

LEHRBUCH
DER PHYSIOLOGIE
DES MENSCHEN

VON

R. HÖBER

Dritte Auflage

LEHRBUCH DER PHYSIOLOGIE DES MENSCHEN

VON

DR. MED. RUDOLF HÖBER

O. Ö. PROFESSOR DER PHYSIOLOGIE UND DIREKTOR DES
PHYSIOLOGISCHEN INSTITUTS DER UNIVERSITÄT KIEL

DRITTE, NEU BEARBEITETE AUFLAGE

MIT 256 TEXTABBILDUNGEN



SPRINGER-VERLAG
BERLIN HEIDELBERG GMBH
1922

ALLE RECHTE, INSBESONDERE DAS DER ÜBERSETZUNG
IN FREMDE SPRACHEN VORBEHALTEN.
© SPRINGER-VERLAG BERLIN HEIDELBERG 1922
URSPRÜNGLICH ERSCIENEN BEI JULIUS SPRINGER IN BERLIN 1922
SOFTCOVER REPRINT OF THE HARDCOVER 3RD EDITION 1922

ISBN 978-3-662-35650-0

ISBN 978-3-662-36480-2 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-36480-2

Vorwort zur ersten Auflage.

Wenn ich zu den zahlreichen Lehrbüchern der Physiologie des Menschen noch ein weiteres hinzufüge, so bedarf es wohl eines Wortes der Rechtfertigung, um so mehr, da die weite Verbreitung mancher der schon vorhandenen Lehrbücher und das immer sich wiederholende Verlangen nach neuen Auflagen Zeugnis von ihrer Güte ablegt.

Aber mir schwebte ein Werk vor, das in mancher Hinsicht anders beschaffen sein sollte, als die, die wir haben. Der Leser sollte in meinem Buch weniger von dem Werkstättenbetrieb der Physiologen spüren, sollte weniger bemerken, wie in mühseliger Kleinarbeit die Erfahrungen aneinander und ineinander gefügt werden, ihm sollten nicht die Fugen des Mosaiks und die klaffenden Lücken in dem Maß auffallen, daß sie vielleicht das Gesamtbild verwirren oder mindestens seinen ästhetischen Eindruck abschwächen. Ich wollte versuchen, mit breiterem Pinselstrich ein Bild der Physiologie zu entwerfen, auf die Gefahr hin, den Näherstehenden zu enttäuschen, weil er manche gewohnt gewordene oder ihm auch besonders wichtig dünkende Einzelheit vermißt. Die Lektüre sollte dadurch weniger der Arbeit einer ermüdenden Fußwanderung gleichen, als einem erfrischenden Ritt durch ein reizvolles Gelände.

Das war der Plan. Daß mir seine Ausführung geglückt ist, erscheint mir selber zweifelhaft, und ich muß es dem Leser anheimstellen, zu entscheiden, ob es ein überflüssiges Beginnen war, den alten Wein wieder einmal in einen neuen Schlauch zu füllen.

Kiel, im Mai 1919.

Rudolf Höber.

Vorwort zur zweiten Auflage.

Äußerlich hat sich die zweite Auflage gegen die erste kaum verändert; bei näherer Prüfung wird man aber mancherlei Umarbeitungen und Zusätze bemerken, die vielfach auf die freundlichen Anregungen und Kritiken von Fachgenossen zurückzuführen sind; hierfür sei an dieser Stelle herzlich gedankt. Daß nach weniger als einem Jahr eine neue Auflage erforderlich geworden ist, erweckt in mir die Hoffnung, daß ich in dem Buch den rechten Ton getroffen habe.

Kiel, im Februar 1920.

Rudolf Höber.

Vorwort zur dritten Auflage.

Ich habe meine Aufgabe bei der Neubearbeitung meines Buches darin erblickt, seinen Inhalt den in unserer Wissenschaft erzielten Fortschritten anzupassen; am Grundplan des Buches, der sich anscheinend bewährt, habe ich wiederum nichts geändert.

Kiel, im September 1922.

Rudolf Höber.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
1. Kapitel. Die Erforschung des Lebendigen	1
Erster Teil.	
Physiologie der vegetativen Funktionen	13
2. Kapitel. Nahrungsaufnahme und Verdauung in der Mundhöhle	13
Nahrungsmittel und Nahrungsstoffe 13. Das Ziel ihrer Verdauung 15. Der Speichel 15. Die Ptyalinwirkung 16. Die Fermente und die Theorie der Fermente 17. Die Arbeit der Speicheldrüsen 19. Die sekretorischen Nerven 21. Speichelreflexe 23.	
3. Kapitel. Das Schlucken und die Verdauung im Magen	25
Die Schluckbewegung 25. Das Schlucken als Reflex 26. Der Magensaft 27. Die Wirkung des Pepsins auf die Eiweißkörper 27. Die Labwirkung 29. Die Lipase 29. Die Absonderung des Magensaftes 30. Salz- und Milchsäure 32. Die Magenbewegungen 33. Das Hungergefühl 35. Das Erbrechen 35. Die Innervation der Magenmuskeln 36. Die Schichtung des Mageninhaltes 37. Die Magenentleerung 38.	
4. Kapitel. Die Verdauung im Dünndarm	39
Der Pankreassaft 39. Chemie der Eiweißkörper 39. Die tryptische Eiweißverdauung 41. Die stereochemische Spezifität der Fermente 42. Die Enterokinase und das Labferment 43. Chemie und Verdauung der Kohlehydrate 43. Verdauung der Fette 43. Die Absonderung des Pankreassaftes 45. Die Zusammensetzung der Galle 46. Die Galle als Verdauungssaft und als Exkret 47. Die Absonderung der Galle 49. Der Darmsaft 51. Die Darmbewegungen und ihre Innervation 52.	
5. Kapitel. Der Dickdarm, die Fäzes und die Defäkation	56
Die Bildung und Zusammensetzung der Fäzes 56. Die Tätigkeit der Darmbakterien 58. Die Bewegungen und die Innervation des Dickdarms 61. Die Defäkation 61.	
6. Kapitel. Die Resorption	63
Osmose und Diffusion 63. Die bei der Resorption beteiligten Kräfte 65. Die Resorption der Hauptnahrungsstoffe 67.	
7. Kapitel. Das Blutplasma	69
Die Zusammensetzung des Blutes 69. Die Blutgerinnung 71. Die Artspezifität der Eiweißkörper und die biologischen Reaktionen 73. Der osmotische Druck des Plasmas 77. Die Bedeutung der Plasmasalze und die physiologische Kochsalzlösung 78. Die Reaktion des Blutes 79.	
8. Kapitel. Die Blutkörperchen und die Blutgase	81
Die weißen Blutkörperchen 81. Die Blutkörperchenzählung 82. Die Funktion der weißen Blutkörperchen 83. Die Blutplättchen 85. Die roten Blutkörperchen; ihre Form und Zahl 85. Die Sedimentierungsgeschwindigkeit 86. Die osmotischen Eigenschaften der roten Blutkörperchen; Hämolyse 86. Das Hämoglobin 88. Die gesamte	

	Seite
Blutmenge 89. Die Blutgase; Gesetze der Gasabsorption; Blutgasanalyse 91. Die Bindung des Sauerstoffs und die Dissoziation des Oxyhämoglobins 93. Die Bindung des Kohlendioxyds 97. Das Kohlenoxydhämoglobin 98.	
9. Kapitel. Die innere und äußere Atmung	99
Die Zusammensetzung von Expirations- und Alveolarluft 100. Die Gasspannungen in der Alveolarluft und im Lungenblut 101. Die innere Atmung 102. Die äußere Thoraxatmung 104. Die Inspiration 105. Die Expiration und der negative Druck im Thorax 106. Die bei der Atmung beförderten Luftmengen 108. Die Atemfrequenz. Die zuführenden Luftwege 109. Husten und Niesen 110. Die Innervation der Atembewegungen; das Atemzentrum 110. Chemische Regulation der Atembewegungen 113. Die Wasserstoffionen als Atemreiz 115. Der Einfluß des Vagus auf die Atmung 116.	
10. Kapitel. Das Herz	119
Anatomie des Herzens: Muskulatur, Reizleitungssystem, Nervensystem 121. Die rhythmische Automatie des Herzens 123. Theorie der Herzstätigkeit 125. Besonderheiten der Reizbarkeit des Herzmuskels 127. Der Spitzenstoß 129. Herzklappen und Herztöne 131. Die Aktionsströme des Herzens und das Elektrokardiogramm 133. Der intrakardiale Druck 134. Die Innervation des Herzens; chronotrope, ino- und bathmotrope Wirkungen 135. Die Schlagfrequenz des Herzens 139.	
11. Kapitel. Die Bewegung des Blutes in den Gefäßen	140
Der Energieverbrauch im Gefäßsystem; Druck und Geschwindigkeit einer strömenden Flüssigkeit 141. Der Einfluß der Elastizität der Wandungen 144. Der Blutdruck in Arterien, Kapillaren und Venen und seine Messung 145. Die Innervation der Blutgefäße 147. Der Gefäßtonus 148. Gefäßreflexe 149. Die funktionelle Gefäßerweiterung 150. Der Plethysmograph 151. Schwankungen des arteriellen Blutdrucks 152. Der Puls 156. Die Füllung des Herzens 159. Die Blutgeschwindigkeit 160. Das Schlagvolumen des Herzens 161. Die Herzarbeit 162. Die Blutumlaufrzeit 162.	
12. Kapitel. Der Stoffwechsel in den Organen.	163
Assimilation und Dissimilation 163. Der Stoffwechsel der Fette 164. Der Stoffwechsel der Eiweißkörper 169. Harnstoff und Kreatinin 174. Der Stoffwechsel der Kohlehydrate 175. Das Zustandekommen der Verbrennungsprozesse 179. Der Purinstoffwechsel 180. Die Lipide 182. Die Vitamine oder akzessorischen Nährstoffe 183.	
13. Kapitel. Die Ernährung	187
Die Methoden der Stoffwechselanalyse und der Messung des Energiewechsels 188. Stoff- und Energiewechsel im Hungerzustand 194. Der Einfluß der Körpergröße und des Lebensalters 195. Der Energiewechsel bei Nahrungszufuhr, die Verdauungsarbeit und die spezifisch-dynamische Wirkung der Eiweißkörper 197. Der Eiweißbedarf 198. Der Nahrungsbedarf bei körperlicher Arbeit 200. Der Wirkungsgrad der Muskelmaschine 202. Die Quelle der Muskelkraft 203. Der Einfluß der geistigen Arbeit 204. Die Ausnützung der Nahrungsmittel 204. Das Vorratsmaß und die Eiweißfrage 207. Der Bedarf bei verschiedener beruflicher Tätigkeit 209. Vegetarische Ernährung 210.	
14. Kapitel. Die Bedeutung der Salze	212
Salzarme Ernährung 212. Die Bedeutung der verschiedenen Ionensorten 213. Das Kochsalz 214. Theorie der Salzwirkungen 215.	
15. Kapitel. Wärme und Licht	218
Die Körpertemperatur 218. Homiothermes und poikilothermes Verhalten 219. Wärmeproduktion und Wärmeabgabe 220. Wärmeregulation durch physikalische und durch chemische Mittel 221. Die Abhängigkeit der Regulation vom Zentralnervensystem 225. Physiologische Wirkungen des Lichtes 229.	

	Seite
16. Kapitel. Lymphbildung und Exkretion des Harns	231
Die Bedeutung und Zusammensetzung der Lymphe 231. Bedingungen der Lymphbildung 232. Die Lymphdrüsen 234. Die Zusammensetzung des Harns 235. Die Bildung des Harns 238. Die Harnentleerung 243.	
17. Kapitel. Ausscheidungen der Haut	246
Der Schweiß 246. Der Talg 247. Die Milch; ihre Zusammensetzung 248. Das Kolostrum 252. Die Bildung der Milch 253.	
18. Kapitel. Die Hormondrüsen	254
Die Nebennieren 255. Die Epithelkörper 261. Die Schilddrüsen 262. Die Hypophyse 268. Das Pankreas 271. Die Thymusdrüse 273. Die Milz 274. Die Keimdrüsen 275.	
19. Kapitel. Fortpflanzung und Wachstum	281
Das Sperma 281. Erektion und Ejakulation 283. Die Eier; Ovulation und Menstruation 284. Befruchtung und Entwicklung des Eies 285. Das Wachstum 288.	
Zweiter Teil.	
Physiologie der animalischen Funktionen	295
20. Kapitel. Die Muskeln	295
Reizungsmethoden 296. Die Muskelzuckung 298. Die Muskelkraft 300. Die Ermüdung 301. Die Muskelströme 303. Der Tetanus 307. Der Tonus 309. Der Stoffwechsel der Muskeln 312. Die Wärmeproduktion 315. Die Leichenstarre 318. Theorie der Muskelkontraktion 318. Das Stehen 320. Das Gehen 322.	
21. Kapitel. Die Nerven	324
Zentrifugale und zentripetale Nerven 324. Das doppelsinnige Leitungsvermögen 325. Die Neurofibrillen als leitende Elemente 326. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erregung im Nerven 327. Reizungsmethoden; der elektrische Reiz 328. Der Aktionsstrom des Nerven; Theorie der bioelektrischen Ströme 332. Der Elektrotonus und das PFLÜGERSCHE Zuckungsgesetz 334. Die Ermüdbarkeit und der Stoffwechsel des Nerven 338.	
22. Kapitel. Das Rückenmark	340
Die Reflexe 340. Die Reflexzeit 344. Die irreziproke Reizleitung 345. Die zentrale Rhythmik 345. Die wechselnde Erregbarkeit 345. Die Summation und die Bahnung 346. Die Reflexhemmung 347. Der Reflextonus 348. Ataxie 349. Die Bedeutung der Ganglienzellen 350. Analyse der Lokomotion 353. Segmentale Wurzelinnervation und segmentale Reflexzentra 355. Das Centrum cilio-spinale 356. Centrum ano-, vesico- und genito-spinale 357. Das BELL-MAGENDRESCHE Gesetz 357. Aufsteigende und absteigende Degeneration 359. Die Leitungsbahnen im Rückenmark 360. Durchschneidungen der Leitungsbahnen 363.	
23. Kapitel. Der Hirnstamm und die Gehirnnerven	365
Die Reflexzentra in der Medulla oblongata 366. Die Pupillenreflexe 367. Die automatischen Zentra des Hirnstammes 369. Die Gehirnnerven 370. Die trophischen Funktionen der Nerven 372. Die Erregungsleitung im Hirnstamm 374. Die Zwangsbewegungen 374. Die Vierhügelregion 374.	
24. Kapitel. Das Großhirn	375
Vergleichende Anatomie des Großhirns 377. Das Verhalten nach Exstirpation des Großhirns 378. Die Lokalisationslehre 384. Die Lokalisation der Motilität im Großhirn 385. Restitutionserscheinungen nach Ausschneiden bestimmter motorischer Rindenzentra 391. Die Lokalisation der Sensibilität 393. Weitere Folgen des Ausschneidens der Zentra 393. Die Sehphäre 395. Die Hörphäre 397. Geruchs- und Geschmackszentrum 398. Primär- und Sekundärzentra	

	Seite
399. Aphasie 399. Apraxie und Agnosie 402. Die Präponderanz der linken Hemisphäre 403. Der Schlaf 405. Der zeitliche Verlauf der Gehirnvorgänge 405.	
25. Kapitel. Das Kleinhirn	408
Der Bau des Kleinhirns 408. Exstirpationsversuche 409. Reizung der Kleinhirnrinde 410.	
26. Kapitel. Das vegetative Nervensystem	412
Das sympathische und das parasympathische Nervensystem 414. Ihr Antagonismus im pharmakologischen Verhalten 415. Zentripetale Leitung im vegetativen Nervensystem 415. Zentrale Erregung des Sympathikus und der Ausdruck der Gemütsbewegungen 416.	
27. Kapitel. Bedeutung und Wesen der Sinnesfunktionen	418
Empfindungsmodalitäten und Empfindungsqualitäten 420. Adäquate Reize und spezifische Dispositionen 421. Das Gesetz von den spezifischen Sinnesenergien 422. Reizschwelle und Unterschiedsschwelle; das WEBERsche Gesetz 424.	
28. Kapitel. Der dioptrische Apparat des Auges	426
Strahlengang im zentrierten optischen System 427. Die Kardinalpunkte des Auges; das reduzierte Auge 428. Die optischen Konstanten des Auges 429. Die Akkommodation des Auges 433. Die Grenzen des Akkommodationsvermögens; die Akkommodationsbreite 438. Die Presbyopie 439. Myopie und Hypermetropie 440. Die Pupillenreaktion 440. Die chromatische Aberration 441. Die sphärische Aberration 442. Der Astigmatismus 442. Die mangelhafte Zentrierung 444. Trübungen in den brechenden Medien 445. Das Augenspiegel 447. Der Augenspiegel 447.	
29. Kapitel. Die Wirkungen der Ätherwellen auf die Netzhaut und die Lichtempfindungen	449
Der blinde Fleck 449. Die PURKINJESCHE Aderfigur 451. Der Sehpurpur 452. Die Wanderung des Netzhauptpigments und die Kontraktion der Zapfennenglieder 453. Die Lichtempfindungen 454. Die Mischung der Farben 457. Die Grundfarben von HELMHOLTZ 460. Die Helligkeiten der Farben und das farblose Spektrum 461. Die Theorie der Gegenfarben von HERING und die Dreikomponentenlehre von YOUNG und HELMHOLTZ 462. Der Simultankontrast 464. Der Sukzessivkontrast 466. Hell- und Dunkeladaptation und die Duplizitätstheorie 468. Die Farbenblindheit 469. Die Verteilung des Farbensinns im normalen Gesichtsfeld 472.	
30. Kapitel. Die räumlichen Gesichtswahrnehmungen	474
Die Sehschärfe 474. Das Augenmaß 476. Geometrisch-optische Täuschungen 477. Das verkehrte Netzhautbild 478. Das Gesichtsfeld 479. Die Augenbewegungen 480. Die identische Sehrichtung 482. Die identischen Netzhauptpunkte und das binokulare Einfachsehen 483. Der Horopter 484. Wettstreit der Sehfelder 485. Monokulare Tiefenwahrnehmung 486. Binokulare Tiefenwahrnehmung 487. Das Stereoskop 490. Die Wahrnehmung von Bewegungen 492.	
31. Kapitel. Der Gehörsinn	496
Klänge, Geräusche und Töne 496. Die Ohrmuschel; Perzeption der Schallrichtung 499. Die Knochenleitung des Schalls 500. Das Trommelfell 500. Die Gehörknöchelchen 501. Die Binnenmuskeln des Ohrs 501. Die Tuba Eustachii 502. Das innere Ohr 503. Die Resonatorenthorie von HELMHOLTZ 504. Die Schallbildertheorie von EWALD 509.	
32. Kapitel. Stimme und Sprache	511
Der Kehlkopf als Pfeife 511. Die Stimmgebung 512. Der Stimmumfang 513. Die Vokale 514. Die Konsonanten 516.	
33. Kapitel. Geschmacks- und Geruchssinn	517
Niedere und höhere Sinne 517. Die Geschmacksqualitäten und die Geschmacksorgane 518. Die Geschmacksreize 519. Die Geruchsqualitäten und die Geruchsorgane 520. Die Geruchsreize 521.	

	Seite
34. Kapitel. Temperatur-, Druck- und Schmerzsinne	524
Der Wärme- und Kältesinn 525. Die Wärme- und Kälteorgane 526. Der Drucksinn 528. Die Drucksinnesorgane 529. Die Simultan- und die Sukzessivschwelle des Drucksinns 531. Der Schmerzsinne; die Schmerzhaftigkeit der inneren Organe 532. Der Schmerzsinne der Haut 534.	
35. Kapitel. Lage- und Bewegungssinne	536
Die Perzeption der Lage und Bewegung einzelner Körperteile 536. Die Perzeption der Lage und Bewegung des ganzen Körpers 538. Dreh- schwindel und galvanischer Schwindel 540. Die Erhaltung des Gleich- gewichts durch die Massenverteilung im Körper 542. Labyrinth- exstirpationen zum Nachweis des statischen Sinns 543. Die Bogen- gangsfunktion 546. Die Statozystenfunktion 549.	
Sachverzeichnis	552

1. Kapitel.

Die Erforschung des Lebendigen.

Die Physiologie des Menschen bildet nur einen kleinen Bezirk in dem weiten Feld der Lehre von den Lebenserscheinungen, aber denjenigen Bezirk, welcher für das Studium der Medizin und für die Ausübung der ärztlichen Tätigkeit naturgemäß weitaus die größte Bedeutung hat. Dennoch soll in diesem Buch, das sich an die werdenden und an die im Beruf stehenden Ärzte richtet, nicht gleich das Hauptthema angeschlagen werden, sondern, da es das Ziel aller physiologischen Forschung ist, das Phänomen des Lebendigen zu erklären, also die unterscheidenden Merkmale aufzusuchen, mit denen sich das Tote vom Lebendigen abgrenzen läßt, so ist es auch dem Standpunkt des Arztes, der der Vernichtung des Lebendigen entgegenarbeitet, angemessen, wenn das Thema der Physiologie zunächst in seiner allgemeinen Fassung erörtert und eine Klarheit darüber angestrebt wird, mit welcher Aussicht auf Erfolg die Analyse der Lebenserscheinungen überhaupt betrieben werden kann.

Es sind Zweifel darüber laut geworden, ob bei dem gegenwärtigen Stand der physiologischen Forschung von einer Lösung ihrer Aufgabe irgend die Rede sein könne. MULDER hat zur Kennzeichnung dieses Standes den lebenden Organismus mit einem Haus verglichen, durch dessen Tor man wohl allerhand Dinge hineintragen, aus dessen Schornstein man den Rauch abziehen und aus dessen Nebenpforten man Abfälle und Schlacken wegtransportieren sieht, während das Interessanteste, das ganze innere Getriebe, dessen Anblick uns erst Zweck und Sinn der äußeren Vorgänge erkennen ließe, unserer Wahrnehmung entzogen ist, und GUSTAV v. BUNGE hat es ausgesprochen, daß, wenn wir die Strömung des Blutes, die Formänderung des Muskels, die Elektrizitätserzeugung durch den erregten Nerven, die Wärmebildung in den Drüsen messen, wir nur Äußerungen der Lebensvorgänge analysieren, nicht aber diese selber, daß alle diese Erscheinungen ebensowenig das Leben seien, wie die Bewegungen der Blätter und Zweige an einem Baum, der vom Sturm gerüttelt wird, oder wie die Bewegung des Blütenstaubes, den der Wind von der männlichen zur weiblichen Pappel hinüberträgt.

Man muß es nun in der Tat einräumen, daß auch heute, mehrere Jahrzehnte, nachdem diese Urteile gefällt wurden, trotz aller großen Fortschritte die errungen sind, und die namentlich auch dem Arzt manche wirkungsreiche Waffe zur Bekämpfung der Krankheiten in die

Hand gaben, *noch keine einzige der fundamentalen Lebensäußerungen völlig durchschaut* ist: wir sind weit entfernt von einer gesicherten Vorstellung von dem Mechanismus der Muskelverkürzung, wir ahnen nicht, was das Prinzip der Nervenleitung ist, wir stehen der Exkretion und der Sekretion ohne rechtes Verständnis gegenüber, die Konstitution der gebräuchlichsten Mittel für den chemischen Betrieb der Zelle, die Konstitution der Fermente, ist uns völlig rätselhaft. Überall ist das Facit bisher ein Ignoramus.

Aber wir können diesen Stand der physiologischen Forschung auch begreifen, ihn sozusagen vor dem Jahrhundert naturwissenschaftlicher Triumphe entschuldigen. Die lebenden Wesen sind Naturerscheinungen, gerade so wie ein Fluß, ein Berg, eine Wolke, und wenn wir irgend einem dieser Gebilde mit dem Anspruch gegenüber treten, es völlig zu begreifen, so werden wir finden, daß es uns an den Fähigkeiten dazu gebricht. Wir sehen eine Wolke in ihrer bestimmten, aber bizarren und unregelmäßigen Form; wir haben wohl die Überzeugung, daß diese ihre gegenwärtige Form die Resultante zahlreicher physikalischer Kräfte von bestimmter Größe, die nach bestimmten Gesetzen wirken, darstellt, aber da die Form von der Temperatur, der Luftbewegung, der Lichtbestrahlung, dem Elektronengehalt der Luft, der Gravitation und noch vielem anderen abhängig ist, so ist es für uns ein Ding der Unmöglichkeit, die Form der einzelnen Wolke zu erklären, d. h. alle bei ihrer Formung angreifenden Kräfte quantitativ zu bestimmen. Nur wenn wir den Wasserdampf, welcher die Wolke bildet, dem Experiment unterwerfen, d. h. wenn wir möglichst alle Bedingungen für seine Formung konstant halten, bis auf eine, die wir allein variieren, nur dann können wir von einer Gesetzmäßigkeit in seiner Erscheinungsweise sprechen. Gerade so ist ein jeder Organismus eine Naturerscheinung, das Produkt zahlreicher Kräfte und darum an sich unanalysierbar, aber der experimentellen Erforschung deshalb noch ganz besonders unzugänglich, weil das Leben im allgemeinen an die *Mikroform* der Zelle gebunden ist, und diese ist ausgestattet mit einer *Mikrostruktur*, die so fein ist, daß wir sie nicht direkt nachweisen können, die wir nur mutmaßen, und die die Zelle fast zu einem *noli me tangere* macht, da wir bei jedem experimentellen Eingriff in die Zelle Gefahr laufen, das Leben zu zerstören. Hinzukommt ein überaus kompliziertes chemisches Verhalten im Innern dieser Mikrostruktur, das sich ebenso in der Größe und Vielgliedrigkeit der wichtigsten Molekülarten als auch in der Mannigfaltigkeit der zahlreichen gleichzeitig verlaufenden und ineinander spielenden Reaktionen äußert.

Angesichts dieser offenbaren Schwierigkeiten, welche sich demjenigen entgegentürmen, der sich die Erforschung der Lebensvorgänge zum Ziele gesetzt hat, ist es eigentlich begreiflich genug, wenn sämtliche von der Physik und Chemie in den letzten hundert Jahren zur Verfügung gestellten feinen Forschungsmittel die Physiologie nicht weiter gefördert haben als bisher. Trotzdem gibt es manche, welche jetzt schon sagen, daß die Gesetze der Physik und Chemie, welche im Reich des Anorganischen walten, nicht die einzigen sein können, welche die Vorgänge in der lebenden Substanz dirigieren, daß das *Leben vielmehr einer ganz anderen Kategorie von Erscheinungen angehört* und grundsätzlich in anderer Weise für die Forschung erschließbar sei als eine Wolke oder ein Gebirge; es komme noch ein spezifisches Unbegreifliches hinzu, eine „Lebenskraft“, eine „anima inscia“, ein „spiritus rector“, der kräfte-

entwickelnd oder kräfte richtend in das Walten der anorganischen Kräfte eingreife. Fragen wir, worauf sich diese Ansicht hauptsächlich gründet!

Um das zu verstehen, müssen wir zunächst versuchen, das Lebendige zu definieren, das *gemeinsam Unterscheidende* aufzufinden, durch das sich das Lebende gegen das Tote abgrenzen läßt, also **Kriterien des Lebens** zu finden.

Das Leben ist durchweg an eine Substanz von bestimmter chemischer Beschaffenheit gebunden. Sie wird als *Protoplasma* bezeichnet. Daß das Protoplasma freilich im ganzen Träger des Lebens ist, wird oft bestritten. Es ist auch gewiß nicht zweifelhaft, daß manche seiner geformten Einschlüsse, wie Stärkekörner, Ölkugeln, Kristalle von Eiweiß, von Oxalat und dergleichen durchaus nicht als belebt gelten können. Aber genauer im Protoplasma abzugrenzen, wo das Leblose aufhört, und wo das Lebendige anfängt, ist unmöglich. Jedenfalls ist das Wesentliche eine Summe von „organischen“ Verbindungen, wie *Eiweiß*, *Lezithin*, *Kohlehydrat* u. a.; denn wir kennen keine lebende Substanz, in welcher diese nicht anwesend wären. Nun wissen wir aber seit langem, daß die Bildung der organischen Verbindungen keine Domäne der Lebewesen ist, sondern daß auch im Reagenzglas die Bildungsbedingungen künstlich erzeugt werden können. Zwar ist es dem Chemiker noch lange nicht gelungen, alle in den Organismen vorkommenden Verbindungen auch synthetisch herzustellen, vor allen Dingen nicht die niemals fehlenden *Eiweißkörper* und die ebenfalls niemals fehlenden *Fermente*; dennoch kann man wohl sagen, daß es bei den gewaltigen Fortschritten, welche die organische Chemie im Laufe der letzten 50 Jahre gemacht hat, nur eine Frage der Zeit ist, daß auch diese Ziele erreicht werden; so ist ja wenigstens der Bauplan des Eiweißmoleküls schon einigermaßen enthüllt und etwas Eiweißähnliches schon künstlich hergestellt. Jedenfalls kann die Existenz der für das Protoplasma charakteristischen Verbindungen schon heute nicht mehr die Aufrichtung einer Schranke zwischen dem Anorganischen und dem Organischen rechtfertigen, welche mit den Mitteln der Physik und der Chemie nicht zu übersteigen wäre. Aber selbst wenn es heute den Anschein hätte, als könnte man der Schwierigkeiten der Synthese des Eiweißes, der Fermente u. a. niemals Herr werden, so würde man doch nicht behaupten können, daß deshalb das Leben ein spezifisch unbegreifliches Phänomen ist; denn ein einzelner Eiweißkörper oder ein einzelnes Ferment lebt ebensowenig wie Zucker oder Fett oder Lezithin. Man hat zwar öfter das Mysterium der lebendigen Substanz auf den Hauptzeugen ihrer chemischen Eigenart übertragen und von „lebendem Eiweiß“ gesprochen, aber ohne jeden zureichenden Grund.

Etwas anderes ist es, wenn wir die Frage aufwerfen, wie aus der Mischung aller charakteristischen organischen Stoffe mit den anorganischen Verbindungen und dem Wasser Leben hervorgehen kann. Aus dieser Mischung resultiert nämlich *eine Kette chemischer Umsetzungen, welche, solange das Leben besteht, niemals abreißt.* Sie wird durch einen besonderen Namen zu einem wichtigen Kriterium des Lebens gestempelt, nämlich als **Stoffwechsel** bezeichnet. Jeder lebende Organismus steht mit seiner Umgebung in Austausch, er nimmt gewisse Stoffe als Nahrung auf und gibt andere als seine Ausscheidungen ab; dazu vollziehen sich Umsetzungen im Innern. Aber die Kontinuität der chemischen Reaktionen genügt nicht zur Definition des Stoffwechselbegriffs. Wenn die

Kohlensäure der Luft ein Kalkgebirge in Jahrtausenden fortgesetzt zerfrißt, so ist das kein Stoffwechsel. Der chemische Umsatz im Organismus ist im allgemeinen dadurch gekennzeichnet, daß trotz seiner Kontinuität die lebende Substanz sich nicht aufzehrt, sondern für das, was verbraucht und zerstört wird, wird entweder durch Nachlieferung von Nahrung oder durch Synthese — z. B. durch Synthese von Kohlehydrat aus Kohlensäure und Wasser bei den grünen Pflanzen —, Ersatz geschaffen, und geschieht der Verbrauch der lebenden Substanz in zeitlich wechselndem Maß, so paßt sich die Nachlieferung dem an, wie auch umgekehrt Schwankungen in der Nachlieferung durch Regelung der Zersetzungen kompensiert werden. So wird bei vielen Tieren im Winter, wenn die Nahrung knapp wird, der Verbrauch von Körpermaterialien automatisch gebremst, und andererseits weckt ein gesteigerter Zerfall von lebender Substanz, etwa infolge von Arbeit, das Bedürfnis nach Nahrung. Das Ergebnis ist daher ein stoffliches Gleichgewicht; das heißt aber nicht ein stabiles Gleichgewicht, bei welchem die Konstanz des Zustandes auf der Ruhe der Teile basiert, sondern ein *stationäres Gleichgewicht* infolge von Bewegung des Stoffes, welcher die lebende Substanz mit einer im Mittel konstanten Geschwindigkeit passiert, die das Bestehen *selbstregulatorischer Einrichtungen* zur Voraussetzung hat.

Ist nun, in diesem Sinne verstanden, der Stoffwechsel etwas spezifisch Vitales, analogielos und unbegreiflich? Wir wollen die Frage beantworten, indem wir die wesentlichen Einzelheiten hervorkehren.

Was zunächst den *Verbrauch der Protoplasmabestandteile* anlangt, so konnte es bis vor wenigen Jahrzehnten noch als etwas Wunderbares erscheinen, daß Substanzen wie Stärke, Fett, Eiweiß u. a., welche an sich einen durchaus beständigen Charakter haben, innerhalb des Protoplasmas mit Leichtigkeit zerfallen. Indessen weiß man jetzt, daß diese Zersetzlichkeit von der Gegenwart der Fermente herrührt, welche nach Analogie der anorganischen Katalysatoren die Reaktionsfähigkeit vermehren.

Die Kehrseite des Zerfalls im Stoffwechsel, die *Synthese*, kann gleichfalls nicht als ein Reservat der Lebewesen angesehen werden. Jede chemische Reaktion ist natürlich in gewissem Sinn eine Synthese insofern, als das Verschwinden der Reaktionskomponenten mit dem Auftreten neuer Verbindungen Hand in Hand geht. Gemeint ist hier aber nur die Neubildung, welche unfreiwillig, d. h. unter dem Aufwand von Energie zustandekommt. Das Prototyp für solche im Stoffwechsel des lebenden Wesens zustandekommenden Synthesen ist die Photosynthese der Kohlehydrate in den grünen Pflanzen. In der Tat muß man sagen, daß das Reich der Organismen gegenüber dem Reich des Anorganischen durch das Vorkommen solcher aufbauenden Prozesse, die zur Bildung von Molekülen mit komplizierter Struktur führen, ausgezeichnet ist, insbesondere das Reich der Pflanzen, in deren Körper Kohlehydrate, Eiweißkörper und Fette, Harze, Alkaloide, Farbstoffe und vieles andere aus einfachen Stoffen, zum Teil aus den Elementen unter Energieverbrauch erzeugt werden. Aber analogielos ist auch dies keineswegs. Nicht bloß, daß der Chemiker auch künstlich alle die Bedingungen für die Synthese der komplizierten organischen Verbindungen herzustellen vermag; auch speziell für die Synthese der Kohlehydrate unter Aufwand von strahlender Energie gibt es Analoga, etwa in der Umwandlung von Anthrazen in Dianthrazen unter der Wirkung des Lichts, während im

Dunkeln freiwillig der Wiederzerfall des Dianthrazens in Anthrazen zustandekommt.

Die **selbstregulatorischen Einrichtungen**, welche im Stoffwechsel Verbrauch und Nachlieferung regeln, sind außerordentlich zahlreich und sind die Ursache dafür, daß sich die Organismen in so auffälliger Weise gegenüber den Kräften der Außenwelt zu behaupten vermögen. Als Beispiel für ein höheres Tier sei etwa die Situation gewählt, bei der infolge einer zu hohen Außentemperatur das Tier Gefahr läuft, übererwärmt zu werden und an der zu hohen Innentemperatur zugrunde zu gehen. Selbstregulatorisch schützt sich das Tier alsbald dagegen, indem es durch Hineintreiben von warmem Blut in die Haut das Temperaturgefälle in die Umgebung steiler macht, indem es die Wärmeproduktion in den Muskeln und großen Drüsen einschränkt und ähnliches. Aber hierin gleicht das Tier doch wieder einigermaßen einem Anorganismus, wie es eine Maschine ist, welche die Überhitzung und damit Überspannung des Dampfes in ihrem Kessel selbstregulatorisch mit der Öffnung eines Ventils beantwortet, durch das der Wärme- und Spannungsüberschuß entlassen wird.

Diesem mehr energetischen Beispiel von Selbstregulation lassen sich aber auch solche an die Seite stellen, in welchen die stoffliche Seite der Kompensation von Verbrauch und Nachlieferung mehr in den Vordergrund tritt. Wenn etwa ein Muskel zur Leistung von Arbeit sein Depot von Kohlehydrat aufzehrt, dann wird automatisch das in der Leber abgelagerte Kohlehydrat mobilisiert und dem Muskel als Brennmaterial nachgeliefert. Aber in vergleichbarer Weise regeln sich, wie schon LIONARDO bemerkte, Verbrauch und Nachlieferung auch in der Flamme einer brennenden Kerze. Indem im oberen Ende des Doctes das geschmolzene Stearin verbrennt, wird von unten her weiteres verflüssigtes Stearin in die Kapillaren des Doctes nachgesogen. Zündet man die Kerze an, so verbrennt zunächst bloß das Stearin im Docht, dann wird die Flamme durch Aufbrauch des Stearins kleiner und kleiner und nähert sich dem unteren Dochtende, dort schmilzt sie neues Stearin, und so wird selbstregulatorisch die „ausgehungerte“ Flamme genährt und vergrößert sich wieder. Dies Spiel wiederholt sich in kleinerem Maßstab bei jeder weiteren Störung einer Verbrennung.

Daß dem *stofflichen stationären Gleichgewicht* ein energetisches stationäres Gleichgewicht entspricht, wurde bereits bemerkt. Für dies letztere hat EML DU BOIS-REYMOND einen eigenen Ausdruck, *dynamisches Gleichgewicht*, geprägt, um damit ein besonderes Kriterium des Lebens hervorzuheben, nämlich die Tatsache, daß ein stationärer Strom von Energie durch den Organismus hindurchgeht. Es ist nicht ganz ersichtlich, zu welchem Zweck Stoff und Energie im Innern des Protoplasmas fortwährend wechseln. Zum Teil ist der Grund hierfür, daß fast unausgesetzt Arbeiten geleistet werden müssen, um Eingriffe von seiten der Außenwelt rückgängig zu machen und um zur Außenwelt Stellung zu nehmen. Ferner sind wohl zwecks Aufnahme von Stoff, Verteilung im Zellinnern und Abscheidung nach außen osmotische Arbeiten zu leisten. Zudem muß beim höheren Tier ein Strom von Energie in Gestalt von Wärme den Körper durchsetzen, damit die Temperatur auf einer gewissen Höhe erhalten werden kann. Nur beiläufig sei daran erinnert, daß die organischen Bedingungen für diesen temperaturerhaltenden Wärmestrom in jeder Konstruktion eines Thermoregulators ihr anorganisches Analogon haben.

Übrigens sei gleich hier bei der Erwähnung der energetischen Vorgänge im Organismus auch hinzugefügt, daß das Gesetz von der Erhaltung der Energie, der *erste Hauptsatz* der Thermodynamik, so weit man das bei der Schwierigkeit der Untersuchung beurteilen kann, auch für den Organismus zu Recht besteht.

Ebenso ist an der Gültigkeit des *zweiten Hauptsatzes* (von der begrenzten Arbeitsfähigkeit eines Energiesystems) für den Organismus wohl kaum zu zweifeln.

Wenn nun auch insoweit qualitativ eine Ähnlichkeit zwischen den verschiedenen Charakteristiken des Stoffwechsels und gewissen anorganischen Vorgängen festzustellen ist, so sind im einzelnen, namentlich was die Selbstregulationen anlangt, die quantitativen Unterschiede doch so groß, daß man zweifeln muß, ob von einer brauchbaren Analogie, die auf Erklärungswert Anspruch hat, überhaupt noch die Rede sein kann. Zu solchen Vorgängen gehören vor allem manche *Regenerationen*. Tötet man z. B. bei einem Seeigeli im Zweizellen-Stadium die eine Blastomere, so entwickelt sich die andere doch zu einer vollständigen, nur kleineren Pluteuslarve. Aber viel merkwürdiger noch sind die Regenerationen bei ausgewachsenen Tieren. Schneidet man z. B. aus dem Leib einer Planarie durch zwei Querschnitte einen Streifen heraus, so sproßt aus dessen vorderer Schnittfläche ein neuer Kopf hervor mit Nervensystem, Augen, Darmkanal und anderen Organen, während aus der hinteren Fläche ein Schwanz auswächst, so daß ein neues verkleinertes Tier entsteht. Oder überläßt man ein nach Lage und Größe beliebiges Teilstück einer Aszidie von der Gattung *Clavellina* sich selbst, so regeneriert daraus eine typische kleine Aszidie mit Kiemenkorb, Eingeweidesack, Einströmungs- und Ausströmungsöffnung. Höchst wunderbar ist auch die Regeneration der Linse bei Triton; während normalerweise die Linse bei der Embryonalentwicklung vom Hornhautepithel aus gebildet wird, wuchert nach ihrer Entfernung eine neue Linse aus einem ganz anderen Ort heraus, nämlich aus dem oberen Rand der Iris. Einer anderen Kategorie von Regulationen gehört die *Antikörperbildung* an. Spritzt man z. B. einem Hund Gänseblut in seine Blutbahn, so reagiert er auf diese Fremdschubstanz mit der Produktion von „Antikörpern“, welche ganz spezifisch dazu befähigt sind, das Fremdblut zu beseitigen, sei es durch Bindung und Ausfällung der Eiweißkörper, sei es durch Verklumpung und Auflösung der Blutkörperchen, welche von der Gans herkommen. Diese und ähnliche Selbsthilfen machen besonders deshalb den Eindruck des Unbegreiflichen und mit den anorganischen Vorgängen Unvergleichlichen, weil sie unter außerordentlichen Bedingungen zustandekommen und dadurch den Eindruck einer unbedingten Zweckmäßigkeit in der Reaktionsfähigkeit der lebendigen Substanz hervorrufen.

In der Tat fehlt es auch an einleuchtenden Erklärungen hierfür. Und dennoch müssen wir wohl, bevor wir daraufhin das Walten spezifisch vitaler Kräfte postulieren, uns klar machen, daß wir von den Vorgängen im Innern des Protoplasmas, die hierbei hauptsächlich maßgebend sind, noch ungeheuer wenig wissen. Gerade für die Regeneration kommt es zweifellos auf die anerbten Dispositionen und Strukturen an. Das Vorhandensein von Protoplasmastrukturen können wir aber, wie schon einmal gesagt wurde, bisher nur mutmaßen, z. B. darauf hin, daß das Protoplasma, auch wenn es ziemlich homogen aussieht, doch ebenso wenig verträgt, durcheinander gerieben zu werden, wie ein Uhrwerk einen zertrümmernden Schlag verträgt, wobei da wie dort die chemischen Bestandteile durch den Schlag nicht verändert werden. Und von den sicherlich strukturellen Eigenarten, welche die Basis für die Erbscheinungen bilden, haben wir ebenfalls noch so gut wie gar keine Kenntnis. Aus diesen Gründen ist es wohl angemessen, die auffallenden Erschei-

nungen als Fragestellungen aufzufassen, statt Skepsis und Resignation aus ihnen herzuleiten, um so mehr, als die Forschung erst in der Neuzeit sich in diesen Richtungen bewegt hat. Zudem lehren etwa für das Beispiel der Regeneration der Tritonlinse neuere Studien (siehe am Schluß von Kapitel 18), daß man doch wohl zu einem besseren Verständnis derselben vordringen kann; die vorher genannte Clavellina-Regeneration verliert an Mystik durch die neuerliche Feststellung, daß in dem regenerierenden Teilstück fast alle Zellen zugrunde gehen bis auf wenige zerstreut liegende Zellen, die einen embryonalen Charakter, also wohl auch embryonale Potenzen bewahrt haben, und von denen allein die Neubildung ausgeht. Und wenn es auch nur eine vage Analogie ist, so ist das Phänomen, daß ein Kristall eine abgebrochene Ecke aus seiner Mutterlauge regeneriert, daß ein zerbrochener Hämoglobinkristall sich sogar durch bloße Verschiebungen in seiner halbfesten Substanz zu einem vollständigen nur kleineren Kristall umformt, doch vielleicht nicht bloß äußerlich mit den geschilderten regenerativen Neubildungen verwandt.

Zu den weiteren Kriterien des Lebens gehört neben der chemischen Zusammensetzung und den im Stoffwechsel sich äußernden chemischen Umsetzungen auch diejenige **physiko-chemische Beschaffenheit** der lebenden Substanz, welche ihre eigenartige Konsistenz, ihren — wie man es genannt hat — *festflüssigen Aggregatzustand* bedingt. Dieser rührt von den *Kolloiden* her, welche ähnlich, wie der Leim, der ihnen den Namen gegeben hat, in Wasser aufquellen und Gallerten bilden, deren Widerstand gegen Formänderungen zwischen dem des festen und dem des flüssigen Aggregatzustandes die Mitte hält. Die „Biokolloide“ gehören im wesentlichen den chemischen Gruppen der Eiweißkörper, der Kohlehydrate und der Lecithine an. Sie sind aber keineswegs ein Sonderzeichen des Lebendigen. Ein Beweis dafür ist etwa der Irrtum des Bathybius Haeckelii, dieser gallertigen Masse, die, vom Boden der Tiefsee heraufgebracht, anfänglich für ein einfachstes in der Organisation noch unter den Amöben stehendes Wesen gehalten wurde, bis man feststellte, daß der zähe Schleim in der Hauptsache aus kolloidalen Erdalkalisalzen besteht. Die Konsistenz einer festeren oder weicheren Gallerte kommt in der Tat aller lebenden Substanz zu. Deshalb spielen auch in all den vielfältigen Versuchen, einfachste Lebewesen mit künstlichen Mitteln zu imitieren, Kolloide eine wichtige Rolle.

Die Bedeutung des kolloidalen Zustandes ist darin zu erblicken, daß durch ihn das Protoplasma eine Form erhält, nicht bloß eine *äußere Körperform*, sondern auch eine *innere Struktur*. Zugleich besitzt die formgebende Substanz die Eigenschaft, ähnlich wie eine Flüssigkeit, wie ein Lösungsmittel, im Gegensatz zu den festen Körpern, das Spiel chemischer Reaktionen zu erlauben und einen Formenwechsel zu ermöglichen, was mit dem festen Aggregatzustand unverträglich wäre.

Die Organismenwelt ist ja vor der Welt des Anorganischen ganz auffallend durch die Vielfältigkeit ihrer sich immer wiederholenden Formen, der Formen der Bäume und Kräuter, der Schmetterlinge, der Fische, der Vierfüßler, ausgezeichnet. Zwar fehlen auch im Anorganischen die bestimmten stets wiederkehrenden Formen nicht völlig, wir finden sie in den Kristallen; aber das Ungeformte überwiegt doch bei weitem. Beim Kristall ist die gesetzmäßige Form das Ergebnis bestimmter gerichteter Affinitäten der Atome. Worauf beim Organismus die Form beruht,

wissen wir nicht; vielleicht beruht sie auf der Form der Ultramikronen, der kleinsten Kolloidpartikeln, welche, von Art zu Art mehr oder weniger verschieden, ineinander geschachtelt die Strukturbestandteile der Organismen aufbauen. Doch das ist nicht mehr, als eine Vermutung.

Man hat den Vergleich der organischen Form mit der Kristallform öfter gescheut, weil der Kristall ein stabiles Gleichgewicht, der Organismus dagegen ein stationäres Gleichgewicht darstellt. Deshalb wurde der Vergleich mit einem Wasserfall oder einem Springbrunnen vorgezogen, weil bei diesen, trotz der Konstanz der Form, ein lebhafter Wechsel des Stoffes stattfindet. Noch brauchbarer wäre das Bild einer Flamme, in deren Innern sich chemische Prozesse vollziehen. Aber gegen alle diese Modelle spricht das, daß bei ihnen die Form und der Wechsel des Stoffes untrennbar sind; mit dem Aufhören des Stoffstroms verschwindet auch die Form, während der Tod bei den Organismen den Stoffwechsel, den Chemismus völlig umändert und zum Teil zum Stillstand bringt, ohne daß die Form davon zunächst mitbetroffen wird.

Mit dem Formwechsel einerseits, mit dem Stoffwechsel und besonders mit den regenerativen Vorgängen andererseits sind äußerlich und innerlich **Fortpflanzung, Wachstum und Entwicklung** verwandt, — Erscheinungen, welche die belebte von der unbelebten Materie in besonders augenfälliger Weise unterscheiden. Es mag hier darauf verzichtet werden, auf die vielfachen Analogien zwischen der Fortpflanzung durch Teilung und dem Zerfall von Flüssigkeiten in Tropfen unter verschiedenen Bedingungen, zwischen dem Wachstum des Organismus und dem appositionellen Wachstum der Kristalle, dem osmotischen „Wachstum“ innerhalb von semipermeablen Membranen und dergleichen näher einzugehen. Auf alle Fälle sind ja die genannten organischen Phänomene etwas viel Komplizierteres und im einzelnen noch höchst rätselhaft. Aber Physiologie und Entwicklungsmechanik sind ja auch bis in die neuere Zeit noch meist an ihnen vorbeigegangen.

Unter Entwicklung versteht man nicht bloß die *Individualentwicklung*, die Ontogenie, sondern auch die *Stammesentwicklung* oder Phylogenie. Daß eine derartige Entwicklung stattgefunden hat, bezweifelt heute niemand; die Paläontologie bringt dafür schlagende Beweise in den Petrefakten; hinzukommen die stammesgeschichtlichen Reminiszenzen, welche bei der Individualentwicklung in gewissen Embryonalanlagen, wie den Kiemenbögen, dem Herzschlauch, den Aortenbögen auftauchen. So gilt es als sicher, daß die Lebewesen sich von den einfachsten Formen bis zu den kompliziertesten allmählich entwickelt haben. Es ist im Grunde genommen eine Frage der Physiologie, welche Kräfte dies zuwege gebracht haben. Man glaubte jahrzehntelang fast allgemein die Erklärung dafür in DARWINS Prinzip von der natürlichen Auslese im Kampf ums Dasein, in dem Prinzip von dem Überleben des Passendsten gefunden zu haben. Aber heute hat man erkannt, daß, selbst wenn der Kampf ums Dasein sich in dem Umfang abspielte, wie es die Darwinisten angenommen haben, nach wie vor das große Rätsel zu lösen bliebe, wie eigentlich die fortgeschritteneren „passenden“ Varianten immer von neuem entstehen. Die Vervollkommnung, und zwar die Vervollkommnung nicht bloß in einem einzelnen Organ, sondern die gleichzeitige harmonische „korrelative“ Abänderung in verschiedenen funktionell zusammengehörigen Organen, die notwendig ist, wenn eine bessere Anpassung an die Umgebungsbedingungen resultieren soll, setzt

innere Entwicklungsgesetze voraus, die uns noch unbekannt sind. Wir kennen wohl äußere Einflüsse, welche bei allen möglichen Organismen bleibende und sogar erbbeständige Umbildungen hervorrufen können, — Schmetterlingen kann z. B. durch hohe oder durch niedere Temperatur eine andere Farbe aufgeprägt werden, so daß die Variation sich über Generationen vererbt, Heferassen können durch hohe Temperatur dauernd die Fähigkeit verlieren, Sporen zu bilden — und an solchem veränderten Material könnte vielleicht der Kampf ums Dasein auslesend im Sinne besserer Anpassung wirken. Aber wie die äußeren Faktoren die innere Umprägung, besonders die Umprägung im Sinne einer allgemeinen Vervollkommnung bewirken, das wissen wir, wie gesagt, nicht. Freilich ist selbst solch eine organische Entwicklung nicht völlig ohne Analogie im Anorganischen; die Kosmogonie, etwa nach der Hypothese von KANT und LAPLACE, ist solch ein Beispiel für eine anorganische Entwicklung. Aber zu einem Verständnis für die Entwicklung der Organismen hilft uns dieser Vergleich in keiner Weise.

Wir wenden uns bei der Aufzählung von Kriterien des Lebens an letzter Stelle zu der **Beseeltheit**, welche die Lebewesen vor den anorganischen Gebilden auszeichnet — oder auszeichnen soll. Denn wir müssen dies Kriterium alsbald beanstanden, sobald wir uns die Frage vorlegen, woher das Urteil, daß die Lebewesen durch seelische Regungen ausgezeichnet sind, stammt. Zunächst kennen wir das Seelische nur aus uns selber; wenn ein Licht in unser Auge fällt, oder wenn wir uns stoßen, so empfinden wir das Licht und den Stoß. Wenn wir dagegen Empfindungen und Gefühle in andere Wesen hineinlegen, so ist das nur ein Analogieschluß, den wir ziehen, weil wir die anderen Wesen sich ähnlich verhalten sehen, wenn sie ein Reiz trifft, wie wir es tun. Ein Mitmensch lauscht wie ich auf einen Ton, ein Hund heult, wenn er einen Schlag erhält, ein Wurm windet sich, wenn er verletzt wird. Aber Analogieschlüsse können trügen. Schon das Mienenspiel eines Mitmenschen können wir mißdeuten; ein Anencephalus, d. h. eine menschliche Mißgeburt ohne Gehirn, verzerrt das Gesicht wie vor Ekel, wenn Chinin auf seine Zunge gebracht wird, und schreit, wie vor Hunger, wenn er lange nichts zu trinken bekommen hat; bei einem Regenwurm, den man in der Mitte durchschneidet, krümmt sich am auffallendsten der hintere Teil, als ob die schmerzempfindende Seele nur dort säße; die Ameisen, die weit von ihrem Bau fortkriechen und sich nicht verirren, sondern wieder heimfinden, und die über Angehörige aus einem anderen Bau, denen sie draußen begegnen, herfallen, während sie die Mitinsassen des eigenen Baus ungeschoren lassen, erwecken den Eindruck, als besäßen sie eine außerordentliche Ortskundigkeit und ein großes Personalgedächtnis, und doch sind sie nur von sehr einfachen Geruchseindrücken, auf die sie reflektorisch antworten, beherrscht; das Infusor scheint seelischen Regungen zu folgen, wenn es unberechenbar „willkürlich“ bald hierhin, bald dorthin steuert. Aber verfährt man in dieser Weise, dann kann man all und jedes beseelen; der Hund, welcher die Peitsche flieht, handelt dann gerade so aus egozentrischen Trieben, wie die Pflanze, deren Wurzel sich vom Licht abkehrt und in den Boden strebt, und wie die Erde, die kreisend den von der Schwerkraft erstrebten Sturz in den glühenden Sonnenball vermeidet. Wir enden im Panpsychismus; der gehobene und losgelassene Stein „sucht“ dann die Erde, die Spitze der Magnethedel „flieht“ dann den Nordpol und „strebt“ zum Südpol, „Liebe“ und „Haß“,

„Eros“ und „Polemos“ treiben dann die Atome zueinander hin und voneinander fort.

Wir vermögen also keine Angaben darüber zu machen, wann und wo das Psychische in der Welt zuerst in primitivsten Regungen auftritt. Aber für die Erforschung der Lebensvorgänge ist das auch völlig gleichgültig; denn welchen erkenntnistheoretischen Standpunkt wir auch immer einnehmen, mögen wir der Welt als naive Realisten und Dualisten gegenüber treten und der Welt der Körper das seelische Ich entgegenstellen, oder mögen wir als Idealisten die Welt, wie wir sie auffassen, als die Schöpfung unserer Sinne erkennen, — für die Physiologie kommt es auf das gleiche hinaus. So werden uns die unverständlichen, weil unberechenbaren Bewegungen des Infusors, das unter anscheinend homogenen Umgebungsbedingungen jetzt in dieser, gleich darauf in jener Richtung schwimmt, nicht im geringsten verständlicher, wenn wir in das Infusor seelische Stimmungen hineinlegen; wir versperren uns höchstens damit den Weg zur Erkenntnis. Denn beim näheren Zusehen erscheint es geradezu unerlaubt, behaupten zu wollen, daß in der unmittelbaren Umgebung des Infusors gar keine richtenden Unterschiede vorhanden wären, ganz abgesehen davon, daß auch lokale Veränderungen im Innern den Anreiz zur Bewegung abgeben können. Bei solcher Art von Tierpsychologie kehrten wir auf den primitiven Standpunkt des Naturerkennens zurück, auf dem der Mensch den Donner durch den Jupiter tonans, den Umlauf der Sonne durch die Fahrt des Sonnengottes erklärte. Und selbst wenn es später einmal glücken sollte, genau diejenigen physikalischen und chemischen Vorgänge im Gehirn festzustellen, welche mit bestimmten seelischen Prozessen einhergehen, so würde uns von dem gewöhnlich eingenommenen realistischen Standpunkt aus der Gegensatz zwischen Materie und Psyche gerade so unüberbrückbar vorkommen, wie vorher. —

Blicken wir auf unseren Versuch, den Begriff des Lebendigen anschaulich zu machen, zurück! Wir stellen fest, daß zur Charakteristik der belebten Substanz eine besondere chemische und physiko-chemische Beschaffenheit gehört, ferner ein besonderer als Stoffwechsel bezeichneter chemischer Umsatz, die Fähigkeit der Selbstregulation gegenüber äußeren Kräften, die Eigenart der Form und die Fähigkeit des Formenwechsels, die Fähigkeit der Fortpflanzung, des Wachstums und der Entwicklung. In dieser Kombination von Eigenschaften ist das Lebendige unzweifelhaft vom Toten und Anorganischen unterschieden, es stellt sich als *eine ganz besondere, sonst nirgends vorkommende Konstellation von Stoffen und Kräften* dar. Haben nun aber deshalb diejenigen recht, welche behaupten, daß die Physiologen, solange sie allein die Gesetze der Physik und der Chemie als „Hebel und Schrauben“ anwenden, niemals zu der Klarheit der exakten Naturwissenschaften vordringen können, daß nur die Anwendung ganz besonderer Erklärungsprinzipien die Lösung des Lebensrätsels bringen kann?

Es kann gewiß keinem Zweifel unterliegen, daß das Ziel der physiologischen Forschung noch unendlich fern ist, ja daß wir sogar erst an den Anfängen der Erkenntnis stehen, daß noch kaum eine physiologische Aufgabe sich ohne Rest hat lösen lassen. Wohl wird man Fortschritte in unserer Kenntnis von der chemischen Beschaffenheit und vom Stoffwechsel anerkennen müssen; demgegenüber müssen wir uns jedoch bei der Betrachtung der organischen Regulationen, des Form-

wechsels, der Fortpflanzung, des Wachstums, der Entwicklung vorläufig mit recht vagen Analogien im Anorganischen zufrieden geben. Auch wurde schon hervorgehoben, daß wichtige Organfunktionen des höheren Tiers, auf dessen Erforschung Mühe und Scharfsinn in besonders reichem Maß aufgewendet wurden, daß die Kontraktilität des Muskels, die sekretorischen Leistungen der Drüsen, die Nervenleitung und anderes noch fast unanalysierbar sind. Dennoch ist es gewiß verfrüht, das Ignoramus mit einem Ignorabimus zu übertrumpfen. So verkehrt es uns vorkommt, wenn der Angehörige einer primitiven Rasse einem ihm gänzlich unverständlichen Wunderwerk der Technik eine besondere unbegreifliche Kraft beilegt, ebenso falsch ist es, wenn man in einer Zeit, in der die besten Köpfe eben erst an der Arbeit sind, mit allen nur irgend erreichbaren Werkzeugen der Wissenschaft die Gebäude der Physik und der Chemie zu fundamentieren, beim Studium des kompliziertesten aller Naturvorgänge einen Deus ex machina an den Anfang der Forschung postiert. Stellen wir heute schon die These auf, daß die Gesetze, welche in der anorganischen Welt herrschen, nicht ausreichen, das Phänomen des Lebens zu erklären, dann schädigen wir den Forscherenthusiasmus. Denn Physik und Chemie sind diejenigen Naturwissenschaften, welchen wir fast ausschließlich die bisherigen Errungenschaften der Physiologie zu danken haben. Dagegen sind die Lebenskräfte, die man uns nicht außer acht lassen heißt, um das Leben verstehen zu lernen, bisher noch niemals nachgewiesen worden.

Wenden wir uns nun unserer speziellen Aufgabe, der *Physiologie des Menschen*, zu! Sie ist auf alle Fälle das interessanteste und wichtigste Kapitel der ganzen Physiologie, mag man sie vom Standpunkt des Arztes, des Philosophen, des Naturforschers oder des Nationalökonomen betrachten. Sie ist auch die Wurzel aller Physiologie; denn beim Menschen hat die Physiologie angefangen, wie überhaupt alle und jede Wissenschaft eine anthropozentrische Basis hat. Es ist der uralte Kampf, den die Menschheit gegen die andringenden Kräfte der Natur führt, der ihm unter dem Zuruf: „tua res agitur“ Hebel und Schrauben, Reagenzglas und Sezierschere geschaffen und in die Hand gedrückt hat, es ist die Not, die ihn immer wieder von neuem zugleich zum Objekt und zum Subjekt der Forschung macht; das gilt von den primitivsten Anfängen der Wissenschaft an bis heute, wo uns der Krieg zwang, uns wieder von neuem auf die Eigenschaften unseres Körpers zu besinnen, wo wir, das Schreckgespenst des Hungers drohend vor uns, probieren mußten, ob der Darm nicht doch in reichem Maße die Zellulose aufzuspalten vermag, ob er die Glycerinkomponente der Fette vielleicht zugunsten der Munitionserzeugung entbehren und dafür andere Ester der Fettsäuren verwerten kann, und ob die allgemeine Eiweißnot sich nicht durch einen teilweisen direkten oder indirekten Ersatz des Eiweißstickstoffs durch Ammoniakstickstoff bekämpfen läßt. — Daß schließlich dieser Abschnitt der Physiologie für den Medizinstudierenden, also für den angehenden Arzt der anziehendste ist, weil von ihm aus die Wege in das Gebiet der Pathologie führen, das ist selbstverständlich. —

Verteilen wir nun zunächst den Stoff, welcher hier gesichtet werden soll. Wir halten uns zu dem Zweck an den oft gebrauchten Vergleich des Menschen mit einer Maschine; dann werden wir, in Anlehnung an

deren Betrieb, von der Brennstoffaufnahme, von der Ventilation des Verbrennungsraumes, von der Kräfteerzeugung durch Umwandlung des Brennstoffs zu reden haben und werden damit auf Kapitel mit den Überschriften: *Nahrungsaufnahme und Verdauung, Atmung, Stoff- und Energiewechsel, Erzeugung von Wärme und mechanischer Arbeit* hingewiesen. Die speziellen Einrichtungen in unserem Körper, welche der Verteilung der eingenommenen Brennstoffe und der Entfernung der Verbrennungsschlacken dienen, erheischen dazu noch die besonderen Kapitel der Physiologie des *Kreislaufs* und der *Bildung und Entleerung von Harn und Schweiß*.

Alle diese eben genannten Funktionen finden wir bei sämtlichen Lebewesen, und weil man ihnen auch bei der Pflanze begegnet, heißen sie **vegetative Funktionen**. Im Gegensatz dazu spricht man von **animalischen Funktionen**, welche ein Kennzeichen des Menschen und des höheren Tieres sind, und welche im allgemeinen auch bei der Maschine fehlen; das sind diejenigen Funktionen, vermöge deren das höhere Wesen vornehmlich aus der Rolle des trägen Dulders heraustritt, um zu sichtlichen Lebensäußerungen, zu aktiver Stellungnahme gegenüber den Änderungen und Angriffen der Außenwelt, zu deutlicher Beherrschung des Anorganischen überzugehen. Diese Funktionen sind diejenigen der Reizbarkeit und der vielfältigen Reaktionsfähigkeit durch Muskelaktion; sie werden in den Kapiteln der *Physiologie der Sinnesorgane und des Nervensystems* und in den Kapiteln über *Bewegung, Lokomotion, Stimme und Sprache* erörtert.

Erster Teil.

Physiologie der vegetativen Funktionen.

2. Kapitel.

Nahrungsaufnahme und Verdauung in der Mundhöhle.

Nahrungsmittel und Nahrungsstoffe 13. Das Ziel ihrer Verdauung 15. Der Speichel 15. Die Ptyalinwirkung 16. Die Fermente und die Theorie der Fermente 17. Die Arbeit der Speicheldrüsen 19. Die sekretorischen Nerven 21. Speichelreflexe 23.

Wie soeben schon gesagt wurde, ist die Nahrungsaufnahme das Analogon zu der Zufuhr von Feuerungsmaterial bei einer Maschine. Denn dort wie hier entspringen die Leistungen der chemischen Energie, welche von dem zugelieferten Stoff bei Zutritt von Sauerstoff durch Verbrennung hergegeben werden kann. Freilich liegen die Verhältnisse hier insofern eigenartig, als *das Maschinenmaterial auch selber mit verbrennen*, mit zu Feuerungsmaterial werden kann, wenn die Nahrungszufuhr eine Unterbrechung erleidet, wie umgekehrt *die Nahrung in Maschinensubstanz umgewandelt* werden, also zum Aufbau von Körpersubstanz Verwendung finden kann. Auch insofern hinkt der Vergleich mit der Maschine, als die Verbrennung erst das Endglied einer langen Kette vorbereitender Spaltungen der Nahrung darstellt, welche ohne Sauerstoffaufnahme zustande kommen. Dagegen können wir den Vergleich darin wieder gutheißen, daß die Art des Brennmaterials so verschieden sein kann, wie Kohle, Petroleum und Spiritus.

Man unterscheidet **Nahrungsmittel** und **Nahrungsstoffe**; Nahrungsstoffe sind das, was unser Körper energetisch ausnützt; neben ihnen enthalten die Nahrungsmittel oft noch Ballast, aus dem wir keinen Nutzen zu ziehen vermögen, wie Knochen, Holzfaser, Chitin, Hornsubstanz; die reinen Nahrungsstoffe verhalten sich zu den Nahrungsmitteln also etwa, wie eine reine Kohle zu Torf. Die Nahrungsmittel setzen sich im allgemeinen (siehe Kapitel 12 und 13) aus drei Hauptnahrungsstoffen zusammen, aus den *Eiweißkörpern*, den *Kohlehydraten* und den *Fetten*. Sie sind in sehr verschiedenen Mengenverhältnissen in der Nahrung enthalten, wie etwa die folgende Tabelle nach KÖNIG lehrt.

Prozentische Zusammensetzung der Nahrungsmittel.

	N-haltige Substanz	Fett	Kohle- hydrat	Rohfaser	Asche	Wasser
Animalische Nahrungsmittel						
Rindfleisch, mittelfett	19.4	7.1	—	—	2	71.5
Kalbfleisch, mager	19.6	1.7	—	—	1.7	77.0
Schweinefleisch, fett	14.1	35.0	—	—	2	47.5
Gänsefleisch, sehr fett	15.8	42.8	—	—	1	38.0
Hühnerfleisch, mittelfett	20.4	4.2	—	—	2	73.5
Fleisch von Wild	20.8	1.4	—	—	2	76.0
Lachs	20.6	12.3	—	—	2	64.0
Hecht	17.9	0.5	—	—	1.6	79.8
Büchling	20.4	7.3	—	—	2	69.3
Eier	12.2	11.5	—	—	2.5	74.2
Kuhmilch	3.2	3.4	4.9	—	1.1	87.4
Butter	0.5	81.5	0.5	—	2.4	9.1
Fettkäse	24.4	28.0	3.4	—	4.6	36.3
Magerkäse	33.5	11.9	4.1	—	4.7	43.1
Vegetabilische Nahrungsmittel						
Bohnen	24	0.6	52	6.0	2	12.5
Erbsen	23	0.6	52	5.6	2.8	13.8
Linsen	26	0.6	52	4.0	3.0	12.2
Reis	8	0.5	77	1.0	1.0	12.5
Weizenmehl, fein	10.8	0.7	75	0.8	0.5	12.6
Roggenmehl	11.5	1.0	69.6	2.0	1.9	14.0
Makkaroni	10.5	0.8	74.5	1.4	0.8	12.0
Weizenbrot (Semmel)	6.3	0.4	58.1	0.5	1.0	33.7
Graubrot	6.2	0.5	50.2	2.0	2.0	39.5
Schwarzbrot	6.8	0.7	46.2	2.0	2.0	42.0
Kartoffeln	1.5	0.2	20	1.8	1.5	75.0
Weißkohl	1.3	0.2	4.2	2.4	1.5	90.0
Spinat	2.4	0.3	3.2	1.6	2.0	89.0
Äpfel, frisch	0.5	—	11.3	2.0	1.2	85.0
Schokolade	6.3	21.0	64.0	2.2	2.3	1.6

In der Tabelle sind die Eiweißkörper unter der Bezeichnung N-haltige Substanz enthalten; diese Bezeichnung ist gewählt, weil, namentlich bei der vegetabilischen Nahrung, der Stickstoffgehalt nicht allein auf Eiweiß zu beziehen ist, sondern noch auf andere Substanzen, welche später genauer zu besprechen sind. Die Tabelle zeigt, wie *alle Nahrung aus denselben Grundstoffen besteht*, wie nur die Quantität der einzelnen in dem Gemisch großen Schwankungen unterworfen ist; so überwiegen z. B. die Eiweißkörper im allgemeinen in der animalischen Nahrung, die Kohlehydrate in der vegetabilischen. Andere Nahrungsstoffe, welche an Quantität hinter den Eiweißkörpern, Kohlehydraten und Fetten zurücktreten, aber dessenungeachtet im Haushalt des Körpers von großer Bedeutung sind, werden später noch erwähnt.

Der Begriff des Nahrungsstoffes, so wie er bisher gebraucht wurde, subsumiert also sowohl die Fähigkeit der Energiespendung, wie auch die Fähigkeit zum Neuaufbau von Körpersubstanz. Der Begriff wird öfter aber auch anders gefaßt. Die Tabelle über die Zusammensetzung der Nahrungsmittel belehrt darüber, daß bestimmte anorganische Stoffe sehr erheblichen Anteil an ihrer Zusammensetzung nehmen, nämlich *anorganische Salze*, unter der Rubrik „Asche“ angegeben, und vor allem

Wasser. Diese Stoffe werden schon unabhängig von jeder wissenschaftlichen Betrachtungsweise, rein instinktmäßig, nicht als „nahrhaft“ angesehen. Aber wir werden sehen, daß sie trotzdem ganz unentbehrliche Bestandteile jeder Nahrung sind und an dem Aufbau unseres Körpers gerade so teil haben, wie die Eiweißkörper, Kohlehydrate und Fette. Für das Wasser kann gleich hier gesagt werden, daß es etwa 65% des gesamten Körpergewichts ausmacht, daß es in den Weichteilen im allgemeinen zu 75—80% enthalten ist, und daß seine Hauptbedeutung darin liegt, daß es gemäß dem alten chemischen Satz: „*corpora non agunt nisi soluta*“ das Reaktionsmedium für fast alle chemischen Umwandlungen in unserem Körper darstellt. Wozu die Salze dienlich sind, soll erst später (Kap. 14) erörtert werden. Aber Energiespender sind sie ebensowenig, wie das Wasser; ohne chemische Veränderungen passieren sie unseren Körper; daher können sie uns nicht satt machen, und deshalb schließt sie die allgemeine Meinung mit Recht von der Gruppe der eigentlichen Nahrungsstoffe aus. Allein ihre Unentbehrlichkeit für den Ersatz verloren gegangener Körpersubstanz kann für sie die Bezeichnung Nahrungsstoff rechtfertigen.

Der Begriff Nahrungsstoff wird schließlich auch anders gefaßt, wenn es sich um die Einruhrisierung von mit der Nahrung aufgenommenen Stoffen, wie etwa *Äpfelsäure*, *Zitronensäure*, *Fruchtester*, *Alkohol* u. a. handelt. Diese Stoffe gehören, im Gegensatz zu den bisher genannten, nicht zu den integrierenden Bestandteilen des Körpers. Aber indem sie verbrennen, kann ihre Energie gerade so, wie die der eigentlichen Nahrungsstoffe, für die Leistungen des Körpers verwertet werden. —

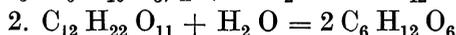
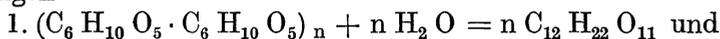
Die zugeführte Nahrung bedarf nun zwecks Ausnützung für die Leistungen des Körpers zuerst der **Verdauung**, d. h. die Nahrungsstoffe müssen aus den Nahrungsmitteln herausgelöst und chemisch so verändert werden, daß sie erstens resorbiert und zweitens assimiliert werden können. Unter *Resorption* versteht man den Übergang der verdauten Nahrungsstoffe aus dem Verdauungstrakt in die Säfte des Körpers, Blut und Lymphe, unter *Assimilation* ihre Einverleibung von da aus in die Organzellen, ihre Ablagerung als körpereigenes Material. Weder Resorption noch Assimilation kann im allgemeinen stattfinden, ohne daß die Nahrungsstoffe vorher bestimmte chemische Umwandlungen erfahren haben; die Gründe dafür werden bald ersichtlich werden.

Die Verdauung wird durch ein Hauptmittel erreicht: die Speise wird mit Verdauungssäften übergossen, deren es eine ganze Anzahl gibt. Sie werden von verschiedenen Drüsen produziert, welche in der Umgebung des Verdauungsschlauches oder in dessen Wand gelegen sind, und sie ergießen sich nacheinander über die Nahrung. Dafür wird diese mit Hilfe von Muskeln durch den langen Verdauungskanal langsam hindurchgeschoben; die Muskeln dienen ferner dazu, die Speise mit den Verdauungssäften zu durchkneten. Wir werden somit bei der Physiologie jedes Abschnitts des Verdauungskanals von einer *Chemie der Verdauung* und von einer *Mechanik der Verdauung* zu sprechen haben.

Der erste Verdauungssaft, welcher sich in der Mundhöhle über die Speise ergießt, ist der **Speichel**. Er ist bekanntlich gewöhnlich eine zähe, fadenziehende Flüssigkeit; seine Klebrigkeit oder „Viskosität“ rührt von einer eiweißartigen Substanz, dem *Muzin* oder *Schleimstoff*, her. Man kann dieses leicht mit einer organischen Säure, z. B. Essigsäure, nachweisen; im Gegensatz zu den meisten Eiweißkörpern fällt das Muzin

dabei schon in der Kälte in Form von weißen Fäden oder Flocken aus. Der Speichel enthält ferner kleine Mengen von Eiweiß, etwas anorganische Salze, unter ihnen merkwürdigerweise Rhodansalz, und endlich zwei „Fermente“, das *Ptyalin* (*Speicheldiastase*, *Amylase*) und die *Maltase*. Unter den anorganischen Salzen befindet sich Kalziumbikarbonat, das beim Stehen des Speichels an der Luft durch Abdunsten von Kohlensäure in Kalziumkarbonat übergeht. Dadurch trübt sich der Speichel. Auch innerhalb der Mundhöhle kann das Kalziumkarbonat ausfallen und sich als „Zahnstein“ niederschlagen. Die Fermente sind es, welche den Speichel zu einem typischen Verdauungssaft machen, denn ihnen verdankt der Speichel seine verdauenden Eigenschaften. In ihnen lernen wir die ersten Glieder einer ganzen Schar von Fermenten kennen, welche alle an den chemischen Verdauungsreaktionen beteiligt sind, und in ihnen lernen wir zum erstmal Repräsentanten des weitaus wichtigsten und merkwürdigsten Werkzeugs kennen, dessen sich fast alle Zellen aller Organismen bedienen, um die vielfältigen typischen Stoffwechselreaktionen zu vollziehen. Es sei deshalb gleich an dieser Stelle der Begriff und das Wesen des Fermentes dargelegt.

Zuvor soll jedoch die Art der *verdauenden Wirkung des Speichels* geschildert werden. Unter den Nahrungstoffen sind es die Kohlehydrate, und von diesen ist es die Stärke, welche vom Speichel angegriffen wird. Die sich vollziehenden Reaktionen können summarisch durch die Gleichungen



ausgedrückt werden. Die Stärke $(C_6 H_{10} O_5 \cdot C_6 H_{10} O_5)_n$, nach KARRER als polymere Diamylose, als polymeres Maltoseanhydrid aufzufassen, wird also *hydrolytisch gespalten*, durch das Ptyalin entsteht in einer ersten Phase das Disaccharid *Maltose* $(C_{12} H_{22} O_{11})$, aus diesem durch die Wirkung der Maltase das Monosaccharid *Traubenzucker* $(C_6 H_{12} O_6)$. Die Bildung der beiden Zucker kann schon wenige Minuten nach der Vermischung von Speichel und Stärkelösung leicht durch die bekannte TROMMERSche Reaktion, Reduktion von Kupferoxyd in alkalischer Lösung, nachgewiesen werden. Ebenso kann man das Verschwinden der Stärke am Verschwinden der Blaufärbung mit Jod erkennen.

Wenn man z. B. 10 cem einer 1%igen Weizenstärkelösung mit 2 cem von 500—1000fach mit Wasser verdünntem Speichel vermischt und in kleinen Zwischenpausen je einen Tropfen der Mischung mit einem Tropfen Jod-Jodkalilösung auf einer Porzellanplatte zusammenbringt, so bleibt schon kurze Zeit nach dem Beginn der Speichelwirkung die anfängliche Bläuung aus (BIEDERMANN).

Diese erste Verdauungsreaktion, die wir kennen lernen, ist in mehrfacher Hinsicht ein Paradigma. Erstens bestehen sämtliche Reaktionen, welche die Verdauungssäfte bewirken, in der Zerlegung größerer Moleküle in mehrere kleine; hier ist es ein Polysaccharid, das in Zucker-Moleküle aufgespalten wird. Zweitens sind sämtliche Spaltungen hydrolytische Spaltungen, Spaltungen unter Aufnahme von Wasser. Drittens verläuft, noch etwas komplizierter als die Reaktionsgleichungen es angeben, die Spaltung stufenweise; das große Stärkemolekül zerfällt nämlich unter dem Einfluß des Ptyalins nicht auf einmal in zahlreiche Moleküle Maltose, sondern es entstehen Bruchstücke verschiedener Größe, kleinere, Maltose, und größere, die als *Dextrine* bezeichnet werden. Die Dextrine haben noch dieselbe empirische Zusammensetzung $C_6 H_{10} O_5$ wie die

Stärke, aber sie färben sich mit Jod nicht blau, sondern je nach dem Fortschritt der Verdauung violett bis rötlich („Erythrodextrin“), oder sie färben sich schließlich gar nicht („Achroodextrin“).

Auf welche Weise wirkt nun das Ferment Ptyalin? Was ist es überhaupt? Der Begriff der „Fermentatio“ stammt schon aus dem Altertum, er hängt vielleicht mit dem lateinischen „fervere“ zusammen und bedeutet eine Gasentwicklung, wie sie bei den altbekannten Gärungsprozessen, wie etwa der alkoholischen Gärung, zu beobachten ist. Der Begriff der Fermentation wurde dann auf andere verwandte Zersetzungsprozesse übertragen, man sprach von gasiger, von fauliger, von weiniger, von saurer Gärung. Die Ursachen der Fermentation, die Fermente, blieben unbeachtet, bis im Jahre 1837 von CAGNIARD LATOUR und SCHWANN die Hefe entdeckt wurde. Bald darauf entbrannte zwischen LIEBIG und PASTEUR ein erbitterter Streit über die Natur der Fermentationen. LIEBIG hatte eine allgemeine Theorie der Gärungen von seinem chemischen Standpunkt aus entwickelt; er nahm an, die Ursache der Gärungen seien leicht zersetzliche Substanzen, welche durch ihren Zerfall andere Stoffe in den Zusammensturz ihrer Moleküle mit hineinrissen, es seien starke intramolekulare Schwingungen der fermentierenden Stoffe, welche sich auf das Substrat der Gärung übertragen und dessen chemischen Bau erschütterten. Dieser „mechanistischen“ Theorie stellte PASTEUR die „vitalistische“ Anschauung entgegen, daß die Gärung an den Lebensvorgang gebunden sei; er zeigte durch vortreffliche Versuche, daß das Zustandekommen einer Reihe der bekanntesten Gärungen von der Anwesenheit von Mikroorganismen abhängt und deren Stoffwechsel zuzuschreiben sei. Enthielt auch diese biologische Theorie keine Erklärung der Fermentation, verhüllte sie im Gegenteil den aufzuklärenden Vorgang in das Dunkel der vitalen Prozesse, so mußte doch das von LIEBIG mit Heftigkeit verteidigte mechanistische Dogma der Macht der Tatsachen weichen.

Inzwischen waren aber noch andere Fermente bekannt geworden, die zwar der Lebenstätigkeit von Zellen entstammten, aber selbst keine Lebensäußerungen, vor allem kein Wachstum und keine Vermehrung darboten. Solche Substanzen, welche bestimmte chemische Umsetzungen anregten, waren durch Alkohol-fällung in Form von Pulvern aus dem Magensaft als „Pepsin“, aus dem Pankreassaft als „Trypsin“, aus den Mandelkernen als „Emulsin“ dargestellt worden. Da die Pulver keinerlei Struktur, nichts von Organisation darboten, so wurden sie den lebenden **geformten oder organisierten Fermenten** als **ungeformte Fermente** gegenübergestellt und später von KÜHNE mit dem besonderen Namen der „*Enzyme*“ bezeichnet. Die PASTEURSche Anschauung paßte, wie schon gesagt, auf diese Fermente nicht, aber auch der LIEBIGSchen Theorie, welche sowieso in Mißkredit geraten war, konnten sie nicht neuen Vorschub leisten, da die Pulver und ihre Lösungen keinerlei Zeichen von Selbstzerfall darboten. Immerhin konnte man versucht sein, die Enzyme doch noch zu den lebenden geformten Fermenten in verwandtschaftliche Beziehungen zu setzen, weil sie in manchen Eigenschaften an die Lebewesen erinnern. So sind ihre Lösungen gegen höhere Temperaturen sehr empfindlich; man kann z. B. den Speichel oder vielmehr das Ptyalin durch kurzes Erhitzen inaktivieren. Die Enzymlösungen sind ferner gewöhnlich gegen Säuren, Laugen und Schwermetallsalze unbeständig, ja sogar allein durch längeres Schütteln können sie unwirksam gemacht wer-

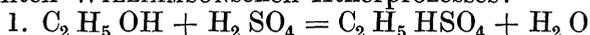
den. Die Pulver geben ferner meistens, so wie jede lebende Zelle, die Reaktionen auf Eiweiß; doch wird dies heute allgemein so aufgefaßt, daß die Fermente nicht selbst Eiweißkörper sind oder solche gebunden enthalten müssen, sondern daß ihnen von ihrer Herstellung her, wie z. B. durch die Ausfällung mit Alkohol, Eiweißkörper anhaften. Wegen dieser verschiedenen Eigenschaften und in dem begreiflichen Bestreben, die Gesamtheit der Fermente einheitlich aufzufassen, ist die Meinung vertreten worden, in den Enzymen stecke noch eine Spur von Leben, sie seien vielleicht Protoplasmasplitter. So ging also die Tendenz dahin, die Fermente dem Bereich physikalischer und chemischer Forschung zu entziehen, und sie samt und sonders in den komplizierten und unanalysierten Erscheinungskomplex Leben einzuhüllen.

Heute ist die Schranke zwischen den geformten und den ungeformten Fermenten in weit befriedigender Weise beiseite geräumt. Allmählich brach sich der Gedanke Bahn, die geformten Fermente entfalteteten ihre chemische Tätigkeit vielleicht vermöge in ihnen eingeschlossener „*intrazellulärer*“ *Enzyme*; zugunsten dessen konnte etwa angeführt werden, daß die Fähigkeit der Hefe, Rohrzucker zu invertieren, durch leichte Schädigung, z. B. durch Chloroformieren, aus ihrem Lebensprozeß herausgelöst und in das umgebende Wasser transloziert werden kann. In der Linie dieser Gedankenentwicklung lag dann die große, mit dem Nobelpreis gekrönte Entdeckung von EDUARD BUCHNER (1897), daß die typischen Gärungsvorgänge, die alkoholische, die Essig-, die Milchsäuregärung von der Tätigkeit der lebenden Zellen völlig losgelöst werden können; quetscht man die Mikroorganismen aus, so erhält man einen Preßsaft, welcher vermöge seines Gehaltes an „*Zymase*“, d. h. einem Gemisch von bis dahin im Zellinnern eingeschlossenen Enzymen, weiter gärt, dessen gärendes Prinzip durch Fällung mit Alkohol und Äther niedergeschlagen und in Wasser wieder aufgelöst werden kann, ohne seine Gärkraft einzubüßen. Damit war die Fermentation aus dem mysteriösen Bezirk des Vitalen ein für allemal herausgerückt, und vom Standpunkt des Physikers und Chemikers konnte von neuem die Frage gestellt werden: wie wirkt ein Ferment? Endgültig kann diese Frage auch heute nicht beantwortet werden, vor allem auch deshalb nicht, weil wir noch gar nicht wissen, wie die Enzyme chemisch konstituiert sind; deshalb verstehen wir auch noch nicht genügend die weitgehende *Spezifität der Fermentwirkungen*, d. h. die Eigenschaft der Enzyme, nur wenige oder eventuell nur eine einzige chemische Reaktion, z. B. die Zerlegung von Milhzucker in Traubenzucker und Galaktose, zu bewirken.

Aber dem vollen Verständnis sind wir jedenfalls ein gut Stück näher gerückt, seitdem WILHELM OSTWALD, anknüpfend an eine alte Klassifizierung von BERZELIUS, die Fermente zu den „*Katalysatoren*“ der Chemiker in Beziehung setzte. Unter einem Katalysator versteht man nach OSTWALD einen Stoff, welcher einer Reaktion eine merkliche Geschwindigkeit erteilt, ohne sich anscheinend selbst an der Reaktion zu beteiligen. Dieser sehr allgemein gehaltenen Definition fügen sich die Enzyme zunächst insofern, als sie selbst, wie lange bekannt, bei ihrer Tätigkeit nicht verbraucht werden, sondern sich nach Ablauf der Fermentation noch unverändert im Substrat vorfinden. Zugunsten der Eingliederung in die Gruppe der Katalysatoren läßt sich ferner anführen, daß es eine ganze Anzahl von Reaktionen gibt, welche sowohl durch organische Fermente, als auch durch anorganische „*Kontakt-*

substanzen“ in Gang gebracht werden; z. B. erfolgt die Oxydation von Alkohol zu Essigsäure sowohl durch den Pilz *Mycoderma aceti*, als auch durch fein verteiltes Platin; ebenso wird schweflige Säure in Schwefelsäure, ameisen-saures Kalzium in Wasser, Kohlendioxyd und Kalziumkarbonat durch Bakterien oder Schimmelpilze und durch Iridium, Palladium oder Platin übergeführt, und die Zerlegung von Wasserstoffperoxyd in Wasser und Sauerstoff geschieht durch die wässerigen Extrakte zahlreicher Zellen, wie etwa Blutkörperchen, wie auch durch kolloidales Silber (Kollargol). Auch die Hitzeempfindlichkeit der geformten und ungeformten Fermente ist nicht ohne Analogie bei den anorganischen Katalysatoren; beide sind ferner oft empfindlich gegen die gleichen Gifte (BREDIG), beide werden durch Narkotika gehemmt (O. WARBURG, MEYERHOF). Selbst die Spezifität der Wirkung kann im Gebiet der Katalysatoren in ausgesprochenstem Maße angetroffen werden, wofür später (S. 42) ein Beispiel gegeben werden soll.

Fragen wir schließlich noch nach dem *Mechanismus der katalytischen Wirkung*, so kann eine einheitliche Antwort darüber nicht erteilt werden. Im großen ganzen wird man sich vorstellen dürfen, daß die Katalyse durch „Zwischenreaktion“ von statten geht, etwa nach dem Modell des bekannten WILLIAMSONSchen Ätherprozesses:



in dem die Schwefelsäure die Rolle der Kontaksubstanz spielt, die scheinbar nur durch ihre Gegenwart, aber in Wahrheit wohl durch die Zwischenreaktion wirkt, aus der sie immer wieder regeneriert wird. Die Beschleunigung der Reaktion durch den Katalysator beruht dabei im allgemeinen darauf, daß die Zwischenreaktionen mit größerer Geschwindigkeit verlaufen, als die Reaktion ohne Katalysator.

Soviel an dieser Stelle von den Fermenten! Wir werden aber noch mehrfach auf ihre Natur zu sprechen kommen. Denn — und das rechtfertigt wohl die lange historische Entwicklung des Fermentbegriffs — wir haben es hier mit Bestandteilen der Zelle zu tun, welche erstens charakteristischer sind, als irgend ein anderer ihrer Bestandteile, und welche zweitens eine vor kurzem noch kaum geahnte Bedeutung für das Verständnis der Stoffwechselfvorgänge erlangt haben, deren Erforschung damit einen besonders aussichtsreichen Weg eröffnet, die Zellvorgänge mehr und mehr ihres geheimnisvollen Charakters zu entkleiden. —

Kehren wir nun zu der verdauenden Wirkung des Speichels zurück. Der genannte diastatische Einfluß auf die in der Speise enthaltene Stärke bleibt von einer vollständigen Aufspaltung weit entfernt; im Gegenteil, *bei dem kurzen Aufenthalt der Speise im Mund tritt nur eine ganz unbedeutende Verzuckerung ein*; man muß schon absichtlich lange etwa auf einem Stück Semmel herumkauen, um zu merken, daß die Stärke im Mund süß wird. Man könnte daher meinen, daß das ganze Ptyalin überflüssig ist; wir werden jedoch später sehen, daß es im Magen doch noch ausgiebig in Aktion tritt.

Die Bedeutung des Speichels für die Verdauung liegt aber nicht ausschließlich in seinem Fermentgehalt. Das erfährt man, sobald man sich den Einzelheiten der Speichelabscheidung zuwendet.

Der Speichel fließt aus 3 Paaren großer Speicheldrüsen in die Mundhöhle; jederseits mündet eine Glandula parotis, eine Glandula submaxillaris und eine Glandula sublingualis; dazu kommt noch eine größere

Zahl kleinerer und kleinster Drüsen. Die Parotis liefert ein muzinarmes, eiweiß- und fermentreicheres, „seröses“ Sekret, die Submaxillaris und die Sublingualis ein muzinreiches, eiweiß- und fermentärmeres Sekret. Über Menge und Beschaffenheit der von den verschiedenen Drüsen abgeschiedenen Sekrete kann man sich durch ein vivisektorisches Experiment, durch Anlegung einer *Speichelfistel*, orientieren; das Sekret fließt dann nicht aus der Mundhöhle, sondern tropft, unvermischt mit Speise, durch eine in den Ausführungsgang eingebundene Kanüle aus. Indessen leidet dabei die Sekretion teils durch die Narkose, welche während der Operation vorgenommen werden muß, teils infolge der Schmerzen nach dem Aufwachen. PAWLOW verfuhr deshalb so, daß er bei einem Hund die Ausführungsgänge der drei großen Drüsen freilegte, durchschnitt und nach außen in die Haut einnähte, so daß die Sekrete dieser Seite nach außen abfließen mußten, während die Sekrete der drei anderen Drüsen in normaler Weise ihren Saft in die Mundhöhle ergossen. Erst wenn die Wunde völlig verheilt und permanente Fisteln gebildet waren, begann das eigentliche Experiment. Dabei wurden auf der operierten Seite kleine Becher unter die Fisteln an die Haut angehängt und das Sekret unter verschiedenen Versuchsbedingungen darin gesammelt. Mit dieser ingeniosen Methode konnte *die normale Arbeitsweise der Drüsen* festgestellt werden, d. h. es ließ sich die Frage beantworten, ob Qualität und Quantität der einzelnen Sekrete von Menge und Natur der in die Mundhöhle gebrachten Stoffe abhängig sind. Die folgende Tabelle enthält einige Angaben über die Reaktionen der Submaxillaris:

In die Mundhöhle eingeführt	Menge des Submaxillaris-Speichel in ccm	Prozente organischer Substanz
Rohes Fleisch	1.1	0.956
Milch	2.4	0.987
Semmel	3.0	0.967
Fleischpulver	4.4	0.869
Formalin 0,5 %	2.8	0.116
Kochsalz 20 %	4.0	0.237
Sand	1.9	0.133
Steine	0	—
Wasser	0	—

Betrachten wir zuerst die *Reaktion auf die Nahrungsstoffe!* Die Qualität des Submaxillaris-Speichels bleibt sich dabei offenbar gleich, aber die Quantität wird variiert; auf das getrocknete Fleisch wird am meisten, auf das frische Fleisch am wenigsten ergossen. Das läßt sich so deuten, daß das trockene Pulver gar nicht aus der Mundhöhle herausgebracht und geschluckt werden könnte, wenn es nicht durch Flüssigkeit zusammengespült würde. So ist auch verständlich, daß sich auch auf trockene Semmel ziemlich viel Speichel ergießt. Dagegen erscheint die Sekretion bei der Milch unverhältnismäßig reichlich; dies ist indessen nach PAWLOW eine spezielle Reaktion der Submaxillaris auf Milch und hat die Bedeutung, daß das Milchgerinnsel, das sich im Magen bildet (siehe S. 29), bei reichlicher Durchsetzung mit Muzin lockerer und darum verdaulicher wird.

Nehmen wir nun die *Reaktion auf Nichtnahrhaftes* hinzu! Diesmal ist die Qualität des Speichels verändert, der Gehalt an organischer Substanz, d. h. vor allem der Gehalt an Muzin weit geringer. Und damit werden wir auf die Bedeutung des Muzins gelenkt: es dient dazu, vermöge der Viskosität seiner Lösungen (S. 15) die einzelnen Nahrungsbestandteile zusammenzukleistern, so daß sie mit Hilfe der die Mundhöhle umschließenden Muskeln zu einem kompakten Bissen geformt werden können, welcher zufolge seiner Schlüpfrigkeit die Speiseröhre hinuntergleitet. Der über die Speise ergossene Speichel ist also nach PAWLOWS Ausdrucksweise „*Gleit- oder Schmierspeichel*“. Er kann aber auch vorwiegend „*Verdünnungsspeichel*“ sein. Das folgt nicht bloß schon aus der besprochenen Anpassung der Speichelquantität an die Nahrung, sondern vor allem auch aus der Anpassung an das Nichtnahrhafte: auf Sand wird ein muzinarmes wässriges Sekret ergossen, auf die ebenso unbrauchbaren Steine dagegen nichts. Der Sinn ist klar: so leicht durch einige Zungenbewegungen die Steine aus dem Mund herauszuschleudern sind, so schwer geht das mit Sand; er wird herausgespült, gerade so wie die unangenehm beißenden beiden Lösungen der Tabelle, die Lösungen von Formalin und Kochsalz, deren Wirkung durch die Verdünnung gemildert wird.

Der Milderung der Reizwirkung einer Nahrung dient in besonderer Weise die Parotis, wie die folgende Tabelle lehrt:

In die Mundhöhle eingeführt	Menge des Parotis-Speichels in ccm	Prozente organischer Substanz
Kochsalz 20%	2	0.450
Soda 10%	2	0.950
Schwefelsäure 0.67%	2.2	0.937

Auf die alkalische Soda- und die saure Schwefelsäurelösung wird ein doppelt so konzentrierter Parotisspeichel ergossen, als auf die neutrale Kochsalzlösung. Das hat nach PAWLOW die Bedeutung, daß das Eiweiß des Parotissekrets dazu verwendet wird, durch chemische Bindung der Hydroxyl- bzw. der Wasserstoffionen die ätzenden Lösungen zu neutralisieren.

Wir begegnen hier also einem unerwarteten und überaus prägnanten Beispiel zweckmäßiger Reaktionsweise, wie sie nach den Darlegungen im ersten Kapitel zu den Kennzeichen der Lebewesen gehört.

Es erhebt sich nun vor allem die Frage, wie der Inhalt der Mundhöhle die Drüsen zu ihrer Tätigkeit anregt. Es geschieht von den Sinnesorganen im Mund, besonders von den Geschmacksorganen aus durch Vermittlung des Nervensystems. Im Jahre 1851 entdeckte CARL LUDWIG an den Speicheldrüsen die spezifisch **sekretorischen Nerven**. Die Speicheldrüsen werden, wie die meisten Organe, deren Funktion unserer Willkür nicht unterworfen ist, in doppelter Weise innerviert, erstens durch direkt aus dem Zentralnervensystem stammende Nervenfasern, hier Fasern von Gehirnnerven, und zweitens durch Fasern aus dem Sympathikus.

Die Submaxillaris und Sublingualis beziehen ihre zerebralen Fasern aus dem Fazialis; ein Ast des Fazialis, die Chorda tympani, verläuft in den Ramus lingualis des Trigemini, mit diesem gelangen dann die Fazialisfasern zu den Drüsen. Die zerebralen Fasern für die Parotis stammen aus dem Glossopharyngeus und gelangen auf dem Weg über den Nervus tympanicus und Nervus petrosus

superficialis minor und über das Ganglion oticum zum Ramus auriculotemporalis des Trigeminus. Die Sympathikusfasern der Speicheldrüsen kommen aus dem Halssympathikus.

Durchschneidet man nun etwa die Chorda tympani oder den unteren Lingualisstamm bei einem Hund und reizt den peripheren Nervenstumpf mit dem elektrischen Strom, so sezerniert die bis dahin ruhende Submaxillaris; zugleich erweitern sich die Blutgefäße, und es fließt viel reichlicher Blut durch die Drüse. Es liegt natürlich nahe anzunehmen, daß die einsetzende Speichelbildung mit der Durchblutung in unmittelbarem Zusammenhang steht, in dem Sinn, daß die unter Druck stehende Blutflüssigkeit durch die vergrößerte Filtrationsfläche der weiten Blutgefäße vermehrt hindurchgepreßt wird, und ferner liegt die Annahme nahe, daß der Effekt der Nervenreizung gar nicht die Existenz von Sekretionsnerven beweist, sondern bloß auf der Erregung der überall sich verbreitenden gefäßweiternden Nerven (Kap. 11) beruht. Aber es kann leicht gezeigt werden, daß beide Annahmen falsch sind: Spritzt man dem Hund etwa 5 mg Atropin in eine Vene, so fließt kurze Zeit darauf bei der Nervenreizung kein Tropfen Speichel aus dem Drüsenausführungsgang, dagegen findet nach wie vor die Gefäßdilataion statt (HEIDENHAIN). Das beweist, daß Atropin — und ähnlich wirken andere Gifte — die Gefäßnerven nicht angreift, dagegen offenbar vorhandene spezifische Sekretionsnerven lähmt, welche unabhängig von der durchfließenden Blutmenge die Sekretbildung verursachen.

Für eine spezifische Wirkung und gegen bloße Begünstigung einer Filtration spricht auch der Effekt der Reizung der Sympathikusfasern. Auch diese erzeugt Sekretion, obgleich dabei infolge der Miterregung gefäßverengernder Nerven die Blutzirkulation in der Drüse sich vermindert. Der „*Sympathikusspeichel*“ ist aber eine zähe, dickflüssige, eventuell klumpige Masse, der viel reichlicher fließende „*Chordaspeichel*“ dagegen eine dünne, wasserklare Flüssigkeit.

Auch aus weiteren Beobachtungen geht hervor, daß *der Speichel das Produkt einer besonderen Drüsenarbeit ist*, und daß die Drüsensubstanz nicht etwa einem toten passiven Filter vergleichbar ist. So hat LUDWIG gezeigt, daß, wenn man in den Ausführungsgang einer Speicheldrüse ein Manometer einbindet, bei der Sekretion eventuell ein beträchtlich höherer „*Sekretionsdruck*“ abzulesen ist, als gleichzeitig der Blutdruck in der Karotis beträgt. Ferner steigt die Temperatur in der Drüse bei der Sekretion über die Temperatur des zufließenden Blutes; LUDWIG beobachtete in einem Versuch eine Temperaturdifferenz von 1,5°.

Auch die chemische Zusammensetzung kennzeichnet den Speichel als spezifisches Produkt der Drüsenarbeit. Seine molekulare Konzentration, gemessen an seinem Gefrierpunkt, ist erheblich geringer als die molekulare Konzentration des Blutes; die Gefrierpunktserniedrigung des menschlichen Speichels beträgt bloß 0,09—0,24°, die des Blutes etwa 0,56°. Daraus folgt, daß die Speicheldrüsen gegen einen osmotischen Druck von mehreren Atmosphären Arbeit leisten müssen, um ihr dünnes Sekret aus dem Blutplasma abzusecheiden (siehe dazu Kap. 16). Ferner sind Muzin, Ptyalin und Maltase von den Drüsenzellen durch besondere Tätigkeit erarbeitet; denn sie werden nicht präformiert vom Blut den Drüsen zugeführt.

Endlich spricht auch *das histologische Bild der Speicheldrüsen* für ihre Aktivität; denn je nach den Funktionszuständen ist es ein wechselndes

(s. Abb. 1). Im Ruhezustand ist das Protoplasma der Zellen meist erfüllt von dunklen Körnchen, den sogenannten *Sekretgranula*; während der Tätigkeit verschieben sich diese von der Basis her gegen das Lumen; im Stadium stärkster Sekretion, wie sie etwa durch elektrische Reizung der Drüsennerven hervorzurufen ist, findet man oft nur einen schmalen Saum von Granula dicht unter der Zelloberfläche, der übrige Teil der Zelle bis zur Basis ist glasig und hell, fast granulafrei (HEIDENHAIN, LANGLEY).

Die nervösen Impulse, auf welche die Drüsen mit ihrer Tätigkeit reagieren, können im Experiment, wie gesagt, durch elektrische Ströme erzeugt werden; normalerweise kommen sie aber natürlich anders, und zwar in erster Linie durch Erregung der Sinnesorgane der Mundhöhle zustande; es sind der Geschmacks-, der Temperatur-, der Tast- und eventuell der Schmerzsinne, welche zunächst erregt werden; *die Speichelsekretion erfolgt dann reflektorisch*. Unter einem *Reflex* versteht man eine auf einen bestimmten Reiz mit Regelmäßigkeit und in typischem Ablauf und unabhängig von unserer Willkür sich einstellende Reaktion. Ein Reflex kommt zustande, indem von einem Sinnesorgan aus ein Sinnesnerv erregt wird; die Erregung läuft dann „zentripetal“ zum „Reflexzentrum“, das irgendwo im Zentralnervensystem gelegen ist, und dort



Abb. 1. Glandula parotis vom Kaninchen (nach BIEDERMANN). A ruhend. B während der Sekretion. C nach starker Sympathikusreizung.

findet die Übertragung der Erregung auf einen „zentrifugalen“ Nerven, in unserem Fall also einen Sekretionsnerv statt. Das Speichelsekretionszentrum ist in der Medulla oblongata gelegen. Die vorher (S. 20) geschilderte zweckmäßige Reaktion der Speicheldrüsen, die sich in einer jeweils den Bedürfnissen angepaßten Menge und Zusammensetzung des Speichels äußert, ist auf die Erregung des Reflexes durch ganz bestimmte Sinnesorgane angewiesen. Das lehrt z. B. der folgende Versuch aus PAWLOWS Schule, bei dem die reflektorische Parotissekretion vor und nach Durchschneidung der Geschmacksnerven der Zunge, des Lingualis und des Glossopharyngeus, bei einem Hund untersucht wurde:

Mundhöhlenreiz	Prozentgehalt an festen Stoffen	Prozentgehalt an Salzen	Prozentgehalt an organischen Stoffen
vor Durchschneidung der Nerven			
Schwefelsäure	1.425	0.475	0.950
Soda	1.433	0.466	0.967
Kochsalz	0.903	0.466	0.437

Mundhöhlenreiz	Prozentgehalt an festen Stoffen	Prozentgehalt an Salzen	Prozentgehalt an organischen Stoffen
nach Durchschneidung der Nerven			
Schwefelsäure	0.760	0.400	0.360
Soda	0.700	0.425	0.275
Kochsalz	0.725	0.400	0.325

Der Prozentgehalt des Speichels an organischer Substanz ist also infolge der Durchschneidung stark reduziert, und namentlich ist die spezifische Differenz in dem Gehalt nach der Wirkung von Kochsalz einerseits, von Säure oder Soda andererseits verschwunden. Der vorher hervorgehobene Erguß eines besonders eiweißreichen Sekretes auf sauren oder alkalischen Mundhöhleninhalt zum Zweck von dessen Neutralisierung ist also an die Intaktheit der Geschmacksnerven gebunden; die von den anderen Nerven der Mund- und Rachenschleimhaut aus durch die drei Lösungen ausgelöste Reaktion ist dagegen unspezifisch.

Die eben geschilderten Reflexe sind „unbedingte“ im Verhältnis zu den von PAWLOW sogenannten „bedingten Reflexen“, welche namentlich von einem allgemeineren Standpunkt aus von großem Interesse sind. Ein bedingter Reflex ist es, wenn einem beim Anblick einer Speise, beim Durchlesen der Speisekarte, beim Geklapper der Teller oder dem Duft aus der Küche eines Gasthauses „das Wasser im Munde zusammenläuft“. Hier wird das Reflexzentrum für die Speicheldrüseninnervation nicht direkt von den Geschmackssinnesorganen der Mundhöhle aus erregt, sondern indirekt vom Auge oder Ohr oder der Nase aus über die optischen, akustischen oder olfaktorischen Zentren. „Bedingt“ sind diese Reflexe insofern, als sie nicht unbedingt von je her eintreten, sobald eine bestimmte Speise vorgehalten oder ein bestimmter Geruch appliziert wird, sondern die Speise muß ein- oder mehrmals gesehen und geschmeckt oder gerochen und geschmeckt sein, eine bestimmte „Assoziation“ verschiedener Wahrnehmungen ist Vorbedingung; „gebranntes Kind scheut das Feuer“. Wenn aber einmal solche Assoziationen zustandegebracht sind, dann fließt bei einem Hunde beim bloßen Anblick von trockenem Fleischpulver und von Sand reichlich Speichel, beim Vorhalten von Steinen fließt keiner, dann sezerniert ein Hund, der mehrmals bei einem bestimmten Ton eine ihm mundende Speise, bei einem anderen Ton eine widerliche Speise bekommen hat, im ersten Fall einen muzinreichen „Gleitspeichel“, im zweiten Fall einen wässerigen „Verdünnungsspeichel“, sobald die betreffenden Töne erklingen (KRASNOGORSKY). Der Speichel wird also ein Ausdruck der Gemütsbewegungen, er wird, wie PAWLOW es etwas gewagt ausgedrückt hat, „psychischer Saft“, an dessen Erscheinen oder Beschaffenheit man erkennen kann, ob der Hund zwei Reize, die er kennen gelernt hat, unterscheiden kann, wie lange er sie im Gedächtnis behalten hat, ob die Erinnerung daran durch plötzliche neue Erfahrungen gestört wird, und dergleichen. Es gelingt also, über die Speicheldrüsenfunktion in die Seelenvorgänge der Tiere vorzudringen. Natürlich hat bei diesen Studien die Speicheldrüsentätigkeit keine andere Bedeutung, als die einer recht bequem meßbaren und dabei unbewußten und unwillkürlichen Reaktion.

3. Kapitel.

Das Schlucken und die Verdauung im Magen.

Die Schluckbewegung 25. Das Schlucken als Reflex 26. Der Magensaft 27. Die Wirkung des Pepsins auf die Eiweißkörper 27. Die Labwirkung 29. Die Lipase 29. Die Absonderung des Magensaftes 30. Salzsäure und Milchsäure 32. Die Magenbewegungen 33. Das Hungergefühl 35. Das Erbrechen 35. Die Innervation der Magenmuskeln 36. Die Schichtung des Mageninhalts 37. Die Magenentleerung 38.

Die unter den zerschneidenden und zermahlenden Kaubewegungen eingespeichelte Nahrung wird nun verschluckt. Zum Zweck des **Schluckens** wird durch das Zusammenwirken von Zungen-, Lippen- und Wangenmuskulatur ein *Bissen* geformt. Dieser wird auf der Zungenoberfläche durch eine von vorn nach hinten fortschreitende Hebung der Zunge rachenwärts geschoben. Durch die schließliche Hebung des Zungengrundes und durch Verkürzung der Gaumenbögen wird dann der Rachen- gegen den Mundraum abgeschlossen. Zugleich wird das Gaumensegel nach oben bewegt, so daß es die Nasenhöhle von unten verschließt; dadurch, daß das Zungenbein und der Kehlkopf kräftig nach vorn und aufwärts gezogen werden, legt sich die Epiglottis auch auf den Kehlkopfeingang; außerdem wird der Ösophaguseingang geöffnet (siehe Abb. 2, S. 26). Wenn nun die Constrictores pharyngis auf den schlüpfrigen Bissen pressen, so bleibt diesem kein anderer Ausweg, als in den Ösophagus hinabzugleiten. Hier wird der Bissen durch die sukzessive Kontraktion der den Ösophagusschlauch umspannenden Muskulatur, durch eine sogenannte *peristaltische Bewegung*, weiter abwärts geschoben, bis er an der Kardie anlangt; der Kontraktionswelle läuft eine Erschlaffungswelle voraus. Flüssigkeiten werden schon allein durch die heftige und plötzliche Kontraktion im oberen Schlundteil bis zur Kardie gespritzt, aber auch dann folgt noch eine peristaltische Welle nach. Werden mehrere Schlucke rasch nacheinander ausgeführt, wie beim Trinken einer Flüssigkeit, dann bleibt der Ösophagus bis zum letzten Schluck erschlafft in Ruhe, und dann erst läuft eine Kontraktionswelle über ihn hinweg. Dieser ganze komplizierte Schluckakt ist nur in seinem Anfangsteil ein Akt der Willkür, nämlich nur, bis der Bissen die Grenzlinie des Zungengrundes überschritten hat; von da ab wird der Bissen unabhängig von unserem Willen weiterbefördert.

Den zeitlichen Verlauf dieses Schluckakts hat man gemessen. Es wurde z. B. eine Schlundsonde in den Ösophagus gelegt, durch welche

der ganzen Länge nach ein Faden gezogen war; an das unten herausragende Ende des Fadens war ein Stück blaues Lackmuspapier gebunden, und an dem Faden konnte das Papier kurze, aber verschiedene Zeiten nach Beginn des Schluckens einer sauren Flüssigkeit oder Speise in die Sonde hineingezogen werden; es ließ sich dann feststellen, ob das Papier schon gerötet war, oder noch nicht. Oder es wurde Speise geschluckt, die mit basisch salpetersaurem Wismut (Bismuthum subnitricum) durchknetet war; da das Wismutsalz für Röntgenstrahlen wenig durchlässig ist, so konnte die Bewegung des Bissens auf dem Röntgenbildschirm verfolgt werden (CANNON). Auf diesen und anderen Wegen ist gefunden, daß Flüssigkeiten in 0,5—1,5'' heruntergespritzt werden, feste Speisen brauchen wegen der Langsamkeit der peristaltischen Welle

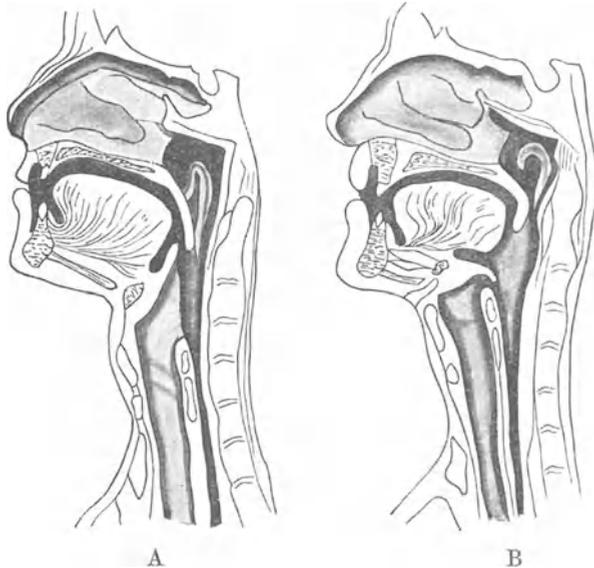


Abb. 2. Sagittalschnitte durch den Kopf.
A Ruhestellung. B Schluckstellung von Zunge, Kehlkopf und Gaumen.

4—6''; denn nur das obere Drittel des Ösophagus ist von quergestreiften Muskeln eingehüllt, die unteren zwei Drittel werden von glatten Muskelfasern, die sich viel langsamer kontrahieren, bewegt.

Es ist also ein überaus komplizierter Muskelapparat, welcher in Gang gesetzt wird, vergleichbar einem Präzisionswerk, das genau einreguliert sein muß. Die Zusammenschaltung der Einzelteile geschieht durch ein „Schluckzentrum“, welches in der Medulla oblongata gelegen ist. Dort entspringen die Nerven, welche die zahlreichen Schluckmuskeln versorgen: Trigemini, Hypoglossus, Glossopharyngeus, Vagus und Accessorius. Wieviel auf deren zeitlich und intensiv richtige Koordination ankommt, wird man besonders gewahr, wenn Störungen im Zentrum vorkommen. Es gibt eine nicht ganz seltene Erkrankung des Menschen, die sogenannte *Bulbärparalyse*, bei welcher die Ursprungskerne der motorischen Nerven gerade in der Medulla oblongata (im Bulbus rachiticus, wie es früher hieß) befallen werden; den armen Patienten läuft die Speise oft aus Mund und Nase, wenn sie schlucken wollen, sie „ver-

schlucken“ sich, weil die Speise in den Kehlkopf gerät, und oft gehen sie an dem Verschlucken zugrunde, weil die Speise in die Lungen aspiriert wird und diese infiziert (siehe Kap. 23).

Die einzelnen Abschnitte des Muskelschlauchs werden vom Schluckzentrum aus nacheinander zur Kontraktion angeregt. Durchschneidet man daher bei einem Tier den Ösophagus in mehrere Ringe, so hat das auf den Ablauf des Schluckvorgangs keinen Einfluß; die voneinander durch die Schnitte isolierten Rohrabschnitte kontrahieren sich nacheinander, als wären sie noch miteinander verwachsen (Mosso). Eine entsprechende Beobachtung am Menschen hat v. MIKULICZ mitgeteilt; er bemerkte bei einem Patienten, welchem er den Ösophagus durchschnitten hatte, daß, wenn er Speise in die Ösophagusöffnung am Hals schob, der Ösophagus die Speise immer erst dann annahm und weiterbeförderte, wenn der Patient schluckte, wenn also dem unteren Ösophagus die Bewegung sozusagen vom oberen vorgemacht wurde.

Der Schluckakt ist eine Reflexbewegung, d. h. der Muskelmechanismus oder richtiger das Schluckzentrum bedarf der Anregung durch zentripetale Nerven. Diese sind Trigeminus, Glossopharyngeus und Laryngeus superior, welche den Rachenraum mit sensiblen Fasern versorgen. Ist die Speise willkürlich bis in den Rachen geschoben, dann setzt unwillkürlich und zwangsmäßig die Schlingbewegung ein.

Es ist ein Irrtum, wenn man glaubt, willkürlich schlucken zu können; wenn man es scheinbar tut, so bewegt man in Wirklichkeit nur etwas Speichel gegen den Rachen, und dieser ist es dann, welcher den Schluckreflex auslöst. Daher geht es schließlich nicht mehr, wenn man immer wieder „leer“ zu schlucken versucht, und daher wird auch die Schluckfähigkeit durch Anästhesieren der Rachenwände mit Kokain zeitweilig aufgehoben.

Erreicht die dem verschluckten Bissen voraneilende Erschlaffungswelle die *Kardia*, so wird deren Sphinkter in den Erschlaffungsvorgang mit einbezogen und die Kardia öffnet sich; zugleich erschlafft auch der benachbarte Fundusteil des Magens, so daß der Eintritt des Bissens in den Magen erleichtert wird. Hier gerät nun die Speise unter den Einfluß der zweiten Verdauungsflüssigkeit, des **Magensafts**. Den Magensaft rein zu gewinnen, ist schon schwieriger, als es für den Speichel der Fall war. Hebert man den Magensaft aus, so erhält man den Saft vermischt mit Speise; läßt man, wie es früher gemacht wurde, einen Hund ein Stückchen Schwamm schlucken, der an einem Bindfaden festgebunden ist, und zieht dann den Schwamm wieder heraus, so hat er sich wesentlich mit *Magenschleim* durchtränkt. Das beste Verfahren ist Gewinnung des Saftes durch eine *Magenfistel*; davon wird nachher die Rede sein. Hier, wie in anderen Fällen, kann man sich aber auch mit der Herstellung eines *künstlichen Magensaftes* helfen; man zerhackt zu dem Zweck die Schleimhaut eines frischen Kälber- oder Schweinemagens und extrahiert sie mehrere Tage mit Glyzerin; den Glyzerinextrakt, welcher die Magenfermente enthält, und welcher lange Zeit haltbar ist, versetzt man dann mit 0,5% Salzsäure.

Der Magensaft, eine wasserklare, farblose Flüssigkeit, enthält an Enzymen das eiweißverdauende *Pepsin*, das milchkoagulierende *Labferment* oder *Chymosin*, die fettsplattende *Lipase*, ferner etwa 0,3 bis 0,5% *Salzsäure*, dazu kleine Mengen von anorganischen Salzen und von Eiweiß. Seine Gefrierpunktserniedrigung als Maß seiner molekularen Konzentration stimmt mit der des Blutes annähernd überein.

Die wichtigste Eigenschaft des Magensaftes ist die **Eiweißverdauung**. Sie geschieht durch das Zusammenwirken von **Pepsin** und Salzsäure. Die Salzsäure wirkt dabei quellend auf das Eiweiß. Ihr Konzentrationsoptimum für die Quellung liegt nicht weit von ihrer im Magensaft normalerweise vorhandenen Konzentration entfernt; größere Konzentrationen sind weniger günstig. An die Quellung schließt sich dann bei Gegenwart von Pepsin der Zerfall des Eiweißes an. Die Salzsäure wirkt aber nicht bloß als Quellungsmittel; denn andere Säuren, anorganische sowohl wie organische, stehen hinter ihr an Wirksamkeit zurück. Ein Temperaturoptimum für die Wirkung liegt zwischen 35° und 50° ; Kochen zerstört die Wirksamkeit.

Die Verdauung durch das Pepsin erstreckt sich sowohl auf unlösliches, geronnenes Eiweiß, als auch auf gelöstes; die Verdauung des geronnenen ist so viel auffälliger, daß sie zum *Nachweis der Pepsinwirkung* verwendet wird. Man benutzt dazu entweder eine Fibrinflocke oder ein Stückchen hitzeokoaguliertes Hühnereiweiß. Sehr empfindlich ist die Rizinprobe; dazu löst man Rizin, einen Eiweißkörper aus Rizinusamen, in Kochsalzlösung auf, fällt durch Zusatz von etwas Salzsäure das Rizin in feinen Flöckchen aus, und versetzt diese Suspension mit dem zu prüfenden Saft (JACOBY); Pepsin löst dann die zarten Gerinnsel sehr rasch auf. Nach GRÜTZNER eignen sich besonders gut mit Karmin gefärbte Fibrinflocken, welche erst bei der Verdauung das Karmin lassen, so daß die Rotfärbung des Saftes einen Maßstab der verdauenden Kraft abgibt.

Die Verdauung des unlöslichen, wie des gelösten Eiweißes ist wiederum, wie die Stärkeverdauung, eine hydrolytische Spaltung. Das kann man daraus erschließen, daß Kochen mit verdünnter Säure zu denselben Spaltprodukten führt. Diese heißen *Albumosen* und *Peptone*, mit einem gemeinsamen Namen von EMIL FISCHER als *Peptide* bezeichnet; der Vorgang der Eiweißumwandlung heißt *Peptonisierung*. Albumosen und Peptone sind etwa den verschiedenen Dextrinen vergleichbar, es sind größere Bruchstücke des Eiweißmoleküls, welche selber noch manche Ähnlichkeit mit dem Eiweiß besitzen. Sie sind z. B. wie Eiweiß fällbar durch Alkohol, durch Pikrinsäure, durch Gerbsäure, durch Sublimat, durch Salpetersäure, sie geben wie Eiweiß mit Natronlauge und etwas Kupfersulfat eine Rotviolett färbung (sog. *Biuretreaktion*), beim Erhitzen mit in Salpetersäure gelöstem Quecksilber (MILLONsches Reagens) eine Fleischrosa- bis Rotfärbung u. a. Dagegen koagulieren Albumosen und Peptone nicht beim Erhitzen der Lösungen, ihre Niederschläge mit Salpetersäure oder mit Ferrozyanwasserstoffsäure lösen sich im Gegensatz zu den Niederschlägen des Eiweißes beim Erwärmen, sie sind auch, im Gegensatz zu Eiweiß, durch Neutralsalze, z. B. durch Ammoniumsulfat, nur partiell oder überhaupt nicht aussalzbar (KÜHNE, HOFMEISTER). Albumosen und Peptone sind also im großen ganzen beständiger in ihrer Lösung, haben eine größere Affinität zum Wasser, als die Eiweißkörper, und von den beiden Sorten von Spaltprodukten sind wieder die Peptone die löslicheren, als die Albumosen. — Albumosen und Peptone sind Sammelbegriffe für eine große Zahl von Peptiden, es entstehen bei der peptischen Spaltung des Eiweißes eben sehr viele verschiedene Bruchstücke. Dabei beweist die geringere Löslichkeit der Albumosen nicht etwa eine größere Aufteilung, ein größeres Molekulargewicht. Sondern über die Löslichkeit entscheidet die spezielle Zu-

sammensetzung aus den Bauelementen aller Peptide einschließlich der Eiweißkörper. Diese Bauelemente sind *Aminosäuren*. Es gibt deren eine größere Zahl; sie werden später (s. S. 40) aufgezählt werden.

Die *Verdaulichkeit verschiedener Eiweißkörper* ist verschieden. Fibrin wird schnell, hart gesottenes Hühnereiweiß dagegen relativ langsam verflüssigt. Den Eiweißkörpern verwandt, jedenfalls auch aus Aminosäuren aufgebaut, sind gewisse Stützsubstanzen, wie *Kollagen*, der Hauptbestandteil der Bindegewebsfasern, *Elastin* und *Keratin*, die Materialien der elastischen Fasern und der Hornsubstanzen (Haare, Nägel, Federn). Von ihnen wird Keratin nicht, Elastin schwer, Kollagen dagegen besonders leicht durch den Magensaft angegriffen; letzteres quillt durch die Säure und wird zu *Leim*, der Leim wird alsdann peptonisiert. So kommt es, daß Fleisch im Magen sich rasch in einen Brei auflöst — in *Chymus*, wie man den Speisebrei auch nennt —, weil das Bindegewebe, das die Muskelfasern zusammenhält, verflüssigt wird. Auch schon durch bloßes Erhitzen wird das Kollagen in Gegenwart von Wasser zur Quellung und Lösung gebracht. Darin liegt u. a. die Bedeutung des Kochens und Bratens; denn dabei geschieht dieselbe Auflockerung des Fleisches wie bei der Berührung mit Magensaft, nur daß dessen Säure besonders stark quellend wirkt, und daß sich an die Quellung die Aufspaltung zu „Leimpeptonen“ anschließt. Auch das Fettgewebe zerfällt durch die Lösung des Bindegewebes in die einzelnen Fettzellen.

Unter den Eiweißkörpern und bei ihrer Verdauung im Magen spielt eine besondere Rolle der Käsestoff oder das *Kasein* der Milch. Milch gerinnt bekanntlich sehr leicht; es geschieht dadurch, daß Luftbakterien sich in der Milch entwickeln und den Milchzucker zu Milchsäure vergären, so daß die Milch sauer wird. Im Gegensatz zu vielen anderen Eiweißkörpern fällt nämlich Kasein ähnlich wie Muzin (siehe S. 15), schon in Gegenwart der schwachen organischen Säuren aus. Milch gerinnt aber auch in Abwesenheit von Säure, wenn das *Labferment* oder *Chymosin* des Magensafts sich der Milch zumischt; es bildet sich dann aus Kasein ein fädiges Gerinnsel von *Parakasein*. Am einfachsten kann man, wie von alters her von der Käsebereitung bekannt, die Gerinnung herbeiführen, wenn man ein frisches, gewaschenes Stück Kälbermagen in die Milch hineinhängt. Diese merkwürdige chemische Umwandlung des löslichen Kaseins in das unlösliche Koagulum ist trotz vieler Bemühungen bisher wenig klar gelegt; sicher weiß man aber, daß der Kalk der Milch an der Umwandlung beteiligt ist. Denn wenn man durch Zusatz von Natriumoxalat (zu 10 ccm Milch 2 ccm 3% Natriumoxalat), von Natriumfluorid oder Natriumzitat den gelösten Kalk aus der Milch niederschlägt, so bleibt die Labwirkung aus, um wieder einzusetzen, sobald wieder ein lösliches Kalziumsalz zugeführt wird. In dieser Hinsicht ist die Labung ganz der Blutgerinnung zu vergleichen; auch dabei wirken kalkfällende Mittel gerinnungshemmend (siehe Kapitel 7).

Der Sinn der Labgerinnung ist vielleicht der folgende: wir werden nachher sehen, daß Flüssigkeiten im allgemeinen rasch durch den Magen hindurch in den Darm übertreten. Geschähe das auch mit der Milch, so würde das Kasein im Gegensatz zu anderen Eiweißkörpern unverdaut in den Darm gelangen; dies wird durch die Verwandlung der Milch in eine feste Masse verhindert. Das Koagulum wird dann gerade so, wie anderes geronnenes Eiweiß, von Pepsin und Salzsäure allmählich in Peptone umgewandelt.

Der vorher erwähnten **Lipase** des Magensaftes kommt wegen ihrer kleinen Menge nur eine untergeordnete Bedeutung zu; sie spaltet bei schwach saurer Reaktion Fett in seine Komponenten Glycerin und Fettsäure, aber die Wirkung ist unbedeutend.

Wir wenden uns nunmehr der Frage zu, durch welche Umstände die **Abscheidung des Magensaftes** herbeigeführt wird. Am besten legt man zum Studium dieser Frage eine *Magenfistel* an; dann kann der sich bildende Saft durch eine Kanüle direkt nach außen abfließen. Geht man nun durch die Kanüle mit einem Glasstab oder einer Federpose ein und reizt die Magenschleimhaut mechanisch, so erhält man wohl Magenschleim, der sich an der Oberfläche gebildet hat, aber keinen Magensaft; auch andere mechanische Reize, wie Sand oder Glaspulver, sind unwirksam. Aber auch manche Nahrungsstoffe sind erstaunlich schlechte Erregungsmittel; ausgekochtes Fleisch und Brot wirken beim

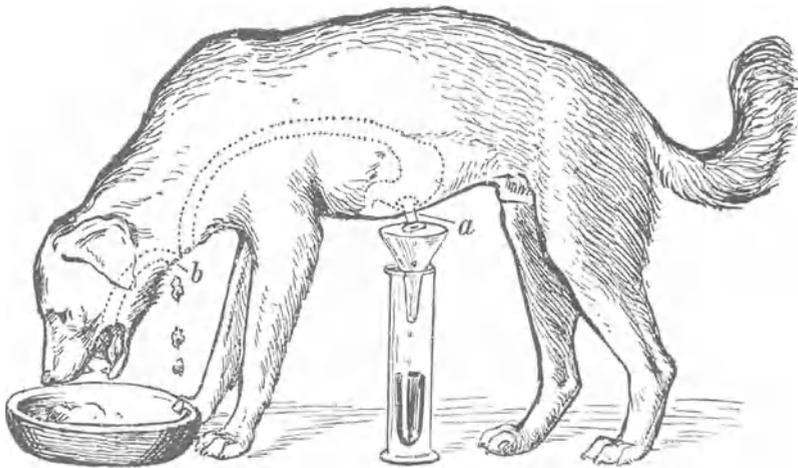


Abb. 3. PAWLOWS Scheinfütterung eines Hundes mit Magen- und Ösophagusfistel (nach v. FREY).

Hund gar nicht, flüssiges Hühnereiweiß erst nach ca. 70 Minuten schwach, Wasser ist ebenfalls ein nur mäßiger Reiz. Dagegen verursachen die Extraktivstoffe des Fleisches etwa in Form von „Liebig's Fleischextrakt“ schon nach 10—15' eine stundenlang anhaltende Saftabscheidung; ebenso die Verdauungsprodukte des Fleisches. Das Wirksame ist dabei wahrscheinlich das Histamin, ein basisches Spaltprodukt der Eiweißkörper, das uns noch öfter beschäftigen wird. Offenbar erhalten die Magendrüsen also gar nicht, so wie man denken sollte, den ersten Anstoß durch die Speise selbst, sondern werden erst sekundär durch deren Verdauungsprodukte in Tätigkeit versetzt.

In der Tat ist das *primum movens* etwas ganz anderes. PAWLOW hat gezeigt, daß der Anreiz zur Sekretion im allgemeinen von der Mundhöhle ausgeht. Sein Beweis ist die „Scheinfütterung“: durchschneidet man bei einem Hund den Ösophagus, heilt die Enden in die Haut des Halses ein, und legt dann noch eine Magenfistel an, so kann man den Hund füttern, ohne daß die Speise in den Magen gelangt; denn sie fällt immer wieder aus der Halsöffnung des Ösophagus heraus (Abb. 3). 3—5'

nachdem die Scheinfütterung begonnen hat, fängt nun aus der Fistel reichlich reiner Magensaft zu fließen an, und dieser Fluß kann 2—4 Stunden anhalten. Die Sekretion ist im allgemeinen reichlicher bei Fleisch- als bei Brotfütterung, sie ist spärlich, wenn der Hund satt, massenhaft, wenn er begierig ist. Deshalb bezeichnete PAWLOW diesen Saft sehr prägnant als „*Appetitsaft*“. Die Sekretion erfolgt also reflektorisch durch Reizung der Geschmacksorgane. Die Erregung kann aber auch von anderen Sinnen ausgehen; der Geruch, der Anblick der Speise und alle Momente, welche wir bei den Speicheldrüsen in den „bedingten Reflexen“ wirken sahen, kommen auch hier wieder zur Entfaltung. Der Schritt des Wärters, der das Futter zu bringen pflegt, lockt den Saft hervor, der Ärger über eine Katze, welche dem Hund vorgehalten wird, bringt den Fluß zum Versiegen (BICKEL). Bei einem Kind, dem wegen eines narbigen Ösophagusverschlusses eine Magenfistel angelegt werden mußte, und dem eine Zeitlang regelmäßig beim Essen auf einer Trompete vorgeblasen wurde, floß Saft aus der Fistel auch dann, wenn allein der Trompetenton erklang (BOGEN). Man kann auch jemandem in der Hypnose suggerieren, er verzehre eine Mahlzeit; nach einigen Minuten fließt alsdann für längere Zeit reichlich Saft in den leeren Magen. So erkennt man, welche Bedeutung dem assoziativen Moment für die Verdauung zukommt, wie die Tischglocke, der Schmuck der Tafel, die Fräcke der Kellner der Ernährung unmittelbare Dienste leisten, als man sonst wohl meint, und wie wahr es sein kann, daß einem „das Essen vor Ärger im Magen liegen bleibt“.

Der Appetitsaft regt in der Tat die Magenverdauung erst an; denn Stoffe, die, wie wir sahen, an sich reizlos sind, wie gekochtes Fleisch oder Brot, werden nun mit dem Appetitsaft übergossen, und wenn sich dann erst einmal Verdauungsprodukte gebildet haben, so können diese, wie wir ebenfalls sahen, direkt weiter erregen. So wird der „Appetitsaft“ zum „*Zündsaft*“, wie PAWLOW sich ausdrückt, die einmal angezündete Sekretion kann dann 4—10 Stunden lang fortgehen.

So erscheint auch die Bedeutung der *Fleischbrühe*, besonders derjenigen, die, aus viel Fleisch mit wenig Wasser hergestellt, als „*Kraftbrühe*“ Patienten oft zur Kräftigung gegeben wird, in neuem Licht. Denn BUNGE hat schon vor langer Zeit darauf aufmerksam gemacht, daß bei ihrem geringen Gehalt an Leim, ihrem Gehalt an Salzen, Kreatin, Kreatinin und einigen anderen Extraktivstoffen von einer direkt kräftigenden Wirkung gar nicht die Rede sein kann. Aber da die Fleischextraktivstoffe zu den stärksten Sekretionsreizen für die Magenschleimhaut gehören, so ersetzt die Brühe den mangelnden Appetit, bei Gesunden so gut wie bei Kranken, und die alte Gewohnheit, die Suppe zum ersten Gang des Mittagmahls zu machen, erhält ihre physiologische Rechtfertigung.

Den anregenden Stoffen stehen solche gegenüber, welche die Magensekretion hemmen; es sind vor allem Fette und Alkali. Damit steht in Zusammenhang, daß nach einer fettreichen Mahlzeit durch den offenen Pylorus alkalischer Pankreassaft aus dem Duodenum in den Magen eintritt, und daß sich nun schon im Magen eine reichlichere Fettverdauung vollzieht, wie sie sonst eigentlich erst im Darm einsetzt (BOLDYREFF). So ist begreiflich, daß man eine fette Speise als „schwer“ empfindet, daß sie einem „Magendrücken“ verursacht.

Die Erfahrungen bei der Scheinfütterung lassen es als selbstverständlich erscheinen, daß **sekretorische Nerven** für die Magendrüsen existieren. In der Tat gibt Reizung des durchschnittenen Vagus Saftbildung, und der Appetitsaft fließt nicht mehr, wenn die Vagi durchschnitten oder durch Atropin ausgeschaltet sind. Aber es muß auch noch andere Erregungsmöglichkeiten geben; denn auch nach der Vagusdurchschneidung, ja sogar nach völliger nervöser Isolierung des Magens verursacht Nahrungsaufnahme in den Magen noch Saftbildung (POPIELSKI). Da zahlreiche Nervenfasern und Ganglienzellen in der Magenwand enthalten sind, so könnte deren unmittelbare Erregung dafür maßgebend sein, und diese kann sowohl von der Magenschleimhaut her als auch vom Blut aus erfolgen. Spritzt man einen mit Salzsäure hergestellten und dann neutralisierten Extrakt der Magenschleimhaut einem Hund intravenös ein, so kommt es zu lebhafter Sekretion. Das in dem Extrakt enthaltene „Gastrin“ oder „Magensekretin“ ist vielleicht mit dem schon genannten Eiweißderivat Histamin identisch, das ebenfalls bei subkutaner Applikation eine starke Magensaftabscheidung verursacht.

Der Ort der Magensaftbildung sind die zahlreichen, die ganze Magenwand von innen auskleidenden Magendrüsen. Es gibt deren hauptsächlich zwei Sorten: die *Fundusdrüsen*, und die *Pylorusdrüsen*. Nur im Fundusteil des Magens reagiert die Schleimhaut sauer, im Pylorusteil dagegen schwach alkalisch, ebenso wie die Oberfläche im Fundus schwach alkalisch reagiert, wenn kein Magensaft sezerniert wird. Die Salzsäure wird danach allein in den Fundusdrüsen gebildet; das Sekret der Pylorusdrüsen, ebenso wie der an der Innenfläche des Magens produzierte Schleim enthalten Alkali. Die Fundusdrüsenschläuche bestehen bekanntlich aus zwei Arten von Zellen, den vorherrschenden „Hauptzellen“, und den weniger zahlreichen, aber größeren, scheinbar von außen auf die Drüsen daraufgelegten sogenannten „Belegzellen“. Da die Belegzellen allein im Fundusteil vorkommen, werden sie als Produktionsstätte der Salzsäure angesehen, während die Bildung des Pepsins, die auch im Pylorusteil statthat, in die Hauptzellen verlagert wird.

Wie die Abscheidung der Salzsäure aus dem neutralen Blut von den Belegzellen zustande gebracht wird, ist unbekannt. Nur muß dafür ein gewisses Quantum von Chlorionen disponibel sein. Infolgedessen versiegt die Salzsäurebildung mehr oder weniger, wenn man aus der Nahrung möglichst alles Kochsalz fortläßt. Die Abscheidung der starken Säure aus dem neutralen Blut hinterläßt notwendigerweise einen Alkaliüberschuß, welcher alsbald durch die Tätigkeit der Darmdrüsen, vor allem aber durch die Tätigkeit der Nieren beseitigt wird; diese produzieren während der Magenverdauung einen Harn, welcher entweder weniger sauer ist als sonst, oder sogar neutral bis alkalisch reagiert. Diese Änderung der Harnazidität kann direkt als ein Symptom einer regelrechten Säurebildung im Magen diagnostisch verwertet werden.

Zum *Nachweis der Salzsäure* des Magensaftes sind besondere Reagenzien angegeben worden. Der Nachweis der Chlorionen mit Silbernitrat genügt natürlich nicht, ebensowenig die Reaktion mit Lackmus, da bei Salzsäuremangel der Mageninhalt aus Gründen, die wir gleich kennen lernen werden, vor allem durch Milchsäure saure Reaktion erhalten kann. Zum Nachweis dient meist das „*Günzburgsche Reagenz*“ (eine alkoholische Lösung von Phlorogluzin und Vanillin); einige Tropfen davon mit einigen Tropfen Magenflüssigkeit vorsichtig eingedampft,

geben bei Anwesenheit von freier Salzsäure einen ziegelroten Rückstand. Ferner schlägt Kongorot bei Zusatz von freier Salzsäure in blau, Methylviolett ebenfalls in blau um. Alle drei Reagenzien werden durch organische Säuren, wie Milchsäure, nicht verfärbt. Der Grund ist der folgende: alle drei Reagenzien sind Indikatoren, welche, wie die sonst üblichen Indikatoren, bei einer bestimmten Wasserstoffionenkonzentration einen Farbumschlag geben; bei diesen speziellen Indikatoren genügt aber der Wasserstoffionengehalt der schwachen, d. h. relativ wenig dissoziierten organischen Säuren noch nicht, so wie z. B. bei Lackmus, um die Farbe zu verändern, sondern erst die größere H^+ -Konzentration, wie sie in der im Magensaft enthaltenen Salzsäure vorhanden ist.

Die bequeme Unterscheidung von Salzsäure und organischer Säure ist von Wichtigkeit, weil in pathologischen Fällen, z. B. beim Magenkrebs oder bei Magenerweiterung, die Bildung der Salzsäure oft versiegt. Der Salzsäuremangel ist also an sich ein wichtiges Krankheitssymptom; seine Folge ist aber das Auftreten der schon genannten *Milchsäure* neben

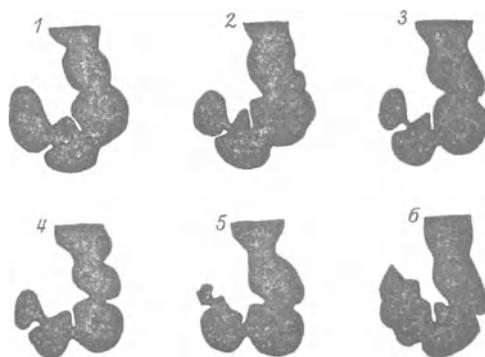


Abb. 4. Röntgenographische Aufnahmen der Peristaltik des menschlichen Magens.
Nach COLE schematisiert.

1—6 sechs verschiedene Phasen einer peristaltischen Welle.

anderen organischen Säuren. Sobald nämlich Salzsäure im Mageninhalt fehlt, wuchern die mit der Nahrung verschluckten Bakterien im Magen, und es kommt durch Vergärung der Kohlehydrate zur Bildung der Milchsäure. So werden wir darauf aufmerksam, daß *der Salzsäure neben ihrer Aktivierung des Pepsins noch eine weitere wichtige Funktion zukommt, sie wirkt antibakteriell*, d. h. sie hemmt das Wachstum der Bakterien und schützt so den Darm vor einem Übermaß an Mikroorganismen.

Die Einwirkung des Magensaftes wird unterstützt durch die **Magenbewegungen**. Diese haben nämlich nicht bloß den Zweck, die Speise in den Darm weiterzubefördern, sondern sie sorgen auch dafür, daß die Speise ausreichend mit Magensaft in Berührung kommt.

Die Bewegungen rühren von der Muskulatur her, welche aus einer äußeren Schicht längs verlaufender Fasern und einer inneren Schicht teils ringförmig den Magen umfassender, teils diagonal verlaufender Fasern besteht. Diese Muskulatur ist im Pylorusteil des Magens stärker als im Fundusteil und umschließt dort das sogenannte *Antrum pylori*.

Die Bewegung ist eine *peristaltische Bewegung*, d. h. es laufen rhythmische Kontraktionswellen, an der Kardialia anfangend, bis zum Pfortner über den Magen hin, im allgemeinen mit großer Regelmäßigkeit,

etwa alle 10—20' eine Welle. Diese Bewegungen sind im Fundusteil ziemlich oberflächlich, im Pylorusteil steigern sie sich, so daß gegen den Pylorus hin tiefe zirkuläre Schnürfurchen entstehen, natürlich mit dem Effekt, daß sie den Mageninhalt knetend vor sich hertreiben. Man kennt diesen Ablauf genau, seitdem man röntgenkinematographische Aufnahmen des mit Wismutbrei gefüllten Magens macht; man erhält dann Serien von Bildern, wie sie etwa die Abb. 4 zur Darstellung bringt (CANNON, RIEDER). Jede Welle braucht etwa $\frac{1}{2}$ Minute, um über den Magen hinzulaufen; daher sieht man auf den Bildern jedesmal mehrere Schnürfurchen zugleich.

Sobald eine peristaltische Welle am Pförtner anlangt, öffnet sich nicht etwa jedesmal dessen Sphinkter, sondern nur von Zeit zu Zeit; das hängt noch von besonderen Umständen ab. So kommt es, daß der Mageninhalt im Antrum pylori kräftig durchknetet wird, und daß besonders gröbere Brocken dort noch zerkleinert werden. Die Intensität der Peristaltik variiert je nach der Menge und Beschaffenheit der Speise. Füllung, besonders rasche Füllung des Magens, regt sie an. Fetthaltige Nahrung, deren hemmenden Einfluß auf die Magensaftsekretion wir schon kennen lernten, hemmt auch die Peristaltik, stark gewürzte Speisen steigern sie.

Die Pylorusöffnung wird reflektorisch besonders vom Duodenum aus reguliert (HIRSCH, VON MERING, PAWLOW); die Reize sind teils mechanischer, teils chemischer Natur. Legt man eine Duodenalfistel an, schiebt in deren Öffnung eine Gummiblase und bläst sie auf, so daß die Wände des Duodenums gespannt werden, so schließt sich der Pförtner; in ähnlicher Weise verursacht die pralle Füllung des Duodenums mit Speise Pylorusschluß und sistiert so die weitere Speisenentleerung aus dem Reservoir des Magens, bis sich das Duodenum seinerseits jejunumwärts entleert hat. Benetzt man von der Fistelöffnung aus die Duodenalschleimhaut mit Säure oder mit Fett, so schließt sich ebenfalls der Pylorus, so daß trotz Fortbestands der Magenperistaltik die Entleerung des Magens plötzlich unterbrochen wird. Offenbar soll also die Magenentleerung auch gehemmt werden, bis die Azidität des Darminhalts durch das Alkali des Pankreas- und Darmsafts genügend abgestumpft, und bis das Fett genügend verarbeitet ist. Andererseits löst Berieselung der Duodenalschleimhaut mit Wasser oder mit einer alkalischen Lösung den Pylorusschluß, und der Mageninhalt wird nun von Antrum pylori in einzelnen Schüben ins Duodenum gespritzt. Befindet sich reichlich Fett innerhalb des Magens, so kommt es ebenfalls, wie schon (S. 31) gesagt wurde, zum Klaffen des Pylorus, aber da zu gleicher Zeit die Magenperistaltik durch das Fett gehemmt ist, so tritt nun vom Duodenum aus Pankreassaft und Galle in den Magen über, ja sie können sogar durch eine antiperistaltische Bewegung des Duodenums rückwärts getrieben werden, und die Fettverdauung, welche sonst in ausgiebigem Maß erst im Darm einsetzt, vollzieht sich bereits im Magen (BOLDYREFF).

Auch der völlig leere Magen führt noch schwache peristaltische Bewegungen aus. Man kann sie beim Menschen beobachten, wenn man ihm eine mit einer dünnen Gummiblase unten verschlossene Schlundsonde in den Magen einführt und den Gummibeutel durch Einblasen von Luft etwas bläst; die leichten rhythmischen Drucke, welche von seiten der Magenwandungen auf die Blase ausgeübt werden, sind dann durch „Luftübertragung“ graphisch zu registrieren (MORITZ).

Man macht dies etwa so, daß man die Schlundsonde durch Schlauch mit einer sogenannten MAREYSchen Trommel verbindet (siehe Abb. 5). Sie besteht aus einer flachen Kapsel, deren obere Wand von einer dünnen Gummimembran gebildet ist; auf dieser ruht ein leichter Strohhebel. Jede Druckschwankung im Innern der Kapsel erzeugt eine Hebelbewegung, welche auf einer langsam sich bewegenden berußten Schreibfläche aufgeschrieben wird.

Die Bewegungen des leeren Magens sind als Hungerbewegungen bezeichnet worden, weil sie gleichzeitig mit dem *Gefühl des Hungers* auftreten (CANNON, CARLSON). Dies hat zu der Auffassung geführt, daß die Bewegungen direkt durch Reizung sensibler Nerven in der Magenwand den Hunger erregen. Man könnte dafür unter anderm anführen, daß es bei den Eingeborenen Südamerikas gebräuchlich ist, den Hunger durch Kauen von Kokablättern zu bekämpfen; da das darin enthaltene Kokain die sensiblen Nerven lähmt, so könnte es auch die vom Magen aus durch die Hungerperistaltik ausgelösten Sensationen unterdrücken. Aber diese ganze Deutung ist wohl nicht richtig, oder vielmehr nicht ausreichend; denn es wird angegeben, daß auch nach Exstirpation des Magens das Hungergefühl noch weiter besteht, und die Kokainwirkung kann auch im Zentralnervensystem und braucht nicht in der Magenschleimhaut lokalisiert zu sein, da auch subkutane Einverleibung des Kokains den Hunger lindern soll. Der Hunger scheint übrigens auch nicht dadurch, oder wenigstens nicht allein dadurch zustande zu kommen, daß man die Leere des Magens irgendwie spürt; denn, wenn man den Magen mit großen Mengen von etwas Unverdaulichem, z. B. mit einem Brei von Bariumsulfat füllt, so hört nach manchen Angaben der Hunger doch nicht auf. Der Hunger hat seinen Ursprung zum Teil wohl ganz wo anders; wenn man einem Hungerten Nahrung irgendwie beibringt, z. B. eine Traubenzuckerlösung subkutan, oder irgendwelche Speise als Klysma verabreicht, so wird dadurch wenigstens zeitweilig das Hungergefühl beseitigt; der Hunger entsteht danach bei einer gewissen

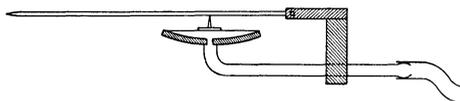


Abb. 5. Schematische Darstellung einer MAREYSchen Trommel.

chemischen Zusammensetzung des Blutes; er ist die Folge eines „Blutreizes“, wie es deren viele gibt. Trotzdem ist nicht zu leugnen, daß die so häufige Lokalisation des Hungers in die Magengegend doch auch auf eine Mitbeteiligung von Magensensationen hinweist; die Hungerkontraktionen steigern sich auch oft deutlich mit periodischen Steigerungen des Hungergefühls.

Eine eigentümliche Kombination von Bewegungen des Magens mit anderen Bewegungen ist das *Erbrechen*. Der Magen ist daran in erster Linie durch Öffnung der Kardia beteiligt. Abgesehen davon ist der Hauptakt die plötzlich einsetzende Bauchpresse, d. h. die gleichzeitige Kontraktion von Bauchmuskeln und Zwerchfell. Die Magenbewegungen beim Brechakt lassen sich am besten auf dem Röntgenshirm beobachten. Man sieht dann, daß die Peristaltik des Antrum sich verstärkt, während zugleich der Fundusteil erschlafft; da der Pylorus geschlossen bleibt, so wird der Mageninhalt vom Antrum in den Fundus gedrängt und besonders von der Bauchpresse durch die sich unter dem Druck öffnende Kardia in den Ösophagus und Pharynx hinaufgetrieben. Eine regelrechte Antiperistaltik wird beim Erbrechen nicht beobachtet. Bekanntlich gesellt sich zu diesen Bewegungen noch eine Reihe weiterer Vorgänge: tiefe Inspiration, Hebung von Kehlkopf und Zunge, Schweißausbruch und Speichelfluß. Das läßt schon vermuten, daß für den ganzen Aktionskomplex, ähnlich wie für den Schluckakt, ein Koordinationszentrum im Zentralnervensystem vorhanden ist. Dieses sogenannte „Breachzentrum“ ist wiederum in der Medulla oblongata gelegen (THUMAS). Es wird am häufigsten reflektorisch von der Rachen- oder der Magenschleimhaut

aus in Tätigkeit versetzt, z. B. durch manche Speisen oder durch Brechmittel, wie das weinsaure Antimonylkalium, den sog. Brechweinstein. Das Brechzentrum kann aber auch durch unmittelbaren Angriff in der Medulla oblongata erregt werden, so wenn eine Gehirngeschwulst einen Druck auf sie ausübt, oder wenn das Brechmittel Apomorphin durch subkutane Einspritzung in den Kreislauf gebracht wird, oder wenn bei einer schweren Nierenkrankheit das Blut mit giftigen Stoffwechselprodukten überladen ist. Die zentripetale Leitung für den Reflex wird von sensiblen Fasern des Vagus und des Glossopharyngeus gebildet; daher ist z. B. nach Vagusdurchschneidung der Brechakt durch Reizung der Magenschleimhaut nicht mehr auszulösen.

Das Studium des Brechaktes, vor allem aber die Physiologie der normalen Magenbewegungen legt die Frage nach der **motorischen Innervation des Magens** nahe. Sie geschieht durch Vagus und Sympathikus, und zwar stehen die beiden wesentlich im Antagonistenverhältnis zueinander; der Vagus wirkt vorwiegend fördernd auf die Peristaltik, der Sympathikus vorwiegend hemmend, gerade umgekehrt wie beim Herzen (siehe Kap. 10). Von großem theoretischen Interesse ist es, daß die peristaltischen Bewegungen auch ganz unabhängig von diesen Nervenimpulsen vor sich gehen können; durchschneidet man nach Möglichkeit alle von außen herantretenden Nerven, oder noch radikaler: exstirpiert man den Magen, so hört seine Peristaltik doch nicht auf (HOFMEISTER). Wir stoßen hier zum ersten Mal auf einen Fall von sogenannter **Automatie**. Unter automatischen Funktionen versteht man nämlich solche Funktionen, welche zwar nicht ganz unabhängig von äußeren Impulsen zustandekommen, aber doch auf diese nicht angewiesen sind; die Magenbewegungen können zwar vom Vagus aus beeinflußt werden, sie kommen aber auch ohne Vagus zustande. Das Prototyp der automatischen Organe ist das ausgeschnittene schlagende Herz.

In jedem Fall von Automatie werden wir uns zu fragen haben, welcher innerlicher Mechanismus dem Funktionieren zugrunde liegt. Gewohnt, irgendwelche Bewegungen auf die Anregung von seiten des Zentralnervensystems zu beziehen, werden wir zuerst nach entsprechenden nervösen Elementen fragen, welche Impulse aussenden können. Beim Zentralnervensystem verlegt man den Ort der Impulsgebung meist in die Ganglienzellen, weil deren Besitz das Zentralnervensystem vor den peripheren Nerven auszeichnet. Ganglienzellen gibt es nun aber auch in allen automatischen Organen, und so wird man, wenn nicht besondere Gründe dagegen sprechen, diesen peripheren Ganglienzellen, welche dem sympathischen Nervensystem angehören, die gleichen Funktionen zutrauen, wie den Ganglienzellen im Zentralnervensystem. Hier beim Magen wollen wir auf die Frage, mit welchem Grad von Sicherheit seine automatische Bewegung auf die Anwesenheit von peripheren Ganglienzellen bezogen werden kann, nicht eingehen. Jedenfalls breitet sich zwischen der äußeren Längs- und der inneren Zirkulärfaserschicht der Muskularis des Magens ein Nervennetz aus, in dessen Knotenpunkten Ganglienzellen liegen. Die einzelnen Abschnitte dieses Netzes senden ihre Impulse für sich zu den einzelnen Magenabschnitten; so wird es erklärlich, daß, wenn man z. B. das Antrum durch einen Zirkulärschnitt vom übrigen Magen trennt, die Antrumperistaltik ungestört fortfährt.

Nachdem wir nun die sekretorische und motorische Tätigkeit des Magens im einzelnen kennen gelernt haben, sei zusammenfassend

ein Bild von der *Gesamtleistung des Magens für die Verdauung* entworfen. Wenn die zerkaute Nahrung in einzelnen Portionen in den Magen geschluckt wird, so werden nicht, wie man sich das früher vorstellte, die Bissen durch lebhaftere peristaltische Bewegungen durcheinander geworfen und so gleichmäßig mit Magensaft durchtränkt, sondern sie lagern sich teils über einander, teils sinken die zuletzt geschluckten in die Masse der vorher geschluckten ein und drängen sie beiseite. So liegen die ersten Bissen am tiefsten, zum Teil bilden sie auch eine Hülle um die später angelangten. Auf jeden Fall kommen die ersten Bissen von vornherein in Kontakt mit der Magenwand, werden mit Saft übergossen und alsbald durch die Verdauung in einen dünnen Brei verwandelt, welcher infolge des von der Magenmuskulatur ausgeübten fast konstanten Drucks (von etwa 60—80 mm Wasser) und direkt unterstützt von der Wirkung der Peristaltik pyloruswärts ausweicht, während die kardiawärts und die zentraler gelegenen, später verschluckten Portionen zunächst mit Magensaft nicht in Berührung kommen. Diese Portionen sind es, in welchen das diastatische Ferment des Speichels noch eine Zeitlang amyolytisch

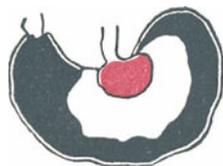


Abb. 6. Schichtung der Speisen im Magen einer Ratte (nach GRÜTZNER).

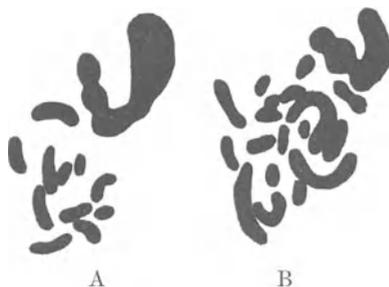


Abb. 7. Röntgenogramme von Magen und Dünndarm einer Katze, zwei Stunden nach Fütterung von Fleisch (A) und von Kohlehydrat (B). Nach CANNON.

wirken kann, nämlich solange es noch nicht durch die Säure des Magensafts inaktiviert worden ist, und so verstehen wir nun — was früher nicht verständlich war (S. 19) —, daß die Speicheldiastase doch dazu kommt, bei der Verdauung mitzuwirken.

Von dieser eben geschilderten *Schichtung des Mageninhaltes* (ELLENBERGER und SCHEUNERT, GRÜTZNER) (siehe Abb. 6) kann man sich vortrefflich überzeugen, wenn man eine weiße Ratte erst zwei Tage hungern läßt, sie dann nacheinander mit je einer kleinen Portion von Semmel mit Tierkohle, Semmel mit Milch, und Semmel mit Karmin füttert, und sie darauf sofort tötet; legt man dann den Magen in eine Kältemischung, bis er steif gefroren ist, und schneidet ihn durch, so findet man die rote, die weiße und die schwarze Speise scharf gesondert nebeneinander liegen.

Je breiiger die verschluckten Bissen von vornherein sind, um so rascher entweichen sie im allgemeinen aus dem Magen, ein Kohlehydratbrei rascher als ein eiweißhaltiger Brei, und dieser wieder rascher als ein fettiger Brei (siehe Abb. 7). Flüssigkeit, welche zu der relativ trockenen Kost zwischendurch hinzugetrunken wird, fließt im allgemeinen von der Kardia direkt längs der kleinen Kurvatur ab zum Pylorus und in den Darm; das geschieht teils dadurch, daß die Schleimhaut des Magens

an dieser Stelle Längsfalten hat, teils durch eine eigene Muskulatur, welche bei ihrer Kontraktion einen „Sulcus gastricus“ von der Kardie zum Pfortner hin bildet (RETZIUS, LUSCHKA). So könnte auch Milch leicht direkt durch den Magen hindurchfließen, wenn sie nicht, wie früher (S. 29) geschildert, durch den Labungsvorgang koaguliert würde.

So erstreckt sich die Magenverdauung einer größeren Mahlzeit bis zur völligen Entleerung des Magens je nachdem auf einen Zeitraum von 2—3 bis zu 6—8 Stunden. Vom Menschen weiß man das teils durch Magenspülung, teils durch Röntgendurchleuchtung nach Zugabe von Wismutsalz zur Speise. Beim Tier hat man auch Duodenalfisteln angelegt. Das letztere Verfahren gab aber meist viel zu kurze Verdauungszeiten, weil, wenn die aus dem Magen herausgespritzten Portionen Chymus, durch die Fistelöffnung nach außen entleert werden, der vom Duodenum sonst reflektorisch ausgelöste Schluß des Pylorus nicht zustande kommt. TOBLER verfuhr deshalb so, daß er die aus der Fistel herausfallenden Portionen immer wieder duodenalwärts einspritzte. Auf die Weise erzielte er normale Verdauungszeiten und konnte sich zu gleicher Zeit durch Probenentnahme aus den einzelnen Portionen davon überzeugen, daß beim Hund aus einer Fleischmahlzeit etwa 50% vom Eiweiß in Form von Albumosen und Peptonen in den Darm übertreten, während etwa 30% schon innerhalb des Magens zur Resorption gelangen.

Hiernach könnte man zweifeln, ob eine Totalexstirpation des Magens mit einer einigermaßen ungestörten Verwertung der Nahrung verträglich sei. In der Tat hat man ja bei Tier und Mensch den Magen operativ entfernt. Das Fazit ist, daß *der Magen ohne besondere Gefährdung entbehrt werden kann*. Das wird verständlicher, wenn wir erfahren, daß die Eiweißverdauung, welche ja die wesentliche chemische Leistung des Magens ist, auch im Darm, und sogar noch vollständiger als im Magen, vonstatten geht. Außerdem macht man sich aber beim Menschen die Erfahrungen der Physiologie so weit zunutze, daß man Patienten ohne Magen die Nahrung erstens möglichst zerkleinert zuführt und zweitens nicht in einzelnen größeren Mahlzeiten, welche ein Reservoir erfordern, sondern in kleinen Portionen, welche im engen Darm Platz finden. Aber der Fortfall der antibakteriellen Wirkung des Magensafts hat sich bei der Magenexstirpation immerhin darin geltend gemacht, daß oft Symptome erhöhter Fäulnis im Darm zu beobachten waren.

4. Kapitel.

Die Verdauung im Dünndarm.

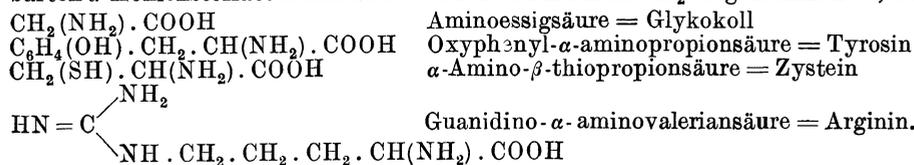
Der Pankreassaft 39. Chemie der Eiweißkörper 39. Die tryptische Eiweißverdauung 41. Die stereochemische Spezifität der Fermente 42. Die Entero-kinase und das Labferment 43. Chemie und Verdauung der Kohlehydrate 43. Verdauung der Fette 43. Die Absonderung des Pankreassaftes 45. Die Zusammensetzung der Galle 46. Die Galle als Verdauungssaft und als Exkret 47. Die Absonderung der Galle 49. Der Darmsaft 51. Die Darmbewegungen und ihre Innervation 52.

Sobald der Chymus aus dem Magen ins Duodenum eingetreten ist, wird er von neuem von zwei Verdauungssäften übergossen, welche charakteristischerweise an der gleichen Stelle, auf der Papilla duodenalis, ins Darmlumen fließen, vom *Bauchspeichel* oder *Pankreassaft* und von der *Galle*.

Der **Pankreassaft** ist eine farblose durchsichtige Flüssigkeit. Man kann sie rein und in reichlicher Menge gewinnen, wenn man eine permanente Pankreasfistel anlegt; man macht das am besten nach HEIDENHAIN und PAWLOW so, daß man die Mündung des Ductus pancreaticus zusammen mit einem Stückchen Duodenalwand in die äußere Haut verlagert. Die *Analyse des Saftes* ergibt, daß er durch reichlichen Gehalt an Natriumbikarbonat schwach alkalisch reagiert; dieses Natriumbikarbonat verleiht dem Saft sein physiologisch wichtiges großes Säurebindungsvermögen. Ferner enthält der Saft Salze und etwas Eiweiß, endlich — die Hauptsache — Enzyme und zwar Enzyme für alle drei Hauptkategorien von Nahrungsstoffen. Dadurch erhält der Bauchspeichel eine besonders große Bedeutung für die Verdauung.

Gehen wir nun auf die einzelnen Umwandlungen der Nahrungsstoffe ein, so soll zugleich Gelegenheit genommen werden, einige Daten aus der *Chemie der Nahrungsstoffe* zu erörtern.

Die Chemie der Eiweißkörper oder Proteine. Die Eiweißkörper bestehen aus den 5 Elementen C, H, N, O und S. Ihre mittlere Zusammensetzung ist die folgende: C 50—55%, H 6,5—7,3%, N 15—17,6%, O 19—24%, S 0,3—2,4%. Sie sind hochmolekulare Körper, welche durch hydrolytische Spaltung, am besten durch Kochen mit verdünnter Säure, in ihre charakteristischen Bauelemente, nämlich in *Aminosäuren*, zerfallen. Die Aminosäuren sind fast ohne Ausnahme α -Aminosäuren, d. h. organische Säuren, bei welchen an dem der Carboxylgruppe benachbarten α -Kohlenstoffatom eine Substitution von H durch NH_2 vorgenommen ist, z. B.



Das α -C-Atom macht die Aminosäuren optisch aktiv, da seine vier Valenzen alle verschieden abgesättigt sind. Die Aminosäuren gehören teils der Gruppe der aliphatischen, teils der Gruppe der aromatischen Verbindungen an; die wichtigsten sind im folgenden namentlich aufgezählt:

1. *Aliphatische Aminosäuren:*

a) *Monamino*säuren: Glykokoll (Glyzin), Alanin, Serin, Zystein und Zystin, Valin, Leuzin, Asparaginsäure, Glutaminsäure.

b) *Diamino*säuren: Lysin, Arginin.

2. *Aromatische Aminosäuren:*

a) *isozyklische*: Phenylalanin, Tyrosin.

b) *heterozyklische*: Histidin, Tryptophan, Prolin, Oxyprolin.

Besondere Eigenschaften und die besondere Bedeutung der einzelnen Aminosäuren werden bei Gelegenheit später erörtert werden.

Diese Aminosäuren sind nun im Eiweiß nach EMIL FISCHER wohl hauptsächlich so verkuppelt, daß die Aminogruppe eines Aminosäuremoleküls mit der Carboxylgruppe eines anderen unter Wasseraustritt reagiert, also z. B. $(\text{NH}_2) \text{CH}_2 \cdot \text{COOH} + (\text{NH}) \text{CH} \cdot \text{COOH} = (\text{NH}_2) \text{CH}_2 \cdot \text{CO} - (\text{NH}) \text{CH} \cdot \text{COOH}$



So können lange Ketten aneinander gereihter Aminosäuren entstehen; diese synthetischen Produkte sind von E. FISCHER als *Peptide* bezeichnet worden; je nach der Anzahl der darin enthaltenen Aminosäure-Moleküle spricht man von Di-, Tri-, Tetra- bis Polypeptiden. Die Komplexe von größerem Molekulargewicht haben viel Ähnlichkeit mit den Albumosen und Peptonen, welche, wie wir sahen, beim peptischen Abbau der Eiweißkörper entstehen. Einige Reaktionen der Eiweißkörper, Albumosen und Peptone sind früher schon erwähnt (siehe S. 28).

Am Aufbau der überaus zahlreichen, in der Natur vorkommenden Eiweißkörper sind die einzelnen der genannten Aminosäuren quantitativ in sehr verschiedenem Maße beteiligt; die folgende Tabelle gibt darüber für einige wichtigere Eiweißsubstanzen Aufschluß (ABDERHALDEN, FÜRTH):

Aminosäuren	tierisches Eiweiß			tierische Gerüstsubstanzen		Pflanzen-Eiweiß		
	Eieralbumin	Kasein	Serum-globulin	Elastin	Keratin	Legumin (aus Erbsen)	Gliadin (aus Weizen)	Edestin (aus Hanf)
Glykokoll . . .	0	0	3.5	26.0	4.7	0.4	0	3.8
Alanin	3.0	0.9	2.2	6.6	1.5	2.0	2.5	3.6
Valin	1.0	1.0	2.0	1.0	0.9	—	0.3	+
Leuzin	7.0	10.5	15.0	21.4	7.1	8.0	6.0	21.0
Serin	—	0.23	—	—	—	0.5	0.1	0.3
Zystin	0.3	0.06	1.2	—	0.6	—	0.45	0.25
Phenylalanin .	4.5	3.2	3.8	3.9	—	3.75	2.6	2.5
Tyrosin	1.0	4.5	2.5	0.34	3.2	1.5	2.4	2.1
Histidin	—	2.6	—	—	—	1.7	1.7	2.2
Prolin	2.5	3.1	2.8	1.7	3.4	3.2	2.4	1.7
Tryptophan . .	2.6	2.2	4.4	—	1.2	+	1.0	3.0
Lysin	2.0	5.8	—	—	—	5.0	0	1.65
Arginin	2.0	4.8	—	0.3	—	11.7	3.4	14.0
Asparaginsäure	1.5	1.2	2.5	—	10.0	5.3	1.2	4.5
Glutaminsäure	9.0	11.0	8.5	0.8	3.7	17.0	37.0	14.0

Die Tabelle lehrt, daß recht große Differenzen in der Zusammensetzung des Moleküls vorkommen; man achte etwa auf den außerordentlich verschiedenen Gehalt an Arginin oder an Glutaminsäure, man achte ferner darauf, daß manche Aminosäuren bei einem bestimmten Körper ganz fehlen, wie z. B. das Lysin und das Glykokoll beim Gliadin. Daran werden wir uns später bei der Besprechung des Nährwertes der Eiweißsubstanzen zurückerinnern müssen (siehe Kap. 12 u. 19).

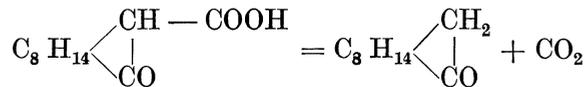
Außer den einfachen Eiweißkörpern oder Proteinen kommen in den Organismen noch Verbindungen des Eiweißes mit anderen Stoffen vor, sie werden als *Proteide* bezeichnet. Das bekannteste Proteid ist das *Hämoglobin*, der Blutfarbstoff, es ist die Verbindung eines Eiweißkörpers Globin mit einer Farbkom-

ponente Hämatin. In den Zellkernen sind *Nukleoproteide* enthalten; das sind Verbindungen von Eiweiß mit Nukleinsäure, einem komplizierten Stoff, dessen Zusammensetzung uns später (Kapitel 12) beschäftigen wird. *Phosphorproteide* sind Verbindungen von Eiweiß mit Phosphorsäure; zu ihnen gehört das Kasein der Milch (siehe S. 29). Die von den verschiedensten Drüsen, namentlich denen des Intestinaltrakts, abgeschiedenen Muzine oder Schleimstoffe rechnen zu den *Glykoproteiden*, weil sie bei der Spaltung reichlich Glukosamin, ein Derivat der Glukose, geben.

Nach dieser knappen Übersicht über die Chemie wenden wir uns der *Verdauung der Eiweißkörper durch den Pankreassaft* zu. Das eiweißspaltende Ferment des Pankreassaftes ist das **Trypsin**; das Wort ist von *τρύπειν*, zerschlagen, abgeleitet. Das Trypsin zerschlägt das Eiweiß, aber es zerschlägt es anders als das Pepsin. Während nämlich das Pepsin das Eiweiß nur in größere Bruchstücke zerlegt, entstehen bei der tryptischen Hydrolyse von vornherein neben Albumosen und Peptonen auch freie Aminosäuren. Unter diesen erscheinen besonders frühzeitig Tyrosin, Zystin und Tryptophan, besonders spät Prolin und Phenylalanin. Man kennt schon sehr lange eine Reaktion, welche für tryptische Verdauungsgemische charakteristisch ist, eine Violettfärbung bei Zusatz von Bromwasser; diese Reaktion wurde „Tryptophanreaktion“ genannt. Viel später erkannte man, daß sie an das Freiwerden einer bestimmten Aminosäure gebunden ist, welcher deshalb der Name Tryptophan gegeben wurde. Bei längerer Einwirkung des Trypsins wird der größte Teil des Eiweißes zu Aminosäuren aufgespalten; aber ein Teil der Peptide, das von KÜHNE sogenannte „*Anti-pepton*“, leistet dem Trypsin Widerstand. Es ist nun aus mehr als einem Grund interessant zu erfahren, woran das liegt. Wenn man nämlich durch Synthese aus verschiedenen Aminosäuren allerlei Peptide künstlich herstellt, so zeigt sich, daß diese teils von Trypsin wieder zerlegt werden können, teils nicht (E. FISCHER und ABDERHALDEN). Um ein paar Beispiele zu nennen: Alanyl-glyzin, Alanyl-alanin, Glyzyl-leuzyl-alanin werden hydrolysiert, Glyzyl-alanin, Leuzyl-glyzin, Triglyzyl-glyzin werden nicht hydrolysiert. Bestimmte Regeln lassen sich nicht angeben. Auf alle Fälle wird aber so begreiflicher, daß auch gewisse natürlich vorkommende Komplexe von Aminosäuren für Pankreassaft unangreifbar sind; das sind dann solche Komplexe, welche wegen ihrer größeren oder geringeren Resistenz gegen die eiweißspaltenden „proteolytischen“ Fermente sich dazu eignen, vom Körper als *Gerüstsubstanzen* verwendet zu werden, ähnlich wie sonst anorganische Stoffe als Skelettbildner. Das Elastin, das Keratin, das Fibroin der Seide sind dafür Beispiele; sie setzen sich gerade so aus Aminosäuren zusammen, wie das gewöhnliche Eiweiß. Wir kennen ein Analogon aus der Kohlehydratchemie, die Zellulose; sie ist ein Polysaccharid gerade so wie die Stärke, und sie dient als wichtigste Stützsubstanz im Pflanzenreich, weil auch sie für die meisten Kohlehydrat spaltenden Fermente unangreifbar ist.

Die Untersuchung der tryptischen Wirkung auf synthetische Peptide hat noch eine andere interessante Tatsache zutage gefördert. Es wurde schon (S. 40) bemerkt, daß die Aminosäuren optisch-aktiv sind; es gibt also eine rechtsdrehende d-Form und eine linksdrehende l-Form. Demgemäß müssen z. B. vier verschiedene Alanyl-leuzine existieren, d-Alanyl-d-leuzin, l-Alanyl-l-leuzin, d-Alanyl-l-leuzin und l-Alanyl-d-leuzin. Der Versuch hat nun gelehrt, daß von diesen vier Peptiden allein das dritte vom Trypsin gespalten wird. Das ist insofern begreiflich

zu nennen, als es das einzige von den vier Peptiden ist, welches sich aus zwei natürlich vorkommenden Aminosäuren zusammensetzt; denn l-Alanin und d-Leuzin sind Kunstprodukte. Immerhin werden wir darauf hingewiesen, *wie weitgehend spezifisch Enzymwirkungen sein können*. Das soll hier noch einmal (S. 19) von dem allgemeinen Standpunkt aus betont sein, den wir gegenüber den Enzymen im Hinblick auf ihre hohe Bedeutung für das Verständnis der Lebensvorgänge immer von neuem aufsuchen müssen. Denn der eben erwähnten Unterscheidungsfähigkeit der Enzyme für die stereoisomeren Verbindungen begegnen wir auf Schritt und Tritt, oder wenn es nicht die Enzyme sind, so sind es doch ganze lebende Zellen, welche — vermutlich eben durch ihren Gehalt an intrazellulären Enzymen (S. 18) — die stereochemische Spezifität der Wirkung äußern. So ist ja seit PASTEUR bekannt, daß der Schimmelpilz *Penicillium glaucum* aus einem razemischen Gemisch von d- und l-Weinsäure nur die d-Modifikation verbraucht, daß Hefe die d-Glukose und d-Galaktose vergärt, die entsprechenden linksdrehenden Isomeren unberührt läßt; so reagiert unser eigener Körper viel heftiger auf das in den Nebennieren natürlich vorkommende l-Adrenalin, als auf die künstlich erzeugte d-Form, so schmeckt uns d-Mannose süß und l-Mannose bitter. All das findet eine gewisse Erklärung durch die Annahme, daß die Enzyme selber, wie so viele Komponenten des Protoplasmas, optisch-aktiv sind. Jedenfalls ist es unter dieser Voraussetzung BREDIG gelungen, auch die **stereochemische Spezifität der Enzyme** durch einen Modellversuch nachzuahmen und damit eine der letzten Schranken zu zerstören, welche die chemischen Leistungen der Organismen von den gewöhnlichen chemischen Vorgängen in der anorganischen Welt trennen sollten. Die Kampfokarbonsäure zerfällt nämlich in Gegenwart von Basen als Katalysatoren in Kampfer und Kohlensäure:



Wählt man nun, wie BREDIG, als Base das optisch aktive l-Nikotin, so wird die razemische Kampfokarbonsäure asymmetrisch gespalten, die d-Form zerfällt rascher als die l-Form.

Kehren wir nach dieser Abschweifung zur tryptischen Verdauung zurück! Das Trypsin wirkt am kräftigsten bei schwach alkalischer Reaktion, aber auch bei neutraler, ja selbst bei schwach saurer Reaktion ist es wirksam. Ähnlich wie gegenüber dem Pepsin, so sind die verschiedenen Eiweißkörper auch verschieden trypsinresistent; *Serumeiweiß* und *Eiereiweiß* werden relativ schwer angegriffen, ebenso das dem Pepsin so zugängliche *Kollagen*. Daher ist es für den Fleischabbau von Wichtigkeit, daß der pankreatischen die peptische Verdauung vorausgeht. Die *Proteide* werden gespalten und ihre Eiweißkomponente verdaut; so gerät vom Hämoglobin das Hämatin, von den Nukleoproteiden die Nukleinsäure in Freiheit. Der weitgehende, für die tryptische Wirkung so charakteristische Abbau vollzieht sich im Darm viel leichter, als im Reagenzglas; das liegt vor allem daran, daß die Ansammlung der Spaltprodukte auf den Fortgang der Reaktion hemmend wirkt; bei der natürlichen Verdauung aber werden die Spaltprodukte gleich nach ihrem Entstehen durch die Darmwand fortresorbiert.

Pankreassaft, welcher direkt aus dem Ductus pancreaticus gewonnen wird, ist inaktiv; die Erklärung ist von HEIDENHAIN und PAWLOW gegeben: das Trypsin ist im Pankreassekret in einer Vorstufe, als *Trypsinogen*, vorhanden, welches erst im Darm durch eine besondere Substanz, die *Enterokinase*, aktiviert wird. Diese wird von der Darmwand bei Gegenwart von Trypsinogen abgegeben, sie erinnert in manchen Eigenschaften, z. B. in ihrer Hitzeempfindlichkeit, an die Fermente.

Außer dem Trypsin gibt es noch ein Enzym im Pankreassaft, welches auf Eiweiß wirkt, das ist ein **Labferment**, welches wie das des Magens Kasein in Parakasein verwandelt.

Auch für die *Verdauung der Kohlehydrate* enthält der Pankreassaft mehrere Enzyme.

Ein kurzer Überblick über die **Chemie der Kohlehydrate** wird hier wiederum und für später das Verständnis erleichtern. Wie schon der Name besagt, bestehen die Kohlehydrate aus Kohle und den Bestandteilen des Wassers, also aus den 3 Elementen C, H und O. Der Einteilung der Eiweißkörper und ihrer Derivate in Di-, Tri- bis Polypeptide entspricht die Einteilung der Kohlehydrate in Mono-, Di-, Tri- bis Polysaccharide. Wie dort die Aminosäuren, so ist hier der einfache Zucker mit 5 oder 6 Kohlenstoffatomen, die *Pentose* oder die *Hexose*, das Bauelement.

Die folgende Übersicht enthält die für uns wichtigsten einfachen und komplexen Kohlehydrate:

1. *Monosaccharide*

- a) Pentosen, $C_5H_{10}O_5$: Arabinose, Xylose,
- b) Hexosen, $C_6H_{12}O_6$: Glukose (Dextrose, Traubenzucker), Galaktose, Mannose; Fruktose (Lävulose, Fruchtzucker);

2. *Disaccharide*

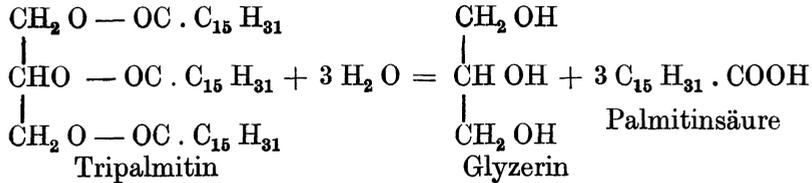
- aus Hexosen gebildet: $2 C_6H_{12}O_6 - H_2O = C_{12}H_{22}O_{11}$,
Sacharose (Rohrzucker) \rightarrow Glukose + Fruktose,
Maltose (Malzzucker) \rightarrow 2 Glukose,
Laktose (Milchzucker) \rightarrow Glukose + Galaktose;

3. *Polysaccharide*

- a) aus Pentosen ($C_5H_8O_4$)_n: Pentosane.
- b) aus Hexosen ($C_6H_{10}O_5$)_n:
Amylum (pflanzliche Stärke) \rightarrow Glukose,
Glykogen (tierische Stärke) \rightarrow Glukose.
Inulin \rightarrow Fruktose,
Hemicellulose \rightarrow Hexosen + Pentosen,
Cellulose \rightarrow Cellobiose \rightarrow Glukose.

Von diesen Kohlehydraten werden die Polysaccharide Stärke und Glykogen im Pankreassaft durch eine **Pankreasdiastase** verzuckert, die Zellulosen hingegen nicht angegriffen. Der Spaltung der Maltose dient eine **Maltase**, der Spaltung des Milchzuckers eine **Laktase**. Die Notwendigkeit, zwei Enzyme voneinander zu unterscheiden, welche beide ein Disaccharid $C_{12}H_{22}O_{11}$ spalten, das eine Maltose, das andere Laktose, ergibt sich u. a. aus der von WEINLAND beim Hund gefundenen merkwürdigen Tatsache, daß Pankreassaft den Milchzucker nur nach Milchfütterung zu spalten vermag, während er nach längerer Milchkarenz diese Fähigkeit verliert. Wir begegnen hier zum erstenmal einer zweckmäßigen Anpassung im Fermentbestand an das jeweils vorhanden Substrat.

Endlich dient der Pankreassaft auch noch der *Verdauung der Fette*. Von ihnen kommen als Nahrungsstoffe hauptsächlich die Triglyzeride der Palmitin-, der Stearin- und der Oleinsäure in Betracht, daneben in kleineren Mengen die Glyzeride der Buttersäure, Kapron-, Kapryl-, Kaprinsäure — also charakteristischerweise alles Säuren mit einer geraden Anzahl von C-Atomen (siehe dazu Kap. 12). Die Fette werden durch eine *Pankreaslipase* oder **Steapsin** hydrolytisch in Glyzerin und freie Fettsäuren gespalten, also z. B.



Hierin erschöpft sich aber die Wirkung des Pankreassaftes auf die Fette noch nicht; vielmehr hat der früher erwähnte Gehalt an *Natriumbikarbonat* noch seine besondere Bedeutung, ganz abgesehen von seinem Zweck, den sauren Magenbrei zu neutralisieren und erst dadurch der kräftigen Wirkung der Pankreasenzyme, welche sämtlich bei schwach alkalischer Reaktion das Optimum ihrer Wirkung entfalten, zugänglich zu machen, und ganz abgesehen von dem früher erörterten Zweck der Regulierung der Pylorusbewegungen. Nämlich das Fett, welches in größeren Tropfen dem Chymus beigemischt ist, wird durch das Alkali in eine feine Emulsion verteilt. Dies hat den Vorteil, die Angriffsfläche für das Steapsin enorm zu vergrößern; man kann sich leicht berechnen, daß die Aufteilung von 1 ccm Öl in feine Tröpfchen von im Mittel 3 μ Durchmesser die Oberfläche des Öls um ungefähr das 40 000fache vergrößert. Gerade beim Fett ist aber solche Aufteilung von Nutzen, weil hier allein von der Oberfläche her die Spaltung zustandekommen kann; bei koaguliertem Eiweiß oder bei Stärke, welche von Wasser durchsetzt oder in Wasser quellbar sind, können die Enzyme auch ins Innere hineindiffundieren, beim Öl geht das nicht. Die Emulgierung beruht auf folgendem Vorgang: alle Nahrungsfette sind wenigstens eine Spur „ranzig“, d. h. zu einem kleinen Bruchteil, gewöhnlich infolge von Bakterienwirkung, in Glycerin und Fettsäure gespalten. Kommt nun die Fettsäure an der Oberfläche des Fetttropfens mit Alkali, also z. B. mit einer Natriumbikarbonatlösung in Berührung, so bildet sich fettsaures Natrium, eine Seife. Da aber die Oberflächenspannung von Seifenlösung gegen Wasser geringer ist, als von Fett gegen Wasser, so wird am Ort der chemischen Reaktion das Öl aus dem Tropfen vorgebuchtet, gleichsam ein feines Öl-Pseudopodium vorgestreckt und dann leicht als ein feines Öltröpfchen abgerissen, und indem sich das an vielen Stellen der Öloberfläche und immer von neuem wiederholt, kommt es zur Emulgierung. Weil die Seifenlösung aber die geringere Oberflächenspannung gegen Wasser hat als Öl, muß sich auch um jedes Tröpfchen eine Hülle von Seife bilden, und da aus noch nicht genügend bekannten Gründen diese Seifenhaut alsbald bis zu einem gewissen Grade erstarrt, zu einer sogenannten *Haptogenmembran* wird, so können die feinen Tröpfchen, einmal gebildet, nicht wieder miteinander konfluieren; die Emulsion ist also beständig.

Findet nun bei all diesen Öltröpfchen die Spaltung durch das Steapsin in Glycerin und Fettsäure statt, so resultiert, im Gegensatz zum Effekt aller bisher betrachteten Verdauungsvorgänge, ein Produkt, welches größtenteils nicht löslicher ist als vor der Verdauung. Eiweiß, gelöstes wie festes, wird in die wasserlöslichen Albumosen, Peptone und Aminosäuren umgewandelt, Polysaccharide werden in die wasserlöslichen Zucker gespalten; aber von den Spaltprodukten der Fette ist nur das Glycerin wasserlöslich, die freien Fettsäuren, welche etwa $\frac{7}{8}$ der Fettmasse ausmachen, sind vollkommen unlöslich. Da nun, wie wir sehen werden, aus Gründen der Resorbierbarkeit der Nahrung eines der Ziele der Verdauung die Herstellung wasserlöslicher Stoffe ist, so

wird bei der Fettverdauung durch den Pankreassaft dies Ziel noch nicht oder nur zum kleinen Teil erreicht, nämlich nur insoweit, als Glycerin gebildet wird und als Verseifung durch das Natriumbikarbonat eintritt; für das übrige muß noch die Galle eingreifen.

Der Reichtum an Enzymen, welcher dem Pankreassaft zu eigen ist, wird von der Drüse nicht verschwenderisch über jede beliebige Nahrung ausgeschüttet, sondern, wie wir das ähnlich schon bei den Speicheldrüsen kennen gelernt haben, so *paßt auch die Bauchspeicheldrüse ihre Tätigkeit haushälterisch den jeweiligen Bedürfnissen an*. PAWLOW hat angegeben, daß erstens der zeitliche Verlauf der Saftproduktion je nach der Nahrung verschieden ist, und daß zweitens auch die Ferment- und die Alkalikonzentration in zweckentsprechender Weise variiert; und wenn längere Zeit ein und dieselbe Nahrung genossen wird, so soll sich nach PAWLOW die Pankreasdrüse so sehr auf ihre bestimmte Tätigkeit einstellen, daß bei einem plötzlichen Diätwechsel die Drüse erst sozusagen umlernen muß; dieses Umlernen erfolgt aber nicht sofort, sondern beansprucht einige Tage, und daher kann ein akuter Diätwechsel Verdauungsstörungen verursachen, wie man sie eben als Folge derartiger Gewohnheitsänderungen auch beim Menschen oft genug zu sehen bekommt.

Fragen wir auch hier wieder nach den *Reizen für die Pankreasdrüse*. Hat man eine Pankreasfistel angelegt, so sieht man schon 1—2 Minuten nach der Nahrungsaufnahme oder auch nach der Scheinfütterung, also schon vor Beginn der Magendrüsentätigkeit, etwa eine halbe Stunde lang etwas Bauchspeichel fließen. Eine kräftige Sekretion setzt aber erst ein, wenn auch der Magen in kräftige Aktion tritt, und zwar ist es die Salzsäure, welche vom Magen aus erregend wirkt; denn auch Bepflügelung der Magenschleimhaut mit verdünnter Salzsäure erzeugt Pankreassekretion. Die Salzsäure wirkt ferner von der Duodenalschleimhaut aus als starker Reiz, so daß der saure Chymus, welcher vom Magen in den Darm übertritt, alsbald neutralisiert wird. Charakteristischerweise erzeugen ferner freie Fettsäuren und Seifen vom Duodenum aus Saftbildung.

Die **Sekretionsnerven für das Pankreas** sind wieder teils zerebrale, teils sympathische Fasern; die zerebralen Fasern verlaufen im Vagus, die sympathischen im Splanchnikus. Atropinvergiftung macht, wie bei den Speicheldrüsen, die Reizung der zerebralen Fasern unwirksam.

Aber die Salzsäure wirkt auch vom Duodenum aus safttreibend noch dann, wenn sämtliche zuführenden Nerven und die Bauchganglien des Sympathikus ausgeschnitten und das Rückenmark ausgerottet ist. Nach BAYLISS und STARLING kommt die Anregung dann durch einen im Duodenum gebildeten, von ihnen als *Sekretin* bezeichneten Stoff zustande; sie extrahierten Duodenalschleimhaut mit verdünnter Salzsäure und injizierten das Extrakt in eine Vene; sofort begann der Bauchspeichel zu fließen. Dies Sekretin ist also ein Analogon des Magensekretins oder Gastrins (s. S. 32).

Besonders schön wird die Wirkung des Sekretins auf dem Blutweg durch einen Versuch von MATSUO demonstriert: man erzeugt bei zwei Hunden einen gemeinsamen Blutkreislauf, indem man die Karotis des einen mit der Jugularis des anderen verbindet und umgekehrt; ferner legt man bei beiden Tieren eine Pankreasfistel an. Wenn man nun dem einen Tier Salzsäure ins Duodenum bringt, so fließt auch aus der Fistel des anderen Pankreassaft.

Wenden wir uns nun demjenigen Verdauungssaft zu, welcher gleichzeitig mit dem Bauchspeichel über den Chymus ergossen wird,

der Galle. Ihre Abscheidung gehört zu den zahlreichen Funktionen der größten Drüse unseres Körpers, der Leber. Die Galle unterscheidet sich von den bisher besprochenen Verdauungssäften sehr wesentlich, nämlich *sie enthält gar keine Enzyme*, ist dafür aber durch besondere, für die Verdauung wichtige organische Verbindungen ausgezeichnet, wie sie den übrigen Sekreten fehlen oder wenigstens bei ihnen an Bedeutung in den Hintergrund treten.

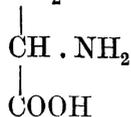
Man gewinnt die Galle entweder aus der Gallenblase, oder indem man bei einem Tier eine Gallengangfistel anlegt. *Blasengalle* und *Fistelgalle* sind in ihrer quantitativen Zusammensetzung recht verschieden. Die Blasengalle enthält 14—20%, die Fistelgalle nur etwa 1—4% Trockensubstanz. Das liegt teils daran, daß die von der Leber der Gallenblase zugeführte Galle in der Blase durch Wasserresorption stark eingedickt wird, teils daran, daß die Gallenausführungswege und besonders die Gallenblase selbst ein Muzin oder ein muzinartiges Nuklealbumin hinzuliefern. Besonders dadurch erhält die Blasengalle ihre ziemlich dickflüssige, fadenziehende Beschaffenheit.

Unter den Bestandteilen der Galle fesseln unsere Aufmerksamkeit zuerst wegen ihrer auffallenden Färbung die *Gallenfarbstoffe*. Die Galle ist je nach der Tierart mehr rötlich-gelb oder mehr gelb-grün gefärbt. Das hängt davon ab, ob mehr das rötliche *Bilirubin* oder das grüne *Biliverdin* überwiegt. Der grüne Farbstoff, $C_{32}H_{36}N_4O_8$ ist ein Oxydationsprodukt des roten $C_{32}H_{36}N_4O_6$. Auf dem Farbwechsel durch Oxydation beruht ein bekannter Gallennachweis, die *GMELINSche Gallenfarbstoffreaktion*: unterschichtet man Galle vorsichtig mit rauchender Salpetersäure, so bilden sich an der Grenze regenbogenartig übereinander liegende Farbzonen, unten rötlich-gelb, dann rötlich, violett, blau, grün. Der rötlich-gelbe Farbstoff ist das Endprodukt der Oxydation, das sogenannte Choletelin, zwischen ihm und dem grünen Biliverdin liegen die verschiedenen anderen, mit verschiedenen Namen, wie Bilizyanin, Bilifuszin, Biliprasin belegten Oxydationszwischenstufen.

Ferner enthält die Galle die sogenannten *Gallensäuren* bzw. deren Salze, beim Menschen hauptsächlich *Glykocholsäure* und *Taurocholsäure*, sowie *Glykodesoxycholsäure* und *Taurodesoxycholsäure*. Sie sind Verbindungen höhermolekularer stickstofffreier einbasischer Säuren von unbekannter Konstitution, der *Cholsäure* oder *Cholalsäure* $C_{24}H_{40}O_5$ und der *Desoxycholsäure* $C_{24}H_{40}O_4$ mit Glykokoll einerseits und mit Taurin andererseits. Taurin oder Aminoäthylsulfonsäure $CH_2 \cdot HSO_3$,

|
CH₂ · NH₂

ist ein durch Oxydation an der Schwefelgruppe und durch Abspaltung von CO₂ entstandenes Derivat des Zysteins CH₂ · HS (siehe S. 39).



Die Gallensäuren werden durch die *PETTENKOFERSche Reaktion* nachgewiesen: man mischt etwas Galle mit etwas 10%iger Rohrzuckerlösung, setzt etwas konzentrierte Schwefelsäure hinzu, und erwärmt vorsichtig, jedoch nicht über 70°; dann erscheint eine prachtvolle rot-violette Farbe.

Ein weiterer Bestandteil der Galle ist das *Cholesterin*, $C_{27}H_{46}O$; es ist ein aromatischer Alkohol, der nach WINDAUS mit der Cholsäure

und der Desoxycholsäure nahe verwandt ist. Cholesterin ist in Wasser unlöslich, in Galle nur durch deren organische Bestandteile in Lösung gehalten; es kristallisiert leicht in perlmutterglänzenden Blättchen aus. So ist das Cholesterin neben den Kalkverbindungen der Gallenfarbstoffe das Hauptmaterial für die krankhafte Bildung der *Gallensteine*. Das Cholesterin kann durch die *SALKOWSKISCHE REAKTION* nachgewiesen werden: man löst einige Cholesterinkristalle in Chloroform und unterschichtet mit konzentrierter Schwefelsäure; schüttelt man dann leicht, so färbt sich die Chloroformlösung blutrot, die Schwefelsäure gelblich mit grüner Fluoreszenz.

Endlich enthält die Galle *anorganische Salze*. Ihre *Reaktion* ist angenähert neutral. Ihre Gefrierpunktserniedrigung stimmt ebenso wie die des Pankreassafts mit der Gefrierpunktserniedrigung des Blutes überein.

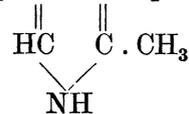
Was nun die *physiologische Bedeutung der Galle* anlangt, so kommen für die Verdauung in erster Linie die **Gallensäuren** in Betracht. Wir sahen, daß speziell für die Fette die Pankreasverdauung trotz der starken Steapsinwirkung dabei nicht ausreicht, und zwar weil die wasserunlöslichen freien Fettsäuren entstehen, welche unresorbierbar im Darm liegen bleiben. Hier greift nun *die Galle* ein, und *bringt die Fettsäuren in Lösung*. Schon vor mehr als 50 Jahren beobachtete WISTINGHAUSEN in Nachahmung der Resorptionsbedingungen, daß Öl durch eine tierische Membran hindurchzudiffundieren vermag, wenn die Membran statt mit Wasser mit Galle durchtränkt wird. Das beruht auf folgendem: das Alkali der Galle bildet mit Fettsäuren, welche ja besonders in Gegenwart von Pankreassteapsin reichlich im Darm enthalten sind, Seifen, und in Gegenwart von Seifen vermag die Galle massenhaft Fettsäure in Lösung zu halten (PFLÜGER). Dabei bilden sich kristallinische und wasserlösliche Doppelverbindungen von Fettsäuren und Desoxycholsäure (WIELAND und SORGE), welche *Choleinsäuren* genannt werden. Hierdurch wird verständlich, daß bei Abwesenheit von Galle im Darm die Ausnützung der Fette notleidet, und dies ereignet sich nicht so selten; wenn z. B. bei einer leichten Erkrankung des Duodenum die Schwellung seiner Schleimhaut auf die Gallenwege übergreift und da wie dort reichliche katarrhalische Schleimbildung zustande kommt, oder wenn ein Gallenstein sich durch den Ductus choledochus in den Darm zu zwängen versucht, dann kann es zum Verschuß der Gallenwege kommen. Die Galle staut sich dann hinter dem Hindernis, sie füllt allmählich innerhalb der Leber von den Gallengangskapillaren aus die Lymphgefäße, und aus diesen fließt sie dann durch den Ductus thoracicus in die Blutbahn über; nun wird der ganze Körper mit Galle überschwemmt, alle Gewebe färben sich gelb, es kommt zu *Gelbsucht* oder *Ikterus*. Wird jetzt eine fettreiche Mahlzeit eingenommen, so werden hell-lehmfarbene stinkende Fäzes entleert. Diese helle Farbe der „acholischen Stühle“ rührt nicht bloß von der Abwesenheit der Gallenfarbstoffe her, sondern auch von der Anwesenheit unresorbierter Fette oder richtiger Fettsäuren; denn das Pankreassteapsin hat ja gewirkt und die Fette zerlegt, das Glycerin ist auch resorbiert, aber die Fettsäuren zusammen mit einem Teil der Seifen sind im Darm ungenützt liegen geblieben. Der üble Geruch der Fäzes bei Ikterus rührt von vermehrter Fäulnis im Darm her. Man hat daraufhin von einer antibakteriellen Wirkung der Galle gesprochen; aber Galle fault selbst überaus leicht. Die richtige Erklärung

ist wohl, daß die Massen von Fettsäure, welche bei Acholie im Darm liegen bleiben, auch Eiweiß dadurch, daß sie es einhüllen, von der Resorption zurückhalten, und daß dies Eiweiß dann in Fäulnis übergeht.

Die Gallensäuren unterstützen die Verdauung noch in einer anderen Weise. Die Pankreasfermente wirken bei Gallenzusatz viel intensiver, als ohne das, *die Gallensäuren aktivieren also die Enzyme, insbesondere das Steapsin.*

Die übrigen der Galle eigentümlichen Bestandteile treten hinter den Gallensäuren an Bedeutung für die Verdauung zurück. Die **Gallenfarbstoffe** sind, wie man seit langem auf Grund von Experimenten und klinischen Beobachtungen annehmen konnte, Derivate des Blutfarbstoffs, des Hämoglobins. Nämlich wenn sogenannte „Blutgifte“, wie Arsenwasserstoff, Phosphorwasserstoff, Toluylendiamin, Anilin u. a. in den Kreislauf geraten, so zerfallen massenhaft Blutkörperchen, und es zirkuliert freies Hämoglobin; alsbald tritt dann ein starker Ikterus ein, welcher davon herrührt, daß auf das massenhafte Angebot von Blutfarbstoff die Leber mit vermehrter Gallenproduktion antwortet; aber es bildet sich nun so viel konzentrierte, dickflüssige Galle, daß es zu Stauung und zu Resorption in die Blutbahn kommt (sog. pleiochromer Ikterus). Beweis dafür, daß dieser Gallenfarbstoff von der Leber gebildet wird und nicht etwa schon in der Blutbahn aus dem Hämoglobin entsteht, ist die Tatsache, daß, wenn man die Leber bei Gänsen total exstirpiert — eine Operation, die diese im Gegensatz zu den Säugetieren infolge eigentümlicher Kreislaufverhältnisse 10—20 Stunden lang überleben —, die Vergiftung mit einem der Blutgifte, z. B. mit Arsenwasserstoff, nun nicht mehr wie sonst die Bildung von Gallenfarbstoff steigert und Ikterus erzeugt (MINKOWSKI und NAUNYN). Offenbar wird also in der Leber das Hämoglobin in den Eiweißkörper Globin und in die Farbkomponente Hämatin gespalten (siehe S. 40 u. Kap. 8) und aus dem eisenhaltigen Hämatin unter Eisenabspaltung der Gallenfarbstoff gebildet.

Aber es gibt auch direkte chemische Beweise für diese Abstammung. Man kann aus dem Hämatin das Eisen mit Schwefelsäure abspalten und erhält dann einen bräunlichen Farbstoff, das *Hämatoporphyrin*, welcher auch normalerweise in kleinen Mengen im Harn des Menschen vorkommt. Durch Spaltung unter Reduktion entsteht daraus ein basischer Körper, das *Hämopyrrol* (NENCKI und ZALESKI, W. KÜSTER), welchem wahrscheinlich die Konstitutionsformel $\text{CH}_3 \cdot \text{C} = \text{C} \cdot \text{C}_2 \text{H}_5$



zukommt. Hämopyrrol ist also Dimethyläthylpyrrol. Dies Hämopyrrol ist für uns hier von Interesse, weil man es auch durch Spaltung von Bilirubin gewinnen kann (PILOTY, H. FISCHER). Eine weit allgemeinere Bedeutung kommt ihm aber deshalb zu, weil NENCKI es auch durch Spaltung von Chlorophyll erhielt und so die merkwürdige Verwandtschaft von Blatt- und Blutfarbstoff entdeckte.

Endlich kann für die Genese der Gallenfarbstoffe aus dem Hämoglobin auch noch eine Beobachtung der pathologischen Anatomen herangezogen werden: in alten Blutextravasaten trifft man öfter einen gelb-roten Farbstoff in kristallinischer Form, das *Hämatoidin* (VIRCHOW);

es wird nach seiner Zusammensetzung und nach seinen Reaktionen für identisch mit Bilirubin angesehen. Hier hätten wir also den Fall, daß Gallenfarbstoff doch auch unabhängig von der Leber unter besonderen Bedingungen im Gewebe entstehen kann.

Den Gallenfarbstoffen kommt für die Verdauung keinerlei Bedeutung zu. Sie werden im Darminhalt weiterhin durch den Stoffwechsel der Bakterien chemisch verändert, besonders reduziert, es entstehen *Urobilin*, *Hydrobilirubin* und andere Derivate, von denen die Färbung von Harn und Fäzes herrührt.

Die Herkunft der Gallenfarbstoffe macht uns auch die Anwesenheit von **Cholesterin** in der Galle verständlich. Cholesterin gehört zu den regelmäßigen Baustoffen sämtlicher tierischer und pflanzlicher Zellen. Wenn man Zellen auf osmotischem Wege durch Wasser zerstört (siehe Kap. 8), so bleibt vom Plasma ein ungelöster Rest übrig, das *Zellgerüst* oder *Stroma*, bei den roten Blutkörperchen auch als „Blutschatten“ bekannt. Dies Stroma setzt sich im wesentlichen aus Eiweiß und aus den sogenannten *Lipoiden*, d. h. fettähnlichen Stoffen zusammen. Deren Fettähnlichkeit besteht in erster Linie in einer ähnlichen Löslichkeit in organischen Lösungsmitteln, wie bei den Fetten, also z. B. in einer Löslichkeit in Äther, Chloroform, Schwefelkohlenstoff u. a.; wirkliche chemische Ähnlichkeit mit Fett hat unter ihnen nur das *Lezithin*, welches übrigens auch in kleinen Mengen in der Galle enthalten ist. Neben dem Lezithin ist das wichtigste Lipoid das Cholesterin. Von der allgemeinen-physiologischen Bedeutung dieser Lipide soll erst später die Rede sein (siehe Kapitel 8 u. 12); dann werden wir auch noch einmal auf das Lezithin zurückkommen. Das Cholesterin, das uns hier angeht, verdankt seine Anwesenheit in der Galle offenbar dem Untergang zahlreicher Blutkörperchen in der Leber; das Cholesterin ist also eine Schlacke der Blutkörperchen, welche mit der Galle aus dem Körper entfernt wird. In dieser Hinsicht ist es also den Gallenfarbstoffen vergleichbar, wenn man nicht eine besondere physiologische Funktion des Cholesterins darin erblicken will, daß sein im Darminhalt entstehendes Reduktionsprodukt, das *Koprosterin*, zufolge seiner harzigen Beschaffenheit dazu dient, die Fäzespertikeln miteinander zur Formung der Fäzes zu verkleben. Ein Teil des den Blutkörperchen entstammenden Cholesterins wird aber wohl in Cholsäure und Desoxycholsäure umgewandelt (s. S. 46). Außer aus dem Zerfall der Blutkörperchen stammt das Cholesterin auch aus der Nahrung, wie man durch Fütterungsversuche bewiesen hat.

Welches sind nun die physiologischen Bedingungen für die Abscheidung der Galle? Auch wenn wir diese Frage erörtern, begegnen wir bei der Galle Verhältnissen, welche von den bei den anderen Verdauungssäften vorgefundenen abweichen. Wir sahen schon, daß die Galle insofern kein gewöhnlicher Verdauungssaft ist, als sie keine Enzyme enthält; Verdauungssaft ist sie fast nur durch ihren Gehalt an Gallensäuren; die übrigen für sie charakteristischen Bestandteile, Gallenfarbstoffe und Cholesterin, erfüllen nach unserem gegenwärtigen Wissen keinen Zweck weiter, sie sind Abfallprodukte unseres Körpers. Insofern ist also die Galle nicht bloß ein Sekret, sondern auch ein *Exkret*. Unter einem Exkret versteht man nämlich ein Drüsenprodukt, welches dazu da ist, Schlacken des Körpers zu entfernen; der Harn ist das Prototyp eines Exkretes. Wie nun der Harn fortwährend von den Nieren absondert wird, weil fortwährend die Körpersubstanz zerfällt und Abfallstoffe

bildet, so fließt auch fortwährend Galle; sie fließt sogar, wenn auch spärlicher, bei vollkommenem Hunger, wenn gar nichts zu verdauen ist.

Also nicht bloß nach ihrer Zusammensetzung, sondern auch nach ihren Abscheidungsbedingungen ist die Galle von den anderen Verdauungssäften unterschieden, welche nur zu bestimmten Zeiten der Anforderung von seiten des Intestinaltrakts produziert werden. Immerhin — und insofern zeigt eben die Gallenproduktion nicht bloß Exkret-, sondern auch Sekretcharakter — wird der Gallenfluß zuzeiten der Nahrungsaufnahme verstärkt, und die einzelnen Nahrungsmittel verursachen dabei einen charakteristischen zeitlichen Verlauf der Sekretion nach Menge und nach Konzentration des Sekrets (PAWLOW). Dabei spielt freilich auch die Regulation des Zuflusses durch die Muskeln eine Rolle, welche den Ductus choledochus an der Papilla duodenalis verschließen können. Dieser Sphinkter steht unter der Herrschaft des Nervensystems; sein Tonus wird durch den N. vagus gesteigert, durch den N. sympathicus verringert.

Auch darin dokumentiert die Galle Exkretcharakter, daß der Einfluß von seiten des Nervensystems auf die Größe der Gallenproduktion recht undeutlich ist. Von den übrigen Verdauungssäften her sind wir

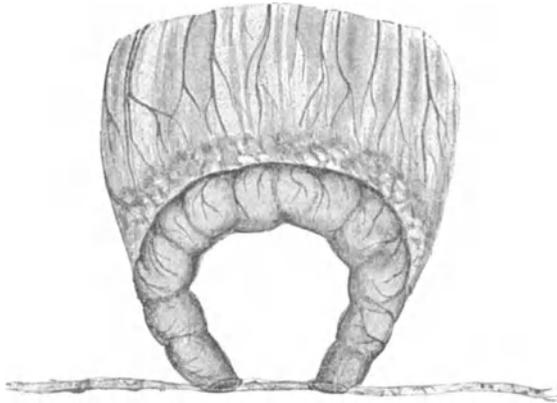


Abb. 8. Schema einer THIRY-VELLA'schen Fistel.

das evidente Anschwellen des Sekretstromes bei elektrischer Reizung bestimmter Nerven zu sehen gewohnt; hier läßt sich durch Reizung des Vagus die Gallenabscheidung nur wenig fördern (EIGER). Abermals werden wir dabei an ähnliche Verhältnisse bei den Nieren erinnert (siehe Kapitel 16).

Endlich ist auch die Anregung der Gallenbildung durch bestimmte chemische Verbindungen, wie sie ihre Analogie etwa in der Anregung der Pankreassekretion durch Säure und Seifen, in der Speichelbildung auf allerlei Geschmacksreize hin finden könnte, ziemlich problematisch. Besonders im klinischen Interesse sucht man immer wieder nach gallentreibenden Mitteln, nach sogenannten „Cholagoga“. Am deutlichsten wirkt Galle selbst, bzw. die gallensauren Salze, ferner gelten Seifen und Peptone als cholagoga, auch Sekretin.

Wir kommen nun zu dem letzten Verdauungssaft, welcher sich über die Nahrung ergießt, und welchem die Aufgabe zufällt, das zu

vollenden, was die anderen angefangen haben, zu dem **Darmsaft**, dem Sekret der LIEBERKÜHNschen Drüsen. Man gewinnt ihn am reinsten aus einer sogenannten THIRY-VELLA'schen *Fistel*. THIRY durchschnitt bei Hunden, welche 24 Stunden gehungert hatten, den Dünndarm an zwei etwa 10—15 cm voneinander entfernten Stellen; das eine Ende des isolierten Darmstücks wurde durch Naht verschlossen, das andere Ende in der Bauchwunde befestigt, so daß ein Darmblindsack entstand, welcher nach außen mündete. Die beiden Schnittränder des übrigen Darms wurden miteinander vernäht und auf die Weise ein verkürzter Darm gebildet. Da das Mesenterium des zum Blindsack umgewandelten Darmstücks unversehrt blieb, so wurde es auch weiter in normaler Weise mit Blut versorgt. VELLA modifizierte die Operation in der Richtung, daß er beide Öffnungen des isolierten Darmstücks in die Bauchwunde einheilte, so wie es etwa die schematische Abbildung 8 zur Anschauung bringt.

Aus solcher THIRY-VELLA'schen Fistel kann man nun entweder durch mechanische Reize, z. B. eingeführte Stückchen Schwamm, oder durch chemische Reize, z. B. etwas Salzsäure, Darmsaft als eine hellgelbe schleimig-wässerige, schwach alkalische Flüssigkeit gewinnen. Bei der Untersuchung derselben fanden THIRY und andere überraschenderweise, daß sie weder Hühneriweiß, Fibrin oder Muskelstückchen noch Leim noch Stärkemehl verdaute, und daß sie auch Fett nur langsam angriff. So kam es, daß man eine Zeit lang die ganze Bedeutung des Darmsafts in seinem Gehalt an Alkali in Form von Bikarbonat erblickte, vermöge dessen der Darmsaft zu der Emulgierung der Fette beiträgt. Erst später wurde gefunden, daß auch der Darmsaft ein typischer Verdauungsaft ist, welcher sogar eine ganze Serie von Enzymen enthält, denen aber — in ebenso charakteristischer wie zweckmäßiger Art — die unveränderten Nahrungsstoffe unzugänglich sind, während die auf dem Weg zum Totalabbau sich bildenden Zwischenprodukte von ihnen weiter gespalten werden. Der Darmsaft enthält also kein proteolytisches, wohl aber ein „*peptolytisches*“ Ferment, das **Erepsin** (O. COHNHEIM), welches nicht Eiweiß angreift, wohl aber Albumosen und Peptone, und zwar widersteht dem Erepsin auch nicht das „Antipepton“, diese Summe trypsinresistenter, besonders Phenylalanin und Prolin enthaltender Peptide (siehe S. 41), so daß die ereptische Verdauung in der Tat zum Totalabbau des Eiweißes, zur Aufspaltung bis zu den einzelnen Aminosäuren führen kann. Der Darmsaft enthält auch kein oder nur wenig diastatisches Ferment für die komplexen Kohlehydrate; dafür spaltet es den Malzzucker mit einer **Maltase**, den Rohrzucker mit einer **Invertase**, und wenn Milch als Nahrung verabfolgt wird, so erscheint in ihm eine **Laktase** für den Milchzucker (siehe S. 43). Ferner ist im Darmsaft eine **Nuklease** enthalten, welche die durch die pankreatische Verdauung aus den Nukleoproteiden freigemachte Nukleinsäure in ihre Spaltstücke (siehe Kap. 12) zerlegt. Das Fett wird durch das Alkali des Darmsafts kräftig emulgiert und zum Teil auch durch eine nicht reichlich vorhandene *Lipase* hydrolysiert. Endlich sei noch einmal daran erinnert, daß auch die *Enterokinase* ein Produkt der Darmdrüsen ist.

Dieser Darmsaft fließt hauptsächlich auf den Reiz der Nahrungsaufnahme hin. Dabei wirkt aber die Nahrung nicht bloß unmittelbar, sondern auch aus der leeren THIRY'schen Schlinge fließt spontan der Saft, wenn der übrige Darm mit Nahrung gefüllt wird. Der direkte

Reiz der Nahrung wirkt freilich verstärkend. Der so angeregte Erguß dauert 6—7 Stunden. Ob dabei die Nerven des Darmes eine Rolle spielen, ist unsicher.

Zu einer ergebnissen Ausnützung der in den Darm fließenden Verdauungssäfte tragen wesentlich die **Darmbewegungen** bei, indem sie den Speisebrei einestheils mit den Säften mischen, anderenteils ihn den 4—5 m langen Weg bis zum Dickdarm entlang schieben, wobei er immer von neuem mit Darmsaft übergossen wird.

Für die Beobachtung der eigenartigen Bewegungen sind verschiedene Methoden ersonnen worden. Am einfachsten ist es natürlich, die Bauchhöhle am lebenden Tier zu eröffnen und direkt den Darm zu betrachten; unter diesen abnormen Bedingungen ist der Erhaltung der Funktion förderlich, den Leib des Tieres in ein Bad von körperwarmer 0,9%-iger Kochsalzlösung zu versenken oder noch besser, in ein Bad warmer RINGERScher Lösung (0,9% NaCl + 0,02% KCl + 0,02% CaCl₂ + 0,01% NaHCO₃); welche Vorteile die letztere bietet, wird später (siehe Kap. 7 u. 10) erörtert werden. KATSCH und BORCHERS verschafften sich einen Einblick in die Bauchhöhle so, daß sie unter aseptischen Maßregeln die Bauchwand

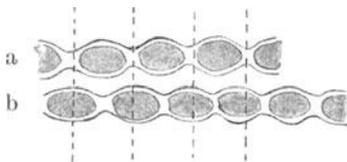


Abb. 9. Schematische Darstellung der rhythmischen Segmentierung des Dünndarminhalts.

durch ein großes Fenster aus Zelluloid ersetzt; man kann dann an dem in Rückenlage gefesselten Tier tagelang die Bewegungen der Eingeweide inspizieren. Weit harmloser und doch ergebnissen für die Physiologie von Tier und Mensch ist das nun schon öfter zitierte schöne Verfahren von CANNON, nach Verabreichung eines Wismutbreis mit Röntgenstrahlen zu durchleuchten.

Mit diesen Methoden hat man vor allem zweierlei Bewegungsformen des Darmes kennen gelernt: 1. die Pendelbewegungen und 2. die Peristaltik.

Die *Pendelbewegungen* führen ihren Namen daher, weil bei ihnen die einzelnen Teile der Darmwand theils in der Längs-, theils in der Querrichtung des Darms hin und herpendeln. Ein etwas ausgiebigeres Pendeln in der Querrichtung, beruhend auf abwechselnder Kontraktion und Erschlaffung der Ringmuskulatur einer Stelle mit einer Phasendifferenz im Pendeln der benachbarten Stellen, führt zu „*rhythmischer Segmentierung*“ des Darminhalts, d. h. die Säule des Inhalts zerfällt in einem bestimmten Moment (a) durch die ringförmige Pressung in einzelne Segmente, um kurze Zeit darauf (b) an anderer Stelle segmentiert zu werden, so wie es etwa das Schema der Abb. 9 darstellt. Dies Pendeln dauert an, solange der Darm gefüllt ist. Im Duodenum beträgt per Rhythmus 17—21 pro Minute, in den unteren Darmabschnitten weniger (5—12).

Die *Peristaltik* besteht darin, daß, wenn in einem bestimmten Moment der Darm an einer Stelle gedehnt wird, oberhalb der gereizten Stelle eine starke Einschnürung zustandekommt, welche langsam nach Art einer Welle in der Richtung zum Dickdarm fortschreitet, während zu gleicher Zeit dicht unterhalb der gereizten Partie eine Ausweitung des Rohres durch Erschlaffung der Ringmuskulatur und Kontraktion der Längsmuskulatur entsteht, die sich in der gleichen Richtung ver-

schiebt. Diese Bewegungsform erinnert täuschend an die Bewegungen eines sich heftig schlängelnden Wurmes.

Die *Auslösung der peristaltischen Bewegungen* geschieht, wie gesagt, durch die Dehnung der Darmwand; bei zunehmendem Innendruck beantwortet die Muskulatur die Dehnung mit Steigen der Spannung, und da magenwärts die Erregbarkeit größer ist als analwärts, so steigt der Tonus auch oben mehr als unten, bis bei Überschreitung eines gewissen Grenzwertes die tonische Anspannung mit einem Mal in die rhythmische Peristaltik umschlägt, welche, wiederum entsprechend der Erregbarkeitsverteilung, oben beginnen und nach unten fortschreiten muß (P. TRENDELENBURG). Je rascher die Dehnung erfolgt, um so leichter wird die Peristaltik ausgelöst; daher kann eine überrasche Füllung von Magen und Darm durch schnelles Essen die Peristaltik fördern, die Ausnutzung der Nahrung also ungünstig beeinflussen. Die Peristaltik in dem Darmstück endet gewöhnlich damit, daß er sich seines Inhalts entleert. Dieser erregt dann in dem nächst unteren Darmstück dieselben Bewegungen.

Der Effekt des Pendelns ist in erster Linie eine sorgfältige Durchknetung des Chymus; dadurch entsteht z. B. beim Hund oder der Katze ein dünner, fast homogener Brei oder richtiger eine Flüssigkeit, die durch feine Bröckchen getrübt ist, wenigstens wenn nur Fleisch und Fett gefüttert werden. Indem der Darminhalt beim Pendeln hin- und hergeschoben wird, kann es gelegentlich geschehen, daß feine Teilchen, wie z. B. Lykodium-Samen, welche per anum in das Rektum gebracht werden, bis in den Magen hinaufwandern.

Das ist freilich nur möglich, wenn die Peristaltik nicht zu sehr überwiegt; denn diese verschiebt den Darminhalt einseitig analwärts. Bei leicht verdaulicher Kost, d. h. wenn der Darminhalt einen dünnen Brei bildet, ist die peristaltische Fortführung nur schwach, jeder harte Speiseteil regt sie jedoch an. Die gewöhnlichen mechanischen Reize sind harte Zellulosestücke und Knochen; Pflanzenfresser, wie z. B. Mäuse, sind so sehr auf die mechanische Anregung ihrer Peristaltik angewiesen, daß sie an „Darmlähmung“ zugrunde gehen, wenn man sie mit den reinen Nahrungsstoffen füttert. Nüsse, grobes Brot, Sägemehl, Kohlepulver „führen ab“, eine zu „leichte“ Kost führt zu „Verstopfung“.

Eine *Antiperistaltik*, welche man früher annahm, gibt es nicht. Wenn man ein Stück Darm einem eben getöteten Kaninchen entnimmt und an zwei Fäden in körperwarmer Ringerlösung aufhängt, so kann man beobachten, daß, wenn man am oralen Ende einen der kugeligen Kotballen in den Darm einschiebt, er kurze Zeit danach am anderen Ende wieder herausfällt (MAGNUS); niemals kann man aber einen Transport in der Gegenrichtung erzwingen. Durchschneidet man den Darm an zwei Stellen und heilt das isolierte, aber mit dem Mesenterium in Verbindung gebliebene Darmstück in verkehrter Richtung wieder in die Kontinuität des Darmes ein, so macht das eingehheilte Stück scheinbar antiperistaltische Bewegungen. Das ist für das Wohlbefinden des Tieres so lange gleichgültig, als es mit einer leichten Kost gefüttert wird, welche vorwiegend Pendeln erregt; sobald aber etwa Knochen gefüttert werden, geht das Tier unter den Zeichen eines Darmverschlusses (Ileus) zugrunde, weil die angeregten heftigen peristaltischen Bewegungen des Zwischenstücks wie ein richtiger Verschuß wirken.

Dieser ganze Bewegungsmechanismus untersteht dem **Nervensystem**, aber nicht in erster Linie dem Zentralnervensystem, sondern

den autochthonen Nervelementen der Darmwand. Nämlich wie der Magen, so ist auch *der Darm ein ausgesprochen automatisches Organ* (siehe S. 36); das lehrt schon der geschilderte Versuch, daß ein ausgeschnittenes Darmstück in seiner Peristaltik fortfährt, und die Automatie der Pendelbewegungen kann sehr leicht mit einem Stückchen überlebenden Dünndarms von Kaninchen demonstriert werden, das man

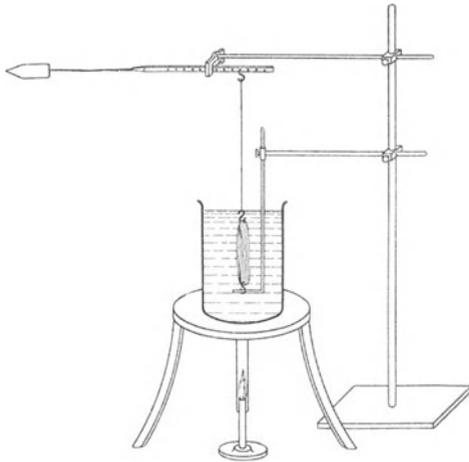


Abb. 10. Registrierung der Pendelbewegungen des Darms (nach MAGNUS).

damit auch den MEISSNERSchen Plexus von einem lebenden Darmstück abstreifen, oder man kann auch die Serosa zerstören, ohne daß seine Motilität erlischt; die Bewegung ist also nicht reflektorischer Natur.

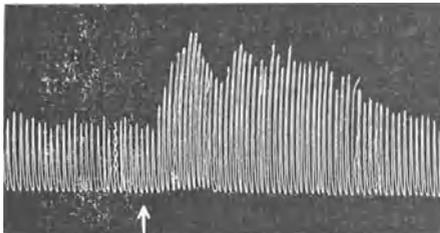


Abb. 11. Pendelbewegungen des isolierten Kaninchendünndarms. Der Pfeil markiert den Zusatz von Dialysat eines Katzendünndarms nach MAGNUS und v. KÜHLEWEIN).

fand, daß die Bewegungen eines ausgeschnittenen Darmstücks durch eine Lösung, in der überlebender Dünndarm eine Weile gelegen hat, kräftig gesteigert werden (s. Abb. 11), und daß diese Anregung auch bei intravenöser Zufuhr des Darmextrakts zustandekommt. LE HEUX stellte sodann fest, daß der Dünndarm reichlich freies *Cholin* $N \cdot OH \cdot C_2H_4(OH) \cdot (CH_3)_3$, ein bekanntes Spaltprodukt des Lezithins (s. Kap. 12), enthält, und daß dieses *den Plexus erregt*. LE HEUX kam darauf durch die zufällige Beobachtung, daß die Darmextrakte durch Essigsäure stark

in sauerstoffgesättigter Ringerlösung aufhängt und seine überaus regelmäßigen Verkürzungen mit Hilfe eines Hebels registrieren läßt, so wie es die Abb. 10 zur Darstellung bringt. Unter der Serosa des Darmes liegt nun zwischen der äußeren Längs- und der inneren Ringmuskelschicht der *Tunica muscularis* der *Plexus myentericus Auerbachi*, ein zweites Nervenetz liegt als *Plexus submucosus Meißneri* auf der *Muscularis mucosae*, und der AUERBACHsche Nervenplexus ist nachweislich der Ursprungsort für die rhythmischen Impulse, welche die Darmmuskulatur erregen. Denn erstens kann man leicht die Mukosa und die Submukosa und

Zweitens gelingt es, die Längs- von der Ringmuskelschicht abzureißen, wobei der *Plexus myentericus* in der Regel an der Längsmuskulatur hängen bleibt; dann fährt diese allein mit ihren rhythmischen Kontraktionen fort, während die plexuslose Muskulatur auf einen Reiz nur noch mit einer einzigen Kontraktion antwortet, um danach wieder in Ruhe zu verfallen (MAGNUS). Die Anregung des AUERBACHschen Plexus zu seiner automatischen Rhythmik geschieht vom Innern der Darmwand auf chemischem Wege. WEILAND

aktiviert werden; es war aber bereits bekannt, daß das Azetylcholin auf Herz und Blutdruck mehrtausendfach kräftiger wirkt als das Cholin selber. Dabei steigert das Cholin schon in einer Verdünnung von 1:100 000 die Darmbewegungen. Die Wirkung des Cholins gewinnt praktische Bedeutung, wenn der Darm, z. B. infolge einer tiefen Narkose, gelähmt ist. Abb. 12 gibt ein Bild von der Heilwirkung des intravenös verabreichten Cholins.

Die Funktion des Plexus submucosus wird wohl durch folgende Beobachtung beleuchtet: spießt sich infolge der Peristaltik etwa ein spitziges Knochenstück gegen die Schleimhaut und droht die dünne Wand zu durchbohren, dann weicht das gestochene Schleimhautstückchen durch Erschlaffen der darunter gelegenen Stelle der Muscularis mucosae aus, und indem gleichzeitig rund um die erschlaffende Stelle die Muskelfasern sich zusammenziehen, entsteht ein ringförmiger Wall auf der Schleimhaut, so daß der Knochensplitter aufgerichtet wird und mit seinem stumpfen Ende in das Darmlumen hineinzuragen

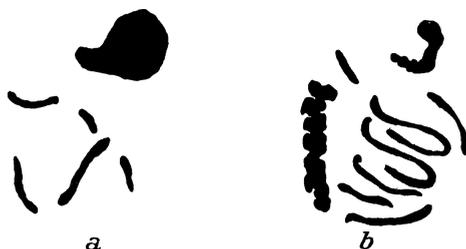


Abb. 12. Röntgenbilder nach tiefer Chloroformnarkose.

a) ohne Cholin: Magen prall gefüllt und bewegungslos; Dünndarm spärlich gefüllt. Dickdarm leer. b) mit Cholin: Magen fast leer, mit Peristaltik des Antrum pylori. Dünndarm stark gefüllt, Dickdarm gefüllt (nach MAGNUS und v. KÜHLEWEIN).

kommt; schiebt nun die peristaltische Welle den Darminhalt analwärts, so wird das Knochenstück mit dem stumpfen Ende voraus mitgenommen, also die Spitze aus der Wand entfernt.

Wie beim Magen, so ist auch beim Darm dem Einfluß des lokalen Nervensystems der des Zentralnervensystems übergelagert. Dort wie hier ist es der Vagus, welcher vorwiegend die Bewegungen erregt, und der Sympathikus in seinem Hauptast, dem Splanchnikus, welcher sie vorwiegend hemmt. Durch dies Hinzutreten „äußerer“ Nervenfasern werden von weit her kommende Einflüsse, z. B. Einflüsse von seiten des Großhirns verständlich. CANNON beschreibt z. B., wie bei einer friedlichen Katze, die ruhig über der Röntgenröhre liegt, die peristaltischen Bewegungen in ihrer vollen Regelmäßigkeit auf dem Schirm zu sehen sind, während sie bei einem böswilligen Kater, der sich sträubt, still stehen; er beschreibt, wie die Bewegungen bei der Mutterkatze aufhören, sobald man ihr ihr Junges nimmt; so begreift man abermals die Ausdrucksweise, daß einem „der Ärger ins Gedärm fährt“, daß manche empfindliche Menschen infolge einer Aufregung eine Verdauungsstörung bekommen (s. auch Kap. 26).

5. Kapitel.

Der Dickdarm, die Fäzes und die Defäkation.

Die Bildung und Zusammensetzung der Fäzes 56. Die Tätigkeit der Darmbakterien 58. Die Bewegungen und die Innervation des Dickdarms 61. Die Defäkation 61.

Die Verdauung ist im wesentlichen beendet, wenn der Inhalt des Dünndarms in den Dickdarm übertritt. Erfahrungen am Menschen, welchen ein künstlicher After am unteren Ende des Dünndarms angelegt werden mußte, haben gelehrt, daß hier der Inhalt ein dünner Brei von hellgelber bis hell-gelbgrüner Farbe ist, welcher durchaus noch keinen fäkalen Geruch hat. Die 5—10% Trockensubstanz dieses Breies enthalten bei leicht verdaulicher Kost nur wenig noch ungelöste Nahrungsreste, wie z. B. einige Stärkekörner, Fetttropfen, einige Muskelfasern, gelöst finden sich Albumosen, Peptone und Aminosäuren, Dextrine, höhere und niedere Fettsäuren, bisweilen Zucker. Dazu kommen eventuell unbrauchbare Schlacken, wie Knochenstückchen und Zellulose. Ferner finden sich die Reste der Verdauungssäfte und Bakterien. Die Reaktion ist schwach sauer.

Die Veränderungen, welche dieser Brei bei seinem Aufenthalt im Dickdarm durchmacht, bestehen erstens in einer Fortführung der Dünndarmverdauung durch die mit übergetretenen Enzyme des Pankreas- und Darmsaftes, zweitens in der Resorption der Verdauungsprodukte und besonders des Wassers, so daß eine starke Eindickung des Breies bis zu einem Trockengehalt von 30—50% zustande kommt, drittens in einer Durchmischung mit Dickdarmschleim, welcher, ähnlich wie muzinreicher Speichel, dazu dient, die Massen zusammenzubacken, und viertens in der Entfaltung einer mächtigen Wirkung der stark wuchernden Bakterien auf alle noch angreifbaren organischen Reste der Nahrung.

So wandelt sich der Dünndarmbrei allmählich im Dickdarm in die **Fäzes** um. Diese enthalten darum unter Umständen, nämlich wenn die Speise angenähert bloß aus reinen Nahrungsstoffen bestand, nichts oder fast nichts von Nahrungsresten, und bestehen dann fast nur aus Schleim, aus abgestorbenen und abgestoßenen Epithelien, aus den Überbleibseln der Verdauungssäfte, wie Cholesterin, Koprosterin, Urobilin, Hydrobilirubin, Cholsäure, Enzymen, aus unlöslichen Salzen, — z. B. nach reichlichem Milchgenuß zu 10—20% der Trockensubstanz aus Kalziumphosphat —, endlich aus lebenden und toten Bakterien, deren Masse 30—50% der Fäzes ausmacht,

Darum ist auch verständlich, daß die im Hunger gebildeten Fäzes ihrer Qualität nach ebenso zusammengesetzt sind, wie die Fäzes bei Nahrungszufuhr; nur die Quantität der letzteren überwiegt, da bei Nahrungszufuhr eben mehr Verdauungssäfte fließen, mehr Schleim produziert wird, mehr Bakterien wuchern.

Die Zusammensetzung der Fäzes kann aber auch ganz anders beschaffen sein. Ist nämlich die Nahrung stark mit unverdaulichen, namentlich harten Beimengungen, wie Knochen, Horn oder kompakten Zelluloseteilen belastet, dann bilden diese Massen nicht einfach ein Plus in den Fäzes, sondern auch abgesehen davon verändern sie sie quantitativ und qualitativ. Die harten Teile verursachen erstens durch mechanische Reizung der Darmschleimhaut eine reichlichere Abscheidung von Verdauungssaft, insbesondere von Schleim; zweitens regen sie die Peristaltik an, so daß die Nahrung rascher als sonst den Darmkanal passiert, also weniger Zeit zur Resorption des Verdauten bleibt, es verschlechtert sich also die Ausnützung; drittens findet man speziell bei einer an Zellulose reichen Kost sogar unveränderte Nahrungsstoffe, Eiweiß, Stärke, Chlorophyll, in den Fäzes, und zwar deswegen, weil die unverdauliche Zellulose als Zellmembran bei den Pflanzen das nahrhafte Protoplasma umschließt. Diese verschiedenen Einflüsse sind unmittelbar aus den folgenden Tabellen nach RUBNER abzulesen:

Fäzes-Trockensubstanz in g, welche 100 g getrockneter Nahrung entsprechen:

Weißbrot	4,5	Fett	8,5
Reis	4,1	Milch	9,0
Makkaroni	5,0	Kartoffeln	9,4
Fleisch	5,1	Wirsingkohl	14,9
Eier	5,2	Schwarzbrot	15,0
		Gelbe Rüben	20,7

Fäzes-Stickstoff in g, welche 100 g Nahrungs-Stickstoff entsprechen:

Fleisch	2,6	Wirsingkohl	25,3
Ei	2,6	Weißbrot	18,7—25,7
Milch	6,5—12,0	Schwarzbrot	32—40
Erbsen	10,5—17,5	Pilze	35,4
Kartoffeln	15,3	Gelbe Rüben	39
Mais	15,5	Kohlrüben	65
Reis	20,4	Äpfel	132

Die erste Tabelle beweist zahlenmäßig die bekannte Tatsache, daß vegetabilische Kost stärker kotbildend wirkt, als animalische. Präparierte zellulosefreie Vegetabilien, wie Reis und Makkaroni, bilden dabei allerdings und begreiflicherweise eine Ausnahme. Auf der anderen Seite liefert Milch relativ reichlich Kot, wesentlich deshalb weil, wie schon gesagt wurde, ein großer Teil der Milchsätze nicht resorbiert wird. Die stärkere Kotbildung durch vegetabilische Kost beruht aber auch noch auf dem größeren Wassergehalt.

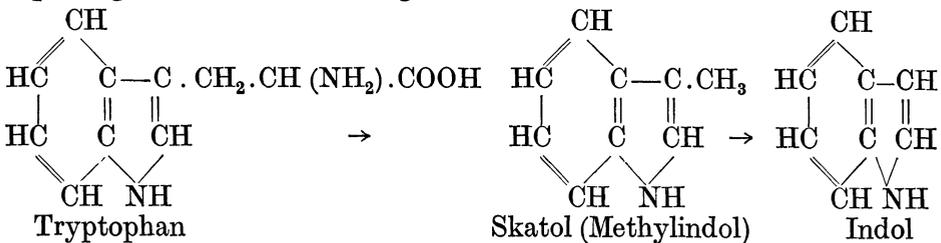
Die zweite Tabelle überzeugt davon, daß die Ausnützung des Eiweißes oder, vorsichtiger ausgedrückt, der N-haltigen Substanzen ungemein von der Art der Verabreichung abhängig ist. Das Eiweiß aus Fleisch und Eiern wird zu 97—98% ausgenützt, während bei vielen Vegetabilien die Verluste enorme sind, und diese Verluste sind um so

höher zu veranschlagen, als der Gehalt an N-haltigen Stoffen sowieso schon bei den Vegetabilien im allgemeinen geringer ist (siehe die Tabelle S. 14). Wir werden dies später bei der Besprechung der Kostmaße (Kap. 13) zu berücksichtigen haben. Die angegebenen Zahlen sind Mittelwerte, die Größe der Ausnützung ist stark individuell; im speziellen spielt auch die Gewöhnung eine wichtige Rolle. So ist z. B. beobachtet, daß bei Ernährung mit grobem Brot anfänglich 35% der N-haltigen Stoffe in den Fäzes verloren gingen, nach 7—10 Tagen nur noch 26% (ZUNTZ). Das ist in der Hauptsache so zu deuten, daß sich der Darm an die kräftigen mechanischen Reize von seiten der harten Kleieteile im groben Brot gewöhnt und nicht mehr mit so starker Vermehrung der Peristaltik reagiert, wie zuerst; im Krieg hat wohl jeder Erfahrungen derart sammeln können.

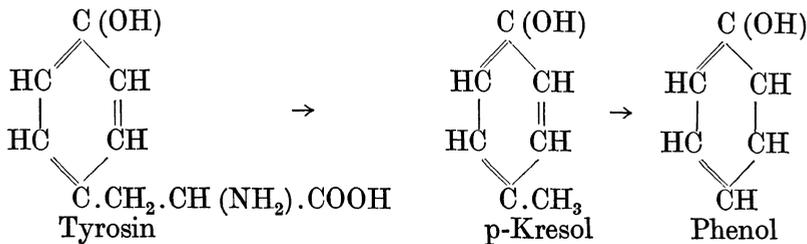
Die Ausnützung der vegetabilischen Kost ist aber auch sehr stark abhängig von der **Tätigkeit der Bakterien im Darmkanal**. Beim Menschen sind diese im Jejunum nur spärlich vorhanden, reichlicher schon im Ileum, in Massen treten sie aber erst im Dickdarm in Erscheinung; warum, ist nicht ganz klar. Die vorherrschenden Spezies sind das *Bacterium coli* und das *Bacterium lactis aerogenes*, beide vergären Kohlehydrate; dazu kommt der Eiweißfäulnis erzeugende *Bacillus putrificus*.

Die Aufspaltung der Kohlehydrate durch die Bakterien geht viel weiter als die enzymatische Spaltung; einerseits betrifft sie auch Kohlehydrate, welche für sämtliche Enzyme unseres Körpers unangreifbar sind, nämlich die Zellulosen, Hemizellulosen und Pentosane (siehe S. 43), andererseits bleibt sie nicht bei den Zuckern als letzten Spaltprodukten stehen, sondern diese werden weiter in einfache Fettsäuren, wie Ameisensäure, Essigsäure, Buttersäure, Milchsäure, Bernsteinsäure, in Gase, wie Wasserstoff, Methan und Kohlendioxyd zersetzt. Diese Zersetzung beginnt bereits im Dünndarm; denn davon rührt der Gehalt des Dünndarmbreies an freien niederen Fettsäuren her (s. S. 56).

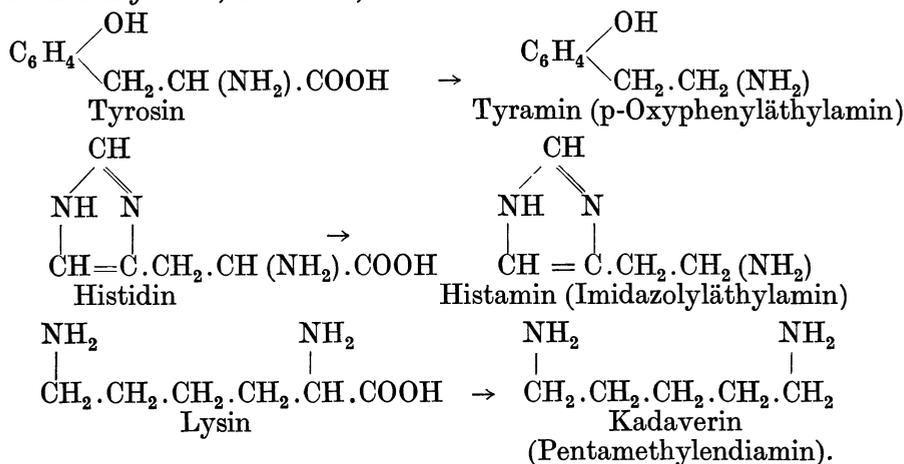
Ebenso werden bei der Eiweißfäulnis durch die Bakterien die Aminosäuren zerstört, wobei charakteristische, namentlich durch ihren üblen, zum Teil fäkalen Geruch ausgezeichnete Körper entstehen. Tryptophan geht über in die heftig riechenden *Skatol* und *Indol*:



aus Tyrosin entstehen *para-Kresol* und *Phenol*:



aus Tyrosin, Histidin und Lysin bilden sich, besonders bei pathologisch gesteigerter bakterieller Tätigkeit, durch Dekarboxylierung die basischen Produkte *Tyramin*, *Histamin*, *Kadaverin* u. a.:



Alle diese Stoffe sind mehr oder weniger giftig; werden sie resorbiert, so ergreift unser Körper wesentlich mit Hilfe der Leber gegen sie Abwehrmaßregeln, indem er sie zum Teil an Schwefelsäure bindet, es entstehen die sogenannten *gepaarten* oder *Ätherschwefelsäuren*, welche dadurch ungiftig sind, daß sie im Gegensatz zu den Ausgangsstoffen nicht mehr die Fähigkeit haben, die Oberfläche der Protoplasten, die „Plasmahaut“ zu durchdringen (siehe dazu Kap. 8).

Kohlehydrat- und Eiweißgärung schließen sich im großen Ganzen gegenseitig aus; reichlichere Kohlehydratzufuhr unterdrückt die Eiweißfäulnis, reichlichere Eiweißfäulnis die Kohlehydratgärung; jeder zoologische Garten belehrt die Nase darüber, wenn man an den Raubtier- und an den Pflanzenfresserkäfigen vorbeigeht.

Man könnte nach alledem der Meinung sein, daß die Bakterienflora für unseren Körper nichts weniger als erwünscht ist; bei genauerem Zusehen findet man, daß die Sache nicht so einfach liegt. Vor allem ist zu beachten, daß die Bakterien die Zellulose angreifen, für deren Spaltung unserem Körper kein Mittel zu eigen ist; von den zarten Zellulosen und Hemizellulosen, z. B. des grünen Salats, können im Darm des Menschen 25% und mehr vergoren werden. Dabei ist es weniger die Bildung der Spaltprodukte, welche, etwa als Fettsäuren, nach ihrer Resorption noch ausgenützt werden können, als die Tatsache der Aufschließung der von dem Zellulosemantel umhüllten pflanzlichen Protoplasten, welche die Vergärung der Zellulose für uns wertvoll machen. Diese Aufschließung spielt freilich im Verdauungskanal des Pflanzenfressers eine ungleich großartigere Rolle, aber auch das kommt uns indirekt zugute. Bekannt ist ja die absolut wie relativ gewaltige *Länge des Darms* bei den Pflanzenfressern; bei der Katze ist der Darm nur 3 mal so lang, als die Entfernung vom Kopf bis zum Steiß, beim Hund 4—6 mal, beim Menschen 7—8 mal, beim Schwein 14 mal, bei Schaf und Ziege 27 mal; besonders Kolon und Cökum haben außerordentliche Dimensionen. In diesem großen Raum haben beträchtliche Mengen Pflanzenkost Platz, und da sie sich z. B. im Leib des Wiederkäuers 2—8 Tage lang aufhalten, spielt sich eine viel intensivere Gärung ab als im Darm

des Menschen. Ja, beim *Wiederkäuer* ist sogar schon der Magen darauf eingerichtet, der Gärung möglichsten Vorschub zu leisten; die Speise gelangt bei ihm durch das Schlucken zuerst in die besonderen Abteilungen des *Pansen* und des *Netzmagens*, und dort verbleibt sie, reichlich mit Speichel durchsetzt, eine Weile und gärt, dann wird sie abermals ins Maul hinaufbefördert und durchkaut, „wiedergekaut“, um, zum zweiten Male verschluckt, in den eigentlichen Magen mit seinem sauren Saft zu gelangen. Diese Steigerung der Kohlehydratgärung ermöglicht dem Pflanzenfresser die Ausnützung von Wiesengras und Heu, von Stroh, Spreu und Blättern, welche für uns unbrauchbar sind, deren Zellulose sie jedoch bis zu 80% verdauen, und indem sie aus den aufgeschlossenen Protoplasten die Nahrungsstoffe herausresorbieren und zu Fleisch und Milch umbilden, kommt die Gärung auch uns indirekt zugute. Zugunsten der Bakterien können wir ferner anführen, daß, da die Gärungsvorgänge exotherme Reaktionen sind, Reaktionen, bei denen Wärme frei wird, nicht unbeträchtliche Mengen von Wärme entstehen, welche der sowieso notwendigen Anheizung des Körpers dienen können.

Diesen offenbaren Vorteilen unserer Vergesellschaftung mit den Bakterien stehen aber Nachteile gegenüber. Erstens wachsen die Bakterien und vermehren sich auf Kosten der zugeführten Nahrung, um dann in den Fäzes unseren Körper zu verlassen. Zweitens sind die Produkte der Gärung zum Teil für uns, im Gegensatz zu den Produkten enzymatischer Spaltung, unbrauchbar. Nicht bloß die Zellulose, sondern auch die für uns wertvolle Stärke kann bis zu einfachen Stoffen, wie Wasserstoff oder Methan, welche zwar einen hohen, aber für uns unzugänglichen Energiegehalt haben, abgebaut werden. Von den Produkten der Eiweißfäulnis wurde bereits gesagt, daß sie direkt giftig sind; aus dieser Erkenntnis des Vorkommens sogenannter *Autointoxikationen* entsprang teilweise die Lehre von der Schädlichkeit der Fleischkost, welche heute von zahlreichen Ernährungsreformern gepredigt wird, teils gründet sich darauf die Propaganda für die bekannten Gärungsprodukte der Milch, *Kefyr* und *Yoghurt*, da die Kefyr- und Yoghurt-Bakterien die Erreger der Eiweißfäulnis zurückdrängen sollen.

Stellt man die Vorteile, welche das Bakterienwachstum in unserem Darmkanal gewährt, mehr in den Vordergrund als die Nachteile, so kann man zu der Frage kommen, ob wir es hier nicht mit einer notwendigen Symbiose zu tun haben, ob nicht die Bakterien für unser Gedeihen geradezu unentbehrlich sind. NUTTALL und THIERFELDER haben darauf durch das Experiment zu antworten versucht, nämlich sie führten den von PASTEUR angeregten Versuch durch, neugeborene Tiere keimfrei aufzuzüchten. Sie gewannen junge Meerschweinchen steril durch Kaiserschnitt aus dem Muttertier und ernährten sie in einem kunstvollen sterilen Glaskäfig mit sterilen Keks und Milch; die Tiere wuchsen, boten keinerlei Zeichen von Störung und erwiesen sich, nachdem sie getötet waren, als wirklich keimfrei. Zum entgegengesetzten Resultat gelangte SCHOTTELIUS bei jungen, eben aus dem Ei gekrochenen Hühnchen; unter ähnlichen bakteriologischen Bedingungen, wie NUTTALL und THIERFELDER sie einhielten, gingen seine Tiere trotz reichlicher Nahrungsaufnahme zugrunde, konnten jedoch am Leben erhalten werden, als SCHOTTELIUS der Nahrung gewisse Bakterien zusetzte. Es ist jedoch zu bedenken, daß SCHOTTELIUS die Hühnchen mit Körnern fütterte, und diese verlangen natürlich Bakterien, welche die Zellulosemäntel der Protoplasten

aufschließen; *bei Ernährung mit reinen oder fast reinen Nahrungsstoffen sind nach unseren gegenwärtigen Kenntnissen die Darmbakterien entbehrlich.*

Wie bei den übrigen Darmabschnitten, so werden auch beim Dickdarm die chemischen Veränderungen seines Inhaltes durch die **mechanischen Vorgänge** unterstützt. Dünn- und Dickdarm sind im allgemeinen gegeneinander an der Valvula coli durch den Sphincter ileocolicus abgeschlossen; nur von Zeit zu Zeit öffnet sich der Sphinkter, um Dünndarminhalt in das Kolon übertreten zu lassen. Eine Passage in der entgegengesetzten Richtung kommt im allgemeinen nicht vor. Aber interessant und besonders für die ärztliche Praxis wichtig ist es, daß, wie Röntgendurchleuchtungen gelehrt haben, Nährklistieren der Übertritt in den Dünndarm unter Erschlaffung der Ringmuskulatur in der Umgebung des Sphinkters oberhalb sowohl wie unterhalb gewährt wird, aus welchen Gründen, ist nicht bekannt; der anomale Gehalt des Dickdarminhaltes an Nährstoffen wird dabei eine Rolle spielen. Die Bewegungen des Dickdarmes sind, wie beim Dünndarm, teils Pendelbewegungen, teils peristaltische Bewegungen. Als neue Bewegungsform kommt die *Antiperistaltik* in den proximalen Abschnitten hinzu (CANNON). Wenn nämlich reichlichere Mengen Dünndarminhalt ins Kolon befördert sind, dann wird lange Zeit, eventuell stundenlang, der Inhalt rückwärts gegen die geschlossene Valvula coli getrieben, und indem er sich so eine Weile staut, wird er durch ausgiebige Resorption von Wasser bis zu der fäkalen Konsistenz eingedickt. Ist dies erreicht, dann schlägt die Antiperistaltik plötzlich in die normale Peristaltik um, und diese treibt den Inhalt in die distalen Kolonabschnitte.

Über die *Innervation der Dickdarmbewegungen* sind wir noch unvollkommen unterrichtet. Die Bewegungen sind, wie die des Dünndarmes, automatisch (siehe S. 54); dazu kommt eine äußere Innervation von seiten des Sympathikus und für die oberen Abschnitte des Kolon auch von seiten des Vagus. Der Sphincter coli wird vom 13. Thorakal- und 1. bis 3. Lumbalsegment des Rückenmarks aus über den Nervus splanchnicus innerviert. Durchschneidung dieser Fasern bringt den Sphinkter zu länger andauerndem Klaffen. Es ist die Meinung geäußert, daß manche Durchfälle, welche bei Verletzung des Rückenmarks beobachtet werden, damit in Zusammenhang stehen.

Den letzten Akt der Verdauungsmechanik bildet die Entleerung des Enddarmes, die **Defäkation**. Ist durch die Peristaltik des Dickdarmes die Flexura sigmoides gefüllt, so verkürzt sich diese durch Kontraktion ihrer Längsmuskulatur und damit verschiebt sich ihr Inhalt ins Rektum. Nun kommt es zu dem Gefühl des „Stuhldrangs“; es werden also von diesem Endabschnitt des Verdauungskanals aus Empfindungen ausgelöst, ähnlich wie auch Reize, welche den Anfangsteil, Mundhöhle, Schlund und Ösophagus treffen, empfunden werden. Alle Vorgänge in dem langen und wichtigsten Abschnitt des Intestinums, in Magen, Dünn- und Dickdarm, teilen sich dagegen unserem Bewußtsein nicht mit. Wir werden uns später (s. Kap. 34) mit dieser Tatsache der Unbewußtheit der inneren Funktionen noch einmal eingehend beschäftigen; an dieser Stelle sei nur noch darauf verwiesen, daß auch nur Anfangs- und Endteil des Intestinaltrakts einigermaßen unserer Willkür unterstellt sind.

Die Defäkation ist ein Reflex. Auf den als Stuhldrang perzipierten Reiz der Füllung des Enddarmes kontrahiert sich vor allem die Ring-, aber auch die Längsmuskulatur des Rektums, zu gleicher Zeit erschlaffen

der Sphincter ani internus und externus, welche sich bis dahin im Zustand der Daueranspannung, im Tonus befanden; dazu setzt die „Bauchpresse“ ein und unterstützt die Bewegungen des Rektums in ihrem Effekt. Es ist also eine komplizierte Muskelkoordination, deren Abhängigkeit vom Zentralnervensystem nach allen Analogien vorausgesetzt werden darf. In der Tat kann von einem im Rückenmark gelegenen *Centrum anospinale* gesprochen werden. Wenn man das Lumbosakralmark bei einem Hund ausrottet, oder wenn bei einem Menschen die untere Lendenwirbelsäule zertrümmert wird, so kommt es zu einer „Incontinentia alvi“, d. h. zu nicht mehr periodischer Entleerung größerer Kotmengen, sondern zu häufigem und unregelmäßigem Abgang kleiner Portionen aus dem klaffenden Anus. Der letzte Abschnitt des Darmkanals wird nämlich vom Lumbosakralmark aus innerviert, und zwar führen wieder, wie in den analogen Fällen, zweierlei Wege dorthin. Direkt aus dem Sakralmark entspringen Fasern, welche in den *Nervi pelvici s. erigentes* zum Enddarm laufen, und indirekt kommen Fasern der *Nervi hypogastrici* über den Grenzstrang des Sympathikus und das Ganglion mesentericum inferius aus dem 2.—4. Segment des Lumbalmarks; die künstliche Reizung dieser Nerven kann sowohl Erregung wie Hemmung der innervierten Muskulatur herbeiführen. Es ist aber, besonders von GOLTZ, die wichtige Feststellung gemacht worden, daß einige Zeit nach der Ausschaltung des Analzentrums die Defäkation annähernd normalen Charakter wiedererlangt; namentlich kommt es wieder zu einem kräftigen Sphinkterentonus. Das ist um so bemerkenswerter, als der Sphincter ani externus im Gegensatz zum Sphincter internus aus quergestreifter Muskulatur wie die Skelettmuskulatur besteht, und von dieser ist ja allgemein bekannt, daß sie, losgelöst vom Zentralnervensystem, dauernd erlahmt, und daß sie einige Zeit, nachdem die Impulse vom Zentrum her aufgehört haben, degeneriert (siehe Kapitel 22); der Sphincter ani externus dagegen behält auch nach der Zerstörung des *Centrum anospinale* dauernd seine Funktionsfähigkeit und dokumentiert seine Gesundheit auch durch die rote normale Farbe seiner Muskulatur. Es hängt dies wohl damit zusammen, daß im Gegensatz zum Skelettmuskel diese Eingeweidemuskulatur auch noch von den peripheren sympathischen Ganglienzellen abhängt, ähnlich wie etwa Magen und Dünndarm.

Die Defäkation nach Ausschaltung des Zentralnervensystems ist aber keineswegs vollkommen normal, das Analzentrum also keineswegs überflüssig. Zwar erfolgen auch unter diesen Verhältnissen periodische Entleerungen größerer Fäzesmengen, aber ohne Beteiligung der Bauchpresse; mit dadurch wird die Entleerung leichter unvollständig, und man findet öfter im Rektum angesammelten Kot. So kommt es bei Erkrankung des Lumbosakralmarks auch häufig zu Obstipation. Da ferner das Gefühl des Stuhldrangs mangelt, und da die willkürliche Verstärkung, ebenso wie die willkürliche Hemmung des Sphinkterschlusses nicht mehr möglich ist, so vermag auch der Wille, d. h. das Großhirn, nicht mehr die Zeit des Stuhlgangs bis zu einem gewissen Grad zu bestimmen, indem er die Defäkation entweder durch Ingangsetzen der Bauchpresse und durch Entspannung der Sphinkteren fördert oder sie durch Anspannung der Sphinkteren hemmt. So wird auch verständlich, daß bei heftigen psychischen Erschütterungen, sozusagen durch Ausschaltung des Gehirns, oft wider Willen der Darm sich rein reflektorisch entleert.

6. Kapitel.

Die Resorption.

Osiose und Diffusion 63. Die bei der Resorption beteiligten Kräfte 65. Die Resorption der Hauptnahrungstoffe 67.

Unter Nahrungsaufnahme ist vom Standpunkt des Physiologen wie auch des Morphologen nicht eigentlich das Verzehren der Speise zu verstehen, sondern ihre Resorption. Denn die Schleimhäute des Intestinaltrakts sind immer noch quasi eingestülpte Körperoberfläche; erst indem die Nahrungsstoffe aus der im Magen oder Darm enthaltenen Flüssigkeit in die Flüssigkeiten des Körpers, in Lymphe oder Blut übertreten, wird von ihnen zum erstenmal eine lebende Zelle oder Zellschicht, ein Teil unseres Leibes, passiert. Die Frage, welche uns jetzt beschäftigen soll, ist nun, auf welche Weise, durch welche Kräfte diese Bewegung zustandekommt. Ihre Beantwortung ist von unmittelbarem Interesse; denn sie ist ja im Zusammenhang mit allem, was wir bisher als Verdauungsphysiologie erörtert haben, die am nächsten liegende Aufgabe. Das Studium der Resorptionskräfte hat aber überdies die Aufmerksamkeit vieler Physiologen auch deshalb auf sich gelenkt, weil es zeitweilig den Anschein hatte, als könnte hier ein wichtiger Akt im Leben jedes Tieres restlos auf bekannte physikalische und physiko-chemische Gesetze zurückgeführt und damit das Endziel physiologischer Forschung in einem bestimmten Fall verwirklicht werden.

Strebt man nun auf dieses Ziel hin, so liegt es nahe, die Resorption mit dem Durchtritt von Lösungen durch irgendwelche tote Membranen hindurch, durch Pergament, durch eine Schweinsblase, durch eine Gelatineschicht oder dergleichen in Parallele zu setzen. Dieser Durchtritt könnte erstens durch *Filtration* zustande kommen. Darunter versteht man die Bewegung der Lösung durch die Membran infolge einer hydrostatischen Druckdifferenz auf beiden Seiten der Membran. Zweitens können die beiden Komponenten einer Lösung, Lösungsmittel und gelöster Stoff, mehr oder weniger unabhängig voneinander die Membran passieren; diese Bewegungen werden als *Osiose* und als *Diffusion* bezeichnet.

Schichtet man eine verdünnte wässrige Lösung über eine konzentriertere, so bewegt sich freiwillig der gelöste Stoff allmählich von Orten größerer Konzentration zu Orten geringerer Konzentration, bis seine Verteilung gleichmäßig geworden ist. Die Geschwindigkeit, mit welcher diese Ausbreitung, diese Diffusion erfolgt, ist unter anderem eine Funktion der Molekülgröße; die Diffusionsge-

schwindigkeit ist um so größer, je kleiner das Molekül ist. Daher ist die Diffusionsgeschwindigkeit hochmolekularer Substanzen, wie Eiweiß, Stärke oder Leim, in Wasser fast gleich Null, und GRAHAM bezeichnete die Stoffe, welche sich bei der Diffusion wie Leim (colla) verhalten, allgemein als *Kolloide*. Trennt eine Membran die konzentriertere von der verdünnteren Lösung, so hängt die Diffusionsgeschwindigkeit auch von Eigenschaften der Membran ab, nämlich, wenn die Membran Poren enthält, von dem Verhältnis des Gesamtquerschnitts der Poren zur Gesamtfläche der Membran, und wenn der Durchmesser der einzelnen Poren in die Größenordnung der Moleküldurchmesser hineinfällt, so kann die Membran zu einem „*Molekülsieb*“ werden, welches gewisse kleine Moleküle passieren läßt und größere von der Diffusion ausschließt. Die Eigenschaften der Membranen können sich aber auch in ganz anderer Weise geltend machen; wenn z. B. eine Kautschukmembran eine wässrige Lösung von Äther von einer wässrigen Lösung von Alkohol trennt, so diffundiert der Äther in die Alkohollösung, aber nicht umgekehrt der Alkohol in die Ätherlösung. Das ist dadurch zu erklären, daß Kautschuk ein Lösungsmittel für Äther, aber nicht für Alkohol ist. Hier kommt es für den Durchtritt der gelösten Stoffe also nicht auf die Porosität der Membran und nicht auf die Molekülgröße des diffundierenden Stoffes an, sondern auf *selektive Löslichkeit* (RAOULT, NERNST, OVERTON), d. h. auf eine gewisse Affinität der Membran zum gelösten Stoff.

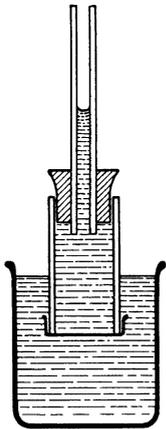


Abb. 13. Osmometer. Der innere Zylinder ist unten durch eine semipermeable Membran verschlossen.

Wie nun aber, wenn eine Membran zwei wässrige Lösungen verschiedener Konzentration voneinander trennt und die Membran weder als Porenfilter noch als Lösungsmittel dem gelösten Stoff den Durchtritt gewährt, so daß ein Ausgleich der Konzentrationsdifferenz durch Diffusion nicht zustandekommen kann? Dann ist immer noch ein Ausgleich durch *Osmose* möglich, vorausgesetzt, daß die Membran für das Lösungsmittel der Lösungen, für das Wasser durchlässig ist. Solche Membranen, welche allein das Lösungsmittel passieren lassen, heißen *halbdurchlässige* oder *semipermeable Membranen*; die Membran aus Ferrozcyankupfer, welche sich an der Grenze einer Ferrozcyankalium- und einer Kupfersulfat-Lösung bildet, ist z. B. eine semipermeable Membran (M. TRAUBE). Man kann solche Membranen in bekannter Weise in einem Osmometer verwenden (siehe Abb. 13); füllt man dieses mit einer wässrigen Lösung und stellt es in Wasser, so steigt alsbald das Niveau in dem Steigrohr als Beweis dafür, daß eine Osmose von Wasser in die Lösung hinein statthat. Es bildet sich also eine hydrostatische Druckdifferenz aus als Maß für die osmotische Saugkraft der Lösung, und wenn ein Gleichgewicht, d. h. eine Konstanz der Druckdifferenz erreicht ist, dann repräsentiert der hydrostatische Druck den „*osmotischen Druck*“ der Lösung.

Die Osmose ist unter sonst gleichen Bedingungen um so stärker, je größer der Konzentrationsunterschied in den Lösungen zu beiden Seiten der Membran ist. Der osmotische Druck ist ganz allgemein eine Funktion der molekularen Konzentration, d. h. der in der Raumeinheit Lösung verteilten Zahl gelöster Moleküle (PFEFFER, VAN'T HOFF). Trennt man also zwei Lösungen, welche zwei verschiedene Stoffe in der gleichen molekularen Konzentration gelöst enthalten, durch eine Membran, so sind sie *osmotisch* im Gleichgewicht, sie sind *isotonisch*.

Isotonische Lösungen brauchen aber nicht im Diffusionsgleichgewicht zu stehen. Denn es gibt Membranen — und sie überwiegen weitaus —, welche sowohl für das Lösungsmittel, als auch für den gelösten Stoff permeabel sind; dazu gehören sämtliche gewöhnlich zu Diffusionsversuchen gebrauchte Membranen. Bei ihnen wird je nach der Größe der osmotischen Druckdifferenz zwischen zwei beliebigen wässrigen Lösungen, welche die Membran voneinander trennt, je nach der Diffusionsgeschwindigkeit der beteiligten gelösten Stoffe, je nach den Eigenschaften der Membran als Porenfilter und als Lösungsmittel zunächst bald mehr die Diffusion, bald mehr die Osmose überwiegen; das Ende solch eines Austausches durch die Membran hindurch muß aber immer Gleichheit der Konzentration aller gelösten Stoffe auf beiden Seiten der Membran, also auch Gleichheit der osmotischen Drucke sein.

Fragen wir uns nun, ob die Resorption der gelösten Nahrungsstoffe aus dem Intestinaltrakt mit den eben geschilderten Membranvorgängen

zu vergleichen, und nicht bloß das, ob sie durch dieselben auch zu erklären ist. *Das Hauptresorptionsorgan ist der Dünndarm*, seine Leistungen überwiegen bei weitem über die Resorptionsleistungen des Magens und des Dickdarmes. Er ist auch der Funktion der Aufnahme besonders angepaßt durch die enorme Ausdehnung seiner Schleimhautoberfläche, welche sich über die KERKRINKSchen Falten und vor allem über die zahllosen, in den Dünndarmbrei eintauchenden Darmzotten hinerstreckt. Den in dem Brei gelösten Nahrungsstoffen, oder vielmehr den durch die enzymatischen Spaltungen entstandenen wasserlöslichen und relativ kleinmolekularen Spaltprodukten derselben bietet sich also eine enorme Filtrations- und Diffusionsfläche für den Übergang in die Gewebsflüssigkeiten dar.

Über die **Natur der Resorptionskräfte** und über die wichtigste Frage, *ob die Resorptionsmembran trotz ihres Aufbaues aus lebenden Zellen sich nur wie eine tote Membran passiv bei dem Übergang der Stoffe verhält, oder ob die Zellen aktiv Arbeit leistend eingreifen*, kann man sich auf eine ziemlich einfache Weise orientieren. HEIDENHAIN entnahm einem Hunde Blut und brachte ihm nach Öffnung der Bauchhöhle sein eigenes Blutserum in eine leere, beiderseits abgebundene Darmschlinge; es zeigte sich, daß der Hund sein eigenes Serum resorbiert. In diesem Experiment sind Konzentrationsdifferenzen zwischen Darminhalt und Gewebsflüssigkeit so gut wie ganz ausgeschlossen, Diffusion und Osmose können also an der Resorption keinen Anteil genommen haben; zu diskutieren wäre nur, ob etwa durch die Arbeit der Darmmuskeln, welche allseitig den Darminhalt umschließen und unter Druck versetzen können, das Serum ins Blut hinübergereßt, also durch die Darmschleimhaut hindurch filtriert sein könnte. Aber vor aller weiteren Diskussion läßt sich durch ein anderes Experiment eine Filtrationskraft dieser Art ausschließen. REID verwendete frisch aus einem eben getöteten Kaninchen entnommene Stücke Dünndarm als Diaphragma, welches zwei mit der gleichen Kochsalzlösung gefüllte Räume voneinander trennte, und konnte nun feststellen, daß solch ein ausgeschnittenes Darmstück die Lösung eine Zeitlang von der Schleimhautseite zur Serosaseite durch sich hindurch transportiert. Hier leistet also die Membran selber Arbeit, sie drückt oder saugt die Lösung durch sich hindurch; nach einiger Zeit, offenbar indem sie abstirbt, aber auch wenn man sie chloroformiert, versagt sie; das beweist, daß es auf die Lebenstätigkeit ihrer Zellen ankommt. Wie soll man das erklären? Darauf läßt sich mit einer recht ansprechenden Hypothese antworten: die Darmzotten enthalten erstens glatte Muskelfasern, durch welche sie verkürzt werden können, zweitens erweitern sich die Lymphräume des unter dem Epithel gelegenen retikulären Bindegewebes zu einem „zentralen Chylusgefäß“, welches in die tiefer gelegenen, „Chylus“, d. h. Darmlymphe führenden größeren Lymphgefäße einmündet. Wenn nun die Zotten durch periodische Tätigkeit der Muskeln sich abwechselnd erigieren und verkürzen, so kann eine Pumpwirkung zustandekommen, da dabei der Raum des zentralen Chylusgefäßes abwechselnd eng und weit wird (GRAF SPEE, HEIDENHAIN), und da sich außerdem in den tiefer gelegenen Lymphgefäßen Ventile befinden, welche, ähnlich wie bei den Venen dem Blut, so hier der Lymphe nur in einer Richtung, vom Darm fort, zu fließen erlauben (siehe Kapitel 11). Funktioniert dieser Mechanismus der „Zottenpumpe“ in Wirklichkeit, dann verstehen wir den sonst so rätselhaften Versuch von REID. Zwar

müssen wir dann unbedingt anerkennen, daß an dem Resorptionsakt vitale Leistungen teilhaben, aber das Problem, das dann zu lösen bleibt, ist kein anderes, als es jede beliebige Muskelkontraktion auch vor uns hinstellt.

Abgesehen von dieser filtrierend wirkenden, von der Darmwand entwickelten Triebkraft kommen nun aber auch die Kräfte der **Diffusion und Osmose** zur Geltung. Dies läßt sich etwa aus dem folgenden Versuch von HEIDENHAIN ableiten, bei welchem es sich um die Resorption verschieden-prozentiger Kochsalzlösungen aus dem Dünndarm eines Hundes handelt. In dem Versuch wurde die Bauchhöhle des Tieres geöffnet, eine Darmschlinge beiderseits abgebunden und mit den verschiedenen Lösungen gefüllt.

Eingeführt			Nach 15 Min. noch in der Schlinge enthalten			Also wegresorbiert	
ccm			ccm			ccm	
120	0,3 % NaCl	0,36 g NaCl	18	0,60 % NaCl	0,108 g NaCl	102	0,25 g NaCl
120	0,5 „ „	0,6 „ „	35	0,66 „ „	0,23 „ „	85	0,37 „ „
117	1,0 „ „	1,17 „ „	75	0,90 „ „	0,67 „ „	42	0,50 „ „
120	1,46 „ „	1,75 „ „	109	1,20 „ „	1,31 „ „	11	0,44 „ „

Das Ergebnis ist völlig zu begreifen, sobald man erstens bedenkt, daß außer Diffusion und Osmose die eben erwähnte Triebkraft wirkt, daß zweitens der NaCl-Gehalt des Blutplasmas etwa 0,65% beträgt, und daß drittens mit dem Blut eine ungefähr 0,95% NaCl-Lösung isotonisch ist. Dann sieht man ein, daß die Geschwindigkeit der Wegresorption der Flüssigkeit um so geringer ist, je größer der NaCl-Gehalt, d. h. je größer der osmotische Druck der gegebenen Lösung ist. Ferner versteht man, daß der NaCl-Gehalt der Lösung, indem er sich während der Resorption ändert, gegen den Wert von etwa 0,65% hin tendiert; denn die 0,3- und die 0,5%ige Lösung sind mit dem Blut nicht isotonisch, sondern „hypotonisch“, aus ihnen wird also osmotisch Wasser abgesogen, die 1,46% Lösung ist „hypertonisch“, sie zieht Wasser an, und aus der ungefähr isotonischen 1%igen Lösung kann NaCl durch Diffusion ins Blutplasma abwandern. Endlich ist auch zu begreifen, daß in den ursprünglich 0,3- und 0,5%igen Lösungen der Gesamtgehalt an NaCl während der Resorption abnimmt, und daß das Volumen der hyper-tonischen 1,46%igen Lösung während der Resorption nicht zunimmt, weil ja die Kräfte der Diffusion und Osmose durch die filtrierende Triebkraft überkompensiert sein können (HÖBER).

Die Mitbeteiligung der Diffusion bei der Resorption folgt auch aus der Tatsache, daß, wenn nicht komplizierende Einflüsse das Bild trüben, *die Resorptionsgeschwindigkeit der Diffusionsgeschwindigkeit parallel geht*. Daher werden z. B. die relativ langsam diffundierenden Sulfate schlecht resorbiert und darum als Abführmittel verwendet, da sie osmotisch Wasser im Darm zurückhalten und so durch seine Füllung Peristaltik auslösen (s. S. 53). *Auch als Lösungsmittel in rein physiko-chemischer Betrachtung wirkt die Darmmembran bei der Resorption gewisser Stoffe, also vergleichbar der vorher erwähnten Kautschukmembran, welche Äther „resorbiert“.* Nämlich diejenigen Stoffe, welche in den sämtlichen Zellen als Stromabestandteilen enthaltenen Lipoiden (siehe S. 49) löslich sind, wie Äthylalkohol und andere Narkotika, werden

relativ sehr rasch resorbiert und im allgemeinen um so rascher, je lipid-löslicher sie sind (s. dazu Kap. 8); das ist so zu erklären, daß diesen Stoffen nicht bloß die wasserdurchtränkten Teile der Zellen zur Diffusion offen stehen, sondern dazu auch die Lipoide (HÖBER).

Es gibt aber auch Beobachtungen, welche dem, was man nach den Gesetzen der Diffusion und der Osmose zu erwarten hat, durchaus konträr laufen. O. COHNHEIM gibt z. B. an, daß aus einem mit Jodnatriumlösung gefüllten und in Meerwasser aufgehängten Cephalopoden-Darm alles NaI verschwindet und in die umgebende Lösung hinausgetrieben wird, und auch bei Hunden läßt sich zeigen, daß unter bestimmten Bedingungen der NaCl-Gehalt einer Lösung im Darm unter den NaCl-Gehalt des Blutplasmas während der Resorption heruntersinkt, daß also Kochsalz entgegen dem Konzentrationsgefälle wandert. Hier handelt es sich um eine Arbeitsleistung, gerade so, wie wenn ein Gas von einer niederen Konzentration, also von einem niederen Druck auf einen höheren Druck gebracht werden soll. Das ist eine Leistung, wie sie in vergleichbarer Art und Weise auch in anderen Organen vollzogen wird; denn die Verrichtung von „Konzentrationsarbeit“ ist typisch für zahlreiche Drüsen, wovon später die Rede sein wird. Die Leistung ist natürlich ein neues Dokument dafür, daß *die lebenden Zellen aktiv bei der Resorption eingreifen*.

Wenden wir uns nun der Betrachtung der **Resorption bestimmter Nahrungsstoffe** zu. Die *Fette* werden, wie wir sahen, im Darm in Fettsäuren und Glycerin gespalten, die Fettsäuren teils durch Überführung in Seifen, teils durch den Einfluß der Gallensäuren in Lösung gebracht; damit ist die Hauptbedingung für die Resorbierbarkeit, die Wasserlöslichkeit und die Diffusibilität, erfüllt. Daß dies aber eine *Conditio sine qua non* ist, läßt sich gerade beim Fett zeigen. Denn verfüttert man z. B. an Stelle der gewöhnlichen Glycerin-Fette einen Fettsäurecholesterinester, wie das Lanolin, welches für Steapsin unangreifbar ist, so findet man, daß es nicht resorbiert wird.

Höchst merkwürdig ist, daß die Spaltlinge der Fette unmittelbar nach ihrer Resorption wieder zu Fett synthetisch vereinigt werden. Nach einer reichlichen Fettmahlzeit findet man die Darmlymphgefäße mit milchweißem Inhalt gefüllt, mit *Chylus*, in welchem gerade so wie in Milch das Fett emulgiert ist. Die Fetttröpfchen lassen sich nach rückwärts bis in die Zottenepithelien hinein verfolgen; dort sind sie aber nicht schon dicht unter der gegen das Darmlumen gerichteten Oberfläche zu sehen, sondern erst in tieferen Partien des Zellprotoplasmas. Regeneriertes Fett könnte also unmittelbar unter der Zelloberfläche höchstens in ultramikroskopischer Aufteilung vorhanden sein. Auf alle Fälle sind die Spaltprodukte also nur auf der ganz kurzen Strecke vom Darmlumen bis hinein in die oberste Zone des Epithels vorhanden; aber das ist für die Resorption offenbar unumgänglich notwendig. Eine feine Emulgierung, so wie sie im Dünndarm statthat (S. 44), genügt zur Resorption noch nicht. Daher werden auch Kohlenwasserstoffe, wie z. B. Paraffinöl, die sich zwar sehr fein zerteilen, aber nicht in wässrige Lösung bringen lassen, nicht aufgenommen.

Die Resynthese der Fette ist wahrscheinlich, wie ihre Zerlegung, ein enzymatischer Vorgang; es wäre falsch, an der bis vor kurzem gehegten und auch durch die bisherigen Darlegungen vielleicht genährten Vorstellung festzuhalten, als ob die Enzyme immer nur spalten; wir werden

später noch auf den Nachweis von fermentativen Synthesen zu sprechen kommen. Interessant ist, daß die Darmepithelien vielleicht noch mit ganz anderen synthetischen Fähigkeiten begabt sind; verfüttert man nämlich freie Fettsäuren oder Seifen oder die Äthylester der Fettsäuren, so erscheinen trotzdem im Chylus die neutralen Glyzeride, es wird also Glyzerin hinzugeliefert (MUNK, FRANK).

Nach der Passage der Darmepithelien gelangen die Fetttropfchen in die Lymphspalten und von da in die offenen Lymphgefäße.

Im Gegensatz zu den Fetten werden die Spaltprodukte der *Kohlehydrate* und *Eiweißkörper* im allgemeinen nicht in die Lymphgefäße, sondern in die Blutbahn hinein resorbiert. Das liegt jedenfalls daran, daß die einfachen Zucker und Aminosäuren relativ diffusibel sind, also leicht die Wandungen der Blutkapillaren durchdringen und nun vom Blutstrom mit fortgeführt werden. Die resorbierten Zucker und Aminosäuren sind im Blut nicht leicht aufzufinden; man muß bedenken, daß, wenn auch reichlich Stärke oder Eiweiß als Nahrung zugeführt worden ist, doch in jedem Moment nur wenig Spaltprodukte im Darmkanal entstehen, welche resorbiert und nun gleich durch die rasche Blutbewegung auf die ganze Masse des Blutes verteilt werden; kommt hinzu, daß die Spaltprodukte zur weiteren Verwendung alsbald aus dem Blut in die Gewebe übertreten, so wird es begreiflich, daß der prozentische Gehalt an resorbierten Bestandteilen der Nahrungsstoffe im Blut nur sehr geringfügig sein kann. Immerhin steigt nach einer kohlehydratreichen Mahlzeit der Traubenzuckergehalt im Pfortaderblut von 0,1% auf etwa 0,3% an, und in größeren Quanten Blut kann man auch freie Aminosäuren nachweisen. Ein ingenüoses Verfahren, die diffusiblen Abbauprodukte der Nahrungsstoffe im Blut aufzufinden, ist von ABEL angegeben worden; er schaltete bei Hunden in die Kontinuität der Blutgefäßbahn einen langen dünnwandigen gewundenen Kollodiumschlauch ein, welcher von einem mit Kochsalzlösung gefüllten Mantel umgeben war. Das Blut kann so stundenlang durch den Schlauch zirkulieren und läßt dabei seine diffusiblen Substanzen zum Teil durch die Schlauchwände in die Lösung übertreten, in der sie später nach Eindampfen leicht nachgewiesen werden können. Auf diese Weise lassen sich durch „Vividiffusion“ z. B. Aminosäuren grammweise dem Blut entziehen.

Aber *die komplexen Kohlehydrate und Eiweißkörper können gelegentlich auch unverändert zur Resorption gelangen*. Trotz ihrer geringen Diffusibilität passiert ein Teil davon, noch ehe die Verdauungsenzyme zur Wirkung kamen, die Darmwand, falls große Mengen in gelöster Form in den Darmkanal gebracht werden; genießt man z. B. mehrere rohe Eier, so tritt oft genuines Hühnereiweiß ins Blut über, ebenso ist dort Stärke nachgewiesen worden. Wie sich der Körper diesen abnormen Eindringlingen gegenüber verhält, werden wir bald erfahren.

7. Kapitel.

Das Blutplasma.

Die Zusammensetzung des Blutes 69. Die Blutgerinnung 71. Die Artspezifität der Eiweißkörper und die biologischen Reaktionen 73. Der osmotische Druck des Plasmas 77. Die Bedeutung der Plasmasalze und die physiologische Kochsalzlösung 78. Die Reaktion des Blutes 79.

Wir haben eben gesehen, wie die Verdauungsprodukte der Nahrung dem Blut beigemischt werden und dieses so zu dem ernährenden Saft machen, als welcher es gemeinlich angesehen wird. Aber wir sahen auch, wie sich die Nahrungsbestandteile in der großen Masse des Blutes verlieren, sie treten hinter anderen Blutbestandteilen bei weitem an Menge zurück. Auf diese letzteren wollen wir nun zunächst unsere Aufmerksamkeit richten, und den Verbleib der Nahrungsstoffe erst später wieder ins Auge fassen, wenn wir uns der Tätigkeit der vom Blut gespeisten einzelnen Organe zuwenden.

Als bald nachdem Blut aus einer Wunde ausgeflossen ist, bietet sich dem Auge ein überraschender Prozeß dar; das Blut erstarrt zu einer festen Masse. Der Sinn dieser **Gerinnung** ist klar; denn wenn die Wunde nicht allzu groß ist, so kann durch das Gerinnsel, das in dem aussickernden Blut entsteht, die Wunde automatisch verschlossen werden. Die Natur dieses Gerinnungsvorganges wird uns nachher beschäftigen; zunächst soll er uns nur dazu dienen, eine mechanische Analyse der Blutbestandteile vorzunehmen.

Erstarrt eine größere Menge von Blut in einem Glase, so spricht man von der roten, sulzigen, puddingartig aus dem Glase ausstülpbaren Masse als von einem *Blutkuchen*. Läßt man diesen eine Zeit lang stehen, so schrumpft er, indem er eine heller oder dunkler gelbe, klare Lösung aus sich auspreßt, das *Blutserum*. Man kann aber die ganze Erstarrung verhindern, wenn man das Blut gleich nach seinem Austritt aus dem Blutgefäß mit einer Rute oder einem Stabe schlägt; es setzt sich alsdann im Verlauf einiger Minuten eine Masse von Fäden an der Rute fest, bestehend aus dem *Faserstoff* oder *Fibrin*; das übrig bleibende *defibrinierte Blut* gerinnt nicht mehr. Wäscht man das ausgeschiedene Fibrin mit Wasser, so zeigt sich, daß es schneeweiß ist. Das defibrinierte Blut sedimentiert bei längerem ruhigen Stehen in eine untere undurchsichtige rote Schicht, welche sich unter dem Mikroskop als aus *roten Blutkörperchen* oder *Erythrozyten* bestehend erweist, und eine obere durch-

sichtige gelbe Schicht, das Blutserum. Der feste Blutkuchen, der sich bei Erstarrung des Blutes in toto bildet, kommt danach so zustande, daß sich ein Netzwerk von Fibrinfäden abscheidet, in dessen Maschenwerk die Blutkörperchen und durch Kapillarität das Serum festgehalten werden. Manchmal gelingt es, z. B. besonders leicht beim Pferd, das Blut dadurch flüssig zu erhalten, daß man es in einem eisgekühlten Gefäß auffängt; bleibt es dann in der Kälte stehen, so sedimentiert es auch in eine untere rote Schicht aus Blutkörperchen und eine obere gelbe Flüssigkeit; hebert man diese aber ab und bringt sie auf Zimmertemperatur, so erstarrt sie zu einem diesmal gelblichen Kuchen, aus welchem wiederum mit der Zeit Serum abgepreßt wird. Die genuine Blutflüssigkeit, welche so gewonnen wurde, heißt *Blutplasma*.

Das Blut besteht also ursprünglich aus Plasma und Blutkörperchen; in dem Plasma muß in irgendeiner Vorstufe das Fibrin enthalten sein, welches sich unter besonderen Bedingungen in fester Form abscheidet und die Gerinnung verursacht. Diese Bedingungen wollen wir zunächst zu präzisieren versuchen.

Es wurde bereits gesagt, daß der Sinn der Gerinnung der automatische Wundverschluß ist. Teils erfolgt dieser dadurch, daß das Gerinnsel als *Schorf* sozusagen wie ein Pfropfen die offenen Gefäße verschließt, teils dadurch, daß die Fibrinfäden sich an den Wundrändern anheften und sie zusammenziehen; denn die Fibrinfäden sind normalerweise mit einer eigentümlichen Retraktionskraft begabt, welche sich auch in dem vorher erwähnten Auspressen von Blutserum aus dem Blutkuchen äußert. Die große Bedeutung der Gerinnung prägt sich dem Arzt oft in erschütternder Weise ein. Es gibt Krankheitsfälle, bei welchen das Blut diese Gerinnbarkeit mehr oder weniger einbüßt. Dies kommt z. B. im Verlauf von schweren Infektionskrankheiten vor, aber auch als lebenslängliche konstitutionelle Anomalie, als sogenannte *Hämophilie* oder *Bluterkrankheit*. In solchen Fällen führt schon eine geringfügige Verletzung zu schweren Blutverlusten, eine Zahnextraktion oder bloßes Nasenbluten können für einen Hämophilen lebensgefährlich werden; denn selbst wenn die Gerinnbarkeit des Blutes nicht völlig aufgehoben ist, so entsteht doch nur ein lockerer Blutpfropf in der Wunde, durch welchen das Blut weiter hindurchsickert. Aber auch das Gegenteil einer herabgesetzten Gerinnbarkeit kommt vor. Wiederum infolge einer Infektion, und zwar am Ort der Bakterienansiedelung selbst kann ein Gerinnsel entstehen, und nun, an unrechter Stelle, in der Blutbahn, und zu unrechter Zeit gebildet, verheerend wirken. Bekannt ist, wie im Wochenbettsfieber durch Invasion von Mikroorganismen vom infizierten Uterus aus in der Blutbahn im Ursprungsgebiet der V. hypogastrica eine Gerinnung oder „*Thrombose*“ zustandekommt, wie das Gerinnsel wachsend bis zur V. iliaca communis und V. femoralis vordringt und diese verschließt, so daß das Blut sich im Bein staut, und wie zufällig, etwa beim ersten Aufrichten der Wöchnerin im Bett, ein Stück solch eines „*Thrombus*“ sich löst und als „*Embolus*“ vom Blutstrom mitgerissen eine größere Lungenarterie verschließt und dadurch plötzlich den Tod herbeiführt. Oder die Bakterien setzen sich, etwa bei einem Gelenkrheumatismus, auf einer Herzklappe fest, um den Infektionsherd herum lagert sich Fibrin ab, bei den heftig schleudernden Bewegungen der Klappen wird ein Stückchen Gerinnsel abgerissen,

und wieder kommt es zu einer tödlichen *Embolie* ins Gehirn. So gibt es zahllose Beispiele aus der ärztlichen Praxis, welche eindringlich zu einem Studium des Gerinnungsprozesses auffordern.

Nun muß von vornherein gesagt werden, daß trotz eines großen Aufwands von Scharfsinn und Mühe unsere Kenntnisse über die Blutgerinnung recht unzureichend geblieben sind. Das **Fibrin** ist ein Eiweißkörper, vergleichbar in seiner Unlöslichkeit etwa dem hitzeokoagulierten Hühnereiweiß; als solcher gibt es z. B. die Farbenreaktionen des Eiweißes (s. S. 28) und wird durch Magensaft peptonisiert. Das Blutplasma enthält dieses Fibrin in einer löslichen Vorstufe, als *Fibrinogen*. Die Menge beträgt nur etwa 0,1—0,3%; das genügt aber bei der eigenartigen Form der Ausscheidung in den miteinander verfilzten Fäden, um den konsistenten Schorf oder Blutkuchen zu erzeugen. Das Fibrinogen gehört zu den sogenannten *Globulinen*; darunter versteht man Eiweißkörper, welche sich nicht, wie die *Albumine*, in reinem Wasser, sondern nur in verdünnten Salzlösungen lösen; durch Sättigung mit Kochsalz oder Drittelsättigung mit Ammonsulfat kann es aus dem Blutplasma ausgefällt werden. Woher geht es nun beim Austritt des Blutes aus einem Gefäß in die feste Form über? Man könnte meinen, daß die Abkühlung beim Austritt etwas damit zu tun hat; aber wir haben ja schon gesehen, daß gerade umgekehrt Kälte, wie so viele Reaktionen, so auch die Reaktion der Gerinnung verzögert. Auch daran liegt es nicht, daß das Blut nicht mehr in den Gefäßen strömt, sondern zum Stillstand kommt; denn wenn man z. B. bei einem lebenden Tier ein Gefäß freilegt und an zwei Stellen eine Ligatur herumlegt, so kann das Blut tagelang in der abgesperrten Strecke flüssig bleiben.

Jedenfalls handelt es sich um einen chemischen Vorgang, denn man kann durch Ausfällen des im Blut enthaltenen Kalziums die Gerinnbarkeit aufheben (ARTHUS); das kann z. B. durch Zusatz von 0,1—0,15% Natriumoxalat, 0,15—0,3% Natriumfluorid oder 0,5% Natriumzitat geschehen. Setzt man dann von neuem Kalziumsalz zu, so wird das Blut wieder gerinnbar.

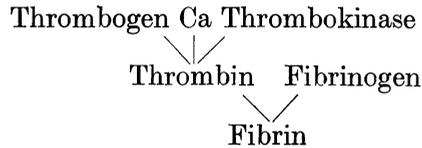
Diese Tatsachen erinnern an einen Vorgang, den wir schon kennen gelernt haben, nämlich an die Auslabung des Kaseins (siehe S. 29). Auch diese ist an die Gegenwart von Kalziumsalz gebunden, und auch dort handelte es sich um die Umwandlung eines löslichen Eiweißkörpers Kasein in eine unlösliche Modifikation Parakasein. Und wie dort die Umwandlung durch ein Enzym, das Labferment, zustandekommt, so scheint auch hier ein Enzym, das sogenannte *Fibrinferment* oder **Thrombin** beteiligt zu sein (ALEXANDER SCHMIDT). Wenn man den Gerinnungsvorgang unter dem Mikroskop beobachtet, so sieht man, wie in der klaren Blutflüssigkeit plötzlich die Fibrinfäden in der Umgebung der körperlichen Elemente des Blutes anschießen. Von den letzteren wurden bisher allein die Erythrozyten erwähnt; neben ihnen, an Zahl erheblich zurücktretend, gibt es die sogenannten weißen Blutkörperchen oder *Leukozyten* und die *Blutplättchen* oder *Thrombozyten*. Letztere sind es nun besonders, in deren Nachbarschaft die Gerinnung beginnt, wobei die Thrombozyten zerfallen. Man kann daher annehmen, daß sie ein Agens enthalten, welches die Fibrinausscheidung anregt, und da schon sehr kleine Mengen von Blutzellen genügen, um große Mengen von Fibrin zu bilden, da man aus Serum mit Alkohol eine Fällung gewinnen kann,

die, in Wasser wieder gelöst, Fibrinogenlösungen zur Gerinnung bringt, und die durch Erhitzen auf 100° zu inaktivieren ist, so spricht man von einem Ferment, eben dem Thrombin. Seine Existenz ist freilich aus anderen Gründen des öfteren bezweifelt, die Mitwirkung der Blutkörperchen bei seiner Bildung verschieden gedeutet worden.

Jedenfalls muß aber ein *Zerfall von Thrombozyten* eingeleitet werden, damit das flüssige Blut erstarren kann; es erhebt sich deshalb die Frage, ob der Blutaustritt aus den Gefäßen dafür Bedingungen herstellt. Es ist lange bekannt, daß, wenn man Blut aus einem Tier direkt in ein Gefäß fließen läßt, dessen Wände mit Öl, Vaseline oder Paraffin überzogen sind, die Gerinnung stark verzögert wird. Zum Teil liegt das wohl daran, daß das Blut an diesen Stoffen nicht adhärirt, sondern abfließt und sich auf dem Boden des Gefäßes sammelt; es wird also verhindert, daß Blutstropfen an den Wandungen hängen bleiben und vertrocknen, und so der Anlaß für den Zerfall von Zellen gegeben wird. Die Adhäsion befördert freilich wohl auch noch in anderer Weise die Gerinnung; nämlich die Schwärme feiner kurzer Fibrinnädelchen, welche sich im ersten Augenblick ausscheiden, ordnen sich infolge der Adhäsion der Flüssigkeit in ihrer Oberfläche parallel zur Wandschicht und verkleben dabei zu größeren Fasern, während sie ohne das länger gesondert bleiben. Von DEETJEN ist ferner beobachtet, daß die außerordentlich empfindlichen Thrombozyten unter anderem zwischen Objektträger und Deckglas besonders rasch zerfallen, daß dieser Zerfall aber verhindert werden kann, wenn man Quarzgläser verwendet. Die Spuren Alkali, welche gewöhnliches Glas abgibt, genügen, um die Thrombozyten zu zerstören, und da nun beim Austritt von Blut Kohlensäure in die Luft entweicht, so wird das Blut etwas alkalischer, und auch das genügt, um den Thrombozyten-Zerfall herbeizuführen. Daß das Schlagen des Blutes so den Untergang der Zellen steigern und dadurch gerinnungsfördernd wirken kann, braucht kaum hinzugefügt zu werden.

Es fragt sich weiter, in welcher Weise Fibrinogen, Kalzium und Thrombozyten zusammenwirken. Da es möglich ist, eine kalziumfreie Fibrinogenlösung mit einer kalziumfreien Thrombinlösung zur Gerinnung zu bringen (FULD und SPIRO), so wird angenommen, daß das Kalzium an der Bildung des Thrombins beteiligt ist, indem es dieses aus einer Vorstufe, dem *Thrombogen*, bilden hilft. Das Thrombogen ist aber wahrscheinlich im Plasma präformiert vorhanden, und seine Umwandlung in Thrombin erfolgt in Gegenwart von Kalzium durch einen besonderen Stoff, die **Thrombokinase**; das ist dasjenige Agens, welches von den Thrombozyten bei ihrem Zerfall abgegeben wird (MORAWITZ, FULD). Die Thrombokinase ist aber auch in allen übrigen Geweben enthalten, und eben dadurch wird die Gerinnung und die Schorfbildung in einer Wunde begünstigt; darauf beruht es auch, daß, wo etwa das Gefäßendothel verletzt wird, z. B. durch eine sich ansetzende Kolonie von Bakterien, intravaskulär eine Gerinnung, ein Thrombus zustandekommt (siehe S. 70), und damit erklärt man es, daß, wenn man Stückchen frischen Gewebes gegen eine blutende Wunde andrückt, die Blutung rascher zum Stillstand kommt. Der Gewebsextrakt vermag aber für sich keine Gerinnung in einer Fibrinogenlösung hervorzurufen; auch das spricht dafür, daß es auf zweierlei, auf Thrombin und Thrombokinase ankommt.

Wir können demnach den Gerinnungsvorgang in folgendes Schema bringen:



Kommen wir nun noch einmal auf die vorher erwähnte pathologische Aufhebung der Gerinnungsfähigkeit zurück. Wenn im Verlauf schwerer und lang andauernder Infektionskrankheiten das Blut schwer gerinnbar wird, so kann das an einem Verlust von Fibrinogen liegen; jedenfalls findet man in solchen Fällen öfter eine sogenannte „Hypinose“, d. h. einen geringeren Gehalt an Fibrinogen als sonst. Bei der Hämophilie beruht die mangelnde Gerinnungsfähigkeit vielleicht auf einem Fermentdefekt, wie ein solcher etwa auch zur Erklärung der Gicht oder der Zuckerkrankheit herangezogen worden ist (siehe Kap. 12 und 18); meist wird ein Defizit an Thrombokinese angenommen und dementsprechend versucht, die Bluterkrankheit durch Einspritzung von Gewebssaft oder von Serum zu bekämpfen. Man kann auch daran denken, daß eigene gerinnungswidrige Stoffe, „*Antithrombine*“ oder „*Antikinasen*“, verantwortlich zu machen sind. Das Mundsekret des Blutegels (*Hirudo medicinalis*) enthält z. B. eine Substanz, Hirudin genannt, welche in winzigen Mengen dem Blut zugesetzt, die Gerinnbarkeit aufhebt. Entsprechend wirken Extrakte von Krebsmuskeln, von Muscheln, ferner eine dem käuflichen Pepton anhaftende Substanz.

In dem Fibrinogen haben wir einen besonders wichtigen Bestandteil des Plasmas kennen gelernt. Gehen wir nun auf dessen übrige Komponenten ein! Auch nach Ausscheidung des Fibrinogens als Fibrin enthält das Plasma noch 7—9% Eiweißkörper, in der Hauptsache das *Serumalbumin* und die *Serumglobuline*, die je nach ihrer Fällbarkeit durch Salze in *Euglobulin* und *Pseudoglobulin* unterschieden werden. Das Verhältnis von Albumin und Globulin ist je nach der Tierart sehr verschieden; Pferdeplasma ist z. B. relativ reich an Globulin, Kaninchenplasma an Albumin. Bei zahlreichen Infektionskrankheiten des Menschen nimmt ebenfalls die relative Menge der Globuline zu. Aus dem Verhalten der Bluteiweißkörper ist vornehmlich der Begriff der **Artspezifität** herausentwickelt worden, dessen Inhalt ein gewaltiges Kapitel der modernen experimentellen Biologie anfüllt, dessen Grenzen sich stetig erweitern und noch kaum abgesteckt werden können.

Zum Verständnis dessen, was man unter Artspezifität versteht, wollen wir von den Folgen einer sogenannten *parenteralen Injektion* von Eiweißkörpern ausgehen. Wenn man einem Tier oder einem Menschen Eiweiß einer anderen Tierspezies, sogenanntes „*artfremdes*“ Eiweiß nicht auf dem gewöhnlichen enteralen Weg per os, sondern auf einem Nebenweg, am besten durch Injektion in eine Vene einverleibt, so hat das eine ganze Reihe von Folgen. Erstens treten häufig deutliche Vergiftungssymptome auf; nach der Injektion von artfremdem Serum kommt z. B. oft die sogenannte *Serumkrankheit* zum Ausbruch, welche mit Fieber, Hautausschlag, Schwellungen und Gelenkergüssen einhergeht. Zweitens wird das artfremde Eiweiß häufig ungenützt und unverändert

durch die Nieren wieder ausgeschieden, so besonders Hühnereiweiß und Kasein. Bleiben wir zunächst bei diesen zwei Folgen der Einverleibung von artfremdem Eiweiß stehen, so belehren sie uns darüber, daß der Eiweißabbau im Magen und Darm offenbar noch einen ganz anderen Sinn hat, als bloß den der Umformung in wasserlösliche und diffusible Produkte; *das Nahrungseiweiß muß seines Artcharakters entkleidet werden*, sonst ist und bleibt es ein Fremdkörper, der dazu schädliche Wirkungen entfaltet. Das Nahrungseiweiß kann nicht direkt assimiliert werden, sondern sein Molekül muß erst umgebaut werden, und dafür wird es erst durch die Enzyme der Verdauungssäfte in die einzelnen Bausteine der Aminosäuren zerlegt; denn diese sind sämtlichen Eiweißkörpern gemeinsam, erst ihr Gefüge ist artspezifisch (ABDERHALDEN). Einen Beweis für diese Deduktionen bildet z. B. die Tatsache, daß, wenn nach Genuß mehrerer roher Eier so, wie früher (S. 68) erwähnt, Hühnereiweiß unzerlegt im Darm resorbiert wird und in die Blutbahn gelangt, es dort als Fremdkörper behandelt wird; nämlich erstens bemächtigt sich seiner die Niere und scheidet es im Harn ab, wie die Niere mit jeder gelösten Fremdschubstanz verfährt, z. B. auch mit Rohrzucker oder Milchzucker, wenn sie parenteral zugeführt werden (F. VOIT), und zweitens reagieren darauf auch andere Organe in einer Weise, die wir gleich genauer besprechen werden.

Viel gefährlicher als die Injektion von artfremdem Serum ist die wiederholte Injektion, vorausgesetzt, daß die Reinjektion in einem gewissen zeitlichen Abstand, etwa nach zwei bis drei Wochen, erfolgt. Denn durch die erste Injektion gerät das Tier oder der Mensch ganz allmählich in einen Zustand von *Überempfindlichkeit* oder *Anaphylaxie* (RICHER) gegenüber dem betreffenden Serum, er ist dafür so hochgradig sensibilisiert, daß die zweite Injektion eventuell einen „*anaphylaktischen Schock*“ auslöst, in dem das Tier zugrunde geht. Bei dem besonders empfindlichen Meerschweinchen sensibilisiert z. B. bereits $\frac{1}{10}$ — $\frac{1}{1000}$ ccm Serum stark, ja $\frac{1}{10\,000}$ — $\frac{1}{1\,000\,000}$ ccm eventuell noch merklich, so daß die Reinjektion von nur $\frac{1}{10}$ — $\frac{1}{100}$ ccm krank macht oder gar tötet, indem im anaphylaktischen Schock heftige Konvulsionen auftreten, die Körpertemperatur sinkt, und ein starker Krampf der Bronchialmuskulatur gewöhnlich zur Erstickung führt. All das tritt nicht ein, wenn die zweite Injektion nicht mit Serum der gleichen Art, wie das erste Mal, sondern mit einem beliebigen anderen Serum ausgeführt wird. Offenbar reagiert also der Körper streng spezifisch auf das spezifische Gift. Wir haben nun zu fragen, worin diese Reaktion besteht.

Länger bekannt, als das Auftreten der Sensibilisierung ist eine ganze Reihe anderer spezifischer Reaktionen, welche zur Produktion der sogenannten *Antikörper* führen (EHRlich). Die Bildung derselben wird durch artspezifische Stoffe ausgelöst, welche mit dem allgemeinen Namen der *Antigene* bezeichnet worden sind. Am bekanntesten ist vielleicht die Reaktion, daß der Körper auf das von den Diphtheriebazillen produzierte und von der Infektionsstätte aus sich verbreitende Diphtherietoxin mit der Bildung von spezifischem Gegengift, dem Diphtherieantitoxin antwortet, durch welches er sich eventuell selber immunisiert. In ähnlicher Weise vermag der Körper zahlreiche spezifische *Bakterienantitoxine* zu produzieren (EHRlich). Eine andere Klasse von Antikörpern sind die *Agglutinine*; darunter versteht man Stoffe,

welche artfremde Zellen, die in die Blutbahn gebracht werden, wie rote oder weiße Blutkörperchen, Pflanzenzellen oder Bakterien, zur Verklebung und Klumpenbildung, zur „Agglutination“ bringen; spritzt man z. B. einem Hammel Kaninchenblut in die Blutbahn, so reagiert er darauf mit der allmählichen Bildung von spezifischem Agglutinin, so daß das Serum des Hammels, nun mit Blut eines Kaninchens zusammengebracht, dessen Blutkörperchen rasch verklumpt, während es Blutkörperchen vom Rind oder Schwein nicht oder wenig agglutiniert. Eine dritte Klasse von Antikörpern sind die *Lysine*, welche artfremde Zellen auflösen (Hämolyse, Zytolyse, Bakteriolysine), eine vierte Klasse die *Präzipitine*. Gerade bei diesen ist sicher, was bei den anderen Antikörpern nur wahrscheinlich ist, daß sie der spezifischen Reaktion auf Eiweiß entspringen, und darum wollen wir uns mit ihnen etwas mehr beschäftigen. Spritzt man einem Tier Serum oder Milch oder auch Hühnereiweiß, Kasein, Pflanzeneiweiß ein, so erlangt das Serum des behandelten Tiers allmählich die Eigenschaft, mit dem Stoff, welcher zur Vorbehandlung benutzt ist, und nur oder wenigstens ganz vorwiegend mit diesem Stoff einen Niederschlag, ein Präzipitat, zu bilden (R. KRAUS, BORDET). Spritzt man z. B. einem Kaninchen mehrmals Menschenblut ein, so gibt das Kaninchenserum mit Menschenserum einen Niederschlag, dagegen nicht oder kaum mit Rinderserum oder mit Hundeserum. Diese Präzipitinreaktion hat vielfache praktische Anwendung gefunden; sie dient in forensischen Fällen dazu festzustellen, ob ein Blutfleck in einem Kleidungsstück Menschen- oder Tierblut ist (WASSERMANN, UHLENHUT), sie dient dazu, Nahrungsmittelverfälschungen herauszufinden, sie dient dazu, auf experimentellem Wege eine Blutsverwandtschaft zwischen verschiedenen Spezies, Blutsverwandtschaft im eigentlichsten Sinn des Wortes festzustellen. Die Präzipitinreaktion und noch mehr die Agglutininreaktion sind damit in den Dienst der Erblichkeitsforschung gestellt, sie ließen sich so verfeinern, daß es gelingt, Rassen und Sippen, ja sogar Familien biochemisch zusammenzufassen (v. DUNGERN), ferner die ganz besonders nahe Verwandtschaft eineiiger Zwillinge nachzuweisen. Von praktischer Bedeutung ist auch die Erkenntnis, daß, wenn es darauf ankommt, einen schweren Blutverlust infolge einer Verwundung oder Krankheit durch Übermittlung von Fremdblut auszugleichen, diese „Transfusion“ von Blut eines nahe Verwandten einen dauerhafteren Erfolg verspricht, als wenn man Blut eines Fernerstehenden verwendet.

Eine noch andere Art und Weise spezifischer Reaktion besteht in der Mobilisierung spezifisch gegen das Fremdeiweiß gerichteter Fermente. Wir können diese Erscheinung zunächst mit der früher (S. 43) erwähnten interessanten Beobachtung verknüpfen, daß bei Fütterung mit Milch der Hundedarm eine spezifisch gegen den Milchzucker gerichtete Laktase produziert, welche sonst nicht in ihm enthalten ist; ja er produziert auch eine „Inulase“, wenn in der Nahrung das Polysaccharid der Fruktose Inulin (siehe S. 43) zugeführt wird. So erlangt nun auch das Blut fermentative Fähigkeiten, welche ihm sonst mangeln, wenn gewisse organische Fremdstoffe hineingeraten; es führt eine Lipase, wenn reichlich Fett ins Blut übertritt, auf eine Injektion von Rohrzucker hin wird nach einigen, allerdings nicht unbestrittenen Angaben eine Invertase mobilisiert, vor allem aber erscheinen nach Zutritt von artfremden Eiweißkörpern spezifisch gegen den Eindringling gerichtete,

proteolytische „Abwehrfermente“ im Blut (ABDERHALDEN). Nach ABDERHALDEN sollen diese sogar nicht bloß dann im Blut erscheinen, wenn artfremdes Eiweiß, sondern sogar auch, wenn „blutfremdes“ obwohl „körpereigenes“ Eiweiß anwesend ist, und auch diese Abwehrfermente sollen streng spezifisch wirken. So wird von ABDERHALDEN eine *Schwangerschaftsreaktion* beschrieben, welche darauf basiert, daß in der Schwangerschaft Plazentareiweiß ins Blut der Graviden gelangt und spezifisch dagegen gerichtetes Ferment anlocken soll, so daß eine Probe Blutserum, einer Schwangeren entnommen, Eiweiß einer beliebigen menschlichen Plazenta, aber nicht anderer Organe, abbaut, während Blutserum einer Nichtgraviden Plazentareiweiß nicht angreift.

Alle diese überaus merkwürdigen Erfahrungen lehren, daß es gelingt, durch diese sogenannten „*biologischen Reaktionen*“ Unterschiede zwischen den Eiweißkörpern festzustellen, wo chemische Methoden noch völlig versagen, und doch liegen den biologischen Reaktionen unzweifelhaft chemische Differenzen zugrunde. Was zur Bestimmung des Artcharakters in der Tier- und Pflanzenwelt in der Hauptsache dient, die äußere Gestalt und die Form der einzelnen Organe, das ist darum wohl innerlich in dem chemischen Gefüge, man kann wohl direkt sagen: in der ultramikroskopischen Form der großen Moleküle oder Molekülverbände der Eiweißkörper begründet.

Man könnte noch fragen, welchen Zweck die Eiweißkörper des Plasmas — natürlich abgesehen vom Fibrinogen — zu erfüllen haben. Ob die nächstliegende Antwort, daß sie zur Ernährung der Organe da sind, die richtige ist, kann bezweifelt werden, da die Zellen schwerlich Eiweiß als solches aufnehmen. Vielleicht dienen sie in erster Linie vermöge ihres osmotischen Druckes zusammen mit der geringen Durchlässigkeit der Blutgefäßwände für ihre großen Moleküle der Erhaltung der normalen Wasserverteilung zwischen Blut und Gewebe (siehe Kap. 11 u. 16).

Die übrigen Bestandteile des Plasmas sind nicht von so aufdringlicher Bedeutung, wie die Eiweißkörper, und doch wichtig genug. An *organischen Stoffen* seien vor allem Traubenzucker, Aminosäuren, Harnstoff, Kreatin, Purinbasen genannt; als Vermittler zwischen dem ernährenden Darm und den verschiedenen Organen einerseits, diesen Organen und den ausscheidenden Nieren andererseits muß ja das Blut allerlei Zeugen des progressiven und des regressiven Stoffwechsels mit sich führen. Die eine oder andere dieser Verbindungen kann aus besonderen Gründen — welche später zum Teil erwähnt werden sollen — in gesteigertem Maß vorhanden sein; je nachdem spricht man von „*Glykämie*“, von „*Urämie*“, von „*Urikämie*“, von „*Cholesterinämie*“; die Gesamtheit der nichteiweißartigen N-haltigen Verbindungen mißt man im sogenannten „*Reststickstoff*“. Gelegentlich findet sich nach fettreichen Mahlzeiten das Blutplasma mehr oder weniger milchig getrübt durch feine Fetttropfchen, welche vom Ductus thoracicus her mit der Lymphe eingebracht sind; solche Zustände von „*Lipämie*“ haben oft auch eine besondere klinische Bedeutung (siehe Kap. 12).

Der Gehalt des Plasmas an *anorganischen Stoffen* ist auffallend konstant und stimmt auch bei den verschiedenen Säugetieren merkwürdig überein. Das lehrt etwa die folgende Übersicht über einige Aschenanalysen von ABDERHALDEN (wobei freilich zu bedenken ist, daß mindestens die in der Asche vorkommende Phosphorsäure z. T. organisch gebunden in den Seren enthalten war).

1000 Gewichtsteile Blutserum enthalten:

	Rind	Schaf	Schwein	Hund
Natrium (Na ₂ O)	4,312	4,303	4,251	4,263
Kali (K ₂ O)	0,255	0,256	0,270	0,226
Kalk (CaO)	0,1194	0,117	0,122	0,113
Magnesia (MgO)	0,0446	0,041	0,0413	0,040
Chlor (Cl)	3,69	3,711	3,627	4,023
Phosphorsäure (P ₂ O ₅)	0,0847	0,073	0,0524	0,080

Man kann schon vermuten, daß dies seine besondere Bedeutung hat. In der Tat bedeutet es erstens einmal, daß das Plasma einen konstanten **osmotischen Druck** auf alle von ihm bespülten Zellen ausübt. Denn wenn der Masse nach auch die organischen Bestandteile über die anorganischen überwiegen — an Eiweiß enthält das Plasma ja 70—90 g im Liter — so spielt ihr osmotischer Partialdruck doch wegen des großen, zum Teil sehr großen Molekulargewichts gegenüber dem gesamten osmotischen Druck doch nur eine sehr kleine Rolle, da der osmotische Druck eine Funktion der Molekülzahl ist; in der Tat ändert sich der osmotische Druck des Plasmas nur sehr wenig, wenn man es enteivweiß. Die Konstanz des osmotischen Druckes ist aber von großer Bedeutung, weil dadurch eine Bedingung für den geregelten Verlauf der Lebensprozesse garantiert ist, ein konstanter Wassergehalt der Zellen, welcher in einem konstanten Volumen zum Ausdruck kommt. Jede Senkung des osmotischen Druckes steigert, jede Erhöhung vermindert das Zellvolumen durch Endosmose oder durch Exosmose (siehe Kap. 8).

Die Zellen verhalten sich nämlich im allgemeinen, als wäre ein flüssiger Inhalt von einer semipermeablen Membran umkleidet (PFEFFER); diese hypothetische Membran wird als „*Plasmahaut*“ bezeichnet. Die Semipermeabilität der Zellen wird aber nicht bloß aus den osmotischen Wasserbewegungen gefolgert, sondern auch aus der Tatsache, daß die Zellen ihre gelösten Innenbestandteile im allgemeinen festhalten. Die an sich leicht diffusiblen Salze z. B., welche auch im Innern der Zellen mindestens zum guten Teil in diffusibler Form enthalten sind, da sich zeigen läßt, daß die Zellen eine erhebliche „innere Leitfähigkeit“ besitzen (HÖBER), sind dort dauernd in ganz anderen Mengenverhältnissen anwesend als die Salze außen im Plasma. Oft ist auch der Zellsaft innerhalb von Pflanzenzellen gefärbt, und der umschließende Plasmamantel hält die Farbe fest, solange die Zelle lebt; erst, wenn das Plasma abstirbt, diffundiert der Farbstoff heraus (DE VRIES). Vermöge ihrer Plasmahaut emanzipiert sich also die Zelle von ihrem Milieu und führt ihr eigenes Leben. Das bedeutet logischerweise, daß der Akt der Aufnahme von Nahrungsstoffen von seiten der einzelnen Zellen und der Akt der Abgabe ihrer Stoffwechselprodukte etwas Besonderes, ein vitales Phänomen, eine Energieäußerung der Zelle, nicht bloß ein einfacher Diffusionsausgleich ist (OVERTON, HÖBER).

Die Konstanz des osmotischen Druckes des Plasmas schließt auch das Postulat bestimmter Organe ein, welche „*osmoregulatorisch*“ tätig sind, so wie es z. B. thermoregulatorische Apparate in unserem Körper gibt, welche der Erhaltung der Innentemperatur dienen (siehe Kapitel 15). Denn es ist ja zu bedenken, daß die periodische Zufuhr von Nahrungs-

stoffen, d. h. von wesentlich hochmolekularen Verbindungen, welche im Verdauungskanal in kleine Moleküle zertrümmert werden, die dann resorbiert den Körper überschwemmen, ebenso wie die periodische Zufuhr von Wasser, daß ferner die mit chemischen Umsetzungen verbundene Arbeitsleistung einzelner Organe das osmotische Gleichgewicht stark stören müßten, wenn nicht sofort die betreffenden Überschüsse irgendwie eliminiert würden. In der Tat versehen die Lungen, die Schweißdrüsen und vor allem die Nieren diese Funktion. Daher kann man eine Nieren-erkrankung eventuell diagnostizieren, indem man den abnormen osmotischen Druck des Blutes feststellt. Letzteres geschieht am bequemsten durch Messung der *Gefrierpunktserniedrigung* in einem Kryoskop.

Es ist bekannt, daß Wasser, in dem ein Stoff gelöst ist, unterhalb 0° gefriert, und daß die Erniedrigung des Gefrierpunktes um so größer ist, je größer die molekulare Konzentration, also der osmotische Druck der Lösung. Einer Erniedrigung um 1° entsprechen ungefähr 12 Atmosphären osmotischen Druckes.

Die Gefrierpunktserniedrigung von normalem Blut beträgt im Mittel
 $\Delta = 0,56^\circ$ (v. KORANYI), sein osmotischer Druck also ungefähr 7 Atmosphären.

Die Exaktheit, mit welcher diese Einstellung immer wieder vor sich geht, ist ein Maßstab der Organisationshöhe der Säugetiere, geradeso wie ihre konstante Innentemperatur die Vorzüglichkeit ihrer thermoregulatorischen Einrichtungen beweist. Beides ist im Verlaufe der Phylognese erst allmählich erworben. Denn den „poikilothermen“ Tieren, deren Temperatur mit der Temperatur der Umgebung hin- und herschwankt (siehe Kapitel 15) entsprechen „poikilosmotische“, welche ein Spielball der osmotischen Schwankungen des Milieus sind, wie die Wirbellosen und unter den Wirbeltieren die Elasmobranchier; und zwischen den poikilothermen und poikilosmotischen Wesen einerseits, den „homiothermen“ und „homioosmotischen“ andererseits gibt es Zwischenformen, bei welchen das Gleichgewicht noch leicht zu stören ist. Das osmotische Gleichgewicht ist aber offenbar anstrengenswert, weil jede Änderung des Wassergehalts im Innern der Zellen Änderungen der chemischen Reaktionsgeschwindigkeiten, die eine Funktion der Konzentration sind, nach sich ziehen muß, und weil die feinen Innenstrukturen, welche aus vielen Gründen für die Zelleiber vorauszusetzen sind, durch Volumenänderungen sicherlich beschädigt werden.

Die Tabelle für die Aschenanalyse der Blutsera (S. 77) verweist aber außer auf die Konstanz des gesamten von den gelösten Salzen ausgeübten osmotischen Drucks auch noch auf **die Bedeutung der Einzelkonzentrationen der Salze**; denn es muß doch einen Sinn haben, daß auch im einzelnen die Schwankungen gering sind. Daß außer der Quantität der gelösten Moleküle auch die Qualität wesentlich ist, beweist ein einfacher Versuch (OVERTON): wenn man einen Muskel oder Nerven vom Frosch in eine mit seinem Blut isotonische Lösung von Traubenzucker oder Rohrzucker oder sonst einem beliebigen ungiftigen Nichtelektrolyten einlegt, so schwindet alsbald die Erregbarkeit, um nach Übertragung in die Lösung der Blutsalze oder selbst bloß in die Lösung eines neutralen Natriumsalzes wieder erregbar zu werden. Es kommt also nicht bloß auf eine bestimmte molekulare Konzentration im Plasma, also auf die Größe des osmotischen Drucks an, sondern darauf, daß Salze mit bestimmten Ionen anwesend sind, und zwar *Natriumionen*.

In der Tat kennt man in den physiologischen Instituten seit langem die Vorzüge der sogenannten „*physiologischen Kochsalzlösung*“ für die Konservierung der Funktionen der klassischen Experimentierobjekte, der Muskeln und Nerven vom Frosch. Man wendet eine Konzentration von 0,65—0,7% NaCl an, weil dabei Organvolumen und Organfunktion relativ am längsten erhalten bleiben; diese Lösung ist isotonisch mit den Säften des Frosches. Der Molekularkonzentration des Säugetierblutes entspricht eine Konzentration von ungefähr 0,95% NaCl.

Aber es ist auch leicht zu zeigen, daß die physiologische Kochsalzlösung lange nicht das Ideal eines rein anorganischen Milieus ist, wenn es etwa auf die Konservierung des Herzens, des Darms oder des Zentralnervensystems oder selbst auch der Muskeln ankommt. Denn erstere büßen darin im Gegensatz zu Muskel und Nerv rasch ihre Erregbarkeit ein, und die Muskeln verfallen in der reinen Kochsalz-Lösung bald in unregelmäßige, „fibrilläre“ Zuckungen. Im allgemeinen ist der physiologischen Kochsalzlösung die sogenannte *Ringersche Lösung* weit vorzuziehen, welche neben NaCl 0,02—0,03% KCl und CaCl₂ enthält; das sind Mengen dieser Salze, wie sie ungefähr der Zusammensetzung der Serummasse entsprechen. Wie man sich die Wirkung dieses Salzgemisches vorstellen kann, davon wird später (Kap. 14) zu reden sein.

Konstant ist auch die **Reaktion des Blutplasmas**. Bekanntlich versteht man unter einer neutralen wässrigen Lösung eine solche, bei der die Konzentration der Wasserstoffionen gleich der Konzentration der Hydroxyl-Ionen ist: $[H^+] = [OH^-] = 0,8 \cdot 10^{-7}$ (bei 18°). Überwiegen die H-Ionen, so ist die Reaktion sauer, überwiegen die OH-Ionen, so ist sie alkalisch. Untersucht man das Blut oder das Blutplasma unter Kautelen, welche einen Austritt der natürlicherweise darin enthaltenen Gase, insbesondere des Kohlendioxyds verhüten, so zeigt sich, daß die *Reaktion fast neutral*, ein wenig alkalisch ist, es ist bei 18° $[H^+]$ etwa gleich $0,45 \cdot 10^{-7}$. Diesen Wert kann man mit verschiedenen physikochemischen Verfahren (HÖBER, SOERENSEN, HASSELBALCH) feststellen, die hier aber nicht auseinandergesetzt werden können. Die physiologische Schwankung im CO₂-Gehalt, also die Veränderung des arteriellen zum venösen Blut ändert an der Reaktion fast nichts. Unter normalen Verhältnissen steigt der CO₂-Gehalt niemals so hoch, daß der H⁺-Gehalt den Neutralpunkt erreicht. Gegen Lackmus reagiert das Blutplasma scheinbar alkalisch, aber die Reaktion wird dadurch vorgetäuscht, daß erstens ein Blutstropfen, indem man ihn ausbreitet, an der Luft Kohlensäure abdunstet, zweitens dadurch, daß das Lackmus als eine Säure Kohlensäure austreibt.

Gerade so wie das Blutplasma fortwährend in der Gefahr schwebt, durch Stoffwechsel und Nahrungszufuhr sein osmotisches Gleichgewicht zu verlieren, so läuft es auch unausgesetzt Gefahr, durch die Bildung von Kohlensäure bei der Verbrennung der organischen Verbindungen, von Schwefelsäure infolge der Oxydation des Eiweißschwefels, von Phosphorsäure durch Abspaltung aus den Nukleoproteiden, oder auch von schwächeren organischen Säuren, welche in pathologischen Fällen in Gestalt von Azetessigsäure und Oxybuttersäure sogar in enormen Mengen auftreten (siehe Kapitel 12), saure Reaktion anzunehmen. Hiergegen ist es aber wiederum einigermaßen durch die regulatorische Tätigkeit von Lungen und Nieren geschützt, welche den Überschuß an Kohlensäure, an sauren Phosphaten, Harnsäure u. a. hinausbefördern, zudem aber auch durch

in ihm selbst gelegene rein chemische Vorrichtungen, welche als *Reaktionsregulatoren* oder als *Puffersubstanzen* bezeichnet werden. Dieser ins Ohr fallende bildliche Ausdruck soll besagen: wie ein Puffer den Stoß auffängt, welcher einen Eisenbahnwagen zertrümmern würde, wenn ihn nicht die Kraft der Feder in dem Puffer schützte, gerade so fangen die Puffersubstanzen im Blutplasma den Stoß ab, welchen ohne sie die sauren Substanzen seiner Reaktion versetzen würden. Das geschieht folgendermaßen: Puffer sind, ganz allgemein gesagt, schwache Säuren oder Salze schwacher Säuren, ihre Funktion kann man sich etwa am Beispiel des im Blut enthaltenen Natriumbikarbonats klar machen. Die Reaktionsgleichung $\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ = \text{H}_2\text{CO}_3$ besagt, daß, wenn zu einer Bikarbonatlösung, d. h. zu HCO_3^- -Ionen, H-Ionen zugesetzt werden, diese nicht in Freiheit bleiben, also die Reaktion nicht nach der sauren Seite verschieben, sondern — wenigstens zum Teil — von den Bikarbonat-Anionen aufgenommen werden, indem undissoziierte Moleküle der schwachen, d. h. relativ wenig in Ionen zerfallenden Kohlensäure entstehen. Ganz anders, wenn eine Säure, also H-Ionen, zu einer Kochsalzlösung, also Cl-Ionen, zugesetzt wird; da nämlich HCl eine starke, d. h. stark dissoziierende Säure ist, so werden die zugesetzten H-Ionen nicht gebunden, sondern bleiben in Freiheit. Als reaktionsregulierende Puffer treten nun im Plasma außer dem Bikarbonat vor allem die Eiweißkörper in Funktion, welche sich gleichfalls wie schwache Säuren verhalten, entsprechend ihrem Aufbau aus den Aminosäuren; die Hauptrolle spielt dabei das in den Blutkörperchen enthaltene Hämoglobin. Durch diese Puffereigenschaften des Blutes wird es begreiflich, daß selbst in Fällen stärkerer Säurevergiftung sein H^+ -Gehalt sich nicht oder fast nicht ändert (SPIRO, HENDERSON, H. STRAUB.) Von den Puffereigenschaften der Blutbestandteile kann man sich gut überzeugen, wenn man Blutserum durch Zusatz von Natronlauge alkalisch zu machen versucht; dann zeigt sich, daß man 40—70 mal so viel Natronlauge hinzufügen muß, als zu Wasser, um einen Farbenschlag mit Phenolphthalein hervorzurufen (FRIEDENTHAL).

8. Kapitel.

Die Blutkörperchen und die Blutgase.

Die weißen Blutkörperchen 81. Die Blutkörperchenzählung 82. Die Funktion der weißen Blutkörperchen 83. Die Blutplättchen 85. Die roten Blutkörperchen; ihre Form und Zahl 85. Die Sedimentierungsgeschwindigkeit 86. Die osmotischen Eigenschaften der roten Blutkörperchen; Hämolyse 86. Das Hämoglobin 88. Die gesamte Blutmenge 89. Die Blutgase; Gesetze der Gasabsorption; Blutgasanalyse 91. Die Bindung des Sauerstoffs und die Dissoziation des Oxyhämoglobins 93. Die Bindung des Kohlendioxyds 97. Das Kohlenoxydhämoglobin 98.

Die Zellformen, welche als Blutkörperchen im Blut enthalten sind, sind bereits mit Namen genannt; es sind die *roten Blutkörperchen* oder *Erythrozyten*, die *weißen Blutkörperchen* oder *Leukozyten* und die *Blutplättchen* oder *Thrombozyten*. Alle drei sind vor anderen Zellen durch die besondere und ganz auffallende Eigenschaft ausgezeichnet, daß sie nicht zu Geweben verbunden sind, wie die übrigen Zellen unseres Körpers, sondern daß sie gesondert voneinander frei im Blutplasma flottieren. Wir werden sehen, daß das in engem Zusammenhang mit ihrer Funktion steht.

Wir beginnen die Besprechung mit den **weißen Blutkörperchen**. Diese verdanken ihren Namen ihrer Farblosigkeit im Gegensatz zu der so hervorstechenden Pigmentierung der Erythrozyten. Sie kommen in einer Reihe verschiedener Formen vor (siehe Abb. 14): 1. als *Lymphozyten* (a), das sind kleine Zellen von der Größe der roten Blutkörperchen, mit rundem Kern und schmalen Protoplasmasaum; 2. *große mononukleäre Leukozyten* (b), welche 2—3 mal so groß sind, als die Erythrozyten; sie haben einen großen runden oder etwas gelappten Kern, welcher in einem kaum granulierten Protoplasma liegt; 3. *neutrophil-polymorphkernige Leukozyten* (c), etwa so groß wie die großen mononukleären, ausgezeichnet durch die Mannigfaltigkeit der Kernform und durch reichliches Protoplasma, welches zahlreiche neutrophile d. h. basischen und

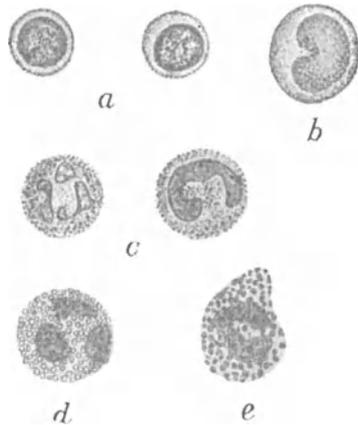


Abb. 14. Verschiedene Formen von weißen Blutkörperchen des Menschen.

a Lymphozyten, b große mononukleäre Leukozyten, c neutrophil-polymorphkernige Leukozyten, d eosinophile Leukozyten, e basophile Leukozyten.

sauren Farbstoff zugleich aufnehmende feine Granula enthält; 4. *azidophile* oder *eosinophile Leukozyten* (d), welche schon ohne Färbungsmittel große Granula im Protoplasma erkennen lassen, die sich bei Zusatz von saurem Farbstoff, insbesondere von Eosin leuchtend färben; ihre Form entspricht im übrigen den neutrophilen; 5. *basophile Leukozyten* oder *Mastzellen* (e), mit gelapptem Kern und großen Granulis, welche basische Farbstoffe an sich ziehen (P. EHRLICH).

Diese verschiedenen Zellformen sind in der Norm in charakteristischen Mengenverhältnissen im Blut enthalten; weitaus überwiegen die Neutrophilen, welche 65—70% aller Leukozyten ausmachen, die Lymphozyten bilden etwa 20—25%, die großen Mononukleären 6—8%, die Eosinophilen 2—4% und die Mastzellen 0,5% (NAEGELI). Die Gesamtzahl tritt aber hinter der Zahl der Erythrozyten sehr stark zurück, auf 800—1500 rote kommt nur ein weißes Blutkörperchen.

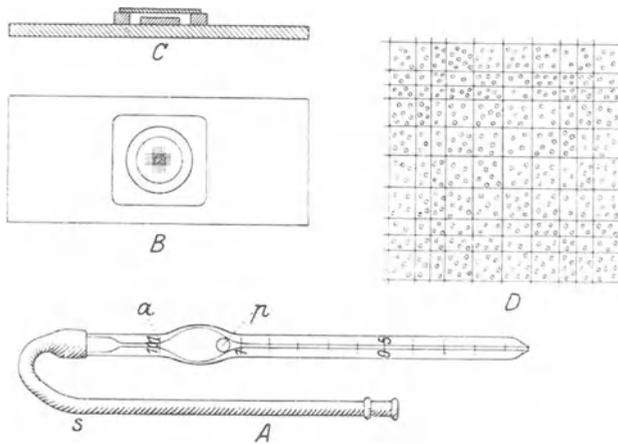


Abb. 15. Blutkörperchen-Zählapparat nach ZEISS-THOMA. A Mischpipette; B Zählkammer in der Aufsicht, ohne Deckglas; C im Längsschnitt mit Deckglas; D Bild der gefüllten Kammer im Mikroskop.

Die Zählung der Blutkörperchen nimmt man in einer „Zählkammer“ vor. Man verdünnt dabei zuerst das Blut in einer *Mischpipette*, wie sie Abb. 15 A darstellt; man füllt durch Saugen am Schlauch s die Kapillare bis zu einer ihrer Marken (1 oder 0,5) mit Blut, saugt dann die Verdünnungsflüssigkeit bis zu der oberen Marke bei a nach und schüttelt mit Hilfe der im Pipettenraum eingeschlossenen kleinen Glasperle p tüchtig durch. Für die Zählung der *weißen Blutkörperchen* benutzt man gewöhnlich eine Pipette, deren Ausweitung so groß ist, daß man das Blut darin um das 10- oder 20-fache verdünnen kann, und verdünnt mit einer durch Essigsäure angesäuerten Methylviolett-Lösung; diese zerstört die roten und weißen Blutkörperchen, von den weißen läßt sie jedoch die Kerne übrig, welche sich mit dem Methylviolett anfärben. Zur Zählung der sehr viel zahlreicheren *roten Blutkörperchen* verdünnt man im allgemeinen um das 100- oder 200-fache und benutzt als Verdünnungsmittel entweder physiologische Kochsalzlösung, also für menschliches Blut eine etwa 10%ige Lösung, welche die roten Blutkörperchen in ihrer Form erhält, oder auch eine andere Konservierungsflüssigkeit (am besten HAYEMSCHE Lösung, welche neben Kochsalz und Natriumsulfat ein wenig Sublimat enthält). Eine Probe des verdünnten Blutes wird alsdann in eine Zählkammer übertragen, die die Form eines Objektträgers mit aufgelegtem Deckglas hat (ZEISS-THOMA, BÜRCKER). Die Kammer von ZEISS und THOMA ist in der Abb. 15 in der Aufsicht B und im Längsschnitt C dargestellt. Der Raum zwischen Objektträger und Deckglas hat eine Höhe von 0,1 mm, auf dem Boden der Kammer ist ins Glas ein feines Netz von Quadraten eingeritzt, deren jedes $\frac{1}{400}$ mm² mißt. Ein Stück dieser

Teilung ist in D vergrößert abgebildet. Es sind auf die Weise also Räume von $\frac{1}{4000}$ mm³ optisch abgegrenzt, und in diesen zählt man nach Füllung der Kammer die Blutkörperchen, bzw. die Kerne der Leukozyten. Das Bild Abb. 15 D stellt die mit roten Blutkörperchen gefüllte Kammer dar. Die *Blutplättchen* werden ähnlich wie die weißen Blutkörperchen zu ihrer Zählung gefärbt.

So findet man, daß *normalerweise* 5—10000 *weiße Blutkörperchen* in 1 mm³ *enthalten sind*. In pathologischen Fällen kommt jedoch sowohl eine starke Steigerung vor, eine sogenannte „*Leukozytose*“, wie auch eine Verminderung, eine sogenannte „*Leukopenie*“. Unter Umständen kommt es zu ganz exzessiver Vermehrung (z. B. 500 000 in 1 mm³); man spricht alsdann von *Leukämie*.

Die Funktion der Leukozyten ist ungemein wichtig. Merkwürdigerweise werden wir, sobald wir sie vom Standpunkt der Physiologie aus erörtern wollen, fast ganz auf das Gebiet der Pathologie abgelenkt; aber wir werden noch öfter die Erfahrung machen, daß die Grenzen zwischen dem Gesunden und dem Kranken sich leicht verwischen, und dies ist schließlich auch nicht verwunderlich, da ja der Lebensvorgang ein Gleichgewicht zwischen den einander entgegenarbeitenden Prozessen des Zerfalls und des Aufbaus darstellt. Die Leukozyten, insbesondere die polymorphkernigen Neutrophilen und die großen Mononukleären, sind im Gegensatz zu den meisten Zellen unseres Körpers mit der Fähigkeit der *Eigenbewegung* begabt; diese erinnert so sehr an die Eigenbewegung der Amöben, daß man die Leukozyten eine Zeitlang als Parasiten des Blutes ansah. Die „amöboiden“ Bewegungen befähigen nun die Leukozyten gerade so wie die frei in der Natur lebenden Amöben dazu, erstens geformte Teilchen durch Ausstrecken von Pseudopodien und durch Herumfließen des Protoplasmas aufzunehmen und zweitens ihren Ort zu wechseln. Die Leukozyten werden auf die Weise zu „*Phagozyten*“ oder „*Freßzellen*“ (METSCHNIKOFF) und zu „*Wanderzellen*“. Als Freßzellen nehmen sie Staubkörnchen, z. B. Kohlepartikeln oder Karminkörnchen, ferner artfremde rote Blutkörperchen, Trümmer von Zellen und Geweben, etwa Fett- und Lezithintröpfchen bei einer Nervendegeneration, oder Bakterien aller Art in sich auf, und wie die Amöben es tun, so verarbeiten sie manche dieser Fremdkörper, d. h. sie lösen sie allmählich auf, führen also sozusagen eine intrazelluläre Verdauung aus. Hat man z. B. in die Bauchhöhle eines Meerschweinchens artfremde Erythrozyten, etwa rote Blutkörperchen von der Gans gebracht, so kann man bald den Verlauf der Phagozytose in den eingewanderten Leukozyten beobachten. Anfangs sieht man die Gänseblutkörperchen unverändert im Innern der Leukozyten liegen; in einem etwas späteren Stadium färben sich als Symptom des Absterbens ihre Kerne beim Zusatz eines Farbstoffes, welcher ins Innere der lebenden Leukozyten eindringt (z. B. Neutralrot), während die Kerne der übrigen Blutkörperchen, welche nicht von Leukozyten aufgefressen sind, die Farbe noch nicht annehmen; noch etwas später sieht man das Hämoglobin der Gänseblutkörperchen ins Protoplasma des Phagozyten übertreten, und schließlich bleibt allein noch der Kern des Blutkörperchens sichtbar, bis auch er allmählich zerfällt. Auf diese Weise wirken die Leukozyten auch als Schutzorgane gegen die gefährlichsten Feinde unseres Körpers, gegen die Bakterien, und sorgen zudem für die Reinigung des Körpers von größeren Zerfallsprodukten. Diese Freßfunktion hat aber das erwähnte Wanderungsvermögen zur Voraussetzung. Dank dem Besitz *chemotaktischer Eigen-*

schaften, d. h. dank der „Empfindlichkeit“ für gewisse chemische Reizmittel, welche z. B. in den spezifischen Produkten des Stoffwechsels der Bakterien oder in den löslichen Zerfallsprodukten abgestorbener Zellen gegeben sind, wandern die Leukozyten zu den gefährdeten oder geschädigten Orten hin. Sie strecken nämlich ihre Pseudopodien in derjenigen Richtung aus, in welcher die Reizstoffe in der größten Konzentration vorhanden sind, sie bewegen sich also gegen das Diffusionsgefälle der Reizstoffe und gelangen so zu den Orten, an denen die Produktion der Reizstoffe statthat. Haben sich z. B. Bakterien in der nächsten Nachbarschaft einer Blutkapillare angesiedelt, so kann man unter dem Mikroskop beobachten, wie sich die Leukozyten zwischen den Endothelzellen der Kapillarwand hindurchzwängen, eine sogenannte „Diapedese“ ausführen, um sich alsdann der Eindringlinge zu bemächtigen (siehe Abb. 16).

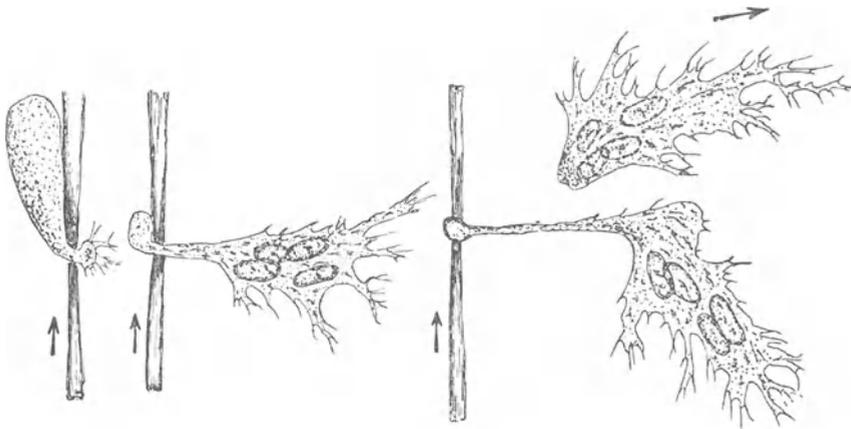


Abb. 16. Verschiedene Stadien der Diapedese weißer Blutkörperchen durch die Kapillarwand beim Frosch (nach THOMA). Die senkrechten Pfeile markieren die Richtung des Blutstroms in der Kapillare.

Daher findet man die Leukozyten in ungeheurer Zahl im Eiter als sogenannte *Eiterkörperchen*. Ähnlich kann man sie im Experiment jederzeit in gewaltigen Mengen anlocken, wenn man z. B. eine sterile Aufschwemmung von Nuklein oder von Aleuronat in die Bauchhöhle eines Tieres einspritzt. Der intrazellulären Verdauung fügen die Leukozyten aber noch eine extrazelluläre hinzu, indem sie *proteolytische Fermente*, ähnlich dem Trypsin, abgeben; so werden die Gewebstrümmer, welche etwa bei einer groben Verletzung entstanden sind, mehr oder weniger verflüssigt, um dann von den Blutgefäßen resorbiert zu werden.

Nach all dem ist es wohl verständlich, wieso wir, wenn wir die Leukozytenfunktion verstehen wollen, notgedrungen tief in die Erscheinungen der Pathologie geraten; denn da Infektion und Verwundung unvermeidlich jeden Menschen treffen, so ist es auch unter dem Gesichtspunkt der zweckmäßigen Organisation unseres Körpers zu begreifen, daß Abwehrmaßregeln in ihm vorgesehen sind.

Fragen wir schließlich noch nach dem Sinn der verschiedenen aufgezählten Leukozytenformen, so lehrt die Pathologie, daß auch hier, wie so oft, durch Arbeitsteilung die sich bietenden Aufgaben bewältigt

werden. So werden z. B. die neutrophil-polymorphkernigen Leukozyten vor allem gegen die Erreger der Eiterungen und der akuten Infektionskrankheiten mobilisiert, die eosinophilen Zellen sind bei Anwesenheit tierischer Parasiten, bei Karzinom, bei Asthma u. a. besonders vermehrt, die Mastzellen erscheinen z. B. nach Injektion artfremden Serums in vergrößerter Zahl.

Über die zweite Form von Blutzellen, die **Blutplättchen**, ist zu dem schon früher Gesagten nur wenig hinzuzufügen. Es sind unscheinbare Gebilde, 3—20mal kleiner als die Leukozyten, da ihr Durchmesser nur $0,5\text{--}3\ \mu$ beträgt, und zudem ungemein empfindlich, so daß sie leicht zerfallen. Das ist aber vielleicht gerade im Sinn ihrer Funktion, da wir gesehen haben, daß durch ihren Untergang, offenbar infolge des Freiwerdens von Thrombokinasen, die Fibrinbildung zustandekommt (siehe S. 72). Ihre Zahl übertrifft gewöhnlich die der weißen und steht hinter der Zahl der roten Blutkörperchen zurück; man rechnet etwa 200 000 bis 300 000 auf $1\ \text{mm}^3$. Doch kommt auch ein auffallender Mangel an Blutplättchen, eine „*Thrombopenie*“, vor, welche, ähnlich wie die Hämophilie

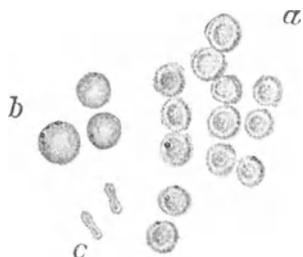


Abb. 17. Rote Blutkörperchen des Menschen. a und b von der Fläche bei verschiedener Einstellung des Mikroskops, c von der Kante.



Abb. 18. Gesteigerte Geldrollenbildung im menschlichen Blut (nach FÄHRÆUS).

philie (s. S. 70) mit Neigung zu Gewebsblutungen einhergeht. Auch die Blutplättchen führen amöboide Bewegungen aus. Sie verkleben sehr leicht zu größeren Klumpen. In defibriniertem Blut sind sie gewöhnlich nicht aufzufinden, teils weil sie bei der Gerinnung zerfallen, teils weil sie sich an das Fibrin anheften.

Unter Blutkörperchen schlechtweg versteht man gewöhnlich die **roten Blutkörperchen**, weil sie an Masse weitaus die anderen überragen und durch ihre Farbe so leicht in die Augen fallen. Sie haben eine *eigenartige Form* (siehe Abb. 17), sie bilden flache, kreisrunde Scheiben, von etwa $7,5\ \mu$ Durchmesser beim Menschen; der Rand der Scheibe ist gegenüber der Mitte verdickt, so daß der Querschnitt eine Biskuitform hat, sie erinnern also in der Form an eine Bikonkavlinse. Am Rand beträgt die Dicke $2\text{--}2,5\ \mu$, in der Mitte $1\text{--}1,5\ \mu$. Die Zahl beträgt nicht weniger als im Mittel 5 Millionen pro $1\ \text{mm}^3$ beim Mann, 4,5 Millionen beim Weib. Rechnen wir etwa 5 Liter Blut für den Körper des Erwachsenen, so ergibt die enorme Zahl von etwa 25 Billionen Erythrozyten zusammen mit der relativ sehr großen Oberflächenentwicklung auf den einzelnen flachen Scheibchen eine *Gesamtoberfläche* von ungefähr 3500 Quadratmetern; das ist etwa das 2000fache der Körperoberfläche. Dies ist insofern bemerkens-

wert, als dadurch die Hauptbedeutung der roten Blutkörperchen, ihre respiratorische Funktion, beleuchtet wird; denn die roten Blutkörperchen stehen im Dienst der Atmung, indem sie durch ihre Oberfläche Sauerstoff aufnehmen und zeitweilig binden und dann wieder abgeben.

Die Blutkörperchen sind spezifisch schwerer als das Blutplasma; daher sedimentieren sie allmählich, wenn man ungeronnenes (oder auch defibriniertes) Blut stehen läßt. Die Sedimentierungsgeschwindigkeit ist bei verschiedenen Bluten sehr verschieden. Pferdeblut sedimentiert sehr rasch, das Blut von Rind und Schwein sehr langsam. Beim menschlichen Blut, dessen Blutkörperchen sich mit mittlerer Geschwindigkeit absetzen, variiert die Sedimentierungsgeschwindigkeit unter verschiedenen normalen und krankhaften Bedingungen. Sie ist z. B. während der Schwangerschaft stark erhöht (FÄHRAEUS), ebenso bei zahlreichen akuten fieberhaften Erkrankungen. Das hängt irgendwie damit zusammen, daß unter diesen Bedingungen die Globuline des Plasmas im Verhältnis zum Albumin vermehrt sind (s. S. 73); jedenfalls sedimentieren die Blutkörperchen in Globulin- und ganz besonders in Fibrinogenlösungen viel rascher als in Albuminlösungen. Die gegenüber der Norm

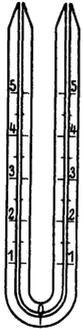


Abb. 19.
Hämatokrit.

vermehrte Senkungsgeschwindigkeit bewirkt es, daß, wenn eine fieberhafte Erkrankung den Tod herbeigeführt hat, das Blut in der Leiche oft erst dann gerinnt, wenn sich die roten Blutkörperchen bereits abgesetzt haben; das Plasma erstarrt dann zu einer farblosen „Speckhaut“, der *Crista phlogistica*, die schon den alten Ärzten bekannt war. Die unmittelbare Ursache der raschen Sedimentierung ist eine *Agglutination* der Blutkörperchen (s. S. 74), welche einsetzt, sobald die Strömung des Blutes zum Stillstand kommt. Bei dieser Agglutination legen sich die Blutkörperchen mit ihren Flächen in „Geldrollenform“ zu längeren Ketten aneinander, die auch mit bloßem Auge sichtbare Klümpchen bilden (s. Abb. 18). Solche Gebilde können zwar in kleinerem Maßstab auch schon unter normalen Verhältnissen entstehen, aber dann fallen die Rollen schon bei den leichtesten Bewegungen

wieder in die einzelnen Körperchen auseinander, während bei pathologisch gesteigerter Agglutination die Körperchen ziemlich fest aneinander haften bleiben (FÄHRAEUS).

Die Abtrennung der Blutkörperchen vom Plasma kann natürlich durch Zentrifugieren beschleunigt werden. Man sieht dann meist die Massen der Erythrozyten mit einem grauen Schleier oberflächlich bedeckt. Dieser rührt von den weißen Blutkörperchen her, welche spezifisch etwas leichter sind als die roten Blutkörperchen. Will man genau das Volumenverhältnis zwischen Blutkörperchen und Plasma feststellen, so zentrifugiert man das Blut in einem sogenannten *Hämatokriten* (siehe Abb. 19), einer U-förmig gebogenen und graduierten Kapillare. Man findet beim Menschen im Mittel ein *Blutkörperchenvolumen* von 35—40%.

Durch die Möglichkeit solcher exakter Volummessungen lassen sich bei den roten Blutkörperchen leichter als bei irgendwelchen anderen tierischen Zellen die osmotischen Eigenschaften studieren, wie überhaupt die freie Verschieblichkeit der Blutzellen in ihrem Milieu sie zu einem auserlesenen Objekt für zellulärphysiologische Untersuchungen macht; denn allen chemischen und physikalischen Einflüssen von seiten ihres Milieus sind sie eben dadurch, daß sie zu keinem kompakten

Gewebe zusammengefügt sind, besonders zugänglich. Man muß freilich besonders vorsichtig sein, die dabei gewonnenen Ergebnisse zu verallgemeinern, weil die roten Blutkörperchen der Säugetiere keine vollwertigen Zellen sind, sondern durch ihre Kernlosigkeit von dem gewöhnlichen Zelltypus abweichen.

Über die osmotischen Eigenschaften der Zellen wurden schon im vorigen Kapitel (S. 77) einige Andeutungen gemacht, als von dem osmotischen Druck des Blutplasmas die Rede war. Es hieß dort, die Zellen seien von einer Plasmahaut umschlossen, welche im allgemeinen die Eigenschaften der semipermeablen Membranen (S. 64) besitze. Wenn dies nun auch für die Blutkörperchen gilt, so muß das hämatokritisch gemessene Blutkörperchen-Volumen in einer zum Plasma hypotonischen Lösung, in der die Blutkörperchen anstatt in Plasma suspendiert werden, zunehmen, und in einer hypertotonischen Lösung abnehmen. Das ist auch in der Tat der Fall. Man kann dies Verhalten auch genau in einem einfachen osmotischen Modell nachahmen. Läßt man aus einer Kapillare einen Tropfen Kupfersulfatlösung in eine mit ihr isotonische Lösung von Ferrozyankalium austreten, so umgibt sich der blaue Tropfen sofort mit der früher schon erwähnten semipermeablen Membran aus Ferrozyankupfer (S. 64) und bleibt, in dieser gefangen, in der Oberfläche der gelben Lösung hängen; es hat sich eine sogenannte *TRAUBESCHE ZELLE* gebildet. Verdünnt man nun die gelbe Außenlösung, so wächst die Zelle, weil der osmotische Druck gegen die Membran von innen her über den Druck von außen überwiegt, und demzufolge unter Dehnung der Membran Endosmose zustande kommt; konzentriert man dagegen die Außenlösung, so schrumpft die Zelle. Auch bei der einzelnen Blutzelle kann man die osmotische Volumänderung im Mikroskop direkt sehen, wenn sie beträchtlich genug ist; in konzentrierten Lösungen sehen die Blutkörperchen deutlich geschrumpft aus, sie nehmen dabei eine unregelmäßige Form mit gezackter oder gebuckelter Oberfläche, eine sogenannte *Stechapfel-* oder *Maulbeerform* an; in stark hypotonischen Lösungen schwellen sie bis zur Kugelform an, um schließlich unter Loslassen ihres Farbstoffes fast unsichtbar zu werden; die übrig bleibenden Reste sind die früher schon genannten *Stromata* oder *Blutschatten*. Die Blutkörperchen lösen sich also in stark hypotonischen Lösungen anscheinend auf, man spricht von Hämolyse.

Mit dieser **Hämolyse** hängt zusammen, daß Blut bei Verdünnung mit Wasser durchsichtig wird, während es bei Verdünnung mit physiologischer Kochsalzlösung undurchsichtig trüb bleibt. Denn die Undurchsichtigkeit des Blutes beruht auf den verschiedenen Brechungsindices der Blutkörperchen und ihrer Suspensionsflüssigkeit; daher wird das auf sie auffallende Licht reflektiert und dringt nicht durch. Wenn dagegen Hämolyse eingetreten ist, dann sind die Differenzen im Brechungsvermögen verschwunden, das Blut verhält sich wie eine *Lasur-* oder *Lackfarbe*, welche den Untergrund durchscheinen läßt; vorher war es eine *Deckfarbe*, welche auf einen Untergrund gestrichen, diesen zudeckt.

Aber nicht in allen mit Plasma isotonischen Lösungen bewahren die Blutkörperchen ihr normales Volumen. Wie eine Kochsalzlösung verhalten sich im allgemeinen bei der entsprechenden isotonischen Konzentration auch die Lösungen anderer neutraler Salze, die Lösungen verschiedener Zucker, der Aminosäuren u. a. Dagegen wirken Lösungen der einwertigen Alkohole, Aldehyde, Urethane, Halogenkohlenwasser-

stoffe u. a., auch wenn sie denselben osmotischen Druck wie das Plasma haben, als wäre statt ihrer destilliertes Wasser zur Suspension der Blutkörperchen genommen, d. h. es tritt Hämolyse ein. Das beruht darauf, daß gegenüber den Lösungen dieser chemischen Verbindungen die Plasmahaut der Blutkörperchen nicht semipermeabel ist, daß diese Verbindungen sich vielmehr sofort durch die Plasmahaut hindurch gleichmäßig auf die Blutkörperchen und ihre Umgebung verteilen, und nun schwellen die Blutkörperchen aus denselben Gründen auf, wie die Blutkörperchen in destilliertem Wasser, nämlich die in ihrem Innern gelösten normalen Bestandteile üben gegen die für sie semipermeable Plasmahaut ihren osmotischen Druck aus, dem von außen her kein entsprechender Gegendruck entgegenwirkt, und so kommt es zur Schwellung wie im analogen Fall der „TRAUBESCHEN Zellen“.

Die einfachste Erklärung für dies verschiedene Verhalten der Plasmahaut gegenüber den gelösten Stoffen ist von OVERTON gegeben worden; sie besteht in der Annahme eines *auswählenden Lösungsvermögens* der Substanzen, aus denen sich die Plasmahaut aufbaut (s. S. 64). Die Zellstromata enthalten nämlich erhebliche Mengen von *Lipoiden*, hauptsächlich von Cholesterin und Lezithin, wie schon einmal (siehe S. 49) hervorgehoben wurde, und zum Zellstroma gehört jedenfalls auch die Plasmahaut; und da nun die Alkohole, Aldehyde, Urethane usw. nach OVERTON in den Lipoiden löslich sind, so muß die Plasmahaut für sie permeabel sein. Das Durchdringungsvermögen dieser Stoffe ist also hier gegenüber den einzelnen Zellen aus dem gleichen Grunde groß, wie gegenüber dem ganzen Zellkomplex der Darmwand bei der Resorption (siehe S. 66). Gestützt wird diese Annahme durch die Tatsache, daß dieselben Verbindungen, für welche die Zellen sich als durchlässig erweisen, Hämolyse verursachen, sobald sie in größerer Konzentration zu dem Plasma oder auch zu physiologischer Kochsalzlösung zugesetzt werden; denn da diese Stoffe sich nicht bloß in den Lipoiden lösen, sondern auch selber Lösungsmittel für die Lipide sind, so können sie, in größeren Mengen in der Umgebung der Blutkörperchen befindlich, aus deren Plasmahaut die Lipide herauslösen und die Oberfläche dadurch sozusagen durchlöchern. So ist lange bekannt, daß durch Zusatz von Äther, Chloroform, Amylalkohol u. a. Blut lackfarben wird.

Auf eines sei schließlich in diesem Zusammenhang noch aufmerksam gemacht: die genannten lipoidlöslichen bzw. permeierenden Verbindungen sind Zellgifte; unter denjenigen Verbindungen dagegen, für welche die Blutkörperchen und überhaupt die meisten Zellen impermeabel oder wenigstens schwer durchlässig sind, finden sich die Nahrungsstoffe und ihre Spaltprodukte, die Zucker, die Aminosäuren, die Salze. Damit werden wir noch einmal an die schon früher (S. 77) gezogene Konsequenz erinnert, daß der Akt der Nahrungsaufnahme in die Zellen mehr sein muß, als ein einfacher Diffusionsvorgang, daß man also einer passiven, physikalischen eine aktive „physiologische Permeabilität“ gegenüberstellen muß (HÖBER).

Wir kommen nun zu dem chemischen Inhalt der Erythrozyten und haben da eigentlich nur einen charakteristischen und höchst wichtigen Bestandteil zu nennen, den Farbstoff, das **Hämoglobin**. Die roten Blutkörperchen bestehen im Mittel zu zwei Dritteln aus Wasser, ein Drittel ist Trockensubstanz; von dieser Trockensubstanz sind aber 90—95% Hämoglobin; daraus allein geht schon die Bedeutung des Hämoglobins für die Funktion der Blutkörperchen hervor.

Man gewinnt das Hämoglobin aus lackfarben gemachtem Blut unter Zusatz von Alkohol in Form von Kristallen, welche je nach der Tierart, der das Blut entstammt, verschiedene Form haben; das menschliche Hämoglobin kristallisiert in großen rhombischen Prismen. Das Hämoglobin gehört, wie schon früher (S. 40) gesagt wurde, zu den Proteiden. Es wird sehr leicht, z. B. durch Erhitzen oder durch Säure, in seine beiden Komponenten gespalten, in einen Eiweißkörper *Globin* und in einen Farbstoff, *Hämochromogen*; dieses geht in Gegenwart von Sauerstoff in das *Hämatin* über.

Das Hämatin ist in saurer Lösung braun, in alkalischer in dicken Schichten rot. Mit Salzsäure gibt es einen schwer löslichen Ester, *Hämin* genannt, welcher in Form der sogenannten *TEICHMANNschen Kristalle* leicht auskristallisiert; diese sind mikroskopisch kleine braune rhombische Prismen (siehe Abb. 20). Sie dienen, besonders für forensische Zwecke, zum Nachweis von Blut; wenige Tropfen wässrigen Extrakts aus einem Blutfleck oder dergleichen, mit einigen Körnchen Kochsalz und Eisessig langsam auf einem Objektträger eingedampft, genügen zur Bildung zahlreicher Häminkristalle. Da das Hämatin, soviel man weiß, für alle Hämoglobine das gleiche ist, so kann man durch die *TEICHMANNsche* Probe nur Blut schlechtweg nachweisen; zur Feststellung, ob Menschen- oder Tierblut vorliegt, muß man eine der „biologischen Reaktionen“ (siehe S. 76) ausführen.

Bekanntlich enthält das Hämoglobinmolekül Eisen, und dieses Eisen ist speziell im Hämatin enthalten. Durch Behandlung mit Säure läßt es sich abspalten, und man erhält einen neuen eisenfreien, braunroten Farbstoff, das *Hämatoporphyrin*, welches auch normalerweise in Spuren in den Körperflüssigkeiten, zumal im Harn vorkommt (siehe Kap. 15). Es wurde schon einmal erwähnt, als von der Herkunft der Gallenfarbstoffe die Rede war, und gesagt, daß es chemisch dem Bilirubin nahesteht. Auch daran sei noch einmal erinnert, daß es über sein Spaltprodukt, das *Hämopyrrol*, mit dem Chlorophyll verwandt ist (siehe S. 48).

Die **quantitative Bestimmung des Hämoglobins** im Blut ist von gleich großem Wert für die Physiologie und für die Pathologie. Sie ist, wie bei allen Farbstoffen, relativ leicht mit einer der vielen kolorimetrischen Methoden auszuführen.

Bei der klinisch oft geübten Bestimmung mit dem *Hämometer von SAHLI* wird eine kleine, genau gemessene Menge von einigen Kubikmillimetern Blut in 0,1 normaler Salzsäure in einem graduierten Röhrchen verdünnt, dabei entsteht eine braune Lösung von Hämin; diese wird so lange mit Wasser weiter verdünnt, bis sie die gleiche Helligkeit hat, wie eine in einem zugeschmolzenen Röhrchen befindliche Vergleichslösung von Hämin von bekanntem Gehalt. Genauer ist die Messung im Kolorimeter nach *AUTENRIETH-KÖNIGSBERGER*; hierbei wird ein langer, spitzwinkliger Keil, der mit Häminlösung gefüllt ist, an einem planparallelen Trog vorbeigeführt, der das in bekanntem Verhältnis mit Salzsäure verdünnte Blut enthält. Der Keil wird in seiner Längsrichtung gegen den Trog so weit verschoben, daß er beim Hindurchblicken genau ebenso braun aussieht, wie der Trog. In einer Eichungstabelle läßt sich dann der Hämoglobingehalt ablesen.

Der Hämoglobingehalt beim erwachsenen Menschen beträgt 13—14% vom Blut; bei der Frau beträgt der Gehalt nur etwa 90% von dem des Mannes.

Mit Hilfe einer dieser oder sonst einer kolorimetrischen Methode kann man auch *die Bestimmung der Gesamtmenge Blut* in einem Tier vornehmen. Man läßt das Tier verbluten, spült durch Einlaufenlassen von physiologischer Kochsalzlösung in die Blutbahn die Blutreste möglichst heraus und extrahiert dann noch die einzelnen zerkleinerten Organe mit Wasser. Darauf mischt man diese drei Flüssigkeitsquanten, nachdem man zuvor an einer Probe des spontan ausgeflossenen Blutes den



Abb. 20. *TEICHMANNsche Häminkristalle.*

Hämoglobingehalt gemessen hat, und bestimmt zum Schluß den Hämoglobingehalt des Gemisches. Alsdann läßt sich die Gesamtblutmenge berechnen. Auf diese Weise fand WELCKER, daß *die gesamte Blutmenge etwa $\frac{1}{13}$ des Körpergewichts beträgt*, d. h. beim erwachsenen Menschen von im Mittel 65 kg etwa 5 Liter. Versuche am lebenden Menschen mit einer anderen, später zu erörternden Methode (siehe S. 98) haben einen erheblich kleineren Wert ergeben, nämlich nur etwa $\frac{1}{20,5}$ des Körpergewichts, also etwa 3,2 Liter.

Welche physiologische Funktion hat nun das Hämoglobin zu erfüllen? Wir wollen der Antwort auf diese Frage näher kommen, indem wir Ursachen und Folgen einiger Schwankungen im normalen Hämoglobingehalt betrachten. Es wird seit langer Zeit angegeben, daß während des Aufenthalts an hochgelegenen Orten bei Mensch und Tier die Zahl der roten Blutkörperchen und die Menge Hämoglobin in der Volumeinheit Blut zunehmen. Diese Steigerungen, welche man in einem wenige Kubikmillimeter umfassenden Blutstropfen konstatiert, können natürlich relative sein. Es kann z. B., wie es tatsächlich auch vorkommt, die Verteilung der Blutkörperchen unregelmäßig sein, so daß in den Hautkapillaren das Blut konzentrierter ist, als in denen eines inneren Organs, oder durch starke Wasserverdunstung oder durch Auspressen von Plasma durch die Gefäßwände kann das Blut eingedickt sein. Aber wenigstens bei längerem Aufenthalt im *Höhenklima* nimmt der Hämoglobingehalt des Körpers auch absolut zu. Dem entspricht die Angabe, daß, wenn man von Hunden aus dem gleichen Wurf einige in der Höhe, die anderen in der Ebene aufwachsen läßt, bei den Höhentieren das rote Knochenmark, die Bildungsstätte der Blutkörperchen während der Jugendzeit, länger fortfährt, Blutkörperchen zu produzieren, als bei den Ebenentieren (ZUNTZ). Ferner werden Blutverluste im Höhenklima auffallend viel schneller durch Blutkörperchenneubildung ausgeglichen, als in der Ebene (LAQUER). In diesen Vorgängen erblickt man wohl mit Recht eine Anpassung an den verminderten Sauerstoffgehalt der verdünnten Luft. Denn in größeren Höhen ist jede körperliche Arbeit durch rasch einsetzende Atemnot erschwert, der Körper kann sich aus der dünnen Atmosphäre nicht genügend mit Sauerstoff versorgen; dem kann aber durch Vermehrung der Zahl der Blutkörperchen und besonders durch Steigerung der Hämoglobinmenge mehr oder weniger abgeholfen werden, weil *das Hämoglobin im Dienst der Respiration steht, indem es Sauerstoff bindet*.

Das Gegenstück zu diesen Erscheinungen bilden die klinischen Beobachtungen bei den verschiedenen Formen von *Anämie* oder *Blutarmut*, bei welchen das Blut durch einen Mindergehalt an Hämoglobin, meist auch durch eine Verminderung der Blutkörperzahl gekennzeichnet ist. Hier begegnet man wieder der Atemnot, welche diesmal aber nicht dem äußeren Mangel an Sauerstoff, sondern dem inneren Defizit an Sauerstoffaffinitäten entspringt, und bekanntlich wird bei manchen Formen von Anämie die unzureichend gewordene Hämoglobinproduktion durch Verabreichung von Eisen erfolgreich angeregt, wobei freilich unsicher ist, ob das Eisen wirklich, so wie man es sich zunächst selbstverständlich vorstellt, direkt für die Neubildung von Hämoglobin-Molekülen Verwendung findet, oder ob es indirekt anregend wirkt.

Zum Verständnis der Beziehungen zwischen Hämoglobin und Sauerstoff wird es zweckmäßig sein, sich zuerst das Verhältnis von Gasen zu Flüssigkeiten, wie das Blut eine ist, ins Gedächtnis zurückzurufen. Bekanntlich sind Gase in

Flüssigkeiten, wie z. B. in Wasser, mehr oder weniger löslich; man bezeichnet den *freiwilligen Übergang von einem Gas in eine Flüssigkeit* als **Gasabsorption** und kennzeichnet den Grad der Löslichkeit eines Gases durch seinen *Absorptionskoeffizienten*. Darunter versteht man diejenige Menge Gas in Kubikzentimetern, welche bei 0° von 1 ccm Flüssigkeit aufgenommen wird. Für die für uns wichtigsten Gase sind die Absorptionskoeffizienten gegenüber Wasser folgende:

$$O_2 = 0,049, N_2 = 0,024, CO_2 = 1,713.$$

Die Absorption sinkt mit steigender Temperatur; die Absorptionskoeffizienten für 40°, also ungefähr Körpertemperatur, sind:

$$O_2 = 0,023, N_2 = 0,012, CO_2 = 0,53.$$

Die Gewichtsmengen von Gas, die absorbiert werden, steigen proportional mit dem Druck; da aber die Gewichte der Gase ihren Volumina umgekehrt proportional sind, so sind die absorbierten Volumina unabhängig vom Druck (**HENRY-DALTON'sches Absorptionsgesetz**).

Befindet sich über der Flüssigkeit kein reines Gas, sondern ein Gasmisch, so wird jede Komponente des Gemisches proportional dem ihm zukommenden Partialdruck absorbiert. Luft ist z. B. ein Gemisch von 20,92 Volumprozent O_2 , 79,05% N_2 und 0,03% CO_2 ; die Partialdrucke sind also bei Atmosphärendruck:

$$\frac{20,92 \times 760}{100} = 159 \text{ mm Hg für } O_2$$

$$\frac{79,05 \times 760}{100} = 600,8 \text{ „ „ für } N_2$$

$$\frac{0,03 \times 760}{100} = 0,2 \text{ „ „ für } CO_2$$

Demnach werden, bezogen auf die Absorption aus den reinen Gasen, von O_2 nur $\frac{159}{760}$, von N_2 nur $\frac{600,8}{760}$ und von CO_2 nur $\frac{0,2}{760}$ absorbiert.

Von einer Flüssigkeit, welche sich mit einem Gas von einer Atmosphäre Druck ins Gleichgewicht gesetzt hat, sagt man kurz: die Flüssigkeit hat eine *Gasspannung* von einer Atmosphäre. Bringt man eine Flüssigkeit von höherer Gasspannung mit Gas von niedriger Spannung in Berührung, so entweicht so lange Gas, bis die Flüssigkeit die entsprechende niedrigere Gasspannung angenommen hat. Daher braust Selterswasser auf, wenn man die Flasche entkorkt, indem sich das Wasser von hoher CO_2 -Spannung mit der viel niedrigeren CO_2 -Spannung in der Luft ins Gleichgewicht setzt. Aus dem gleichen Grunde entstehen in den Geweben eines sogenannten Caissonarbeiters, der auf dem Boden eines Flußbettes in einem Caisson bei 2 bis 3 Atmosphären Luftdruck arbeitet, dessen Gewebsflüssigkeit also eine Gas-Spannung von 2—3 Atmosphären angenommen hat, kleine Gasbläschen, wenn er plötzlich nach Hochziehen des Caissons auf den gewöhnlichen Luftdruck übergeht. Die Bläschen bestehen hauptsächlich aus Stickstoff, weil der Sauerstoff leichter chemisch gebunden wird, und da Stickstoff in Fetten und in Lipoiden relativ gut löslich ist, sich in diesen also besonders reichlich speichert, so entwickeln sich die Gasbläschen besonders im Fettgewebe und in der lipoidreichen weißen Substanz des Zentralnervensystems, um so mehr da diese nur spärlich vaskularisiert sind; sie gefährden dort die Funktion, indem sie das Gewebe komprimieren oder zerreißen; die Folgen sind eventuell zentrale Lähmungen. Das beste Hilfsmittel beim Eintritt von Lähmungen ist, die Patienten schleunigst wieder unter erhöhten Druck zu setzen.

Zur Feststellung der genannten Gasabsorptionsgesetze ist es notwendig, eine **Analyse der absorbierten Gasmengen** vorzunehmen, welche unter den verschiedenen Bedingungen von einer Flüssigkeit aufgenommen worden sind. Dazu stehen hauptsächlich folgende *Methoden der Gasgewinnung* zu Gebote:

1. Hat ein Flüssigkeitsquantum Gas absorbiert, so entweicht dieses Gas vollständig, wenn man die Flüssigkeit mit einem Vakuum in Berührung bringt, oder sie vielmehr in Berührung mit dem Vakuum schüttelt. Denn die absorbierten Gasmengen sind ja proportional dem Gasdruck; ist der Druck Null, so ist auch die Absorption Null. Man kann also mit einer Luftpumpe alles Gas auspumpen und dann zur Analyse in einem Eudiometerrohr über Quecksilber ansammeln. Eine für die Gewinnung der Blutgase geeignete *Quecksilberpumpe* ist in Abb. 21 schematisch dargestellt.

2. Das absorbierte Gas entweicht auch vollständig, wenn man die Flüssigkeit in einen Raum bringt, welcher mit einem anderen Gas erfüllt ist, als sich in der Flüssigkeit absorbiert befindet; denn dies andere Gas wirkt wie ein Vakuum, weil der Partialdruck des absorbierten Gases darin gleich Null ist. Die Austreibung durch das Fremdgas geschieht am besten so, daß man es durch die Flüssigkeit hindurch strömen läßt.

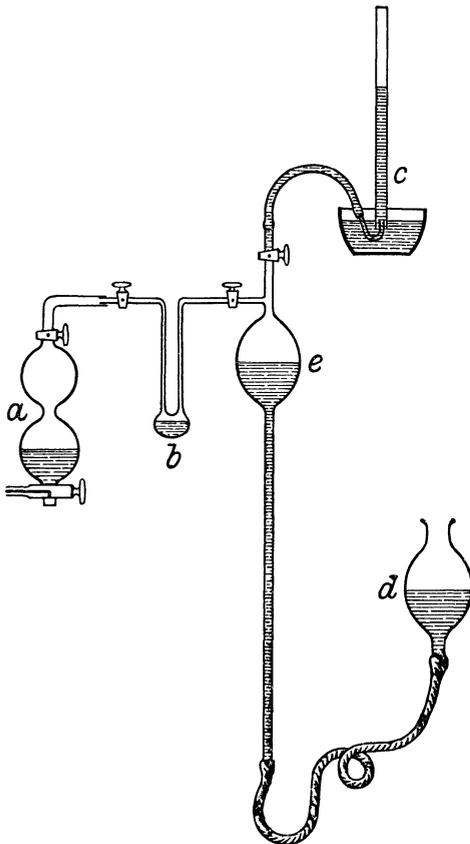


Abb. 21. Quecksilberpumpe.

a Blutresipient; b Gefäß mit konzentrierter Schwefelsäure zur Absorption von Wasserdampf; c Quecksilberwanne mit Eudiometerrohr. Durch abwechselndes Senken und Heben der Quecksilberfüllkugel d kann die anfänglich in a und b enthaltene Luft abgesogen und nach der Quecksilberwanne hin ausgetrieben werden. Sind a und b völlig evakuiert, so wird der untere Hahn von a mit einem Blutgefäß verbunden, und durch Drehung des Hahns das Blut direkt aus dem Tier in die Höhe gelassen; das Blut kocht schäumend in den Kugeln von a in die Höhe. Darauf werden die Blutgase durch mehrmaliges Senken und Heben von d in das Eudiometer über der Quecksilberwanne befördert.

füllen in die Quecksilberpumpe nicht mit der Luft in Berührung kommt; man kann zu dem Zweck das Blut z. B. über Quecksilber auffangen, indem man aus einem völlig mit Quecksilber gefüllten Gefäß einen Teil

3. Man kann das absorbierte Gas auch austreiben, indem man die Flüssigkeit zum Sieden erhitzt; denn die Absorption sinkt mit steigender Temperatur, und sie wird beim Siedepunkt gleich Null, weil die dann sich bildenden Dampfblasen des Lösungsmittels ebenso wirken, wie das Fremdgas bei der zweiten Methode.

Die chemische Analyse der so gewonnenen Gasgemische erfolgt nach folgenden Prinzipien:

1. Zu dem in einem Eudiometerrohr über Quecksilber angesammelten Gas wird in fester oder gelöster Form Kaliumhydroxyd gebracht, dieses absorbiert sämtliches Kohlendioxyd; die Differenz der Gasvolumina, auf gleiche Temperatur und gleichen Druck bezogen, ergibt den Gehalt an CO_2 .

2. Darauf wird zur Absorption des Sauerstoffs in den Gasraum entweder alkalische Pyrogalllösung gebracht, oder man leitet zu dem Gasgemisch ein genau gemessenes Volumen Wasserstoff hinzu und bringt durch einen elektrischen Funken zwischen den Enden zweier Platindrähte, welche in die Wand des Eudiometerrohres eingeschmolzen sind, das Gemisch zur Explosion; ein Drittel des verschwindenden Gasvolumens ist dann Sauerstoff.

3. Der Gasrest ist, abgesehen von dem bei der Explosion übrig bleibenden Wasserstoffüberschuß, Stickstoff.

Wenden wir uns nun speziell den Blutgasen zu! Wir können in deren Zusammensetzung unter den verschiedensten physiologischen Zuständen mit den geschilderten Methoden einen exakten Einblick gewinnen unter der Voraussetzung, daß das Blut von seiner Entnahme aus einer Arterie oder Vene an bis zum Ein-

des Quecksilbers austreten läßt und direkt durch Blut aus einem Blutgefäß ersetzt.

Auf diese Weise wurde gefunden, daß der O_2 -Gehalt des Blutes vom arteriellen zum venösen Gebiet etwa zwischen 20 und 12 Volumprozent, der CO_2 -Gehalt zwischen 43 und 50 Volumprozent schwankt, und daß der N_2 -Gehalt etwa 1 Volumprozent beträgt. Das ist allein für den Stickstoff so viel, wie nach den Absorptionsmessungen bei Wasser und wässrigen Lösungen bei Körpertemperatur von vornherein zu erwarten ist; denn gehen wir davon aus, daß das zirkulierende Blut sich an der weit ausgedehnten inneren Oberfläche der Lungen mit der Lungenluft ins Gleichgewicht setzen kann, so wäre unter Berücksichtigung des Partialdrucks des Stickstoffs in der Luft und unter Berücksichtigung des Absorptionskoeffizienten für Stickstoff zu erwarten, daß 100 ccm Blut etwa $\frac{0,012.79.100}{100} = 0,95$ ccm N_2 ab-

sorbieren. Sauerstoff ist dagegen 30—60mal und Kohlendioxyd noch sehr viel reichlicher im Blut enthalten, als den Absorptionsgesetzen nach zu erwarten wäre. Die Erklärung dafür ist, daß *Sauerstoff und Kohlendioxyd größtenteils nicht einfach physikalisch absorbiert, sondern chemisch gebunden im Blut enthalten sind.*

Diese Tatsache der reichlichen Bindung ist die Grundlage für ein von BARCROFT angegebenes Verfahren, die Blutgase zu gewinnen und zu analysieren, das durch seine Einfachheit der Bestimmung mit Hilfe der Quecksilberpumpe weit überlegen ist und dabei den großen Vorzug hat, nur sehr geringe Blutquanten, so wie sie z. B. klinisch zu Gebote stehen, zu erfordern. Das BARCROFTsche *Differential-Blutgasmanometer* ist in Abb. 22 dargestellt. Die beiden Gefäße A und B werden mit je 2 ccm Ammoniak gefüllt, und je 1 ccm Blut vorsichtig darunter geschichtet; in die in der Abbildung sichtbare seitliche Höhlung in dem eingeschlifften Glasstopfen des einen Gefäßes bringt man durch die Öffnung p etwas Ferricyankaliumlösung. Dann hängt man beide Gefäße in einen Thermostaten, während die Hähne so gestellt sind, daß der Innenraum der Gefäße mit der Außenluft kommuniziert. Ist der Temperatenausgleich erfolgt, so werden durch Hahndrehung die Gefäße mit dem Manometer verbunden. Schütztelt man jetzt die Gefäße, so wird das Blut durch das Ammoniak hämolysiert, und das Ferricyankalium, welches in dem einen Gefäß durch das Schütteln mit dem Blut vermischt wird, treibt allen chemisch gebundenen Sauerstoff auf dieser Seite aus; dementsprechend sinkt der Meniskus der Manometerflüssigkeit (Nelkenöl) auf dieser Seite des Manometers und steigt auf der Gegenseite. Aus der Größe der Verschiebung kann man, wenn der Apparat vorher durch eine quantitativ verlaufende Gas entwickelnde Reaktion geeicht ist, die Menge des im Blut enthaltenen Sauerstoffs berechnen. An die Bestimmung des Sauerstoffs wird die Bestimmung des Kohlendioxyds direkt angeschlossen. Man öffnet zu dem Zweck das Gefäß, in welchem der Sauerstoff ausgetrieben ist, und bringt in den Hohlstopfen an Stelle der Ferricyankaliumlösung Weinsäurelösung; verfährt man danach genau so, wie das erste Mal, so treibt die mit dem Blut sich mischende Säure das bis jetzt noch gebunden gebliebene Kohlendioxyd aus, und es entsteht abermals eine Niveaudifferenz in den Manometerschenkeln.

Wenden wir uns nun der Frage zu, *in welcher Weise Sauerstoff und Kohlendioxyd im Blut gebunden sind.* Es ist leicht zu entscheiden, daß die gesamte **Bindung des Sauerstoffs** in den Blutkörperchen erfolgt; denn wenn man diese vom Plasma abzentrifugiert, so zeigt sich, daß das Plasma nicht mehr Sauerstoff aufzunehmen vermag, als dem Absorptionskoeffizienten entspricht, während auch das Plasma die Fähigkeit gewinnt, reichlich Sauerstoff zu binden, sobald man durch ein Hämolytikum den Inhalt der Blutkörperchen in ihm auflöst. Der wirksame Bestandteil der Blutkörperchen ist das Hämoglobin, welches den Sauerstoff in lockerer, dissoziabler und reversibler Bindung als **Oxyhämoglobin** fixiert. Für

die Existenz solch einer besonderen chemischen Verbindung sprechen vor allem folgende Gründe: Erstens ändert sich, wie bei so vielen chemischen Reaktionen, auch hier mit dem Einleiten von Sauerstoff in vorher entgastes Blut die Farbe; die bläulich dunkelrote Farbe des Hämoglobins geht in die scharlachrote des Oxyhämoglobins über. Zweitens ändert sich das *Absorptionsspektrum*. Für das Oxyhämoglobin sind vor allem zwei Absorptionsbänder im gelben und grünen Teil des Spektrums zwischen der D- und E-Linie charakteristisch, dazu kommt eine starke Verkürzung

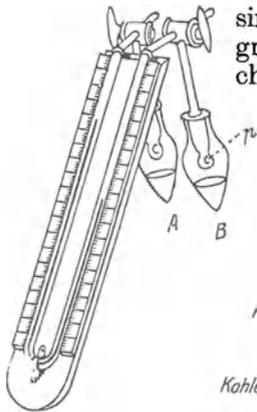


Abb. 22. Differential-Blutgasmanometer nach BARCROFT.

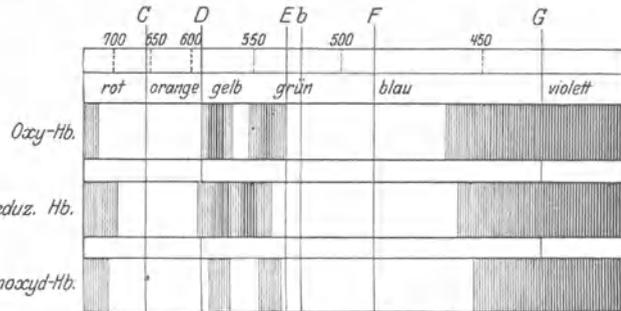


Abb. 23. Blutspektren.

des Spektrums am kurzwelligen Ende durch Absorption des Violett und Blau (siehe Abb. 23); bei größeren Oxyhämoglobin-Konzentrationen konfluieren durch Absorption auch der zwischenliegenden Wellenlängen

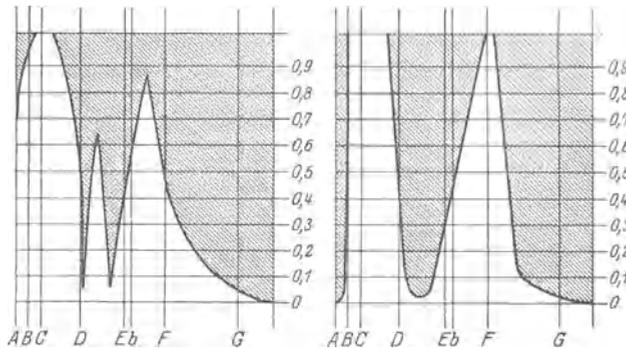


Abb. 24. Spektrale Absorption durch Oxyhämoglobin (I) und durch Hämoglobin (II) in Abhängigkeit von der Konzentration (nach ROLLERT). Die Ordinatenwerte bedeuten den Prozentgehalt an Farbstoff.

die beiden Streifen zu einem. Das Spektrum des Hämoglobins ist dagegen durch ein breites Absorptionsband ebenfalls zwischen der D- und E-Linie ausgezeichnet; dazu kommt wieder die Absorption der kurzwelligen Strahlen. Man kann das Spektrum des Oxyhämoglobins leicht in das des Hämoglobins überführen, indem man das Oxyhämoglobin reduziert; man setzt zu dem Zweck zu Blut etwas Schwefelammoniumlösung oder STOKESSche Lösung d. h. eine ammoniakalische

Lösung von Ferrosulfat und Weinsäure. Wie sich die Absorptionsstreifen mit der Konzentration an Oxyhämoglobin und an Hämoglobin ändern, zeigt die Abb. 24.

Die Verbindung von Hämoglobin und Sauerstoff ist, wie gesagt, eine reversible Reaktion. Das folgt schon aus der Tatsache, daß Blut, welches mit Luft in Berührung war, sehr viel Sauerstoff enthält, und daß durch Evakuieren dieser Sauerstoff vollständig ausgetrieben werden kann. Die Größe der Sauerstoffaufnahme ist also offenbar eine Funktion der Sauerstoffspannung. Man erfährt die Art dieses Zusammenhangs, wenn man eine Hämoglobinlösung mit Gasgemischen von verschiedenen Sauerstoff-Partialdrucken schüttelt und nach Eintritt des Gleichgewichts erstens die Sauerstoffspannung in dem betreffenden Gasgemisch und zweitens die Menge des in der Lösung gebundenen Sauerstoffs bestimmt. Wir wollen die Menge Sauerstoff, welche beim Schütteln mit dem reinen Gas (= 760 mm O₂-Spannung) gebunden wird, gleich 100 setzen; da bei dieser O₂-Spannung sämtliches Hämoglobin in Oxyhämoglobin übergeführt ist, so stellen die Werte für die bei niedrigeren Spannungen gebundenen Mengen, entsprechend umgerechnet, die *prozentischen Sättigungen mit Sauerstoff* dar, sind also Angaben darüber, welcher Anteil vom gesamten Hämoglobin in der Lösung in Form von Oxyhämoglobin und wieviel in Form von reduziertem Hämoglobin anwesend ist. So wurde z. B. für die Temperatur von 38° gefunden:

Sauerstoffdruck in mm Hg	Prozentische Sättigung
0	0
10	55
20	72
40	84
100	92

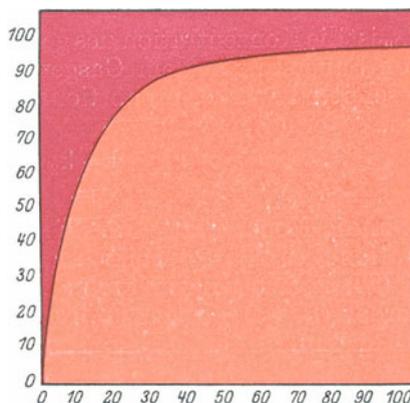


Abb. 25. Dissoziationskurve des Oxyhämoglobins (nach BARCROFT). Hellrot bedeutet Oxyhämoglobin, dunkelrot Hämoglobin.

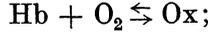
Trägt man diese Werte in ein Koordinatensystem ein, dessen x-Achse die Sauerstoffdrucke in mm Hg, dessen y-Achse die prozentischen Sättigungen angibt, so erhält man eine Kurve, wie in Abb. 25, nämlich eine rechtwinklige Hyperbel. Die Kurve zeigt anschaulich, daß der relative Gehalt an Oxyhämoglobin in der Lösung mit den Sauerstoffdrucken von Null angefangen anfangs sehr rasch wächst, daß dann aber die weitere Steigerung des Sauerstoffdruckes von immer geringerem Einfluß ist. Von einem Druck von etwa 150 mm Hg ab aufwärts ist die Lösung schon fast vollständig mit Sauerstoff gesättigt, ist praktisch alles Hämoglobin in Oxyhämoglobin übergeführt.

Der streng gesetzmäßige Verlauf der Kurve läßt vom Standpunkt der physikalischen Chemie leicht eine Deutung zu. Das Grundgesetz der chemischen Kinetik, das *Massenwirkungsgesetz* von GULDBERG und WAAGE besagt, daß die Geschwindigkeit einer Reaktion proportional ist

dem Produkt aus den Konzentrationen der reagierenden Bestandteile; das heißt also für die Reaktion der Bildung von Oxyhämoglobin (Ox) aus Hämoglobin (Hb) und Sauerstoff nach der Gleichung: $\text{Hb} + \text{O}_2 \rightarrow \text{Ox}$

$$v_1 = k_1 C_{\text{Hb}} \cdot C_{\text{O}_2},$$

wenn v_1 die Geschwindigkeit der Oxyhämoglobinbildung, k_1 ein Proportionalitätsfaktor, C_{Hb} und C_{O_2} die molekularen Konzentrationen von Hb und O_2 sind. Nun ist die Reaktion, mit der wir es zu tun haben, offenbar umkehrbar:



denn bei großen Sauerstoffspannungen verläuft sie im Sinn der Reaktionsgleichung von links nach rechts, bei kleinen Spannungen von rechts nach links. Also gilt auch:

$$v_2 = k_2 C_{\text{Ox}}.$$

Laufen beide Reaktionen gleichzeitig ab, so muß ein chemisches Gleichgewicht zustande kommen, sobald $v_1 = v_2$ geworden ist. Dann ist also:

$$k_1 C_{\text{Hb}} \cdot C_{\text{O}_2} = k_2 C_{\text{Ox}}, \text{ oder:}$$

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{C_{\text{Ox}}}{C_{\text{Hb}} \cdot C_{\text{O}_2}}.$$

C_{O_2} ist die Konzentration des gelösten Sauerstoffs, sie ist dem Partialdruck p von Sauerstoff in dem Gasgemisch, mit welchem die Hämoglobininlösung geschüttelt wurde, proportional, also $C_{\text{O}_2} = k_3 p$. Setzen wir diesen Wert ein, so erhalten wir:

$$\frac{k_1 \cdot k_3}{k_2} = K = \frac{C_{\text{Ox}}}{C_{\text{Hb}} \cdot p};$$

d. h. die Konzentration des Oxyhämoglobins dividiert durch die Konzentration des Hämoglobins mal der Sauerstoffspannung muß in jedem Fall konstant sein (HÜFNER). Prüfen wir daraufhin die Werte in der vorher (S. 95) gegebenen Tabelle:

Sauerstoffdruck in mm Hg	prozentische Sättigung	$\frac{C_{\text{Ox}}}{C_{\text{Hb}}}$	$\frac{C_{\text{Ox}}}{C_{\text{Hb}} \cdot p} = K$
0	0	—	—
10	55	55:45 = 1,22	1,22: 10 = 0,122
20	72	72:28 = 2,57	2,57: 20 = 0,129
40	84	84:16 = 5,25	5,25: 40 = 0,131
100	92	92: 8 = 11,5	11,5 : 100 = 0,115

Die letzte Zahlenkolonne zeigt, daß der mathematische Ansatz richtig war; denn die K-Werte sind ungefähr konstant.

Diese einfache Formulierung der experimentellen Befunde gilt jedoch nur, wenn das Gleichgewicht des Sauerstoffs mit reinen Hämoglobininlösungen untersucht wird. Die *Sättigungs-Kurve (Dissoziationskurve)* für das Hämoglobin verläuft anders beim Blut (BOHR), nämlich so, wie es die Kurve B der Abb. 26 zeigt. Dieser abweichende Verlauf rührt von der Anwesenheit der Elektrolyte im Blut her (BARCROFT) und hängt damit zusammen, daß die Elektrolyte das kolloidale Hämoglobin in der Art verändern, daß neben einfachen Hämoglobin-Molekülen

in der Lösung auch noch verschiedene Aggregate mehrerer Moleküle existieren (HILL). Die Folge der Aggregation ist ein im ganzen vermindertes Sauerstoffbindungsvermögen. So ist auch zu erklären, daß Säuren und unter ihnen die physiologisch wichtigste, die Kohlensäure, im Sinn einer Verminderung der Sauerstoffaffinität des Hämoglobins wirken, so wie es die Abb. 27 darstellt. Die physiologische Bedeutung dieser Tatsache werden wir nachher (S. 102 und 103) zu würdigen haben.

Wenden wir uns nun der **Bindung des Kohlendioxyds im Blut** zu! Hier liegen die Verhältnisse dadurch komplizierter, als beim Sauerstoff, daß schon das Plasma allein viel mehr auspumpbares CO_2 enthält, als nach der Größe des Absorptionskoeffizienten zu erwarten wäre. *Das Kohlendioxyd ist sowohl im Plasma wie in den Blutkörperchen chemisch gebunden.* Im Plasma geschieht die Bindung durch Umsatz mit darin enthaltenen *Alkali-Globulinen* im Sinn einer Reaktionsgleichung: $\text{Na-Globulin} + \text{H}_2\text{CO}_3 = \text{H-Globulin} + \text{NaHCO}_3$. Das Globulin fungiert

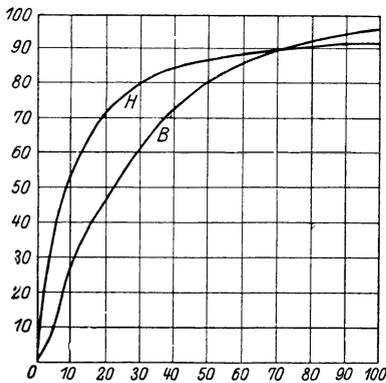


Abb. 26. Dissoziationskurve einer reinen Hämoglobinlösung (H) und von Blut (B) nach BARCROFT.

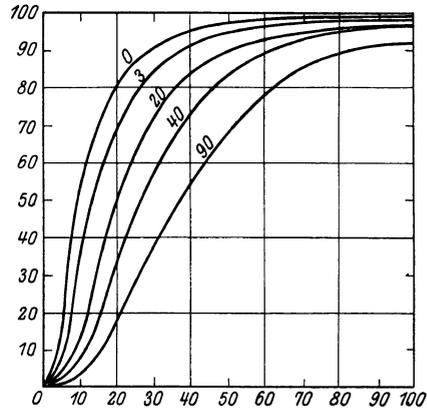


Abb. 27. Dissoziationskurve von Blut bei verschiedenen CO_2 -Spannungen (von 0—90 mm Hg) nach BARCROFT.

also als eine sehr schwache Säure, welche aus ihrer Verbindung mit Alkali durch die Kohlensäure ausgetrieben wird. Auf diese Alkaliglobuline wurde die Aufmerksamkeit durch die Beobachtung gelenkt, daß nur ein Teil des im Serum enthaltenen Alkalis leicht diffusibel ist; leitet man aber CO_2 in das Serum ein, so wird das bis dahin *schwer diffusible Alkali* zum großen Teil in leicht diffusibles verwandelt, was durch die eben aufgestellte Reaktionsgleichung, welche die Loslösung des Na aus der Bindung an das indiffusible kolloidale Eiweiß ausdrückt, verständlich gemacht wird (ZUNTZ und LOEWY, HAMBURGER). In den Blutkörperchen wird das Kohlendioxyd ebenfalls durch Vermittlung von Alkaliglobulinen fixiert; vor allem kommt dafür aber dort die Bildung eines dem Oxyhämoglobin analogen *Kohlensäurehämoglobins* in Betracht (BOHR). Unter normalen Verhältnissen wird auf diese Weise, wie S. 93 gesagt, zwischen 40 und 50 Volumprozent Kohlensäure im Blut festgehalten. Wenn jedoch abnormerweise große Mengen anderer Säuren im Stoffwechsel der Organe entstehen, wie z. B. bei der Zuckerkrankheit (s. Kap. 12), so treten diese mit der Kohlensäure in wirksame Konkurrenz um das Alkali, und demzufolge sinkt die „Kohlensäurekapazität“

des Blutes beträchtlich ab. Die Menge austreibbarer Kohlensäure oder besser: die Menge Kohlensäure, die bei einer bestimmten CO_2 -Spannung vom Blut aufgenommen werden kann, wird so zum Maßstab eines krankhaften Zustandes von „Azidose“.

Außer den genannten Verbindungen des Hämoglobins sind noch einige andere von einem gewissen Interesse für uns. Das *Methämoglobin* ist eine festere Verbindung zwischen Hämoglobin und Sauerstoff; es entsteht in Blut, das sich zersetzt und bildet sich auf Zusatz von Kaliumchlorat, Kaliumpermanganat, Ozon, Ferricyankalium; ferner findet man es bei Vergiftung mit Kaliumchlorat oder mit Nitriten im Blut und im Harn. Der gebundene Sauerstoff ist im Gegensatz zu dem Oxyhämoglobin-Sauerstoff nicht dissoziierbar. Der Farbstoff ist durch ein charakteristisches Spektrum ausgezeichnet.

Von großer toxikologischer Bedeutung ist das **Kohlenoxyd-Hämoglobin**, dessen reichliches Entstehen bei der Leuchtgasvergiftung und bei der Gasvergiftung durch unvollkommene Verbrennung der Kohle in schlecht ziehenden Öfen die Todesursache bildet. Die Bindung des CO erfolgt nämlich offenbar an der gleichen Stelle des Hämoglobinmoleküls, wie die Bindung des O_2 . Die Reaktion ist zwar an sich gerade so reversibel, wie die Oxyhämoglobinbildung, aber da die Affinität zu Kohlenoxyd etwa 150mal so groß ist, als die Affinität zu Sauerstoff, so nimmt das Hämoglobin bei gleicher Spannung von CO und O_2 von ersterem 150mal mehr auf, als von letzterem. Das bedeutet, daß bei Einatmung von CO-haltiger Luft sich leicht ein großer Teil des Oxyhämoglobins in CO-Hämoglobin verwandelt, so daß der vergiftete Organismus sich aus den fast entleerten Sauerstoffreservoirs, welche die roten Blutkörperchen jetzt darstellen, nicht mehr genügend versorgen kann und an Erstickung zugrunde geht; ein Gehalt von $0,5\%$ CO in der Luft genügt bereits, um gegen 30% des Hämoglobins in die CO-Verbindung umzuwandeln. Atmung von reinem Sauerstoff vermag das Leben zu retten.

Das Kohlenoxydhämoglobin sieht kirschrot aus. Sein *Spektrum* (siehe Abb. 23 S. 94) ist fast identisch mit dem des Oxyhämoglobins; die zwei Absorptionsstreifen im Gelb und Grün, welche für dieses charakteristisch sind, liegen beim CO-Hämoglobin nur ein wenig nach dem violetten Ende verschoben. Die Unterscheidung vom Oxyhämoglobin-Spektrum gelingt aber leicht; denn die früher (S. 94) genannten Reduktionsmittel, welche gewöhnlich an Stelle der zwei Absorptionsstreifen rasch das breite Absorptionsband des reduzierten Hämoglobins erscheinen lassen, sind hier unwirksam.

Auf die Tatsache der Bindung des Kohlenoxyds im Blut durch das Hämoglobin gründet sich ein Verfahren, *die Gesamtblutmenge innerhalb eines lebenden Menschen zu bestimmen*. Man läßt aus einem begrenzten Luftquantum, in welchem eine kleine bekannte Menge Kohlenoxyd enthalten ist, eine Zeitlang atmen; dann stellt sich ein Gleichgewicht zwischen dem freien und dem gebundenen Kohlenoxyd her. Analysiert man nun eine Blutprobe auf CO und bestimmt zugleich die Abnahme des CO-Gehalts in dem Atmungsraum, so läßt sich die Blutmenge berechnen (GRÉHANT und QUINQUAUD). Auf diese Art wurde gefunden, daß die Blutmenge nur etwa $\frac{1}{20,5}$ des Körpergewichts beträgt (HALDANE), während die WELCKERsche Verblutungsmethode (s. S. 90) $\frac{1}{13}$ ergab. — Bei einem anderen klinisch anwendbaren Verfahren wird eine bestimmte Menge eines wenig diffusiblen und in die Blutkörper nicht eindringenden Farbstoffs, Vitalrot, intravenös eingespritzt und kurze Zeit darauf an einer Blutprobe die Konzentration festgestellt, in welcher sich der Farbstoff im Plasma vorfindet. Stellt man noch mit dem Hämatokriten das Volumverhältnis von Plasma und Blutkörperchen fest, so läßt sich wiederum die Blutmenge errechnen. Man findet sie so zu etwa $\frac{1}{15}$ des Körpergewichts (HARRIS).

9. Kapitel.

Die innere und äußere Atmung.

Die Zusammensetzung von Expirations- und Alveolarluft 99. Die Gasspannungen in der Alveolarluft und im Lungenblut 100. Die innere Atmung 103. Die äußere Thoraxatmung 104. Die Inspiration 105. Die Expiration und der negative Druck im Thorax 106. Die bei der Atmung beförderten Luftmengen 108. Die Atemfrequenz. Die zuführenden Luftwege 109. Husten und Niesen 110. Die Innervation der Atembewegungen; das Atemzentrum 110. Chemische Regulation der Atembewegungen 113. Die Wasserstoffionen als Atemreiz 115. Der Einfluß des Vagus auf die Atmung 116.

Unvermerkt sind wir durch die Betrachtung der Beziehungen, welche zwischen dem Gasgehalt des Blutes und der Zusammensetzung des mit ihm in Berührung befindlichen atmosphärischen Gasgemisches herrschen, schon in das Kapitel der Atmung eingetreten; denn diese ist ja in ihrem Wesen nichts anderes, als der Gasaustausch zwischen den Körperflüssigkeiten und der Luft. Ja wir sind vielleicht sogar schon in gewisser Hinsicht zu einem prinzipiellen Verständnis des Atmungsvorgangs oder mindestens zu der wichtigsten Fragestellung dabei vorgedrungen, nämlich, *ob der Atmungsgaswechsel auf einen Ausgleich von Spannungsunterschieden zurückgeführt werden kann*. Dies ist jedenfalls das erste, worüber wir jetzt ins klare kommen müssen. Dafür werden wir die bisherigen Betrachtungen von einem etwas veränderten Standpunkt aus fortführen, nicht vom Standpunkt des Blutes, sondern vom Standpunkt der Atmungsluft, welche dem Körper den Sauerstoff zu liefern hat, und vom Standpunkt der Organe, welche ihn erst indirekt durch Vermittlung des Blutes beziehen, um dafür die Kohlensäure, welche in ihnen durch Verbrennung kohlenstoffhaltiger Verbindungen entstanden ist, wiederum durch Vermittlung des Blutes nach außen abzugeben.

Der Gaswechsel vollzieht sich im Körperinnern weitab von der von Luft umspülten Oberfläche des Körpers in den kleinen, nur auf dem langen Weg von der Nasenhöhle bis zu den feinsten Bronchiolen zu erreichenden *Alveolen* der Lunge. So kommt es, daß nicht die unveränderte atmosphärische Luft mit dem Lungenblut in Austausch tritt, sondern trotz der ventilierenden Atembewegungen mehr oder weniger stagnierende Luft; denn bei jeder Ausatmung können sich aus Gründen, welche wir erst später bei der Besprechung der Atemmechanik erörtern werden, die Lungen nicht völlig entleeren, so daß sie sich mit dem Beginn einer neuen Einatmung mit vollkommen frischer Luft füllen könnten, sondern die frische Luft mischt sich mit einem Teil der zurückgebliebenen.

Die trockene *Einatmungsluft* enthält: 20,92% O₂, 79,05% N₂, 0,03% CO₂, die trockene *Ausatmungsluft* im Mittel: 16,4% O₂, 79,8% N₂,

3,8% CO₂ bei der gleichen Temperatur. Es sinkt also der O₂-Gehalt um etwa 4,5%, und der CO₂-Gehalt steigt um etwa 3,8%. Dabei sind die ersten Portionen der Exspirationsluft in jedem Atemzug O₂-reicher und CO₂-ärmer, als die letzten; das rührt aber weniger davon her, daß sich der Gasaustausch in den Alveolen im Verlauf eines Atemzuges erst allmählich vollzieht, als davon, daß von der eingeatmeten Luft nur ein Teil bis in die Alveolen vordringt und sich mit der dort befindlichen Alveolarluft mischt, während derjenige Teil, welcher Mund- und Nasenhöhle, Kehlkopf, Trachea und Bronchen füllt, ohne respiratorische Veränderungen zu erfahren, über der eigentlich zur Atmung verwendeten Portion stehen bleibt. Diese Luftsäule, welche in dem „toten Raum“ des Respirationstrakts steht, wird daher, ebenso wie sie zuletzt eingeatmet ist, auch zuerst ausgeatmet, und erst später folgt in der Expiration diejenige Luft, die wirklich der Respiration gedient hat.

Der tote Raum wird für den erwachsenen Menschen im Mittel zu 140 ccm veranschlagt (LOEWY); danach kann man aus der Zusammensetzung der Exspirationsluft die mittlere Zusammensetzung der **Alveolarluft** berechnen. Betrage z. B. der O₂-Gehalt der Exspirationsluft 17% und ihre Menge 500 ccm, so gilt die Gleichung:

$$500 \cdot 17 = 140 \cdot 21 + 360 \cdot x,$$

wenn x den mittleren Prozentgehalt an Sauerstoff in der Alveolarluft bedeutet. Daraus folgt: $x = 15,4$. In entsprechender Weise kann man auch den CO₂-Gehalt der Alveolarluft berechnen. Nach HALDANE und PRIESTLEY kann man die Zusammensetzung der Alveolarluft aber auch direkt auf folgendem Wege bestimmen: nach einer gewöhnlichen Inspiration atmet man durch einen langen Schlauch aus und verschließt den Schlauch zum Schluß der Expiration mit der Zunge; dann entnimmt man durch einen seitlichen Ansatz nahe am Mund dem Schlauchinhalt eine Luftprobe und analysiert sie.

Die Zusammensetzung der Alveolarluft ist natürlich Schwankungen unterworfen, welche vor allem von der Größe der Verbrennungsprozesse im Körper und der Tiefe der Atemzüge abhängen; aber unter gewöhnlichen Umständen sind die Schwankungen sehr geringfügig, weil beim Steigen des Sauerstoffkonsums und der Kohlensäureproduktion automatisch eine Vertiefung der Atmung, also eine Vermehrung der Ventilation zustande kommt, welche ausgleichend wirkt.

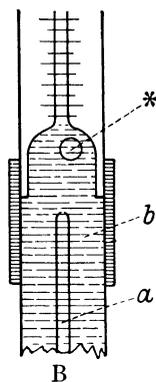
Um nun ein Urteil darüber zu gewinnen, ob wirklich die Atmung auf Ausgleich der Gasspannungen zwischen Alveolarluft und Lungenblut beruht, müssen wir uns zunächst der Ermittlung dieser Spannungswerte zuwenden. *Die mittleren O₂- und CO₂-Spannungen der Alveolarluft* lassen sich aus deren Zusammensetzung leicht berechnen; man hat dabei nur noch zu berücksichtigen, daß die Inspirationsluft sich an der feuchten Oberfläche der Lungen und der zuführenden Luftwege mit Wasserdampf sättigt. Denn die Wasserdampfspannung beträgt bei 37° 46,6 mm Hg. Bei 760 mm Druck entspricht also z. B. dem vorher berechneten Sauerstoffgehalt von 15,4% der trockenen Alveolarluft eine Spannung von $\frac{15,4(760 - 46,6)}{100} = 109,9$ mm Hg. Im allgemeinen schwankt bei Ruhe

und bei mäßiger Körperarbeit *die O₂-Spannung der Alveolarluft zwischen 100 und 110, die CO₂-Spannung zwischen 35 und 45 mm Hg*; der Prozentgehalt variiert also in der trockenen Alveolarluft zwischen 14 und 15,4 für den Sauerstoff, zwischen 4,9 und 6,3 für das Kohlendioxyd.

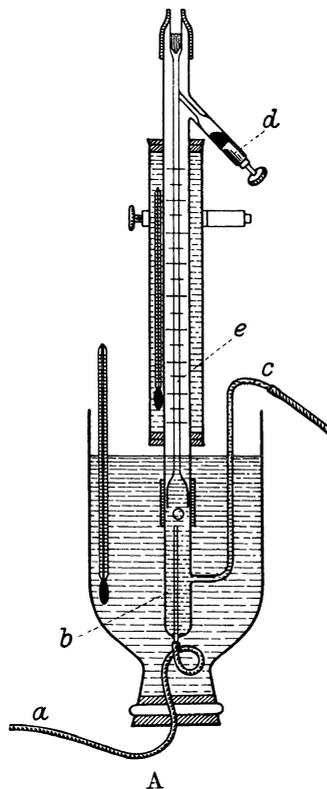
Schwieriger ist die Messung der Gasspannungen im Blut, das in den Lungen mit der Alveolarluft in Austausch tritt, d. h. die Messung der Spannungen im venösen und im arteriellen Blut; denn das Blut in einer großen Vene ist ungefähr mit dem in die Lunge eintretenden Blut der Art. pulmonalis, das Blut einer großen Arterie mit dem aus der Lunge austretenden Blut der V. pulmonalis zu identifizieren. Die Spannungsmessungen geschehen mit einem sogenannten *Aerotonometer*. Das Prinzip ist folgendes: man läßt das Blut eine Zeitlang an einer Gasmenge vorbeiströmen und kontrolliert von Zeit zu Zeit deren Zusammensetzung; diese ändert sich anfänglich durch den Austausch mit dem Blut, um dann konstant zu werden; die endgültige Zusammensetzung entspricht den Gasspannungen des Blutes. Natürlich muß die Gasmenge im Verhältnis zu dem daran vorbeiströmenden Blut klein und die Berührungsfläche groß sein, damit der Austausch rasch und vollständig von statten geht.

Diesen Anforderungen entspricht vortrefflich das *Mikrotonometer* von KROGH (siehe Abb. 23): das Blut fließt direkt aus der Arterie eines Tiers unter konstantem Druck und bei konstanter Temperatur aus dem Rohr a durch den Raum b in das Rohr c und von da in das Tier zurück. In dem Raum b ist eine kleine Luftblase (*) von etwa 2 mm Durchmesser gefangen und wird von dem Blutstrom hin und her gerollt. Von Zeit zu Zeit wird die Blase

mit Hilfe des Spritzenstempels bei d in das in einen Wassermantel von konstanter Temperatur eingeschlossene kalibrierte Kapillarrohr e hineingesogen und die Länge des Gasfadens gemessen, bis Konstanz der Länge, also des Volumens eingetreten ist. Das ist spätestens nach 5 Minuten geschehen. Nun schreitet man zur Analyse des Gasmischunges in der Blase. Zu diesem Zweck wird die Meßkapillare mit der in ihr befindlichen Gasblase von b, mit welchem sie durch ein Schlauchstückchen verbunden ist, abgenommen (siehe Abb. 23 B) und der an die Meßkapillare unten angeschlossene erweiterte Raum



B



A

Abb. 28. Mikrotonometer von KROGH.

erst mit Kalilauge und danech mit alkalischer Pyrogalllösung gefüllt. Werden diese Flüssigkeiten nacheinander in die Kapillare aufgesogen, so absorbieren sie erst das Kohlendioxyd, und dann den Sauerstoff der Gasblase.

Tonometrische Messungen der Art haben ergeben, daß unter gewöhnlichen Atmungsbedingungen die mittlere Sauerstoffspannung in der Alveolarluft um etwa 15–20 mm Hg über die Sauerstoffspannung des arterialisierten Blutes der Lungenvene überwiegt, und daß umgekehrt die Kohlendioxydspannung des venösen Blutes in der Lungenarterie größer ist, als in der Alveolarluft, oder ihr gleichkommt (KROGH). Das braucht nun freilich an sich noch nicht zu beweisen, daß der respiratorische Gaswechsel ein rein physikalisches Phänomen ist. Erstens kommt es noch darauf an, daß die Spannungsgefälle auch groß genug sind, um in der Zeiteinheit genügende dem Bedarf bzw. der Produktion entspre-

chende Mengen Sauerstoff und Kohlensäure in den Körper und aus ihm heraus zu treiben; entsprechende Diffusionsversuche an Membranen und an ausgeschnittenen Lungen haben aber gelehrt, daß das der Fall ist (ZUNTZ und LOEWY). Zweitens kann man die Frage aufwerfen, ob die Spannungsdifferenzen unter allen Umständen, z. B. bei exzessiver, einen großen Sauerstoffbedarf erzeugender und die Verbrennungsprozesse stark anfachender Muskelarbeit oder in der verdünnten Luft großer Höhen zur Versorgung des Körpers ausreichen. Diese Frage ist nach mannigfachen Versuchen erst neuerdings dahin entschieden worden, daß auch bei relativem Sauerstoffmangel, wie nach 6 Tage langem Aufenthalt in Luft von nur 84 mm Sauerstoffspannung (entsprechend einer Höhe von mehr als 5000 m), während dessen auch Muskelarbeit geleistet wurde, das reguläre Spannungsgefälle von der Alveolarluft ins Blut erhalten bleibt (BARCROFT).

An und für sich kann ja die Möglichkeit gewiß nicht von der Hand gewiesen werden, daß unter besonderen Lebensbedingungen von unserem Körper Kräfte mobilisiert werden, welche in gewöhnlichen Verhältnissen nicht beansprucht zu werden brauchen; dafür gibt es ja zahlreiche Beispiele. Und es kommt hinzu, daß in gewissen Fällen, die gleich genannt werden sollen, eine Beförderung des Sauerstoffs entgegen dem Sauerstoffdruck auch mit Bestimmtheit nachgewiesen ist. Man spricht in diesen Fällen mit Recht von einer Gassekretion. Zum Typus der sekretorischen Funktion gehört nämlich, abgesehen von der Produktion bestimmter chemischer Verbindungen in der Drüse, wie etwa Trypsin im Pankreas oder Milchzucker in der Milchdrüse, die Leistung von Konzentrationsarbeit, d. h. die Bewegung von gelösten Stoffen gegen ihren osmotischen Druck; ein gutes Beispiel ist etwa die Anreicherung des Harnstoffs im Harn, welcher, im Blut in einer Konzentration von wenigen hundertstel Prozent enthalten, durch die Tätigkeit der Niere auf eine Konzentration von 1—2% im Harn gebracht wird. In ähnlicher Weise, wie hier durch die Arbeitsleistung der lebenden Nierenzellen der Harnstoff gegen sein osmotisches Druckgefälle befördert wird, so wird nun gelegentlich auch der Sauerstoff gegen das Gasdruckgefälle bewegt. So besteht das Gas in der Schwimmblase mancher Fische zu 80% und mehr aus Sauerstoff; der Sauerstoffgehalt steigt, wenn man die Fische von der Oberfläche in größere Tiefen versetzt, und wenn man die Schwimmblase ansticht, so füllt sie sich von neuem mit Gas, welches manchmal fast reiner Sauerstoff ist. Hier ist also die Sauerstoffspannung in der Blase, in die hinein der Sauerstoff abgeschieden wird, bei weitem höher als im Blut. Zugunsten des Vergleichs mit der Tätigkeit einer Drüse spricht noch besonders, daß die Sauerstoffabscheidung aufhört, sobald der zur Schwimmblase hinzutretende Ast des N. vagus durchschnitten wird (BROX, BOHR). In demselben Sinn könnte die Lunge als eine Gasdrüse funktionieren; aber das ist, wie wir heute wissen, nicht der Fall.

Die Mindestmenge Sauerstoff, die in der Atmungsluft enthalten sein muß, damit der Körper nicht gefährdet wird, beträgt etwa 9%; bei etwa 3%, also einem Partialdruck von 21 mm Hg, tritt rasch Erstickung ein (СПЕК).

Ein besonderes Moment bleibt noch zu erwähnen, welches den Übertritt des Sauerstoffs in das Lungenblut erleichtert. Es war früher davon die Rede und wurde durch die Abb. 27 illustriert, daß Kohlensäure je nach ihrer Konzentration in verschiedenem Maß die Fähigkeit des Blutes, Sauerstoff zu fixieren, verringert, d. h. daß durch Einleiten von CO₂ in Blut, welches mit einem Gasgemisch von bestimmter O₂-Spannung im Gleichgewicht ist, Sauerstoff aus dem Blut ausgetrieben werden kann. Umgekehrt wird demnach, wenn in den Lungenalveolen im Verlauf eines Atemzuges aus dem Blut Kohlendioxyd mehr und mehr abdunstet, das Sättigungsvermögen des Blutes für Sauerstoff stetig wachsen.

So viel von dem, was man gewöhnlich unter respiratorischem Gaswechsel versteht! Man bezeichnet ihn wohl auch als *äußere Atmung*, im Gegensatz zu der *inneren Atmung*, dem eigentlich wesentlichen At-

mungsprozeß. Unter innerer oder *Gewebsatmung* versteht man den Gasaustausch zwischen Blut und Organen, den Austausch der Kohlensäure, welche als Endprodukt der Verbrennung organischer Verbindungen in den Organen entsteht, gegen den Sauerstoff, welcher für neue Oxydationen zugeführt werden muß. LAVOISIER war noch der Ansicht, daß der Sauerstoff innerhalb der Gefäße verzehrt und zur Verbrennung der von den Organen dorthin abgegebenen oxydablen Stoffe verbraucht werde. Aber heute weiß man, daß die Sauerstoffzehrung beim normalen Blut auffallend geringfügig ist; denn auch der Sauerstoffverbrauch der Blutkörperchen ist, wenigstens beim Erwachsenen, nur sehr klein (O. WARBURG). Man betrachtet heute auf Grund zahlreicher Versuche als den *Sitz der Hauptverbrennungen die Organe*, und zwar die sie aufbauenden Zellen. Schon vom vergleichend-physiologischen Standpunkt aus kann man dafür anführen, daß auch die niederen Tiere und Pflanzen, welche gar kein Blut besitzen, Sauerstoff verbrauchen und Kohlensäure produzieren. PFLÜGER hat bei Fröschen das Blut nach Möglichkeit entfernt, indem er in die durchschnittene V. abdominalis herzwärts physiologische Kochsalzlösung einlaufen ließ, während aus dem peripheren Stück der Vene das Blut ausfloß, und konstatierte, daß solche „Salzfrösche“ einen kaum niedrigeren respiratorischen Gaswechsel haben, als normale. Auch ausgeschnittene Organe, welche man künstlich durchströmt, weisen eine lebhaftere Sauerstoffzehrung und Kohlendioxydbildung auf, und Blut, von dem gerade angegeben wurde, daß es unter normalen Verhältnissen besonders wenig Sauerstoff konsumiert, atmet lebhafter, sobald, etwa nach einem Blutverlust oder im Verlauf gewisser Erkrankungen, neben seinen kernlosen roten Blutkörperchen die eben wegen ihrer Kernlosigkeit keine richtigen den Gewebszellen vergleichbaren Zellen sind, reichlicher kernhaltige Blutkörperchen (Erythroblasten) in der Gefäßbahn erscheinen.

Wie die innere Atmung vor sich geht, ist nach allen vorangegangenen Betrachtungen leicht zu verstehen. Da die Sauerstoffspannung in den Organen wegen ihres Verbrauchs, besonders natürlich, wenn sie sich in lebhafter Tätigkeit befinden, gering bis null, die Sauerstoffspannung im arteriellen Blut gegen 100 mm Hg beträgt, so muß Sauerstoff in die Gewebe abfließen, und indem so die Sauerstoffspannung des Blutes bei seiner Passage durch das Organ sinkt, wird das bis dahin im ganzen Arteriensystem vom Herzen bis zum Organ bestehende Gleichgewicht zwischen Oxyhämoglobin, Hämoglobin und Sauerstoff in den Blutkörperchen gestört, Oxyhämoglobin muß dissoziieren und Sauerstoff ins Plasma nachliefern. Umgekehrt wird aus den Organen das durch die Oxydationen entstehende Kohlendioxyd, dessen Spannung sich auf etwa 40—70 mm beläuft, in das arterielle Blut, in dem die Spannung nur 20—40 mm beträgt, fort diffundieren, um im Plasma und in den Blutkörperchen chemisch gebunden zu werden. Und indem der Gehalt des Blutes an Kohlensäure, während es das Organ durchströmt, mehr und mehr zunimmt, sorgt dies Produkt der Verbrennung selber für die ausgiebige Nachlieferung von Sauerstoff; denn wie wir vorher sahen, daß in den Lungen durch das Abdunsten der Kohlensäure aus dem Blut die Affinität des Hämoglobins zum Sauerstoff wächst, so treibt nun hier umgekehrt die Kohlensäure mit steigender Konzentration den Sauerstoff mehr und mehr aus seiner Bindung, steigert also die Sauerstoffspannung und macht somit das Diffusionsgefälle ins Gewebe hinein steiler. Den gleichen Zweck erfüllen auch noch andere Vorgänge; je lebhafter die

Tätigkeit eines Organs ist, um so stärker ist der Strom von Lymphe, die aus ihm austritt (s. Kap. 16); diese entstammt aber im Grunde genommen dem Blut, welches beim Durchfließen durch ein arbeitendes Organ merklich eingedickt wird; auch dadurch wird die Spannung des gelösten Sauerstoffs vermehrt. Im gleichen Sinne wirkt die Sekretbildung in den Drüsen, auch die Schweißabscheidung bei der Muskelarbeit. So wird aus dem hellroten arteriellen Blut, welches in ein tätiges Organ einströmt, das dunkle venöse Blut.

Aber auch im venösen Blut herrscht im allgemeinen neben einer CO_2 -Spannung von 40—50 mm immer noch eine Sauerstoffspannung von 20—40 mm; das bedeutet, wie aus den entsprechenden Kurven der Abb. 27 abzulesen ist, daß immer noch das Sauerstoffreservoir der roten Blutkörperchen mit ihrem Hämoglobin zu etwa 35—75% gefüllt ist.

Wir wenden uns nun dem äußerlich sichtbaren Teil der Atmung, der *Atemmechanik* zu. Der respiratorische Gaswechsel zwischen Alveolarluft und Lungenblut würde gänzlich unzureichend sein, das Verlangen des Körpers nach Sauerstoff sowie sein Bedürfnis nach Abgabe der Kohlensäure zu befriedigen, wenn nicht noch der Ventilationsmechanismus des Thorax hinzukäme. Der Ort des Gasaustausches, die Alveolen, liegt ja, wie bereits bemerkt wurde, weit entfernt von der reinen atmosphärischen Luft an der Körperoberfläche, und die Diffusion der Gase ist ein viel zu langsamer Prozeß, als daß dadurch allein die Luft in der Lunge genügend aufgefrischt und ihre Veränderung durch den Austausch immer von neuem rückgängig gemacht werden könnte. Andererseits erfüllt die Verlagerung des Gasaustausches in die Tiefe und in die engen Alveolen den Zweck, die respiratorische Oberfläche zu vergrößern; denn die Alveolen sind ja das Resultat einer tausendfältigen Kammerung des großen Lungenluftraums; man veranschlagt die Fläche der Lungen auf etwa 90 m². Wie bei allen kiementragenden Tieren der gleiche Zweck durch eine mehr oder weniger fein verzweigte Ausstülpung der Rachenwandung erreicht wird, so ist bei den Lungenatmern — und ähnlich auch bei den Tracheenatmern — die komplizierte Einstülpung und Einschachtelung in das geschützte Innere des Körpers zustande gekommen. Diese große innere Oberfläche ist dann außerdem sinngemäß von einem engmaschigen Netz von Blutgefäßen umspannen.

Die Ventilation der Lunge erfolgt durch *abwechselnde Vergrößerung und Verkleinerung des Thoraxraumes*, in welchen die Lunge eingefügt ist. Gehen wir bei der Betrachtung der Atmung von derjenigen Phase aus, in welcher der Thorax am kleinsten ist; die Lungenoberfläche ist dabei zugleich der Thoraxinnenfläche eng angeschmiegt oder vielmehr durch eine kapillare Schicht von Gewebswasser von ihr getrennt, welche ein leichtes Gleiten der Lungenoberfläche entlang der Thoraxinnenwand ermöglicht. Wird jetzt durch Muskelwirkung der Brustraum erweitert, so werden *passiv die elastischen Wände der Lunge gedehnt*, so daß sie der Brustwand angelagert bleiben, und nehmen ein entsprechendes Quantum Luft auf, es erfolgt also eine Einatmung oder *Inspiration*. Verengt sich danach der Thorax, so passen sich die Lungen von neuem den geänderten Raumverhältnissen an, indem sich ihre elastischen Wandungen entspannen, sie stoßen also bei der Ausatmung oder *Expiration* ein Quantum Luft aus. Zum Schluß der Expiration ist jedoch die Lunge nie vollständig entleert, es findet also *bei der Atmung stets nur eine partielle Auffrischung der Alveolarluft* statt.

Die Muskulatur für die **Inspiration** wird vor allem durch das *Zwerchfell* repräsentiert; erst in zweiter Linie sind dabei die *M. intercostales externi* und die *M. intercartilaginei* beteiligt. Die Kontraktion des Zwerchfells erweitert den Thoraxraum besonders in der vertikalen Richtung; seine Kuppe flacht sich durch die Verkürzung der muskulösen Anteile ab, dazu entfernen sich die Randpartien von der Thoraxwand, der sie im Stadium der Expiration seitlich anliegen. Durch die Interkostalmuskeln werden die Rippen gehoben. Wir können letztere zunächst als einarmige Hebel betrachten, deren Drehpunkt in der Gelenkverbindung mit den Wirbeln gelegen ist. Da nun die Intercostales externi von hinten oben nach vorn unten von Rippe zu Rippe verlaufen, so werden sie bei ihrer Verkürzung die Rippen heben, weil das Drehungsmoment am unteren Ansatz der Muskeln wegen der größeren Länge des Hebelarmes größer ist als am oberen. Im vorderen knorpeligen Drittel der Rippen dagegen vom Angulus costae ab, von wo die Rippen bzw. die Rippenknorpel zur Verbindung mit dem Sternum hin zum Teil aufsteigen, können die Intercartilaginei mit dem entgegengerichteten Verlauf von vorn

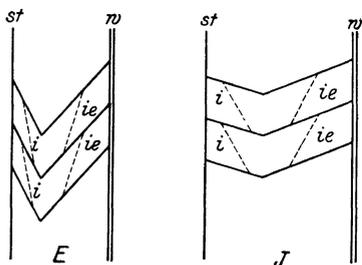


Abb. 29. Schema der Rippenbewegung nach HAMBERGER. E Expiration. I Inspiration. w Wirbelsäule. st Sternum. ie Intercostales externi. i Intercartilaginei.

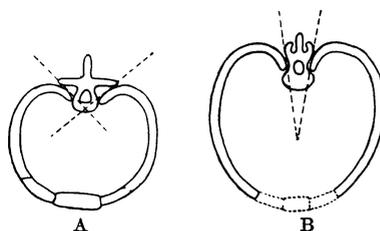


Abb. 30. Thoraxquerschnitte. A in der Höhe des 3., B in der des 10. Brustwirbels. Die gestrichelten Linien bedeuten die Drehachsen der Rippen.

oben nach hinten unten die Hebung unterstützen. Das Schema Abb. 29 macht diese hebende Wirkung klar. Die Bewegung wird durch die feste, nicht gelenkige Knorpelverbindung mit dem Sternum natürlich beschränkt; die elastischen Knorpel müssen von den Muskeln erst durchgebogen werden. So werden durch die Torsion elastische Kräfte geweckt, welche den Thorax in seine Ausgangslage zurückzuführen streben. Da die Rippenbögen in der Ruhelage von hinten nach vorn schräg abwärts gerichtet sind, so muß die Hebung des Bogens den Thorax im sagittalen Durchmesser erweitern, so wie es die rechte Hälfte von Abb. 29 in dem größeren Abstand von w bis st zum Ausdruck bringt. Dazu kommt aber auch noch, besonders in den unteren Thoraxpartien, eine Erweiterung im frontalen Durchmesser. Das rührt davon her, daß die Drehachsen der Rippen an ihrem Ansatz an die Wirbelsäule nicht frontal verlaufen, sondern daß die Achsen eines Rippenpaares schräg nach vorn gegeneinander konvergieren und verschiedene Winkel zwischen sich einschließen, so wie es die schematischen Abb. 30 A und B darstellen. Je nachdem durch die verschiedenen Konfigurationen der Wirbel die Drehachse, d. h. die Verbindungslinie zwischen dem Ansatz des Capitulum costae am Wirbelkörper und des Tuberculum costae am Processus transversus eine mehr frontale oder mehr sagittale Richtung erhält, wird durch die um diese

Linie erfolgende Drehung eine mehr sagittale oder eine mehr frontale Erweiterung zustande kommen müssen.

Zwerchfell und Interkostalmuskeln können in verschiedenem Ausmaß für die Inspiration herangezogen werden; danach unterscheidet man den *diaphragmatischen* oder *Abdominaltypus* und den *Kostaltypus* der Atmung; ersterer überwiegt beim männlichen, letzterer beim weiblichen Geschlecht. Ob der Kostaltypus als eine Anpassung des weiblichen Körpers an die Gravidität aufgefaßt werden darf, ist unsicher. Die sexuelle Differenz entwickelt sich erst etwa vom 10. Lebensjahre ab.

In Fällen von besonders starkem Ventilationsbedürfnis können noch *auxiliäre Atemmuskeln der Inspiration* dienstbar gemacht werden. So sieht man besonders bei Kranken mit Lufthunger die Scaleni am Hals sich anspannen; indem Kopf und Nacken fixiert werden, helfen auch die Sternokleidomastoidei den Thorax nach oben ziehen; ferner werden die Arme aufgestützt und die Scapulae festgestellt, damit Pectorales und Serratus anterior die Rippen heben können, während sie für gewöhnlich umgekehrt den Thorax als *Punctum fixum* benutzen, um die Arme zu bewegen. Bei schwerer Atemnot werden auch die Nasenflügel gehoben und im äußersten Fall vereinigen sich noch Mund- und Kehlkopfmuskulatur, um „Luft zu schnappen“.

Die **Expiration** erfolgt viel mehr passiv, als durch Muskelaktion; die passiven Momente sind vor allen Dingen *elastische Kräfte* verschiedenen Ursprungs. Es wurde bereits gesagt, daß bei der Inspiration die Lungenoberfläche den nach allen Richtungen hin ausweichenden Thoraxwänden folgt, indem sich ihre elastischen Wände dehnen; die Arbeit der Inspirationsmuskeln dient also zum Teil der Spannung der elastischen Fasern der Lunge. Die so als elastische Energie teilweise aufgespeicherte Muskelarbeit wirkt nun darauf hin, sobald die Muskelanspannung nachläßt, die Thoraxhebung und Zwerchfellsenkung rückgängig zu machen, indem die Lunge in ihre elastische Ruhelage zurückkehrt. Dieser „*Lungenzug*“ ist natürlich zu Beginn der Expiration am kräftigsten und läßt dann mehr und mehr nach. Aber auch zum Schluß der Expiration sind die elastischen Fasern der Lunge noch nicht entspannt; davon kann man sich durch ein bekanntes Experiment überzeugen: durchsticht man bei einer Leiche, deren Thorax sich natürlich in Expirationsstellung befindet, die Brustwand, so zieht sich alsbald die Lungenoberfläche von der Thoraxwand zurück, es entsteht ein Zwischenraum zwischen Pleura costalis und Pleura pulmonalis, in den Luft hineinstreicht, und die kollabierende Lunge treibt einen Lufthauch durch die Atemwege nach außen. Dasselbe kann geschehen, wenn beim Lebenden eine penetrierende Wunde in der Thoraxwand oder, etwa infolge eines Eiterungsprozesses, ein Loch in der Lungenoberfläche zustande kommt; die Lunge sinkt zusammen, in den Pleuraraum tritt Luft, es bildet sich ein sogenannter *Pneumothorax*. Jede Inspiration lüftet von nun an nicht mehr die Lunge, sondern die Inspirationsluft tritt durch die Wunde oder das Loch in den Pleuraraum, während die Lunge still liegt. So begreift man, daß, wenn ein doppelseitiger Pneumothorax entsteht, oft Tod durch Erstickung zustande kommt. So begreift man auch, daß der Chirurg bei Operationen an der Lunge auf besonders schwierige Verhältnisse stößt, weil ihm die Lunge bei Eröffnung des Thorax ausweicht, indem sie sich auf ein kleines Volumen retrahiert. Doch kann man dieser Schwierigkeiten Herr werden, wenn man durch Überdruck vom Mund her die kollabierte Lunge aufbläht.

Man macht das unter anderem so, daß Patient und Operateur in einen hermetisch verschließbaren Raum kommen, durch dessen eine Wand nur der Kopf des Patienten herausragt; wird nun in diesem Raum durch Luftverdünnung ein bestimmter Unterdruck hergestellt, so weiten sich die Lungen bis zu ihrem normalen Blähungszustand aus.

Im Hinblick auf dies Verfahren ist es besonders einleuchtend, wenn man gewöhnlich von einem *negativen Druck im Pleuraraum* spricht; die Lunge verhält sich so, als ob im Pleuraraum eine Saugkraft von periodisch wechselnder Größe bestände. Sticht man bei einem Tier einen Schenkel eines Manometers luftdicht durch die Thoraxwand hindurch, so wird der negative Druck durch eine Niveaudifferenz im Manometer angezeigt. Beim lebenden Menschen hat man statt dessen eine dünnwandige Schlundsonde in den Ösophagus eingelegt; wird deren oberes Ende mit einem Manometer verschlossen, so zeigt sich expiratorisch ein Druck von — 3 bis 4,5, inspiratorisch von — 7,5 bis 9 mm Hg (I. ROSENTHAL). Die ersten Messungen des intrathorakalen Druckes führte DONDERS so aus, daß er an der Leiche ein Manometer in die Trachea einband, und dann den Thorax öffnete; das Quecksilber wurde dann um 6 mm gehoben.

Woher rührt nun dieser auch in der Expiration noch bestehende „Lungenzug“? Wie ist ursprünglich die den negativen Druck verursachende elastische Spannung der Lungenwand zustande gekommen? Wenn man bei einem neugeborenen Kind den Thorax öffnet, so kollabiert die Lunge nicht (BERNSTEIN); erst etwa vom 8. Tag ab entsteht die elastische Anspannung. Die richtige Erklärung dafür ist wohl, daß der Thorax rascher wächst als die Lunge, letztere muß dann den sich weitenden Thoraxwänden nachfolgen, wie bei der Inspiration, und wie bei der Inspiration muß Luft in die Lunge eintreten; das Thoraxwachstum ist sozusagen eine lange, über Monate hin sich steigernde Inspiration. So kommt es auch, daß, wie schon gesagt wurde, auch bei maximaler Expiration nicht alle Luft die Lunge verlassen kann; der Thorax kann nicht so stark verkleinert werden, daß die Lunge sich völlig entspannt. Das hat aber den Nachteil, daß die frisch inspirierte Luft sich stets mit der „Residualluft“ vermischt (siehe S. 109); mit viel reinerer Luft füllen sich dagegen die Alveolen des Neugeborenen.

Der *Lungenzug* wirkt naturgemäß auf alle nachgiebigen Teile am und im Thorax. Wie er die Manometerflüssigkeit einwärts saugt, wenn man ein Manometer in einen Interkostalraum durchstößt, so saugt er auch die nachgiebigen interkostalen Weichteile einwärts und würde dies noch mehr tun, wenn sie nicht inspiratorisch durch die Kontraktion der Intercostales externi, expiratorisch durch die Kontraktion der Intercostales interni versteift würden. Dennoch bilden sich bekanntlich während des Lebens entsprechend dem Verlauf der Interkostalspalten Impressionen auf der Lungenoberfläche. Der Lungenzug wirkt ferner aufs Herz, auf seine Kammern, wenn sie diastolisch schlaff sind, und besonders auf die dünnwandigen Vorhöfe und trägt auf diese Weise zur Füllung des Herzens mit Blut von den Venen her bei. Auch die großen Venenstämme, welche die Thoraxwand durchbrechen, werden vom Lungenzug ausgeweitet und ihr Inhalt angesogen; daher besteht die Gefahr, daß, wenn man eine größere Vene in der Nähe des Thorax anschneidet, nicht Blut austritt, sondern im Gegenteil Luft angesogen wird, welche durch „Luftembolie“ (siehe S. 70) einen plötzlichen Tod herbeiführen kann.

Die fortgesetzte Beanspruchung der elastischen Fasern in der Lunge führt, genau wie bei einem Gummiband, allmählich einen Elastizitätsverlust herbei. Nach den vorangegangenen Ausführungen wird begreiflicherweise die Atmung dadurch geschädigt. Wenn z. B. durch häufiges forciertes Ausatmen (siehe unten) gegen Widerstände in den Respirationswegen, z. B. beim Blasen eines Instrumentes oder bei asthmatischem Krampf der Bronchialmuskeln, die elastischen Fasern überdehnt werden, so werden die Lungen sich immer mangelhafter entleeren, und unwillkürlich wird der Thorax in eine mehr und mehr gesteigerte Inspirationsstellung gebracht, wie bei dem sogenannten „Emphysem der Lunge“, der „Lungenblähung“.

Bei der Expiration betätigen sich außer der elastischen Kraft der Lunge auch noch die Kräfte anderer elastisch gespannter totor Elemente. Wir sahen früher, daß inspiratorisch die *Rippenknorpel* von den Inspirationsmuskeln durchgebogen werden; expiratorisch kehren sie von selbst in ihre elastische Ruhelage zurück, wobei die Rippen sich wieder senken. Inspiratorisch werden von dem herabsteigenden Zwerchfell die *Bauchdecken* vorgewölbt und die in den Baucheingeweiden enthaltenen *Darmgase* komprimiert, expiratorisch retrahieren sich die Bauchdecken elastisch und die Gase dehnen sich wieder aus, so daß unter Mitwirkung des Lungenzugs das Zwerchfell wieder emporgehoben wird.

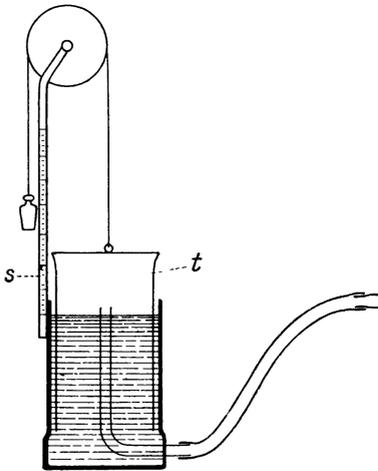


Abb. 31. Spirometer nach HUTCHINSON.

der Verlaufsrichtung ihrer Fasern von vorn oben nach hinten unten die Antagonisten der externi sind. Bei manchen Tieren ist die expiratorische Funktion der interni experimentell festgestellt; für ihre Mitwirkung bei der Expiration des Menschen wird angeführt, daß die Expirationsstellung des Thorax sich jenseits seiner elastischen Ruhelage befindet.

Wie für die Inspiration werden im Fall der Not auch *auxiliäre Atemmuskeln für die Expiration* in Gang gesetzt. Solche sind vor allem die Bauchmuskeln, welche das Zwerchfell nach oben drängen und das Brustbein mitsamt der vorderen Brustkorbwand abwärts ziehen, sowie *Serratus posticus inferior* und *Quadratus lumborum*, welche ebenfalls die Rippen senken.

Die Luftmengen, welche durch diesen Atmungsmechanismus befördert werden, sind je nach äußeren und inneren Umständen sehr verschieden groß. Man kann sie mit einem sogenannten *Spirometer* (HUTCHINSON) (siehe Abb. 31) messen. Dies ist eine Art Gasometer, unter dessen Tauchglocke (t) die Ausatemluft eines oder mehrerer Atemzüge aufgefangen

zu den passiven Momenten der Expiration gehört schließlich noch die *Schwerkraft*; die gehobenen Rippen fallen herunter, wenn keine Muskeln mehr sie oben halten.

Aber bis zu einem gewissen Grad ist die *Expiration wohl auch aktiv*, wie die Inspiration, indem die *Intercostales interni* in Tätigkeit treten, welche nach

und an einer seitwärts angebrachten Skala (s) gemessen werden kann. Die Menge Luft, welche von einem Erwachsenen bei ruhiger Atmung gewöhnlich durch einen einzelnen Atemzug befördert wird, bezeichnet man als *Atemluft* oder *Respirationsluft*; sie beträgt, bei Zimmertemperatur gemessen, etwa 300—800 ccm, im Mittel rechnet man 500 ccm. Man kann aber leicht an eine gewöhnliche Expiration noch eine tiefere Ausatmung anschließen und auf die Weise die sogenannte *Reserveluft*, 1500—2500 ccm, abgeben; andererseits kann man zu dem gewöhnlichen Quantum der Respirationsluft auch noch ein Quantum von 1500—3000 ccm als *Komplementärluft* aufnehmen. Es gelingt also nach einer tiefen Inspiration etwa 3500—6000 ccm zu expirieren; dieses Quantum repräsentiert die *vitale Kapazität der Lunge*. Man atmet für gewöhnlich also recht oberflächlich, da man nur $\frac{1}{7}$ bis $\frac{1}{12}$ der möglichen Menge hin- und herbewegt. Die Vitalkapazität richtet sich natürlich nach der Körpergröße und vor allem nach den Dimensionen des Thorax; sie nimmt mit dem Alter ab, ist aber auch von der Übung abhängig.

Wir haben bereits erfahren, wie und warum die Lunge auch nach der stärksten Expiration noch Luft enthält, die sogenannte *Residualluft*. Man hat ihr Volumen auf verschiedenen Wegen bestimmt, z. B. so, daß man nach einer tiefen Expiration aus einem Spirometer Wasserstoff etwa 10mal hin- und heratmet und zum Schluß wiederum maximal expirieren ließ; analysiert man dann die Zusammensetzung des Gasgemisches im Spirometer, so kann man die Menge der Residualluft berechnen. Auf diese Weise wurden Quanten von 800—1700 ccm gefunden.

Die Residualluft ist auch noch in der Lunge einer Leiche enthalten; macht man bei dieser einen Pneumothorax, so fällt die Lunge zusammen, und es entweicht die sogenannte *Kollapsluft*. Dann bleibt noch die *Minimalluft* in der Lunge übrig, welche von den elastischen Fasern der Lunge nicht ausgetrieben werden kann, weil die kollabierten Bronchiolen zu großen Widerstand bieten. Daher ist auch eine ausgeschnittene Lunge noch lufthaltig, und schwimmt darum auf Wasser. Nur die „ateletatische“, d. h. die an den letzten Ausläufern der Atemwege von Luft nicht ausgeweitete Lunge, z. B. die Lunge eines Fötus, welcher noch keinen Atemzug getan hat, sinkt bei der „Schwimmprobe“ unter — ein forensisch wichtiges Merkmal.

Die **Frequenz der Atmung**, d. h. die Anzahl von Malen, welche die Respirationsluft pro Minute hin- und herbewegt wird, beträgt beim ruhenden Erwachsenen 12—20. Doch wird die Zahl durch äußere Umstände stark beeinflusst. Muskeltätigkeit, erhöhte Umgebungstemperatur steigern die Frequenz, psychische Einflüsse wirken erniedrigend oder erhöhend, auch stark modifizierend auf den zeitlichen Verlauf des einzelnen Atemzuges, wie etwa das *Seufzen*, das *Schluchzen*, das *Lachen* zeigen.

Die Einatemungsluft streicht, bevor sie bis in die Lunge gelangt, durch die **zuführenden Luftwege**; diese haben mannigfache Funktionen zu erfüllen. Nase, Mund und Rachen dienen dazu, die *inspirierte Luft vorzuwärmen und anzufeuchten*. Ferner fangen die Schleimhäute der Luftwege bis in die kleinen Bronchen hinunter, indem die Luft daran vorbeiwirbelt, die Staubteilchen ab, welche in der Luft mittransportiert werden, und dieser Staub wird dann mit dem Schleim und mit abgestoßenen Epithelien und Leukozyten durch das *Flimmerepithel*, welches die tiefen Partien des Respirationstrakts auskleidet, aufwärts getrieben.

Der Kehlkopf kann durch *reflektorischen Verschluss der Glottis* Bronchen und Lungen vor dem Eindringen von schädlichen reizenden Gasen, wie Säuredämpfen, Ammoniak, Chlor, Brom u. a. schützen. Dem gleichen Zweck und vor allem auch der Entfernung fester Partikeln dienen die Nasen- und Kehlkopfreflexe des *Niesens* und *Hustens*. Der Hustenreiz löst gewöhnlich zuerst eine tiefe Inspiration aus, dann schließt sich die Glottis und nun erfolgt eine heftige Expiration unter Beteiligung der Bauchpresse, wodurch die Glottis explosiv gesprengt und das reizende Agens hinausgeschleudert wird. Auch der Niesakt beginnt mit einer tiefen Inspiration, aber die Glottis bleibt danach weit, dafür verschließt sich reflektorisch der Nasenraum durch den weichen Gaumen gegen den Rachen; folgt nun wieder eine krampfartige Expiration, so wird diesmal der Nasenrachenverschluss gesprengt und die heftig aus der Nase herausgetriebene Luft fegt den Reizkörper mit hinaus. Eine willkürliche Nachahmung dieser unwillkürlichen Reflexe ist das „*Schnäuzen*“; dabei wird nach tiefer Inspiration die Nase mit den Fingern verschlossen

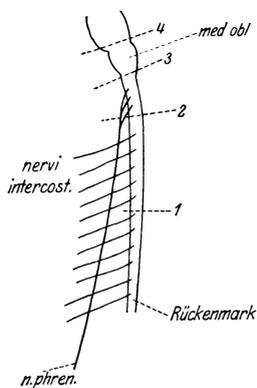


Abb. 32. Schema der Innervation der Atemmuskeln.

und nun bei kräftiger Expiration der Ausweg durch die Nase wieder frei gegeben. Es ist einleuchtend, daß diese Reflexe des Hustens und Niesens große, unter Umständen vitale Bedeutung haben; schützt doch besonders der Hustenreflex davor, daß etwa infolge „Verschluckens“ Speiseteile durch den Kehlkopf hindurch in die Lunge aspiriert werden und diese infizieren (s. Kap. 23). Noch ein Schutzreflex ist die *reflektorische Verengung der Bronchen* von der Nase aus. Eine abnorme Steigerung in der Auflösbarkeit dieses Reflexes hat klinische Bedeutung; sie ist die Ursache für das quälende Asthma, bei dem Inspiration wie Expiration durch die Einengung der Luftwege erschwert sind.

Wenn wir uns nunmehr der **Innervation der Atembewegungen** zuwenden, so stoßen wir zum dritten Mal auf die Erscheinung einer im gewöhnlichen Wortsinn automatischen, d. h. unwillkürlichen, rhythmischen Aktion, und daher liegt es zunächst auch nahe, die rhythmischen Impulse, welche der Atmungsmuskulatur zufließen, so wie bei Magen und Darm, auf autochthone, der Muskulatur direkt angelagerte Nervenlemente zurückzuführen. Immerhin besteht zwischen hier und dort der bemerkenswerte Unterschied, daß erstens die Atemmuskeln Skelettmuskeln und wie alle Skelettmuskeln quergestreift sind, und daß zweitens, wenn auch die Atmung im allgemeinen unwillkürlich vor sich geht, sie doch jederzeit vom Willen modifiziert werden kann, wie etwa die Vorgänge des Sprechens und Singens beweisen.

In der Tat kommt denn auch die Anregung für die Atmung nicht autochthon zustande, sondern die Impulse stammen von „außen“ her; darum stehen Zwerchfell und Interkostalmuskeln still, sobald die sie innervierenden Nervi phrenici und N. intercostales durchschnitten werden. Es fragt sich, von wo dann die Impulse ihren Ursprung nehmen, und das Experiment ergibt folgende Antwort: Durchschneidet man das Rückenmark im Thorakalabschnitt (siehe Schnitt I des Schemas Abb. 32), so fahren diejenigen Thoraxteile fort zu atmen, welche von Nerven versorgt werden, die oberhalb der Schnittstelle aus dem Rückenmark entspringen;

trennt man das Thorakal- vom Zervikalmark (Schnitt 2), so bleibt allein die diaphragmatische Atmung bestehen; durchschneidet man oberhalb des 3. Zervikalsegments, d. h. oberhalb des Ursprungs der N. phrenici (Schnitt 3), so wird auch das Zwerchfell gelähmt und der Tod durch Erstickung tritt ein, es persistieren allein noch die akzessorischen Atembewegungen der Nase. Dies führt zu dem Schluß, daß die Impulse für die Atmungsmuskeln weiter oberhalb produziert werden; wie weit oberhalb, darüber belehrt ein vierter Schnitt, welcher über der Medulla oblongata gelegt wird (Schnitt 4); hiernach bleiben Zwerchfell- und Thoraxatmung in Gang.

So werden wir auf die *Medulla oblongata als Ort der Ursprungsreize für die Atmung* hingewiesen, und schon 1811 ist von LEGALLOIS gezeigt worden, daß, wenn man in die Medulla oblongata in der Höhe des Austritts des 8.—10. Gehirnnerven einsticht, die Atmung erlischt. FLOURENS bezeichnete dies scharf umschriebene *Atemzentrum* als *noeud* oder *point vital*, gleich als ob dort in einem Punkte sämtliche Nervenfasern zusammenliefen, durch welche den einzelnen Organen die Impulse zu ihrem Leben zufließen. Und in der Tat erlischt ja unmittelbar nach dem Stich in den Lebensknoten nicht bloß die Atmung, es hört auch das Herz auf zu schlagen, und das Tier sinkt zu Boden, also die sichtlichsten Äußerungen des Lebens verschwinden, wie wenn wirklich der *Eintritt des Todes* die unmittelbare Folge der Zerstörung des Lebensknotens wäre, wie wenn also dieses kleine Stück Nervenmasse das Leben aller Organe sozusagen in der Hand hielte. Einer derartigen Anschauung widersprechen aber schon verschiedene der früher gemachten Beobachtungen an „überlebenden“ Organen; so sahen wir, daß der ausgeschnittene Magen und daß Darmstücke in ihren normalen Bewegungen fortfahren, wenn sie in Ringerlösung von Körpertemperatur eingehängt und ein Strom von Sauerstoff durch die Lösung hindurchgeleitet wird. Beim Frosch gelingt es noch viel leichter, die Lebendigkeit der einzelnen Organe des zerstückelten Tieres nachzuweisen; denn hier beim Kaltblüter ist es nicht notwendig, die Organe künstlich auf einer höheren Temperatur zu halten, bei der normalen niedrigeren Temperatur ist aber auch der Stoffwechsel so gering, daß im allgemeinen eine besondere Zufuhr von Sauerstoff entbehrlich ist; die einfach ausgeschnittenen Muskeln, Nerven, das Zentralnervensystem, Herz, Leber, Nieren bleiben lange Zeit funktionsfähig. Wenn beim Warmblüter das Leben der Organe einer besonderen Zentralstelle in der Medulla oblongata unterstellt zu sein scheint, wenn also bei Zerstörung dieser Stelle der Tod fast momentan eintritt, so liegt das allein daran, daß, wenn die Atmung aufhört, fast sofort alle Organe bei ihrem großen Bedarf an Sauerstoff erstickt werden. Wir werden bald erfahren, daß man bei hinlänglicher Sauerstoffversorgung auch jedes Warmblüterorgan, auch das Herz, vom Körper losgetrennt, am Leben erhalten kann.

Genauere Studien über den *Sitz des Atemzentrums* haben gezeigt, daß es bilateral vorhanden ist; macht man einen Medianschnitt im Calamus scriptorius der Medulla oblongata, so geht die Atmung ungestört weiter; durchtrennt man dann die Medulla oblongata von einer Seite her an ihrem unteren Ende, so erlöschen die Atembewegungen nur auf der operierten Seite (FLOURENS, SCHIFF). Von einem besonderen Kern von Ganglienzellen ist die Atmung anscheinend nicht abhängig, sondern von der gesamten *Formatio reticularis* in der Gegend des Ursprungs

des 9.—12. Gehirnnerven (GAD und MARINESCU); von dort verlaufen Fasern, vielleicht im sogenannten Respirationsbündel, abwärts zu den Ursprungskernen der Nervi phrenici und intercostales.

An der bisher von uns unbedenklich festgehaltenen ursprünglichen Auffassung des Atemzentrums als eines Zentrums für die koordinierte rhythmische Innervation sämtlicher Atemmuskeln etwa von der Art des Schluckzentrums (siehe S. 26) wurde man zweifelhaft, als die Erscheinungen des sogenannten *Schocks* beim Zentralnervensystem genauer untersucht wurden. Darunter versteht man die Tatsache, daß bei Operationen am Zentralnervensystem die Funktionsfähigkeit der dem Operationsgebiet benachbarten, aber nicht direkt insultierten Bezirke zeitweilig schwer beeinträchtigt oder sogar ganz aufgehoben wird, um nach einiger Zeit wieder zurückzukehren; die Schockerscheinungen sind dabei unterhalb der Operationsstelle besonders schwere. Danach wäre es möglich, daß die rhythmischen Atemimpulse eigentlich in den spinalen Ursprungskernen der Atemnerven entstanden, daß der Stillstand der Atmung bei Zerstörung des *point vital* nur ein Atemzentrum in der Medulla oblongata vortäuschte, und daß die rhythmischen Aktionen der im Schockgebiet befindlichen Ursprungskerne der Atemnerven nach einiger Zeit sich wieder einstellen würden, wenn nicht eben die zeitweilige Unterbrechung der Sauerstoffversorgung des Körpers dem Leben inzwischen ein Ziel setzte. Eine etwas andere Auffassung erblickt in der Unterbrechung des Atemrhythmus durch den Stich in den Lebensknoten den Effekt einer Reizwirkung, welche auf ein *Hemmungszentrum* in der Medulla oblongata ausgeübt wird. Diese Vorstellung hält sich besonders an die Tatsache, daß das sogenannte Atemzentrum die Gegend der Vaguskerne einnimmt, und so könnte Reizung der Vagi in ähnlicher Weise die Atmung hemmen, wie sie auch das Herz hemmt (siehe Kap. 10). Gegen diese Schock- und Hemmungstheorien lassen sich aber gewichtige Argumente anführen. Vor allem hat W. TRENDELENBURG eine „reizlose“ Abtrennung der Medulla oblongata vom Zervikalmark dadurch vorgenommen, daß er bei Kaninchen unterhalb des Calamus scriptorius um das Rückenmark einen dünnen Schlauch (aus Meer-schweinchendünndarm) herumlegte, und durch diesen Eiswasser fließen ließ; dann hörte infolge dieses „Kältequerschnitts“ die eigentliche Atmung alsbald auf — nur die Nasenflügelatmung persistierte —, um zur Norm zurückzukehren, sobald warmes Wasser durch den Schlauch geschickt wurde. In diesem Experiment kommt weder Schockwirkung noch Reizung von Hemmungsfasern für den Effekt in Betracht.

Immerhin scheinen die Kerne der Nervi phrenici und N. intercostales doch bis zu einem gewissen Grad auch selbständig rhythmische Erregungen produzieren zu können und insofern als *spinale Atemzentra* zu fungieren. Diese anzunehmen hätte von vornherein manches für sich; denn die Funktion des Rückenmarks baut sich auch sonst vielfach aus den Funktionen seiner einzelnen Segmente auf (siehe Kapitel 22), und speziell die Atmung ist bei vielen Wirbellosen (Insekten, Krebsen) ausgesprochen segmental; daher könnte auch bei den Wirbeltieren ein den spinalen Kernen übergeordnetes besonderes Atmungszentrum entbehrlich erscheinen. In der Tat hat LANGENDORFF gefunden, daß bei neugeborenen Tieren, deren Erregbarkeit durch Strychnin gesteigert ist, auch nach Abtrennung der Medulla oblongata noch thorakale Atembewegungen vorhanden sind, und WERTHEIMER konstatierte das gleiche

bei ausgewachsenen Hunden, wenn bei ihnen längere Zeit künstliche Atmung unterhalten wurde, um dem Zentralnervensystem Zeit zu geben, sich vom Schock zu erholen. Es scheint also so, als ob ein Hauptzentrum als „führender Teil“ (siehe S. 123) für gewöhnlich die Atmung beherrscht, während untergeordnete spinale Nebenzentren nebenher oder vikariierend wirksam sind.

Wie der ausgeschnittene Magen und Darm, so *funktioniert auch der gesamte Atemapparat automatisch* im Sinn der Physiologie, d. h. das Atemzentrum bedarf keiner Anregung seiner Tätigkeit durch zentripetale Erregungen wie ein Reflexzentrum, sondern es produziert seine Rhythmik aus sich heraus. Der Beweis ist so geführt, daß man nach Möglichkeit alle zur Medulla oblongata führenden zentripetalen Leitungen unterbrach, d. h. man durchschnitt die Verbindung mit dem Hirnstamm, ferner die Vagi, die hinteren Wurzeln des Zervikalmarks und das Rückenmark selber an der Grenze zwischen Zervikal- und Thorakalteil (I. ROSENTHAL); trotzdem blieb die Respiration bestehen.

So kommt es also nicht auf eine Anregung „von außen“ an, wohl aber sind „innere Reize“ vom Blut her wirksam. Es läßt sich nämlich zeigen, daß *das Ausmaß der Tätigkeit des Atemzentrums und seine Tätigkeit überhaupt von einer bestimmten Beschaffenheit des Blutes, vor allem vom Grad seiner Venosität abhängt*. Wenn diese zunimmt, d. h. im allgemeinen, wenn der CO_2 -Gehalt des Blutes steigt, der O_2 -Gehalt sinkt, dann wird die Atmung gesteigert, die Atemzüge werden tiefer und häufiger schneller, es tritt „Dyspnoe“ oder „Hyperpnoe“ auf; man beobachtet dies beispielsweise, wenn durch eine Entzündung der Lunge die respiratorische Oberfläche verkleinert wird, oder bei Verengung der Luftwege, oder auch beim Aufenthalt in verdünnter Luft. Umgekehrt führt eine Abnahme der Venosität, z. B. infolge von Überventilation, zu „Apnoe“, d. h. zu einem Stillstand der Atmung; so braucht man nur absichtlich eine Reihe beschleunigter und vertiefter Inspirationen auszuführen, um sein Bedürfnis zu atmen für eine halbe Minute und mehr auszuschalten. *Die Atmung ist also abhängig vom Atmungsbedarf*, und sie wird je nach dem Bedarf regulatorisch so geändert, daß das Blut einen einer gewissen Norm entsprechenden Gehalt an Sauerstoff und Kohlendioxyd besitzt; ist das erreicht, so besteht der Zustand der „Eupnoe“ (I. ROSENTHAL).

Dieser Blutreiz wirkt in erster Linie unmittelbar auf das Atemzentrum; das ist besonders eindrucksvoll durch folgenden Versuch von FREDERICQ zu demonstrieren: verbindet man bei zwei Hunden je eine Karotis kreuzweise von Tier zu Tier durch Glaskanülen, so strömt das arterielle Blut des einen Tiers direkt zum Gehirn und zur Medulla oblongata des anderen Tieres und umgekehrt; infolgedessen machen sich respiratorische Veränderungen des Blutes der Tiere kreuzweise und unmittelbar durch die Wirkung auf die beiden Medullae oblongatae geltend. Klemmt man bei dem einen Tier die Trachea zusammen, so wird das andere alsbald dyspnoisch, gerade als wäre seine Trachea zugesperrt, und da es nun kräftig durchventiliert wird, so kann das andere Tier, welches eigentlich Dyspnoe haben sollte, eher apnoisch werden, weil seinem Kopfmark das stark ventilierte Blut zuströmt. Danach haben wir uns also vorzustellen, daß die normale Impulsgebung von seiten des Atemzentrums so zustande kommt, daß es andauernd vom arteriellen Blut mit seinem bestimmten mittleren Gehalt an Sauerstoff und Kohlendioxyd gereizt wird. Warum es auf diese kontinuierliche Reizung

mit rhythmischer Aktion antwortet, ist eine Frage für sich und bis heute gerade so rätselhaft, wie die Rhythmik des Magens oder des Darmes, des Ureters (siehe Kap. 16) oder der Ganglienzellen des Rückenmarks (siehe Kap. 22).

Ein guter Beweis für den Zusammenhang von Blutbeschaffenheit und Atmung ist auch die sogenannte *fötale Apnoe* (I. ROSENTHAL). Solange nämlich der Fötus innerhalb der Mutter von der Plazenta aus mit Sauerstoff versorgt wird, atmet er nicht, auch nicht, wenn, wie in den letzten zwei Monaten der Schwangerschaft, sein Atemzentrum an sich fähig wäre, zu agieren. Der erste Atemzug erfolgt erst dann, wenn bei der Geburt die Loslösung von der Mutter ziemlich brüsk zustande kommt und infolgedessen die Venosität des Blutes rasch anwächst. Zieht sich dabei die Ausstoßung des Fötus so in die Länge, daß das Blut bereits Reizwirkung erhält, bevor der Kopf geboren ist, dann wird eventuell nicht Luft inspiriert, sondern Fruchtwasser, und das Kind erstickt, indem es in seinem eigenen Fruchtwasser ertrinkt.

Wenn nun nach dem Gesagten ein gewisses Maß von Venosität des Blutes den Reiz für das Atemzentrum abgibt, so bleibt zu fragen, ob im speziellen die Überschreitung einer bestimmten Kohlensäure-Konzentration oder ob ein bestimmtes Defizit an Sauerstoff den Reiz abgibt. Für beides lassen sich experimentelle Erfahrungen anführen; aber die Steigerung der Kohlensäurekonzentration ist das wichtigere Moment. Für die *Reizwirkung der Kohlensäure* spricht zunächst, daß, wenn man den CO_2 -Gehalt der Inspirationsluft künstlich ein wenig steigert, Hyperpnoe einsetzt, obwohl der Sauerstoffgehalt des Blutes dabei zum mindesten nicht sinkt, eher infolge der kräftigen Ventilation etwas steigt. HALDANE und LORRAIN SMITH ließen zum Beweis der Reizwirkung des CO_2 einen Menschen in einem vollkommen abgeschlossenen Raum atmen; nach einiger Zeit, wenn der O_2 -Gehalt auf ein bestimmtes Maß gesunken, der CO_2 -Gehalt gestiegen war, setzte Hyperpnoe ein; wenn man nun den Versuch ein zweites Mal in der Weise wiederholt, daß man alles sich bildende CO_2 wegabsorbiert, so stellt sich keineswegs Hyperpnoe ein, wenn der O_2 -Gehalt ungefähr ebenso tief gesunken ist, wie das erstemal; füllt man dagegen bei einer dritten Wiederholung den Raum statt mit Luft mit Sauerstoff, so beginnt diesmal die Hyperpnoe, sobald der Kohlensäuregehalt dieselbe Grenze wie das erstemal erreicht hat, obwohl die O_2 -Spannung noch erheblich höher ist. Die Reizwirkung der Kohlensäure wird praktisch ausgenützt, indem zum Schluß einer Inhalationsnarkose der Atmungsluft CO_2 beigemischt und so durch Verstärkung der Atmung das Chloroform oder der Äther rascher wieder aus dem Körper entfernt wird (Y. HENDERSON).

Aber *auch Sauerstoffmangel wirkt erregend*. Sinkt z. B. in dem zweiten Versuch von HALDANE und SMITH bei Abwesenheit von CO_2 der O_2 -Gehalt mehr und mehr ab, so kommt es schließlich auch dann zu Hyperpnoe. Die Bedeutung des O_2 -Mangels als erregenden Moments wird gut auch durch folgenden Versuch demonstriert: wenn man einige Minuten lang forciert atmet, so entfernt man einen großen Teil der Kohlensäure aus den Alveolen, und die Folge davon ist eine länger dauernde Apnoe; mißt man nun zum Schluß, kurz bevor die Atmung spontan wieder einsetzt, die alveolare CO_2 -Spannung, so zeigt sich, daß sie immer noch gegen die Norm herabgesetzt ist. Folglich kann nur O_2 -Mangel den Anreiz für den Wiederbeginn der Atmung bilden. Dieser

Mangel macht sich auch in der leichenhaften Färbung kenntlich, die während der Apnoe mehr und mehr hervortritt. Die Reizwirkung des O_2 -Mangels wird auch dadurch bewiesen, daß, wenn man zum Schluß der forcierten Atmung einige Atemzüge reinen Sauerstoff inspiriert, die Dauer der Apnoe bis auf 4—8 Minuten verlängert werden kann (VERNON).

Wir haben demnach zweierlei Reize für das Atemzentrum anzunehmen. Trotzdem ist wahrscheinlich die unmittelbare Ursache für die Erregung beide Male die gleiche, nämlich eine *Zunahme der Wasserstoffionenkonzentration*. Daß diese bei einer Steigerung der CO_2 -Spannung zustande kommen muß, ist natürlich ohne weiteres klar. Aber auch bei Sauerstoffmangel steigt der H^+ -Gehalt, weil als intermediäre Stoffwechselprodukte Säuren in den Geweben entstehen, welche sonst bei ausreichender Sauerstoffversorgung der Oxydation anheimfallen würden (PFLÜGER). Einen direkten Beweis für die Wirksamkeit der Wasserstoffionen versuchte WINTERSTEIN zu erbringen: er durchspülte neugeborene Kaninchen von der Aorta aus mit sauerstoffgesättigter Ringerlösung und erzeugte so Apnoe; setzte er nun etwas Salzsäure oder Weinsäure zu der Lösung, so traten Atembewegungen auf. Es mag sein, daß diese Säuren — bei gleicher H^+ -Konzentration — noch von der Kohlensäure an Wirksamkeit übertroffen werden, entweder durch Mitwirkung des Kohlesäureanions oder aus anderen physiko-chemischen Gründen; jedenfalls ändert sich aber auch bei gleicher CO_2 -Spannung die Atmung sofort, wenn die H^+ -Konzentration sich nur eine Spur steigert. Die *Empfindlichkeit des Atemzentrums* ist nämlich außerordentlich groß. Wir sahen z. B. früher (S. 100), daß der CO_2 -Gehalt in der trockenen Alveolarluft für gewöhnlich 4,9—6,3% beträgt. Nach HALDANE und PRIESTLEY braucht dieser Gehalt nur um 0,2—0,3% zuzunehmen, um die Lungenventilation bereits um 100% zu steigern. Schon eine Änderung der Nahrung kann den H^+ -Gehalt des Blutes so beeinflussen, daß sich auch die Atmung ändert. Zum Beispiel maß HASSELBALCH beim Menschen die H^+ -Konzentration des Blutes einmal nach Fleischkost und ein anderes Mal nach Pflanzenkost, nachdem er die Blutproben mit CO_2 von 40 mm Spannung ins Gleichgewicht gesetzt hatte; im ersteren Falle betrug der H^+ -Gehalt $0,47 \cdot 10^{-7}$, im zweiten nur $0,38 \cdot 10^{-7}$. Im Körper stellte sich aber beide Male automatisch der H^+ -Gehalt des Blutes auf den gleichen Wert ein, indem durch Selbstregulation die Fleischkost die Atmung verstärkte, so daß die alveolare CO_2 -Spannung sank; sie betrug bei Fleischkost 38,9 mm, bei Pflanzenkost 43,3 mm. Ähnlich säurebildend wie die Fleischkost wirkt die Muskelarbeit; bei jeder Arbeitsleistung steigt der respiratorische Gaswechsel, und dies geht Hand in Hand mit einer Zunahme der alveolaren CO_2 -Spannung, beruht demnach auf einer Reizwirkung infolge der gesteigerten CO_2 -Spannung des Blutes. GEPPERT und ZUNTZ bewiesen diesen Zusammenhang auf folgende Weise: sie versetzten die Hinterbeine eines Hundes durch elektrische Reizung in Dauerkontraktion, nachdem alle nervösen Verbindungen mit dem Vordertier durchtrennt waren, es trat Hyperpnoe ein; wurden nun die Blutgefäße der Beine abgeklemmt, so hörte die Hyperpnoe auf, wurden sie wieder freigegeben, so setzte die Hyperpnoe von neuem ein, auch wenn die Dauerkontraktion inzwischen aufgehoben war. Das Blut vermittelte also zwischen den Muskeln und dem Atemzentrum. — Nur bei starker Muskelarbeit sinkt infolge starker Venti-

lation die alveolare CO_2 -Spannung. Trotzdem erregt auch dann das Blut das Atemzentrum, weil das Minus an Kohlensäure durch ein Plus an sauren Stoffwechselprodukten aus den arbeitenden Muskeln überkompensiert wird; dies zeigt sich sehr deutlich daran, daß der H^+ -Gehalt in einer bei starker Arbeit entnommenen Blutprobe nach Austreiben sämtlicher Kohlensäure im Vakuum erheblich größer sein kann, als unter den gleichen Verhältnissen im Blut bei Ruhe (HÖBER).

Nimmt die Venosität des Blutes mehr und mehr zu, so treten zu der Dyspnoe *Erstickungskrämpfe* der gesamten Körpermuskulatur, zugleich verengen sich sämtliche Gefäße und der Puls wird langsamer (siehe Kap. 11), die Pupille wird weit (siehe Kap. 22). Dann geht die Erregung des Atemzentrums in Erschöpfung und Lähmung über, d. h. die Atmung wird immer oberflächlicher; es entsteht der Zustand der „*Asphyxie*“. Bei Erstickung durch Absperrung der Luftzufuhr muß dieser Zustand in wenigen Minuten eintreten; denn im Gesamtblut sind weniger als 2 g Sauerstoff enthalten, während der tägliche Bedarf etwa 750 g beträgt. Setzt in der Asphyxie auf irgend eine Weise wieder eine kräftigere Ventilation der Lunge ein, so kann das dyspnoische Stadium abermals erscheinen, um mehr und mehr in Eupnoe überzugehen. Bei hochgradigem Sauerstoffmangel, z. B. bei der Bergkrankheit, nimmt die

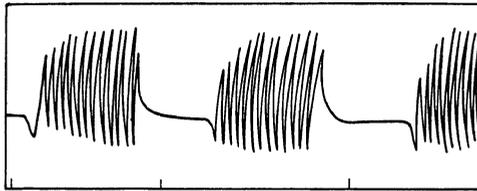


Abb. 33. CHEYNE-STOKESSches Atmen des Menschen.

Atmung öfter einen eigentümlichen periodischen Charakter an, welcher als *CHEYNE-STOKESSches Atmen* bezeichnet wird (siehe Abb. 33); man kennt die gleiche Erscheinung als Folge verschiedener das Herz und die Lunge befallender Krankheiten oder Vergiftungen. Aber auch normalerweise kommt das *CHEYNE-STOKESSche Atmen* gelegentlich im Schlaf, besonders auch bei den Winterschläfern vor. In ähnlicher Weise beobachtet man periodisches Agieren beim Herzen, wenn seine Automatie verringert ist, sowie periodische Tonusschwankungen bei den Gefäßen.

Außer durch die inneren oder Blutreize wird die Tätigkeit des Atemzentrums auch durch herantretende zentripetale Nerven beeinflusst, z. B. durch die sensiblen Nerven der Haut. So kann man durch Kneifen der Haut bei Tieren die Atmung beschleunigen, ein Reflex, der offenbar den Sinn hat, den Körper für notwendige Abwehrmaßnahmen durch Betätigung der Muskeln reichlich mit Sauerstoff zu versorgen; ferner löst beim Menschen Übergießen mit kaltem Wasser tiefe Inspirationen aus. Ein weiterer Atemreflex ist die Hemmung der Inspiration durch Reizung des N. splanchnicus, wodurch wohl ein übermäßiger Druck von seiten des Zwerchfells auf die Bauchorgane vermieden wird (SJÖBLOM). Die größte Bedeutung hat der *Nervus vagus*, weil er einerseits seine Ursprungskerne in unmittelbarer Nachbarschaft des Atemzentrums hat, und weil er andererseits Äste an die Lunge abgibt. Seine Mitwirkung bei der Atmung erkennt man am einfachsten so, daß

man eine doppelseitige Vagotomie ausführt oder — um das Mithineinspielen von Reizwirkungen in die Ausfallserscheinungen möglichst auszuschließen — so, daß man die beiden freigelegten Vagi lokal stark abkühlt und damit ihr Leitungsvermögen aufhebt. Dann tritt alsbald die sogenannte *Vagusdyspnoe* auf (siehe Abb. 34); d. h. die Inspirationen werden tiefer und seltener, sie erhalten einen mehr krampfhaften „tetanischen“ Charakter, und die Pause zwischen zwei Inspirationen wird verlängert. Die Folge davon ist meist eine Verschlechterung der Ventilation; deshalb ist es eigentlich auch nicht richtig, von einer *Vagusdyspnoe* zu sprechen, da die wirkliche *Dyspnoe* im Gegenteil eine Steigerung der Ventilation bedeutet.

Die Vagi erleichtern auf irgend eine Weise den Ablauf der Atemkontraktionen. Wie das geschieht, darüber belehren Versuche von HERING und BREUER. Sie reizten nämlich die sensiblen Äste der Vagi in den Lungen in möglichst natürlicher Form mechanisch, indem sie durch eine Trachealkanüle entweder Luft in die Lungen einbliesen oder aus ihnen absaugten. Jede Ausweitung durch Einblasen löst dann sofort eine Expiration, jeder Kollaps durch Absaugen eine Inspiration aus. Man kann dies besonders gut beim Kaninchen beobachten, dessen

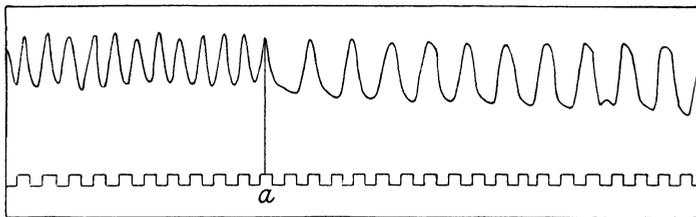


Abb. 34. Einfluß reizloser Vagusausschaltung auf die Atmung des Kaninchens. Bei a Durchfrierung der Vagi. Unten Sekundenmarken.

Nasenflügelatmung einen bequemen Indikator für die jeweils vorhandene Atemphase abgibt. HERING und BREUER sprachen auf Grund dieser Beobachtungen von einer *Selbststeuerung der Atmung*, weil offenbar jede Inspiration von selbst eine Expiration, jede Expiration eine Inspiration wachruft. Sobald diese Selbststeuerung durch die doppelseitige Vagotomie ausgeschaltet wird, dann macht sich der Mangel in der vorher geschilderten *Vagusdyspnoe* geltend.

Die Selbststeuerung kann auch noch auf andere Weise demonstriert werden. Wenn man z. B. die Trachealkanüle am Schluß einer Inspiration verschließt oder stark verengt, so daß der Blähungszustand der Lungen länger erhalten bleibt als ohne dies, so wird dadurch die Expiration in die Länge gezogen; umgekehrt, verschließt man die Kanüle am Schluß der Expiration, so wird dadurch die Inspiration verlängert. Beides geht aber nur, solange die Vagi intakt sind. Ferner haben HERING und BREUER gezeigt, daß, wenn man bei einem Tier plötzlich einen doppelseitigen Pneumothorax erzeugt, der Lungenkollaps mit einer lang anhaltenden tetanischen Inspiration beantwortet wird.

Wenn nun alle diese Versuche dafür sprechen, daß bei jedem Atemzug zweierlei Erregungsimpulse von den Lungen durch die Vagi aufwärts laufen, nämlich einer zu Beginn der Inspiration und einer zu Beginn der Expiration, so läßt sich dies auch tatsächlich demonstrieren,

indem man von dem peripheren Stumpf eines durchschnittenen Vagus mit Elektroden zu einem Galvanometer von geeigneter Empfindlichkeit ableitet. Jede Erregung eines Nerven ist nämlich, wie wir später erfahren werden (siehe Kap. 20 und 21), vom Auftreten eines elektrischen Stroms, eines sogenannten Aktionsstroms, begleitet, und so läßt sich nun auch hier feststellen, daß synchron mit der Atmung Stromschwankungen im peripheren Vagusstumpf zustande kommen, welche als „Elektrovagogramm“ photographisch zu registrieren sind (siehe Abb. 101, Kap. 21).

Man könnte daran denken, auf noch eine andere Art und Weise die HERING-BREUERSche Auffassung der Selbststeuerung der Atmung sicher zu stellen, nämlich durch direkte elektrische Reizung der Vagi die natürlichen peripheren Erregungen zu imitieren. Man erhält, wenn man so verfährt (TRAUBE, J. ROSENTHAL), aber nur unsichere Ergebnisse, nämlich bald Beschleunigung der Atmung und Verstärkung der Inspiration, bald Verlangsamung mit Begünstigung der Expiration. Das liegt offenbar daran, daß durch die elektrische Reizung gleichzeitig die inspiratorisch und die expiratorisch tätigen Nervenfasern gereizt werden, und daß der Effekt von dem jeweiligen Überwiegen der einen oder anderen bestimmt wird.

Von den Vagi ist auch die vorübergehende Apnoe, welche, wie hervorgehoben wurde (siehe S. 113), durch künstliche Überventilation erzeugt werden kann, bis zu einem gewissen Grade abhängig. Sie ist nämlich nur schwer zu erzeugen, wenn die Vagi vorher durchschnitten sind, und wenn man die Vagi während des Bestehens solch einer Apnoe durchschneidet, so setzen sofort tiefe Inspirationen ein. Deshalb hat man auch diese künstliche Apnoe als *Apnoea vagi* oder *A. spuria* zu der echten (*A. vera*), z. B. der fötalen in Gegensatz gestellt und die *Apnoea vagi* als Hemmung des Atemzentrums infolge der starken mechanischen Reizung der Lungenvagi durch die Überventilation aufgefaßt. Aber daß es auch eine echte Apnoe durch Überventilation gibt, bei welcher von solch einem reflektorischen Einfluß des Vagus nicht die Rede sein kann, beweist der vorher (S. 113) geschilderte Überkreuzungsversuch von FREDERICQ. Andererseits stellt sich auch bei forciertester Atmung keine Apnoe ein, wenn man ein Luftgemisch atmet, welches so viel CO₂ enthält, wie etwa der normalen Alveolarspannung entspricht; denn dann kann trotz der Polypnoe die CO₂-Spannung des Blutes nicht unter den Schwellenwert für die Erregung des Atemzentrums heruntersinken (HALDANE und PRIESTLEY).

Der Vagus innerviert auch die *Bronchialmuskeln* und bewirkt bei seiner Erregung Verengung der Luftwege, während der Sympathikus umgekehrt durch Hemmung des Bronchialmuskeltonus die Luftwege erweitert. Ein Übermaß von Kontraktion erzeugt, wie wir schon (S. 110) erfahren, das Bronchialasthma; aus den Innervationsverhältnissen folgt, daß man das Asthma, durch Mittel bekämpfen kann die entweder die Vagusendigungen lähmen, wie z. B. Atropin, oder die Sympathikusendigungen erregen, wie z. B. Adrenalin (s. dazu Kap. 26).

10. Kapitel.

Das Herz.

Anatomie des Herzens: Muskulatur, Reizleitungssystem, Nervensystem 121. Die rhythmische Automatie des Herzens 123. Theorie der Herzstätigkeit 123. Besonderheiten der Reizbarkeit des Herzmuskels 127. Der Spitzenstoß 129. Herzklappen und Herztöne 130. Die Aktionsströme des Herzens und das Elektrokardiogramm 133. Der intrakardiale Druck 134. Die Innervation des Herzens; chrono-, dromo-, ino- und bathmotrope Wirkungen 135. Die Schlagfrequenz des Herzens 137.

Nachdem auf den vorangegangenen Seiten geschildert worden ist, wie die Nahrung eingenommen und von den Verdauungsorganen vorbereitet wird, um durch die Kräfte der Resorption ins Blut befördert zu werden, nachdem wir ferner erfahren haben, wie durch die Lunge noch ein besonderer Nahrungsbestandteil, der Sauerstoff, dem Blute zugeführt wird, wenden wir uns nun zu der Beförderung dieses Blutes, welche dazu dient, Nahrung und Sauerstoff auf die verschiedenen Organe des Körpers zu verteilen.

Wenn irgend eine Kenntnis von den Verrichtungen unseres Körpers schon von der Schule unserem Gedächtnis eingeprägt wird, so ist es wohl die Kenntnis vom Kreislauf, den das Blut beschreibt, und wie dieses Stück Physiologie unseren frühesten Besitz an Wissen von den materiellen Vorgängen in uns ausmacht, so steht dies selbe Stück Wissen auch am Anfang der historischen Entwicklung der Physiologie.

Allbekannt ist das Schema (siehe Abb. 35), in welchem die Lehre vom Blutkreislauf dargestellt wird, so wie sie im Jahre 1628 von WILLIAM HARVEY in seiner berühmten Schrift: „*Exercitatio anatomica de motu cordis et sanguinis in animalibus*“ zusammengefaßt wurde. In dieser Schrift vereinigte der englische Arzt die Beobachtungen VESALS und der italienischen Ärzte des Cinquecento, von welchen er bei seinen Studien in Padua hörte, mit den eigenen anatomischen und physiologischen Erfah-

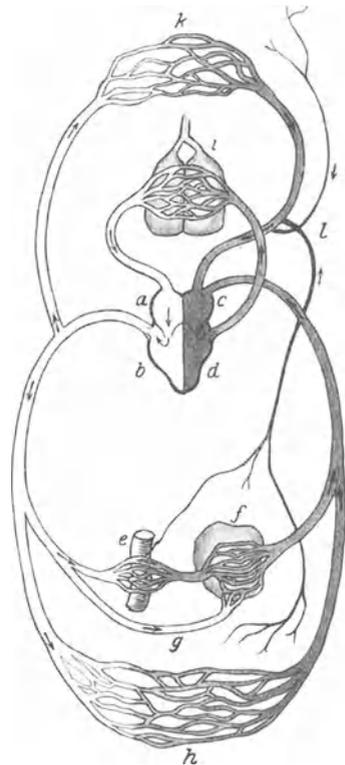


Abb. 35. Schema des Blutkreislaufs nach HARVEY.

a linker Vorhof; b linker Ventrikel; c rechter Vorhof; d rechter Ventrikel; e Verdauungskanal; f Leber; g A. hepatica; h Kapillargebiet der unteren Körperhälfte; i Lunge; k Kapillargebiet der oberen Körperhälfte; l Ductus thoracicus.

rungen zu einem Bild von fast vollendeter Klarheit. So ist denn dieses erste große Ergebnis der Physiologie ein echtes Kind der Renaissance; denn in Italien erwachte zuerst wieder die objektive Betrachtung der Dinge, und Renaissance bedeutet ja keineswegs bloß ein Auflebenlassen des antiquarischen Wissens, sondern dessen tägliche Anwendung auf das wirkliche Leben, das mit neuen Augen angesehen wird; nur dadurch gab das Altertum den Anstoß zur Entdeckung der nahen und fernen Welt, welche sich in jener Zeit vollzog.

Betrachten wir, der historischen und sachlichen Bedeutung der Entdeckung des Kreislaufs entsprechend, ganz kurz die Hauptwendepunkte in der Entwicklung dieser Lehre. Zu Beginn der neuen Zeit fußte man noch auf der alten aristotelischen, nur zum Teil von GALEN überwundenen Lehre, daß die Arterien lufthaltig sind; man ließ das Blut in den in den Organen blind endigenden Venen noch hin und her gehen, ließ es aus der Leber Nahrung schöpfen und diese in der Vena cava inferior und superior den Organen zuführen, und man dachte sich die Scheidewand des Herzens durchlöchert, so daß auch das linke Herz Nahrung empfangen konnte. Anderthalb tausend Jahre hatte man an dieser Anschauung festgehalten bis zur Mitte des 16. Jahrhunderts. Um diese Zeit traten SERVETO und COLOMBO der Galenischen Anschauung von der Porosität der Scheidewand mit Bestimmtheit entgegen und behaupteten, das Blut fließe aus dem rechten Ventrikel durch die Lungen hindurch ins linke Herz, sie lehrten also die Existenz des „kleinen Kreislaufs“. Bald darauf, im Jahre 1571 erkannte CESALPINO auch die Notwendigkeit des „großen Kreislaufs“; er stellte vor allem experimentell fest, daß, wenn man eine Vene unterbindet, nicht das herzwärts gelegene Stück anschwillt, im Gegenteil sich entleert, während umgekehrt das periphere Stück, das mit den Organen verbunden ist, sich mit Blut füllt; daraus zog er genial den Schluß, daß „vasa in capillamenta resoluta“ existieren müßten, durch welche in den Organen Arterien und Venen miteinander anastomosieren. Diesen Schluß erhärtete noch SARPI, indem er auf die Stellung der Venenklappen und ihre Bedeutung für die Strömung des Venenblutes in der einen Richtung zum Herzen verwies. Was dann schließlich HARVEY 1628 in seinem Buch hinzufügte, war eine Reihe exakter Beobachtungen, die kritisch mit dem Vorhandenen zusammengestellt die Existenz des Kreislaufs unwiderleglich und endgültig darlegten. Er stellte am freiliegenden Herzen die Synchronie der Ventrikelzusammenziehung mit dem Puls der Arterien fest, sah die Arterien spritzen, sah bei schwacher Umschnürung des Arms das Blut in den peripheren Teilen der Hautvenen sich stauen, bei starker Umschnürung dagegen den Puls der Arterien verschwinden, er bemerkte, daß die Blutmenge, welche das Herz bei einem einzelnen Schlag austreibt, multipliziert mit der Zahl der Pulse an einem Tag, eine Menge ergibt, welche das Gewicht des ganzen Körpers bei weitem übertrifft, und folgerte daraus, daß offenbar ein und dasselbe Blut mehrmals am Tag das Herz passiere, daß es also durch den Körper zirkuliere. Erst im Jahre 1661 sah MALPIGHI mit dem inzwischen erfundenen Mikroskop die Kapillaren als Verbindungsstücke zwischen den Arterien und Venen und legte damit den Schlußstein an das ganze Gebäude.

Beginnen wir nun unsere Erörterungen über den Kreislauf mit der **Physiologie des Herzens!** Legt man es bei einem Warmblüter bloß, so kann man sehen, wie an den Einmündungsstellen der großen Venen

beginnend die beiden Vorhöfe zu gleicher Zeit sich kontrahieren; dieser „Systole“ der Atrien folgt die gleichfalls synchrone Systole der beiden Ventrikel, während zugleich die Vorhöfe erschlaffen, in „Diastole“ übergehen; daran schließt sich die Diastole der Ventrikel, und nach einer kurzen Pause, der „Herzpause“, beginnt das Spiel von neuem.

Suchen wir nach einem Verständnis für den inneren Mechanismus dieses Spiels, so müssen wir einige Betrachtungen über die *Anatomie des Herzens* vorausschicken. Das Herz besteht im wesentlichen aus einem Synzytium eigenartiger quergestreifter Muskelzellen. Dazu kommt ein Nervennetz aus Ganglienzellen und Nervenfasern; die Ganglienzellen sind zum Teil zu Ganglienknoten gehäuft.

Die *Muskulatur der Vorhöfe* bildet nur eine dünne Schicht, entsprechend der geringfügigen Arbeitsleistung, welche in der Beförderung des Blutes aus den Vorhöfen in die benachbarten diastolisch schlaffen Ventrikel besteht. An den Einmündungsstellen der großen Venen sind die Muskelfaserzüge zirkulär nach Art von Sphinkteren angeordnet. Von den

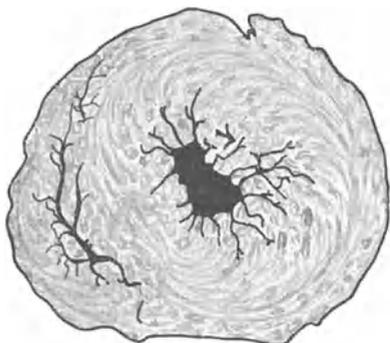


Abb. 36. Querschnitt durch das systolisch kontrahierte Herz (nach KREHL).

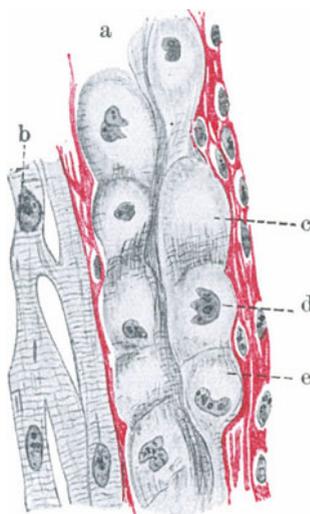


Abb. 37. Zellen aus dem Reizleitungssystem des Hundes (nach TAWARA). a ein PURKINJE'Scher Faden, b gewöhnliche Kammermuskelfasern mit deutlicher Querstreifung, c-e PURKINJE'Sche Zellen.

viel dicker wandigen *Ventrikeln* ist der linke stärker als der rechte; der rechte ist sozusagen nur ein Spaltraum in der rechten Wand des linken Ventrikels (siehe Abb. 36). Das kommt dadurch zustande, daß die Hauptmasse der Muskelzellen zu transversal gerichteten Zügen geordnet ist, welche ringförmig verlaufend teils allein den linken Ventrikel, teils das ganze Herz umspannen, während eigene Ringmuskeln für den rechten Ventrikel nicht vorhanden sind. Der linke Ventrikel ist mit seiner starken Wand der großen Arbeit, das Blut durch den ganzen Körper zu treiben, angepaßt; der rechte hat dagegen das Blut nur durch die Lungen zu befördern. Der Hauptmasse der Zirkulärmuskeln, welche von KREHL als *Triebwerk* des Herzens bezeichnet worden ist, sind außen und innen mehr in Längsrichtung verlaufende Faserzüge aufgelagert. Die Fasern der dünnen Außenschicht entspringen an dem Annulus fibrosus der Atrioventrikulargrenze und ziehen schräg abwärts

zur Herzspitze, bilden dort, sich spiralgig windend, den „Herzwirbel“ und biegen dann größtenteils ins Innere um, um auf der Innenwand der Ventrikel wieder aufwärts zu steigen. Die Fasern der Innenschicht verbreiten sich auf den Trabeculae carnae und auf den Papillarmuskeln, an deren Spitzen sie mit den Sehnenfäden der Atrioventrikularklappen, den Chordae tendineae, verbunden sind; dadurch treten sie in den Dienst der Aktion der Herzklappen.

Auf der Innenfläche des gesamten Herzens breitet sich aber außerdem noch eine besondere Faserung aus, das sogenannte **Reizleitungssystem**. Es gehört genetisch zur Muskulatur, hat aber eine andere Funktion, nämlich die, den einzelnen Herzabschnitten die Erregungen zuzuführen. Das Reizleitungssystem besteht aus plasmareichen Zellen (**PURKINJE**sche Zellen) mit wenigen Muskelfibrillen (siehe Abb. 37), die im Aussehen und auch durch ihren Glykogengehalt an embryonale Muskelzellen erinnern. Die Zellen sind meist zu Reihen geordnet, welche an ihren Enden in die Züge der Muskelfasern übergehen, im übrigen aber durch Bindegewebe von der Muskulatur getrennt sind. An zwei Stellen ist das Reizleitungssystem zu Knoten verdickt, erstens in der Wand des rechten Vorhofes zwischen den Mündungen der Vena cava superior und der Vena cava inferior zum **KEITH-FLACK**schen *Sinusknoten* und zweitens ebenfalls in der Wand des rechten Vorhofs nahe am Septum, dicht oberhalb der Atrioventrikulargrenze zum **ASCHOFF-TAWARA**schen *Atrioventrikularknoten*. Der Sinusknoten versorgt die Vorhofsmuskulatur, er ist außerdem mit dem Atrioventrikularknoten durch das spezifische reizleitende Gewebe verbunden. Vom Atrioventrikularknoten aus geht, durch Bindegewebe gegen die Muskulatur abgesetzt, ein starkes Bündel, das **HIS**sche *Bündel* kammerwärts; es ist die einzige „Muskelbrücke“ zwischen Atrien und Ventrikeln, welche im übrigen durch den Annulus fibrosus voneinander getrennt sind. Das Bündel teilt sich, am unteren Rand der Pars membranacea des Ventrikelseptums verlaufend, in zwei Schenkel, deren Verzweigungen sich auf der Innenseite der beiden Ventrikel netzförmig ausbreiten und dort teils auf der Oberfläche der Trabekeln, teils frei als „falsche Sehnenfäden“ oder „**PURKINJE**sche Fäden“ verlaufen und schließlich mit der Muskulatur in Verbindung treten.

Das **Nervensystem** des Herzens ist ein dichtmaschiges, überallhin ausgebreitetes Nervennetz, in dessen Knoten kleinste Ganglienzellen liegen. Größere Anhäufungen aus größeren Ganglienzellen liegen bei den Säugern meist subperikardial, besonders zwischen den großen Gefäßen und an der Atrioventrikulargrenze. Auch das Reizleitungssystem ist reichlich von Nervenfasern und Ganglienzellen begleitet. Beim Frosch ist ein größeres Ganglion in der Wand des Sinus, der Einmündungsstelle der großen Venen, zu finden, der sogenannte **REMAK**sche *Haufen*; von dort ziehen zwei „Scheidewandnerven“ zu einem Ganglion an der Atrioventrikulargrenze, dem **BIDDER**schen *Haufen*.

Wenden wir uns nun zur Physiologie des Herzens, so knüpft sich unsere erste Frage an eines der eindrucksvollsten Experimente, nämlich die Beobachtung des herausgenommenen Herzens, dessen einzelne Abschnitte sich in der regelrechten Aufeinanderfolge weiter kontrahieren können. Beim Frosch und anderen Kaltblütern braucht man zu dem Zweck nur das Herz möglichst vollständig, d. h. unter Mitnahme der Ansätze der großen Venen herauszupräparieren. Das weit empfindlichere Säugetierherz muß man mit reichlich Sauerstoff versorgen; zu dem Zweck

bindet man eine Kanüle herzwärts in die Aorta des ausgeschnittenen Herzens, und läßt in der der normalen Blutströmung entgegengesetzten Richtung körperwarmer, sauerstoffgesättigte Ringerlösung (siehe S. 79) unter Druck einlaufen; da sich dabei die Aortenklappen von selbst schließen, so fließt die Lösung von den Klappentaschen aus durch die Koronargefäße ins Innere des Herzmuskels (LANGENDORFF). Mit der gleichen Methode glückt es auch, menschliche Herzen, welche auf Eis aufgehoben sind, noch einen Tag nach dem Tod von neuem zu beleben (KULIABKO). *Das Herz ist also ein rhythmisch-automatisches Organ*, wie Magen, Darm, Atemzentrum. So erhebt sich hier, wie dort, die Frage, in was für Elementen der Sitz der automatischen Fähigkeiten zu suchen ist; hier läßt aber das Objekt durch die koordinierte Bewegung, welche seine anatomisch gut abgegrenzten und relativ leicht zugänglichen Abschnitte in einzelnen Phasen ausführen, ganz besonders dazu ein, dieser Frage nachzugehen.

Trennt man beim Frosch durch eine Ligatur oder auch durch Schnitt den Sinus venosus vom übrigen Herzen ab, so bleibt das Herz stehen, während der Sinus unverändert weiter pulsiert (STANNIUS). Nach einiger Zeit fängt dann meist das Herz wieder an zu schlagen, gewöhnlich in verlangsamtem Tempo. Regelmäßiger und rascher als das Froschherz erholt sich das Herz der Schildkröte nach Anlegung der Ligatur. Durch den STANNIUSschen Versuch wird demonstriert, daß der Sinus automatische Fähigkeiten besitzt. Den länger anhaltenden Stillstand des übrigen Herzens kann man dann entweder durch die Annahme deuten, daß das Herz geringere Automatie hat, als der Sinus, und im allgemeinen von diesem aus angeregt wird, oder durch die Annahme, daß durch die Ligatur Hemmungsnerven, welche vom Sinus her ins Herz eintreten, gereizt werden. Die zweite Deutung wird jedoch dadurch widerlegt, daß, wenn man die Hauptnervenverbindungen (Scheidewandnerven) zwischen Sinus und Herz für sich abbindet und auch noch die Atrienwände teilweise durchschneidet, die Kammern dennoch fortfahren zu schlagen, solange sie noch eine Brücke mit dem Sinus verbindet (F. B. HOFMANN). *Das ganze Herz hat demnach ein gewisses Maß von Automatie*, und wie das ganze Herz, so haben auch seine einzelnen Teile die automatischen Fähigkeiten, wenn auch geringere, als der Sinus. So können einzelne Stücke der zerschnittenen Ventrikel noch rhythmisch schlagen, ebenso der Bulbus aortae; bei Säugern, Reptilien und Fischen pulsiert auch noch die abgeschnittene Herzspitze (ENGELMANN, PORTER).

Es sieht also so aus, als ob beim Froschherz *der Sinus „führender Teil“* ist, als ob er am leichtesten rhythmisch schlägt und seinen Rhythmus dem übrigen Herzen aufzwingt, und dies läßt sich auch direkt beweisen. Wenn man den Sinus isoliert erwärmt, so steigt die Schlagfrequenz des Herzens; wenn man ihn abkühlt, so sinkt sie; ändert man dagegen auf dieselbe Weise die Temperatur des Ventrikels, so ändert sich allenfalls dadurch seine Kontraktionshöhe, aber nicht das Tempo. Ähnlich verhält sich das Säugetierherz. GANTER und ZAHN haben das schlagende Herz von außen mit einer „Thermode“ abgekühlt, d. h. mit einem kleinen Zapfen aus Metall, den sie gegen die Herzwand andrückten, und durch welchen warmes oder kaltes Wasser hindurchgeleitet werden konnte; es ergab sich, daß allein von einem schmalen Streifen des rechten Vorhofs zwischen den Einmündungsstellen der Hohlvenen, also an einer dem Sinus des Froschherzens ungefähr entsprechenden Partie das Tempo beschleunigt oder verlangsamt werden konnte. Unter genau derselben Stelle liegt

aber hier der KEITH-FLACKSche Sinusknoten. Daraus wird man den Schluß ziehen, daß *an diesem Ursprungsort des reizleitenden Gewebes wohl in erster Linie die rhythmischen Erregungen produziert werden, und daß von hier aus durch das daran anschließende Reizleitungssystem das übrige Herz seine Anregung erhält.* In der Tat läßt sich für diese Doppelfunktion des Reizleitungssystems eine Reihe von Gründen anführen.

Wenn man an der Atrioventrikulargrenze, am besten von den eröffneten Vorhöfen aus, durch Einstich schmale Verletzungen erzeugt, so tritt allein für den Fall, daß dabei das Hissche Bündel getroffen wird, eine Alteration in der Tätigkeit des Herzens ein: die Koordination wird zerstört, die Vorhöfe schlagen zwar im alten Tempo weiter, aber die Ventrikel schlagen langsamer und völlig unabhängig von den Vorhöfen (HIS, H. E. HERING); man bezeichnet die Störung als *Allo-rhythmie*, als *Dissoziation* oder auch als *Herzblock*. Die normale Über-

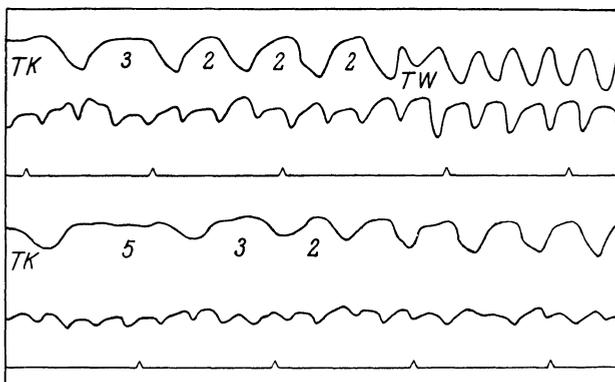


Abb. 38. Überleitungsstörungen bei Einwirkung von Thermoden auf den Atrioventrikularknoten des Kaninchenherzens (nach GANTER und ZAHN).

Oben Ventrikelkurve, unten Vorhofskurve.

T K Kühlung, T W Erwärmung in der Gegend des Tawaraknotens.

Die Zahlen bedeuten die Anzahl Atrienschläge, welche einem Ventrikelschlag entsprechen.

leitung von dem rechten Atrium zu den Ventrikeln, welche offenbar auf dem Weg des Hisschen Bündels erfolgte, ist also aufgehoben, und nun manifestieren die Ventrikel ihre eigenen unabhängigen, aber geringfügigeren automatischen Fähigkeiten. In reversibler Weise läßt sich die Überleitungsstörung erzeugen, wenn man vom rechten Vorhof aus gegen den Ort des Hisschen Bündels abwechselnd eine kalte und eine warme Thermode andrückt. Man erhält dann Herzaktionen, wie sie etwa in den Kurven der Abb. 38 dargestellt sind (GANTER und ZAHN).

Schaltet man den Sinusknoten irgendwie, etwa durch eine Kälthermode aus, so schlägt von nun ab das Herz allein vermöge der Automatie, welche Atrien und Ventrikel besitzen; die Anregung geht dabei vom Atrioventrikularknoten aus. Denn tastet man jetzt das Innere des Vorhofes mit einer zweiten Thermode ab, so bekommt man Rhythmusänderungen allein bei Reizung im rechten Vorhof an der Stelle des ASCHOFF-TAWARASchen Knotens. Ferner schlägt gleich nach der Ausschaltung des Sinusknotens die normale Herztätigkeit in den sogenannten *atrioventrikulären Rhythmus* um, d. h. Vorhöfe und Kammern schlagen nicht

mehr nacheinander, sondern synchron, oder die Ventrikel schlagen sogar vor den Vorhöfen (siehe Abb. 39); reizt man nach der Ausschaltung des Sinusknotens den Atrioventrikularknoten mit einer warmen Thermode mehr oben, so kommt es zu der synchronen Tätigkeit, reizt man ihn mehr unten, so kehrt sich die normale Schlagfolge um, die Kammern beginnen und die Vorhöfe folgen.

Die Leitungsfunktion des Reizleitungssystems kommt des ferneren auch darin zum Ausdruck, daß die Papillarmuskeln, an welche ja die Ausläufer der beiden Schenkel des Hischen Bündels zunächst herantreten, sich schon kurze Zeit vor den Ventrikeln kontrahieren.

Aus all dem folgt, daß die Herztätigkeit offenbar nicht „neurogener“ Natur ist, so wie man sowohl im Hinblick auf die Nervenversorgung, als auch nach Analogie mit den rhythmisch automatischen Funktionen des Darmes (siehe S. 54) und des Atemzentrums (siehe S. 111) zunächst annehmen sollte. Sie ist aber auch nicht „myogener“ Natur. Zugunsten der einen und anderen Seite dieser heiß umstrittenen Alternative ist eine große Zahl von Beobachtungen ins Feld geführt worden; einige derselben seien hier noch zur Erläuterung des bisher Gesagten angeführt!

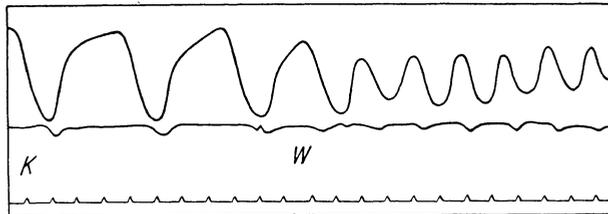


Abb. 39. Wirkung einer Thermode auf den Sinusknoten des Affenherzens (nach GANTER und ZAHN).

Oben Ventrikelkurve, unten Vorhofskurve.

K Kältewirkung; deutlicher atrioventrikulärer Rhythmus. W Wärmewirkung; normale Schlagfolge.

Schneidet man aus dem Froschherzen nach Möglichkeit die nervösen Elemente heraus, wie den REMAKSchen und BIDDERSchen Haufen und die mit Ganglienzellen besetzten Scheidewandnerven, so ist dies ohne Einfluß auf die Aktion (F. B. HOFMANN). Natürlich spricht das dagegen, daß die Impulse für die Herzaktion von den Ganglienzellen ausgesendet werden. Diesen kommt nur die Funktion zu, Einflüsse von seiten des Zentralnervensystems durch von außen herantretende Nerven dem Herzmuskel zu übermitteln (siehe S. 135). Andererseits beweist der Versuch aber nicht, daß die eigentlichen Herzmuskelzellen Automatie besitzen.

Zugunsten der myogenen Theorie ist früher oft angeführt, daß die isolierte Herzspitze und manche andere abgeschnittene Teile des Herzens vom Frosch oder von Säugetieren unter bestimmten Bedingungen rhythmisch schlagen, obwohl sie frei von Ganglienzellen seien; BETHE hat aber gezeigt, daß das mit sehr kleinen Ganglienzellen durchsetzte Nervennetz sich auf sämtliche Herzabschnitte erstreckt.

Ein besonders starkes Argument in der gleichen Richtung wird von manchen in der Beobachtung von HIS erblickt, daß das embryonale Herz vom Hühnchen schon zu einer Zeit pulsiert, wo Nerven Elemente vom Medullarrohr aus noch gar nicht in das Herz eingewachsen sind. Aber man kann dagegen einwenden, daß embryonales Gewebe andere Eigenschaften haben kann, als das ausgewachsene; die embryonalen Herz-

zellen weichen ja auch histologisch von den Herzmuskelzellen ab, sie haben noch keine Querstreifung und können vielleicht eher mit den Zellen des Reizleitungssystems verglichen werden und darum automatisch-rhythmische Fähigkeiten besitzen. Man weiß aber auch noch nicht, ob nicht das Nervennetz im Herzen peripheren Ursprungs ist; denn nur von den großen Ganglienzellen ist bekannt, daß sie bei der Entwicklung von außen ins Herz einwandern.

Zugunsten der neurogenen Lehre ist besonders auf das Herz eines Tieres verwiesen worden, bei welchem der neurogene Charakter seiner Aktion in der Tat nicht in Zweifel gezogen werden kann; das ist das Herz der Arachnoide *Limulus polyphemus*. Im Gegensatz zu den Wirbeltierherzen, von welchen jedes kleinste Stück von dem Nervennetz durchsetzt ist, liegt hier ein großes Ganglion neben dem Muskelschlauch und entsendet zu ihm, ähnlich wie zu einem Skelettmuskel, mehrere Nervenfasern. CARLSON hat nun gezeigt, daß hier das Ganglion in jeder Hinsicht die Führung des Herzens hat. Durchschneidet man die Nervenfasern, so erlischt die Tätigkeit; reizt man einen Faden, so kontrahiert sich das zugehörige Herzsegment. Zerschneidet man das Herz in mehrere Stücke, so wird die koordinierte, peristaltische Aktion nicht alteriert, solange nur das Ganglion intakt bleibt; das Verhalten erinnert also etwa an den nervösen Schluckmechanismus (siehe S. 27). Nur wenn man das Ganglion erwärmt, steigt die Frequenz; Erwärmung des Herzschlauchs selber ist ohne Einfluß. Verweist man aber auf all das zugunsten einer allgemeinen neurogenen Theorie der Herztätigkeit, indem man betont, daß hier, wo einmal eine scharfe Trennung zwischen nervösen und muskulösen Elementen einwandfreie Experimentierbedingungen bietet, die Herrschaft der nervösen Substanz sich deutlich manifestiert, so bildet nicht bloß der Abstand in den biologischen Eigenschaften von Wirbellosen und Wirbeltieren einen Einwand gegen die Generalisierung, sondern auch die Beobachtung von P. HOFFMANN, daß der Herzmuskel von *Limulus* tetanisierbar ist wie ein Skelettmuskel, während es, wie wir gleich sehen werden, einen Tetanus beim Wirbeltierherzen nicht gibt.

Die vergleichend-physiologische Forschung hat noch ein zweites Analogon zum Wirbeltierherzen kennen gelehrt, die *Meduse*, die physiologisch dem Herzen so weitgehend ähnlich ist, daß man sie mit Recht als *ein frei im Meer umherschwimmendes schlagendes Herz* bezeichnet hat. Diese Ähnlichkeit äußert die Meduse, abgesehen von ihrer rhythmischen Automatie, z. B. darin, daß sie alle dieselben Besonderheiten in ihrer Reizbarkeit besitzt, welche wir für das Herz alsbald kennen lernen werden. Auch der Schlag der Meduse ist nun durchaus neurogener Natur. Entfernt man den Nervenring mit den Randkörpern, welche im Schirmrand der Meduse gelegen sind und ihr Zentralnervensystem repräsentieren, so hört das rhythmische Pulsieren auf; ferner kommen alle diejenigen Rhythmusstörungen, welche man künstlich dadurch erzeugen kann, daß man die Konzentrationen der einzelnen Salze des Meerwassers ändert (s. S. 128), nur von den Randkörpern aus und nicht durch direkte Wirkung auf die Muskulatur zustande (BETHÉ).

Aber auch hier muß man doch wieder sagen, daß man das klare Verhalten bei den Medusen immerhin nicht als einen Beweis für die neurogene Natur der Tätigkeit auch des Wirbeltierherzens ersehen kann. Denn es bleibt eben die Tatsache bestehen, daß *die Automatie beim Wirbeltierherzen irgendwie an ein besonderes, bei keinem anderen Organ*

bisher gefundenes Gewebe, das Reizleitungssystem, gebunden ist. Freilich ist auch dies System mit Nervenfasern und Ganglienzellen reichlich durchsetzt, aber das gilt, wie wir (S. 122) sahen, auch für alle übrigen Abschnitte des Herzens.

Die Eigenschaften des Reizleitungssystems bedingen wohl auch den zeitlichen Ablauf eines ganzen Herzschlags. Dieser besteht ja darin, daß zuerst die Vorhöfe sich synchron kontrahieren und danach nach einer kleinen Pause die Ventrikel. Dies dürfte so zustande kommen, daß die Erregung sich im Reizleitungssystem nur langsam, in der Herzmuskulatur bzw. dem Nervenetz dagegen rasch ausbreitet. Die langsame Fortleitung der Erregung vom rechten Vorhof auf die Ventrikel verursacht die Pause zwischen Atrien- und Ventrikelsystole, die rasche Ausbreitung in den Wänden bedingt die praktisch gleichzeitige Aktion sämtlicher Teile der Ätrien und der Ventrikel.

Wenn man den Versuch macht, dem Herzen außer den Erregungen, welche ihm von Natur von seinen automatiebegabten Teilen her zufließen, noch künstliche Erregungen zuzuführen, oder wenn man versucht, es künstlich wieder in Tätigkeit zu versetzen, nachdem es etwa durch Ausschaltung des Sinus zum Stillstand gekommen ist, so stößt man auf eigenartige Verhältnisse in der Reizbarkeit des Herzmuskels. Erstens spricht er auf den Reiz, mag es sich um einen mechanischen oder elektrischen oder sonst einen Reiz handeln, viel langsamer an, als ein gewöhnlicher quergestreifter Muskel, d. h. die Zeit, die zwischen Reiz und Re-

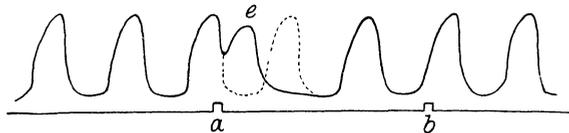


Abb. 40. Extrasystole und kompensatorische Pause.

Bei a Extrareiz in der Diastole; ihm folgt eine Extrakontraktion e, danach eine kompensatorische Pause. Bei b Extrareiz zu Beginn der Systole, also im Refraktärstadium.

aktion verstreicht, die *Latenzzeit*, ist größer und die Verkürzung bis zum Maximum wird weniger schnell erreicht. Eine zweite Eigenart besteht darin, daß, während ein Skelettmuskel auf einen an der Schwelle der Wirksamkeit befindlichen Reiz mit einer minimalen Zuckung antwortet und bei kontinuierlich gesteigerter Reizstärke kontinuierlich bis zu einem Maximum anwachsende Kontraktionen ausführt, das Herz schon bei Schwellenreizen mit maximaler Verkürzung reagiert; *die Zuckungshöhe ist hier unabhängig von der Reizstärke* stets maximal, es gilt, wie es BOWDITCH genannt hat, das „Alles- oder -Nichts-Gesetz“. Daraus folgt als dritte Besonderheit das Vorhandensein eines *Refraktärstadiums*. Wenn man auf einen Skelettmuskel zu irgend einer Zeit, während er sich auf einen Reiz verkürzt oder während er sich verlängert, einen zweiten Reiz ausübt, so beginnt er sofort mit einer neuen Kontraktion, welche sich auf die erste superponiert (siehe Kapitel 20). Anders der Herzmuskel! Er verhält sich während der ganzen Systole refraktär und gewinnt erst während der Diastole mehr und mehr die frühere Erregbarkeit zurück. Vielleicht hängt das mit seiner eben genannten Eigentümlichkeit zusammen, sich stets ad maximum zu kontrahieren, also seine ganze disponible Energie auf einmal auszugeben. (Ein freilich außerordentlich kurzes Refraktärstadium gibt es auch bei gewöhnlichen Muskeln und Nerven.) Reizt man dagegen das Herz in der Diastole, so antwortet es darauf mit einer „*Extrasystole*“, d. h. beim spontan

schlagenden Herzen wird in das regelmäßige, vom Sinus herrührende Tempo eine Extrakontraktion eingeschaltet. Darauf folgt aber eine *kompensatorische Pause*, welche die gewöhnliche Herzpause (siehe S. 121) an Länge überdauert (siehe Abb. 40). Ihr Zustandekommen ist wohl so zu erklären, daß, wenn nach der Extrasystole vom Sinus der dem normalen Rhythmus angehörige nächste Impuls abgesandt wird, das Herz sich noch von der Extrasystole her im Refraktärstadium befindet, so daß die Antwort auf diesen Impuls ausfällt, und erst der nächste wieder wirksam wird. Daher gilt das „Gesetz der Erhaltung der physiologischen Reizperiode“ (ENGELMANN), die erste Kontraktion nach der Extrasystole tritt im selben Zeitmoment ein, wo sie auch ohne die Extrasystole zustande gekommen wäre, nicht früher. Die erste Systole nach der Extrasystole ist häufig höher als die übrigen. Das ist ein Ausdruck für das allgemeine Gesetz, daß die Herzkontraktionen um so ausgiebiger sind, je langsamer das Tempo; „fliegende Pulse“ sind meistens klein, der langsame Puls groß. Extrasystole und kompensatorische Pause spielen auch klinisch eine wichtige Rolle, da durch Krankheitsherde im Herzmuskel sowie durch Widerstände im Kreislauf Extrareize ausgeübt werden. Aus der Existenz eines Refraktärstadiums folgt wohl endlich auch, daß, wie schon gesagt, im Gegensatz zum Skelettmuskel *der Herzmuskel nicht tetanisierbar* ist. Der rhythmischen Erregung vom Sinus her entspricht eben ein rhythmisches Refraktärsein, so daß das Herz auf die frequenten elektrischen Reize, welche sonst zum Tetanus führen, nur jeweils in den Intervallen der Beanspruchbarkeit antwortet; so entsteht an Stelle der tetanischen Dauerkontraktionen nur ein „Wühlen“ oder „Wogen“. Aus demselben Grund antwortet das Herz auf Dauererregungen mit mehr oder weniger regelmäßigen rhythmischen Kontraktionen; solche Erregungen können etwa durch Auflegen eines Kochsalzkristalls aufs Herz oder durch Durchleiten eines galvanischen Stroms hervorgerufen werden.

Für alle diese typischen Reaktionen ist Vorbedingung die Erhaltung normaler Ernährungsverhältnisse. Dazu gehört bei ausgeschnittenen Herzen, vor allem bei Säugetierherzen, Zufuhr von Sauerstoff und Durchspülung mit einer indifferenten Lösung, welche die Stoffwechselprodukte entfernt; nicht notwendig ist dagegen die Zufuhr von organischen Nahrungsstoffen, da der Herzmuskel gewöhnlich genügende Reserven enthält. *Eine indifferente Lösung, welche die Erregbarkeit konservieren soll, muß gewisse Salze in bestimmten Konzentrationen enthalten.* In einer reinen isotonischen Kochsalzlösung erschöpft sich das Herz in kurzer Zeit; auch hierin unterscheidet es sich vom Skelettmuskel, welcher zwar auch in physiologischer Kochsalzlösung abnorm wird, insofern als er auch ungereizt fortwährend „fibrilläre Zuckungen“ ausführt; aber er bleibt doch immerhin lange Zeit erregbar. Das durch Kochsalzlösung gelähmte Herz wird erst wieder fähig zu schlagen, wenn einige hundertstel Prozent Kalziumchlorid zugesetzt werden. Aber in dieser NaCl-CaCl₂-Lösung schlägt das Herz verlangsamt, die Systolen sind tetanusartig (s. Kap. 20) verlängert, und in der Diastole erschläfft das Herz nicht vollständig; nach einiger Zeit wird der Schlag unregelmäßig und dann bleibt das Herz stehen. Setzt man aber außer CaCl₂ noch einige hundertstel Prozent KCl hinzu, so wird die Herzaktion wieder normal. So ist also die früher (S. 79) erwähnte *Ringerlösung* von der Zusammensetzung 0,65% NaCl (für den Frosch) oder 0,95% (für das Säugetier)

+ 0,02% KCl + 0,02% CaCl₂ geeignet, die Herzaktion für längere Zeit zu konservieren. Läßt man aus der Ringerlösung das Ca weg, so steigt die Schlagfrequenz zunächst, das Herz erlahmt aber bald; das in reiner NaCl-Lösung zum Stillstand gekommene Herz kann durch K nicht wieder zur Tätigkeit erweckt werden. Das Herz nimmt übrigens in seinem Salzbedarf keine Sonderstellung gegenüber allen anderen Organen ein; auch das Zentralnervensystem büßt seine Reflexfunktionen ein, wenn es mit reiner Kochsalzlösung durchspült wird, die „indirekte“ Erregung des Muskels vom Nerven aus, die Automatie des Darmes, der der Herzaktion in vieler Hinsicht ähnliche Schlag der Medusen geht in Abwesenheit von Kalzium verloren. In allen diesen Fällen handelt es sich um Systeme, in denen Nerven mit Nerven oder Nerven mit Muskeln funktionell verbunden sind, und man neigt dazu, den Verlust

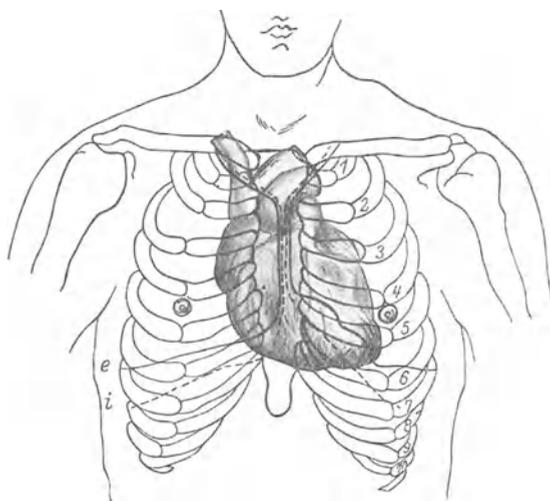


Abb. 41. Lagerung des Herzens im Thorax.

Die Lungengrenzen auf der Höhe der Inspiration (i) und der Expiration (e) sind mit eingezeichnet.

der Funktionsfähigkeit bei Kalziummangel auf die Lösung einer die verschiedenen Systemkomponenten verbindenden Kittsubstanz zurückzuführen. Das würde, aufs Herz übertragen, bedeuten, daß der Kontakt zwischen Reizleitungssystem und Herzmuskel durch Wegnahme des Kalziums gelockert wird.

Bisher hatten wir es mit Beobachtungen am ausgeschnittenen Herzen zu tun. Wenden wir uns nun dem Verhalten des Herzens in situ zu, so wie es, in den Thorax eingeschlossen, agiert. Diese Tätigkeit manifestiert sich nach außen in verschiedener Art, nämlich vor allem durch den Spitzenstoß, die Herztöne und die Aktionsströme.

Der **Herzspitzenstoß** besteht in einer fühlbaren und oft auch sichtbaren kurzen lokalen Erschütterung der Thoraxwand, beim Erwachsenen meist im fünften linken Interkostalraum, etwas einwärts von der Mamillarlinie, d. h. der durch die Mamilla gezogenen Senkrechten. Daß es die Herzspitze ist, welche gegen die Thoraxwand anpocht, ergibt die Thoraxtopographie (siehe Abb. 41). Man fühlt den Spitzenstoß

fast gleichzeitig mit dem Puls der Karotis oder der Radialis; daraus ist zu folgern, daß der Spitzenstoß von der Systole der Ventrikel herrührt. Dies könnte unerwartet erscheinen, weil man sich unter der Systole zunächst eine Verkürzung des Herzens in der Längsachse, also ein Abrücken von der Thoraxwand, vorstellen wird; die Lageverhältnisse bedingen aber gerade das Gegenteil. Wieviel auf die Lagerung ankommt, zeigt z. B. folgender Versuch: legt man ein ausgeschnittenes Froschherz, die Längsachse horizontal gerichtet, auf eine Unterlage, so verkürzt sich die Achse, wenn es, etwa infolge eines Druckes, aus der Diastole in Systole übergeht (siehe Abb. 42B); liegt es aber auf seiner Basis, die Spitze nach oben gerichtet, so verlängert sich systolisch die Achse

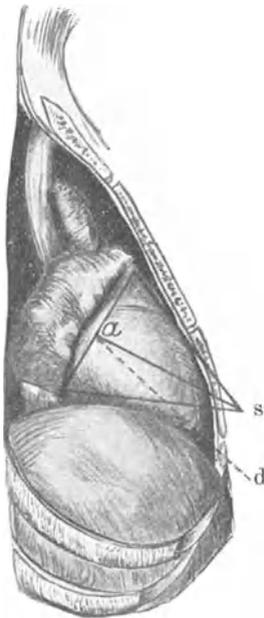


Abb. 43. Zur Theorie des Spitzenstoßes.

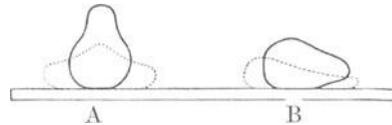


Abb. 42. Verhalten der Herzachse beim Übergang von Diastole in Systole, schematisch (nach NICOLAI).

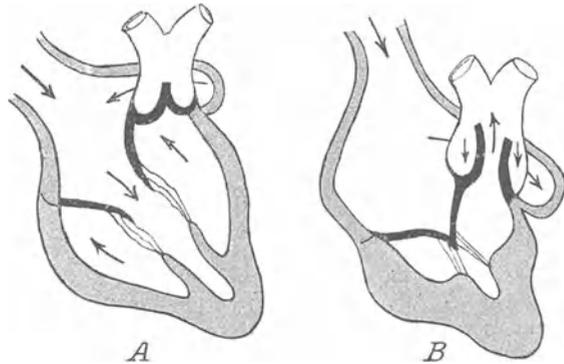


Abb. 44. Schema für die Bewegungen der Herzklappen (nach LANDOIS).
A Atriensystole und Ventrikeldiastole. B Ventrikelsystole und Atriendiastole.

(A). Daß beruht darauf, daß das Herz systolisch-hart zwar eine bestimmte Gestalt hat, diastolisch-weich aber je nach der Unterlage ganz verschieden geformt ist. Im Thorax liegt nun das Herz fast horizontal auf dem Zwerchfell und schmiegt sich in der Diastole ganz passiv der Umgebung an; es hat dabei eine elliptische Basis und schräg abwärts geneigte Längsachse (siehe Abb. 43ad). Bei der Systole rundet sich dann die Basis ab, und die Achse erfährt zwar eine Verkürzung, aber infolge der Lagerung und der Aufhängung an den großen Gefäßen zugleich auch eine Drehung (as), welche die Spitze gegen die Thoraxwand andrängt (C. LUDWIG). Daß der Spitzenstoß dabei in der Rückenlage gewöhnlich deutlicher zu spüren ist, als beim Aufrechtstehen, macht die genannte Beobachtung am Froschherzen ohne weiteres verständlich.

Die **Herztöne** sind zwei zu jedem einzelnen Herzschlag zugehörige leise Geräusche, welche an der Thoraxwand direkt mit dem Ohr oder

mit Hilfe eines „Stethoskops“ zu hören sind. Sie hängen mehr oder weniger mit der Bewegung der **Herzklappen** zusammen (siehe Abb. 44). Wenn durch die Atriensystole das Blut in die Ventrikel geworfen wird (A), so flottieren die Zipfel der *Atrioventrikularklappen* in dem in Wirbelbewegung befindlichen Blut, an ihren Rändern durch die Sehnenfäden gehalten, welche von den Papillarmuskeln entspringen. Folgt nun die Ventrikelsystole (B), während die Atrien erschlaffen, so staut sich das Blut hinter den Klappensegeln, ihre Ränder legen sich aneinander und verschließen die Atrioventrikularostien. Dabei müßten die Segel trotz der Sehnenfäden in die Atrien durchschlagen, da ja die Herzspitze, gegen welche die Sehnenfäden hinziehen, sich der Herzbasis annähert, wenn nicht die Verkürzung der Papillarmuskeln, an welche die Fäden unmittelbar inserieren, diese Annäherung kompensieren würde. Gesichert wird der Klappenschluß dann noch dadurch, daß von je einem Papillarmuskel Sehnenfäden zu den einander gegenüberliegenden Rändern zweier Segel hinlaufen.

Mit dem Einsetzen der Ventrikelsystole wird das Blut ferner gegen die *Semilunarklappen* angedrängt, welche am Ausgang in die Aorta und in die Arteria pulmonalis stehen, und welche in der Diastole der Ventrikel durch den Blutdruck innerhalb der Arterien geschlossen sind. Sobald nun der Druck von seiten der Ventrikel überwiegt, öffnen sich die Semilunarklappen, und das Blut wird ausgetrieben. Hierbei „stellen“ sich die Klappen infolge der Wirbelung im Blut, um sofort die arteriellen Ostien zu schließen, sobald ziemlich brüsk die Ventrikeldiastole einsetzt.

So garantieren also die sich im Druckgefälle bewegendenden Klappenventile die Blutströmung durchs Herz in der einen normalen Richtung. Nur an den Mündungen der großen Venen ins Herz könnte das Blut sich rückwärts stauen; aber erstens begünstigt der bei der Atriensystole herrschende niedrige Druck in den Ventrikeln (siehe S. 135) das Einfließen hierhin, zweitens befinden sich in den Venen, wenn auch nicht an ihrer Einmündung ins Herz, so doch weiter rückwärts Klappen, welche die Blutströmung herzwärts richten (siehe Kap. 11), und drittens bilden einen gewissen Ersatz für Klappen die vorher (S. 121) genannten sphinkterartigen Zirkulärmuskeln, welche an den venösen Ostien der Atrien vorhanden sind.

Macht man sich so den Sinn der Herzklappen klar, so versteht man auch ohne weiteres die große Gefahr der „Klappenfehler“, welche im Gefolge von Herzerkrankungen zustande kommen; man begreift, daß z. B. bei einer Undichtigkeit der Valvula mitralis die Lungenzirkulation leidet und Dyspnoe sich einstellt, man begreift, wie sich bei einer Undichtigkeit der Valvula tricuspidalis das Blut in den Venen des großen Kreislaufs stauen muß, und wie infolgedessen Anschwellungen („Ödeme“) der Gliedmaßen auftreten, u. a.

Von dieser Funktion der Herzklappen sind nun auch die **Herztöne** abhängig. Man unterscheidet bei jeder Herzperiode einen *ersten oder systolischen* und einen *zweiten oder diastolischen Herzton*; der erste ist etwas dumpfer und von etwas längerer Dauer als der zweite. Der erste Herzton ist „Muskelton“, der zweite „Klappenton“. Wenn man nämlich ein ausgeschnittenes blutleeres schlagendes Herz behorcht, so hört man noch den ersten Ton, wenn auch abgeschwächt, aber nicht mehr den zweiten; auch wenn man bei dem in situ befindlichen Herzen die Atrioventrikularklappen durch ein von der V. jugularis oder von der

Art. carotis aus vorgeschobenes Häkchen auseinanderhält, vernimmt man noch den ersten Ton (LUDWIG und DOGIEL, KREHL). Ungeschwächt hört man den ersten Ton, wenn man das Herz — am besten im Moment der Füllung der Ventrikel — an der Herzbasis abschnürt, obwohl die Klappen dadurch außer Funktion gesetzt werden (W. R. HESS). Der erste Ton kommt dadurch zustande, daß nach der systolischen Abrundung der Ventrikel die weitere Verkürzung der Muskelfasern, die sich um den flüssigen Inhalt herum anspannen, jäh unterbrochen wird, bis die Spannung groß genug geworden ist, den Inhalt unter Sprengung der Semilunarklappen auszutreiben. Diese abrupte Bremsung der Kontraktion führt zu den Schwingungen, die den ersten Ton ausmachen. Der Schluß der Atrioventrikularklappen vollzieht sich schon vorher anscheinend vollkommen lautlos in einem Zeitmoment, in dem die Ventrikelwände noch nicht gespannt, also wenig geeignet sind, Schwingungen auf die Umgebung zu übertragen (W. R. HESS). Der zweite Ton hängt dagegen, wie aus den angeführten Versuchen bereits hervorgeht, von der Klappenfunktion ab. Wenn nämlich die Klappenwände

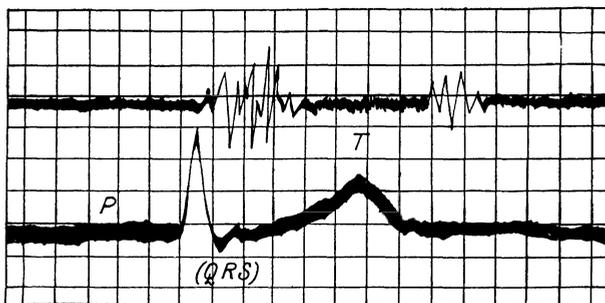


Abb. 45. Kardiophonogramm nach EINTHOVEN.
Darunter normales Elektrokardiogramm.

plötzlich gespannt werden, so wie es zum Schluß der Ventrikelsystole mit den Semilunarklappen geschieht, so entsteht ein klappendes Geräusch, gerade so, wie wenn der Wind plötzlich ein Segel spannt.

Die Herztöne sind, wie gesagt, wenig ins Ohr fallende Geräusche; trotzdem ist es für den Arzt notwendig, pathologische Veränderungen derselben möglichst sicher zu diagnostizieren. Besonders anatomische Veränderungen an den Klappen, welche durch Krankheiten hervorgerufen werden können, z. B. Verwachsungen oder Schrumpfungen, gehen wohlverständlicherweise mit Änderungen der Herztöne einher. Der geübte Arzt vermag auf Grund der „Auskultation“ des Herzens genau den Sitz und die Art der Veränderung anzugeben. Aber weil eben die Methode große Übung voraussetzt, so strebt man mit Recht danach, die Auskultation durch die objektive Registrierung der Herztöne zu ersetzen. Zu diesem Zweck wird z. B. ein Schalltrichter über dem Herzen auf die Brust aufgesetzt und durch einen Schlauch mit einem Mikrophon verbunden; die Schwankungen des hindurchgehenden elektrischen Stromes, welche von den Schwingungen der Thoraxwand hervorgerufen werden, können alsdann von einem empfindlichen und mit möglichst wenig Trägheit reagierenden Galvanometer angezeigt und

eventuell photographisch registriert werden (EINTHOVEN, O. WEISS); Abb. 45 gibt ein Beispiel eines „Kardiophonogramms“.

Ein für solche Aufzeichnungen geeignetes Instrument ist das *Saitengalvanometer* von EINTHOVEN (Abb. 46). Es besteht aus einem versilberten Quarzfaden *a* *b*, der durch das Feld eines starken Magneten oder Elektromagneten hindurchläuft. Fließt durch die gespannte „Saite“ ein Strom, so bewegt sie sich je nach der Stromrichtung nach rechts oder links. Die Magnetpole sind durchbohrt, so daß man die Saitenbewegung mit Hilfe eines Mikroskops beobachten oder besser auf einen rotierenden Film projizieren kann.

Die Tätigkeit des im Innern des Thorax eingeschlossenen Herzens macht sich ferner nach außen in den **Aktionsströmen** geltend. Es wurde schon einmal hervorgehoben (S. 118), daß die Erregung eines jeden Organs von elektrischen „Aktionsströmen“ begleitet ist. Man weist sie im allgemeinen so nach, daß man unmittelbar an das Organ Elektroden anlegt, welche zum stromanzeigenden Instrument hinführen. Aber wenn das betreffende Organ von anderen Geweben umhüllt ist, so kann man auch von den Stromschleifen, welche die Umgebung durchsetzen, ableiten. So verfährt man beim Herzen. Gewöhnlich gibt man einem Menschen einfach die Elektroden in die Hand und verbindet sie mit einem Saitengalvanometer. Diese Anordnung

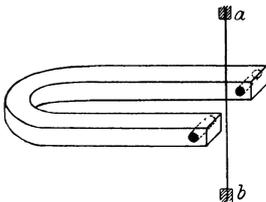


Abb. 46. Schema eines Saitengalvanometers.

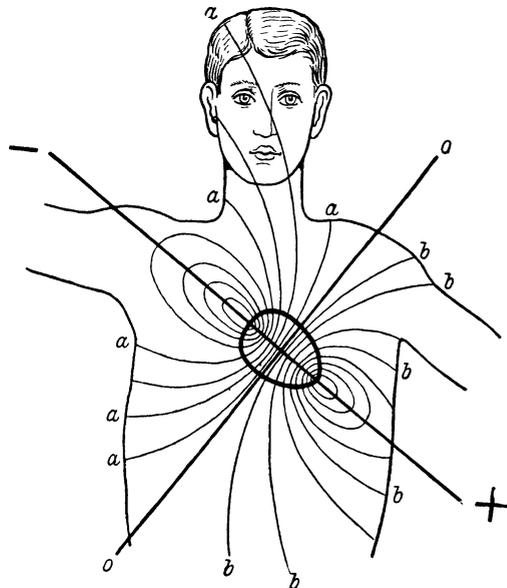


Abb. 47. Verteilung der von der Herzaktion herrührenden elektrischen Spannungen im Körper (nach WALLER).

würde ergebnislos sein, wenn das Herz symmetrisch zur Medianebene des Körpers läge; aber da es asymmetrisch gelagert ist, so verteilen sich die Spannungen, welche durch die Aktion entwickelt werden, so wie es in Abb. 47 dargestellt ist. Der rechte Arm entspricht also der Herzbasis, der linke der Herzspitze; beide verhalten sich, synchron mit der Herzaktion, bald positiv und bald negativ (s. Kap. 20 u. 21).

Registriert man die Aktionsströme, indem man die Bewegungen der Saite im Saitengalvanometer auf einem bewegten photographischen Papier aufnimmt, so erhält man ein „*Elektrokardiogramm*“. Das Elektrokardiogramm des Menschen ist eine komplizierte Kurve (siehe Abb. 48), auf welcher nach EINTHOVEN mehrere Zacken (P-T) charakteristisch sind. Die zeitliche Beziehung zu den Herztönen ist aus der Abb. 45 zu ersehen. Die Deutung der Kurve, über welche viel diskutiert worden

ist, ist noch strittig; sicher gehört die P-Zacke der Vorhofssystole an, die Zacken Q-T entsprechen der Ventrikelsystole. Für die Ausnützung zu klinischen Zwecken genügt es, daß die Kurve des normalen Herzens einen typischen Verlauf hat. In pathologischen Verhältnissen kommen mannigfache Abweichungen vor; so zeigt die Abb. 49 das Bild einer in die normale Rhythmik hineinfallenden Extrasystole.

Eine weitere Vertiefung der Kenntnisse von der Herztätigkeit ist durch vivisektorische Eingriffe zu erlangen. So sind vor allem die

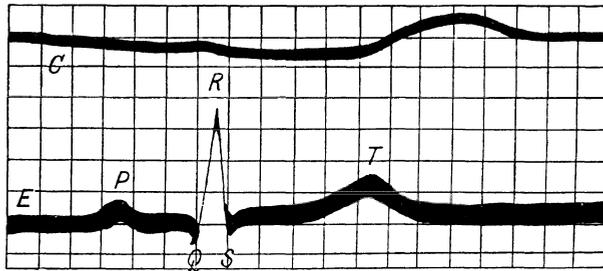


Abb. 48. Normales Elektrokardiogramm nach EINTHOVEN.
Oben C = Carotis-Pulscurve. Unten E = Elektrokardiogramm mit den Zacken P—T.

Schwankungen des **intrakardialen Druckes** gemessen worden (CHAUVEAU und MAREY). Zu dessen Registrierung benutzt man, wie in der Technik, Manometer; da es sich hier aber um sehr rasche und sehr hohe Druckschwankungen handelt, so sind Quecksilbermanometer nicht zu brauchen; denn bei der Trägheit ihrer Masse geben sie zu stark deformierte Kurven.

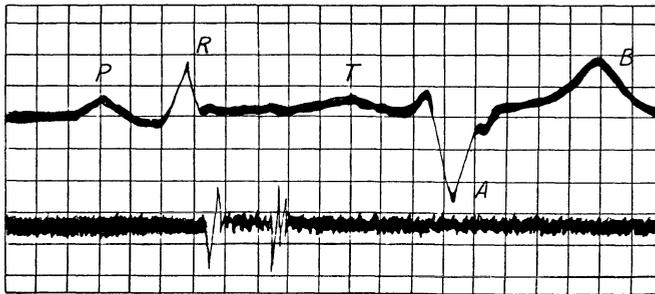


Abb. 49. Anomales Elektrokardiogramm nach EINTHOVEN.
P R T normaler Herzschlag. A B Extrasystole. Darunter das zugehörige Kardiophonogramm.

Man verwendet elastische Manometer (Tonographen) von geringer Masse und mit hoher Eigenschwingungszahl (HÜRTHLE, O. FRANK). Das Herz wird durch Eröffnung des Thorax freigelegt, dann werden in die verschiedenen Herzhöhlen Hohlnadeln eingestochen und diese mit den Manometern verbunden. So erhält man „Tonogramme“, wie sie in Abb. 50 zusammengestellt sind (H. STRAUB, PIPER). Aus der Abbildung ist in der Hauptsache folgendes zu entnehmen: 1. Der systolische Druckanstieg im linken Ventrikel ebenso wie der diastolische Druckabfall verläuft sehr steil; im linken Ventrikel der Katze wurden Maximaldrucke von

150—170 mm Hg, also von ca. $\frac{1}{5}$ Atmosphäre registriert. (Im rechten Ventrikel betrug das Maximum nur 40—50 mm Hg.) 2. Die Vorhofsystole verursacht in der Kammer nur einen kleinen Druckanstieg (V). 3. Bei K markiert sich in der Vorhofskurve der Schluß der Atrioventrikularklappen durch eine kleine Drucksteigerung. 4. Bei S markiert sich die Öffnung der Semilunarklappen. Wenn man nämlich die Aortendruckkurve (welche in der Abbildung rein willkürlich über die anderen Kurven gezeichnet ist) mit der Kurve für den linken Ventrikel auf das gleiche Koordinatensystem bringt (siehe die gestrichelte Kurve), dann sieht man, daß die beiden Kurven sich bei S schneiden, d. h. in dem zugehörigen Zeitmoment wird der Druck im Ventrikel gerade größer, als der Aortendruck; dann muß also der bis dahin bestehende Verschuß der Semilunarklappen gesprengt werden. Daraus folgt, daß die kurze Zeit vom Schluß der Atrioventrikularklappen bis zur Öffnung der Semilunarklappen die Ventrikel allseitig geschlossen sind; in dieser kurzen Zeit spannt sich die Ventrikelmuskulatur um das eingeschlossene Blut an, um es bei Sprengung des Verschlusses in die großen Gefäße auszutreiben. Man unterscheidet deshalb in der Systole der Ventrikel die *Verschuß- oder Anspannungszeit* (vz) von der *Austreibungszeit* (az). 5. Bei I markiert sich der erneute Schluß der Semilunarklappen; er erfolgt, wie die Figur zeigt, linkerseits in dem Moment, wo der Druck innerhalb des linken Ventrikels wieder unter den Druck in der Aorta heruntersinkt. 6. An die Ventrikeldiastole schließt sich eine kurze *Herzpause*, während deren allgemeine Ruhe herrscht.

Der geschilderte Verlauf der Druckschwankungen oder allgemeiner, der Verlauf der Herzaktion innerhalb einer Periode erfährt nun sowohl in seinen zeitlichen, als auch in seinen dynamischen Verhältnissen mannigfache Variationen durch den Einfluß der bereits mehrfach erwähnten von außen an das Herz herantretenden Nerven. Jedermann kennt an sich selber die Wirkungen psychischer Erregung auf Tempo und auf Stärke des Herzschlags; darin dokumentiert sich am deutlichsten der **Einfluß des Nervensystems**.

Das Herz wird, wie Magen (siehe S. 36), Darm (S. 55) und Bronchen (S. 118) und wie überhaupt die inneren Organe, doppelt und in antagonistischem Sinn von Nerven versorgt, welche der Willkür nicht unterstellt sind. Im Jahre 1845 machten die Gebrüder WEBER die berühmte Entdeckung, daß Reizung der *Nervi vagi* die Herztätigkeit verlangsamt oder gar völlig aufhebt. Sie fanden damit das erste Beispiel der hemmenden Wirkung eines Nerven und lösten mit ihrer Entdeckung eine Fülle neuer Untersuchungen aus. Erst etwa 20 Jahre später wurde durch v. BEZOLD

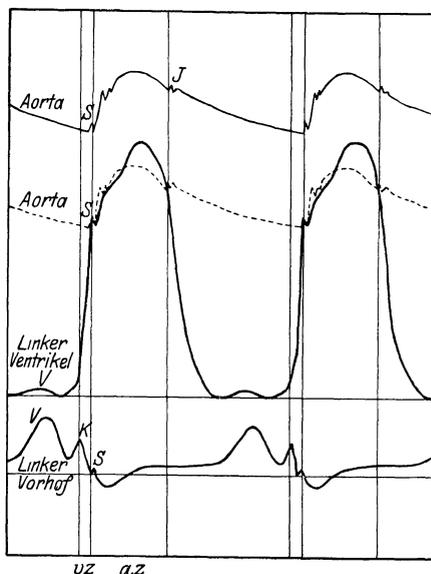


Abb. 50. Druckschwankungen im linken Vorhof, im linken Ventrikel und in der Aorta der Katze (nach PFEFFER).

festgestellt, daß die als *Nervi accelerantes* bezeichneten Äste des Sympathikus als Antagonisten der Vagi die Herztätigkeit fördern. Die Acceleransfasern entstammen dem 1.—5. Thorakalsegment; sie verlaufen in den zugehörigen Rami communicantes albi zum Ganglion stellatum; aus dessen Zellen entspringen alsdann neue Fasern, welche als *Nervi accelerantes* in den Plexus cardiacus eintreten.

Die Wirkungen der Herznerven sind sehr komplizierter Natur. ENGELMANN unterschied chronotrope, dromotrope, inotrope und bathmotrope Einflüsse. Die *chronotropen Wirkungen* sind Wirkungen auf das Tempo. Die Vagi wirken negativ chronotrop, d. h. bei ihrer Reizung kommt es zur Verlangsamung des Herzschlags, bei genügend starker Reizung zu *Stillstand in Diastole*. Fährt man darüber hinaus noch mit der Reizung fort, so kann das Herz wieder anfangen zu schlagen; es schlägt dann aber häufig im atrioventrikulären Rhythmus (siehe S. 124) (H. E. HERING). Die Vagusreizung hat dann offenbar den Sinusknoten total gehemmt, und die Impulse entstehen im Atrioventrikularknoten. Schaltet man die Vagi durch Durchschneiden oder am besten reizlos durch Abkühlen aus, so schlägt das Herz in beschleunigtem Tempo. Daraus folgt, daß die Vagi andauernd von ihrem Zentrum in der Medulla oblongata aus erregt werden; man spricht deshalb von einem „*Vagustonus*“. Die *Nervi accelerantes* wirken als Antagonisten der Vagi positiv chronotrop. Wie es ganz allgemein für die Nerven der inneren Organe gilt, so werden auch die antagonistisch wirkenden Nerven des Herzens von verschiedenen Giften affiziert (siehe Kapitel 26); Muskarin verlangsamt den Herzschlag durch Vagusreizung, Adrenalin beschleunigt ihn durch Acceleransreizung; Atropin beschleunigt das Tempo durch Vaguslähmung, Ergotoxin verlangsamt es durch Acceleranslähmung.

Unter *dromotroper Wirkung* versteht man einen Einfluß auf die Reizleitung. Wieder wirken Vagi und *Accelerantes* hierbei in negativem und positivem Sinn. So beobachtet man bei der Vagusreizung häufig außer der Hemmung des Tempos auch Überleitungsstörungen, teils in Form von richtiger Dissoziation (S. 124), teils bloß als Verlängerung des Intervalls zwischen Atrien- und Ventrikelsystole. Die elektrische Reizung des Vagus beim Frosch und beim Hund, die mechanische durch Druck beim Menschen lehrt ferner, daß der rechte Vagus gewöhnlich stärker negativ chronotrop, der linke stärker negativ dromotrop wirkt, offenbar, weil der rechte Vagus vorwiegend Fasern zum Sinusknoten, der linke vorwiegend zum Atrioventrikularknoten entsendet; daher pflegt die Reizung rechts das Tempo stärker herabzusetzen, als die Reizung links; diese verursacht dafür leichter einen „Herzblock“ (S. 124), den man experimentell am freiliegenden Herzen rückgängig machen kann, indem man mit einer Warmthermode die Gegend des Atrioventrikularknotens erwärmt (GANTER und ZAHN). Acceleransreizung umgekehrt wirkt positiv dromotrop; daher weicht manchmal ein Herzblock bei direkter elektrischer Acceleransreizung oder bei Reizung durch Injektion von Adrenalin.

Inotrope Wirkungen sind solche, welche die Kraft der Herzkontraktionen verändern. Besonders die negativ inotrope Wirkung des Vagus äußert sich in Verkleinerung der Kontraktionshöhe, die Vorhoffssystemen werden dabei oft geschwächt, so daß die P-Zacke des Elektrokardiogramms (S. 133) verschwindet. Von *bathmotropen Wirkungen* endlich spricht man bei Erhöhung oder Erniedrigung der Reizschwelle bei künstlicher Reizung der einzelnen Herzabschnitte,

Durch das Studium der Herznervenwirkungen ist auch ein gewisses Verständnis für die Natur der so verbreiteten Hemmungs- und Förderungswirkungen eröffnet worden. Die Nerven wirken nämlich nicht unmittelbar auf das Herz, sondern durch Vermittlung von chemischen Stoffen, die sie quasi sezernieren. O. LOEWI fand, daß, wenn man bei einem ausgeschnittenen Froschherzen den N. vagus einige Zeit reizt, der Herzhalt die Eigenschaft annimmt, in ein zweites Herz übertragen, dessen Schlag so zu verändern, als wäre sein Vagus gereizt. Es geht also in den Inhalt ein „Vagusstoff“ über, und nach analogen Versuchen hat man als Produkt der Acceleranserregung einen „Acceleransstoff“ anzunehmen. Welcher Natur die chemischen Verbindungen sind, ist noch unbekannt.

Allen den Nervenwirkungen, wie sie durch die experimentelle Analyse sozusagen in einzelne Fraktionen zerlegt worden sind, begegnen wir nun auch unter den natürlichen Bedingungen wieder in mannigfachem und kompliziertem Zusammenspiel, da fast zu gleicher Zeit die verschiedensten Reize ihren Einfluß geltend machen können. Wenden wir unsere Aufmerksamkeit vor allem den der Untersuchung am leichtesten zugänglichen chronotropen Wirkungen zu, so finden wir erstens *das Tempo reflektorisch beeinflußt*. So ruft Reizung aller möglichen sensiblen Nerven, z. B. der Hautnerven, des Ischiadikus, des Plexus brachialis bald Zunahme, bald Abnahme der Frequenz hervor. Besonders durchsichtig ist der sogenannte *Depressorreflex* (LUDWIG und CYON): bei Kaninchen verläuft neben dem Vagusstamm am Hals ein feiner Ast, der Nervus depressor, welcher die Aortenwand innerviert und zentripetal leitet (TSCHERMAK); durchschneidet man ihn und reizt seinen zentralen Stumpf, so verlangsamt sich durch Reflex auf den zentrifugalen Vagus der Herzschlag; der Sinn dieses Reflexes ist darin zu suchen, daß bei zu hohem arteriellen Blutdruck die Depressorendigungen in der Aortenwand mechanisch gereizt werden und durch Verlangsamung des Herzschlages und entsprechende Blutdrucksenkung (S. 154) die Aorta entlasten. Infolgedessen steigt bei hohem Blutdruck der Druck noch weiter an, wenn man die beiden Depressores durchschneidet (PAWLOW). Umgekehrt kommt es zu Pulsfrequenzzunahme, wenn etwa infolge einer Injektion das Venensystem überfüllt und gedehnt wird; die Zunahme beruht nach BAINBRIDGE teils auf Senkung des Vagus-, teils auf Steigerung des Acceleranstonus.

Einen Reflex auf den Vagus demonstriert auch der *GOLTzsche Klopfversuch*; klopft man in raschem Tempo einem Tier auf den Bauch, so verlangsamt sich der Herzschlag, oder es tritt Stillstand in Diastole ein. Der Reflex beruht auf der mechanischen Reizung der Baueingeweide; von dort läuft die Erregung durch den Splanchnikus aufwärts in den Grenzstrang des Sympathikus, tritt dann ins Rückenmark ein und nimmt ihren Weg hinauf zur Medulla oblongata, dem Ursprungsgebiet des Vagus. Daher erlischt der Klopfreflex, sobald man die Medulla oblongata oder die Vagi durchschneidet. Der Reflex hat klinisches Interesse insofern, als gelegentlich durch einen Stoß vor den Bauch der Tod (durch Herzstillstand) eintritt, ohne daß bei der Sektion irgend eine Verletzung der Baueingeweide aufzufinden wäre; auch manche Pulsverlangsamungen bei Darmverschluß (Ileus) oder bei Magen- und Darmreizungen sind vielleicht im Sinn des Klopfversuches zu erklären.

Den reflektorischen Einflüssen auf das Herz stehen die *Einflüsse auf das Tempo von seiten des Zentralnervensystems* nahe. Daß Änderungen

der Frequenz die Begleiterscheinungen der Gemütsbewegungen, Freude, Kummer, Angst sind, wurde bereits erwähnt. Pulsverlangsamung ist ferner ein Symptom der Vermehrung des Hirndrucks, wie sie z. B. durch eine wachsende Geschwulst zustande kommt, aber auch schon infolge venöser Stauung bei kräftiger Anwendung der Bauchpresse; hier wirkt wohl der Druck entweder direkt oder durch Störung der Durchblutung auf das Vaguszentrum.

Ferner ist das *Tempo von der Blutzusammensetzung abhängig*; genau so, wie der Sauerstoff- und Kohlensäuregehalt des Blutes auf die Tätigkeit des Atemzentrums in der Medulla oblongata bestimmend einwirkt, so wirkt er auch auf den Vagustonus. Wird z. B. ein Tier erstickt, so kommt es anfänglich infolge der Erregung des Zentrums der Vagi zu Pulsverlangsamung, daran schließt sich später Pulsbeschleunigung an, wenn durch das Übermaß der Kohlensäure und den Sauerstoffmangel die Medulla oblongata gelähmt wird; endlich verlangsamt sich nochmals der Puls, um allmählich zu versagen, wenn das Herz durch das Asphyxieblut (S. 116) gelähmt wird. In analoger Weise hört man im Verlauf einer Geburt durch die Bauchdecken der Gebärenden, wie der Herzschlag des Fötus bei jeder Wehe infolge der Einschränkung des Plazentarkreislaufs, teils auch infolge des gesteigerten Hirndrucks sich verlangsamt, in jeder Wehenpause wieder schneller wird; wird aber der Fötus auf irgend eine Weise asphyktisch, so geht die Pulszahl abnorm in die Höhe. Bis zu einem gewissen Grad ein Gegenstück zu diesen Erscheinungen ist die Beobachtung, die man leicht an sich selber machen kann, daß, wenn man durch Überventilation der Lungen das Blut arterialisiert, oft eine deutliche Pulsbeschleunigung eintritt.

Nicht sicher erklärt ist die bekannte *Steigerung der Herzfrequenz durch Muskelarbeit*. Teils handelt es sich anscheinend dabei um eine Mitinnervation der Accelerantes bei der Innervation der Muskeln vom Großhirn aus, teils um einen Reflex von den sensiblen Muskelnerven aus; auch die Erwärmung des Blutes, die Bildung anregender Stoffwechselprodukte durch die arbeitenden Muskeln, sowie Adrenalinsekretion infolge der Gemütsregung (s. Kap. 26), die mit jeder starken Anstrengung einhergeht, werden mit als Gründe angeführt.

Alle die nervösen Regulationen der Herztätigkeit sind aber bis zu einem gewissen Grade entbehrlieh. FRIEDENTHAL hat nämlich gezeigt, daß Hunde, bei denen die extrakardialen Nerven durchschnitten worden sind, sich für gewöhnlich völlig normal verhalten; nur wenn ihnen übermäßig starke und andauernde Anstrengungen zugemutet werden, dann versagt der Zirkulationsapparat. Dies beruht darauf, daß das Herz von sich aus über eine nicht unbeträchtliche Anpassungsfähigkeit an verschiedene mechanische Bedingungen verfügt. Dies ist besonders gut an dem von STARLING erprobten „Herz-Lungen-Präparat“ zu studieren.

Hierbei treibt ein ausgeschnittenes Säugetierherz das Blut vom linken Ventrikel durch ein Rohr, an dem der Strömungswiderstand durch Verengung beliebig erhöht werden kann, in ein offenes Reservoir; aus diesem fließt das Blut in den rechten Vorhof mit einer Geschwindigkeit ab, die durch eine Klemme im Abfluß geregelt werden kann. Vom rechten Ventrikel wird das Blut alsdann durch die herausgeschnittene und künstlich ventilierte Lunge des Tieres ins linke Herz zurückgetrieben.

Es zeigt sich nun, daß, auch wenn man durch Änderung des Widerstandes den Druck, gegen den das linke Herz das Blut austreiben muß, etwa zwischen 40 und 200 mm Hg variiert, die in der Zeiteinheit be-

förderte Blutmenge konstant bleibt. Variiert man andererseits durch Betätigung der Reservoirklemme den Zufluß zwischen 100 und 3000 ccm pro Minute, so zeigt sich, daß das Herz sich auch dem anzupassen vermag, indem es bei ungeändertem Druck um so mehr befördert, je mehr ihm zufließt, so daß es zu keiner Stauung auf der venösen Seite kommt. Dies wird dadurch bewerkstelligt, daß das Herz auf Dehnung seiner Wandungen, die im einen wie im anderen Falle zustande kommt, mit Erhöhung seines Stoffwechsels antwortet, die es zu erhöhter Arbeitsleistung befähigt.

Trotz aller wechselnden Einflüsse auf das Tempo kann man von einer für einen bestimmten Menschen **normalen Schlagfrequenz** oder **Pulsfrequenz** sprechen und sie in einer einigermaßen bestimmten Zahl angeben. Man versteht darunter die Frequenz bei körperlicher und seelischer Ruhe. Sie beträgt für den Erwachsenen im Alter von 20—60 Jahren beim Stehen im Mittel 70—75 pro Minute, jedoch kommen bei Gesunden auch Werte von über 100 und unter 50 vor. Das *Alter* spielt insofern eine Rolle, als jenseits 60 Jahren die Frequenz ein wenig, und im Kindesalter erheblich höher ist; bei Neugeborenen beträgt die Pulszahl ca. 130, bei Zehnjährigen ca. 90. Ferner kommt es auf die *Körperhaltung* an; im Stehen ist die Frequenz etwa um 10 Schläge größer, als im Liegen. Daß Körperbewegungen die Frequenz noch mehr steigern, wurde schon gesagt. Auch die *Körpergröße* spielt mit; kleine Menschen haben einen etwas schnelleren Puls als große. Die gleiche Beziehung zur Körpergröße findet man allgemein, wenn man große und kleine Tierspezies miteinander vergleicht; der Elefant hat 25 Pulse pro Minute, die Maus 400—600. Weiter steht die Pulsfrequenz in Beziehung zur *Verdauung*; nach jeder Nahrungsaufnahme steigt sie an. Endlich ist die *Körpertemperatur* von Einfluß; daher bildet die Erhöhung der Pulszahl auch ein bekanntes und wichtiges Symptom des Fiebers; freilich ist der rasche Fieberpuls nicht allein durch die Temperatursteigerung im Herzen bedingt. So resultiert aus dem Zusammenwirken der verschiedenen Momente eine ziemlich komplizierte Tageskurve.

11. Kapitel.

Die Bewegung des Blutes in den Gefäßen.

Der Energieverbrauch im Gefäßsystem; Druck und Geschwindigkeit einer strömenden Flüssigkeit 141. Der Einfluß der Elastizität der Wandungen 144. Der Blutdruck in Arterien, Kapillaren und Venen und seine Messung 145. Die Innervation der Blutgefäße 147. Der Gefäßtonus 148. Gefäßreflexe 149. Die funktionelle Gefäßerweiterung 150. Der Plethysmograph 151. Schwankungen des arteriellen Blutdrucks 152. Der Puls 156. Die Füllung des Herzens 159. Die Blutgeschwindigkeit 160. Das Schlagvolumen des Herzens 161. Die Herzarbeit 162. Die Blutumlaufzeit 162.

Nachdem wir den Motor kennen gelernt haben, welcher das Blut in seine Bahnen hineintreibt, wenden wir uns zur Lehre von den Gesetzen, welche das Strömen des Blutes in den Gefäßen beherrschen, zur *Hämodynamik*. Wir wollen jedoch dies Studium statt an dem komplizierten

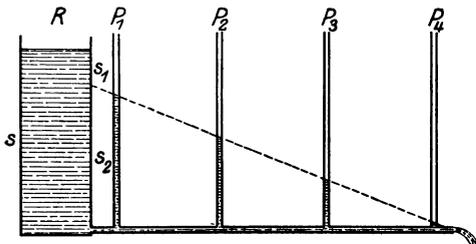


Abb. 51. Piezometer-Schema des Kreislaufsystems.

Naturobjekt mit seinen vielfachen Verzweigungen, mit der Biegsamkeit und der Elastizität seiner Wände und mit den rhythmischen Impulsen, die sein Inhalt erfährt, vorerst an einem einfachen Modell vornehmen. An die Stelle des Herzens tritt dabei (siehe Abb. 51) ein großes Reservoir (R), bis zur Höhe s mit Wasser gefüllt, an dessen Boden seitlich ein horizontales Rohr entspringt. Der hydrostatische Druck am Boden des Gefäßes repräsentiert den vom Herzen entwickelten Druck. Das Reservoir ist so groß gewählt, daß während eines kurze Zeit dauernden Auslaufs das Niveau sich nicht wesentlich senkt. Das horizontale Ausflußrohr hat überall den gleichen Querschnitt; es ist an die Stelle des ungleich weiten und stark verzweigten Blutgefäßsystems getreten. Die Ausflußöffnung am Ende des Rohres entspricht der Ausmündung in die Vorhöfe.

Betrachten wir nun die Energie, welche zur Unterhaltung eines stationären Flusses durch das horizontale Rohr aufgewendet werden muß. Wir können sie erstens als lebendige Kraft $\frac{1}{2} m \cdot v^2$ des bewegten Wassers messen, wenn m die Masse des in einer Sekunde aus dem Rohr ausfließenden Wassers, v seine lineare Geschwindigkeit (den Quotienten aus Volumengeschwindigkeit und Rohrquerschnitt) bedeutet. Zweitens

können wir sie als potentielle Energie des aus dem Druckgefäß herausfallenden Wassers $p \cdot s$ messen, wo p das pro Sekunde austretende Gewicht Wasser, s die Druckhöhe bedeutet. Aus der Energiegleichung $p \cdot s = \frac{1}{2} m \cdot v^2$ ergibt sich dann das *TORICELLIsche Theorem*: $v = \sqrt{2gs}$, wo g die Erdbeschleunigung ist.

Mißt man nun in einem gegebenen Fall an dem Modell die Ausfließgeschwindigkeit v , so findet man, daß sie viel geringer ist, als der Gleichung $v = \sqrt{2gs}$ entspricht; sie ist nur so groß, als ob das Wasser um die Strecke s_1 gefallen wäre. s_1 kann als die *Geschwindigkeitshöhe* bezeichnet werden, weil sie ein Maß für die dem Wasser erteilte Geschwindigkeit bzw. für seine kinetische Energie ist. Es geht also ein Bruchteil der zur Verfügung gestellten potentiellen Energie verloren und wandelt sich nicht in Energie des strömenden Wassers um. Welcher Art dieser Verlust ist, darauf deutet ein noch einfacherer Versuch über das Ausfließen hin. Mißt man die Geschwindigkeit, mit welcher Wasser aus einer Öffnung im Boden eines Gefäßes hervorstürzt, so ist auch diese Geschwindigkeit geringer, als die theoretische Fallgeschwindigkeit. Das rührt wesentlich davon her, daß das Wasser nicht einfach senkrecht in zylindrischem Strahl aus der Öffnung herausfällt, sondern daß auch von den Seiten her Wasserteilchen in den ausfließenden Strahl münden; ein äußeres Zeichen davon ist die konische Zusammenziehung des Strahles unterhalb der Ausflußöffnung, die „*Contractio venae*“. So kommt es zu Wirbelbildung und damit zu Verlusten an Energie durch Reibung, also in Form von Wärme.

Auch die noch größeren Energieverluste beim Ausfließen aus dem horizontalen Rohr des Modells sind Reibungsverluste, herrührend von der „äußeren“ Reibung des Wassers an der Rohrwand durch seine Adhäsion und von der „inneren“ Reibung der Wasserteilchen aneinander. Von der Größe der Widerstände, welche sich auf diese Weise dem Strömen des Wassers entgegenstellen, bekommt man ein anschauliches Maß, wenn man an dem horizontalen Rohr in Abständen voneinander vertikale Seitenrohre, sogenannte *Piezometer* P_1 — P_4 , anbringt; in diesen steigt, wie die Abb. 51 es zeigt, das Wasser während seines Ausfließens um so höher, je näher das Piezometer dem Druckgefäß, um so weniger hoch, je näher es der Ausflußöffnung ist; verbindet man alle Niveaus in den Piezometern, so erhält man eine zur Ausflußöffnung geneigte Gerade, welche rückwärts bis zum Druckgefäß verlängert, an diesem die Höhe s_2 abteilt; s_2 heißt die „*Widerstandshöhe*“, weil sie ein Maß für die dem Strömen sich bietenden Widerstände, ein Maß für den Energieverlust durch Reibung darstellt. Der Vergleich von s_1 und s_2 lehrt, daß in dem gegebenen Fall der größere Teil der potentiellen Energie im Druckgefäß zur Überwindung der Widerstände verbraucht wird und nur der kleinere Teil der Bewegung des Wassers nutzbar gemacht wird.

An jeder Stelle des horizontalen Rohres steht das Wasser, wie an den Piezometern abzulesen ist, unter einem bestimmten Druck; dieser ist kleiner, als wenn die Ausflußöffnung verschlossen, der Widerstand also unendlich groß wäre, und er ist größer als Null, wie beim freien Ausfließen an der Ausflußöffnung. Der *Seitendruck* ist an jeder Stelle ein Maß für die von dem Wasser noch weiterhin zu überwindenden Widerstände. Betrachten wir nun genauer, von was für Umständen dieser Rohrwiderstand abhängt.

Der *Widerstand* ist *ceteris paribus* erstens um so größer, je länger das Rohr; zweitens wird er durch jede Biegung und jede Verzweigung

des Rohres vergrößert, weil dabei in der Flüssigkeitsströmung Wirbel entstehen, welche vermehrte Reibung verursachen. Aus dem gleichen Grund steigt er durch jede plötzliche Erweiterung und Verengung des Querschnitts. Die Verengung, besonders die kapillare Verengung wirkt aber noch aus einem anderen Grund widerstandsvermehrend. Für Kapillaren gilt nämlich das *POISEUILLE'sche Gesetz*, wonach das bei der Druckhöhe s in der Zeiteinheit ausfließende Volumen

$$V = \frac{\pi r^4 s}{8 \eta l}$$

ist; l ist die Rohrlänge, η eine Konstante. Da die Ausflußgeschwindigkeit $v = \frac{V}{r^2 \pi}$ ist, so folgt:

$$v = \frac{r^2 s}{8 \eta l}$$

d. h. bei gleicher Länge und gleicher Druckhöhe steigt die Geschwindigkeit mit dem Quadrat des Radius des Rohrquerschnitts. Die Geschwindigkeit

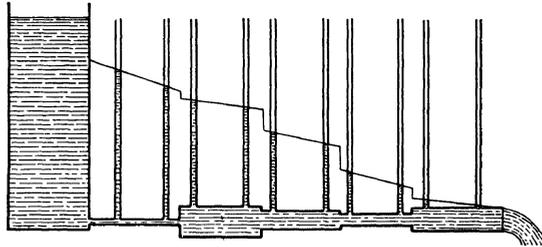


Abb. 52. Einfluß der Querschnittsänderung auf den Seitendruck einer strömenden Flüssigkeit.

ist also nicht dem Umfang des Rohrs proportional, sondern der Fläche; daraus ist zu schließen, daß der Widerstand (welcher der Geschwindigkeit umgekehrt proportional ist) nicht bloß von der Reibung der Flüssigkeit durch Adhäsion an der Wand, wie bei weiten Rohren, sondern auch von der „inneren“ Reibung abhängt. Indem die äußerste Flüssigkeitsschicht von der Wand festgehalten wird, muß sich die nächst innere Schicht an der äußersten verschieben, und so fort bis zur Achse, so daß der Achsenfaden die größte, die Peripherie die geringste Geschwindigkeit hat, genau wie in einem schmalen Bach das Wasser in der Mitte am raschesten fließt und an den Ufern am langsamsten. Die Konstante η ist ein Maß für die Größe der inneren Reibung der jeweils das Rohr durchströmenden Flüssigkeit.

So gestaltet sich der Druckabfall in dem horizontalen Rohr unseres Modells bei wechselweiser Zusammenschaltung enger und weiter Rohrstücke etwa so, wie es in der Abb. 52 dargestellt ist; man sieht, wie der Seitendruck, also der Widerstand, von der Ausflußöffnung an gerechnet, jedesmal bei einer Querschnittsänderung in die Höhe springt, und wie längs eines gleich weiten Rohrstückes der Widerstand um so steiler ansteigt, je enger das Rohr.

Endlich haben wir noch denjenigen *Einfluß der Verzweigung* zu betrachten, welcher, unabhängig von Wirbelbildungen an den Über-

gangsstellen, allein von der Aufteilung des Gesamtquerschnitts herrührt. Es fließe Wasser unter dem gleichen Druck einmal durch ein Rohr vom Radius 10 und der Länge 1 und einmal durch 100 parallel geschaltete Kapillaren, jede mit dem Radius 1 und der gleichen Länge 1; der Querschnitt ist dann beide Male der gleiche, aber das aus dem weiten Rohr ausfließende Volumen ist, wie man leicht der Formel des POISEUILLEschen Gesetzes entnehmen kann, 100mal so groß, als der Ausfluß aus den 100 Kapillaren. Daraus folgt, daß die Einschaltung eines Systems von engen Kapillaren den Widerstand stark vermehren muß.

Wie sehr dies bei der kapillaren Aufteilung im Blutgefäßsystem ins Gewicht fallen wird, läßt sich aus der folgenden Tabelle nach MALL und MILLER für die kapillare Aufspaltung zweier Arterien eines Hundes ablesen:

Gefäß	Einzel-durch-messer	Einzel-quer-schnitt	Einzel-umfang	Zahl	Gesamt-durch-messer	Gesamt-querschnitt	Gesamt-umfang
Art. mesenterica sup.	3 mm	7 mm ²	9,4 mm	1	3 mm	7 mm ²	9,4 mm
Darmkapillaren	7 μ	38,5 μ^2	22 μ	71,5 · 10 ⁶	60 mm (1: 20)	2800 mm ² (1: 400)	1600 m (1: 170 000)
Art. pulmonalis	15,5 mm	181 mm ²	48,5 mm	1	15,5 mm	181 mm ²	48,5 mm
Lungenkapillaren	7 μ	38,5 μ^2	22 μ	600 · 10 ⁶	171 mm (1: 11)	23 000 mm ² (1: 130)	13 000 m (1: 270 000)

Die Tabelle lehrt, daß der Querschnitt der Arteria mesenterica superior beim Übergang in ihr Kapillargebiet um das 400fache, der Querschnitt der Arteria pulmonalis um das 130fache zunimmt. Noch viel mehr wächst aber ihr Umfang, nämlich auf das 170 000fache bzw. 270 000fache. Das heißt: der Einfluß der Wandfläche auf die Strömung, also der relative Einfluß der äußeren und inneren Reibung wächst enorm. So müssen also die Kapillargebiete im Körper Orte besonders großen Widerstandes sein. Dabei ist noch zu berücksichtigen, daß die Blutkörperchen in den Kapillaren, wo ihr Durchmesser an den der Kapillaren heranreicht, den Widerstand noch besonders vermehren müssen.

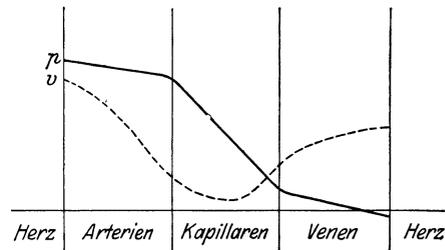


Abb. 53. Schematische Darstellung der Änderung von Druck (p) und Geschwindigkeit (v) im Kreislaufsystem.

Abschließend werden wir demnach aus den Studien am Kreislaufmodell folgern, daß der Seitendruck im Blutgefäßsystem, vom Herzen anfangend bis zum Herzen zurück, im wesentlichen entsprechend der Kurve p in Abb. 53 abfallen muß.

Wenden wir uns nun noch der *Geschwindigkeit des Strömens* in einem starren verzweigten Rohrsystem zu, so liegen da die Verhältnisse viel übersichtlicher als für die Drucke. Nämlich durch jeden (Gesamt-) Querschnitt muß (wegen der Inkompressibilität der Flüssigkeit) in der

Zeiteinheit die gleiche Wassermenge fließen. Für ein unverzweigtes Rohr mit streckenweise verschiedenem Querschnitt bedeutet das, daß die lineare Geschwindigkeit in den engen Rohrabschnitten größer sein muß, als in den weiten, wie das Wasser in einem Flußlauf oberhalb und unterhalb eines Sees rasch, im See selber dagegen langsam fließt. Ist das Rohr aber streckenweise in eine Anzahl parallel verlaufender enger Zweige aufgesplittert, so wird auch die Strömung in dem Maß verlangsamt, wie der Gesamtquerschnitt durch die Aufteilung vergrößert wird; das langsame Fließen in einem Kapillargebiet wird nicht etwa durch die Widerstände des Kapillargebiets verursacht.

Hiernach können wir voraussehen, daß die Geschwindigkeit des Blutes in den Gefäßen, vom Herzen anfangend bis zum Herzen zurück, im wesentlichen entsprechend der Kurve v in Abb. 53 sich ändern muß.

Wenden wir uns nun, um den physiologischen Verhältnissen noch näher zu kommen, dem *rhythmischen* Einpressen von Flüssigkeit durch eine Pumpe in ein *elastisches* Rohrsystem zu, welches ähnlich dem Blutgefäßsystem gebaut ist, d. h. zwischen weiten Rohren ein Kapillargebiet eingeschaltet enthält; ferner soll an der Grenze von Pumpe und Rohrleitung ein Ventil liegen, welches ein Strömen nur in der Richtung in die Rohrleitung hinein zuläßt. Wir denken uns zunächst das Wasser in diesem System in Ruhe; wird nun durch einen ersten raschen Impuls ein weiteres Quantum Wasser hinzugepumpt, so nimmt der weite Anfangsteil des Systems unter Dehnung seiner Wandung den Zufluß auf, weil der elastische Widerstand der Wandung geringer ist, als der Widerstand des folgenden Kapillargebiets, durch welches das hinzugepumpte Wasserquantum sonst, d. h. ohne die Nachgiebigkeit der Wände, abfließen müßte. Folgt dem ersten Impuls eine Pause, so herrscht doch keine Ruhe in dem Rohrsystem; vielmehr wird jetzt die gedehnte Wand ihrer elastischen Ruhelage wieder zustreben, sich zusammenziehen und dabei das Wasser austreiben. Dies könnte entweder in der Richtung zur Pumpe oder in Richtung zum Kapillargebiet geschehen; da der Rückfluß zur Pumpe aber alsbald durch das Ventil verhindert wird, so bleibt nur der Weg kapillarwärts. Bevor aber noch die Entspannung des Rohranfangs beendet ist, mag ein zweiter Impuls kommen; die Wände werden von neuem und stärker gedehnt als das erstemal; dementsprechend wird auch die in der Pause wirkende, zu den Kapillaren gerichtete Triebkraft stärker sein als zuvor, und so folgt nun Impuls auf Impuls, bis ein dynamischer Gleichgewichtszustand eingetreten ist, in welchem in der Zeiteinheit ebensoviel Flüssigkeit von der Pumpe eingetrieben, als von der Pumpe und den elastisch gespannten Wänden ins Kapillargebiet ausgetrieben wird. Es fließt also Flüssigkeit ins Kapillargebiet nicht bloß bei jedem Pumpenstoß, sondern auch in der Pause zwischen zwei Stößen, *der rhythmische Ausfluß aus der Pumpe wird also in einen mehr oder weniger kontinuierlichen Ausfluß umgewandelt*. Wir haben also ganz ähnliche Verhältnisse wie bei der Feuerspritze mit ihrem elastischen Luftpolster im Windkessel.

Es ist einleuchtend, daß eine solche Struktur bei unserem Gefäßsystem für das Herz eine große Entlastung bedeutet. Denn hätten die Blutgefäße unnachgiebige Wandungen, so müßte in der kurzen Zeit der Systole das Herz die ganze Blutmasse vor sich hertreiben; so aber wird der Herzhalt nur in den Anfangsteil des arteriellen Systems entleert, und während der Diastole, der Herzpause und der Atriensystole

treiben die elastischen Wände, in welchen ein Teil der Herzenergie aufgespeichert ist, das Blut weiter.

Wir schließen hiermit die orientierende Betrachtung der Kreislaufmodelle. Dieselbe stellt uns nun vor allem vor zwei Aufgaben, nämlich erstens den *Druck* und zweitens die *Geschwindigkeit* des Blutes in den verschiedenen Abschnitten des Gefäßsystems zu messen, um zu kontrollieren, ob die Verhältnisse wirklich so liegen, wie es die Modelle voraussehen ließen.

Die **Messung des Blutdrucks** kann genau nur im vivisektorischen Experiment vorgenommen werden. Schon im 18. Jahrhundert band STEPHAN HALES zu dem Zweck bei einem Pferd ein Rohr in eine Arterie und sah zu, wie hoch darin das Blut anstieg. Heute bindet man gewöhnlich eine Kanüle in das Gefäß, und verbindet sie mittels eines dickwandigen Schlauchs oder eines Bleirohres mit einem Quecksilbermanometer, so wie es in Abb. 54 dargestellt ist. Die Quecksilberbewegungen werden durch einen Schwimmer auf einer bewegten Schreibfläche, am besten auf der berußten Fläche einer rotierenden Trommel („Kymographion“; s. Abb. 57, S. 151) aufgeschrieben (C. LUDWIG). Den Raum zwischen Quecksilber und Blut füllt man mit einer die Gerinnung verhindernde Lösung, also etwa mit einer Lösung von Natriumoxalat. Auf diese Weise findet man in den *Arterien*, wie z. B. in der Karotis oder Arteria femoralis eines größeren Säugetieres, einen Druck von 120—180 mm Hg, also einen Druck von $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{6}$ Atmosphäre. *Dieser Druck ist unter äußerlich gleichen Umständen konstant*, oder vielmehr er schwankt in periodischen Oszillationen um einen mittleren konstanten Wert, so wie es Abb. 55 zeigt. Die kleineren Oszillationen sind mit dem Herzschlag, die größeren mit der Atmung synchron, sie werden später (S. 155 und 157) genauer erörtert werden. Da die Quecksilbermasse des Manometers viel zu träge ist, um die Schwankungen exakt zu registrieren, so muß man, wenn es auf ihre genaue Verzeichnung ankommt, an Stelle des Quecksilbermanometers ein geeignetes Federmanometer (HÜRTHLE, FRANK) verwenden.

Auch für die *Messung des arteriellen Blutdrucks beim Menschen* sind Instrumente ersonnen. Am gebräuchlichsten ist das *Sphygmomanometer* von RIVA-ROCCI (siehe Abb. 56).

Es besteht aus einem breiten Gummischlauch (v. RECKLINGHAUSEN), einem Quecksilbermanometer und einem Handgebläse. Der Gummischlauch, welcher durch einen Überzug von Segeltuch undehnbare gemacht ist, wird um den Oberarm gelegt, er wird dann durch Einpumpen von Luft mit dem Gebläse aufgebläht, so daß er den Oberarm ringförmig komprimiert; man preßt so lange Luft ein, bis der Radialispuls nicht mehr zu fühlen ist. Öffnet man dann ein kleines Schraubenventil am Manometer, so daß die Luft ganz langsam entweichen kann, so spürt man in einem bestimmten Moment wieder den Puls. In diesem Augenblick liest man den Stand des Quecksilbers am Manometer ab.

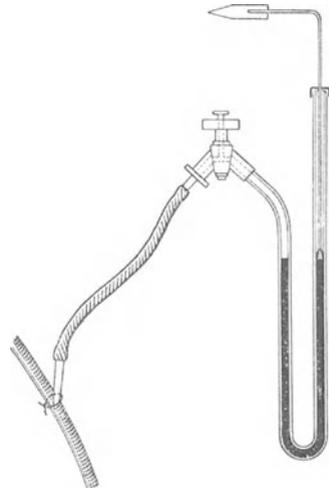


Abb. 54. Quecksilbermanometer, mit einem Blutgefäß verbunden (nach C. LUDWIG).

Man findet so beim gesunden Menschen in der Art. brachialis einen Druck von 90—120 mm Hg. Der Apparat beruht also, wie auch andere ähnliche, auf dem Prinzip, daß der Blutdruck, welcher von innen auf der Arterienwand lastet, durch einen äußeren Druck eben kompensiert bzw. überkompensiert wird. Im speziellen mißt man in der geschilderten Art und Weise den sogenannten *maximalen* oder *systolischen Druck*, d. h. den

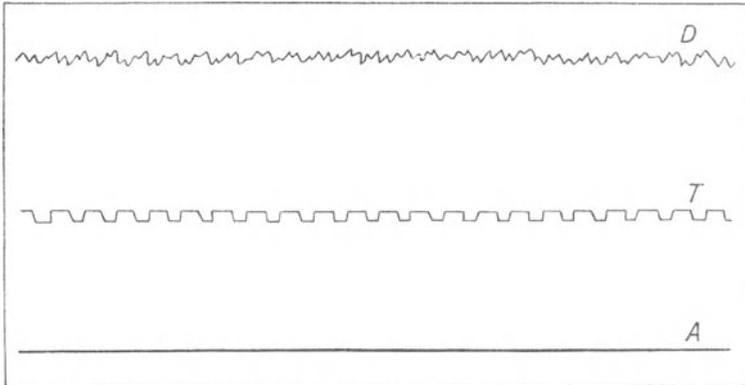


Abb. 55. Blutdruckschwankungen in der Karotis eines Kaninchens, mit einem Quecksilbermanometer registriert.

A Abszisse (= Druck 0); T Sekundenmarken; D Blutdruckschwankungen.

höchsten in der Arterie herrschenden Druck, welcher eben den Außendruck zu überwinden vermag. Die Messung ist keine ganz exakte, da die Überlagerung von Weichteilen über die Arteria brachialis, die Formelastizität des Arterienrohrs, die Inkongruenz zwischen Arterienkom-

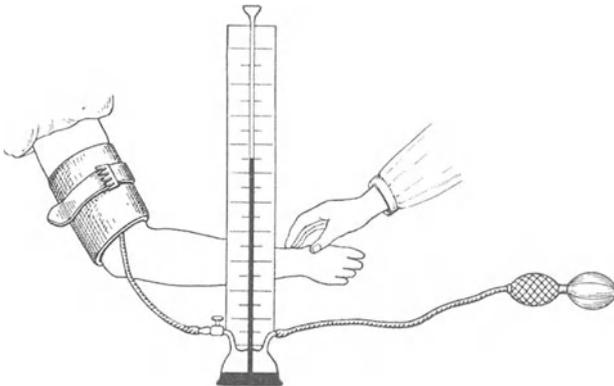


Abb. 56. Sphygmomanometer von RIVA-ROCCI.

pression und Verschwinden des Pulses Fehlerquellen darstellen; aber für vergleichende Bestimmungen ist der Apparat gut zu brauchen.

In ähnlicher Weise kann man auch den *Kapillardruck* des Menschen näherungsweise bestimmen.

Man legt zu dem Zweck ein Glasplättchen etwa auf eine Fingerbeere und belastet es durch Auflegen von Gewichten auf eine an den Rändern des Plättchens mit Fäden angehängte Wagschale so lange, bis die rosa Haut unter dem Druck

erblaßt, also bis zur Kompression der Kapillaren. Dann bestimmt man die Fläche, an welcher die Last auf der Haut angreift, folgendermaßen: man schwärzt die Haut der Fingerbeere mit Ruß, legt noch einmal das Plättchen mit der gleichen Belastung wie vorher auf und nimmt einen Abdruck der belasteten Fläche, deren Größe man über Millimeterpapier ausmißt. Man kann dann den Druck berechnen (N. v. KRIES). Die Messungen sind nicht sehr genau, vor allem, weil schwer anzugeben ist, bei welchem Druck die Haut eben zu erblassen beginnt. Genauer scheinen die Bestimmungen mit dem *Kapillartonometer* von BASLER zu sein: Wenn man die Epidermis der Haut mit Glycerin benetzt, so wird sie so durchsichtig, daß man die oberflächlicher gelegenen Gefäße unter dem Mikroskop mit einer schwachen Vergrößerung betrachten kann (LOMBARD). Besonders geeignet für die Beobachtung von Kapillaren ist die Haut an der Grenze des Nagelbetts, wo die Kapillarschlingen langgestreckt in die Kutispapillen vordringen. Man bringt nun einen Finger unter eine mit Glycerin gefüllte Kapsel, welche oben durch ein Fenster, unten durch Goldschlägerhaut verschlossen ist, und buchtet die Goldschlägerhaut durch Drucksteigerung innerhalb der Kapsel so lange gegen den Finger vor, bis man ein Blutgefäß, welches man mit dem Mikroskop durch Fenster, Glycerin und Goldschlägerhaut hindurch ins Auge faßt, eben infolge der Kompression nicht mehr sieht.

LOMBARD fand so folgende Mittelwerte: Arteriolen 60—70, Kapillaren 35—45, kleinste Venen 15—20, subpapillärer Venenplexus 10 bis 15 mm Hg. Der Druck fällt also auf einer ganz kurzen Strecke gewaltig ab.

Den *Venendruck* bestimmt man wie beim Tier, so auch beim Menschen am besten manometrisch, indem man eine mit dem Manometer verbundene Hohnadel in eine oberflächlich gelegene Vene einsticht (MORITZ und v. TABORA). Man findet, je nachdem man ferner oder näher am Herzen mißt, Drucke von + 5 bis — 5 mm Hg. Damit wird es verständlich, daß sich das Blut in den Venen so sehr leicht durch einen äußeren Druck stauen läßt.

Wir konstatieren also im ganzen Druckverlauf ein Verhalten, wie es die Studien am Kreislaufmodell erwarten ließen (s. Abb. 53).

Unter bestimmten Bedingungen kommen nun aber sehr erhebliche *Blutdruckschwankungen* vor. Ihr Verständnis setzt vor allem eine Kenntnis der Reaktionen der Blutgefäße auf Einflüsse von seiten des Nervensystems voraus. Die Blutgefäße enthalten kontraktile Elemente, vermöge deren ihr Lumen verengt und erweitert werden kann. Bei den Arterien und Venen handelt es sich dabei um die Betätigung zirkulär angeordneter glatter Muskelfasern, bei den Kapillaren um eigentümliche Zellen mit „faßreifenartig“ die Gefäße umfassenden Ausläufern (STEINACH und KAHN). Die **Innervation der Blutgefäße** geschieht von seiten des Sympathikus. Es gibt *Nervi vasoconstrictores*, welche die Gefäße durch die Anspannung der kontraktilen Zellen verengen (CLAUDE BERNARD) und *Nervi vasodilatatores*, welche durch Hemmung der Kontraktion eine Erweiterung hervorrufen (SCHIFF). Ein Organ, dessen konstriktorische Nerven erregt werden, wird blaß und kühl und sein Volumen nimmt ab; ein Organ, dessen dilatierende Nerven in Tätigkeit treten, oder dessen erregte Konstriktoren durchschnitten werden, rötet sich, wird warm und nimmt an Volumen zu.

Die Gefäßnerven verlaufen meistens in den zerebralen oder den spinalen Nerven, denen vom Grenzstrang aus auf dem Wege der Rami communicantes grisei oder von den Halsganglien aus die sympathischen Fasern beigemischt sind; sie verlaufen aber auch in den peripheren Ästen des Sympathikus, wie z. B. im Nervus splanchnicus, welcher das große Gebiet der Baucheingeweide mit Gefäßnerven versorgt. Häufig laufen erweiternde und verengernde Fasern im selben Nerven; man

kann ihre Funktion aber experimentell trennen und gesondert zur Anschauung bringen. Die Vasokonstriktoren sind nämlich im allgemeinen empfindlicher gegen allerlei Einflüsse als die Dilatatoren. Das lehren z. B. folgende Versuche mit dem den Sympathikus erregenden Adrenalin (s. Kap. 18): für gewöhnlich verursacht Adrenalin Gefäßverengung, weil die Konstriktoren meist über die Dilatatoren überwiegen; ist der Gefäßnerv aber einige Zeit vorher durchschnitten, so bewirkt Adrenalin Erweiterung, weil die Konstriktoren nach der Durchschneidung früher degenerieren, als die Dilatatoren. Ferner wirkt Adrenalin bei längerer Wirkungsdauer dilatierend, weil die Konstriktoren rascher ermüden; daher erhält man, wenn die Gefäße zuvor einige Zeit mit Adrenalin 1 : 300 000 durchströmt sind, bei nachfolgender Durchströmung mit 1 : 100 000 Erweiterung und nicht stärkere Verengung. Endlich erzeugt Adrenalin auch Dilatation nach Vorbehandlung mit Ergotoxin, welches vornehmlich die Konstriktoren lähmt. Es gibt aber auch isoliert verlaufende dilatierende Fasern, z. B. in der Chorda tympani, deren Erregung eine starke Gefäßerweiterung in der Submaxillardrüse hervorruft (S. 22), während dieser die Konstriktoren auf dem Wege des Halssympathikus zugeführt werden. Dilatatoren verlaufen auch in den motorischen Nerven; infolgedessen werden bei deren Reizung die Blutgefäße in den Muskeln weit, selbst wenn durch Lähmung der motorischen Fasern, z. B. mit Kurare (Kap. 21), die Kontraktion ausbleibt.

Die gefäßverengernden Nerven sind dauernd erregt; daher kommt es in einem Gefäßgebiet zur Erweiterung, sobald man die zuführenden Gefäßnerven durchschneidet. Dieser *Gefäßtonus* rührt von der Tätigkeit **vasokonstriktorischer Zentra** her (C. LUDWIG). Macht man im Zervikalmark eine durchtrennung oder einen Kältequerschnitt (S. 112), so erweitern sich alsbald die Gefäße des ganzen Körpers; durchtrennt man oberhalb der Medulla oblongata, so bleibt der Effekt aus. Daraus folgt, daß in der Medulla oblongata ein allgemeines Vasokonstriktorenzentrum gelegen ist. An der gleichen Stelle fanden wir schon das tonisch innervierende Vaguszentrum und das ebenfalls andauernd tätige Atemzentrum vor. Wie diese beiden (siehe S. 113 und S. 138), so wird auch das Gefäßzentrum durch „Blutreize“, durch ein Übermaß an Kohlensäure und durch Mangel an Sauerstoff erregt; starke Dyspnoe geht mit *Gefäßkrampf* einher. Ist aber nach der Durchschneidung des Rückenmarks unterhalb der Medulla oblongata einige Zeit verstrichen, so stellt sich der normale Gefäßtonus wieder her. Er weicht dann abermals einer Gefäßlähmung, wenn man weiter unterhalb das Rückenmark noch einmal durchschneidet. Es gibt also *vasokonstriktorische Nebenzentra* im Rückenmark. Aber selbst wenn das Rückenmark größtenteils, vom mittleren Zervikalteil an bis zum Sakralteil, ausgerottet ist, stellt sich doch wieder ein Tonus her, welcher demnach zum Teil peripher bedingt ist (GOLTZ und EWALD).

An den vom Zentralnervensystem völlig isolierten Gefäßen, ja sogar an *ausgeschnittenen Gefäßstücken* kann man noch Tonusänderungen durch mannigfache physikalische und chemische Reizungen hervorrufen. Durchschneidet man z. B. den Ischiadikus bei einem Hund, ja läßt man das Bein allein noch mittels der Gefäße in Zusammenhang mit dem übrigen Körper, so erzeugt lokale Erwärmung noch lokale Gefäßerweiterung, und Kälte bewirkt das Gegenteil. Auch aus dem Körper herausgeschnittene Gefäßstücke reagieren noch auf die Temperaturreize.

Auf Druck von innen her antwortet das Gefäß mit Konstriktion. Ferner werden die Gefäße eines überlebenden Organs, z. B. der Niere, noch eng und weit, je nachdem man dyspnoisches oder arterialisirtes Blut hindurchleitet. Adrenalin erzeugt wie bei intravenöser Injektion im ganzen Tier (siehe Kap. 18), so auch am isolierten Gefäßstück Tonussteigerung, desgleichen Kokain; Amylnitrit, Histamin u. a. bewirken das Gegenteil.

Inwieweit alle diese Reaktionen der unmittelbaren Beeinflussung der Gefäßmuskulatur oder der Beeinflussung über die in die Gefäßwand eingestreuten Ganglienzellen zuzuschreiben sind, läßt sich momentan nicht bestimmt sagen.

Die geschilderten Gefäßreaktionen dienen nun vor allem dazu, für eine *zweckmäßige Verteilung des Blutes im Körper* zu sorgen. Denn an und für sich ist die vorhandene Blutmenge nicht groß genug, sämtliche Organe zu gleicher Zeit in reichstem Maß zu versorgen, sondern das Blut muß, ähnlich wie bei der Drainage der Felder durch abwechselndes Schließen und Öffnen der Stauwehre, so durch Vasodilatation an einem, durch Konstriktion an einem andern Ort bald da-, bald dorthin gesteuert werden, und die Verteilungsänderung ist in der Tat eine ganz außerordentlich ausgiebige. So beobachtete KROGH die Kapillaren der Muskeln unter dem Mikroskop und fand, daß zahlreiche Kapillaren in der Ruhe verschlossen sind und erst bei der Arbeit eröffnet werden, so daß die dem Stoffaustausch dienende Kapillaroberfläche bei der Tätigkeit um das Mehrhundertfache vergrößert werden kann.

Diese Querschnittsänderungen werden zu einem Teil mit Hilfe des Zentralnervensystems, durch **Gefäßreflexe** zu Wege gebracht. Reizt man z. B. die Haut durch Kneifen, oder reizt man einen Hautnerven oder den zentralen Ischiadikusstumpf elektrisch, so verengern sich die Gefäße im Innervationsgebiet des Nervus splanchnicus, also in den Baueingeweiden; zu gleicher Zeit werden die Gefäße in den Muskeln und dem Zentralnervensystem teils aktiv, teils passiv erweitert. Dieser Reflex hat wohl den biologischen Sinn, daß im Moment der Gefährdung durch irgend eine feindliche Gewalt diejenigen Organe vor allem mit Blut versorgt werden, welche der Abwehr oder der Flucht dienen können. Dementsprechend ist auch weiter beobachtet, daß, sobald Muskulatur in Tätigkeit tritt, mit den motorischen auch vasodilatierende Impulse den Muskeln zufließen, während vasokonstringierende Impulse in die Eingeweide abgeschickt werden; umgekehrt werden die Gefäße in Muskeln und Zentralnervensystem eng, wenn mit dem Einsetzen der Sekretion der Verdauungsdrüsen die Blutgefäße der Bauchorgane sich erweitern; so versteht man das bekannte: „Plenus venter non studet libenter“. Besonders wichtig sind auch die Gefäßreflexe, welche im Dienst der Wärmeregulation unseres Körpers stehen. Taucht man ein Bein in kaltes Wasser, so verengen sich die Hautgefäße nicht bloß in dem gereizten Bezirk, sondern auf der ganzen Haut; taucht man das Bein in warmes Wasser, so breitet sich die lokale Rötung auf den ganzen Körper aus (BROWN-SÉQUARD). Vortrefflich ist dies Verhalten beim Kaninchen zu beobachten, dessen Ohrlöffel mit seiner großen Oberfläche als Thermoregulator funktioniert. Lokale Erwärmung irgendwie an einer größeren Hautpartie macht die Gefäße im Ohrlöffel weit und der Ohrlöffel wird aufgerichtet, so daß aus der von warmem Blut durchströmten Hautfalte reichlich Wärme an die kühlere Umgebung abfließen kann;

lokale Abkühlung bewirkt das Gegenteil. Endlich mag hier unter den Gefäßreflexen das Erröten und Erblassen aus psychischer Erregung, aus Freude oder Scham, aus Schreck oder Angst mit aufgezählt werden.

Bei allen diesen Gefäßreflexen handelt es sich darum, daß weit vom Reizort entfernte Gefäßgebiete in Tätigkeit treten, um teils im Interesse des ganzen Körpers, teils zugunsten des gereizten Bezirks für eine andere Blutverteilung zu sorgen. Demgegenüber gibt es aber auch unmittelbare und lokale Reaktionen der Gefäße, welche direkt die Bedürfnisse des erregten Teils nach einer geänderten Durchblutung befriedigen. Dahin gehört z. B. die lokale Rötung der Haut bei mechanischer, bei chemischer oder thermischer Reizung, welche teils auf Erregung der zugehörigen sensiblen Nerven zurückzuführen ist, also einen lokalen Reflex bedeutet, teils aber auch der direkten Reizbarkeit der Gefäße entspringt, wie wir sie vorher (S. 149) kennen gelernt haben. Dahin gehört dann vor allem die **funktionelle Gefäßerweiterung**, durch welche *dem tätigen Organ mehr Blut zugeführt wird als dem ruhenden*. Die Analyse dieser wichtigen Reaktion hat ergeben, daß sie keineswegs oder keineswegs bloß auf einer reflektorischen oder einer Mitinnervation von vasodilatierenden Nerven beruht, sondern auf der *Bildung bestimmter Stoffwechselprodukte*, welche in loco den Tonus der Gefäße herabsetzen.

Ein solcher Fall ist z. B. nach BARCROFT die Erregung der Submaxillärdrüse bei der Katze durch Reizung des Halssympathikus. Auf den Reiz hin wird nämlich die Durchblutung erst vermindert, dann unmittelbar nach Beginn der verstärkten Sekretion gesteigert, und danach kehrt sie wieder auf ihr normales Maß zurück. Natürlich liegt es nahe anzunehmen, daß die Vasodilatation von der Miterregung gefäßerweiternder Fasern, die neben den konstringierenden im Sympathikus verlaufen könnten, herrührt (siehe S. 147). Aber man kann die Vasokonstriktoren für sich mit Hilfe von Ergotoxin lähmen; dann bewirkt Reizung des Nerven nicht etwa reine Dilatation, sondern sie hat nun überhaupt keinen Effekt, weder Gefäßreaktion noch Sekretion. Also — kann man folgern — ist die vor der Vergiftung vorhanden gewesene Dilatation nicht auf die Anwesenheit von Dilatatoren zurückzuführen, sondern sie muß „funktionell“ sein. In der Tat läßt sich zeigen, daß die Dilatation nach der ersten konstriktorischen Phase nur dann erscheint, wenn die Drüse in Funktion tritt; man kann z. B. die Fähigkeit der Drüse zu sezernieren dadurch aufheben, daß man die Arteria submaxillaris eine Zeitlang abklemmt; stellt man dann die Zirkulation wieder her und reizt den Sympathikus, so hat er lediglich konstringierende Wirkung, während zu gleicher Zeit kein Speichel gebildet wird.

Fragt man nun nach Abbauprodukten des Organstoffwechsels, welche den Gefäßtonus zu lösen vermögen, so sind zwei Kategorien bekannt, erstens Säuren, wie Kohlensäure oder Milchsäure, zweitens ein basischer Abkömmling des Eiweißes, das Histamin (siehe S. 59); letzteres hat nach DALE schon in winzigen Dosen enorm dilatierende Fähigkeiten, erstere sind bei Sekretion im venösen Blut der Submaxillaris nachzuweisen.

Der Modus der funktionellen Gefäßerweiterung mittels chemischer Stoffwechselprodukte ist besonders zweckmäßig; denn da die vasodilatierenden Stoffe noch ins Blut übertreten zu einer Zeit, wo die Erregung des Organs schon vorüber ist, so dienen sie seiner Erholung, indem sie die reichlichere Durchblutung noch eine Weile fortbestehen lassen.

In den geschilderten Fällen ist die Änderung der Blutverteilung unter die verschiedenen Organe des Körpers meist entweder durch direkte Inspektion der Organgefäße festgestellt worden, oder dadurch, daß man maß, wieviel Blut aus der angeschnittenen Vene eines Organs unter

den verschiedenen Bedingungen ausfloß. Beide Beobachtungsarten sind aus naheliegenden Gründen nicht immer möglich. Sehr vielseitig ist dagegen die Bestimmung mit der sogenannten **plethysmographischen Methode**. Der *Plethysmograph* dient dazu, Volumänderungen eines

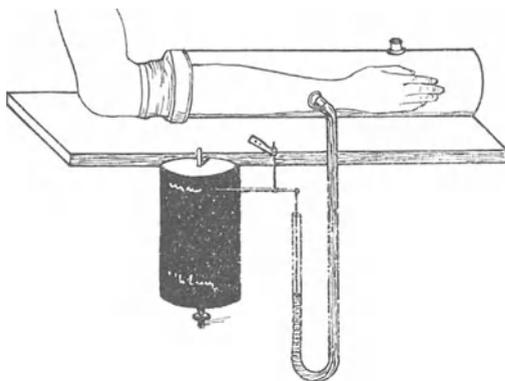


Abb. 57. Armplethysmograph nach A. Fick. Registrierung auf einem Kymographion.

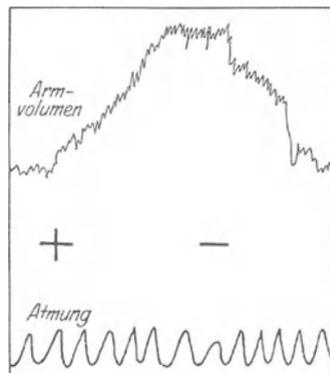


Abb. 58. Einfluß von Fußarbeit auf das Volumen des Arms (nach E. WEBER). Von + bis — wird Arbeit geleistet.

Körperteils zu registrieren. Abb. 57 zeigt z. B. einen Armplethysmographen nach Fick.

In das zylindrische Gefäß wird der Arm hineingesteckt und an seinem Austritt wasserdicht durch Gummi abgedichtet; dann füllt man den Zwischenraum zwischen Zylinderwand und Haut mit Wasser und registriert die Volumänderungen

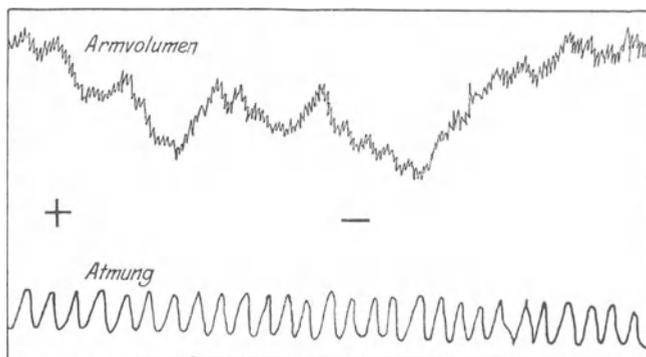


Abb. 59. Einfluß von Fußarbeit auf das Volumen des Arms bei starker Ermüdung (nach E. WEBER). Von + bis — wird Arbeit geleistet.

des Armes durch Luftübertragung mittels eines Wassermanometers oder einer MAREYSchen Kapsel (siehe Abb. 5 S. 35). Im vivisektorischen Experiment kann man auch einzelne freigelegte Organe in kleine, der Form des Organs angepaßte Kapseln hineinlegen, den Zwischenraum füllt man mit warmem Öl und dichtet am Austritt des Gefäßhilus aus der Kapsel mit Vaseline ab; einen solchen Apparat, wie ihn ROY zuerst für die Registrierung der Volumschwankungen der Niere bei ihrer Tätigkeit konstruierte, bezeichnet man als *Onkographen*.

Mit der plethysmographischen Methode sind zahlreiche Beobachtungen auch über die Blutverteilung beim Menschen ausgeführt worden. So wurde gezeigt, daß, wenn eine Extremität, z. B. der Unterschenkel, durch abwechselnde Dorsal- und Plantarflexionen des Fußes Arbeit leistet, nicht bloß dem Bein, sondern auch den Armen Blut in vermehrtem Maß zufließt (Abb. 58), daß aber, wenn der Körper durch starke Anstrengung, z. B. durch einen Dauerlauf, zuvor ermüdet ist, die gleiche Unterschenkelarbeit gerade umgekehrt statt einer Zunahme eine Abnahme der Armdurchblutung als objektives Zeichen der Ermüdung herbeiführt (E. WEBER) (siehe Abb. 59), oder es ist gezeigt, daß verschiedene psychische Erregungen je nach ihrer Art von einer Verschiebung des Blutes aus den Bauchorganen in die Muskulatur und in die Haut oder in der entgegengesetzten Richtung begleitet sind.

Kehren wir nunmehr zu den schon erwähnten **Schwankungen des arteriellen Blutdrucks** zurück, deren Analyse in vielen Fällen auf die eben erörterten Gefäßreaktionen führt. Die relative Konstanz des Blutdrucks, wie sie die manometrischen Messungen nachwiesen (siehe S. 146), erscheint uns verständlich als Ausdruck eines dynamischen Gleichgewichts zwischen der Muskelkraft des Herzens, welche das Blut in gleichmäßigem Rhythmus ins Arteriensystem eintreibt und dabei die Arterienwände dehnt, und der elastischen Kraft dieser Wände, welche das Blut in die Kapillaren entgegen deren Widerständen weitertreibt, wobei die Dehnung der Wände zurückgeht. Daraus ergeben sich *zwei Hauptmomente für die Änderungen des arteriellen Blutdrucks, nämlich Änderungen in der Größe des Zuflusses und Änderungen in den Widerständen gegen den Abfluß*; auf beide Weisen muß es zu Veränderungen der Dehnung der Arterienwände, also zu Schwankungen des Blutdruckes kommen.

Betrachten wir zuerst die *Änderungen der Widerstände*! Wir beginnen mit einem sehr starken Eingriff: durchschneidet man das Rückenmark unterhalb der Medulla oblongata, so sinkt der Blutdruck enorm, weil durch Ausschaltung des von dem Vasokonstriktorenzentrum der Medulla oblongata (S. 148) unterhaltenen Gefäßtonus der Widerstand in den Gefäßen des ganzen Körpers sinkt; das Blut kann also aus den Arterien leichter abfließen, und die elastischen Wände der Arterien entspannen sich. Das ist der Hauptgrund, es ist aber nicht der einzige Grund für die Drucksenkung, sondern, da der Tonus auch in den Venen sinkt, so bleibt das Blut in diesen sozusagen liegen, und dem Herzen fließt infolgedessen weniger Blut zu.

Den gleichen Effekt kann man auch durch chemische Mittel erreichen. Wenn man langsam Histamin intravenös injiziert (DALE und LAIDLAW), so sinkt der Blutdruck, obwohl das Herz sich nach wie vor ausgiebig zusammenzieht, allmählich tiefer und tiefer, weil die Kapillarwände mehr und mehr erschlaffen. Dazu kommt allerdings auch noch eine Steigerung der Durchlässigkeit der vergifteten Kapillaren, aus denen das Blutplasma in die Gewebe austritt, und wir werden bald (S. 156) sehen, daß eine Verminderung des Blutvolumens ebenfalls eine Blutdrucksenkung herbeiführen kann.

Das Gegenstück zu diesen Experimenten ist die starke Blutdrucksteigerung durch Reizung des Gefäßzentrums, welche entweder elektrisch oder „physiologischer“ etwa durch Erstickung, also durch das Mittel der Blutreize vorgenommen werden kann; ferner übt eine Adrenalininjektion durch Reizung der Sympathikusendigungen eine mächtige „pressorische“ Wirkung aus. Daher manifestiert sich ein Mangel an

Adrenalin, wie er infolge einer Nebennierenerkrankung beim sogenannten Morbus Addisoni (siehe Kap. 18) eintritt, in Niedrigstand des Blutdrucks.

In diesen Beispielen handelt es sich um pressorische oder depressorische Wirkungen dadurch, daß ganz allgemein die Schleusen für das Blut gesenkt oder gezogen werden. Geringere Effekte ergeben sich bei mehr lokalisierter Widerstandsänderung. Eine solche gehört zu dem *Depressorreflex*, welcher zum Teil schon früher (S. 137) erörtert wurde. Wird der als Nervus depressor bezeichnete zentripetale Vagusast, welcher in der Aortenwand entspringt, bei zu hohem Blutdruck durch Überdehnung der Aortenwand mechanisch gereizt, so geht die Erregung reflektorisch auf den zentrifugalen Vagus über, so daß das Herztempo verlangsamt wird. Zu dieser bereits genannten Reaktion gesellt sich aber noch eine reflektorische Gefäßerweiterung im Splanchnikusgebiet; dadurch sinkt der Widerstand in dem großen Bezirk der Baueingeweide und die gefährdete Aorta wird entlastet. Den depressorischen stehen *pressorische Reflexe* gegenüber, wie z. B. Reizung zahlreicher sensibler Nerven Blutdrucksteigerung dadurch verursacht, daß die vasokonstriktorischen Fasern des Nervus splanchnicus erregt werden (s. S. 149).

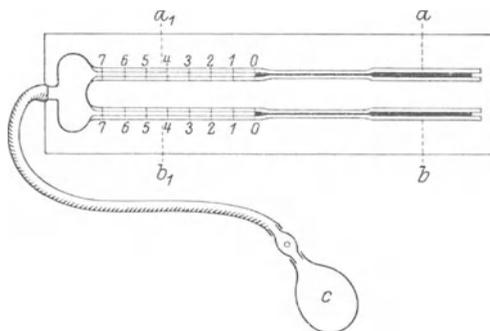


Abb. 60. Viskosimeter nach W. R. Hess.

Beschränkt sich die Widerstandsänderung auf ein einzelnes Organ, z. B. wenn bei seiner Betätigung die Gefäße weit werden, dann hat das auf den arteriellen Blutdruck so gut wie gar keine Rückwirkung; das Blut wird also dann — zum Vorteile des Organs — unter demselben Druck wie vorher, nur viel reichlicher hindurchgetrieben.

Eine Widerstandsänderung ganz anderer Art kann aus einer Änderung in der Zusammensetzung des Blutes resultieren. Wir sahen, daß der Gefäßwiderstand von der Adhäsion des Blutes an der Gefäßwand und von der inneren Reibung bei der Verschiebung der einzelnen Blutschichten gegeneinander abhängt (siehe S. 141). Diese *innere Reibung* oder *Viskosität* kann nun größer oder kleiner werden. Man mißt sie mit einem sogenannten *Viskosimeter*.

Ein Instrument, welches speziell für die Untersuchung des Blutes von W. R. Hess konstruiert ist, ist in Abb. 60 angedeutet: zwei gleiche Rohre a und b und die daran anschließenden gleich langen und gleich weiten Kapillaren werden bis zur Marke 0 mit Wasser bzw. mit Blut gefüllt; dann werden die beiden Flüssigkeiten gleichzeitig mit Hilfe des Gummiballes c in die graduierten Rohre a_1 und b_1 angesogen. Die in gleichen Zeiten von den Flüssigkeiten durchlaufenen Wegstrecken stehen im umgekehrten Verhältnis zur Viskosität; saugt man also das Blut bis zur Marke 1, so gibt die Marke, bis zu welcher das Wasser dann gelangt ist, die relative Viskosität des Blutes an.

Die Viskosität hat beim menschlichen Blut ungefähr den Wert 5. Der Wert ist vor allem abhängig vom Blutkörperchenvolumen, d. h. im wesentlichen von der Blutkörperchenzahl. Daher kann der Widerstand in der Gefäßbahn z. B. bei Bluteindickung infolge schwerer Diarrhöen, wie etwa bei der Cholera, stark vermehrt sein. Die Viskosität sinkt dagegen bei Aderlaß, weil dabei das Blut durch eintretendes Gewebwasser verdünnt wird (s. S. 156). Die Viskosität des Serums ist nur ungefähr 1,5mal so groß wie die des Wassers.

Gehen wir nun zu den arteriellen Blutdruckschwankungen durch *Änderungen des Blutzuflusses* zum Gefäßsystem über! Dahin gehört besonders der Einfluß der Änderung des *Herztempos*. Schlägt das Herz langsamer, so wird im allgemeinen weniger Blut in die Arterien geworfen und die elastischen Elemente der Gefäßwände können sich entspannen; demnach sinkt der Blutdruck. So erzeugt eine nicht zu schwache Vagusreizung eine Blutdrucksenkung, wie sie in Abb. 61 dargestellt ist. Auf-

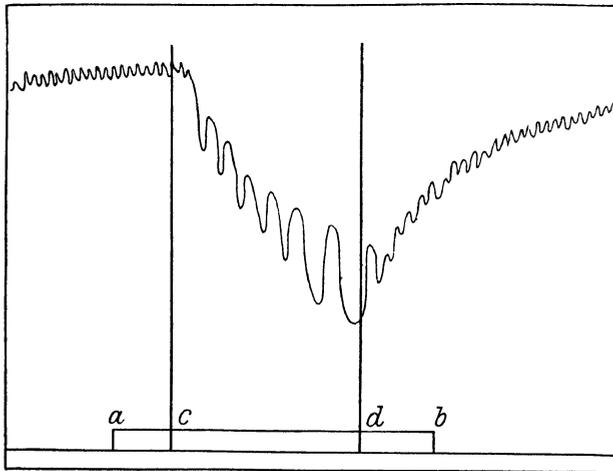


Abb. 61. Einfluß einer mittelstarken Vagusreizung auf den Blutdruck.
Reizdauer von c bis d (a — b = 10 Sekunden).

fallend sind während der Senkung die hohen, mit dem Herzschlag synchronen Pulse; sie rühren davon her, daß die Arterienwände zwischen den einzelnen Systolen Zeit finden, sich ziemlich weitgehend zu entspannen. Reizt man den Vagus stark, so bleibt das Herz in Diastole stehen, und der Blutdruck sinkt eventuell bis auf Null ab. Die Vaguswirkung auf das Tempo spielt, wie gesagt, bei dem Depressorreflex mit hinein; die Reizung des Depressor setzt daher nicht bloß durch die reflektorische Gefäßerweiterung im Gebiet des Splanchnikus den Blutdruck herab, sondern auch durch die Frequenzverminderung. Umgekehrt wie die Herabsetzung des Tempos wirkt im allgemeinen die Beschleunigung, wie sie z. B. im Zusammenhang mit einer kräftigen Muskelaktion zustande kommt (S. 138).

In allen diesen Fällen kann aber eine mit der Frequenzänderung gleichzeitig erfolgende Änderung des „*Schlagvolumens*“ den Effekt komplizieren. Unter dem Schlagvolumen versteht man die durch einen einzelnen Herzschlag ausgeworfene Blutmenge (siehe S. 161). Im allgemeinen nimmt nun das Schlagvolumen ab, wenn das Tempo zunimmt.

Daher können eventuell die Änderungen des Tempos und des Schlagvolumens einander kompensieren, es kann sogar vorkommen, daß die Wirkung des verringerten Schlagvolumens die Temposteigerung überkompensiert; so sinkt der Blutdruck oft prä mortal trotz „fliegender Pulse“ mehr und mehr herunter. Wenn das Schlagvolumen im allgemeinen bei Frequenzzunahme sinkt, so hat das zum Teil seinen einfachen Grund darin, daß bei kürzeren Herzpausen das Herz sich weniger reichlich von den Venen her füllen kann, als sonst, so daß ihm auch nur weniger Blut für den Austrieb zur Verfügung steht. Aber auch am leeren ausgeschnittenen Herzen ist zu konstatieren, daß das Kontraktionsausmaß gewöhnlich um so geringer ist, je schneller der Schlag. Wichtig ist, daß es Pharmaka gibt, welche bei geeigneter Dosierung unabhängig von einem Einfluß auf das Tempo die Systole und die Diastole verstärken, also das Schlagvolumen vergrößern; dahin gehören z. B. die für den Arzt so wertvollen Digitalissubstanzen.

Mit den Änderungen im Blutzufuß zum arteriellen System hängen auch in der Hauptsache die *respiratorischen Blutdruckschwankungen* zusammen, welche auf der Abb. 62 (ebenso wie auf Abb. 55, S. 146) verzeichnet sind. Sie kommen nicht regelmäßig vor, und wenn sie vorkommen,

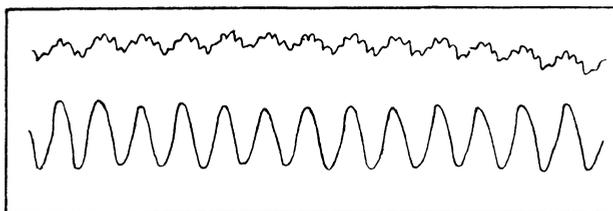


Abb. 62. Respiratorische Blutdruckschwankungen beim Kaninchen.
Oben Blutdruck, unten Atmung.

sind sie sehr verschieden deutlich. Beim Hund beobachtet man gewöhnlich inspiratorischen Anstieg und expiratorischen Abfall des Druckes.

In Betracht kommt dafür in der Hauptsache: 1. daß im Inspirium die Lungenkapillaren weiter sind, als im Expirium, so daß die Lungen mehr Blut fassen und im Laufe der Inspiration mehr Blut in das linke Herz übertreten lassen, 2. daß inspiratorisch die Herzfrequenz steigt (S. 138), 3. daß während der Inspiration durch den gesteigerten negativen Druck im Thorax (siehe S. 107) mehr Blut ins Herz gesogen wird. Dies Moment kann allerdings ebensowohl als blutdrucksteigernd wie als blutdrucksenkend aufgefaßt werden; denn einerseits wird wohl das Blut durch den negativen Druck im Herzen zurückgehalten, andererseits kommt aber auch die stärkere Füllung des Herzens dem arteriellen Blutdruck zugute. Ein depressorischer Faktor ist auch das inspiratorische Nachlassen des von der Medulla oblongata aus unterhaltenen Gefäßtonus. Nach all dem ist also die respiratorische Druckschwankung ein recht verwickeltes Phänomen.

Man beobachtet außerdem gelegentlich auch periodische Blutdruckschwankungen unabhängig von der Atmung, wie die sogenannten *TRAUBE-HERING'schen Wellen*. Sie erscheinen besonders bei Sauerstoffmangel bzw. bei Kohlensäureüberladung im Blut. Ihre Unabhängigkeit von der Atmung manifestiert sich besonders deutlich, wenn man bei einem Tier den Thorax eröffnet, beide Vagi durchschneidet, und die eingeleitete künstliche Atmung dann nur mangelhaft unterhält. Es handelt sich wohl um die Wirkung einer rhythmischen Tätigkeit des Gefäßzentrums, vergleichbar dem autochthonen Rhythmus des Atemzentrums oder

vergleichbar dem Rhythmus des CHEYNE-STOKESSchen Atmens, das ja unter ähnlichen Bedingungen auftritt, wie die TRAUBE-HERINGSchen Wellen (siehe S. 116). Aber auch die ausgeschnittenen Blutgefäße zeigen bei Körpertemperatur rhythmische Zusammenziehungen.

Änderungen sowohl im Blutzufuß zu den Arterien als auch in den Widerständen sind bei den Beobachtungen über den *Einfluß der Blutmenge auf den Blutdruck* in Frage zu ziehen. Schwankungen der Blutmenge kommen nämlich unter zweierlei wichtigen Verhältnissen in Betracht, erstens bei Blutverlusten infolge einer Verletzung, zweitens bei Transfusionen, d. h. intravenösen Einläufen, welche, besonders klinisch, aus verschiedenen Gründen gemacht werden. In beiden Fällen könnte man eine bedeutende Druckänderung, einen Druckanstieg bei Transfusion, einen Abfall bei einer Verblutung erwarten; beides ist nicht der Fall. Sucht man nämlich die Blutmenge durch Transfusion zu vermehren, so wird das Gefäßsystem alsbald von einem großen Teil des Flüssigkeitsüberschusses wieder befreit, teils durch Aufnahme in die Gewebe, teils durch Übertritt in die serösen Höhlen und teils durch die Tätigkeit der Nieren und anderer Drüsen; ferner verringert sich der Gefäßtonus besonders in dem viel Flüssigkeit fassenden Gebiet der Bauchorgane, und da schließlich auch bei manchen Transfusionen, z. B. von physiologischer Kochsalzlösung, die Viskosität des Blutes sinkt, so kommt es nur vorübergehend zu einem Druckanstieg. Tritt andererseits ein großer Blutverlust ein, so hält sich der Druck lange Zeit dadurch auf seiner normalen Höhe, daß erstens Gewebswasser in die Blutbahn eindringt, daß zweitens alle Sekretionen eingeschränkt werden, und daß endlich der Gefäßtonus, besonders im Splanchnikusgebiet, zunimmt. Erst, wenn mehr als die Hälfte Blut verloren gegangen ist, tritt unter rapidem Druckabfall der Tod ein.

Will man dieser Gefahr klinisch durch eine rasche Transfusion begegnen, so läßt sich der Blutdruck weit leichter hochhalten, wenn man statt einer physiologischen Salzlösung eine Salzlösung mit einem Zusatz von etwa 7% Gummi arabicum verwendet (BAYLISS); dadurch wird der allzu rasche Übertritt der Salzlösung in die Gewebe und in den Harn verhindert. Für Gummi ist nämlich, wie für die Serumeiweißkörper (S. 76), die Kapillarwand undurchlässig; diese üben nach STARLING einen osmotischen Druck von etwa 30—35 mm Hg aus. Der Blutdruck in den Kapillaren ist also nicht größer als dieser osmotische Druck (s. S. 147), so daß der Kapillardruck gewöhnlich nicht ausreicht, Flüssigkeit ins Gewebe hinein zu filtrieren. Transfundiert man nun aber eine physiologische Salzlösung, so wird dadurch, d. h. durch Verdünnung des Plasmas, der von den Eiweißkörpern herrührende osmotische Druck erniedrigt, und entsprechend kann Flüssigkeit die Blutbahn verlassen. Dies geschieht aber nicht, wenn man durch Mitinjektion von Gummi oder einer anderen kolloidalen Substanz, für die die Kapillarwand impermeabel ist, das Eiweiß als osmotisch wirksamen Stoff ersetzt.

Zum Schluß bleiben noch die mit dem Herzschlag synchronen allgemein bekannten Blutdruckschwankungen zu analysieren, welche als *Puls* bezeichnet werden. Bekanntlich fühlt und sieht man den Puls an Orten, an denen Gefäße oberflächlich unter der Haut verlaufen, man fühlt ihn am besten dort, wo ein Knochen die Unterlage bildet; daher beobachtet man den *Arterienpuls* vorzugsweise an der Arteria radialis, an der Arteria temporalis oder an der Arteria dorsalis pedis. Den *Venenpuls* fühlt man am besten an der Vena jugularis externa. Will man den Puls graphisch registrieren, so geschieht es im vivisektorischen Experiment am besten mit einem Federmanometer, das man durch eine Kanüle an eine Arterie anschließt (siehe S. 145); man sieht dann, daß die Druck-

schwankung des Pulses etwa ein Drittel des minimalen Blutdrucks ausmacht. Die Registrierung beim Menschen kann entweder plethysmographisch vorgenommen werden (S. 151) — da sich den langsamen Schwankungen des Organvolumens, welche im allgemeinen den Schwankungen des arteriellen Zuflusses oder des venösen Abflusses entsprechen, stets die kurzen periodischen Volumschwankungen des Pulses überlagern (siehe Abb. 58 und 59, S. 151) —, oder sie geschieht mit einem sogenannten *Sphygmographen*, dessen wesentlicher Teil bei den meisten Ausführungen ein System von Winkelhebeln ist, welches die Druck-Volumschwankungen des Pulses auf eine bewegte Schreibfläche überträgt. Die beste Konstruktion ist der Sphygmograph von FRANK und PETER; sein Hebelsystem ist in der Abb. 63 schematisch dargestellt. Ein damit verzeichnetes normales „Sphygmogramm“ ist in Abb. 64 wiedergegeben.

Die an dem Hebel *a* angebrachte Pelotte *p* wird über der pulsierenden Stelle befestigt, ihre Bewegungen werden durch die Hebel *c* und *b* auf die Schreibfläche *s* übertragen. f_1 , f_2 und f_3 sind spannende Federn.

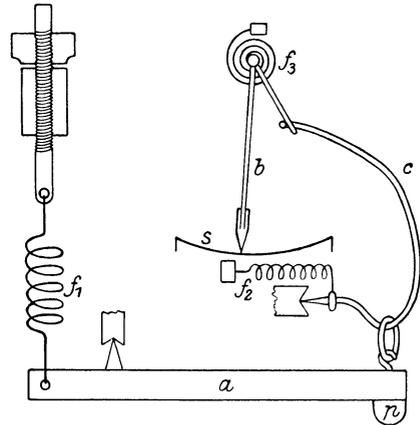


Abb. 63. Sphygmograph nach FRANK und PETER.

Das *Sphygmogramm* besteht in seinen Hauptzügen aus einem steil aufsteigenden und einem flacher abfallenden Schenkel. Während der Anstieg geradlinig verläuft, ist der Abfall kompliziert; er ist erstens anfangs am steilsten und verliert dann mehr und mehr an Steile, zweitens enthält er eine oder mehrere sekundäre Erhebungen. Die eine derselben ist so deutlich, daß man deshalb den

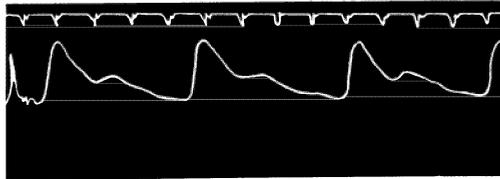


Abb. 64. Sphygmogramm der Art. radialis (nach FRANK und PETER).
Oben $\frac{1}{5}$ Sekunden-Marken.

normalen Puls als doppelschlägig oder als „dikrot“, speziell als dikrot-katakrot bezeichnet, weil die zweite Erhebung auf dem absteigenden Kurvenast gelegen ist.

Die Deutung der Kurve ist trotz endloser Diskussionen strittig. Gehen wir für ihre Analyse von dem Modell eines dünnwandigen, mit Wasser gefüllten, an seinen beiden Enden verschlossenen Gummischlauchs aus; wenn man an dem einen Ende auf den Schlauch schlägt, so entsteht neben der geschlagenen Stelle durch Dehnung eine Ausbuchtung und eine Drucksteigerung, welche sich wellenförmig über den Schlauch fortpflanzt. Die Geschwindigkeit, mit welcher die Welle über den Schlauch hineilt, hängt von der Elastizität der Wand ab. Am Ende des Schlauchs

angekommen, wird die Welle reflektiert, eilt zurück, wird am anderen Ende abermals reflektiert und so fort, bis sie sich durch Verbrauch der elastischen Energie und durch Reibung der verschobenen Flüssigkeitsteilchen verzehrt hat.

In ähnlicher Weise entsteht eine Schlauchwelle im Gefäßsystem, wenn an seinem einen Ende durch die Ventrikelsystole ein Blutquantum eingepreßt wird. Der Druckanstieg bis zum Wellenberg erfolgt, wie die Pulskurve zeigt, steil, entsprechend der Raschheit der Systole. Der Druckabfall geht langsamer vor sich; denn das Blut wird aus der ausgebuchteten Stelle durch die elastischen Kräfte der gedehnten Wandung herausgedrängt, kann jedoch wegen des Schlusses der Semilunarklappen nicht in das diastolisch schlaife Herz zurückfallen, sondern muß distal in das enge Kapillargebiet ausweichen; die elastischen Kräfte, welche unmittelbar nach der Ausbuchtung maximale sind, lassen aber mit der Entspannung der Wand mehr und mehr nach.

Die Druckschwankung pflanzt sich mit großer Geschwindigkeit über das Gefäßsystem fort. Legt man einen Finger an die Karotis, einen anderen an die Radialis, so fühlt man den Puls zwar fast synchron, aber an der Radialis doch deutlich etwas später, als an der Karotis. Genaue Messungen lehren, daß der Karotispuls etwa 0,1'', der Radialis puls 0,17'', der Fußpuls 0,24—0,28'' später auftritt als die Ventrikelsystole. Daraus ergibt sich eine *Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Pulswelle* von 6—9 m pro 1'' (E. H. WEBER). Diese Geschwindigkeit ist jedoch nicht mit der Geschwindigkeit des Blutstroms zu verwechseln; das vorher verwendete Modell des beidseitig geschlossenen wassergefüllten Schlauchs lehrt ja, daß eine große Pulsgeschwindigkeit mit einer Stagnation der Flüssigkeit Hand in Hand gehen kann; bei der Ausbreitung der Druckschwankung bewegen sich die Wasserteilchen nur in geschlossenen elliptischen Bahnen auf und ab.

Ob eine dem Modell entsprechende Reflexion der Pulswelle am Ende des Arteriensystems stattfindet, ist unsicher. Mit dem Modell ist das Arteriensystem nicht direkt zu vergleichen, da die Arterien sich mehr und mehr verzweigen und am Ende in das Kapillargebiet münden. Die Pulswelle geht zwar nicht ins Kapillargebiet über, aber das beruht darauf, daß sie durch die Verzweigungen und die Reibungswiderstände mehr und mehr gedämpft wird. Von manchen werden die kleinen Erhebungen auf der Pulswelle, welche neben der dikroten Erhebung öfter zu sehen sind, als Ausdruck hin und her gehender reflektierter Wellen angesehen.

Auch die Deutung der *dikroten Erhebung* ist unsicher. Es gibt hauptsächlich zwei Theorien für ihre Entstehung. Nach der einen (MAREY u. a.) kommt sie dadurch zustande, daß, wenn unmittelbar nach der Systole der Ventrikel der steile diastolische Druckabfall im Herzen einsetzt (siehe Abb. 50, S. 135), die Semilunarklappen, welche nun unter dem einseitigen Druck von der Aorta her stehen, ventrikelwärts ausweichen, und daß auch durch das Zurückgehen der Muskelpolster, welche die Semilunarklappen stützen, Raum gewonnen wird; so nimmt die Geschwindigkeit des Vorwärtsströmens des Blutes für eine kurze Zeit erheblich ab, der Pulsdruck sinkt daher nach dem anfänglichen systolischen Anstieg rasch. Sind dann aber die Semilunarklappen geschlossen, so erhöht sich die Geschwindigkeit wieder, und hinzu kommt, daß an den Klappen, indem sie sich schließen, im Blut Wirbelbewegungen erzeugt werden, welche einen Druckzuwachs bewirken. Nach der zweiten Theorie (v. FREY) wird die von der Systole herrührende Pulswelle an der Peripherie reflektiert, eilt bis zu den inzwischen geschlossenen Semilunarklappen zurück, wird dort abermals reflektiert, und tritt nun als dikrote Erhebung in Erscheinung.

Die Deutung der Pulskurve wird mehr oder weniger durch klinische Beobachtungen gestützt. So ist danach vorauszusehen, daß, wenn etwa infolge entzündlicher Prozesse die Aortenklappen zum Teil verwachsen und dadurch das

Aortenostium „stenosiert“ ist, der aufsteigende Schenkel der Pulscurve nicht die gewöhnliche Steilheit, sondern einen flacheren Verlauf aufweist (sogenannter *Pulsus tardus*) (siehe Abb. 65), und daß bei einer mangelhaften Schließfähigkeit, bei einer „Insuffizienz“ der Aortenklappen der im großen ganzen flache Abfall durch ein rapides Absinken ersetzt ist, davon herrührend, daß das Blut nun diastolisch in den Ventrikel zurückfallen kann (sogenannter *Pulsus celer*, siehe Abb. 66).

Eine ganz andere Entstehung als der Puls der Arterien hat der *Venenpuls*. Das wird sofort klar, sobald man etwa Karotis- und Jugularispuls gleichzeitig verzeichnet; denn dann bemerkt man, daß die Hauptgipfel der Kurven nicht zusammenfallen, sondern alternieren. Die Haupterhebung des Venenpulses ist synchron mit der Atriensystole; sie bedeutet aber nicht ein Rückwärtsströmen des Blutes vom Herzen in die Venen, sondern nur eine Verzögerung des Einströmens ins Herz infolge der Widerstandserhöhung durch die Atriensystole. Der Venenpuls ist nur in der Nähe des Herzens zu spüren; weiterhin ist er durch die Wirkung der Venenklappen ausgeschaltet.

Die Füllung des Herzens von den Venen her bedarf noch einer genaueren Erörterung. Die kinetische Energie des Blutes wird auf dem Weg durch das Gefäßsystem, namentlich durch das Kapillargebiet fast

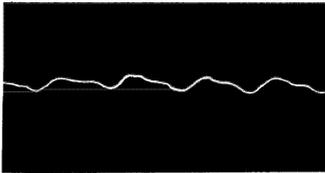


Abb. 65. Pulsus tardus bei Aortenstenose.

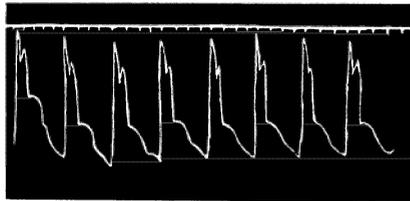


Abb. 66. Pulsus celer bei Aorteninsuffizienz.

ganz aufgezehrt; so wirken noch andere Momente außer der vom Herzen herkommenden *vis a tergo*, um das Blut schließlich ins Herz zurückzuführen.

Es wurde bereits erwähnt, daß der *Blutdruck in den Venen* in der Nähe des Herzens unter Null sinkt; das ist ein Zeichen dafür, daß das Blut ins Herz zurückgesogen wird. Deswegen besteht, wie ebenfalls früher (S. 107) erwähnt wurde, bei Operationen in der Nähe des Thorax die Gefahr der *Luftembolie* infolge der Verletzung einer Vene. Der negative Druck rührt von der *Saugkraft der Lungen*, von dem DONDERSSCHEN negativen Druck im Thorax her (S. 107). Die Lungen üben durch die Spannung ihrer elastischen Fasern auf sämtliche nachgiebigen Teile ihrer Umgebung einen Zug aus. So saugen sie an den Venenwandungen und an den diastolisch weichen Atrien und Ventrikeln. Darum nimmt die Negativität des Blutdruckes in den Venen inspiratorisch zu und expiratorisch ab; darum vergrößert sich der Röntgenschaten des Herzens deutlich bei einer tiefen Inspiration und verkleinert sich bei einer tiefen Expiration. Exspiriert man aber besonders kräftig bei geschlossener Glottis unter Zuhilfenahme der Bauchpresse, dann steigt der Venendruck auf positive Werte, das Blut in den Venen staut sich, es steigt auch der Kapillardruck. So kann es kommen, daß bei heftiger Ausübung der Bauchpresse brüchige Gefäße bersten; deshalb wird beim Arteriosklerotiker vom Arzt die Neigung zu Obstipationen bekämpft.

Dem Transport des Venenblutes ins Herz ist auch das Vorhandensein und die Anordnung der *Venenklappen* förderlich. Jeder Druck von außen auf eine Vene entleert diese herzwärts, da die Klappen die Strömung in der Gegenrichtung verhindern. Solch einen Druck übt fast jeder Skelettmuskel bei seiner Kontraktion aus, und daher unterstützen Körperbewegungen jeder Art, zumal systematische, rhythmisch ausgeführte Freiübungen die Blutzirkulation. Auch das instinktive Dehnen und Recken des Körpers morgens und nach längerem Sitzen regt den Kreislauf an, da die Venen bei der Streckung des Körpers, der Beine und der Arme mehr Blut fassen, als bei gebeugter Haltung. Speziell das Gehen wirkt auch dadurch anregend auf die Blutbewegung in den Venen, daß bei jeder Streckung des Oberschenkels die Vena femoralis unter dem Ligamentum inguinale sich leert und bei jeder Beugung sich von neuem füllt; so pumpt das Gehen das Venenblut aus den Beinen nach oben (BRAUNE).

Der Füllung des Herzens wirkt bei den häufigsten Körperhaltungen die *Schwerkraft* entgegen. Bestände das Gefäßsystem aus starren Röhren, so wäre sie freilich ohne Belang, weil Arterien und Venen kommunizierende Röhren bilden, bei denen der Inhalt des einen Schenkels den des anderen äquilibriert. Aber da es sich um Röhren mit dehnbaren Wandungen handelt, so wird der hydrostatische Druck in den tiefst gelegenen Teilen, z. B. in den herabhängenden Füßen und Händen die Gefäße auszuweiten suchen, wie etwa bei einem Gummischlauch, welchen man mit Quecksilber füllt. Sind die Gefäßwände also allzu nachgiebig, so kommt es zur Bildung von „Krampfadern“ und dergleichen und zu relativer Stagnation des Blutes. Die Resistenz der Gefäße gegen deh nende Einwirkungen ist aber wesentlich von zwei Faktoren bestimmt, erstens von ihrer Elastizität, und zweitens von ihrem Muskeltonus, und letzterer ist von der Gewöhnung und von der Übung abhängig. Das Kaninchen, das seiner normalen Hockstellung entsprechend ganz bestimmte Gefäßgebiete in Tonus hält, stirbt, wenn man es eine Zeitlang gestreckt mit dem Kopf nach oben hält, weil das Blut sich in den unteren Körperteilen ansammelt, an deren Tonisierung es nicht gewöhnt ist, und aus dem Kopf abfließt, Kranke, die lange bettlägerig waren, werden ohnmächtig, wenn sie sich aufrichten, weil der Tonus der tief liegenden Teile sich nicht gleich wieder herstellt; dagegen Turner, welche geübt sind, ihren Körper alle möglichen Haltungen einnehmen zu lassen, haben zugleich so viel „Gymnastik der Gefäßmuskulatur“ getrieben, daß ihnen das Blut auch nicht zu Kopf steigt, wenn dieser nach unten hängt.

Wir wenden uns nun zur Erörterung des zweiten Indikators für die Ausnützung der Herzenergie neben dem Druck (S. 145), nämlich zur Erörterung der **Blutgeschwindigkeit**. Die Modellstudien ließen voraussehen, daß die Blutgeschwindigkeit in den Arterien groß, in den Kapillaren klein, und in den Venen wieder groß sein würde (siehe das Schema Abb. 53, S. 143); das Experiment hat die Voraussage bestätigt. An den großen Gefäßen mißt man die Geschwindigkeit durch vivisektorisches Experiment mit Hilfe einer *Stromuhr*; dabei wird die notwendige Bedingung eingehalten, daß der Widerstand in der Gefäßbahn annähernd unverändert bleibt.

Die Stromuhr von C. LUDWIG (siehe Abb. 67) ist ein U-förmiges Rohr mit zwei Erweiterungen A und B, welches in die beiden Enden des durchschnittenen Gefäßes eingesetzt wird, nachdem die beiden Enden vorher durch Ligatur ver-

geschlossen waren. Die Erweiterung B ist mit physiologischer Kochsalzlösung bis zur Marke b gefüllt, die Erweiterung A sowie das Verbindungsstück C mit Petroleum. Öffnet man nun die Ligaturen, so treibt das Herz die Kochsalzlösung ins periphere Gefäßstück aus, das Petroleum füllt allmählich B, während in A an Stelle von Petroleum Blut tritt. Die Stromuhr ist nun so eingerichtet, daß, sobald B mit Petroleum, A mit Blut gefüllt ist, das ganze U-Rohr auf seinem Fuß um 180° gedreht werden kann, so daß B an die Stelle von A und A an die Stelle von B rückt. Das in A befindliche Blut kann jetzt also in das periphere Gefäßstück übertreten, und so fort. Kennt man das Volumen von A bzw. von B und zählt wie oft man in einer Minute die Stromuhr wenden muß, so kann man die Volumgeschwindigkeit des Blutes berechnen, d. h. die Menge Blut, welche in einer Minute den Gefäßquerschnitt passiert. Mißt man ferner den Gefäßquerschnitt, so erhält man durch Division der Volumgeschwindigkeit durch den Querschnitt die lineare Geschwindigkeit.

Für die Arterien größerer Säugetiere ist so eine Geschwindigkeit von 10—50 cm, für Venen eine Geschwindigkeit von etwa 20 cm pro Sekunde berechnet. Die Geschwindigkeit in den Kapillaren mißt man direkt unter dem Mikroskop durch Beobachtung der Verschiebung der Blutkörperchen entlang einem Mikrometer. Man findet Werte von 0,05—0,08 cm pro Sekunde.

An den mikroskopisch sichtbaren kleinen Arterien kann man auch sehen, daß die Geschwindigkeit keine kontinuierliche ist, sondern synchron mit der Herzsysteme anwächst und in der Herzdiastole und Herzpause abschwilt. Diese pulsatorische Erscheinung verliert sich aber meist in den Kapillaren, es sei denn, daß die Blutdruckschwankungen, welche das Herz in den Arterien erzeugt, ausnehmend große sind; dann bekommt man auch einen *Kapillarpuls* zu sehen, welcher eventuell auch ein periodisches Erröten und Erblassen der Haut verursacht.

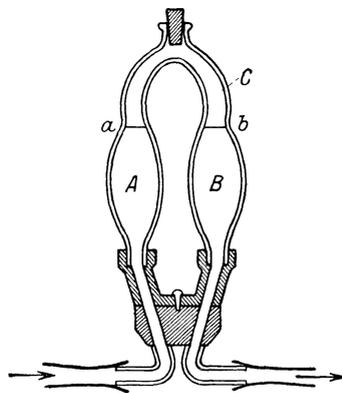


Abb. 67. Stromuhr von C. LUDWIG.

Die Geschwindigkeit des Blutes ist nicht in allen Teilen eines Gefäßquerschnittes gleich groß, sondern sie ist axial am größten und an der Wand am kleinsten; das folgt, wie wir schon (S. 142) sahen, aus dem Vorhandensein der inneren Reibung. Die mittlere Blutgeschwindigkeit in einem Gefäß ist ungefähr gleich der Hälfte der maximalen, d. h. der axialen. Da die roten Blutkörperchen spezifisch schwerer sind, als das Plasma, so sammeln sie sich in der Achse; im Strom der Randpartien bewegen sich dagegen die weißen Blutkörperchen.

Schaltet man die Stromuhr in die Aorta ein, so kann man erfahren, wie groß das **Schlagvolumen** des Herzens ist, d. h. die Menge Blut, welche mit einer einzigen Systole aus dem (linken) Herzen ausgeworfen wird. Das Schlagvolumen ist gleich der Volumgeschwindigkeit dividiert durch die Zahl der in der Zeiteinheit erfolgenden Pulsschläge. Beim Menschen hat man das Schlagvolumen auf indirektem Wege zu bestimmen versucht. Man setzt zu einem Luftquantum eine abgemessene Menge eines indifferenten Gases, welches vom Blut rein physikalisch absorbiert wird (S. 93), z. B. Stickoxydul, läßt eine kurze Zeit hindurch dies Gasgemisch atmen, bestimmt hinterher, wieviel von dem indifferenten Gas noch vorhanden ist, und berechnet aus dem Defizit und aus dem Absorptionskoeffizienten

des Gases, wieviel Blut in der Versuchszeit die Lungen passiert hat. Ebensoviel Blut muß dann in der gleichen Zeit vom Herzen ausgetrieben worden sein, und durch Division durch die in der Versuchszeit ausgeführte Zahl von Systolen erhält man das Schlagvolumen (BORNSTEIN, FRANZ MÜLLER, LINDHARD). Das Schlagvolumen kann bei Arbeitsleistung den Ruhewert, 50—100 ccm, um das 3—4fache übertreffen.

Mit Hilfe des Werts für das Schlagvolumen kann man die **Herzarbeit** bei einer Systole näherungsweise berechnen. Die Herzarbeit setzt sich aus zwei Summanden zusammen, nämlich erstens aus der Arbeit $p v$, die aufzuwenden ist, um gegen den Druck p in die Aorta das Schlagvolumen v auszutreiben, und zweitens aus der Arbeit $\frac{1}{2} m V^2 = \frac{1}{2} P V^2 / G$, durch die der Masse m bzw. dem Gewicht P des Schlagvolumens eine bestimmte Geschwindigkeit V erteilt wird ($G =$ Konstante der Erdbeschleunigung). — Setzen wir das mittlere Schlagvolumen eines Ventrikels zu 75 ccm, den Druck in der Aorta zu 150 mm Hg oder ungefähr 200 g/cm², so beträgt der erste Summand der Herzarbeit für den linken Ventrikel $p v = 200 \cdot 75 \text{ gcm} = 0,15 \text{ kgm}$. Der zweite Summand beträgt, wenn wir die Geschwindigkeit in der Aorta zu 50 cm ansetzen, $\frac{75 \cdot 2500}{2 \cdot 981} \text{ gcm}$, ist also neben

dem ersten Summanden zu vernachlässigen. — Für den rechten Ventrikel beträgt die Arbeit ungefähr $\frac{2}{5}$ von dem Wert für den linken, also 0,06 kgm; denn der Druck in der Art. pulmonalis beträgt etwa $\frac{2}{5}$ des Aortendrucks, das Schlagvolumen muß aber rechts und links gleich groß sein, da in der Zeiteinheit durch jeden Querschnitt der Blutbahn gleich viel hindurchfließt und rechtes und linkes Herz synchron agieren. Die Arbeit einer Systole beträgt demnach $0,15 + 0,06 = 0,21 \text{ kgm}$. Das macht bei einer Pulsfrequenz von 70 pro Minute in einem Tage rund 21 000 kgm.

Diese Arbeit wird nicht gespeichert, sondern im Körper gleich beim Entstehen wieder vernichtet, nämlich in Reibungswärme umgesetzt; nach dem mechanischen Wärmeäquivalentumgerechnet ergeben die 21 000 kgm ca. 50 große Kalorien. Tatsächlich erzeugt der Herzmuskel aber viel mehr Wärme, nämlich ungefähr das Dreifache, da er ähnlich wie die technischen Maschinen die von ihm verbrauchte chemische Energie nur zu etwa ein Drittel in Arbeit umsetzen kann (s. Kap. 13 u. 20). Der Kalorienbedarf des Herzens beträgt danach täglich etwa 150 Kalorien; da wir den Gesamtkalorienverbrauch des Körpers zu etwa 3000 Kalorien ansetzen können (s. Kap. 13), so verzehrt das Herz $\frac{1}{20}$ davon.

Von der Blutgeschwindigkeit hängt auch die **Umlaufszeit** ab, d. h. die Zeit, welche ein Blutteilchen braucht, um den gesamten Kreislauf durchzumachen. Sie ist zuerst von ED. HERING in der Weise gemessen, daß in eine Vena jugularis externa in einem bestimmten Moment Ferrozyankali eingespritzt und dann aus der Jugularvene der anderen Seite Blut in einzelnen kleinen Portionen entnommen und der Augenblick festgestellt wurde, wo zuerst im Plasma mit Eisenchlorid eine Bläuung eintrat. SMITH injizierte statt Ferrozyankali Taubenblut und untersuchte die Blutproben auf die Anwesenheit der elliptischen Blutkörperchen. HERING fand beim Pferd eine Umlaufszeit von 32'', beim Hund von 17'', bei der Katze von 7''; jedesmal war der Umlauf nach etwa 27 Herzschlägen vollzogen. Daraus errechnet sich für den Menschen eine Umlaufszeit von etwa 22''. Es ist jedoch zu bedenken, daß diese Zeit eine Minimalzeit sein kann, entsprechend der maximalen Blutgeschwindigkeit, wie sie in der Achse der Blutgefäße besteht. Die *mittlere Umlaufszeit* wird etwa den doppelten Betrag haben (S. 161). Man kann die Umlaufszeit auch indirekt bestimmen, indem man aus der Gesamtblutmenge (S. 90 und 98) und dem Schlagvolumen die Anzahl von Herzschlägen berechnet, durch welche das gesamte Blut einmal durch die Aorta hindurchgetrieben wird.

12. Kapitel.

Der Stoffwechsel in den Organen.

Assimilation und Dissimilation 163. Der Stoffwechsel der Fette 164. Der Stoffwechsel der Eiweißkörper 169. Harnstoff und Kreatinin 174. Der Stoffwechsel der Kohlehydrate 175. Das Zustandekommen der Verbrennungsprozesse 179. Der Purinstoffwechsel 180. Die Lipoide 182. Die Vitamine oder akzessorischen Nährstoffe 183.

Blicken wir von dem bis hierher erreichten Standpunkt der Erfahrungen auf das zurück, was auseinandergesetzt wurde, um den Weg zu erkennen, dem wir naturgemäß weiter zu folgen haben. Wir erinnern uns des bekannten Vergleichs des Menschen mit einer Maschine, welcher Brennmaterial und Sauerstoff zugeführt werden muß, damit sie arbeitsfähig ist. Dieser Vergleich führte uns an den Ausgangspunkt der Darstellung, die Beschreibung des Nahrungsimports und der Verdauung. Wir verfolgten die Umwandlung der Nahrung im Intestinaltrakt, bis sie zur Resorption gelangt, wir sahen sie sodann ins Blut übertreten und lernten die übrigen Blutbestandteile, denen sie sich beimischt, kennen. Im Blut fanden wir auch den Sauerstoff und erfuhren, wie er durch den Atmungsprozeß herangeschafft wird, und schließlich beschäftigte uns die Frage, auf welche Weise das Blut, also mit ihm Nahrung und Sauerstoff, durch den ganzen Körper, durch alle Organe hindurchgetrieben wird. So ergibt sich die nächste Aufgabe von selbst, nämlich klarzulegen, wie sich nun die Organe der Nahrungsstoffe bemächtigen, und in welcher Weise sie sie ausnützen, um ihre speziellen Leistungen zu vollziehen.

Zeichnen wir im voraus ein Bild von dem, was die Lösung dieser Aufgabe bedeutet! Wir werden erst jetzt einen Einblick in den großartigen und differenzierten chemischen Betrieb der Organismen gewinnen und dabei sehen, daß die chemischen Vorgänge bei der Verdauung nur ein kleines Vorspiel waren. Der Stoffwechsel der Organe umfaßt einerseits die Einlagerung der Nahrungsstoffe bzw. ihrer bei der Verdauung entstandenen Abkömmlinge in die Zellen in einer Form, welche der Eigenart der Organe und ihrer Leistungen entspricht; man bezeichnet diesen Vorgang als „*Assimilation*“ und will damit zum Ausdruck bringen, daß die Nahrungsstoffe nicht bloß aus den zahlreichen Blutbestandteilen, mit denen sie kreisen, heraussortiert und dann als Brennmaterial aufgespeichert werden, sondern daß — wenigstens sehr häufig — dazu noch eine chemische Umwandlung vollzogen wird, durch welche die Stoffe dem schon vorhandenen spezifischen Bestand der einzelnen Zellen

„angeähnelte“ werden. Diese Umwandlung bedeutet gewöhnlich eine Synthese zu größeren Molekülen. Die Kehrseite dieser Prozesse ist die „*Dissimilation*“, der Abbau zu unspezifischen Produkten, ähnlich wie bei der Verdauung, nur tiefer greifend. Und indem wir weiter deren Sinn ins Auge fassen, nämlich die Verwandlung chemischer Energie in mechanische Arbeit und in Wärme, erhebt sich zugleich die unendlich wichtige Frage nach dem Zusammenhang von Nahrungszufuhr und Leistungsfähigkeit. Wir werden damit vor eine der wichtigsten praktischen Aufgaben gestellt, deren grenzenlose Bedeutung unserem Volk in diesen Jahren den Wert physiologischer Forschung so nah vor Augen gerückt hat, wie nie zuvor. Die quantitativen Untersuchungen des Stoffwechsels werden uns demgemäß die Grundlage der Ernährungslehre zu liefern haben, in welcher der Physiologe die Gesetze diktiert, nach denen die Volkswirtschaft im eigentlichsten Sinne des Wortes zu verfahren hat. In diesem Kapitel soll aber vorerst nur rein qualitativ der Stoffwechsel der einzelnen Nahrungsstoffe erörtert werden. Wir werden uns dabei außer mit den drei Hauptkategorien der Eiweißkörper, Kohlehydrate und Fette noch mit den Nukleoproteiden, den Lipoiden und den sogenannten Vitaminen zu beschäftigen haben. Wir beginnen mit dem Stoffwechsel der Fette.

Den Fetten begegneten wir zuletzt im Blutplasma (siehe S. 76), nachdem wir sie auf ihrem Weg durch das Zottenepithel und durch die Chylusgefäße des Dünndarms begleitet hatten. Nach einer sehr fettreichen Mahlzeit kann das Fett im Blutplasma in feinen und feinsten Tröpfchen in solchen Mengen suspendiert sein, daß das Serum milchig aussieht. Aus diesem Fettvorrat des Plasmas schöpfen nun die Organe und bemächtigen sich irgendwie der Fetttröpfchen. Ob dafür abermals, wie bei der Fettresorption im Darm, eine Verseifung an der Zelloberfläche vorangehen muß, ist unbekannt. Von einer Assimilation des Fettes kann also zunächst nur insofern die Rede sein, als vorzugsweise bestimmte Organe das Fett in Depots einlagern; dagegen findet eine chemische Umwandlung des Nahrungsfettes nicht statt, sondern *das Nahrungsfett kann direkt zu Körperfett werden*. Das wird am besten bewiesen, indem man an ein Tier ein Fett verfüttert, welches den Glycerinester einer fremden Fettsäure enthält. Verfüttert man z. B. Rüböl an Hunde, so findet man alsdann die darin enthaltene Erucasäure im Unterhautbindegewebe deponiert, oder, gibt man das jodhaltige Jodipin, so erscheint es nach einiger Zeit im Sekret der Milchdrüse. Man könnte meinen, daß dies Laboratoriumseffekte sind, welche die Bedürfnisse des Tiers nicht befriedigen können. Aber LEUBE hat einen mageren Hund überreichlich mit Butter gefüttert, dann die Bauchhöhle geöffnet, dem Hund etwas von dem dort abgelagerten Fett entnommen und festgestellt, daß das Fett mit seinem niedrigen Schmelzpunkt eher der Butter als gewöhnlichem Hundefett entspricht; darauf schloß er wieder die Bauchhöhle, ließ den Hund nun eine Weile hungern und überzeugte sich danach, daß der Hund das abgelagerte Fett zur Deckung seines Bedarfs verbraucht hatte. Daraus ergibt sich, daß das in großer Menge verabreichte und eingelagerte Fett auch wirklich Verwendung finden kann.

Nun scheint es aber doch, als ob jede Tierart — wenigstens bis zu einem gewissen Grad — im Besitz eines arteigenen (siehe S. 73) Fettes ist. Der Hammeltalg ist ein hartes Fett von hohem Schmelzpunkt,

Schweinefett ist weicher und Gänseschmalz schmilzt schon bei höherer Zimmertemperatur. Dies liegt daran, daß von den drei Triglyzeriden, welche hauptsächlich im tierischen Fett enthalten sind, dem Tristearin, dem Tripalmitin und dem Triolein, die ersten beiden bei etwa 60°, das Triolein schon unterhalb 0° schmelzen, und daß der prozentische Anteil der drei Glyzeride in den verschiedenen Fetten sehr verschieden ist. Das Fett hat also artspezifischen Charakter nicht im chemischen Sinn, sondern im physikalischen Sinn, durch die Art seiner Mischung. Wenn wir nun das Körperfett als thesauriertes Nahrungsfett aufzufassen haben, so muß die „Artspezifität“ des Schmelzpunktes offenbar so erklärt werden, daß jede Tierart dasjenige Fett besitzt, das seiner natürlichen selbstgewählten Nahrung entspricht (ROSENFELD).

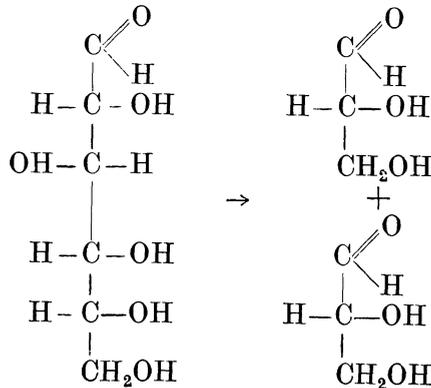
Immerhin müssen doch auch noch andere Momente in Betracht kommen. Denn erstens ist das Fett in den einzelnen Depots eines und desselben Tieres verschieden zusammengesetzt; das Fett im Unterhautbindegewebe ist gewöhnlich weicher als das der inneren Organe, die Milchdrüse arbeitet als Butterfett ein besonders weiches Fett heraus. Und ferner hat das Fett des Körpers auch noch einen anderen Ursprung als im Fett der Nahrung.

Damit kommen wir auf eine in theoretischer und praktischer Hinsicht gleich wichtige Frage zu sprechen, nämlich die Frage nach der Überführbarkeit der einzelnen Nahrungsstoffe ineinander, hier speziell die Frage nach der Bildung von Fett aus Nahrungskohlehydrat und aus Nahrungseiweiß. Diese Frage ist nicht bloß vom rein chemischen Standpunkt überaus interessant, nicht bloß vom Standpunkt der physiologischen Chemie, weil uns durch ihr Studium die merkwürdigen und weitgehenden synthetischen Fähigkeiten des tierischen Körpers enthüllt werden, sondern in Zeiten stark eingeengter Nahrungszufuhr und Nahrungsauswahl, wie in den Kriegszeiten, auch als praktisch-hygienisches Problem, ob ein in der Ernährung ausfallender Nahrungsbestandteil durch einen anderen einigermaßen vertreten oder vollwertig ersetzt werden kann. Die Physiologie hat sich mit dieser Frage seit langem befaßt und für das Fett dahin beantwortet, daß es sicherlich direkt durch Kohlehydrat und indirekt jedenfalls durch Eiweiß vertreten werden kann.

Für die *Bildung von Fett aus Kohlehydrat* könnte zunächst unter anderem das landläufige Rezept angeführt werden, daß, wer nicht fett werden will, sich vor einem Übermaß an Mehlspeisen hüten soll. Experimentell ist die Umwandlung unter anderem von SOXHLET bewiesen worden, welcher am wachsenden Schwein mit reiner Reinsnahrung, also bei Zufuhr von wenig Eiweiß und fast keinem Fett, einen starken Fettansatz erzeugte. Vergleicht man die Konstitutionsformeln der Fette und der Kohlehydrate miteinander, so sieht man, daß diese chemische Überführung offenbar eine starke Reduktion, eine starke Entbindung von Sauerstoff aus dem Kohlehydrat-Molekül bedeutet. Das wird auch direkt kenntlich, wenn man während der Fettmästung mit Kohlehydrat den respiratorischen Gaswechsel verfolgt. Der Vergleich der Inspirations- und der Expirationsluft lehrt, daß für gewöhnlich bei der Atmung ein größeres Volumen Sauerstoff aus der Luft verschwindet, als Kohlensäure dafür erscheint; das ist z. B. auch aus der Angabe auf S. 100 zu ersehen. Das Verhältnis des Volumens der gebildeten Kohlensäure zum Volumen des verschwundenen Sauerstoffs, der sogenannte *respiratorische Quotient*, beträgt nun bei gemischter Kost im Mittel 0,8; während der Umwandlung von Kohle-

hydrat in Fett bei starker Kohlehydratzufuhr steigt der respiratorische Quotient aber eventuell auf über 1. Das ist folgendermaßen zu erklären: würde zu einer Zeit im Körper ausschließlich Kohlehydrat, z. B. $C_6H_{12}O_6$, verbrannt, so würde Sauerstoff nur zur Oxydation des Kohlenstoffs im Zuckermolekül verwendet werden; denn das intramolekuläre Verhältnis von Wasserstoff und Sauerstoff entspricht schon der vollständigen Oxydation des Wasserstoffs; in diesem Falle muß also der respiratorische Quotient 1 betragen, da auf 1 Molekül verbrauchten Sauerstoffs 1 Molekül Kohlendioxyd gebildet wird, und da nach der AVOGADROSCHEN Regel gleichen Molekülzahlen gleiche Volumina (bei gleichem Druck und gleicher Temperatur) entsprechen. Eiweiß und Fett enthalten relativ sehr viel weniger Sauerstoff; daher muß bei ihrer Verbrennung sowohl für die Oxydation des Kohlenstoffs zu Kohlendioxyd als auch für die Oxydation des Wasserstoffs zu Wasser Sauerstoff aufgenommen werden, und es ist zu berechnen, daß der respiratorische Quotient bei der alleinigen Verbrennung von Fett ungefähr 0,7, bei der von Eiweiß ungefähr 0,8 betragen muß. Man kann danach den *respiratorischen Quotienten* auch so definieren: er ist *das Verhältnis des zur Oxydation des Kohlenstoffs verbrauchten Sauerstoffs zum gesamten verbrauchten Sauerstoff* (TANGL). Wenn nun bei der Fettmast mit Kohlehydrat der respiratorische Quotient den auffallenden Wert von 1,2—1,3 erreicht, wie zum Beispiel, wenn man Gänse mit Mehklößen „stopft“ (BLEIBTRETU), so beruht das offenbar darauf, daß bei der Überführung von Kohlehydrat in Fett Sauerstoff disponibel wird und dementsprechend weniger Sauerstoff von außen aufgenommen zu werden braucht. So vermag also — wie wir das auch noch später erfahren werden — der respiratorische Quotient einigermaßen Aufschluß darüber zu geben, welches Heizmaterial jeweils bei den materiell und örtlich so komplizierten Verbrennungen im Körperinnern präponderiert.

Wie die Synthese von Fett aus Kohlehydrat chemisch verläuft, darüber fehlen noch genaue Kenntnisse. Der Weg, auf dem die höheren Fettsäuren entstehen, kann nur indirekt aus dem Fettsäureabbau erschlossen werden; davon wird nachher die Rede sein. Das Glycerin bildet sich aus den Kohlehydraten, z. B. Traubenzucker jedenfalls über den *Glyzerinaldehyd* (EMBDEN):



Der Glyzerinaldehyd wird von überlebenden Organen mit Leichtigkeit in Glycerin umgewandelt. Das Produkt der Fettsynthese aus Kohlehydrat ist ein relativ hartes Fett.

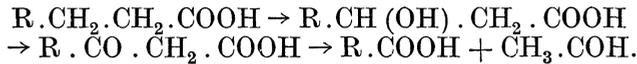
Unsicher ist heute noch die *Bildung von Fett aus Eiweiß*, obwohl gerade diese früher als die sicherste Quelle des Körperfetts galt. Es wurde dafür eine Anzahl von Beobachtungen angeführt, welche, wenn auch ihre Deutung heute als irrtümlich erkannt ist, an sich noch von großem Interesse sind. Besonders evident schien die Bildung bei der von VIRCHOW sogenannten *fettigen Degeneration* erwiesen; wenn nämlich die Zellen, z. B. in der Leber, infolge von chronischem Mißbrauch von Alkohol, von chronischer Vergiftung mit Phosphor oder Arsen oder bei chronischer Tuberkulose allmählich zugrunde gehen, so sieht man in ihnen mehr und mehr Fetttropfchen auftreten, welche direkt aus dem Zerfall des Protoplasmas hervorzugehen scheinen. Aber heute weiß man, daß dies Fett zum größten Teil von außen durch das Blut in das degenerierende Organ eingeschwemmt wird. ROSENFELD hat z. B. einen Hund reichlich mit Hammelfett gefüttert; dies Fett lagert sich alsdann in der Hauptsache im Unterhautzellgewebe ab, das Fett der Leber dagegen bleibt nach wie vor „Hundefett“; wird dann der Hund mit Phosphor vergiftet, so verfällt die Leber der fettigen Degeneration. Aber das dort erscheinende Fett ist, nach seinem hohen Schmelzpunkt zu urteilen, wesentlich Hammelfett, also transportiertes Fett. Teilweise ist das in den degenerierenden Zellen erscheinende Fett freilich auch autochthon; teils befand es sich dort ursprünglich in ultramikroskopischer Aufteilung und fließt nun beim Untergang des Protoplasmas zu größeren Tropfen zusammen, teils stammt es aus dem Zerfall von Lipoiden, insbesondere von Lecithin (siehe S. 182).

Ein anderes Beispiel fälschlicher Argumentierung für die Bildung von Fett aus Eiweiß ist die *Entstehung des sogenannten Leichenwachses*. Wenn Muskeln oder andere Organe längere Zeit im Wasser oder im feuchten Erdreich liegen, so wandeln sie sich unter Schwund des Eiweißes in eine weißliche teigige Masse um, welche hauptsächlich aus freien Fettsäuren und aus Kalk- und Magnesia-seifen besteht. Indessen, wenn hier auch die Herkunft der Fettkomponente aus Eiweiß höchst wahrscheinlich ist, so ist deren Bildung doch auf die Anwesenheit von Bakterien zurückzuführen; denn bei steriler Aufbewahrung bleibt die Leichenwachsbildung, überhaupt die Zunahme der Fettsäuren aus (FR. KRAUS). Aber was die Bakterien an chemischen Synthesen zustande bringen, braucht deshalb noch nicht im Tätigkeitsbereich auch der höheren Tiere zu liegen.

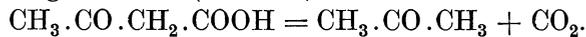
Auch alle übrigen Versuche, namentlich auch zahlreiche Fütterungsversuche an Hunden, haben die Frage nicht zur Entscheidung zu bringen vermocht (PFLÜGER). Wenigstens mit einer indirekten Entstehung von Fett aus Eiweiß darf man aber deshalb rechnen, weil, wie wir bald sehen werden, die Bildung von Kohlehydrat aus Eiweiß nicht in Abrede gestellt werden, das Kohlehydrat sich also sekundär in Fett verwandeln kann. Daß aber dieser Weg der Fettbildung oft und reichlich beschritten wird, ist nicht wahrscheinlich.

Betrachten wir nun die Kehrseite des Fettstoffwechsels, den *Abbau der Fette*. Er geht, wie jeder Abbau komplizierter Stoffe in unserem Körper, stufenweise vor sich. Die erste Étape ist dabei wohl immer die *hydrolytische Spaltung* in Fettsäuren und Glycerin; denn Lipase (s. S. 27 u. 43) findet sich überall, schon weil das Blut eine Lipase enthält; speziell auch im Fettgewebe kommt reichlich Lipase vor. Dennoch ist es nicht wahrscheinlich, daß sich hier der Abbau vollzieht; denn zu Zeiten gesteigerten Bedarfs, wie im Hunger oder bei der Abmagerung der Zuckerkranken, trifft man im Blut reichlich mobilisiertes Fett, das sich auf der Auswanderung aus den Fettdepots befindet.

Die *freien Fettsäuren* werden wahrscheinlich durch sogenannte β -Oxydation abgebaut (KNOOP), d. h. nach dem Schema:



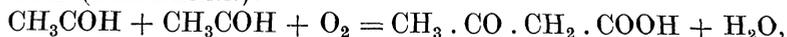
Die Oxydation setzt also in dem in β -Stellung zur Karboxylgruppe stehenden C-Atom an, aus der β -Oxysäure entsteht die β -Ketosäure und dann verkürzt sich die Kette um 2 C-Atome unter Bildung von *Acetaldehyd* (FEULGEN). Dies ist vor allem daraus erschlossen worden, daß bei der unter bestimmten Bedingungen (nämlich am zuckerkranken Tier) vorgenommenen Verfütterung der natürlichen Fettsäuren, welche sämtlich eine gerade Anzahl von C-Atomen besitzen (s. S. 43), stets β -Oxybuttersäure $CH_3 \cdot CH(OH) \cdot CH_2 \cdot COOH$ und *Acetessigsäure* $CH_3 \cdot CO \cdot CH_2 \cdot COOH$ entstehen. Außerdem bildet sich noch *Aceton* durch die Dekarboxylierungsreaktion (s. S. 59)



Die Genese dieser drei Verbindungen, der sogenannten *Acetonkörper*, beansprucht deshalb unser besonderes Interesse, weil sie bei einer ziemlich häufigen Stoffwechselerkrankung, der *Zuckerkrankheit* oder dem *Diabetes mellitus*, eine große und gefährliche Rolle spielen, da sie dabei in Mengen bis zu 200 g täglich im Harn ausgeschieden werden können, und da sie es sind, die die charakteristische Acidose (S. 98) des Diabetikers und häufig seinen Tod herbeiführen.

Über ihre Herkunft war man sich lange Zeit im Unklaren. Man könnte meinen, daß sie beim Diabetes aus einem abnormen Abbau der Kohlehydrate hervorgehen. Aber gerade die Kohlehydrate sind nicht die Ausgangspunkte ihrer Entstehung; im Gegenteil wirken diese „antiketoplastisch“, d. h. ihre Bildung wird bei Verabreichung von Kohlehydrat zurückgedrängt, eine für die Behandlung des Diabetikers höchst wichtige Erkenntnis. Dagegen können sie aus Eiweiß bzw. aus Aminosäuren entstehen (siehe S. 174). Als ihre Hauptquelle werden aber heute die Fettsäuren angesehen. Unter dieser Voraussetzung wird es verständlich, daß die Acetonkörper, die auch vom Gesunden täglich in ganz geringen Mengen (0,01—0,02 g täglich) ausgeschieden werden, während des Hungerns, während dessen ja besonders das Fettpolster ein geschmolzen wird, oder bei Mangel an Kohlehydraten in der Nahrung grammweise im Harn auftreten. Man weiß aber nicht, in welcher Art der normale Verbrauch der Kohlehydrate das Auftreten der Acetonkörper hintanhält. Jedenfalls werden für gewöhnlich die intermediär aus den Fettsäuren entstehenden β -Oxybuttersäure und Acetessigsäure weiter zu den Endprodukten der Oxydation, zu Kohlensäure und Wasser verbrannt.

Der Verlauf des Fettsäureabbaues enthält auch einen Fingerzeig für die Lösung der vorher (S. 166) schon aufgeworfenen Frage nach der Entstehung der Fettsäuren aus Kohlehydrat. Der Abbau erfolgt, wie wir soeben sahen, durch sukzessive Verkürzung der langen geradzähligen C-Ketten um je 2 C-Atome unter Bildung von Acetaldehyd. Acetaldehyd entsteht aber einerseits bei oxydativem Abbau der Kohlehydrate (S. 178), andererseits geht er im Körper leicht in Acetessigsäure über (FRIEDMANN):



und diese Aneinanderlagerung von C-Paarlingen dürfte wiederholt zustandekommen.

Wenden wir uns nun zum **Stoffwechsel der Eiweißkörper!** So sicher nach den angeführten Experimenten die Nahrungsfette direkt im Körper abgelagert und dann verbraucht werden können, ebenso sicher gilt das Gegenteil für das Eiweiß der Nahrung. Die „biologischen Reaktionen“ (siehe S. 76) beweisen es. Das Nahrungseiweiß muß erst seines Artcharakters beraubt werden — und dazu dient die Aufspaltung im Darm bis zu den Aminosäuren —, damit aus den indifferenten Produkten das arteigene Eiweiß neugeschaffen wird. Die Fette sind eher als tote Reserven aufzufassen, welche zeitweilig im Körper für späteren Gebrauch beiseite gelegt werden; das Eiweiß wird in ganz anderem Sinn dem Körper einverleibt, es wird der lebenden Substanz angegliedert, es wird im eigensten Sinne des Wortes „assimiliert“. Aber auch abgesehen von den artspezifischen Bedürfnissen ist ein Umbau der Moleküle des Nahrungseiweißes vonnöten. Es sei nur auf eine früher (S. 40) gegebene tabellarische Zusammenstellung verwiesen, aus welcher hervorgeht, daß die verschiedenen Eiweißstoffe, aus denen sich unser Körper aufbaut, einen ganz verschiedenen prozentischen Anteil der verschiedenen Aminosäuren in ihrem Molekül enthalten; jedes Organ muß sich also aus den im Blut kreisenden resorbierten Aminosäuren (siehe S. 68) diejenigen in dem richtigen Quantum herausortieren, welche es in seinem Gefüge braucht. Wie sollte man anders verstehen, daß z. B. der Säugling seine Leibessubstanz bei einseitiger Ernährung mit Milcheiweiß, also hauptsächlich mit Kasein aufbaut! Daß die Gewinnung all der vielfältigen in den Geweben enthaltenen Eiweißkörper übrigens bloß durch eine Totalzerlegung des Nahrungseiweißes bis zu den einzelnen Aminosäuren erreicht werden kann, das ist nicht gesagt; auch die gröberen ersten Spaltprodukte, die Albumosen und Peptone, haben schon nicht mehr spezifische Eigenschaften, und zum Umbau des Nahrungseiweißes zu den einzelnen Organeiweißen könnte auch das Zerschlagen in größere Blöcke genügen. Jedenfalls aber kann die Aufspaltung eine totale sein, ohne daß das Nahrungseiweiß an Nahrungswert verliert. Das lehrt eine einfache experimentell prüfbare Konsequenz dieser Erörterungen: wenn das Eiweiß doch im Verdauungskanal aufgespalten wird, dann muß es für die Ernährung gleichgültig sein, wenn man in der Nahrung alles Eiweiß wegläßt und dafür ein Gemisch der Aminosäuren verfüttert. Das trifft in der Tat zu. O. LOEWI und besonders ABDERHALDEN haben gezeigt, daß Hunde, Mäuse oder Ratten mit Fleisch, dessen Eiweiß zuvor durch Pepsin und Trypsin oder auch durch Schwefelsäure total hydrolysiert worden ist, gerade so gut gedeihen und in der Wachstumsperiode gerade so gut an Körpergewicht zunehmen können, wie wenn sie mit dem unveränderten Fleisch gefüttert worden wären. Auch Menschen hat man bei Verätzung des Ösophagus per rectum oder bei einer Pankreas-erkrankung per os mit total abgebautem Eiweiß ernährt und dabei sogar Eiweißansatz erzielt (FRANK und SCHITTENHELM).

Unser Körper vollzieht also unzweifelhaft eine Resynthese von Eiweiß aus den freien Aminosäuren des Nahrungseiweißes. Über den Ort und über die Mittel dieser Synthese ist aber nichts Genaues bekannt. Man hat teils angenommen, daß die Synthese bereits in der Darmwand erfolgt, ähnlich wie die Darmwand den Wiederaufbau des Fettes aus den im Darmlumen frei gewordenen Fettsäuren und Glycerin vollzieht (siehe S. 67), teils hat man die Leber dafür beansprucht, welche ja auch sonst stark synthetisierende Fähigkeiten offenbart, speziell auch die resor-

bierten Zucker durch die Synthese von Glykogen (siehe S. 176) speichert. Aber weder für die eine noch für die andere Annahme existieren sichere Beweise. Ausschließlich in der Darmwand vollzieht sich die Regeneration des Eiweißes schon nicht aus dem einfachen Grunde, weil von ABEL durch die Vividiffusion (siehe S. 68) reichlich Aminosäuren im Blut nachgewiesen worden sind. Ferner ist es HENRIQUES und ANDERSEN gelungen, einem Ziegenbock drei Wochen lang alles Eiweiß in der Nahrung zu entziehen und dafür ganz langsam eine Lösung von Aminosäuren aus künstlich verdautem Fleisch in die Vena jugularis einfließen zu lassen; sein Eiweißbestand blieb dabei erhalten. Und die Leber kann deshalb nicht der einzige Ort der Resynthese sein, weil bei Tieren mit einer sogenannten *Eck'schen Fistel*, d. h. bei Tieren, bei welchen durch eine auf operativem Wege hergestellte direkte Überleitung des Portalvenenblutes in die Vena cava inferior die Leber aus dem Pfortaderkreislauf ausgeschaltet ist, auch bei ausschließlicher Fütterung mit Aminosäuren kein Eiweißverlust eintritt. Am wahrscheinlichsten ist es, daß die Synthese in sämtlichen Zellen erfolgt, indem jedes Organ zum Aufbau seiner „organeigenen“ Eiweißkörper die zweckentsprechende Auslese unter den kreisenden Aminosäuren trifft. Wie das allerdings die Zellen machen, ist nicht bekannt; im osmotischen Versuch verhalten sie sich ja gegenüber den Aminosäuren wie undurchlässig (S. 88).

Was sodann die Mittel der Synthese anlangt, so sind es wahrscheinlich Fermente. Wir lernten diese bisher fast nur als Verdauungsfermente in ihrer abbauenden, und zwar meistens hydrolysierenden Tätigkeit kennen (siehe jedoch S. 67). Aber sowohl die Theorie der Katalysatoren als auch das Experiment belehren darüber, daß dieselben Fermente, welche spaltend wirken, prinzipiell auch die umgekehrte Reaktion herbeiführen müssen, und so ist auch für Zucker, für Glykoside, für Ester, und für die Fette bereits nachgewiesen, daß, wenn man die sonst spaltenden Enzyme zu stark konzentrierten Lösungen der Spaltprodukte hinzusetzt, die Ausgangsstoffe regeneriert werden. Fermente gibt es aber nicht bloß in den Sekreten der Drüsen, sondern auch intrazellulär sind sie allgemein verbreitet, und so darf man annehmen, daß auch die Eiweißsynthese ein Akt der Zellfermente ist, wenn es auch bisher nicht bewiesen wurde.

Die Lehre, daß die einzelnen Organe sich aus dem ihnen gebotenen Gemisch von Aminosäuren diejenigen in den geeigneten Proportionen herausholen, welche sie als Bausteine für ihr Eiweiß nötig haben, führt nun noch zu einer wichtigen Schlußfolgerung: da das Nahrungseiweiß in bezug auf die einzelnen Aminosäuren geradeso verschieden zusammengesetzt sein kann, wie etwa die in der Tabelle S. 40 aufgezählten Eiweißkörper verschiedener Herkunft, *so muß der Nährwert der jeweils in der Nahrung enthaltenen Eiweißstoffe je nachdem, wie und wo sie im Körper verwendet werden sollen, verschieden sein.* Ein eklatantes Beispiel dafür ist der Leim, welcher, zu den eiweißähnlichen Stoffen oder den sogenannten *Albuminoiden* gehörig, wie echtes Eiweiß ausschließlich zu Aminosäuren abgebaut wird. Seitdem nämlich zur Zeit der französischen Revolution eine vom Institut français und später eine von der französischen Akademie eingesetzte Kommission den Knorpelleim als Nahrungsmittel empfohlen hatte, breitete sich die Verwendung von Leimsuppen in zahlreichen öffentlichen Anstalten, namentlich in Kasernen, Krankenhäusern, Gefängnissen aus. Aber es hat viele Jahrzehnte gedauert, bis man erkannte, daß der *Leim zwar*

Eiweiß ersparen, aber keinesfalls ersetzen kann (C. VOIT), so daß Mensch und Tier, bei denen das Eiweiß der Nahrung mehr oder weniger vollständig durch Leim ersetzt wird, allmählich an Eiweißmangel dahinsiechen. Heute weiß man, daß Leim deshalb nicht vollwertig ist, weil die Aminosäure Tryptophan darin fehlt und Tyrosin und Zystin darin nur in sehr kleinen Mengen enthalten sind. Entscheidend für die Richtigkeit dieser Auffassung ist, daß man nach Versuchen von M. KAUFMANN und von ABDERHALDEN den Leim zu einem wirklichen Ersatzmittel für Eiweiß machen kann, wenn man die mangelnden Aminosäuren hinzugibt. Aus diesem Grunde bezeichnet man die Folgen der Darreichung von Leim an Stelle von Eiweiß mit Recht als „partielle Unterernährung“. Ein Gegenstück zu diesen Beobachtungen beim Leim ist die Feststellung, daß die Spaltprodukte des Kaseins, welche an sich das Nahrungseiweiß völlig ersetzen können, ihre Vollwertigkeit einbüßen, sobald man daraus das Tryptophan entfernt (weitere Beispiele siehe S. 186 und Kap. 19).

Des ferneren ist hiernach vorauszusehen, daß die kleinste Menge Eiweiß, mit welcher ein Tier unter bestimmten Lebensbedingungen eben auf die Dauer auskommen kann, nicht durch eine einzige bestimmte Menge in Grammen auszudrücken ist, sondern daß es dabei auf die Art des Nahrungseiweißes ankommt. Denn angenommen, das Tier braucht zur Aufrechterhaltung seines Organbestandes von den einzelnen Aminosäuren die und die Menge, so wird vielleicht nur eine bestimmte Sorte Eiweiß gerade entsprechend diesem Verhältnis der einzelnen Aminosäuren zueinander zusammengesetzt sein, jedes andere Eiweiß wird von dieser und jener Aminosäure relativ zu viel enthalten. In der Tat ist gefunden worden, daß das *Eiweißminimum*, mit welchem ein Hund eben auskommt, *von Eiweißsorte zu Eiweißsorte verschieden groß ist*; von Fleisch- oder Milcheiweiß z. B. wird weniger gebraucht als von Gliadin, Phaseolin oder Edestin, den Eiweißkörpern des Weizens, der Bohne und des Hanfs (MICHAUD, THOMAS). Auch wenn der Eiweißbestand eines einzelnen Organs gehoben werden soll, muß danach die Art der Aminosäuremischung für die Größe des Effekts entscheidend sein. Ein gutes Beispiel dafür gibt die folgende Beobachtung von ZUNTZ: es ist schon lange bekannt, daß der Wollertrag bei Schafen durch Verfütterung eines eiweißreichen Futters gesteigert werden kann, was an sich ohne weiteres verständlich ist, da ja die Keratinsubstanz der Wolle aus Aminosäuren aufgebaut ist. Nur muß die Eiweißration ziemlich hoch sein, damit von dem im Keratin besonders reichlich, dagegen in anderen Polypeptiden nur spärlich enthaltenen Zystein (s. S. 40) genügend zugeführt wird. ZUNTZ kam nun auf den Gedanken, den Tieren die Aminosäuren gerade in denjenigen relativen Mengen zuzuführen, in denen sie sie zum Aufbau der Haare verwenden können, d. h. er gab ihnen Hornsubstanz selber als Futterzusatz, aber, da sie ganz unverdaulich ist, in Form ihrer künstlich hergestellten Abbauprodukte, und erreichte in der Tat dadurch eine deutliche Steigerung der Wollproduktion, wobei das einzelne Haar um ein Drittel an Durchmesser zunahm. Versuche an sich selber steigerten den Haar- und Bartwuchs innerhalb von 2 Monaten um über 80%.

Immerhin ist nun nicht jede einzelne Aminosäure ein unersetzlicher Baustein im Eiweißmolekül; vielmehr können manche derselben in unserem Körper neu entstehen. Dafür spricht zunächst z. B., daß man den

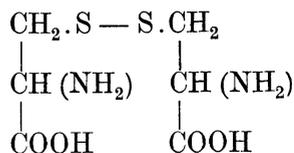
Eiweißbedarf eines erwachsenen Tieres allein mit Gliadin decken kann, obwohl Glykokoll und Lysin in dessen Molekül fehlen. Aber noch mehr; die Aminosäuren können sogar von Grund auf synthetisch hergestellt werden. KNOOP hat gefunden, daß, wenn man an Hunde γ -Phenyl- α -Ketobuttersäure $C_6H_5 \cdot CH_2 \cdot CH_2 \cdot CO \cdot COOH$ verfüttert, die entsprechende Aminosäure $C_6H_5 \cdot CH_2 \cdot CH_2 \cdot CH(NH_2) \cdot COOH$ ausgeschieden wird; ferner bildet sich bei der Durchleitung durch die Leber von Hunden aus Brenztraubensäure $CH_3 \cdot CO \cdot COOH$ Alanin $CH_3 \cdot CH(NH_2) \cdot COOH$, aus Oxyphenylbrenztraubensäure Tyrosin (EMBDEN). Wir haben danach also damit zu rechnen, daß *in unserem Körper aus stickstofffreien Säuren und aus Ammoniak Eiweiß synthetisch gebildet wird*; das wäre also eine Synthese, wie sie ähnlich von den Pflanzen vollführt wird. Wie wichtig diese Schlußfolgerung für einige Probleme der Ernährungslehre ist, soll sogleich gezeigt werden.

Wir werden bald zu erörtern haben, daß im Stoffwechsel durch Fette und durch Kohlehydrate Eiweiß eingespart werden kann, aber *Kohlehydrate wirken viel stärker eiweißsparend als Fett* (siehe S. 199). Diese lange bekannte Tatsache erhält durch den Nachweis der eben genannten Synthesen eine einfache Deutung. Eiweiß wird nämlich in den Organen weit tiefer abgebaut als durch die Verdauungssäfte; die Spaltung geht bis zum Ammoniak, welches dann mit Kohlensäure zu Harnstoff vereinigt durch die Nieren ausgeschieden wird (siehe S. 174). Da ferner die Kohlehydrate über Milchsäure und Brenztraubensäure gespalten werden (siehe S. 179), so ist es möglich, daß freigewordenes Ammoniak, welches sich schon auf dem Wege der Ausscheidung befindet, von Brenztraubensäure, falls diese nach reichlicher Kohlehydratzufuhr in größerer Menge zur Disposition steht, abgefangen und noch einmal in Eiweiß überführt wird. Fette kommen aber dafür nicht in Frage; denn die Fettsäuren werden β -oxydiert (siehe S. 168), sie könnten also allenfalls über β -Ketosäuren in β -Aminosäuren übergehen, welche zur Regeneration von Eiweiß nicht zu brauchen sind; denn Eiweiß baut sich aus α -Aminosäuren auf (siehe S. 39).

Eine zweite interessante Konsequenz aus den Versuchen von KNOOP und EMBDEN ist die folgende: wie nach den Versuchen von LOEWI und ABDERHALDEN die Aminosäuren von Mensch und Tier gleich gut zur Eiweißbildung im Körper verwendet werden können, mögen sie durch Spaltung von Nahrungseiweiß im Darmkanal erst entstanden oder mögen sie gleich in der Nahrung statt Eiweiß zugeführt sein, gerade so könnte man versuchen, wenigstens *einen Teil des Eiweißes in der Nahrung durch Ammoniak und Kohlehydrat zu ersetzen*. Experimente in dieser Richtung haben bisher nicht zum Ziel geführt, wenigstens nicht zu dem Ziel, daß der Nachweis der direkten Ausnützung anorganischer Ammoniumsalze geglückt wäre. Immerhin kommt dennoch die Verwertung von Ammoniak an Stelle von Eiweiß unter gewissen Verhältnissen mit Bestimmtheit in Betracht. KELLNER und ZUNTZ sowie VÖLTZ haben nämlich gefunden, daß man bis zu 30—40% des Eiweißes in der Nahrung der Wiederkäuer durch Ammoniak oder noch besser durch Ammoniumacetat oder Harnstoff ersparen kann; diese Sparwirkung ist aber eine indirekte. Im Magen des Wiederkäuers, speziell in dem als Pansen bezeichneten Abschnitt leben nämlich die für die Vergärung der Zellulose sehr wichtigen Pansenbakterien (siehe S. 60). Sie wachsen für gewöhnlich auf Kosten des Nahrungseiweißes; da sie aber, wie die

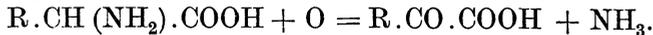
meisten Pflanzen, ihr Zelleiweiß noch besser mit Hilfe von Ammoniak synthetisch herstellen, so kann man von vornherein den Teil des Nahrungseiweißes, der doch ein Raub der Bakterien würde, durch Ammoniak oder Derivate des Ammoniaks ersetzen. Das so gebildete Bakterien-eiweiß kommt dann den Wiederkäuern zum Aufbau ihres eigenen Leibes zugute; denn im Verdauungskanal gehen stets massenhaft Bakterien zugrunde, und das Eiweiß ihres Leibes kann dann gerade so gut als irgend ein anderes Eiweiß zur Nahrung dienen.

So viel von der Assimilation des Eiweißes! *Die dissimilatorische Phase des Eiweißstoffwechsels* ähnelt zunächst, gerade so wie beim Fettstoffwechsel, den Vorgängen bei der Verdauung; wenigstens scheint es so, als ob das Zelleiweiß wenn es angegriffen wird, zunächst durch Hydrolyse in dieselben Produkte zerlegt wird, wie bei der Einwirkung des Trypsins. SALKOWSKI hat nämlich folgende eigentümliche Beobachtung gemacht: bewahrt man ausgeschnittene Organe, wie z. B. die Leber oder Muskeln, längere Zeit vollkommen steril auf, so wandeln sie sich allmählich in einen Brei um und zerfließen. Man bezeichnet den Vorgang als **Autolyse** oder **Autodigestion**. Er beruht darauf, daß vor allem die Eiweißstoffe durch die Wirkung eines intrazellulären „autolytischen“ oder proteolytischen Ferments in Albumosen, Peptone und Aminosäuren gespalten werden; aber auch Fette und Kohlehydrate unterliegen der Hydrolyse. Nun könnte es fraglich erscheinen, ob diese postmortale Selbstverdauung irgend einem normalen Vorgang gleichzusetzen sei. Es lassen sich aber mannigfache Gründe zugunsten dieser Hypothese anführen, zumal auch dafür, daß zum normalen Eiweißabbau das intermediäre Auftreten von Aminosäuren gehört. Denn erstens kann man beobachten, daß bei einem Organ, dessen Funktion vor dem Tod gesteigert war, auch postmortal die Autolyse besonders intensiv verläuft, so z. B. bei der Milchdrüse, welche vor dem Tod sezernierte, oder wenn der Stoffwechsel der Organe vor dem Tod durch Verfütterung von Schilddrüsensubstanz in die Höhe getrieben war (siehe Kapitel 18). Zweitens gelingt es unter verschiedenen Bedingungen, intra vitam Peptide und Aminosäuren als Organprodukte nachzuweisen, welche für gewöhnlich unmerklich bleiben, offenbar weil sie weiter umgewandelt werden (siehe unten). So begegnet man ihnen da, wo Gewebe einschmelzen, also in Eiterherden (siehe S. 84); im Harn erscheinen sie bei der Rückbildung des Uterus nach der Geburt, oder wenn bei der sogenannten akuten gelben Leberatrophie oder bei Phosphorvergiftung die Leber rasch erweicht und sich verflüssigt, oder wenn beim Aufenthalt in großen Höhen durch den Mangel an Sauerstoff der oxydative Abbau eingeschränkt ist; im Auswurf der Lungen erscheinen sie, wenn nach einer Lungenentzündung das Infiltrat der Alveolen von den proteolytischen Fermenten der in die Alveolen eingewanderten und dort zerfallenden Leukozyten gelöst wird (siehe S. 84). Ferner gibt es eine seltene, familiär und erblich auftretende Erkrankung, die *Zystinurie*, bei welcher Zystin, die schwefelhaltige Komponente des Eiweißmoleküls, die α -Diamino- β -Dithiodilaktysäure



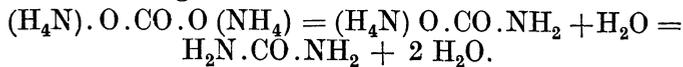
von den Nieren abgesondert wird, und daneben in kleinen Mengen noch verschiedene andere Aminosäuren; offenbar ist also bei der Zystinurie der Abbau des Eiweißes im ganzen mehr und weniger gestört. Endlich sei der experimentellen Beobachtung gedacht, daß man durch Verfütterung von Benzoesäure z. B. an Kaninchen dem Körper ganz außerordentliche Mengen von Glykokoll in Form von Hippursäure $C_6H_5 \cdot CO \cdot NH \cdot CH_2 \cdot COOH$ entziehen kann, weit mehr, als etwa dem Nahrungseiweiß entstammen könnte.

Halten wir mit diesen Beobachtungen die Hypothese einer intermediären Entstehung von Aminosäuren beim Eiweißabbau für genügend gestützt, so erhebt sich die weitere Frage nach dem gewöhnlichen Schicksal dieser Aminosäuren. Vermutlich werden sie öfter, wie die Aminosäuren des verdauten Eiweißes, zum Umbau oder Neuaufbau von Organ-eiweiß verwendet; wenn z. B. ein hungerndes Tier Milch sezerniert, so muß das Kasein aus dem eigenen Körperbestand durch Umbau hergestellt werden, und in weit großartigerem Maßstab muß sich wohl solch innerer Kreislauf von Aminosäuren vollziehen, wenn sich beim Rheinlachs während seiner Monate langen Wanderung stromaufwärts, während deren er keine Nahrung zu sich nimmt, die mächtigen Sexualdrüsen auf Kosten der schwindenden Muskulatur entwickeln (MIESCHER). Aber das häufigere Schicksal ist wohl der weitere Abbau, und dessen Verlauf kann man wieder aus dem Gang der Autolyse erschließen. In den steril aufbewahrten Organen wird nämlich Ammoniak entbunden, ein als „*Desaminase*“ bezeichnetes Ferment vermag die sonst fest gebundene Aminogruppe des Eiweißes abzuspalten, wahrscheinlich entsprechend der Gleichung:



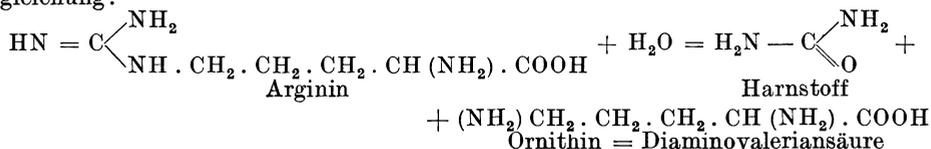
Nach dieser Auffassung ist die *Desaminierung* also das Gegenstück zu der früher (S. 172) erwähnten intravitalen Synthese der Aminosäuren aus Brenztraubensäure und Ammoniak.

Verfolgen wir nun vor allem den Verbleib dieses für das Eiweiß charakteristischen Stickstoffs. Ammoniak kreist, vermutlich als das Resultat solcher auch natürlicherweise zustande kommenden Desaminierung, stets in kleinen Mengen im Blut (ungefähr 0,9 mg in 100 ccm); aus Ammoniak und Kohlensäure wird aber synthetisch **Harnstoff** gebildet, vielleicht über die Zwischenstufe des karbaminsauren Ammoniums, also nach der Gleichung:



Verfüttert man an Hunde kohlen-saures Ammonium oder das Ammoniumsalz irgend einer Säure, welche leicht zu Kohlensäure oxydiert wird, wie z. B. ameisen-saures Ammonium, so steigt alsbald die Harnstoffausscheidung. Der Ort der Synthese ist nach den Durchblutungsversuchen von W. VON SCHRÖDER an überlebenden Nieren, Lebern und Muskeln die Leber. Zu dieser Feststellung paßt vorzüglich die Beobachtung an kranken Menschen, daß bei Leberleiden oft die Ausscheidung von Ammoniak im Harn absolut und relativ zur Harnstoffausscheidung steigt. Freilich gibt es auch Fälle, wo bei hochgradigem Schwund der Lebersubstanz die Ausscheidungsverhältnisse von der Norm kaum abweichen, woraus zu schließen wäre, daß die Leber nicht der einzige Ort der Harnstoffsynthese ist.

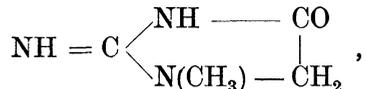
Außer auf synthetischem Wege werden kleine Mengen von Harnstoff auch durch direkte Abspaltung aus dem Arginin (s. S. 39) gebildet nach der Reaktionsgleichung:



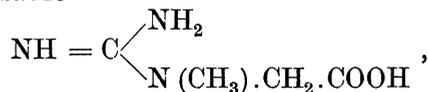
Diese Reaktion beruht auf dem Vorkommen eines eigenen Ferments in der Leber, der *Arginase* (KOSSEL und DAKIN).

Mit diesen Reaktionen haben wir nun schon den Hauptweg kennen gelernt, auf welchem der Eiweißstickstoff den Körper des Menschen verläßt. Denn erstens enthält der Harnstoff den größten Teil (im Mittel 80—90%) des im Harn ausgeschiedenen Stickstoffs, und zweitens liefern die quantitativen Stoffwechseluntersuchungen den sicheren Beweis, daß der Harnstoff als Maß des Eiweißumsatzes in unserem Körper zu gelten hat; vor allem steigt und fällt die Menge dieser Ausscheidung mit der Menge des in der Nahrung zugeführten Eiweißes (siehe S. 188).

Neben dem Harnstoff ist es das **Kreatinin**



in welchem vielleicht ein kleiner Teil des Eiweißstickstoffs unseren Körper verläßt. Es entsteht wohl durch Wasserabspaltung aus *Kreatin* oder Methylguanidinessigsäure



einem Bestandteil des Muskels, und dieses wiederum steht möglicherweise zu dem Arginin in genetischer Beziehung. Danach wäre also das Kreatinin als ein Bruchstück des Eiweißmoleküls aufzufassen, welches der tiefer greifenden Zerlegung entgangen ist. Das Kreatinin ist aber in anderem Sinne eine Schlacke des Eiweiß als der Harnstoff. Denn seine Ausscheidung läuft weder der Eiweißzufuhr noch der Harnstoffausscheidung parallel. Es erscheint reichlicher im Harn (neben Kreatin) bei größeren Gewebskonsumptionen, also z. B. im Fieber, bei der diabetischen Abmagerung, bei Phosphorvergiftung, ferner wenn hungernde Tiere starke Muskelarbeit leisten, und insbesondere bildet es sich bei Steigerung des Muskeltonus (siehe Kap. 20).

Die Kohlenstoffketten, welche von den Aminosäuren nach ihrer Desaminierung übrig bleiben, werden mit in den **Kohlehydrat-Stoffwechsel** hineingezogen, dem wir uns nunmehr zuwenden.

Die Kohlehydrate der Nahrung verließen wir, als sie nach der Aufspaltung bis zu den Monosacchariden durch die Enzyme des Speichels, des Pankreassaftes und des Darmsaftes in die Blutbahn hineinresorbiert worden waren. Man könnte meinen, daß bei der Reichlichkeit, mit welcher die Kohlehydrate gewöhnlich in der Nahrung vertreten sind, auch der Zuckergehalt im Blut wenigstens zu Zeiten der Verdauung ziemlich erheblich sein müßte. Aber man findet im allgemeinen nur 0,06—0,12%. Das hat verschiedene Gründe. Erstens verteilt sich der Zucker entsprechend seiner Diffusibilität leicht auf die Gewebe. Zweitens wird er alsbald nach der Resorption zum Teil verbrannt; das folgt aus

dem Gang des respiratorischen Quotienten (siehe S. 166) nach Kohlehydratzufuhr. MAGNUS-LEVY beobachtete z. B. bei einem Hund, dessen respiratorischer Quotient zunächst 0,74 betrug, nach dem Genuß von 300 g Reis + 30 g Zucker in der ersten Stunde einen Anstieg des Quotienten auf 0,90 und in den folgenden Stunden betrug er dann 0,87, 0,97, 0,99, 0,95 usw. Daraus folgt — nebenbei gesagt —, daß die Zellen den Zucker trotz ihrer scheinbaren Undurchlässigkeit (S. 88) doch irgendwie rasch aufnehmen können. Drittens wird der Zucker, wenn seine Zufuhr den augenblicklichen Bedarf des Körpers übersteigt, deponiert. Zur Anlage von Reserven werden die Kohlehydrate zwar im allgemeinen nicht so reichlich verwendet wie die Fette (siehe S. 164 u. 200), immerhin erheblich mehr als die Eiweißkörper, welche, wie wir später noch erfahren werden, nur unter wenigen und ganz besonderen Bedingungen im Körper des Menschen zum Ansatz zu bringen sind. Die Kohlehydratspeicherung ist aber in einer Hinsicht eigenartig; während die Fette mehr für die Dauer deponiert werden, stehen die Kohlehydratreserven jederzeit, sobald besondere Anforderungen an die Leistungsfähigkeit des Körpers gestellt werden, zur Verfügung, und zwar dadurch, daß sie vom Nervensystem oder von besonderen Organen, den Hormondrüsen aus, die übrigens zum Teil nur die Vermittler der nervösen Impulse bilden, mobilisiert werden können. Davon wird weiterhin noch die Rede sein.

Die Form, in welcher die Kohlehydrate der Nahrung gespeichert werden, ist das **Glykogen** oder die *tierische Stärke*, so genannt, weil sie, wie die pflanzliche Stärke, ein Polysaccharid von der Formel $(C_6H_{10}O_5)_n$ ist, weil sie auch mit Jod eine charakteristische, nämlich eine rotbraune Farbe erzeugt, und weil sie bei der hydrolytischen Spaltung Traubenzucker liefert. Wie die Eiweißkörper, so werden also auch die Kohlehydrate erst in eine andere Form, als sie in der Nahrung enthalten waren, übergeführt, bevor sie im Körper gespeichert werden. Nur die Fette werden unmittelbar deponiert. Der Hauptort der Glykogenspeicherung ist die Leber (CLAUDE BERNARD, HENSEN); nach reichlicher Kohlehydratzufuhr kann innerhalb 16—20 Stunden ihr Glykogengehalt bis auf 18% der Trockensubstanz anwachsen, während er nach längerem Hunger auf ein Minimum reduziert ist. Neben der Leber findet man noch ziemlich reichlich Glykogen in den Muskeln (bis zu etwa 1% der Trockensubstanz), aber auch in den weißen Blutkörperchen, im Herzen, im Uterus, in den Nieren und anderen Orts.

Obwohl das Glykogen bei seinem Abbau in Traubenzucker übergeht, kann es doch auch aus anderen Monosacchariden entstehen, z. B. leicht aus Fruktose und Mannose, schwerer aus Galaktose. Auch die dafür notwendige Umformung des Zuckermoleküls ist Sache der Leber. Daher ist bei manchen Lebererkrankungen die Verwertbarkeit der Galaktose besonders schwer gestört, und die Galaktose erscheint unverändert im Harn.

Aber auch die einfache Assimilation des Traubenzuckers gelingt der Leber nicht unbegrenzt. Bei überreichlicher Zufuhr vermag die Leber nicht allen ihr durch die Pfortader zugeführten Zucker als Glykogen zu fixieren, sondern ein Teil passiert die Leber, gelangt in den großen Kreislauf und wird nun von den Nieren dem „hyperglykämischen“ Blut (siehe S. 76) entnommen und in den Harn abgeschieden; die Nieren, welche auf den geringen Normalgehalt des Blutes an Traubenzucker von ungefähr 0,06—0,12% nicht reagieren, behandeln den Zucker bei

Überschreitung eines gewissen Schwellenwerts oder „Normalspiegels“ als Fremdstoff, und es kommt nun zu einer sogenannten *alimentären Zuckerharnruhr* oder *Glykosurie*. Die „*Assimilationsgrenze*“ der Leber für den Traubenzucker wird im allgemeinen überschritten, wenn auf einmal mehr als etwa 100—150 g zugeführt werden; für die Galaktose, die nicht direkt gespeichert werden kann, sondern dazu erst der Umformung in Traubenzucker bedarf, liegt die Assimilationsgrenze schon bei 30—40 g. Übrigens ist die Assimilationsgrenze Schwankungen unterworfen; vielerlei Schädigungen des Körpers, Infektionskrankheiten, etwa Typhus oder Pneumonie, eine erhebliche Verdauungsstörung, eine schwere Alkoholintoxikation können sie stark herabdrücken.

Die Assimilationsgrenze für Traubenzucker hat mit dem Grad der Füllung der Leber mit Glykogen anscheinend nichts zu tun; wohl aber ist dieser Grad bestimmend dafür, ob das Nahrungskohlehydrat noch als Glykogen gespeichert oder in Fett umgewandelt und anderen Orts deponiert wird.

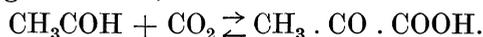
Dauernd ist die Assimilationsgrenze für den Traubenzucker bei einer Krankheit herabgesetzt, welche auch für uns wegen der Aufklärung verschiedener physiologischer Verhältnisse von großem Interesse ist, nämlich bei der schon (S. 168) erwähnten Zuckerkrankheit, dem Diabetes mellitus. Mit dessen Ursachen und mit seiner experimentellen Erzeugung wollen wir uns hier jedoch noch nicht beschäftigen, sondern wir wollen zunächst den Diabetiker als einen Organismus, bei welchem weder die Aufspeicherung des Zuckers in Form von Glykogen noch sein Abbau in normalem Umfang möglich ist, nur dafür verwenden, um einige besondere Fragen des Kohlehydratstoffwechsels zu beantworten.

Erstens nämlich fragen wir wieder, *ob im menschlichen Körper Kohlehydrat aus Eiweiß entstehen kann*. Es ist schwierig, dies allein durch Beobachtungen am Normalen zu entscheiden, hauptsächlich deshalb, weil einerseits der sich etwa bildende Zucker leicht verbrannt wird, und weil andererseits ein Glykogenvorrat, welcher sich nach einseitiger Ernährung mit Eiweiß findet, durch Sparung von Zucker oder durch Sparung und Umwandlung von Fett in Zucker entstanden sein könnte. Anders beim diabetischen Organismus, besonders wenn er durch Hunger annähernd glykogenfrei gemacht ist, bevor das Eiweiß zugeführt wird! Manche Eiweißkörper enthalten nun allerdings von vornherein Zucker in ihrem Molekül präformiert, sie setzen sich außer aus Aminosäuren auch noch aus Aminoglukose zusammen; z. B. enthält Ovalbumin 10%, Muzin sogar 33% Glukosamin. Will man den Fütterungsversuch besonders beweisend gestalten, so wählt man also ein möglichst kohlehydratarmes Eiweiß aus. LÜTHJE fütterte deshalb diabetische Hunde nach einer Hungerperiode mit Kasein, welches gar keinen Kohlehydratkern enthält, PFLÜGER mit Kabeljaufleisch, welches an Fett und Kohlehydrat besonders arm ist; in beiden Fällen reagierten die diabetischen Tiere mit starker Glykosurie.

Diese Versuche beweisen also die Umwandlung von Eiweiß in Kohlehydrat; sie könnten allenfalls noch so gedeutet werden, daß das Eiweiß Fett erspart, und daß dies *Fett in Kohlehydrat umgewandelt* wird. Das ist aber wenig wahrscheinlich, denn Fett wird besonders leicht angesetzt, und Eiweiß besonders leicht an Stelle von Fett zerlegt. Damit soll jedoch nicht gesagt sein, daß Zucker nicht auch aus Fett entstehen kann, wie ja auch das Umgekehrte geschieht (siehe S. 165); nur ist es im Stoffwechselversuch bisher nicht sicher zu erweisen.

Fragen wir nun noch nach dem Chemismus dieser Umwandlungen. Die Tatsache der Desaminierung (siehe S. 174) macht ihn uns, wenigstens teilweise, verständlich. Wenn z. B. Alanin $\text{CH}_3 \cdot \text{CH}(\text{NH}_2) \cdot \text{COOH}$ nach reichlicher Verfütterung zum Teil desaminiert wird, so bilden sich Brenztraubensäure $\text{CH}_3 \cdot \text{CO} \cdot \text{COOH}$ und Milchsäure $\text{CH}_3 \cdot \text{CH}(\text{OH}) \cdot \text{COOH}$; beides sind aber bekannte Spaltprodukte der Kohlehydrate, welche z. B. bei der Durchblutung der Leber, wohl über Glycerinaldehyd, mit Leichtigkeit aus Glykogen, Traubenzucker oder auch Fruchtzucker entstehen (EMBDEN), welche umgekehrt auch leicht in Kohlehydrat zurückzuverwandeln sind. Daher ist denn auch zu beobachten, daß, wenn man eine überlebende Leber mit alaninhaltigem Blut durchströmt, Glykogen angesetzt, oder, wenn man einen diabetischen Hund mit Alanin füttert, quantitativ die entsprechende Menge Zucker ausgeschieden wird (EMBDEN, NEUBERG). Aber auch andere Aminosäuren, wie Glykokoll und Asparaginsäure, sind Zuckerbildner; hier folgt wohl der Desaminierung noch ein Umbau der stickstofffreien Säuren.

Was die Bildung von Zucker aus Fett anlangt, so kann das Glycerin der Fette sich leicht über Glycerinaldehyd $\text{CH}_2(\text{OH}) \cdot \text{CH}(\text{OH}) \cdot \text{COH}$, den einfachsten Zucker, in Kohlehydrat umwandeln (s. S. 166). Für die Fettsäuren wird angenommen, daß ihre lange C-Kette durch die β -Oxydation in Teilstücke von zwei Kohlenstoffatomen (Acetaldehyd) abgebaut wird (siehe S. 168), und daß von diesen aus die Synthese zu Zucker vor sich gehen kann, etwa über die reversible Reaktion:

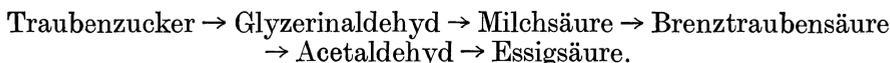


Wenden wir uns nach Erörterung des Aufbaus der *Dissimilation der Kohlehydrate* zu! Das in der Leber und in anderen Organen gespeicherte Glykogen wird unzweifelhaft durch ein *diastatisches Ferment* zu Traubenzucker abgebaut. Läßt man eine ausgeschnittene Leber liegen, so bildet sich in ihr Zucker, und zwar um so reichlicher, je glykogenhaltiger sie ist (HENSEN, CLAUDE BERNARD). Aber auch während des Lebens geschieht dieser Abbau; die Lebervene enthält daher meist etwas mehr Traubenzucker als die Pfortader, und nach Ausschaltung der Leber aus dem Kreislauf sinkt die Blutzuckermenge auf die Hälfte bis ein Drittel der vorherigen Menge. Steigt der Bedarf an Zucker im Körper für oxydative Zwecke, so kann der Glykogenvorrat der Leber schnell dezimiert werden; so wird durch starke Muskelarbeit, durch Hunger, durch rasche Abkühlung, z. B. durch ein kaltes Bad, die Leber ihres Glykogens beraubt. Diese regulative Mobilisierung wird nach CLAUDE BERNARD von dem sog. Zuckerzentrum aus besorgt, welches beim Sinken des Zuckerspiegels im Blut unter ein bestimmtes Niveau in Tätigkeit tritt. Es gibt nämlich eine Methode, die Leber dazu zu veranlassen, mit großer Geschwindigkeit ihr Glykogen in Traubenzucker umzuwandeln; das ist ein Einstich in die Medulla oblongata an bestimmter Stelle, dem Zuckerzentrum; die Folge ist eine starke Glykosurie. Andere künstliche Mittel, Diabetes zu erzeugen, sind Injektion von Adrenalin, Exstirpation des Pankreas, Zufuhr von überreichlich Schilddrüsen-substanz u. a. In allen diesen Fällen schüttet die Leber quasi ihr Glykogen in Form von Traubenzucker ins Blut aus. Diese Zusammenhänge werden im Kap. 18 genauer erörtert werden.

Der Diabetes besteht aber, wie vorgreifend gesagt sein mag (s. Kap. 18), nicht bloß in einer Störung der Glykogenbildung und Glykogenretention,

sondern auch in einer Störung des Traubenzuckerabbaues. Wir sahen vorher (siehe S. 176), daß, wenn man einen gesunden Hund mit Kohlehydrat füttert, alsbald sein respiratorischer Quotient gegen 1 hin ansteigt. Anders bei der Zuckerkrankheit! Ein diabetisch gemachter Hund bekam z. B. Milchreis; vor der Fütterung betrug sein respiratorischer Quotient 0,72, in den nächsten Stunden nach der Fütterung 0,69, 0,73, 0,72, 0,73. Hier versagen also offenbar die den Abbau besorgenden Faktoren; der respiratorische Quotient bleibt nach wie vor der gleiche.

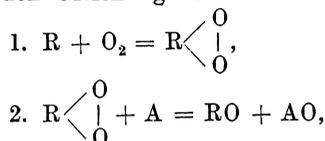
Über den weiteren Abbau der Kohlehydrate vom Traubenzucker aus ist zu dem bereits Gesagten kaum noch etwas Neues hinzuzufügen; der Abbau läßt sich etwa in das Schema zusammenfassen:



In diese Folge münden auch die Reaktionsfolgen ein, welche beim Abbau der Fettsäuren und der Aminosäuren durchlaufen werden.

Den Schluß des Abbaus muß dann die **unter Sauerstoffaufnahme vor sich gehende Verbrennung zu Kohlensäure und Wasser**, den bekannten Endprodukten des Stoffwechsels, bilden. Über deren Mechanismus ist etwa folgendes bekannt: es ist in einigen Fällen gelungen, das Prinzip der Zellatmung, Sauerstoffaufnahme und Kohlensäureabgabe, von den lebenden Zellen abzutrennen und sie auf die Weise der Analyse zugänglicher zu machen; so ist z. B. im Brei von Seeigeleiern und von Leberzellen, ferner in Pulvern von Staphylokokken, von Seeigeleiern und von Hefe, welche man durch Eintragen der Zellen in Aceton-Äther und Trocknen im Vakuum erhält, ein Teil der normalen Atmung noch enthalten (O. WARBURG und MEYERHOF). Die Atmung besteht also unter ähnlichen Bedingungen noch fort, wie etwa die Gärung im Hefepreßsaft (siehe S. 18), und erinnert schon dadurch an einen enzymatischen Prozeß. Als solcher ist die Verbrennung im Organismus aber auch noch aus anderen Gründen aufzufassen. Wäscht man Aceton-Hefe mit Wasser, so verliert sie das Gärvermögen, weil ins Waschwasser eine als „Koferment der Gärung“ bezeichnete Substanz übergeht, die man nur dem gewaschenen Rückstand wieder zuzusetzen braucht, um die Gärung von neuem beginnen zu lassen (HARDEN und YOUNG). Gerade so verschwindet beim Waschen mit Wasser die Atmung aus Aceton-Hefe (MEYERHOF) oder aus Muskelbrei (BATELLI und STERN) und kehrt zurück, wenn man den im Waschwasser enthaltenen selbst nicht atmenden „Atmungskörper“ wieder zusetzt. Die Verwandtschaft von Gärung und Atmung ist aber nicht bloß eine äußerliche insofern, als beide auf dem Zusammenwirken zweier Komponenten, einer wasserlöslichen und einer wasserunlöslichen, beruhen, sondern das Koferment der Gärung und der Atmungskörper sind nach MEYERHOF sogar identisch, so daß man mit dem Atmungskörper des Muskels die verschwundene Gärung der Hefe ebenso wie die verschwundene Muskelatmung wieder erregen kann (über weitere Ähnlichkeiten zwischen Atmung und Gärung siehe Kapitel 20).

Die Sauerstoffübertragung auf an sich schwer oxydable organische Verbindungen geschieht nach den Theorien von BACH, ENGLER u. a. durch Vermittlung der sogenannten „Oxygenasen“; das sind Stoffe (Rezeptoren R), welche durch Anlagerung von molekularem Sauerstoff in Peroxyde übergehen und dann in Gegenwart von oxydablen Stoffen (Acceptoren A) einen Teil dieses Sauerstoffs weitergeben, entsprechend den Gleichungen:



also Stoffe, welche in gewisser Hinsicht Katalysator-Natur haben. Als Oxygenasen in diesem Sinn können sehr einfache chemische Verbindungen, wie Eisen- oder Mangansalze, wirken (BERTRAND, MANCHOT). Nach Versuchen von O. WARBURG rührt nun in der Tat die ganze Atmung der Seeigeleier wahrscheinlich von nichts weiter her, als von der Verbrennung von Lezi hin an Eisen, das in den Eiern enthalten ist. Daher kann man auch die tierische Verbrennung mit Hilfe von

Eisen weitgehend nachahmen. So fand WARBURG, daß beim Schütteln mit Blutkohle, die stets kleine Mengen Eisen enthält, Zystin gerade so wie von den lebenden Zellen in Kohlensäure, Schwefelsäure und Ammoniak zerlegt wird. Der Stickstoff wird also in dem Modellversuch gerade so wenig oxydiert wie in der Zelle. Die Verbrennung an Blutkohle läßt sich durch ein wenig Blausäure hemmen, entsprechend der Affinität der Blausäure zu den Schwermetallen; bekanntlich ist auch für die Zellatmung Blausäure das heftigste Gift.

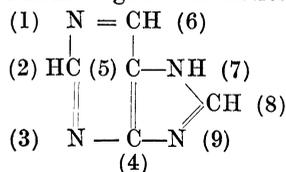
Es bleibt nun noch der Stoffwechsel einiger Gruppen von Verbindungen zu erörtern, welche quantitativ hinter den Fetten, Eiweißkörpern und Kohlehydraten zurücktreten und deshalb leichter der Beachtung entgehen. Wegen ihrer geringen Quantität spielen sie auch nicht diejenige Rolle, in welcher die übrigen Nahrungsstoffe in erster Linie unsere Aufmerksamkeit auf sich lenken, sie sind nicht oder nur im kleinsten Maß Träger der chemischen Energie, welche durch das Mittel der chemischen Umwandlung für den Betrieb der Organe zur Verfügung gestellt werden muß. Aber da wir unter einem Nahrungsstoff nicht bloß einen Stoff verstehen, welcher durch seine chemische Reaktionsfähigkeit für unseren Körper Wert erhält, sondern auch einen Stoff, welcher zu den organischen Bausteinen der Zellen gehört (siehe S. 14), so sind zu den Nahrungsstoffen außer den Fetten, Eiweißkörpern und Kohlehydraten auch die *Nukleoproteide*, die *Lipoide* und — vielleicht eine besondere Klasse — die sogenannten *Vitamine* oder *akzessorischen Nährstoffe* zu zählen.

Die **Nukleoproteide** kommen, wie ihr Name besagt, vor allem in den Zellkernen vor. Sie sind nahe mit den Eiweißkörpern verwandt, insofern als ihr kompliziertes Molekül größtenteils aus Eiweiß besteht; aber daneben enthält es noch andere Bestandteile, vor allem die sogenannten **Purine**, deren Stoffwechsel unser besonderes Interesse beansprucht.

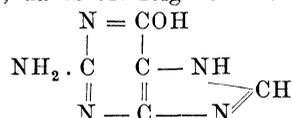
Wir hätten die Chemie der Nukleoproteide schon in dem Kapitel über die Physiologie der Verdauung erörtern können, da auch die Nukleoproteide, wie die übrigen Nahrungsstoffe, durch die einzelnen Verdauungssäfte mit Hilfe von Enzymen, die man als *Nukleasen* bezeichnet, sukzessive abgebaut werden. Der Magensaft spaltet die Nukleoproteide in *Nuklein* und in Eiweiß; letzteres wird verdaut, das Nuklein, eine in Wasser und in Säure unlösliche Substanz, bleibt unverändert. Im Darm wird das Nuklein durch das Alkali des Pankreassaftes gelöst und dann weiter zerlegt; nämlich es wird abermals Eiweiß abgespalten und verdaut, daneben entsteht die sogenannte *Nukleinsäure*, ein merkwürdiger Komplex aus Kohlehydrat, Phosphorsäure, Purinen und Pyrimidinen, welcher durch den Darmsaft noch weiter gespalten wird, aber nicht bis zu den eben genannten einzelnen Bausteinen des Moleküls, sondern es bleiben größere Bruchstücke übrig, die sogenannten *Nukleoside*, welche aus Kohlehydrat und Purin bzw. Pyrimidin bestehen, und diese werden dann resorbiert.

Wenn die Nukleoproteide in den Organen von den intrazellulären Enzymen angegriffen werden, dann geht die Spaltung dort zunächst den gleichen Weg, aber — wie wir das auch bei den anderen Nahrungsstoffen gefunden haben — sie geht tiefer als bei der Verdauung im Darmkanal; die Nukleinsäure zerfällt in ihre eigentlichen Bauelemente, und auch diese werden noch weiter verändert.

Was nun diese Bauelemente im einzelnen anbelangt, so kommen von Kohlehydraten sowohl Hexosen als Pentosen vor. Die Purine sind *Adenin*, *Guanin*, *Hypoxanthin* und *Xanthin*. Sie leiten sich ab von einer Stammsubstanz, dem *Purin* (EMIL FISCHER), welchem folgende Konstitutionsformel zukommt:

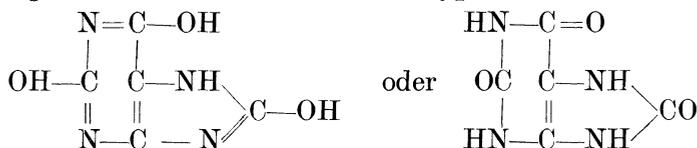


Die beige-schriebenen eingeklammerten Zahlen 1—9 sollen die Orte bezeichnen, an denen Substitutionen eintreten können. So ist z. B. Guanin als 2-Amino-6-Oxypurin zu bezeichnen, da es die folgende Konstitutionsformel hat:



Entsprechend ist Adenin = 6-Aminopurin, Hypoxanthin = 6-Oxypurin, Xanthin = 2,6-Dioxyypurin (EMIL FISCHER).

Diese Purine werden nun in den Organen durch besondere Enzyme (BURIAN, SCHITTENHELM) desaminiert und oxydiert; dabei entsteht als wichtigstes Derivat das 2, 6, 8-Trioxypurin, die **Harnsäure**,



welche lange Zeit als Produkt einer unvollkommenen Eiweißverbrennung aufgefaßt wurde, bis HORBACZEWSKI zeigte, daß sie im Reagenzglas entsteht, wenn man Nuklein zu Milzpulpa hinzusetzt. Heute gelten die gesamte Harnsäure des Harns sowie die dort vorkommenden methylierten Xanthine, zusammengefaßt unter dem Namen der *Harnpurine*, als Abkömmlinge der Kernsubstanzen.

Nur bei Vögeln und Reptilien, deren Harnstickstoff überwiegend Harnsäure ist, hat diese größtenteils eine andere Herkunft. Nämlich wie bei den Säugetieren, Amphibien und Fischen das äußerste stickstoffhaltige Endprodukt der Eiweißzersetzung, das Ammoniak, zusammen mit Kohlensäure zu Harnstoff synthetisch vereinigt wird, so bilden Vögel und Reptilien ebenfalls unter Verwendung von Ammoniak und gleichfalls in der Leber Harnsäure.

So wie also im Harn der Säugetiere der ausgeschiedene Harnstoff ein Maß der Eiweißzersetzung ist, so sind die Purine ihres Harns ein Maß des Nukleinstoffwechsels.

Die Harnpurine stammen teils aus der Nahrung, welche natürlich stets Kernmaterial enthält, teils gehen sie aus dem Zerfall von Körpersubstanz hervor. Man kann dementsprechend *exogene* und *endogene Harnpurine* unterscheiden (BURIAN und SCHUR). Diese doppelte Quelle ist auf folgende Weise festzustellen: läßt man einen Menschen hungern, so scheidet er eine ziemlich konstante, individuell charakteristische Menge von Purinen aus; sie entspricht der täglichen Abnutzung seiner Organe. Wenn nun Organsubstanz aus irgend einem Grunde stärker schwindet, dann wird die Menge der endogenen Harnpurine zunehmen; das geschieht z. B., wenn sich bei einer Pneumonie nach der Krise das Infiltrat der Alveolen löst und aus den zerfallenden Leukozyten die Nukleoproteide austreten und resorbiert werden, oder wenn bei der Röntgenbestrahlung vergrößerter Lymphdrüsen Lymphozyten zerstört werden. Die exogene Herkunft der Harnpurine kann man beweisen, indem man Nahrung von verschiedenem Kernreichtum gibt. Animalische Kost ist im allgemeinen kernreicher als vegetabilische; bei animalischer Kost werden täglich etwa 2 g, bei vegetabilischer nur 0,2—0,7 g Harnsäure ausgeschieden. Und wie schon das histologische Bild vermuten läßt, produzieren drüsige Organe, wie Leber, Nieren, Thymus, entsprechend ihrem Kernreichtum, mehr Purine, wenn sie genossen werden, als Muskeln

oder Gehirn. Muskeln enthalten freilich Purine, namentlich Hypoxanthin, außer in den Kernen auch noch in freiem Zustand; daher sind Fleischbrühe und besonders Fleischextrakt purinhaltig. Aber auch unter den animalischen gibt es ein wichtiges Nahrungsmittel, welches sehr purinarm ist, die Milch. Andererseits gibt es auch Vegetabilien, welche ziemlich reichlich Purine liefern können; so enthalten Kaffee, Tee und Kakao methylierte Xanthine als Koffein, Theophyllin und Theobromin.

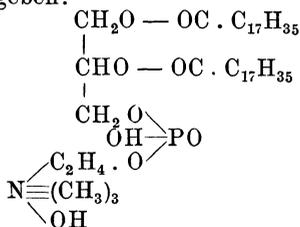
Diese Zusammenhänge sind speziell von Bedeutung für die Behandlung einer verbreiteten Konstitutionsanomalie, der *Gicht*. Deren Hauptsymptom ist bekanntlich die anfallsweise auftretende entzündliche Schwellung bestimmter Gelenke, begleitet von einer Abscheidung von Harnsäure besonders in die Gelenknorpel. Die unmittelbare Ursache der Ablagerung ist eine „Hyperurikämie“, eine Überladung des Blutes mit Harnsäure, welche schwer löslich ist und darum leicht ausfällt. Worauf aber diese Hyperurikämie beruht, ist bisher unbekannt. Deshalb ist man auch bisher nicht imstande, die Krankheit an der Wurzel zu fassen, sondern muß sich wesentlich auf eine diätetische Behandlung beschränken, und die physiologische Chemie zeigt dafür den Weg: Vermeidung von Fleisch aller Art, von Kaffee, Tee, Schokolade; statt dessen vegetarische Kost und Milch. Eine Mahlzeit von Leber oder Niere kann bei Gichtdisposition direkt einen Anfall auslösen.

Die *Purine* müssen als *unentbehrliche Bestandteile der Nahrung* angesehen werden. Denn es gibt bisher keine ganz sicheren Beweise dafür, daß sie in unserem Körper synthetisch gebildet werden können, wenigstens im Körper des Erwachsenen. Im Körper des Säuglings nimmt allerdings der Bestand an Purinen zu, obwohl seine Nahrung, die Milch, fast purinfrei ist. Auch im bebrüteten Hühnerrei bilden sich Purine (KOSSEL). Ferner vollzieht sich offenbar im Rheinlachs, welcher zum Laichen stromaufwärts wandert (siehe S. 174), die Purinsynthese, da er, ohne Nahrung aufzunehmen, seine Geschlechtsprodukte, die an Nukleoproteiden reichen Spermatozoen, aufzubauen vermag (MIESCHER).

Über den Stoffwechsel der *Pyrimidine* (Cytosin, Thymin, Uracil), welche mit den Purinen als charakteristische Komponenten der Nukleoproteide zu nennen waren (siehe S. 180), ist bisher fast nichts bekannt.

Gehen wir nun zur Betrachtung der *Lipoide* über. Im Gegensatz zu den bisher erörterten Nahrungsstoffen handelt es sich bei ihnen um eine Gruppe von Verbindungen, welche chemisch uneinheitlich und statt dessen physikalisch-chemisch charakterisiert ist. Die Lipoide tragen nämlich ihren Namen der „fettähnlichen“ nur deshalb, weil sie in denselben Lösungsmitteln, wie die Fette, löslich sind, nämlich in heißem Alkohol, Äther, Benzol u. a. Das ist natürlich eine sehr unvollkommene Charakterisierung, weil die gleiche Eigenschaft zahlreichen Verbindungen zukommt, welche nicht zu den Lipoiden gezählt werden. Die wichtigsten Lipoide sind die *Lezithine* und *Cholesterin*.

Das Molekül des Lezithins besteht aus Glycerin, Fettsäuren, Phosphorsäure und einer Stickstoffbase. Die verschiedenen Lezithine unterscheiden sich voneinander durch die Art der Fettsäuren und durch die Stickstoffbase, welche meistens Cholin ist, öfter aber auch Aminoäthylalkohol zu sein scheint. Die Konstitution eines Lezithins mit 2 Molekülen Stearinsäure und mit Cholin wäre durch die folgende Formel wiederzugeben:



Cholesterin ist ein aromatischer Alkohol von unbekannter Konstitution. Sein Nachweis wurde früher (S. 47) bei Erörterung der Chemie der Galle beschrieben.

Die Lipoide kommen, soviel man weiß, in den Zellen aller Organe vor. Bei den Tieren sind sie besonders reichlich im Nervengewebe und im Eidotter enthalten. Wir hatten sie schon einmal zu erwähnen, als bei der Beschreibung der Blutkörperchen von den allgemeinen diosmotischen Eigenschaften der Zellen die Rede war (siehe S. 88). Die Plasmahaut der Zellen verhält sich nämlich in vieler Hinsicht so, als ob sie eine Lipoidmembran wäre, und Analysen lehren auch, daß die „Zell-Stromata“ wirklich zu einem erheblichen Teil aus Lipoiden bestehen. *Die Lipoide sind demnach niemals fehlende Bauelemente der Zellen*, sie gehören gerade so gut zu deren integrierenden Bestandteilen wie die Eiweißkörper, Nucleoproteide, Wasser und Salze, während Kohlehydrate und Fette weit eher als Reservematerial zu bezeichnen sind, das auch im Zelleib gelegentlich fehlen kann.

An Hand dieser Betrachtungen gelangen wir von selbst zu der Frage, *ob die Lipoide unbedingt in der Nahrung enthalten sein müssen*, um Stoffwechselverluste zu ersetzen, oder ob sie vielleicht von den Zellen aus anderem Material immer wieder neu gebildet werden können. Diese Frage kann nicht a priori beantwortet werden; denn wenn auch Phosphorsäure, Fettsäuren und Glycerin durch den Stoffwechsel sicherlich zu Gebote stehen, so wissen wir über die Bildungsbedingungen des Cholins noch zu wenig und vom Cholesterin mit seiner unbekanntenen Konstitution erst recht. So kann nur das Experiment entscheiden.

Demgemäß hat man Mäuse mit einer an sich zureichenden Kost ernährt, aus welcher nur die Lipoide durch Extraktion entfernt worden waren (STEPP); die Mäuse gingen dabei zugrunde, während sie gediehen, wenn dem extrahierten Futter die Lipoide wieder zugesetzt wurden. Die Mäuse waren also nicht oder nicht in genügendem Maß imstande, die Lipoide synthetisch zu bilden. Aber dieser Befund läßt sich nicht verallgemeinern. FINGERLING ernährte Enten monatelang mit einem Futter, das an organischen Phosphorverbindungen arm war, dagegen anorganische Phosphate reichlich enthielt, und fand, daß ihre Eierproduktion nicht geringer war, als bei normaler Ernährung, und daß die Eier ebensoviel Lezithin enthielten, wie sonst, weit mehr, als etwa direkt aus dem Körper der Ente an die Eier abgegeben sein konnte. Die Enten vermögen also Lezithin aufzubauen. Daraufhin fütterte STEPP auch Tauben mit dem Futter, aus welchem die Lipoide extrahiert waren und bei dem die Mäuse zugrunde gingen; im Gegensatz zu diesen blieben die Tauben gesund. Offenbar sind also die Vögel befähigt, sowohl Cholesterin, wie Lezithin in ihrem Körper zu bereiten; für sie sind also die Lipoide, anscheinend im Gegensatz zu den Säugetieren, keine unentbehrlichen Nahrungsbestandteile.

Es bleibt nun noch die Gruppe der sogenannten **Vitamine** oder der **akzessorischen Nährstoffe** zu erörtern übrig. Wir betreten damit ein Forschungsgebiet, auf welchem noch alles in Fluß ist, ein Gebiet, das aber die Aufmerksamkeit ganz besonders auf sich lenkt, nicht bloß wegen der Neuartigkeit seines Inhalts, sondern auch, weil es anscheinend das Verständnis für einige merkwürdige, lange bekannte und weit verbreitete, aber bisher nur unbefriedigend erklärte Krankheiten vermittelt, die durch die Nahrung verursacht sind, und weil dadurch Ärzte und Laien angeregt werden, noch andere scheinbare oder wirkliche Schädli-

gungen des Körpers mit einer unzweckmäßigen Auswahl unter den Nahrungsmitteln in Zusammenhang zu bringen und alte ernährungsreformerische Forderungen neu zu begründen.

Die eben genannten, zum Teil epidemisch auftretenden, von der Unvollkommenheit der Nahrung herrührenden Krankheiten sind vor allem der Skorbut, die MÖLLER-BARLOWSche Krankheit, die Beri-Beri oder Kakke-Krankheit und die Xerophthalmie.

Vom *Skorbut* gilt lange als ausgemacht, daß er dann ausbricht, wenn auf Schiffsreisen, bei Belagerungen oder einer Hungersnot Mangel an frischer Pflanzennahrung eintritt, und daß man die Krankheit, welche sich in Blutungen und Geschwüren im Zahnfleisch, Blutungen im Periost, in Anämien und in Gelenkschmerzen äußert, wirksam bekämpfen kann, indem man, wenn auch nur in kleinen Dosen, frische Gemüse verabreicht. Auch beim Meerschweinchen ist experimentell Skorbut durch fast ausschließliche Fütterung mit Brot, mit getrockneten Hülsenfrüchten oder trockenen Getreidekörnern zu erzeugen und kann alsdann durch Hinzugabe von Grünfutter, von frischem Fruchtsaft oder auch von frischer ungekochter Milch geheilt werden (HOLST und TH. FRÖHLICH); es genügt auch, den trockenen Hafer oder die trockene Gerste, mit welcher man den Skorbut hervorgerufen hat, auskeimen zu lassen, um sie zu vollwertigen Nahrungsmitteln zu machen, während abermalige Trocknung des gekeimten Korns bei 37° genügt, um die früheren Schädigungen aufs neue erzeugen zu können (V. FÜRST). Überhaupt ist die wirksame Substanz außerordentlich hitzeempfindlich; daher wird durch Sterilisierung in Büchsen die antiskorbutische Eigenschaft der Gemüse im allgemeinen total vernichtet, während längeres Erhitzen auf 60—80° vielfach nur eine starke Schwächung der Schutzwirkung herbeiführt.

Ganz ähnliche Symptome, wie der Skorbut weist die MÖLLER-BARLOWSche *Krankheit* der Kinder auf. Sie wird deshalb auch als *infantiler Skorbut* bezeichnet. Sie kommt fast ausschließlich bei künstlicher Ernährung der Säuglinge vor, besonders bei Ernährung mit zu lange oder bei zu hoher Temperatur sterilisierter Milch und mit Kindermehlpräparaten. Experimentell ist die Krankheit bei Affen durch Verfüttern von kondensierter Milch erzeugt worden (K. HART). Auch hier können die Symptome, heftige Gliederschmerzen, Periost- und Epiphysenblutungen, häufig in wunderbar kurzer Zeit durch Verabreichung ganz kleiner Dosen Apfelsinen- oder Zitronensaft oder von frischer Milch beseitigt werden.

Die *Beri-Beri-Krankheit* kennt man besonders von Japan, vom malaiischen Archipel und den Philippinen, wo sie große Opfer gefordert hat. Sie besteht meist in einer allgemeinen Nervenentzündung und Nervendegeneration, begleitet von Kontrakturen, Atrophien und Lähmungen der Muskeln; dazu kommen Herzschwäche, Ödeme, Diarrhöen und allgemeiner Verfall. Die Krankheit ist in den genannten Ländern meist die Folge einer vorzugsweisen Ernährung mit Reis, aber mit Reis, der poliert, d. h. seiner äußeren Kleieschicht durch Abmahlen beraubt worden ist (EYKMAN, SCHAUMANN). Gibt man zu poliertem Reis die Reiskleie hinzu, so tritt Genesung ein. Auch bei Vögeln kommt nach Fütterung mit poliertem Reis eine ganz ähnliche Krankheit vor (EYKMAN); sie wird als *Geflügel-Beri-Beri*, *Polyneuritis gallinarum* oder *alimentäre Dystrophie* bezeichnet. Sie ist nicht bloß mit Reiskleie zu heilen, sondern auch mit anderen Kleiesorten, mit frischem Fleisch, Hefe, gewissen Bohnensorten, Eigelb, frischer Milch u. a. Bei den

kranken Tauben sind Sauerstoffkonsum und Kohlensäureproduktion aller Organe sehr stark erniedrigt; dies dürfte die Hauptursache der Muskel- und Nervenaffektionen sein. Durch Hefeextrakt läßt sich der respiratorische Gaswechsel wieder bis zur Norm herauftreiben (ABDERHALDEN). Daß dabei die Störung des Stoffwechsels irgend ein stoffliches Defizit bedeutet, wird dadurch erwiesen, daß der Zustand von Tieren, die durch einseitige Reisfütterung krank gemacht sind, eher durch Fütterung von Muskeln oder Pankreas gesunder Tauben gebessert wird, als durch Fütterung der gleichen Organe beriberikrankter Tauben (W. R. HESS).

Auch bei Kaninchen hat man eine beriberiartige Krankheit durch einseitige Fütterung mit Maiskörnern, bei Hunden und Katzen mit in Sodalösung gekochtem Fleisch hervorgerufen (SCHAUMANN). Beri-Beri kann beim Menschen auch durch Ernährung mit fein ausgemahlenem Mehl anderer Cerealien erzeugt werden.

Auf den Zusammenhang einer weiteren Krankheit, der *Xerophthalmie*, mit dem Mangel eines unbekanntem Nahrungsbestandteils ist man erst durch Fütterungsversuche an Tieren aufmerksam geworden. Die Physiologen haben sich seit langem damit abgegeben, Tiere mit einem künstlichen, aus gereinigten Nahrungsstoffen zusammengestellten Futter aufzuziehen. Diese anscheinend so einfache Aufgabe ist meist nicht zu lösen gewesen, und erst allmählich ist man darauf gekommen, die Ursache in dem Fehlen spurenhafter Beimengungen zu erkennen. HOPKINS ernährte z. B. junge Ratten mit einem Futter aus Kasein, Stärke, Schweinefett, Rohrzucker und Salzen; trotz reichlicher Aufnahme wuchsen die Tiere doch nicht. Legte er aber zu dem Futter eine ganz kleine Menge Milch, welche nur 1—4% des gesamten Futters ausmachte, hinzu, so gediehen die Tiere. Auch Ersatz des reinen Kaseins durch ein käufliches, etwas weniger reines Präparat war von Vorteil, während mehrfaches Umkristallisieren eines in einem Versuch verwendeten Milchzuckerpräparates die Ernährungslage verschlechterte. Mc COLLUM und DAVIS beobachteten an Ratten, daß sie bei einem Futter, dem als Fett etwas Butter, Lebertran oder Eidotter beigegeben war, ausgezeichnet gediehen, während sie im Wachstum zurückblieben, wenn an Stelle der genannten Fette Olivenöl, Mandelöl oder Schweinefett gegeben wurde. Dies führte zu der Erkenntnis, daß gewissen Fetten eine kleine Beimengung anhaftet, welche fett- und alkohollöslich, dagegen wasserunlöslich ist und in Abwesenheit von Sauerstoff bei der Verseifung der Fette nicht zerstört wird, also selber kein Fett ist. Dieser *fettlösliche Stoff* ist nun für das Wachstum der jungen Ratten verantwortlich. Aber sein Mangel schädigt auch sonst; die Tiere neigen zu Appetitlosigkeit, Diarrhöen, Lungenaffektionen und sind in erhöhtem Maß gegen bakterielle Infektionen empfindlich. Das ist wohl auch die Ursache für die Erkrankung der besonders vulnerablen Hornhaut in Form der vorher genannten Xerophthalmie, einer eigentümlichen, anscheinenden Eintrocknung der Hornhaut, die leicht in Geschwürsbildung bis zum Ausbruch einer richtigen *Keratomalazie* übergeht. Die Xerophthalmie kann mit Sicherheit durch Butter oder Lebertran geheilt werden. Der fettlösliche Stoff ist nun außer in gewissen Fetten auch in der Milchmolke, in Leber und Nieren, besonders aber auch in grünen Blättern (Gemüse) enthalten. Auch beim Menschen bricht unter ungünstigen Ernährungsverhältnissen (Mangel an Milch und

Butter) unter gleichzeitiger Störung des Wachstums Xerophthalmie aus; auch für die Rachitis wird von manchen der Mangel an fettlöslichem Stoff angeschuldigt.

Es ist natürlich seit der Beweisführung durch EYKMAN, daß das Fehlen der Reiskleie die Ursache für die verheerende Beri-Beri-Krankheit ist, der Versuch gemacht worden, aus den Heilmitteln wirksame Prinzipien, ein „Antineuritin“ aus der Reiskleie, der Hefe, ein „Antiskorbutin“ aus Weißkohl, Löwenzahnblättern, Rüben und ähnlichem zu isolieren. Bei der Reiskleie glückte zuerst C. FUNK die Darstellung einer wirksamen Substanz, welche wasser- und alkohollöslich ist, durch anhaltendes Kochen zerstört wird, Stickstoff enthält und die Reaktionen organischer Basen gibt. Er nannte sie wegen ihrer Bedeutung für das Leben und wegen ihres Charakters einer Stickstoffbase *Vitamin* und sprach von den Krankheiten durch Vitaminmangel als *Avitaminosen*. Diese Bezeichnungen sind aber mehrfach beanstandet worden, weil FUNK Vitamine alle die hypothetischen Stoffe nannte, welche in den bei Skorbut und Beri-Beri heilsamen Nahrungsmitteln möglicherweise enthalten sind, während einige der mehr oder weniger isolierten Produkte anscheinend von Stickstoff frei sind. HOFMEISTER spricht deshalb indifferenter von *akzessorischen Nährstoffen* und bezeichnet die Krankheiten, welche dem Mangel an diesen entspringen, als *Insuffizienzkrankheiten*.

Es ist auch der Versuch gemacht worden, auf die ja freilich nur unvollkommene chemische Charakterisierung der Vitamine hin mit bekannten chemischen Substanzen antineuritische oder antiskorbutische Wirkungen zu erzielen, und nicht ohne Erfolg; so kann man mit manchen Purin- und Pyrimidinbasen, mit Pyridin- und Nikotinsäure-Derivaten und anderem bei Beri-Beri Besserung erreichen (FUNK, WILLIAMS u. a.).

Wenn so das Wesen der Insuffizienzkrankheiten in den Folgen eines Mangels an gewissen unersetzlichen Beimengungen zu den Hauptnahrungsstoffen, Eiweißkörpern, Kohlehydraten und Fetten, erblickt werden muß, dann sind die Insuffizienzkrankheiten offenbar nahe verwandt mit den vorher besprochenen Störungen, welche aus dem Mangel an Lipoiden, Purinen oder auch gewissen Aminosäuren entspringen; es sei etwa an die schwere Unterernährung erinnert, die beim Ersatz von Fleisch durch Leim zustandekommt (S. 170). Speziell das Wachstum kann z. B. nach OSBORNE und MENDEL ähnlich wie beim Mangel an fettlöslichem Vitamin sistieren, wenn man den Eiweißbedarf allein mit dem Gliadin des Weizens deckt; sobald man aber das dem Gliadin fehlende Lysin hinzufügt, schreitet das Wachstum fort. Der rätselhafte Charakter, der den Avitaminosen noch anhaftet, wird also vermutlich schwinden, sobald erst einmal die einzelnen anzunehmenden Vitamine voneinander isoliert, rein dargestellt und in ihrer chemischen Konstitution erkannt sind.

13. Kapitel.

Die Ernährung.

Die Methoden der Stoffwechselanalyse und der Messung des Energiewechsels 188. Stoff- und Energiewechsel im Hungerzustand 194. Der Einfluß der Körpergröße und des Lebensalters 195. Der Energiewechsel bei Nahrungszufuhr, die Verdauungsarbeit und die spezifisch dynamische Wirkung der Eiweißkörper 197. Der Eiweißbedarf 198. Der Nahrungsbedarf bei körperlicher Arbeit 200. Der Wirkungsgrad der Muskelmaschine 202. Die Quelle der Muskelkraft 203. Der Einfluß der geistigen Arbeit 204. Die Ausnützung der Nahrungsmittel 204. Das Vorratsmaß und die Eiweißfrage 207. Der Bedarf bei verschiedener beruflicher Tätigkeit 209. Vegetarische Ernährung 210.

Das vorige Kapitel lehrte uns die chemischen Umwandlungen kennen, welche die Nahrungsstoffe innerhalb des Körpers durchmachen. Rufen wir uns nun ins Gedächtnis zurück, welchen Zweck dieser „Stoffwechsel“ erfüllt. Vom Standpunkt des Vergleichs des Menschen mit einer Maschine ist dies klar: unausgesetzt werden von unserem Körper Arbeiten der verschiedensten Art verrichtet, und ähnlich wie bei einer Maschine ist die Arbeitsleistung unvermeidlich mit der Produktion von Wärme verbunden; die Quelle dieser Energien, Arbeit und Wärme, ist der Stoffwechsel oder ist, energetisch gesprochen, der Verbrauch chemischer Energie. Sobald man aber diesen Zusammenhang statuiert, erhebt sich auch die neue Frage: wie groß muß der Umsatz sein, damit das nötige Maß von Leistungsfähigkeit resultiert, d. h. *wieviel Nahrung muß ein Mensch einnehmen, damit er seine Funktionen verrichten kann?* Zwar ist zu berücksichtigen, daß der Körper auch ohne jede Nahrungszufuhr auf Kosten seiner eigenen Leibessubstanz zu arbeiten vermag; doch das geht natürlich nicht auf die Dauer, und soll er ohne jede Einbuße von seiner Substanz funktionieren, so ist eine Mindestzufuhr notwendig. Offenbar ist es nun von höchster Bedeutung, nämlich in gleichem Maß von sozialökonomischem, individualhygienischem und medizinisch-diätetischem Interesse, dieses Mindestquantum von Nahrung kennen zu lernen, mit welchem der Bedarf des Körpers zu decken ist; um es zu erfahren, ist *genau wie in einem geschäftlichen Betrieb eine Bilanz aufstellung zu machen, in welcher Import und Export gebucht werden.* Dabei können die Werte für den Import und den Export entweder in Gewichtseinheiten der daran beteiligten Stoffe oder auch in Energieeinheiten aufgeführt werden. Diese wichtige Aufgabe soll in dem folgenden Kapitel gelöst werden. Freilich ist besonders nach den Erfahrungen des letzten Kapitels von neuem zu beachten, daß wir die Nahrung durchaus nicht bloß als Brennmaterial zu werten haben; das gilt allenfalls

für Kohlehydrate und Fette, aber schon nicht von den drei Hauptnährstoffen für das Eiweiß, das als Baumaterial des Körpers an sich unentbehrlich ist, und vollends gilt es nicht für Lipide, Purine und Vitamine, die wegen der kleinen Mengen, in denen sie nur zugeführt zu werden brauchen, als Energiespender gar keine Rolle spielen.

Will man nun auf gewichtsanalytischem Weg einen Einblick in den Haushalt des Körpers gewinnen, so ist man, da die Nahrungsstoffe im Stoffwechsel umgewandelt werden, die Ingesta also chemisch anders beschaffen sind als die Egesta, auf die Aufstellung der Bilanzen für die einzelnen in Frage kommenden Elemente angewiesen. Diese sind vor allem Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff, aus denen die Hauptnahrungsstoffe, die Eiweißkörper, Kohlehydrate und Fette, aufgebaut sind; vom Schwefel und Phosphor und einigen anderen Elementen können wir im großen und ganzen absehen, da sie an Menge hinter den übrigen weit zurücktreten. Zur Bilanzaufstellung für die genannten vier Elemente sind bestimmte **quantitative Methoden der Stoffwechseluntersuchung** ausgearbeitet worden, denen wir uns zuerst zuzuwenden haben.

Beginnen wir mit dem **Stickstoff** als demjenigen Element, welchem als Charakteristikum des Eiweißes eine ganz besondere Bedeutung zukommt. Denn wegen dieses Stickstoffgehaltes ist ja das Eiweiß weder durch Kohlehydrat noch durch Fett in der Nahrung zu vertreten, es darf niemals dauernd in der Nahrung fehlen. Es fehlt auch niemals in irgend einer lebenden Zelle, während Kohlehydrate und Fette eher als tote Reserven aufzufassen sind, welche an sich von der Zelle entbehrt werden können. Den Stickstoff bestimmt man allgemein nach dem *Verfahren von KJELDAHL*.

Das heißt: man zerlegt die getrocknete Substanz durch Kochen mit konzentrierter Schwefelsäure; da so gut wie aller Stickstoff, welcher im Stoffwechsel eine Rolle spielt, Aminostickstoff ist, so wird auf diese Weise der Stickstoff in Ammoniumsulfat übergeführt. Die saure klare Lösung, welche bei dem Kochen resultiert, wird dann mit Lauge alkalisch gemacht, das freiwerdende Ammoniak ausgetrieben und in titrierter Schwefelsäure aufgefangen.

Wendet man das KJELDAHL-Verfahren auf die Nahrung an, so kann man in den meisten Fällen den gefundenen Stickstoff als Eiweiß- oder Aminosäure-Stickstoff ansehen, muß sich freilich stets bewußt bleiben, daß es auch anders sein kann. Da Eiweiß im Mittel 16% Stickstoff enthält, so ergibt die Stickstoffmenge in einem abgewogenen Quantum Nahrung mit 6,25 multipliziert den Eiweißgehalt.

Von den Egesta enthalten Stickstoff der Harn, die Fäzes und der Schweiß, gegebenenfalls auch Menstrualblut, Milch, Sperma. Der Harnstickstoff ist gewöhnlich ganz vorwiegend in Harnstoff enthalten (siehe Kap. 16), und da dieser aus dem Abbau des Eiweißes hervorgeht, so kann man im allgemeinen den *Harnstickstoff als Maß des Eiweißverbrauchs* ansehen. Der Schweißstickstoff kann in den gewöhnlichen Stoffwechselversuchen vernachlässigt werden; bei starker Muskelarbeit, bei hoher Außentemperatur und unter ähnlichen Bedingungen, bei welchen die Schweißproduktion erheblich ist, muß jedoch auch darauf Rücksicht genommen und der Stickstoff in der schweißgetränkten Wäsche und im Spülwasser der Körperhaut mitbestimmt werden. Dieser Stickstoff, welcher auch im wesentlichen Harnstoff-Stickstoff ist (siehe Kap. 17), ist dann ebenfalls für die Eiweißbilanz in Rechnung zu stellen. Anders ist der Stickstoffgehalt der Fäzes zu beurteilen; er ist nur teilweise von der Größe des Eiweißumsatzes abhängig. Nämlich der Fäzes-Stickstoff, dessen Menge je nach der Art der Ernährung sehr stark wechseln kann, ist größtenteils nicht in Eiweißschlacken, sondern in genuinem Eiweiß enthalten, nämlich teils in Eiweiß, welches mit der Nahrung zugeführt, aber der Resorption entgangen ist — das betrifft vor allem Pflanzeneiweiß, welches, in harte unverdauliche Zellulosehäute eingeschlossen, genossen und deshalb nicht ausgenützt wurde (siehe S. 57) —, teils handelt es sich um das Eiweiß

der Bakterienleiber, welches ebenfalls als ungenütztes Nahrungseiweiß, freilich durch Assimilation von den Bakterien umgewandelt, anzusehen ist (siehe S. 60). Teilweise ist der Fäzes-Stickstoff aber auch in abgestoßenen Darmepithelien, in Resten der Verdauungssäfte, in Dickdarmschleim enthalten; dies ist also Stickstoff, welcher ausgenützttem Nahrungseiweiß entstammt.

Wenn man demnach eine *Bilanz des Stickstoffwechsels* aufstellen will, so kann man entweder den Stickstoff der Nahrung als Import dem Stickstoff von Harn, Schweiß und Fäzes als Export gegenüberstellen, oder man verfährt im allgemeinen richtiger, wenn man Nahrungstickstoff minus Fäzesstickstoff als Import, Harn- und Schweißstickstoff als Export bucht.

Letzten Endes soll bei der Untersuchung des Stickstoffwechsels natürlich herauskommen, ob ein Mensch bei einer bestimmten Ernährung sich im *Stickstoff- bzw. Eiweißgleichgewicht* befindet, ob er dabei Eiweiß ansetzt, oder ob er vom eigenen Eiweiß zuzusetzen hat.

In der Praxis zeigt sich, daß die Beantwortung dieser Frage oft dadurch erschwert wird, daß die Fäzes, welche bei einer bestimmten Ernährung gebildet werden, eventuell Tage lang im Darm verweilen, so daß, wenn nacheinander verschiedene Sorten von Nahrung gegeben werden, man zunächst nicht weiß, welche Fäzesportionen zu den einzelnen Nahrungssorten gehören. Man hilft sich so, daß man zu Anfang und zum Schluß einer bestimmten Ernährungsperiode die zugehörigen Fäzes durch Verabreichung einer Portion Knochen (beim Hund) oder durch Zusatz von pulverisierter Kohle oder Karmin (beim Menschen) abgrenzt.

Schwieriger ist die Aufstellung der Bilanz für **Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff**. Die Ingesta und Egesta, soweit sie flüssig oder fest sind, analysiert man dabei nach den gewöhnlichen Methoden der Elementaranalyse. Der größte Teil der Sauerstoffaufnahme und der Kohlenstoffabgabe (etwa 90%) erfolgt aber in Gasform, vor allem durch die Lungen, in geringerem Grade, etwa zu 1%, auch durch die Haut; ein vollständiger Stoffwechselversuch erfordert daher die **quantitative Messung des respiratorischen Gaswechsels**. Diese geschieht am besten nach dem *Prinzip von REGNAULT und REISET*: der Mensch oder das Tier kommt für längere Zeit in einen hermetisch nach außen abgeschlossenen Raum; die Luft darin wird durch einen Ventilator ständig in Zirkulation gehalten und dabei durch Flaschen mit titrierter Kalilauge hindurchgetrieben, um die bei der Respiration abgegebene Kohlensäure zu binden. Der verbrauchte Sauerstoff wird durch Nachlieferung von einem Sauerstoffreservoir aus ersetzt. Auch der ausgeatmete Wasserdampf wird (durch Schwefelsäure) absorbiert. Zu Anfang und zum Schluß des Versuches entnimmt man dem Versuchsraum eine Probe Luft zur Analyse, wägt die Absorptionsgefäße und liest den Sauerstoffverbrauch am Reservoir ab.

Weniger genau, dafür einfacher ist das *Verfahren von PETTENKOFER*. Dabei befindet sich das Tier in einem Raum mit zwei Öffnungen; durch die eine wird fortwährend Luft aus dem Raum abgesogen, durch die andere Öffnung tritt entsprechend frische Luft von außen ein. Die Menge der abgesogenen Luft wird durch Passieren einer Gasuhr gemessen und ein stets gleicher Bruchteil durch einen Analysenapparat getrieben, in welchem wieder das Wasser in konzentrierter Schwefelsäure, die Kohlensäure in titrierter Lauge absorbiert wird. Den Sauerstoffverbrauch bestimmt man diesmal nicht direkt, sondern durch Rechnung; man wiegt nämlich das Tier zum Schluß des Versuches, addiert dazu das Gewicht von Harn, Fäzes, Wasserdampf und Kohlensäure und subtrahiert das Anfangsgewicht und das Gewicht der eingenommenen Nahrung; dann erhält man, da kein Stoff verloren gegangen sein kann, die Menge Sauerstoff, welche aufgenommen sein muß. Bei dieser indirekten Bestimmung des Sauerstoffs häufen sich alle Fehler der Anordnung auf dessen Wert.

Ein drittes noch einfacheres Verfahren vernachlässigt den Gaswechsel durch die Haut hindurch, welcher freilich, wie gesagt, nur etwa 1% des ganzen Gaswechsels ausmacht, und berücksichtigt allein den

Lungengaswechsel (SPECK, GEPPERT und ZUNTZ). Zu diesem Zweck wird bei verschlossener Nase ein Respirationsrohr in den Mund genommen, welches zur Trennung von Inspirations- und Expirationsluft zwei Ventile enthält. Die Expirationsluft streicht wieder durch eine Gasuhr, und Proben von ihr werden in einem Analysenapparat aufgefangen. Dies Verfahren wird besonders in kurzdauernden Versuchen verwendet, in welchen der Einfluß bestimmter Arbeitsleistungen oder bestimmter Außenbedingungen auf den Stoffwechsel untersucht werden soll; ZUNTZ hat den Apparat tragbar nach Art eines Tornisters eingerichtet, so daß er z. B. bei Bergbesteigungen, Radfahrten und dergleichen mitgeführt werden kann.

Hat man nun auf diese Weise eine Bilanz von Wasserstoff, Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff aufgestellt, so läßt sich daraus nicht bloß entnehmen, ob ein Gewinn oder Verlust an den einzelnen Elementen eingetreten ist, sondern *es läßt sich aus den Stoffwechseldaten auch ungefähr errechnen, welcher Ansatz oder welche Einbuße an den einzelnen Hauptnahrungsstoffen, Eiweiß, Kohlehydrat und Fett stattgefunden hat.*

Die Berechnungsart soll ganz kurz und schematisiert an einem einfachen Beispiel klargemacht werden:

Jemand habe in 24 Stunden 10 g Stickstoff und 300 g Kohlenstoff ausgeschieden; davon finden sich die 10 g Stickstoff und 7 g von dem Kohlenstoff in Harn und Fäzes, die übrigen 293 g Kohlenstoff, also weitaus das meiste, sind in Form von 1074 g CO_2 durch die Lungen abgegeben. Dann hat der Körper $10 \cdot 6,25 = 62,5$ g Eiweiß verloren, und da Eiweiß im Mittel 53% Kohlenstoff enthält, so beträgt der Verlust an Eiweiß-Kohlenstoff $62,5 \cdot 0,53 = 33$ g. $300 - 33 = 267$ g von dem abgegebenen Kohlenstoff, entsprechend 979 g CO_2 , müssen alsdann der Einbuße an stickstofffreien Substanzen, also an Fetten und Kohlehydraten entsprechen.

Von den 33 g Eiweiß-Kohlenstoff befinden sich 7 g in Harn und Fäzes; also werden $33 - 7 = 26$ g in Form von 95 g CO_2 durch die Lunge abgegeben.

Sei nun auch festgestellt, daß innerhalb 24 Stunden 900 g Sauerstoff aufgenommen wurden, dann ist es möglich, sich mit Hilfe der respiratorischen Quotienten ein Bild davon zu machen, wieviel g Fett und wieviel g Kohlehydrat außer den 62,5 g Eiweiß zersetzt worden sind. Wir sahen nämlich (siehe S. 16f), daß der respiratorische Quotient für Kohlehydrat 1, für Eiweiß 0,8, und für Fett 0,7 beträgt. Daraus folgt, daß, wenn sich 95 g CO_2 ($= 48,3$ l CO_2) bei der Eiweißzersetzung bildeten, für dieselbe Zersetzung $48,3 : 0,8 = 60,4$ l Sauerstoff $= 86,3$ g Sauerstoff konsumiert wurden. Von den 900 g Sauerstoff, welche aufgenommen wurden, entfallen also nur $900 - 86,3 = 813,7$ g auf die Verbrennung von Fetten und Kohlehydraten zu 979 g CO_2 . Da 813,7 g Sauerstoff ein Volumen von 570 l, 979 g CO_2 ein Volumen von 498 l einnehmen, so ist der zu der Verbrennung der Fette und Kohlehydrate gehörige respiratorische Quotient gleich $\frac{498}{570} = 0,874$.

Das läßt schon erkennen, daß sowohl Fett als auch Kohlehydrat verbraucht worden ist; wieviel von jedem einzelnen, ergibt die folgende Überlegung:

1 g Kohlehydrat (Stärke) verbraucht für seine Oxydation zu CO_2 und H_2O , wie leicht zu berechnen ist, 1,185 g O_2 , 1 g Fett 2,839 g. Sind x g Kohlehydrat und y g Fett verbrannt, so gilt die Gleichung:

$$1,185 x + 2,839 y = 813,7.$$

Ferner bildet 1 g Kohlehydrat bei der Verbrennung 1,629 g CO_2 , 1 g Fett 2,790 g. Aus x g Kohlehydrat und y g Fett entstehen also:

$$1,629 x + 2,790 y = 979$$

Gramm CO_2 . Aus den beiden Gleichungen folgt, daß 336 g Kohlehydrat und 125 g Fett verbrannt worden sind.

Diesen Werten für den Verbrauch von Eiweiß, Kohlehydrat und Fett sind nun die Einnahmen gegenüberzustellen. Den Eiweißgehalt der Nahrung erfährt man, wenn man eine Probe der getrockneten Nahrung

nach KJELDAHL auf ihren Stickstoffgehalt untersucht. Zur Bestimmung des Fettanteils wird die Trockennahrung mit Äther extrahiert, in welchem sich vor allem das Fett löst; den Kohlehydratgehalt findet man angenähert, wenn man von dem Gewicht der Trockennahrung das Gewicht von Eiweiß, Fett und Asche subtrahiert. (Über die Zusammensetzung der Nahrungsmittel siehe die Tabelle auf S. 14.)

Eine zweite Form der Bilanzaufstellung erhält man durch die **Messung des Energiewechsels**. Wie wir bei der Untersuchung des Stoffwechsels die allerverschiedensten in den Einnahmen und Ausgaben enthaltenen chemischen Verbindungen miteinander vergleichen konnten, indem wir auf die elementaren Bestandteile, welche ihnen allen gemeinsam sind, zurückgingen, so läßt sich auch für die verschiedenen Energien, welche unseren Körper passieren, ein einheitliches Maß gewinnen. Weit aus im Vordergrund des chemischen Geschehens im Körper stehen ja die Verbrennungsvorgänge, und daher läßt sich die fast ausschließlich in unseren Körper eingehende Energie, nämlich die in den Nahrungsmitteln enthaltene chemische Energie, in Wärmemaß, d. h. durch die Größe der *Verbrennungswärme der Nahrungsmittel* ausdrücken. Die Wärme bildet auch den Hauptanteil der energetischen Abgaben. Daneben tritt in den Abgaben eine zweite Energieform auf, die mechanische Arbeit. So weit sie „äußere“ Arbeit ist, welche sich in Meterkilogramm ausdrücken läßt, ist auch sie nach dem mechanischen Wärmeäquivalent, 1 kg-Kalorie oder große Kalorie = 427 Meterkilogramm, in Wärmemaß umzurechnen. Alle „innere“ Arbeit jedoch, welche vom Herzen, von den Atem-, den Magen-, den Darmmuskeln geleistet wird, wird sowieso durch Reibung vollständig in Wärme übergeführt, ebenso wie auch die meiste äußere Arbeit, bestehend in Hebungen des Körpers oder der Gliedmaßen, gewöhnlich durch nachfolgende Senkung wieder vernichtet und dabei in Wärme übergeführt wird. *Die Aufgabe der Messung des Energiewechsels ist also durch eine Anzahl von Wärmemessungen zu erledigen.*

Dabei ist aber eines stillschweigend vorausgesetzt, nämlich daß diejenige Wärmemenge, welche bei der gewöhnlichen Verbrennung eines der Nahrungsstoffe, z. B. bei der Verbrennung von 1 g Fett in irgend einem Feuerungsraum entsteht, identisch ist mit der Wärmemenge, welche bei dem stufenweisen und schließlich oxydativen Abbau in unserem Körper frei wird. Denn die Energiezufuhr soll ja nach den eben angestellten Überlegungen so gemessen werden, daß man die Verbrennungswärme der Nahrung in der gewöhnlichen Art und Weise, wie bei einer beliebigen reinen organischen Verbindung, mißt. Wenn außerhalb des Organismus eine Oxydation oder überhaupt irgend eine Reaktion das eine Mal in mehreren Stufen und ein anderes Mal in einem einzigen Prozeß bis zu den gleichen Endprodukten verläuft, dann fordert das *Gesetz der konstanten Wärmesummen* von HESS als eine spezielle Form des Gesetzes von der Erhaltung der Energie, daß die Wärmetönung beide Male dieselbe ist. Thermisch läuft es also z. B. auf dasselbe hinaus, ob Zucker im offenen Feuer direkt zu Kohlensäure und Wasser verbrennt, oder ob er katalytisch erst in Milchsäure gespalten und danach diese über verschiedene Zwischenstufen zu Kohlensäure und Wasser verbrannt wird. Daß dies Gesetz der konstanten Wärmesummen auch im lebenden Organismus gilt, ist zwar von vornherein sehr wahrscheinlich, da zunächst kein Grund für die Annahme vorliegt, daß das Gesetz von der Erhaltung der Energie innerhalb der Lebewesen ungültig ist; aber es

ist doch von grundsätzlicher Bedeutung, es noch extra zu beweisen; wir werden später darauf zurückkommen.

Was nun die **Methodik der Wärmemessungen** betrifft, so geschieht die Bestimmung des *Brennwertes der Nahrung* wie gewöhnlich bei chemischen Arbeiten durch Verbrennen in reinem Sauerstoff innerhalb einer *BERTHELOTSchen kalorimetrischen Bombe*, wobei die entstehende Wärme sich dem Wasser überträgt, in welchem die Bombe liegt. Die folgende Tabelle enthält die Wärmetönungen von 1 g Substanz in großen Kalorien für mehrere chemisch reine Verbindungen (STOHMANN):

Traubenzucker	3,7 Kal.	Eieralbumin	5,7 Kal.
Rohrzucker	4,0 „	Kasein	5,9 „
Stärke	4,2 „	Leim	5,3 „
Fett	9,3 „	Harnstoff	2,5 „
Stearinsäure	9,5 „		

Die nächste Tabelle enthält die Kalorienwerte für 100 g Nahrungsmittel:

<i>Animalische Nahrungsmittel:</i>		<i>Vegetabilische Nahrungsmittel:</i>	
Kalbfleisch gekocht . .	118 Kal.	Kartoffeln gekocht . .	96 Kal.
Schweinefleisch gekocht	180 „	Kartoffeln geröstet . .	200 „
Huhn (Brust)	168 „	Blumenkohl	40 „
Hecht	77 „	Spinat	45 „
Schellfisch	93 „	Rotkohl	68 „
		Spargel	18 „
Kalbsbraten	160 „	Steckrüben	24 „
Schweinebraten	210 „	Erbsenbrei	170 „
Gänsebraten	711 „		
		Weißbrot	265 „
Schinken	160 „	Schwarzbrot	250 „
Zerelatwurst	525 „	Keks	388 „
Leberwurst	254 „	Grießbrei	80 „
Büchling	166 „		
		Äpfel	51 „
Kuhmilch	65 „	Kirschen	52 „
Butter	800 „	Apfelsinen	26 „
Schweizerkäse	420 „	Weintrauben	69 „
		Walnüsse	652 „
Hühnerei	166 „	Kopfsalat	18 „
Kaviar	241 „	Radieschen	22 „
Bouillon	10 „	Schokolade	498 „
		Bier	50 „
		Wein	65 „

Schwieriger ist die *Bestimmung der Wärmeabgabe bei einem Menschen oder bei einem Tier*, und zwar deswegen, weil die Wärmeproduktion sich ganz langsam und kontinuierlich vollzieht und die Wärme sich notwendigerweise schon in der Zeit während der Produktion in die Umgebung zerstreut.

Es gibt freilich auch Verfahren, diese Zerstreung zu vermeiden. Eine *DEWARsche Flasche* ist z. B. fast adiatherman, weil der Raum zwischen den beiden Wänden des Gefäßes evakuiert ist. Daher bleibt die Wärme, welche sich in ihrem Innern bildet, gefangen. Aber bildet sich die Wärme kontinuierlich, so

steigt die Temperatur im Innern fort und fort, und ein eingeschlossener wärme-produzierender Organismus wird sich darum unter stets wechselnden Umgebungsbedingungen befinden. So hat das Dewargefäß bisher auch nur zur Messung des geringfügigen Energiewechsels von Mikroorganismen Verwendung gefunden.

Die *Kalorimeter* für größere Organismen bestehen aus einem Raum (siehe Abb. 63, a) mit Metallwänden, in welchem das Tier oder der Mensch sich aufhält, ohne jedoch die Metallwände zu berühren. Die von ihm produzierte Wärme teilt sich durch die Wände einem zweiten engen geschlossenen Raum (b) mit, welcher entweder den ersten Raum konzentrisch umgibt oder in Gestalt eines Systems von Röhren den ersten Raum durchzieht. Der ganze Apparat befindet sich in einem Zimmer von möglichst konstanter Temperatur. Die Temperaturzunahme in b, welche durch die Wärmeproduktion im Tierraum verursacht wird, wird mit Hilfe eines Wassermanometers m an der Druck- bzw. Volumzunahme der Luft gemessen, welche in b eingeschlossen ist. Der Apparat wird in der Weise geeicht, daß man in a entweder durch langsames Verbrennen eines bestimmten Quantums Alkohol oder durch Hindurchschicken eines genau gemessenen elektrischen Heizstroms eine bestimmte Kalorienmenge erzeugt.

Eine höchst vollkommene Einrichtung für langdauernde Kalorimetrie von Menschen wurde von ATWATER geschaffen. Der Mensch befindet sich in einem Raum mit blanken, die Wärmestrahlen reflektierenden Kupferwänden. Den Raum aus Kupfer umschließt in einem Wandabstand von einigen Zentimetern ein zweiter Kasten aus Zink. Dann folgen zum Zweck möglichst vollkommener thermischer Isolierung noch mehrere Mäntel aus Holz mit Lufträumen dazwischen, und dies ganze System von Kästen ist in einen Kellerraum von ziemlich konstanter Temperatur eingebaut. Es wird nun jeder unkontrollierte Wärmeübergang von außen nach innen oder von innen nach außen auf folgende Weise vermieden: an über 300 Stellen ist der Kupferkasten mit dem Zinkkasten zu einer Lötstelle eines Thermoelements verbunden, so daß jede Temperaturdifferenz zwischen den beiden Kästen, welche sich an irgend einer Stelle ausbildet, galvanometrisch entdeckt und ausgeglichen werden kann; in dem Raum außerhalb des Zinkkastens befinden sich nämlich an zahlreichen Stellen kleine Heizspiralen für elektrischen Strom und Schlangenhöhen für kaltes Wasser, durch deren Ingangsetzen eine zu kühle Stelle erwärmt, eine zu warme rasch gekühlt werden kann. Die von dem Menschen innerhalb des Kalorimeters produzierte Wärme wird von kaltem Wasser aufgenommen, welches in einem je nach Bedarf verschieden starken Strom in einem gewundenen Rohr durch den Innenraum geleitet wird; das Rohr ist außen mit vorspringenden Rippen versehen und geschwärzt, um die Wärme möglichst leicht aufzunehmen. Man mißt in kurzen Zeitabständen mit empfindlichen Instrumenten die Temperatur des eintretenden und die Temperatur des austretenden Wassers, mißt zugleich die Strömungsgeschwindigkeit und kann so die Kalorienproduktion berechnen. Der Apparat ist zugleich so eingerichtet, daß er auch zur Messung des respiratorischen Gaswechsels nach dem Prinzip von REGNAULT und REISET gebraucht werden kann. Es wird deshalb als *Respirationskalorimeter* bezeichnet.

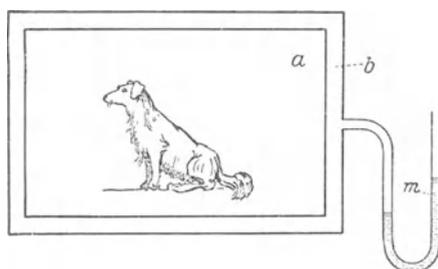


Abb. 68. Schema eines Kalorimeters (nach LECHER).

An Hand der Messungen, welche mit solchen Kalorimetern ausgeführt worden sind, müssen wir nun vor allem zuerst die Frage beantworten, ob das Gesetz der konstanten Wärmesummen auch für den lebenden Organismus gilt, weil davon alle weiteren Schlußfolgerungen abhängen. Wenn wir nämlich gleichzeitig mit der Kalorimetrie einen vollständigen Stoffwechselfersuch durchführen, so können wir aus dem Verbrauch von Eiweiß, Kohlehydrat und Fett unter Einsetzen der Werte für ihre Verbrennungswärme die Kalorienproduktion berechnen und sehen, ob die berechnete Größe mit der experimentell gefundenen übereinstimmt.

Für diese Berechnung ist aber eins noch zu berücksichtigen. Da Fett und Kohlehydrat in der kalorimetrischen Bombe und im Organismus zu den gleichen Endprodukten Kohlensäure und Wasser verbrennen, so ist für beide Fälle der mittlere *Brennwert von 1 g Fett zu 9,3 Kalorien, von 1 g Kohlehydrat zu 4,1 Kalorien* anzusetzen (siehe die Tabelle S. 192). Anders beim Eiweiß! Dieses wird im Körper nicht vollständig verbrannt; denn z. B. Harnstoff, das stickstoffhaltige Endprodukt des Eiweißstoffwechsels, ist ja selbst noch brennbar. Der *physiologische Brennwert des Eiweißes* muß also von seinem physiko-chemischen Brennwert (ca. 5,5) abweichen. RUBNER hat den ersteren so zu ermitteln versucht, daß er einen Hund mit Eiweiß fütterte, die Verbrennungswärme des dem Eiweißumsatz entsprechenden Harns und Kots bestimmte und diese Werte sowie die Quellungswärme des Eiweißes und die Lösungswärme des zugehörigen Harnstoffs von der Verbrennungswärme des Eiweißes abzog. Er kam so zu einem *mittleren Brennwert von 1 g Eiweiß gleich 4,1 Kalorien*. Rechnen wir nun mit diesen Werten die Daten eines Stoffwechselversuches um, so findet man in der Tat eine so weitgehende Übereinstimmung zwischen den berechneten und den gefundenen Kalorienzahlen, wie man nur bei der Schwierigkeit und bei der relativen Ungenauigkeit der Experimente erwarten kann. RUBNER bestimmte z. B., daß von zwei Hunden in acht Versuchsreihen, welche sich über 46 Tage erstreckten, 17 683,6 Kalorien produziert wurden; die Berechnung aus dem Stoffwechsel ergab 17 735,9 Kalorien, also ein Plus von 52,3 Kalorien, das sind nur 0,3% Unterschied. Damit ist *das Gesetz der konstanten Wärmesummen auch für den Organismus als gültig erwiesen*.

Soviel von der Methodik! Wenden wir uns nun zu den Ergebnissen der Messungen des Stoff- und Energiewechsels.

Wir beginnen die Erörterungen mit dem Verhalten im **Hungerzustand**; denn dieser repräsentiert relativ die einfachsten Experimentalbedingungen. Man könnte einwenden, daß der Hungerzustand doch etwas Abnormes ist; aber selbst bei längerem Hungern laufen die Funktionen wie unter gewöhnlichen Verhältnissen ab, und hungernde Menschen äußern völliges Wohlbefinden. Man kann die Untersuchungen im Hungerzustand auf lange Zeiträume ausdehnen; Kaltblüter, z. B. Frösche, vertragen den Hunger länger als ein Jahr, Hunde 1—2 Monate und ebenso lange Menschen, wie die Erfahrungen an den professionellen „Hungerkünstlern“, an den Italienern SUCCI, CETTI, MERLATTI u. a. gelehrt haben, welche 30—50 Tage keinerlei Nahrung zu sich nahmen. Natürlich hängt die Länge der Hungerperiode in allen Fällen vom anfänglichen Ernährungszustand ab.

Der Stoffwechsel im Hunger gestaltet sich nun folgendermaßen: Die Stickstoffausscheidung als Maß der Eiweißkonsumption sinkt ganz allmählich ab und beträgt beim erwachsenen Menschen etwa 7 bis 12 g, entsprechend 45 bis 75 g Eiweiß. Dies Eiweißquantum wird auch als „*Abnutzungsquote*“ (RUBNER) bezeichnet, weil es ein Ausdruck dafür ist, daß die Organe sich in den täglichen Leistungen verbrauchen, wie etwa die Eisenteile einer Maschine allmählich abgenutzt werden. Neben dem Eiweiß wird, wie die quantitativen Messungen des Kohlenstoff- und Sauerstoffwechsels, besonders die Messungen des respiratorischen Quotienten lehren, auch Fett und Kohlehydrat zersetzt, Kohlehydrat aber nur anfänglich in größerer Menge; die Glykogenreserven sind schnell

erschöpft, und von da ab wird mehr das Fett zur Bestreitung der Bedürfnisse herangezogen. Schließlich setzt vor dem Tod noch einmal eine stärkere „prämortale Eiweißzersetzung“ ein. VORT faßte sie als Folge des totalen Aufbrauchs des Fettes auf, der den Körper dazu zwingt, auf seine wertvollen Eiweißbestände zurückzugreifen; andere sehen sie als die Wirkung einer Autointoxikation an, die durch den Zerfall der infolge des Hungers zugrundegehenden Zellen zustande kommt.

Obgleich nun hiernach in den verschiedenen Abschnitten der Hungerperiode die einzelnen Körperbestandteile in sehr verschiedenem Maß für den Umsatz herangezogen werden, bleibt währenddessen die *Energieabgabe* fast konstant, vorausgesetzt, daß die Leistung äußerer Arbeit konstant gehalten wird. Der Erwachsene von etwa 70 kg Körpergewicht verliert bei körperlicher Ruhe 1800—2000 Kalorien in 24 Stunden, also etwas mehr als eine Kalorie pro Kilogramm und Stunde. Diese Zahl ist ein Maß für seinen „Grundumsatz“, das Minimum, welches aufzuwenden ist, um alle Organe so viel zu betätigen, als unentbehrlich ist. Was an Umsatz durch Arbeitsleistungen hinzukommt, wird öfter als „*Leistungszuwachs*“ bezeichnet. Der Mensch verhält sich also wesensverschieden von einer Maschine; denn deren Energieumsatz schwankt je nach der Größe der Zufuhr von Brennmateriale hin und her. Selbst kurz vor dem Hungertod entspricht die Kalorienabgabe noch dem Grundumsatz.

Aus der Tatsache, daß die Kalorienproduktion im Hunger konstant ist, trotzdem daß alle einzelnen Nahrungsstoffe in wechselnden Mengen zersetzt werden, ist ein wichtiger Schluß zu ziehen: offenbar treten die einzelnen Nahrungsstoffe in den verschiedenen Phasen des Hungerns in solchen Mengen für einander ein, welche kalorisch gleichwertig sind, oder, wie RUBNER es ausgedrückt hat, in „*isodynamen*“ Mengen. Da 1 g Kohlehydrat und 1 g Eiweiß je 4,1 Kalorien, 1 g Fett 9,3 Kalorien produziert, so sind 1 g Kohlehydrat und 1 g Eiweiß isodynam mit 0,44 g Fett. Diese Tatsache der Isodynamie ist deshalb so wichtig, weil sie der eigentliche Grund dafür ist, daß man *als Hauptmaßstab für den Nährwert einer Kost ihren Kaloriengehalt gebraucht*. Daß es aber darauf allein nicht ankommt, wurde mehrfach hervorgehoben (S. 180 und 187).

An dem Grundumsatz während des Hungerns sind auch die verschiedenen Organe in sehr verschiedenem Maß beteiligt. Das lehrt die Feststellung ihres mittleren relativen Gewichts vor und nach dem Hungern. Nach VORT schwimmt z. B. das Fettgewebe bis zu 97%, die Leber zu 54%, die Muskeln zu 31%, Herz und Hirn nur zu 3%. Diese großen Unterschiede rühren aber nicht etwa davon her, daß der Stoffwechsel im Fettgewebe am intensivsten und in dem immerwährend arbeitenden Herzen am geringsten wäre; das folgt allein schon daraus, daß, wenn das Herz ganz auf sich angewiesen und allein aus sich das chemische Material für seine Arbeitsleistung bestritte, es sich innerhalb 4 Tagen total aufgezehrt haben würde. Es muß also eine Stoffwanderung zum Herzen hin und überhaupt ein Stofftransport von Organ zu Organ stattfinden, welcher besonders an denjenigen Stellen regenerierend eingreift, wo die Lebenswichtigkeit es am meisten verlangt. Der Hungertod tritt erst ein, wenn der Körper etwa $\frac{1}{2}$ bis $\frac{3}{5}$ von seinem Anfangsgewicht eingebüßt hat.

Im Vorausgegangenen ist des öfteren der Stoff- und Energieverbrauch zum Körpergewicht in Beziehung gesetzt worden, und darin ist schon die selbstverständliche Tatsache zum Ausdruck gebracht, daß *der Bedarf mit der Körpergröße steigt*. Bezieht man aber nun den Energieverbrauch verschieden großer Individuen ceteris paribus auf die Gewichtseinheit, so zeigt sich, daß *der Energieverbrauch nicht der Körpergröße proportional* ist, sondern daß er für die Gewichtseinheit um so größer ist, je kleiner

das Individuum. Das lehrt die folgende für den Hund geltende Tabelle (nach RUBNER):

Körpergewicht in kg	Kalorienabgabe	Kalorienabgabe pro kg	Kalorienabgabe pro m ² Körper- oberfläche
30,4	1058	34,8	984
23,7	953	40,2	1082
19,2	856	44,6	1141
17,7	802	45,3	1047
11,0	630	57,3	1191
6,5	398	61,2	1073
3,1	266	85,8	1099

Man sieht, daß ein Hund von 3,1 kg pro Kilogramm $2\frac{1}{2}$ mal soviel umsetzt, als ein Tier von 30,4 kg. Bezieht man aber mit RUBNER den Stoffverbrauch nicht auf das Körpergewicht, sondern auf die Körperoberfläche, so findet man nur geringfügige Schwankungen des Verbrauchs pro Flächeneinheit. *Der Energieverlust ist also proportional der Körperoberfläche.* Beim Menschen beträgt er nach den genauesten Messungen pro 1 qm etwa 840 Kalorien bei körperlicher Ruhe und nüchtern (BENEDICT, LUSK). RUBNER hat diese Erscheinung zunächst in Zusammenhang mit dem Wärmehaushalt der Tiere gebracht. Die Säugetiere leben im allgemeinen in einer Umgebung, welche kühler ist als der Körper, sie verlieren also andauernd Wärme durch ihre Hautoberfläche an die Umgebung. Da nun ein kleines Tier relativ mehr Oberfläche hat als ein großes, so muß ein kleines, wenn es dieselbe Körpertemperatur festhalten will wie ein großes, entsprechend mehr Wärme produzieren. Diese zunächst ansprechende Erklärung befriedigt aber nicht mehr, sobald man feststellt, daß das Oberflächengesetz auch für die „Kaltblüter“ oder richtiger „Wechselwarmblüter“ gilt, deren Körpertemperatur verschieden ist, bei denen also die Wärmeabgabe (bei gleicher Außentemperatur) nicht der Wärmebildung proportional ist. v. HOESSLIN hat deshalb nach einer anderen Erklärung der Gesetzmäßigkeit gesucht; er hat gezeigt, daß der Umsatz für die Arbeit, welche erforderlich ist, den Körper mit möglichster Geschwindigkeit über eine Strecke fortzubewegen, proportional dem Quadrat aus der Kubikwurzel des Körpergewichts, also proportional der Oberfläche sein muß. Kleine Tiere haben aber das Interesse, sich gleich schnell über die gleiche Wegstrecke zu bewegen, wie große Tiere, wenn sie die gleiche Beute erobern oder der gleichen Gefahr entrinnen wollen; Hund und Pferd, Hirsch und Hase laufen, wenn es darauf ankommt, kaum verschieden geschwind, und in der Tat haben Versuche an Hunden gelehrt, daß *die Arbeit der Lokomotion pro qm Oberfläche gleich groß ist.*

Auch vom Alter ist der Energieverbrauch abhängig; junge Individuen einer Spezies haben einen intensiveren Stoffwechsel als ältere. Aber das hängt nicht allein damit zusammen, daß die jungen Individuen kleiner sind, also relativ mehr Oberfläche haben als die älteren; es ist auch nicht bloß so gemeint, daß die jungen Individuen einen größeren Nahrungsbedarf haben als ältere, was ja aus Gründen des Wachstumsansatzes eine Notwendigkeit ist. Denn die Kalorienmenge, welche pro qm abgegeben wird, ist im Kindesalter am größten und sinkt mit den Jahren mehr und mehr. Setzt man die Kalorienabgabe

für das Alter von 20—40 Jahren gleich 100, so beträgt sie zwischen 14 und 17 Jahren 114—130, zwischen 2 $\frac{1}{2}$ und 12 Jahren 137—160, für 50—70 Jahren aber nur 80.

Wir wenden uns nun zu der wichtigen Frage nach dem **Einfluß der Nahrungszufuhr auf den Stoff- und auf den Energiewechsel**. Wir fanden, daß im Hungerzustand der Energieverbrauch eines Erwachsenen bei körperlicher Ruhe etwa 1800—2000 Kalorien beträgt. Man könnte nun meinen, daß, wenn man Nahrung zuführt, die Kalorienabgabe dadurch nicht verändert wird. Denn wenn im Hunger zur Bestreitung der Bedürfnisse für 1800—2000 Kalorien Körpersubstanz eingeschmolzen wird, so könnte bei Nahrungszufuhr dieser Verlust derart erspart werden, daß an die Stelle der Körpersubstanz eine kalorisch gleichwertige Nahrungsmenge tritt, während ein etwa vorhandener Überschuß an Nahrung als Reserve abgelagert wird. Tatsächlich steigt aber *bei Nahrungsaufnahme die Energieabgabe des Erwachsenen in der Ruhe im Mittel auf 2400 Kalorien*. Wie ist das zu erklären?

In erster Linie ist dafür wohl maßgebend, daß bei Nahrungszufuhr eine Anzahl von Organen in Funktion tritt, welche während des Hungers ganz oder wenigstens fast ganz ruhten, nämlich die Muskeln und Drüsen des Intestinaltrakts. Diese beginnen jetzt zu arbeiten und zu sezernieren, für ihre Versorgung steigt zugleich sekundär die Herzarbeit und die Arbeit der Atmungsorgane; so ist es, kurz gesagt, die „*Verdauungsarbeit*“, welche infolge der Ernährung den Stoff- und damit den Energiewechsel hebt (ZUNTZ). In einzelnen Fällen ist das besonders evident: legt man z. B. einem Hund zu seiner Kost eine Portion Knochen hinzu, so steigt infolge davon sein Energiewechsel um 10—30%; beim Wiederkäuer ist der respiratorische Gaswechsel um 30—40% geringer, wenn man statt des gewöhnlichen Rauhfutters mit seinem großen Zellulosegehalt die gleiche Menge Nahrung in Form reiner Nahrungsstoffe verfüttert; allein schon die anhaltende Kauarbeit bei der Fütterung mit Heu oder Stroh vermehrt die Energieabgabe beträchtlich. Sehr demonstrativ ist auch der Nachweis, daß die Scheinfütterung (siehe S. 30) den Stoffwechsel steigert (O. COHNHEIM).

In zweiter Linie wird der Energiewechsel durch die Natur der Nahrungsstoffe gesteigert, nämlich die Eiweißstoffe treiben den Energieverbrauch stärker in die Höhe als die Kohlehydrate und Fette; RUBNER spricht deshalb von einer „*spezifisch-dynamischen*“ Wirkung der Eiweißstoffe. Sie beruht nicht darauf, daß das Eiweiß eine besonders große Verdauungsarbeit erfordert, sondern es regt in irgendwie anderer Weise die Organe zu erhöhtem Umsatz an. Man bemerkt die spezifisch-dynamische Wirkung des Eiweißes nur unter bestimmten Umständen, nämlich bei nicht zu niedriger Außentemperatur. Die Kalorienproduktion ist nämlich — was wir bisher ganz außer acht ließen —, ceteris paribus um so höher, je kälter die Umgebung; das hängt damit zusammen, daß die beim Stoffwechsel entstehende Wärme nicht bloß die Bedeutung eines energetischen Nebenproduktes neben der Arbeit hat, sondern daß sie Selbstzweck ist insofern, als unser Körper stets auf eine bestimmte Normaltemperatur von ungefähr 37° angeheizt sein muß (siehe Kapitel 15). Bei niedriger Außentemperatur vertreten sich nun, gerade so wie im Hunger (siehe S. 195), die einzelnen Nahrungsstoffe gegenseitig nach ihren isodynamen Werten, die verschiedenen Nahrungsstoffe werden also je nach den Mengen, in welchen sie zu Gebote stehen, so verbraucht, daß

die für den Körper erforderliche Kalorienmenge in Freiheit gesetzt wird. Aber bei höherer Umgebungstemperatur, bei welcher die Wärme sozusagen im Überfluß auftritt und durch besondere temperaturregulierende Maßnahmen des Körpers (siehe Kap. 15) nach außen abgeschoben wird, da zeigt sich, daß das Eiweiß die Verbrennungen stärker anfacht als die anderen Nahrungsstoffe. Während Fettzufuhr die Kalorienabgabe des Hungernden um etwa 2,5%, Zufuhr von Kohlehydrat um 5—9% erhöht, beträgt die Wirkung des Eiweißes 12—24%. So wie Eiweiß wirken auch einzelne Aminosäuren spezifisch-dynamisch, z. B. Glykokoll und Alanin. Dieser Einfluß des Eiweißes zeigt sich auch dann, wenn man es mit Umgehung des Verdauungskanals, „parenteral“, also z. B. subkutan einverleibt. Es wirkt wohl ähnlich erregend auf den Stoffwechsel der Organe, wie gewisse in den Drüsen mit innerer Sekretion gebildete und normalerweise ins Blut hinein sezernierte Stoffe (siehe Kapitel 18), z. B. das Sekret der Schilddrüse, den Stickstoffwechsel und den respiratorischen Gaswechsel in die Höhe treiben (ZUNTZ).

Gehen wir nun weiter zu der Frage über, *welche Quantitäten von den einzelnen Nahrungsstoffen unserem Körper zugeführt werden sollen, um seinen Kalorienbedarf zu decken.*

Von vornherein ist da zu sagen, daß wir bestimmt für das Eiweiß an eine Minimalzufuhr gebunden sind, unter welche nicht heruntergegangen werden darf, weil das Eiweiß weder durch Kohlehydrat noch durch Fett völlig vertreten werden kann. Wollen wir dieses Minimum aufsuchen, so werden wir probieren, mit welcher Eiweißmenge **Stickstoffgleichgewicht** erzielt werden kann. Man könnte erwarten, daß bei einer bestimmten Kost diese Menge für jedes Individuum eine ganz bestimmte ist; man könnte sich vorstellen, daß bei jeder Überschreitung der Menge Eiweiß abgelagert, also die Stickstoffbilanz positiv, bei Unterschreitung die Bilanz negativ werden würde. Tatsächlich ist aber *mit sehr verschiedenen Mengen Eiweiß Stickstoffgleichgewicht herzustellen*. Wie das geschieht, lehren die folgenden 2 Tabellen nach Versuchen von VOIT an einem Hund:

Tag	N-Zufuhr in g	N-Abgabe in g	N-Bilanz
31. V. 63	17,0	18,6	— 1,6
1. VI. 63	51,0	41,6	+ 9,4
2. VI. 63	51,0	44,5	+ 6,5
3. VI. 63	51,0	47,3	+ 3,7
4. VI. 63	51,0	47,9	+ 3,1
5. VI. 63	51,0	49,0	+ 2,0
6. VI. 63	51,0	49,3	+ 1,7
7. VI. 63	51,0	51,0	0
Summa:			+ 26,4

Tag	N-Zufuhr in g	N-Abgabe in g	N-Bilanz
13. IV. 63	51,0	51,0	0
14. IV. 63	34,0	39,2	— 5,2
15. IV. 63	34,0	36,9	— 2,9
16. IV. 63	34,0	37,0	— 3,0
17. IV. 63	34,0	36,7	— 2,7
18. IV. 63	34,0	34,9	— 0,9
Summa:			— 14,7

Das Tier befand sich also am 31. V. fast, aber nicht ganz in Stickstoffgleichgewicht, da es 17,0 g Stickstoff aufnahm, 18,6 g abgab. Als dann am folgenden Tage die Stickstoffzufuhr verdreifacht wurde, stieg die Stickstoffabgabe sofort auf 41,6 g und stieg dann in den nächsten Tagen bei der gleichen Stickstoffzufuhr von 51 g noch weiter, bis sich am 7. Tag ein neues Gleichgewicht auf einem viel höheren Niveau als früher eingestellt hatte. Man kann im allgemeinen sagen, daß, je mehr Eiweiß zugeführt, auch um so mehr zersetzt wird. Gesteigerte Zufuhr erzeugt also höchstens einen ziemlich geringfügigen Ansatz von Eiweiß. Der in der zweiten Tabelle dargestellte Versuch bildet die Kehrseite des ersten. Das Stickstoffgleichgewicht kann also hin und her geschoben werden, Tiere und Menschen vermögen sich mit sehr verschiedenen Eiweißmengen ins Gleichgewicht zu bringen.

Legt man zu einer Eiweißkost Kohlehydrat oder Fett hinzu, so kann dadurch Eiweiß erspart, also z. B. eine negative Stickstoffbilanz eventuell in eine positive verwandelt werden, wie aus folgenden Versuchen von VOIT zu entnehmen ist:

Zugeführtes			Fleischumsatz	Fleischbilanz
Fleisch	Fett	Kohlehydrat		
1500	—	—	1512	— 12
1500	150	—	1474	+ 26
500	250	—	558	— 58
500	—	300	466	+ 34
500	—	200	505	— 5

Dabei wirkt Kohlehydrat stärker eiweißsparend als Fett (siehe S. 172).

Natürlich gibt es eine obere und eine untere Grenze der Eiweißzufuhr, mit welcher sich ein Körper ins Stickstoffgleichgewicht bringen kann. Die obere Grenze ist beim Menschen dadurch gezogen, daß der Darmkanal nur ein gewisses Quantum zu bewältigen vermag; geht man darüber hinaus, so treten heftige Verdauungsstörungen infolge der Fäulnis des unzersetzt bleibenden Eiweißes auf. Der höchste beim Menschen beobachtete Wert beträgt etwa 350 g, entsprechend 1750 g Fleisch. Mit dem größten verdaulichen Eiweißquantum kann ein Mensch aber seinen Kalorienbedarf nicht bestreiten, da selbst 350 g Eiweiß nur 1400 Kalorien repräsentieren. Es muß also nebenher Fett oder Kohlehydrat oder beides genossen werden. Anders beim Fleischfresser; PFLÜGER hat z. B. einen mageren Hund $\frac{3}{4}$ Jahre lang ausschließlich mit magerem Fleisch gefüttert und ihn zu gleicher Zeit stark arbeiten lassen.

Wichtiger ist es, die untere Grenze des Eiweißbedarfs festzulegen. Nach den übereinstimmenden Angaben verschiedener Autoren kann ein Mensch schon mit 0,4—0,6 g Eiweiß pro Kilogramm, also bei einem Körpergewicht von 70 kg mit 28—42 g ins Gleichgewicht kommen. Zum Teil handelt es sich in den beobachteten Fällen um einen gleichzeitigen überreichlichen Konsum von Kohlehydrat und Fett; aber z. B. SIVÉN kam sogar mit 0,3 g Eiweiß pro Kilogramm ins Gleichgewicht bei einer Zufuhr von 42 Kalorien pro Kilogramm; das gibt auf einen Menschen von 70 kg Gewicht umgerechnet 21 g Eiweiß bei 2900 Kalorien, ein Energiewechsel, welcher dem Bedarf für einen nicht ruhenden Menschen

entspricht (siehe S. 195). Besonders hervorzuheben ist dabei noch, daß so kleine Eiweißdosen auch dann für die Aufrechterhaltung des Gleichgewichts genügen können, wenn sie in Form von vegetabilischem Eiweiß genossen werden, wobei es freilich sehr auf die Art des Pflanzeneiweißes ankommt (s. S. 171 u. 186). So beobachtete z. B. HINDHEDE Stickstoffgleichgewicht mit 25 g Eiweiß und weniger bei einer ausschließlichen und monatelang durchgeführten Ernährung mit Kartoffeln und Margarine oder mit Schwarzbrot und Pflaumen, wogegen von dem in feinem Weizenmehl enthaltenen Eiweiß nach SHERMAN erst 80 g ausreichend sind.

Vergleicht man die bei der Ernährung erreichten Eiweißminima mit der Eiweiß-Abnutzungsquote im Hunger (siehe S. 194), so fällt auf, daß *man mit erheblich weniger Eiweiß auskommen kann, als dem Hungerminimum (45—75 g) entspricht*. Das beruht wesentlich auf der gleichzeitigen Zersetzung von Kohlehydraten, welche ja besonders gute Eiweißsparmittel sind (siehe S. 172). Denn verabreicht man einem Hungernden allein Fett in einer seinem Kalorienbedarf entsprechenden Menge, so sinkt die Eiweißzersetzung kaum unter den Hungerwert; dagegen verschiebt die entsprechende Menge Kohlehydrat den Abnutzungs-wert beträchtlich nach unten (LANDERGREN).

Aus dem Angeführten ergibt sich, daß bei der großen Zersetzlichkeit des Eiweiß es nicht leicht gelingen wird, mit einer eiweißreichen Nahrung *Eiweißansatz* zu erzeugen. Am leichtesten ist es, worauf schon früher hingewiesen wurde, *auf Fett zu mästen*; dies gelingt nicht nur bei reichlicher Fett-, sondern auch bei reichlicher Kohlehydratzufuhr. Im letzteren Fall wird außerdem auch *Glykogen abgelagert*, aber das Vermögen des Körpers, Glykogen zu speichern, ist bald erschöpft. Das Eiweiß wird, wie wir sahen, um so stärker gespalten, je mehr man verfüttert. Zu einem ausgiebigen und dauerhaften Eiweißansatz kommt es nach den gegenwärtigen Kenntnissen wesentlich unter den folgenden Bedingungen: 1. bei jugendlichen Individuen während der Wachstumsperiode, 2. wenn die starke Eiweißzufuhr mit kräftiger Muskelarbeit kombiniert wird; denn dann „hypertrophieren“ die Muskeln, indem sich Muskelfleisch neu bildet, 3. beim Aufenthalt in größeren Höhen, wohl unter der Wirkung des Sauerstoffmangels (ZUNTZ), 4. während der Schwangerschaft, besonders in ihrer zweiten Hälfte, und 5. in der Rekonvaleszenz nach einer konsumierenden Krankheit oder nach Konsumtion durch längeren Hunger. Daraus folgt, daß der so oft angepriesene besondere Wert der zahlreichen Eiweißnährpräparate ziemlich illusorisch ist.

Eine der praktisch wichtigsten Fragen in der ganzen Ernährungslehre ist die Frage nach dem **Nahrungsbedarf bei körperlicher Arbeit**. Es ist selbstverständlich, daß, je mehr Arbeit von der Muskelmaschinerie verlangt wird, um so mehr „Brennmaterial“ zugeführt werden muß, und schon LAVOISIER wußte, daß Muskelarbeit mit einem gesteigerten Konsum von Sauerstoff und mit einer erhöhten Produktion von Kohlensäure einhergeht. Setzen wir den Stoffwechsel des Erwachsenen im Ruhestand gleich 2400 Kalorien (siehe S. 197), so beträgt nach den Untersuchungen von ATWATER der Umsatz bei Arbeit im Mittel $2400 + 0,012 \cdot x$ Kalorien, wenn x die Anzahl der geleisteten Meterkilogramm bedeutet. Dies Ergebnis wurde so gewonnen, daß ein Mensch innerhalb des Respirationskalorimeters (siehe S. 193), an einem feststehenden Zweirad Dreharbeit leistete, welche zum Antreiben eines Dynamos verwendet wurde; der erzeugte Strom wurde darauf in einer Glühlampe

in Wärme umgewandelt und die Wärme in Meterkilogramm umgerechnet. Die Gleichung von ATWATER besagt, daß bei einer Arbeitsleistung von:

50 000 mkg	2400 + 600 = 3000	Kalorien
100 000 „	2400 + 1200 = 3600	„
200 000 „	2400 + 2400 = 4800	„
300 000 „	2400 + 3600 = 6000	„

produziert werden. Dabei repräsentieren 200 000—300 000 mkg eine schon ganz erhebliche Arbeitsleistung eines 8stündigen Arbeitstages.

Von besonderem wirtschaftlichen Interesse wäre es natürlich, zu erfahren, wieviel Kalorien in den verschiedenen Berufen täglich abgegeben werden. Dafür ist die Untersuchung im Kalorimeter mindestens in zahlreichen Fällen (z. B. bei Grab-, Heiz-, Schmiedearbeit) aus naheliegenden Gründen nicht zu brauchen. Aber ein gewisses Maß für die Steigerung des Energiewechsels durch die berufliche Tätigkeit kann man auch schon so gewinnen, daß man nur den Sauerstoffkonsum und die Kohlensäureabgabe mißt, um so mehr, da wir nachher sehen werden, daß die Arbeit gewöhnlich nicht auf Kosten von Eiweiß, sondern durch Verbrennung der stickstofffreien Nahrungsstoffe geleistet wird. Man kann sich dabei vortrefflich des (S. 190) erwähnten tragbaren Respirationsanalysenapparates von ZUNTZ bedienen, welchen man in den Arbeitsbetrieb mitnehmen kann. Auch wenn man wissen will, um wieviel eine schwere an sich nur kurze Zeit durchführbare Arbeit, wie z. B. das Heben einer Last, eine turnerische Übung oder Schwimmen, den Stoffwechsel steigert, ist der Apparat zu brauchen. Ja es genügt, den Sauerstoffkonsum oder die Kohlensäureproduktion und dazu den respiratorischen Quotienten zu messen, um unter der gewöhnlich zutreffenden Voraussetzung, daß die Arbeit bloß auf Kosten von Fett und Kohlehydrat geleistet wird, die Kalorienproduktion zu berechnen (siehe dazu S. 190). Mit diesen Methoden ist unter anderem folgendes festgestellt:

Nach Versuchen hauptsächlich von ZUNTZ und seiner Schule wird der respiratorische Gaswechsel gesteigert

durch Sitzen (statt Bettruhe)	um 7,5%
„ Klavierspielen	„ 12,5%
„ militärisches Stehen (statt Bettruhe)	„ 26%
„ Marsch mittlerer Geschwindigkeit	„ 200—300%
„ Marsch bergan	„ 500—900%
„ Radfahren 9 km pro Stunde	„ 300%
„ „ 15 km pro Stunde	„ 600%
„ „ 21 km pro Stunde	„ 900%
„ Schwimmen	„ 900%

Eine achtstündige Tagestour auf dem Rad oder eine stramme Bergtour bedingen danach einen Verbrauch von mehr als 6000 Kalorien.

RUBNER und WOLPERT, BECKER und HÄMÄLÄINEN haben Arbeiter in ihrer beruflichen Tätigkeit untersucht; Mittelwerte aus den Ergebnissen sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt. Dabei ist für Arbeiter ein Ruheverbrauch von 2100 Kalorien bei einem Körpergewicht von 70 kg, für Arbeiterinnen ein Ruheverbrauch von 1680 Kalorien bei einem Gewicht von 65 kg zugrunde gelegt. Die letzte Kolonne der Tabelle gibt die prozentische Steigerung des Energiewechsels bei Arbeit im Verhältnis zur Ruhe;

Gewerbe	Kalorien- abgabe in 16 Ruhestunden	Kalorien- abgabe in 8 Arbeitsstunden	totale Kalorien- abgabe	prozentische Steigerung der Kalorienabgabe durch die Arbeit
Schneider	1400	1040	2440	15
Schuhmacher . .	„	1370	2770	20
Metallarbeiter . .	„	1740	3140	25
Schreiner	„	1790	3190	26
Maler	„	1840	3240	26
Steinhauer	„	3080	4480	44
Holzsäger	„	3800	5200	54
Handnäherin . . .	1120	680	1800	12
Maschinennäherin	„	890	2010	16
Buchbinderin . .	„	890	2010	16
Waschfrau	„	1890	3010	34

Die Tabelle lehrt unter anderem, daß selbst eine noch relativ mäßige Arbeit, wie Steine hauen oder Holz sägen, den Ruheumsatz von 2100—2400 Kalorien schon auf etwa 5000 Kalorien in die Höhe treibt; bei „schwerer“ Arbeit, wie bei der eines Lastträgers oder bei großen Sportsleistungen, kann der Bedarf danach leicht 6000—7000 Kalorien übersteigen.

Aus dem ATWATERSchen Ansatz, daß die Kalorienproduktion eines erwachsenen Arbeiters im Mittel $2400 + 0,012$ mal der Anzahl der Meterkilogramm beträgt, folgt, daß zur Leistung von 1 mkg 0,012 Kalorien erforderlich sind, d. h. 83 mkg sind physiologisch 1 Kalorie äquivalent. Das mechanische Wärmeäquivalent einer Kalorie ist jedoch bekanntlich 427 mkg; also arbeitete in den Versuchen von ATWATER die Maschine Mensch nur mit einem Wirkungsgrad von $\frac{83}{427} = \text{ca. } 20\%$. ZUNTZ fand in anderen Versuchen, in welchen Menschen, Pferde oder Hunde Steigarbeit leisteten, Wirkungsgrade von ungefähr 30%. Die Berechnung wurde auf Grund folgender Überlegung ausgeführt: schon für die Fortbewegung auf horizontaler Bahn, welche keine mechanisch meßbare Arbeit liefert, wird Energie verbraucht; bei Bergangehen kommt die Arbeit des Hebens zu dieser Horizontalleistung noch hinzu. Darum ist von dem Energieverbrauch beim Durchschreiten einer ansteigenden Bahn der Energieverbrauch für die Horizontalbewegung auf einer gleich langen Strecke abzuziehen und diese Differenz auf die Anzahl der durch Hebung des Körpers geleisteten Meterkilogramm zu beziehen.

Der Wirkungsgrad, welchen man auf solche Weisen findet, ist übrigens von Fall zu Fall recht verschieden. Eine wichtige Rolle spielt dabei der Grad der Übung; der Ungeübte führt eine große Zahl von unzweckmäßigen oder ganz überflüssigen Bewegungen aus, welche der Trainierte vermeidet. So kann eine bis ins feinste durchgeführte Schulung die Ökonomie der technischen Arbeit des Menschen in außerordentlichem Maße steigern, wie das vielbesprochene System der „Taylorisierung“ (s. auch Kap. 20) zeigt. Ein anderes Moment ist die Ermüdung; auch bei der geübten Arbeit sinkt der Wirkungsgrad, wenn die Muskeln oder das sie dirigierende Gehirn ermüdet sind. Auch die Art der Arbeit bestimmt begreiflicherweise die Ausnützung der aufgewandten Energiemenge; bei Arbeiten, welche mehr statische als dynamische Arbeiten sind, ist der Wirkungsgrad geringer; unter einer statischen Arbeit ist dabei eine solche verstanden, bei welcher die Muskeln nicht zur Leistung

„äußerer“ physikalisch meßbarer Arbeit verwendet werden, sondern nur „innere“ Arbeit (siehe Kap. 20) ausführen, indem sie dauernd angespannt werden; so muß man, wenn man eine schwere Dreharbeit ausführen will, die Gelenke des Rumpfes und der unteren Extremitäten durch ausgiebige Muskelspannungen versteifen, bei Hebung eines Gewichts den Schwerpunkt des Körpers verlagern und fixieren und dergleichen. Endlich spielen in der Ökonomie des Energieumsatzes auch die individuellen Eigenschaften eine wichtige Rolle; daher wird der Sanguiniker, welcher auf zahlreiche äußere Einwirkungen mit großer Lebhaftigkeit Stellung nimmt, bei gleicher Kost stets mager bleiben, wo der Phlegmatiker Fett ansetzt.

Ist nun durch die direkten und indirekten kalorimetrischen Bestimmungen festgestellt, wieviel chemische Energie für eine bestimmte Arbeit verbraucht wird, so erhebt sich die neue wichtige Frage, in welcher Form die Energie zugeführt werden soll, mit anderen Worten: *welcher Stoff als Quelle der Muskelkraft anzusehen ist, Eiweiß, Kohlehydrat oder Fett*. Am nächsten liegt die von LIEBIG seiner Zeit verfochtene Annahme, daß mit dem Eiweiß als demjenigen Material, aus welchem sich der Muskel hauptsächlich aufbaut, auch sein Energiebedarf bestritten wird. Gerade das trifft aber für gewöhnlich nicht zu; ein klassischer Versuch aus dem Jahre 1865 zeigt es. FICK und WISLICENUS bestiegen nämlich vom Brienersee aus das 1956 m hohe Faulhorn; 17 Stunden vor der Besteigung hatten sie keine eiweißhaltige Nahrung mehr zu sich genommen, während derselben ernährten sie sich stickstofffrei. Sie sammelten den Harn während und mehrere Stunden nach der Arbeitsleistung. Der in dieser Periode ausgeschiedene Stickstoff entsprach nun einer Zersetzung von 37 g Eiweiß, das ergäbe also etwa 150 Kalorien. Würde man nun selbst davon absehen, daß diese Kalorien nur zum Teil für die Leistung mechanischer Arbeit, d. h. für die Hebung des Körpers aufgewendet sein können, da ja auch Herz-, Atem- und Verdauungsarbeit geleistet wurde, und würde man selbst den Wirkungsgrad zu 100% ansetzen, so entsprächen die 150 Kalorien doch immer nur $150 \cdot 427 = 64\,000$ mkg, während der Körper von 76 kg Gewicht um 1956 m gehoben wurde, die Leistung also ungefähr 150 000 mkg betrug. *Es ist also unzweifelhaft, daß das Eiweiß höchstens zum kleinen Teil die Quelle der Muskelkraft gewesen ist.*

Aber für gewöhnlich arbeiten die Muskeln sogar ganz ohne Verbrauch von Eiweiß. Namentlich VOIT und PETTENKOFER haben gezeigt, daß bei Hunden und Menschen die Stickstoffausscheidung überhaupt nicht durch die Muskeltätigkeit beeinflusst wird, es sei denn, daß die Arbeit übertrieben und ermüdend ist, daß die Muskeln Sauerstoffmangel leiden, oder daß die Ernährung mangelhaft ist; nur dann folgt größere Stickstoffausscheidung. Im übrigen wird aber allein der respiratorische Gaswechsel gesteigert, und da gleichzeitig vor allem das Glykogen in den Organen, speziell auch in den Muskeln schwindet (siehe Kapitel 20), kann man behaupten, daß *die gewöhnliche Quelle der Muskelkraft die Kohlehydrate sind.*

Und offenbar ist sie auch die ökonomischste; denn vergleicht man die beiden stickstofffreien Nahrungsstoffe Kohlehydrat und Fett miteinander auf ihre energetische Ausgiebigkeit, so zeigt sich, daß für die gleiche Leistung der Kalorienbedarf aus Fett etwa um 10% den aus Kohlehydrat übersteigt (KROGH und LINDHARD). Dies ist jedenfalls darauf zurückzuführen, daß das Fett vor seiner Verwendung in der

Muskelmaschine in synthetischer Arbeit in Kohlehydrat umgewandelt wird. Daß schließlich auch auf Kosten von Eiweiß große körperliche Leistungen erzielt werden können, das beweist der schon (S. 199) erwähnte Hund, welchen PFLÜGER mehrere Monate lang ausschließlich mit magerem Fleisch ernährte, und der währenddessen starke Zugarbeit an einem Wagen zu leisten hatte; der Glykogen- und Fettgehalt seines Futters hätte nicht einmal hingereicht, die Herzarbeit in der Zeit zu bestreiten.

Wir kommen also zu dem Schluß, daß zwar jeder Nahrungsstoff die Energiequelle für die Muskelarbeit sein kann, daß aber vorzugsweise die Kohlehydrate dafür herangezogen werden.

Von besonderem Interesse ist noch die Frage, ob auch „*geistige Arbeit*“ die Stoffwechselprozesse steigert. Unvoreingenommen wird man die Frage bejahen; denn erstens findet man bei zahlreichen Organen, keineswegs bloß bei den Muskeln, die Steigerung der Aktion mit Steigerung des Stoffwechsels verknüpft, wird also per analogiam dasselbe für das Gehirn annehmen; zweitens kennt man beim Gehirn gerade so eine Ermüdung und Erschöpfung als die Folge erhöhter Inanspruchnahme wie beim arbeitenden Muskel und weiß, daß derjenige, der stark geistig arbeitet, nicht weniger auf eine reichlichere Ernährung Anspruch macht, wie der körperlich Arbeitende, während andererseits eine jähe Störung in der regelmäßigen Blutversorgung Bewußtseinstrübungen (Ohnmacht) bewirkt. Man kennt ferner histologische Veränderungen in den Ganglienzellen des Zentralnervensystems als Folge exzessiver Erregungen (siehe Kapitel 22) und weiß durch plethysmographische Untersuchungen (siehe S. 151) am Menschen mit Schädeldefekten, wobei die Schädelkapsel selbst als Plethysmograph diente, daß bei stärkerer Geistesarbeit der Blutkonflux zum Gehirn zunimmt. Vor allem ist auch erwiesen, daß die Traubenzuckerzersetzung und Stickstoffabgabe, welche beim überlebenden Froschrückenmark zu beobachten sind, durch elektrische Reizung gesteigert, durch Narkose herabgesetzt werden (H. WINTERSTEIN).

Das Experiment am Menschen im Respirationskalorimeter hat nun aber ergeben, daß *bei geistiger Anstrengung der Stoff- und Energiewechsel nicht merklich verändert zu sein braucht* (SPECK, ATWATER). Daraus kann freilich nach dem eben Gesagten nicht geschlossen werden, daß die geistige Arbeit oder richtiger die ihr zugrundeliegenden Erregungsvorgänge im Gehirn gar keine Energie verzehren. Man wird daraus nur folgern, daß die Vermehrung der Umsetzungen zu gering war, um die Fehlerquellen der Messungen des Stoff- und Energiewechsels zu übersteigen; denn es spricht nichts dagegen, daß selbst die höchste geistige Leistung nur von einer kleinen Veränderung der Nervensubstanz begleitet wird. Es gibt allerdings auch nicht wenige Angaben, nach denen geistige Arbeit den Stoffwechsel doch merklich in die Höhe treibt. Aber es ist auch nicht immer genügend berücksichtigt worden, daß bei der geistigen Anspannung sehr häufig unwillkürlich die Muskeln mitangespannt oder gar bewegt werden, und daß auch die Herzaktion und die Atmung sich dabei beschleunigen können.

Wir sind nunmehr durch die beschriebenen Experimente einigermaßen dafür gerüstet, für jeden Menschen in jeder Lebenslage eine Ernährungsvorschrift geben zu können. Nur eines ist dafür noch zu beachten, das ist die **verschiedene stoffliche und kalorische Ausnützung**

fältigkeit der Zubereitung ab. Der Kochprozeß befördert die Quellung der Zellmembranen und ihre Zersprengung; die Pflanzenteile werden hierfür zugänglicher gemacht, wenn sie vor dem Kochen zerrieben, zerhackt oder durch die Maschine getrieben werden. In ähnlicher Weise befördert eine nachträgliche Zermahlung oder auch der Kauprozeß die Aufschließung durch die Verdauungssäfte. So werden z. B. von Kartoffelstücken etwa 70% des Eiweißes, von Kartoffelbrei dagegen 80% resorbiert. Von den Fetten werden die leicht schmelzenden, wie Butter, Schmalz, Pflanzenfett, Tran, besser ausgenützt, als die schwer schmelzbaren, wie Hammel- oder Rindertalg; von ersteren gehen nur 1—4%, von letzteren 5—10% in den Fäzes verloren. Die in der Tabelle angeführten Daten für die Ausnutzbarkeit haben übrigens keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit, da *die Verdaulichkeit einer Kost auch von vielen individuellen Eigentümlichkeiten abhängt.* —

Nachdem hiermit die Aufgabe des Physiologen, Leitsätze für die Ernährungspraxis aufzustellen, in der Hauptsache gelöst ist, wollen wir daran gehen, die Auswahl unter den Nahrungsmitteln, welche nun ein jeder unter dem Zwang oder auch in der Unbeschränktheit seiner Verhältnisse trifft, an dem Maßstab der Laboratoriumserfahrungen zu prüfen und zu kritisieren. Natürlich werden wir im großen und ganzen eine Übereinstimmung zwischen der Zusammensetzung der „frei“ erwählten Kost und der vom Experiment geforderten zu erwarten haben; denn die Menschen müssen ja instinktiv im wesentlichen das Richtige getroffen haben, da sie sich sonst gar nicht hätten erhalten können. Damit ist aber nicht gesagt, daß es nicht doch eine große Zahl von Diätformen gibt, welche im Sinne der Physiologie unzweckmäßig, wenn nicht gar schädlich sind, Diätformen, welche teils in den geographischen Verhältnissen ihre Ursache haben, durch welche eine fast ausschließliche animalische oder vegetabilische Kost aufgenötigt werden kann, teils in besonderen Sitten und Gebräuchen eines Stammes, vor allem aber in der sozialen Schichtung der Bevölkerung.

Sobald man nun aber den Plan eines Vergleichs von „Theorie“ und „Praxis“ verwirklichen will, stößt man auf große Schwierigkeiten. Es gilt, womöglich für eine große Zahl einzelner Menschen der verschiedensten Alters-, Körpergewichts- und Berufsklassen für längere Zeiträume festzustellen, wie sie sich ernähren. Das geschieht am genauesten, wenn man von jeder einzelnen Speise, die genossen wird, ein bestimmtes Quantum analysiert. Aber das ist in größerem Maßstab kaum durchzuführen. Vielfach muß man sich damit begnügen, von der Speise, welche eine ganze Familie konsumiert, das Gewicht festzustellen, deren Zusammensetzung aus den einzelnen Nahrungsstoffen nach bekannten Mittelwerten zu berechnen und ungefähr zu überschlagen, wieviel von der Speise von jedem Familienmitglied verzehrt worden ist. Noch weit ungenauer verfährt man, wenn man die Haushaltungsbücher als Grundlage der Berechnung nimmt und aus den Preisen auf die eingekauften Gewichte zurückschließt und auch die Küchenabfälle und Überbleibsel mit in Anschlag bringt. So ist das zur Verfügung stehende statistische Material höchst ungleichwertig. Mit die brauchbarsten Resultate liefern die Erhebungen bei Tischgemeinschaften von ungefähr Gleichaltrigen und gleichartig Arbeitenden (wie Studentenklubs, wie die Holzfäller des Bayrischen Waldes oder die Besatzung eines Schiffes).

Durch derartige Ermittlungen kam VOIT im Jahre 1875 zur Aufstellung seines viel zitierten „Kostmaßes“ für den Erwachsenen von 67 kg Gewicht bei mittlerer Arbeitsleistung (also etwa der Arbeit eines Schreiners oder eines Maurers), nämlich: 118 g Eiweiß, 56 g Fett, 500 g Kohlehydrat = 3055 Kalorien.

Vergleichen wir dieses Kostmaß mit den Laboratoriumsresultaten, so fällt vor allem die hohe Eiweißdosis auf. VOIT empfahl allerdings absichtlich ein den wirklichen Bedarf übersteigendes Eiweißquantum, rechnete auch damit, daß von den 118 g Eiweiß nur etwa 105 g resorbiert werden. Aber nach den früher (S. 199) angeführten Experimenten kann der Bedarf des Menschen mit viel weniger Eiweiß gedeckt werden, und wir werden gleich sehen, daß auch nach den statistischen Erhebungen im Speisezettel vieler Menschen die Eiweißmenge weit hinter dem VOITschen Wert zurückbleibt. Es soll darum gleich die Frage aufgeworfen werden, *welches Quantum Eiweiß am meisten zu empfehlen ist*. Darüber hat sich ein lebhafter wissenschaftlicher Streit entsponnen, welcher überdies noch dadurch angefaßt wird, daß aus besonderen Gründen die verschiedenen Bevölkerungsklassen um eines der eiweißreichsten Nahrungsmittel, das Fleisch, in Konkurrenz treten.

Was die zahlreichen *statistischen Erhebungen über die Ernährung bei freier Wahl der Nahrungsmittel* anlangt, so sind die zuverlässigsten Ergebnisse derselben von TIGERSTEDT verarbeitet und in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

Gruppe	Zahl der Beobachtungen	Kaloriengehalt der zugeführten Nahrung	mittlerer Eiweißgehalt in g (in Klammern Minimum und Maximum)	mittlerer Fettgehalt in g	mittlerer Kohlehydratgehalt in g
I.	31	2000—2500	84 (35—131)	63	329
II.	38	2500—3000	96 (49—160)	84	405
III.	52	3000—3500	115 (52—163)	105	438
IV.	30	3500—4000	131 (66—199)	115	516
V.	23	4000—4500	139 (74—182)	147	553
VI.	12	4500—5000	163 (80—225)	150	647
VII.	16	> 5000	156 (93—218)	196	809

Betrachten wir in der Tabelle zunächst nur die uns augenblicklich interessierenden Zahlen für das Eiweiß, so ergibt sich, daß die meisten Mittelwerte nicht unter das VOITsche Maß heruntergehen. Aber wohl zu beachten ist, daß es sich dabei um Mittelwerte handelt, die Minima liegen meist weit tiefer als die VOITschen Zahlen, und wenn es sich in manchen Fällen (namentlich der Gruppe I mit einer Zufuhr von nur 2000—2500 Kalorien) auch um Unterernährung handeln mag, so sind in den wichtigsten Gruppen III und IV mit einer mittleren Kalorienzufuhr

von 3000—4000 Beobachtungen an wohlhabenderen und gut sich nährenden Leuten (Studenten, Mechaniker, Juristen) mit eingeschlossen, welche weit weniger Eiweiß verzehrten als 118 g. Hinzukommt, daß, da in der genossenen Kost vielfach die Vegetabilien stark vorherrschten, auch die Ausnützung des zugeführten Eiweißes wahrscheinlich schlechter ausfiel, als VOIT es voraussetzte. Wir können danach zunächst den Schluß ziehen, daß *auch eine Eiweißzufuhr, welche freiwillig und andauernd erheblich kleiner ist als 118 g, nicht unzutraglich zu sein braucht.*

Diese Erkenntnis ist aber deshalb von Bedeutung, weil des öfteren behauptet worden ist, daß jeder überflüssig große Eiweißkonsum allerlei Schädigungen der Gefäßwandungen, des Zentralnervensystems, des Darms, der Nieren und anderer Organe im Gefolge habe. Indessen so wenig auch bezweifelt werden kann, daß bei übertriebener Zufuhr giftige Eiweißspaltprodukte meist basischer Natur (siehe S. 59) entstehen, bei chronischer Überladung wohl auch Gefäßveränderungen sich einstellen können, so wenig ist das für kleinere Dosen, etwa von der Höhe des VOITschen Wertes, dargetan. Auf der anderen Seite müssen wir aber auch die Frage aufwerfen, *ob sich Einwände gegen eine ausgiebige Reduktion des VOITschen Wertes erheben lassen.*

Der amerikanische Physiologe CHITTENDEN hat in Versuchen, die sich auf $\frac{1}{2}$ — $1\frac{1}{2}$ Jahre erstreckten, 26 Personen (Dozenten, Studenten und Soldaten) mit einer Kost ernährt, welche nur 40—60 g Eiweiß enthielt; alle fühlten sich bei der Lebensweise völlig gesund und nahmen nach eigener Aussage bei regelmäßigen gymnastischen Übungen an Leistungsfähigkeit noch zu. Der dänische Arzt HINDHEDE und seine Hausangehörigen ernährten sich monatelang mit Kartoffeln und Margarine, Schwarzbrot und Zwetschen und dergleichen und kamen so bei vollem Wohlbefinden und großem Arbeitsvermögen mit 25 g Eiweiß und weniger ins Gleichgewicht. Vegetarier haben sich auffallend oft bei Dauermärschen als Sieger hervorgetan trotz ähnlich geringen Eiweißgenusses. *Es kann also gar keinem Zweifel unterliegen, daß die körperlichen Fähigkeiten auch bei einem Eiweißkonsum, welcher ein Viertel und weniger des VOITschen Maßes ausmacht, nicht notzuleiden brauchen.* Etwas anders ist es, ob man jemandem empfehlen soll, die untere Grenze der Eiweißdosierung dauernd einzuhalten. Das wäre sicherlich gefährlich, vor allem, wenn man sich das Eiweiß in Vegetabilien zuführt, da das vegetabilische Eiweiß nach seinem Aufbau aus Aminosäuren häufig nicht vollwertig ist (s. S. 170 u. 186). Denn dann genügt eventuell eine unzureichende Zubereitung, ein zu oberflächliches Kauen, ein individuell geringes Verdauungsvermögen, eine kleine Verdauungsstörung, ein Schnupfen mit seinem Übermaß an Schleimproduktion oder eine geringe fieberhafte Erkrankung, um die Erhaltung des Eiweißgleichgewichts unmöglich zu machen. *Aber wie hoch man über das Minimum hinausgehen soll, ist heute schwer zu entscheiden, zumal da uns jeder objektive Maßstab für die Leistungsfähigkeit eines Menschen fehlt, mag es sich um körperliche oder auch um geistige Leistungen handeln.*

Einer auffälligen Erscheinung muß hier noch gedacht werden, nämlich der Tatsache, daß in vielen Kulturländern *der Fleischkonsum innerhalb der letzten Jahrzehnte andauernd gestiegen ist.* Dies lehrt z. B. die folgende Tabelle nach RUBNER für Deutschland in dem Jahrhundert von 1816—1907.

Jährlicher Fleischkonsum in Kilogramm pro Kopf in Deutschland:

1816	13,6	1883	29,6
1840	21,6	1892	32,5
1861	23,2	1900	43,4
1873	29,5	1907	46,2

Der Fleischkonsum ist also in den 100 Jahren auf das 3,4fache gestiegen. Man fragt, was das zu bedeuten hat, und kommt zu der Antwort, daß die Erscheinung teils mit einem physiologischen Faktor, mit der besonderen Schmackhaftigkeit des Fleisches zusammenhängt, teils mit einem wirtschaftlichen Faktor, mit der Hebung der sozialen Lage; beide Momente stehen auch untereinander in Beziehung (RUBNER). Die Schmackhaftigkeit dankt das Fleisch seinen Extraktivstoffen; selbst bei mangelhafter Zubereitung erregt es dadurch den Appetit im Gegensatz zu vielen häufig verwendeten Vegetabilien, welche erst in zeitraubender und sorgfältiger Küchenbehandlung in eine würzige Kost umgewandelt werden. Appetit ist aber weit mehr als der bloße Trieb zur Befriedigung kulinarischer Empfindungen, Appetit bedeutet, wie PAWLOW gelehrt hat (S. 31), die Einleitung der Verdauung durch Bildung von „Zündsafft“ im Magen. Wenn also z. B. der moderne Großstädter ohne Eblust zum Mittagmahl kommt, so regt eine kräftig schmeckende Speise seine Verdauung an, ja die Extraktivstoffe des Fleisches wirken sogar, auch ohne daß sie mit den Geschmacksorganen in Berührung kommen, von der Magenschleimhaut aus direkt safttreibend (S. 31). Geschmacklose Stoffe, wie etwa selbst die reinen Nahrungsstoffe Stärke, Eiweiß, Fett, regen nicht nur den Appetit nicht an, sondern es gelingt kaum, sie in größeren Mengen herunterzuschlucken. Das Fleisch ist aber noch aus einem anderen Grunde im Vorteil vor der Pflanzenkost, das ist seine im allgemeinen größere Verdaulichkeit; Pflanzenkost verlangt erstens eine längere Verdauungszeit und zweitens wegen ihres größeren Wassergehalts und wegen der schlechteren Ausnützung die Zufuhr größerer Volumina; beides beschwert besonders den Großstädter, wie nachher noch weiter erörtert werden soll. Das Fleisch ist ferner — und damit tritt der physiologische Faktor mit dem sozialen in Konkurrenz — unter den Nahrungsmitteln durch seinen hohen Preis ausgezeichnet, und so erhält die Sucht nach Fleisch auch den Stempel des Klassenkampfes; die aufstrebenden Volksschichten betrachten es fast als Ehrensache, reichlich Fleisch zu genießen; daher sind an der Steigerung des Fleischkonsums vor allem die Industrieländer und in diesen vor allem die organisierten Arbeiter in den Städten beteiligt.

Kehren wir nun noch einmal zu der tabellarischen Zusammenstellung von TIGERSTEDT (S. 207) über die Kostaätze bei freiwilliger Nahrungsauswahl zurück. Die sehr verschiedene Kalorienzufuhr, welche zwischen 2000 und mehr als 5000 schwankt, steht natürlich in erster Linie in Zusammenhang mit der *Größe der geleisteten körperlichen Arbeit*; so befinden sich unter den Leuten der Gruppe VII bayrische und amerikanische Holzknechte, Holzsäger aus Schweden, Feldarbeiter aus Siebenbürgen und dergleichen, also Leute, welche der Klasse der Schwerarbeiter zuzurechnen sind; in der Gruppe III befinden sich dagegen Leichtarbeiter, wie Mechaniker, Studenten, Fabrikarbeiter. RUBNER hat die Berufe je nach ihrem Bedarf an ausnutzbaren Kalorien etwa so eingeteilt:

2400	Kalorien: Beamte, Gelehrte, Kaufleute, Maschinenpersonal.
3000	„ gewöhnliche Arbeiter (Industriearbeiter, Handwerker).
3400	„ Maurer, Schneider, Soldaten.
4000—5000	„ Landarbeiter, Lastträger, Sportsleute.

Einer besonderen Bemerkung bedarf dann noch die in der Tabelle S. 207 gegebene *Beziehung zwischen Kalorienzufuhr, d. h. also Arbeitsleistung und Eiweißkonsum*. Da die Muskelarbeit für gewöhnlich auf Kosten der Kohlehydrate erfolgt, so könnte man meinen, daß stark Arbeitende sich nicht mehr Eiweiß zuzuführen brauchten, als schwach Arbeitende. Das ist aber nach der Tabelle durchaus nicht der Fall, sondern die Eiweißzufuhr steigt mit der Kalorienzufuhr, so daß im Mittel etwa 15% des Gesamtkalorienbedarfs durch Eiweiß gedeckt werden. Dies ist wohl mit dem Hinweis zu erklären, daß, wer berufsmäßig seine Muskulatur viel braucht, auch eine größere Fleischmasse, also wohl auch eine größere Abnutzung seines Körpereiwisses hat, als jemand mit spärlicher Muskulatur; so wäre es also nur rationell, daß die Schwerarbeiter auch mehr Eiweiß konsumieren. Für gewöhnlich ergibt sich das wohl ganz von selbst dadurch, daß der stark Arbeitende sich aus der Schüssel eben mehr herauslöffelt als der schwach Arbeitende.

Wie gestaltet sich schließlich noch *das Verhältnis von Fett zu Kohlehydrat in der Ernährungspraxis*? Wir haben zwar früher gesehen, daß eines das andere ersetzen kann, aber die Zusammenstellung auf S. 207 lehrt, daß stets beide gewählt werden, und das entspricht nicht nur der Zusammensetzung unserer Verdauungssäfte hinsichtlich der Enzyme, sondern es rechtfertigt sich auch aus anderen Gründen. Wer fast fettfrei leben will, muß vegetarisch leben. Nun kann ja gewiß kein Zweifel darüber bestehen, daß man bei rein *vegetarischer Kost* Proben hoher körperlicher Leistungsfähigkeit abgeben kann, aber im allgemeinen bedingt die rein vegetarische Kost doch eine Belastung des Verdauungskanals, welche allerhand Unzuträglichkeiten im Gefolge hat. Die vegetarische Kost, welche neben Kartoffeln und Brot reichlich Gemüse und Obst enthält, ist außerordentlich voluminös, und dadurch sowohl wie durch ihren Gehalt an Zellulose erfordert sie fast immer eine größere Verdauungsarbeit, als die animalische Kost, und diese einseitige Inanspruchnahme der Intestinalorgane wird, zumal vom Städter mit seinem rapiden Lebenstempo im Verhältnis zum Landmann, unbehaglich empfunden. Ein teilweiser Ersatz der Vegetabilien durch das kalorisch hochwertige Fett bedeutet, besonders für diejenigen, welche schwer oder welche in kalter Umgebung arbeiten müssen, eine willkommene Entlastung und wird deshalb auch stets durchgeführt, soweit die ökonomische Lage zuläßt, das teurere Fett zu wählen. Auf der anderen Seite ist bezüglich des Vegetarismus zu sagen, daß die Entwöhnung von Vegetabilien, wie sie in den letzten Jahrzehnten in den Städten mehr und mehr Platz griff, den großen Nachteil hat, daß die Verdauungsorgane, durch Fleisch, Fett, Weißbrot, Zucker und dergleichen nur zu schwächerer Arbeit angeregt, an Leistungsfähigkeit einbüßen, um so mehr, als der Kalorienbedarf und damit das Nahrungsquantum des Städtlers, welcher infolge der vielfältigen Errungenschaften der Technik Muskeln, Herz und Atmungsorganen weniger Arbeit aufzubürden pflegt als der

Bauer, sowieso schon reduziert ist (RUBNER). Hier werden die Erfahrungen des Krieges wohl Remedur schaffen.

Zum Schluß sei noch an zwei Beispielen gezeigt, wie man etwa ein physiologisches Kostmaß in billigster Form in die Praxis umsetzen kann:

I. Speisezettel nach Angabe des Reichsgesundheitsamts (1894):

	Eiweiß	Fett	Kohlehydrat
150 g mittelfettes Rindfleisch . . .	33,0	7,5	—
500 „ Magermilch	11,5	10,0	13,5
20 „ Magerkäse	7,0	2,5	0,5
35 „ Schmalz	—	33,0	—
150 „ Erbsen	36,0	3,0	78,0
600 „ Roggenbrot	36,0	—	294,0
400 „ Kartoffeln	8,0	—	84,0
40 „ Reis	3,5	—	30,0
Summe:	135,0	56,0	500,0 = 3124 Kal.

II. Speisezettel nach HINDHEDE (1916):

	Eiweiß	Fett	Kohlehydrat
58 g Fleisch	12,0	6,0	—
48 „ Ei	6,0	4,5	—
243 „ Vollmilch	9,5	9,5	12,0
130 „ Magermilch	4,5	0,9	6,5
7 „ Rahm	0,3	1,8	0,3
71 „ Margarine	—	56,0	—
260 „ Schwarzbrot	20,0	2,6	125,0
55 „ Feinbrot und Kuchen . . .	4,5	0,5	30,0
136 „ Mehl und Grütze	14,0	1,3	100,0
74 „ Zucker	—	—	74,0
300 „ Kartoffeln	6,0	—	60,0
137 „ Obst	—	—	18,0
	76,8	83,1	425,8 = 2834 Kal.

14. Kapitel.

Die Bedeutung der Salze.

Salzarme Ernährung 212. Die Bedeutung der verschiedenen Ionensorten 213.
Das Kochsalz 214. Theorie der Salzwirkungen 215.

Als Nahrungsstoffe werden gewöhnlich diejenigen organischen Verbindungen definiert, welche durch den Stoffwechsel in uns so verändert werden, daß die freiwerdende Energie für die Arbeitsleistungen und für die Erwärmung des Körpers disponibel gemacht wird, und welche zu gleicher Zeit befähigt sind, direkt oder nach entsprechender Umwandlung als Ersatz für verloren gegangene Körpersubstanz einzutreten. Aber wenn man den Nachdruck auf diese zweite Hälfte der Definition legt, so fallen unter den Begriff Nahrungsstoff auch die anorganischen Salze, weil sie gerade so notwendig sind, Verluste des Körpers auszugleichen, wie die organischen Verbindungen. Aus diesem Grunde wurden sie schon früher, als zum erstenmal von den Nahrungsstoffen die Rede war (siehe S. 14), unter diesen mit aufgezählt, und wir müssen uns nun noch nachträglich mit ihnen beschäftigen, um darüber ins klare zu kommen, welchen Zweck sie in unserem Körper erfüllen.

Anorganische Salze müssen unbedingt mit der Nahrung zugeführt werden. Für den wachsenden Organismus kann man das von vornherein deshalb voraussetzen, weil es überhaupt keine Zellen, weder in der Pflanzen- noch in der Tierwelt, gibt, welche nicht Salze enthielten; also kann ein Aufbau von Zellsubstanz auch nicht ohne Zulieferung von Salzen vonstatten gehen. Aber auch der ausgewachsene Organismus ist auf die Salzzufuhr angewiesen, weil er unausgesetzt, hauptsächlich durch den Harn und die Fäzes, Salze verliert. Ein klassischer Versuch aus dem Jahre 1873 steht am Anfang dieser Lehre von der Unentbehrlichkeit der Salze: FÖRSTER fütterte Hunde mit Fleischrückständen, welche zum Zweck der Herstellung von Liebig's Fleischextrakt mit Wasser ausgelaugt worden waren; sie enthielten nur 0,8% Asche in der Trockensubstanz. Bei dieser Ernährung gingen nun die Hunde bald zugrunde, und zwar zum Teil rascher, als wenn sie überhaupt nichts zu fressen bekamen. Es ist bisher nicht genauer analysiert worden, an was die Hunde eigentlich starben. Die Forschung ist später ganz andere Wege gegangen, um dahinter zu kommen, *wie die Salze im tierischen Körper wirken.*

Einige grundlegende Beobachtungen zu dieser Frage sind bereits früher (s. S. 78 u. 128) mitgeteilt worden. Es wurde darauf hingewiesen, daß *der osmotische Druck, welchen der Inhalt der Zellen sowie die Gewebsflüssigkeiten ausüben, vor allem von den Salzen herrührt*, daß aber die Ausübung dieses osmotischen Drucks nicht die einzige Funktion der Salze sein kann. Denn in der Lösung eines sonst indifferenten Nichtleiters, wie z. B. in einer Traubenzuckerlösung, welche mit den Geweben isotonisch ist, erlischt deren Funktion, während sie in der entsprechenden physiologischen Kochsalzlösung erhalten bleibt; so werden Skelettmuskeln oder das Herz rasch gelähmt, wenn man sie in die Traubenzuckerlösung einlegt; ein Zusatz von Kochsalz stellt ihre Kontraktilität wieder her (OVERTON). Man weiß aber auch, daß nicht beliebige von den neutralen Salzen, welche im Körper vorkommen, in diesem Sinn funktionserhaltend wirken können. So bleiben Nerven und Muskeln in Lösungen von Kali-, von Kalzium- und von Magnesiumsalzen gelähmt; *nur Natriumverbindungen und allenfalls von körperfremden Salzen noch Lithiumsalze vermögen die Erregbarkeit der genannten Gewebe zu konservieren*. Damit wird also dem in den Säften weitaus prävalierenden Kation, dem Natriumion, eine ganz bestimmte und wichtige Rolle zugesprochen (OVERTON).

Solche Versuche über die Bedingungen der Erregbarkeit von Nerven und Muskeln geben aber auch ein Bild von der Bedeutung der übrigen in den Körperflüssigkeiten enthaltenen Kationen. Es sei nur daran erinnert, wie sehr die *RINGERSche Lösung*, welche neben Natriumchlorid kleine Mengen von Kaliumchlorid und Kalziumchlorid enthält — so wie es ungefähr ihrem Verhältnis in den Säften entspricht —, der physiologischen Kochsalzlösung überlegen ist; in einer reinen isotonischen Kochsalzlösung verfallen nicht bloß die Muskeln in unaufhörliche fibrilläre Zuckungen, erlahmt nicht bloß das Herz und der Darm, es verliert auch das Zentralnervensystem seine Reflexerregbarkeit, und der Muskel kann nicht mehr von seinem Nerven aus zur Kontraktion gebracht werden (siehe S. 128), während in Ringerlösung alle diese Organe funktionstüchtig bleiben. Dieselbe Rolle spielen Kalium- und Kalziumionen auch für die niederen Tiere und Pflanzen im Meerwasser, welches seiner Zusammensetzung nach einer verdünnten Ringerlösung ähnelt; denn in dieser kommen auf 100 Moleküle NaCl etwa 2,4 Mol. KCl und 1,6 Mol. CaCl₂, im Meerwasser auf 100 Moleküle NaCl etwa 2,2 Mol. KCl und 2,3 Mol. CaCl₂.

Auch die einfache chemische Analyse von Geweben und Gewebsäften läßt ohne alle physiologischen Experimente schon darauf schließen, daß *jeder einzelne Salzbestandteil seine bestimmte Rolle zu spielen hat*. Denn nur dann kann es einen Sinn haben, daß im Blutplasma mit Hilfe der verschiedenen exkretorischen Organe des Körpers ein ganz bestimmtes Verhältnis der einzelnen Salze zueinander aufrecht erhalten wird, obgleich bei dem wechselnden Gehalt der Nahrung an Salzen dies Verhältnis immer wieder von neuem gestört werden muß. Nur so ist es auch zu verstehen, daß innerhalb der Zellen Kalium- und Phosphorsäureionen, außerhalb dagegen Natrium- und Chlorionen überwiegen, und daß die Binnensalze je nach der Tierart ganz charakteristisch gemischt sind, wie z. B. die folgenden Zahlen für die roten Blutkörperchen lehren (ABDERHALDEN):

Es sind enthalten in 1000 g Blutkörperchen von:

	Rind	Schaf	Ziege	Pferd	Schwein	Hund	Katze
Natron	2,232	2,135	2,174	0	0	2,821	2,705
Kali	0,722	0,744	0,679	4,935	4,957	0,289	0,258

Es gibt also Blutkörperchen, wie die vom Pferd oder vom Schwein, welche, in einem natriumreichen Plasma schwimmend, natriumfrei sind und dafür reichlich Kalium enthalten, und andere Blutkörperchen, wie die vom Hund und der Katze, welche neben viel Natrium nur wenig Kalium enthalten.

Den deutlichsten Hinweis auf die Bedeutung der Salze liefern von solchen Analysen aber diejenigen der Milch und des Säuglings, der sich von der Milch nährt. BUNGE verglich z. B. die *Aschenbestandteile des neugeborenen Hundes, der Hundemilch und des Hundebutes* und fand folgendes:

Es sind enthalten in 100 g Asche von:

	<i>neugeborenem Hund</i>	<i>Hundemilch</i>	<i>Hundebut</i>	<i>Hundeserum</i>
K ₂ O	11,14	15,0	3,1	2,4
Na ₂ O	10,06	8,8	45,6	52,1
CaO	29,5	27,2	0,9	2,1
MgO	1,8	1,5	0,4	0,5
P ₂ O ₅	39,4	34,2	13,3	5,9
Cl	8,4	16,9	35,6	47,6

Die Asche der Hundemilch ist also merkwürdig ähnlich zusammengesetzt wie die des Säuglings, während das Blut oder das Serum, aus welchen die Milchdrüse doch für die Milchproduktion schöpft, ganz anders zusammengesetzt sind. Offenbar arbeitet also die Drüse ganz besonders darauf hin, dem Säugling die Salze in solchen Relationen zu bieten, wie er sie direkt ohne Verlust zum Aufbau seines Körpers verwenden kann. Ähnlich liegen die Verhältnisse beim Kaninchen und Meerschweinchen, während beim Menschen der entsprechende Zusammenhang vermißt wird (siehe Kap. 17). BUNGE wird wohl das Richtige treffen, wenn er annimmt, daß die Ursache in dem sehr viel langsameren Wachstum des Menschen zu finden ist.

Diese Tatsache des zähen Festhaltens an einem bestimmten Salzbestand erklärt vielleicht auch eine merkwürdige Erscheinung, welcher man beim Kochsalz begegnet. Manche Tiere haben einen ausgesprochenen *Kochsalzhunger*. BUNGE hat darauf hingewiesen, daß alle diese Tiere Pflanzenfresser sind; beim Fleischfresser fehlt das Kochsalzbedürfnis. Auch beim Menschen ist es so, daß Pflanzennahrung den Trieb nach Kochsalz auslöst. Ackerbauende Völker salzen ihre Speisen, Jägervölker nicht, und wo es bei den ersteren an Kochsalz mangelt, da gilt es als Leckerbissen, und instinktiv benutzen gewisse afrikanische Stämme sogar die Asche aus den Fäzes oder aus dem Harn zum Salzen. Das Kochsalz muß also mehr bedeuten, als ein Genußmittel, dessen Geschmack gesucht wird. Nach BUNGE kommt es darauf an, daß in der Pflanzennahrung im allgemeinen im Verhältnis zum Natrium viel mehr Kalium enthalten ist als in der tierischen Nahrung, und vermutlich kommt dann der Kochsalzhunger dadurch zustande, daß die Nieren, wenn sie

den Kaliüberschuß eliminieren, zugleich auch Natrium mit ausscheiden, so daß eine Verarmung an Natrium zustande kommt.

All diese Daten veranschaulichen nun aber nur die Unentbehrlichkeit der Salze, ohne eine Erklärung für ihre Notwendigkeit zu geben. Diese ist wahrscheinlich darin zu erblicken, daß *die Salze dem Protoplasma eine ganz bestimmte, für seine Funktion erforderliche Konsistenz verleihen* (LOEB, HÖBER). Die Salze sind nämlich im allgemeinen dadurch ausgezeichnet, daß sie den Quellungs Zustand der Kolloide in der einen oder anderen Richtung einer größeren Auflockerung oder größeren Konsolidierung, je nach Konzentration und nach chemischer Beschaffenheit, zu beeinflussen vermögen; eine gegebene Zahl von Salzen wird also nur bei einer bestimmten Mischung und Konzentration dem an Kolloiden reichen Protoplasma einen bestimmten Grad von Starre zu erteilen vermögen. Für diese Deutung lassen sich u. a. folgende Beobachtungen anführen: untersucht man die verschiedenen Salze des Natriums oder eines anderen Alkalis in ihrem Einfluß auf den Quellungs Zustand von Eiweiß, Gelatine oder dergleichen, so zeigt sich, daß die Wirkung der Anionen stets in der Reihenfolge $\text{SO}_4\text{—Cl—Br, NO}_3\text{—I}$ abgestuft ist, während, wenn man bei ungeändertem Anion die Alkalikationen variiert, diese gewöhnlich in der Reihenfolge: Na, Li—Cs—Rb—K wirksam sind. *Die für die Kolloidzustandsänderungen charakteristischen Ionenfolgen findet man nun auch bei dem Einfluß der Salze auf die verschiedensten Zellen und Gewebe* (HÖBER). Suspendiert man z. B. rote Blutkörperchen in isotonischen Lösungen der verschiedenen neutralen Natriumsalze, so tritt nach einiger Zeit trotz der Isotonie Hämolyse ein, und zwar verlieren die roten Blutkörperchen zuerst von ihrem Hämoglobin in NaJ, dann in NaNO_3 und NaBr, darauf in NaCl und am spätesten im Na_2SO_4 ; entsprechend hämolytisiert von den Chloriden KCl am raschesten, dann RbCl, nächst dem CsCl und am langsamsten LiCl und NaCl. Bringt man statt der Blutkörperchen Muskeln in die isotonischen Lösungen, so findet man, daß die Erregbarkeit nach den genannten für die Beziehungen zu den Kolloiden charakteristischen Reihenfolgen der Ionen abnimmt. Wieder in derselben Abstufung wird von den Salzen das Schlagen des Flimmerepithels geschädigt, und wenn man, wie wir später (Kapitel 19) erfahren werden, unbefruchtete Eier von Seeigeln durch kurzes Einlegen in die isotonischen Lösungen der reinen Neutralsalze zu parthenogenetischer Entwicklung anzuregen vermag, so glückt das bei den Natriumsalzen wiederum am leichtesten mit NaJ, langsamer mit NaNO_3 und NaBr und noch langsamer mit NaCl. In den meisten dieser Fälle wird man sich vorzustellen haben, daß die aus Kolloiden bestehende Plasmahaut den Ort des primären Angriffs der Salze darstellt, und daß je nach Erhöhung oder Verringerung der Permeabilität der Plasmahaut die Funktion alteriert wird.

Eine andere Reihe von Versuchen, welche auf eine Einwirkung der Salze auf die Protoplasmakolloide hindeutet, handelt von der Beseitigung der schädigenden Wirkung reiner Kochsalzlösung durch alle möglichen zweiwertigen Kationen. Es ist nämlich ein Gesetz der Kolloidchemie, daß die Wirksamkeit der Ionen als Fällungs- oder Quellungs mittel um so größer ist, je größer die Wertigkeit, und daß mehrwertige Ionen von gleicher Wertigkeit, oft fast unabhängig von ihrer chemischen Natur, gleich wirken. *Als Analogon dieser „Wertigkeitsregel“ der Kolloidchemie kann man es betrachten, daß die Schutzwirkung, welche das Kalziumion*

bei verschiedenen physiologischen Zuständen und Vorgängen entfaltet, auch von Ba, Sr, Mg, Mn, Co, Ni, gelegentlich auch von Zn und Pb ausgeübt werden kann (LOEB, HÖBER). Das ergibt sich am anschaulichsten aus der folgenden Tabelle nach Versuchen von LOEB über den Einfluß von Salzgemischen auf die Entwicklung der befruchteten Eier eines kleinen Knochenfisches *Fundulus heteroclitus*. Die Eier sterben nämlich in einer mit dem Meerwasser isotonischen $\frac{5}{8}$ -molekularen NaCl-Lösung rasch ab, während sie sich in größerer oder kleinerer Zahl zu Embryonen entwickeln, wenn man zu der NaCl-Lösung kleine Mengen von einem Salz mit mehrwertigem Kation hinzufügt. Die Tabelle gibt von diesen Salzen diejenigen Mengen an, welche den günstigsten Effekt ausüben:

Zusammensetzung des Mediums		Prozente der zur Entwicklung gelangenden Eier
100 ccm $\frac{5}{8}$ m. NaCl		0
„ „ „ „	+ 2 ccm 1 m - BaCl ₂	90
„ „ „ „	+ 2 ccm 1 m - MgCl ₂	75
„ „ „ „	+ 2 ccm $\frac{1}{8}$ m - CoCl ₂	88
„ „ „ „	+ 8 ccm $\frac{1}{128}$ m - ZnSO ₄	75
„ „ „ „	+ 8 ccm $\frac{1}{16}$ m - MnCl ₂	55
„ „ „ „	+ 4 ccm $\frac{1}{8}$ m - NiCl ₂	5
„ „ „ „	+ 1 ccm $\frac{1}{64}$ m - Pb(CH ₃ COO) ₂	17
„ „ „ „	+ 1 ccm $\frac{1}{160}$ m - UO ₂ (NO ₃) ₂	3

Man sieht, daß also auch solche Ionen, welche sonst als schwere Gifte gelten, wie Zn, Mn, Ni, Pb, in der Kombination mit Kochsalz günstige Wirkungen entfalten, während dieses für sich allein schädlich ist.

In ganz ähnlicher Weise können die mehrwertigen Ionen nun aber auch gegenüber den Zellen von Säugetieren die Rolle des Schutzmittels gegen die giftigen Wirkungen der reinen isotonischen Alkalisalzlösungen übernehmen. So kann man die schädigende Wirkung kleiner Narkotikummengen auf in NaCl-Lösung suspendierte rote Blutkörperchen nicht bloß durch Zusatz von Ca hemmen, sondern auch durch Ba, Mn, Co, Ni, oder man kann den lähmenden Einfluß von Kaliumionen auf Muskeln durch Ca, Sr, Co, Ni, Zn u. a. aufheben (HÖBER). Die Bedeutung des Kalziums in unseren Säften liegt also wahrscheinlich darin, daß es auf gewisse Kolloide einen konsolidierenden Einfluß ausübt, und von diesem Standpunkt aus ist wahrscheinlich zum Teil auch die neuerdings verbreitete therapeutische Verwendung der Kalksalze zu verstehen, wenn es sich um die Bekämpfung des Austritts von Flüssigkeit (Transsudation) an Schleimhäuten, z. B. beim Schnupfen oder bei der Bildung eines Ergusses in den Pleurahöhlen und dergleichen handelt. Denn da man beobachtet hat, daß in Abwesenheit von Kalzium die Zellen eines Zellverbandes, wie die einzelnen Zellen eines Algenfadens oder die Blastomeren eines sich entwickelnden Eies, auseinanderfallen, offenbar, weil die Kittsubstanz sich auflockert, so wird wahrscheinlich auch an den Schleimhäuten der Zusammenhalt der Zellen durch die Wirkung des Kalziums auf die verbindende kolloide Kittsubstanz gewährleistet.

Wenn sich in dieser Weise auf die Kolloidchemie eine allgemeine Theorie der physiologischen Salzwirkungen aufbauen läßt, so ist indessen nicht zu vergessen, daß *die einzelnen Ionen zum Teil auch ganz spezielle Zwecke zu erfüllen haben*. So werden Kalzium, Magnesium und Phosphor besonders zum Aufbau des Skeletts verwendet, Kalzium ist ferner bei der Gerinnung von Blut und Milch beteiligt, Phosphor bei der Bildung von Lezithin, von Nukleoproteiden und von Kasein unentbehrlich, Chlor ist für die Herstellung der Magensalzsäure erforderlich.

Auf alle Fälle ist aber aus alledem abzuleiten, daß der Mangel an bestimmten Aschenbestandteilen oder daß eine falsche Salzmischung in den Säften Störungen in den Funktionen nach sich ziehen muß. Indessen ist von den fraglos in großer Zahl möglichen krankhaften Zuständen solcher Art bis heute nur erst wenig bekannt.

15. Kapitel.

Wärme und Licht.

Die Körpertemperatur 218. Homiothermes und poikilothermes Verhalten 219. Wärmeproduktion und Wärmeabgabe 220. Wärmeregulation durch physikalische und durch chemische Mittel 221. Die Abhängigkeit der Regulation vom Zentralnervensystem 225. Physiologische Wirkungen des Lichtes 229.

In dem folgenden Kapitel wird die Wärmeabgabe von einem wesentlich anderen Standpunkt aus betrachtet werden, als in dem Kapitel über die Ernährung mit den organischen Nahrungsstoffen. Nämlich bei der Erörterung über das für den Menschen unter verschiedenen Lebensbedingungen notwendige Kostmaß betrachteten wir den menschlichen Körper in erster Linie vom Standpunkt des Maschinentechikers, welcher wissen will, mit wieviel oder wie wenig Brennmateriale er seine Maschine zu voller Leistungsfähigkeit anzutreiben vermag. Die bei der Verbrennung resultierende Wärme interessiert dabei den Techniker mehr in der negativen Richtung als energetisches Nebenprodukt, das er, weil seine Maschine von dem Ideal der Technik, einem Wirkungsgrad von 100%, noch weit entfernt ist, neben der eigentlich allein erwünschten mechanischen Arbeit mit in den Kauf nehmen muß; die Wärme spielte in den Betrachtungen über die Ernährung nur dadurch scheinbar eine bedeutende Rolle, daß sie auch als bequemer Maßstab für die geleistete Arbeit verwendet wurde, um die gesamte Energieproduktion in dem einheitlichen Maß der Kalorie anzugeben. Nun liegen die Verhältnisse aber beim Menschen wie bei allen Warmblütern in der Beziehung ganz anders als bei der technischen Maschine, daß die Wärme keineswegs bloß unerwünschtes Nebenprodukt ist, sondern daß sie dazu da ist, den Körper auf eine bestimmte Temperatur anzuheizen, bei welcher sich allein die Lebensprozesse in normalem Ausmaß abspielen. Unter diesem Gesichtspunkt erhebt sich aber sofort die Hauptfrage für diesen Abschnitt, *wie es kommt, daß trotz der sehr verschiedenen Größe der Kalorienproduktion und, wie wir sehen werden, auch der sehr verschiedenen Größe der Wärmeabgabe die Körpertemperatur fast konstant erhalten wird.*

Die Innentemperatur des Menschen schwankt nämlich bekanntlich nur um einige Zehntelgrade. Man mißt sie gewöhnlich mit einem Thermometer entweder in der Axillargrube oder in der Mundhöhle oder im Rektum. Die Temperaturschwankungen in der Mundhöhle sind relativ groß, in Abhängigkeit von der Temperatur der Umgebung; konstanter ist die Temperatur in der Axilla und im Rektum, im letzteren ist sie

im allgemeinen etwa um $0,5^{\circ}$ höher als in der Axilla. Thermoelektrisch ist die Temperatur auch in den inneren Organen bestimmt worden; die höchsten Werte findet man in der Leber, nämlich $38-39^{\circ}$. Demgegenüber ist die unbedeckte Haut erheblich niedriger temperiert, man findet Temperaturen von etwa $29-32^{\circ}$, an der Nasenspitze und den Ohrmuscheln sogar nur $22-24^{\circ}$.

Die häufigst gemessene *Rektaltemperatur schwankt bei den meisten Menschen in ziemlich regelmäßigem Turnus zwischen $36,5$ und $37,5^{\circ}$* ; das Minimum wird nachts zwischen 1 und 5 Uhr erreicht, das Maximum zwischen 2—6 Uhr nachmittags. Diese Periodizität hängt zum Teil von der Nahrungszufuhr ab; aber das ist nur ein Faktor, da der Hungernde ungefähr dieselbe Temperaturkurve zeigt. Ein zweiter Faktor, und zwar der wichtigere ist die Muskelaktion. Man hat allerdings festgestellt, daß auch bei Bettruhe (und Hunger) die gewöhnliche Schwankung, nur meist abgeflacht, zustande kommt, aber bei Bettruhe werden tagsüber während des Wachseins auch lebhaftere Muskelbewegungen ausgeführt, als nachts im Schlaf. Entscheidend sollte der Versuch sein, durch Nacharbeit und durch Schlafen bei Tag die Temperaturkurve umzudrehen, d. h. Maximum und Minimum um je 12 Stunden zu verschieben. Aber diese Umkehr ist nicht regelmäßig beobachtet worden; vielmehr liegt auch unter diesen Umständen öfter ein flaches Maximum und ein flaches Minimum an den gewöhnlichen Stellen, woraus zu schließen wäre, daß ein innerer Rhythmus die Temperaturkurve mitbedingt. Daß die Muskelaktion an der Höhe der Körpertemperatur teilhat, geht auch daraus hervor, daß bei starker Arbeit die Innentemperatur um etwa 1° ansteigen kann.

Die Körpertemperatur des Menschen ist also, wie bei allen höheren Tieren, relativ konstant. Man stellt die höheren Tiere deshalb als *Homoiotherme* den Wechselwarmblütern oder *Poikilothermen* gegenüber, welche einer „Eigentemperatur“ ermangeln, bei welchen vielmehr die Innentemperatur mit der Außentemperatur hin und her schwankt, ähnlich wie bei den Poikilosmotischen der osmotische Innendruck (siehe S. 78).

Homoiotherm bedeutet aber nicht bloß konstant temperiert, sondern soll zugleich warmblütig heißen, d. h. wärmer als die Umgebung. Beides zusammen qualifiziert das homoiotherme Tier als höher organisiert. Denn das Gesetz, welches in der unbelebten Natur herrscht, daß die Geschwindigkeit chemischer Reaktionen mit der Temperatur rasch anwächst, gilt auch für die Reaktionen in den Organismen. So ist eine hohe Temperatur mit einem intensiveren Stoffwechsel verknüpft, und dieser allein ermöglicht die stete Bereitschaft des höheren Tiers zu rascher Stellungnahme gegenüber den Wechsellagen in der Umgebung. Die erhöhte Temperatur bedingt die große Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erregung in den Nerven (siehe Kap. 21), bedingt die Flinkheit der Muskelaktionen, bedingt die reichliche Durchblutung der Organe durch das schnell arbeitende Herz und vieles andere. Diese selben Eigenschaften kann auch das poikilotherme Tier aufweisen, solange es, etwa durch die Bestrahlung der Sonne, durchwärmt ist, aber das homoiotherme Tier reagiert in der gleichen Art und Weise durch alle Jahreszeiten und in allen Klimaten.

Worauf beruhen die thermoregulatorischen Fähigkeiten der Warmblüter, welche offenbar dafür notwendig sind?

Die Körpertemperatur des Warmblüters ist im großen und ganzen das Resultat der Wärmeproduktion im Innern und der Wärmeabgabe an die Umgebung, aber jeder der beiden Faktoren ist variabel. So wird die Wärmeregulation in der Hauptsache auf eine Äquilibration dieser beiden gegensinnig wirkenden Faktoren hinauslaufen. Um das im einzelnen zu verstehen, ist es notwendig, die Bedingungen genauer kennen zu lernen, unter denen Wärmebildung und Wärmeverlust variieren.

Die **Wärmeproduktion** des vollkommen ruhenden Menschen rührt schätzungsweise zu etwa $\frac{2}{3}$ von den Umsetzungen in der großen Masse der Körpermuskulatur, zu $\frac{1}{3}$ von der inneren Arbeit des Herzens und der Atemmuskeln, von dem Stoffwechsel der Leber, der Nieren und anderer Organe her. Wenn nun die Wärmeproduktion steigt, so stammt der Zuwachs meistens und bei beträchtlichen Graden immer von der *Arbeit der Skelettmuskeln* her; in dem Kapitel über die Ernährung haben wir ja gesehen, wie außerordentlich die Kalorienproduktion durch schwere Arbeit gesteigert werden kann. In geringerem Maß kann die Wärmebildung auch durch *Nahrungsaufnahme* vergrößert werden, teils infolge der dadurch ausgelösten Verdauungsarbeit (siehe S. 197), teils durch den sich an die Resorption anschließenden Abbau der Nahrungstoffe. Neben diesen Hauptquellen des Wärmezuwachses tritt die Vermehrung der Arbeit der übrigen Organe mehr in den Hintergrund.

Die **Wärmeabgabe** erfolgt vor allem durch drei Vorgänge, durch Leitung, durch Strahlung und durch Verdunstung von Wasser an der Körperoberfläche.

Die *Wärmeleitung* erstreckt sich zum Teil auf feste Stoffe und Flüssigkeiten. So können kühle Speisen oder ein kühles Bad dem Körper Wärme entziehen; auch der Wärmeverlust durch Entleerung von Harn und Fäzes ist hierher zu zählen. Wichtiger ist die Ableitung und Ausstrahlung von Wärme an die Luft. Luft ist zwar an sich ein schlechter Wärmeleiter, aber z. B. die in wenigen Sekunden zustande kommende Erwärmung der Inspirationsluft in den Lungen zeigt, daß sie leitet. Wie bei festen und flüssigen Körpern ist auch bei der Luft die *Größe der Wärmeleitung dem Temperaturgefälle proportional*. Daher entzieht bewegtes Wasser oder bewegte Luft der Haut mehr Wärme als ruhendes Wasser und ruhende Luft; die „kühlenden“ Winde empfinden wir im Sommer selbst dann angenehm, wenn die Luft warm ist. Das Wärmeleitungsvermögen der Luft ist um so größer, je größer ihr Feuchtigkeitsgehalt ist; daher kann ein feuchtes kaltes Klima kühler erscheinen, als ein trockenes und an sich kälteres.

Die Wärmeableitung und -ausstrahlung von unserem Körper ist aber nicht bloß eine Funktion der Änderungen in der Umgebung, sondern hängt auch von Zuständen der Körperoberfläche ab. Vor allem wechselt die *Durchblutung der Haut* und damit ihre Temperatur. Durchschneidet man z. B. bei einem Kaninchen auf einer Seite den Halssympathikus, in welchem vasokonstriktorische Fasern zum Ohrlöffel verlaufen, so rötet sich das Ohr infolge der stärkeren Durchblutung und wird auffallend wärmer als das Ohr auf der nicht operierten Seite; da auf die Weise das Temperaturgefälle zwischen Haut und Umgebung steigt, so verliert das Tier durch die große Hautfalte seines Ohrlöffels mehr Wärme als vorher.

Die *Verdunstung* spielt die auffälligste Rolle, wenn die *Schweißdrüsen* in Tätigkeit geraten. Durch die Verdunstung von 1 g Wasser

an der Hautoberfläche werden dem Körper 0,54 Kalorien entzogen. Natürlich ist die Verdunstung um so reichlicher, je trockener und je bewegter die Luft; so können trockene Winde dem schweißbedeckten Körper außerordentlich große Wärmemengen entziehen. Zu der Verdunstung sichtbaren Schweißes kommt noch die sogenannte *Perspiratio insensibilis* hinzu, d. h. die Abgabe von Wasserdampf (neben Kohlendioxyd) von der an sich durch das Blut durchfeuchteten Haut.

Auch die *Atemtätigkeit* verursacht fortwährende Wärmeverluste durch Verdunstung, da die Luft, welche an den Schleimhäuten des Respirationstraktes bis zu den Alveolen entlang streicht, feucht wird. Selbst wasserdampfgesättigte Luft, wie etwa neblige Winterluft, vermag noch Wärme durch Verdunstung zu binden, da die Luft, indem sie sich im Körperinnern erwärmt, von ihrem Sättigungspunkt abrückt, also noch mehr Wasser aufzunehmen vermag.

Wie werden nun diese verschiedenen Faktoren in den Dienst der Wärmeregulation gestellt? Die bisherigen Betrachtungen lehrten bereits, daß man eine *chemische* und eine *physikalische Wärmeregulation* einander gegenüberstellen kann; die physikalischen Mittel der Steigerung der Wärmeableitung, der Wärmeausstrahlung und der Verdunstung werden dann in Gang gesetzt werden, wenn die Gefahr einer Überheizung des Körpers eintritt, das chemische Mittel der Steigerung des Stoffwechsels durch Arbeitsleistung oder auch durch Nahrungszufuhr wird in Fällen drohender Unterkühlung zur Verwendung kommen.

Beginnen wir mit der **physikalischen Wärmeregulation!** Gesetzt den Fall, daß die Temperatur der Umgebung steigt, so macht man die Beobachtung, daß die Haut durch *Vasodilatation* sich rötet. Geschieht die Erwärmung rein lokal, so bleibt die Reaktion der Rötung sehr häufig doch nicht auf den Ort der Wärmezufuhr von außen beschränkt, sondern die Haut des ganzen Körpers wird stärker durchblutet. Diese Fernwirkung deutet schon darauf hin, daß der regulative Faktor der Gefäß-erweiterung dem Zentralnervensystem unterstellt ist, daß wir es wahrscheinlich mit einem Reflex zu tun haben; wir werden nachher darauf zurückkommen. Hüllt man zum Zweck lokalisierter Erwärmung z. B. ein Bein eines Kaninchens in warme Tücher, so weiten sich die Gefäße auch in den Ohröffeln, und diese, die bis dahin dem Rücken des Tiers platt anlagen, werden aufgerichtet, augenscheinlich zu dem Zweck, von der vergrößerten und wärmeren Körperoberfläche in die gleich temperierte Umgebung entsprechend dem steileren Temperaturgefälle mehr Wärme abfließen zu lassen. So kompensiert das Tier die Wärmezufuhr vom Bein aus durch stärkere Wärmeabgabe von den Ohröffeln.

Nehmen wir dagegen den umgekehrten Fall, daß die Temperatur der Umgebung sinkt, so ist die Folge davon ein Erblassen der Haut durch *Vasokonstriktion*; die Haut wird dadurch kühler, das Temperaturgefälle flacher, es fließt also von der Haut, und weil die Haut und das darunter liegende Fettpolster an sich schlechte Wärmeleiter sind, auch von den unter der Haut gelegenen Organen weniger Wärme an die Umgebung ab; dafür verbleibt mehr Blut im Innern des Körpers, wo ihm durch den Stoffwechsel der Organe fort und fort Wärme zugeführt wird. Nur wenn die Abkühlung der Haut, z. B. bei scharfem Frost, sehr intensiv ist, kann das Gegenteil einer Konstriktion eintreten; die heftige, eventuell sogar schmerzhaftige Erregung der Haut durch die Kälte erzeugt dann eine Vasodilatation, wie an den besonders exponierten Partien,

Nasenspitze, Ohren, Fingerspitzen so oft zu beobachten ist. Manchmal werden die stark abgekühlten Teile auch „blau vor Frost“, wahrscheinlich dadurch, daß die tieferen Hautvenen sich unter dem Temperaturreiz kontrahieren, während die Kapillaren weit bleiben, so daß das Blut in diesen mehr oder weniger stagniert und dabei bläulich venös wird. Die Erweiterung der Hautgefäße bei starker Kälte ist vom Standpunkt der Erhaltung der Innentemperatur natürlich eine unzweckmäßige Reaktion, deren Effekt irgendwie kompensiert werden muß, wenn die Innentemperatur nicht sinken soll. Davon später!

Die Gefäßreaktion ist nun aber nicht das einzige Mittel, um durch Änderung der Wärmeleitung und Wärmestrahlung den Körper gegen Abkühlung oder gegen Überhitzung zu schützen. Der Wärmeabfluß von der Haut in die Umgebung ist nicht nur proportional dem Temperaturgefälle, sondern zweitens auch proportional der Körperoberfläche und drittens abhängig von dem Wärmeleitungsvermögen der Körperbedeckung.

Die Oberflächenausdehnung spielt in folgender Hinsicht eine Rolle: in kalter Umgebung kauern Mensch und Tier sich zusammen und exponieren ihre Haut so wenig als möglich, bei warmem Wetter sieht man Hunde und Katzen, alle Viere von sich gestreckt, möglichst ausgebreitet daliegen, um den Wärmeabfluß von der Haut zu steigern.

Das Wärmeleitungsvermögen wechselt je nach der Dichte des Haar- und Federkleides bei den Tieren, nach der Dicke der Kleider beim Menschen und nach dem unter der Haut abgelagerten Fettpolster.

Die *Haare* und *Federn*, welche einen Wärmeschutz gewähren, sind weniger dadurch wirksam, daß die Keratinsubstanz, aus welcher sie hauptsächlich bestehen, ein besonders schlechter Wärmeleiter wäre, als dadurch, daß sie eine poröse Hülle bilden, in deren Räumen die 100mal schlechter leitende Luft stagniert. Statt daß am nackten Körper die ihm unmittelbar anliegende Luftschicht, indem sie erwärmt wird, fortwährend aufwärts abfließt und durch kalte Luft von unten her immer wieder ersetzt wird, bleibt die in den Maschen des Pelzes und des Gefieders befindliche erwärmte Luft ruhen und bildet um den Körper herum ein „Privatklima“, dessen Temperatur von der nahe benachbarten freien Atmosphäre stark abweichen kann. So bleibt auch in der Kälte die Haut warm, „das Kleid friert an Stelle des Körpers“. Hieraus folgt, daß Pelz und Gefieder einen um so besseren Wärmeschutz gewähren, je feinporiger und dabei lufthaltiger sie sind. So versteht man, daß der Winterpelz, mit dem die Natur viele Tiere versieht, weicher und wolliger ist als der Sommerpelz.

Den gleichen Dienst, wie Haare und Federn, leisten die *Kleider* für den Menschen; er bedeckt sich aus demselben physikalischen Grunde mit ihnen, wie er im Winter mit Hilfe eines Doppelfensters eine ruhende Luftschicht zwischen drinnen und draußen legt. Auch bei den Kleidern entscheidet der Grad der Porosität über die Wirksamkeit. Jedoch dürfen die Poren nicht so fein sein, daß die Luft in ihnen vollständig fixiert wäre; denn sonst würde die Luft sich von der Haut aus allmählich mit Feuchtigkeit sättigen und dadurch ihr geringes Wärmeleitungsvermögen verlieren (RUBNER).

Denselben Zweck wie Pelz, Gefieder und Kleidung erfüllt auch das *Unterhautfettgewebe*; hier ist es die Decksubstanz selber, das Fett, welches die Wärme schlecht leitet; hinter dem Fettwall staut sich die

Binnenwärme wie das Wasser hinter einem Wehr. Selbst die im arktischen Meer lebenden Wale sind warmblütig; denn die in ihren Muskeln gebildete Wärme fließt nur langsam in die Fettschicht ab, der steile Temperatursprung kommt erst an der oberflächlichen Haut zustande.

Die Mittel zu rascher Steigerung der Wärmeabgabe, Änderung der Hautgefäßweite und Änderung der Körperhaltung und damit Änderung der die Luft berührenden Körperoberfläche, können ihre Aufgabe der Entwärmung nicht mehr erfüllen, wenn die Außentemperatur so hoch steigt, daß das Temperaturgefälle zwischen Haut und Luft sich umkehrt. Aber auch dann, wenn die Haut nur wenig wärmer ist als die Umgebung, oder wenn im Innern durch große Arbeitsleistungen besonders viel Wärme produziert wird, reichen die eben genannten Mittel für die Wärmeabgabe nicht mehr aus. In diesen Fällen tritt die *Verdunstung* in ihr Recht. Die Wärmemengen, welche auf diese Weise dem Körper entzogen werden können, sind gelegentlich kolossale. Wenn z. B. in den Tropen eine Temperatur von 45° längere Zeit ertragen wird, so ist das nur unter der Voraussetzung möglich, daß gegen den Temperaturanstieg von der Haut zur Luft die 2400 Kalorien, welche der Erwachsene täglich mindestens produziert, abgegeben werden. Da nun, wie gesagt, bei der Überführung von 1 g Wasser in Wasserdampf der Hautoberfläche 0,54 Kalorien entzogen werden können, so müssen zur Abgabe der 2400 Kalorien 4,5 l Wasser verdunsten, oder vielmehr sicher mehr, erstens wegen des negativen Temperaturgefälles, und zweitens weil der Teil des Schweißes, welcher vom Körper abtropft und nicht an seiner Oberfläche verdunstet, nutzlos ist. Tatsächlich beobachtete man, daß in den Tropen 10—15 l Wasser getrunken werden, und daß amerikanische Schnitter, welche bei heißem Wetter arbeiteten, 12 l Schweiß verloren. Natürlich ist die Schweißproduktion um so wirksamer, je trockener die warme Luft ist; bei trockener Luft können daher Temperaturen von 50—60°, für kurze Zeit sogar bis zu 120° ausgehalten werden. In feuchter warmer Luft nützt dagegen alle Schweißproduktion nichts; die Ströme von Schweiß, welche sich in einem Dampfschwitzbad bei 30—40° ergießen, kühlen nicht; die feuchte Luft vor einem sommerlichen Gewitter ist unerträglich schwül, und wird dabei angestrengt marschiert oder sonstwie gearbeitet, so kommt es zum „Hitzschlag“, der Folge der Überhitzung des Körperinnern.

Für die Ausnutzung der Schweißbildung ist von hoher Bedeutung die *Bekleidung* des Körpers. Das Kleid muß durchlässig für das verdunstende Wasser sein. Ledersachen und namentlich Gummimäntel annullieren darum den ganzen Sinn des Schwitzens und sind bei warmem Wetter eine Qual. Poröse Stoffe können dagegen die Verdunstung begünstigen, wenn sie hygroskopisch sind. Sind sie zugleich auch dünn, wie man sie im Sommer wählt, so kühlt die Verdunstung die Haut; sind sie dick, wie im Winter, so verdunstet der etwa durch körperliche Arbeit gebildete und von den hygroskopischen Kleidern aufgesogene Schweiß an der Kleideroberfläche, und die Haut wird von da aus nur sekundär leicht gekühlt. Ungünstig ist bei Wärmeüberschuß im Innern auch ein starkes Fettpolster; denn der Fettleibige, welcher durch Leitung viel weniger Wärme abgeben kann, als der Magere, muß um so mehr durch Schwitzen für die Entwärmung seines Körpers sorgen. ZUNTZ beobachtete, daß bei gleicher Kleidung und auf dem gleichen Marsch ein Fettleibiger 2575, ein Magerer 953 g Schweiß verlor.

Durch Verdunstung wirkt auch die *Atmung* kühlend. Das wird besonders deutlich, wenn bei Gefahr der Überhitzung des Körperinnern die sogenannte „*Wärmedyspnoe*“ einsetzt. Sie ist besonders auffallend beim Hund, welcher fast keine Schweißdrüsen besitzt; er läßt bei Hitze die lange feuchte Zunge aus dem Maul heraushängen und atmet „hachelnd“, so daß er, statt wie sonst bei Ruhe 2 l Luft pro Minute, nun 50—75 l befördert und dabei durch Verdunstung von der Lungenoberfläche und der reichlich bespeichelten Zunge pro Stunde bis 200 g Wasser verliert (ZUNTZ). Auch beim Menschen ist die thermische Tachypnoe zu beobachten.

Stellen wir der physikalischen nun die **chemische Wärmeregulation** gegenüber! Wie gesagt, beruht sie in der Hauptsache auf *vermehrter Muskelaktion*. Sie macht sich am auffälligsten beim Menschen bemerkbar, wenn er die Einwirkung einer niederen Umgebungstemperatur, angeregt durch das Gefühl der Kälte, mit Herumlaufen, mit Schlagen und Reiben der Hände, mit Zittern und mit einer „Gänsehaut“ d. h. mit einer Kontraktion der Hautmuskeln beantwortet. Aber auch ohne jede sichtliche Bewegung steigt bei Abkühlung die Wärmeproduktion durch Vermehrung der chemischen Umsetzungen, was sich in der Zunahme des Sauerstoffverbrauchs und der Kohlensäureproduktion kundgibt (PFLÜGER); bei ruhenden Menschen setzt diese chemische Regulation etwa von 15° abwärts ein. Sie beruht teils darauf, daß unwillkürlich der *Muskeltonus* (siehe Kap. 22) zunimmt, teils wahrscheinlich auf einer Steigerung des Umsatzes in den großen Drüsen, vor allem der Leber.

Die Wärmeproduktion steigt aber nicht bloß bei Abkühlung, sondern zweckwidrigerweise — freilich nicht stark — auch dann, wenn die Außentemperatur des ruhenden Menschen 15° erheblich überschreitet. Dies beruht größtenteils darauf, daß das Ingangsetzen derjenigen verschiedenen Mechanismen, welche die Wärmeabgabe steigern, selber mit Wärmebildung verknüpft ist; so verursacht die Schweißdrüsentätigkeit und die verstärkte Tätigkeit der Atemmuskeln einen vermehrten Sauerstoffverbrauch. Dazu kann noch hinzukommen, daß trotz der regulativen Maßnahmen die Körpertemperatur, wenigstens die Temperatur oberflächlich gelegener Muskeln über die Norm hinaus steigt und nun nach dem gewöhnlichen Gesetz von der Abhängigkeit der chemischen Reaktionsgeschwindigkeit, von der Temperatur (s. Seite 219) der Stoffwechsel in die Höhe geht.

Ob übrigens eine Abkühlung der Haut mehr mit einer Vermehrung der Wärmeproduktion oder mit einer Verminderung der Wärmeabgabe beantwortet wird, das ist individuell verschieden. Wer sich entwöhnt hat, viel körperliche Arbeit zu leisten, der bekommt auf den Kältereiz hin eine blasse oder sogar bläuliche (cyanotische) Haut (s. S. 222), und von der fröstelnden Haut aus werden reflektorisch die schwachen Kontraktionen des Zitterns und die Gänsehautbildung ausgelöst; trotzdem sinkt die Körpertemperatur. Wer dagegen seinen Muskelapparat viel benutzt, der reagiert auch auf den Kältereiz mit kräftigen Muskelbewegungen und behält dabei seine rote durchblutete Haut.

Weniger wichtig für die Wärmeregulation auf chemischem Weg ist die *Nahrungsaufnahme*. Doch ist zu konstatieren, daß unwillkürlich in kühlem Klima oder in der kalten Jahreszeit mehr verzehrt wird als in der Wärme.

Endlich sprechen einige Beobachtungen aus der Pathologie des Wärmehaushalts dafür, daß der Stoffwechsel regulativ auch in den großen Bauchorganen, speziell in der Leber verändert werden kann. Ob dies aber auch in der Norm in Betracht kommt, ist den betreffenden Beobachtungen, welche später erwähnt werden, nicht zu entnehmen.

Die verschiedenen thermoregulatorischen Einrichtungen treten nun nicht gleichzeitig ins Spiel, sondern werden nach bestimmten Regeln in Gang gesetzt. Dies ist z. B. deutlich aus folgenden Beobachtungen von RUBNER an einem ruhenden und hungernden Hund zu ersehen:

Lufttemperatur °	Wärme- produktion (a)	Wasser- Wärme- Abgabe		Wärmeabgabe durch Leitung und Strahlung (a — b) Kal.
	Kal.	durch Verdunstung (b) g	Kal.	
7,6	83,6	19,3	== 11,8	71,7
15	63,0	23,0	== 14,0	49,0
20	53,5	26,6	== 16,2	37,3
25	54,2	27,7	== 16,9	37,3
30	56,2	42,9	== 26,2	30,0

Man kann aus der Tabelle ablesen, daß für den Hund unter den angegebenen Bedingungen die Temperatur von 20° ein Optimum repräsentiert insofern, als der Hund bei dieser Temperatur weder seine chemischen noch seine physikalischen Thermoregulatoren in Gang zu setzen braucht, um seine Innentemperatur festzuhalten. Nämlich, wie die zweite Zahlenkolonne zeigt, produziert der Hund bei 20° ein Minimum an Kalorien. Dagegen unterhalb 20° steigt die Produktion, offenbar durch Erhöhung des Muskeltonus, stark an. Oberhalb 20° hält er seine Wärmebildung fast konstant (siehe dazu S. 224), muß nun aber die physikalischen Regulatoren spielen lassen, um trotz des gegen die Umgebung gesunkenen Temperaturgefälles die bisherige Innentemperatur festzuhalten. Zu diesem Zweck vermehrt er zunächst in dem Lufttemperatur-Intervall von 20—25° die Wärmeabgabe durch Leitung und Strahlung; denn das bedeutet es offenbar, daß zwischen 20° und 25° die in der letzten Zahlenkolonne verzeichnete Wärmeabgabe nicht weiter sinkt, sondern konstant bleibt; in diesem Intervall kommt es offenbar zur Gefäßerweiterung in der Haut, so daß infolgedessen trotz des Temperaturanstiegs um 5° die Ableitung und Abstrahlung der Wärme nicht sinkt. Oberhalb 25° hilft sich der Körper schließlich durch Verdunstung; die Wasserabgabe steigt mit einem Mal sprunghaft an (siehe die vierte Zahlenkolonne), die Wärmedyspnoe hat bei dem Hund eingesetzt.

Diese ganze Art und Weise des Reagierens läßt es kaum zweifelhaft erscheinen, daß *der thermoregulatorische Apparat dem Zentralnervensystem unterstellt ist*, ja noch mehr, daß es in diesem wohl einen bestimmten Ort geben wird, von welchem die geeigneten Direktiven für ein geordnetes Zusammenspiel der verschiedenen Faktoren gegeben werden.

Was zunächst die Abhängigkeit der einzelnen Apparate vom Zentralnervensystem anlangt, so leuchtet es unmittelbar ein, daß die chemische Wärmeregulation, d. h. das Muskelzittern, die Zunahme des Tonus usw. auf zentraler Innervation beruht. Die Gefäßreaktion, also z. B. die Rötung der Haut, kann zwar, wenn sie infolge eines lokalen Temperaturreizes rein lokal auftritt, auch ohne Mitwirkung des Zentralnervensystems vor sich gehen, da selbst ausgeschnittene Gefäße durch Wärme weit werden. Aber wofern der lokale Reiz, wie (S. 221) geschildert, auch an weit entfernten Körperteilen die Gefäßweite ändert, muß eine Mitbeteiligung des Zentralnervensystems angenommen werden. Und in der Tat haben GOLTZ und EWALD gezeigt, daß beim Hund ohne Rückenmark die Hautgefäße nur noch lokal reagieren. Das gleiche gilt für die Schweißabsonderung.

Ein bekannter Reflex auf die Hautgefäße, der durch thermische Reizung an weit entferntem Ort ausgelöst wird, ist die stärkere Hautdurchblutung, eventuell

sogar verbunden mit Schweißsekretion, die nach Genuß eines heißen Getränks zustande kommt. Dies beruht nicht darauf, daß das Blut durch Übertemperierung direkt und lokal auf die Gefäße wirkt, — dazu ist die zugeführte Wärmemenge zu klein — sondern die temperaturempfindlichen Magennerven wirken reflektorisch in die Ferne.

Fragt man nun nach der mutmaßlichen Schaltungszentrale, so wird man sie in jedem Fall in oder oberhalb der Medulla oblongata zu suchen haben; denn bei der Wärmeregulation handelt es sich ja um die Betätigung des Gefäßzentrums, des Zentrums für die Atmung, des Zentrums für die Schweißabsonderung, um die Innervation der gesamten Muskulatur, also um lauter Impulse, welche mindestens oberhalb des Halsmarkes ihren Ausgang nehmen (siehe S. 148 und S. 110, ferner S. 247). Die Erregung dieser Orte kann dann entweder von der Haut aus auf dem Wege zentripetaler Nerven, also reflektorisch erfolgen oder auf dem Blutweg, indem, je nachdem, zu warmes oder zu kaltes Blut den Zentra zufließt. Daß auch dies zweite vorkommt, folgt aus verschiedenen Beobachtungen, von denen hier zunächst folgende angeführt sei: wenn man um die freigelegte Karotis eine Manschette herumlegt, durch welche man warmes Wasser fließen läßt, so daß die umschlossene Blutsäule mit erwärmt wird, so bewirkt diese direkte Zufuhr von übertemperiertem Blut zu den obersten Partien des Zentralnervensystems alsbald die typischen regulatorischen Reaktionen, Erweiterung der Hautgefäße, Aufrichten der Ohren, Schweißabsonderung, Dyspnoe, obgleich durch diese lokale Überhitzung am Kopf nachweislich die Temperatur im übrigen Körper nicht verändert wird (KAHN).

Die genaue Lokalisation des Wärmeregulationszentrums ist, wie immer (siehe Kapitel 22—24), so auch hier teils durch Reizungs- und teils durch Durchschneidungsversuche ausgeführt worden. Sticht man beim Kaninchen seitlich von der Mittellinie des Schädels dicht hinter der Frontalnaht durch ein Trepanloch hindurch ins Gehirn so tief, daß der Stich die Stammganglien erreicht, so steigt gewöhnlich alsbald die Körpertemperatur um mehrere Grade, um nach 1—2 Tagen wieder zur Norm zurückzukehren (SACHS, ARONSOHN). Dieses „Stichfieber“ ist als eine Reizerscheinung aufzufassen; denn läßt man das stechende Instrument liegen, bis das Fieber wieder abgeklungen ist, und benutzt es dann als Elektrode, so kann man durch elektrische Reizung erneut die Temperatur zum Steigen bringen. Eine Folge mechanischer Reizung des „Zentrums“ ist wohl auch das Fieber, das man bei Hirngeschwülsten oder bei Thalamusblutungen beobachtet. Der physiologische Erregungsmodus ist natürlich nicht mechanischer Natur; macht man den „Wärmestich“ mit einer Doppelkanüle, durch welche kaltes oder warmes Wasser geleitet werden kann, so bewirkt Kühlung des Zentrums, daß genau die gleichen Reaktionen eintreten, wie wenn eine äußerliche Abkühlung zustande käme: die Hautgefäße verengern sich, die Ohren werden an den Körper angelegt, die Wärmeproduktion steigt, das Tier beginnt zu fiebern; Erwärmung bewirkt das Gegenteil (HANS HORST MEYER). Hieraus wird man den Schluß ziehen, daß auch normalerweise durch peripher abgekühltes Blut ein Reiz auf das Zentrum ausgeübt wird, welches nur so lange die temperatursteigernden Apparate in Gang setzt, bis es selber wieder die physiologische Temperatur erreicht hat. Überwarmes Blut würde dann nach dieser Auffassung einen beruhigenden, hemmenden Einfluß auf das „Wärmezentrum“ ausüben.

Zu einer genaueren Eingrenzung des „Wärmezentrums“ gelangt man auf folgende Weise: trennt man Großhirn und Corpus striatum durch einen Schnitt vor dem Thalamus vom übrigen Zentralnervensystem ab, so erleidet die Wärmeregulation keine Störung. Durchtrennt man hinter dem Thalamus, so verliert das Tier seine Eigenwärme; bei einer bestimmten Außentemperatur behält es zwar eine bestimmte, um einige Grade höhere Körpertemperatur, aber jedes Steigen oder Sinken der Außentemperatur wird auch von einer parallelen Änderung der Körpertemperatur begleitet, und es genügt schon Nahrungsaufnahme, um die Innentemperatur eventuell um mehrere Grade in die Höhe zu treiben. Das bis dahin homoiotherme Tier ist also in ein poikilothermes verwandelt worden (ISENSCHMID und KREHL).

Über den *Verlauf der Nervenbahnen vom Wärmezentrum zur Peripherie* weiß man bisher folgendes: Nicht nur die Durchtrennung des Hirnstammes hinter dem Thalamus, sondern auch die Durchschneidung des Halsmarks in beliebiger Höhe ruft das poikilotherme Verhalten hervor (PFLÜGER). Anders wenn man über das 8. Zervikalsegment hinausgeht, also unter dem 1.—2. Dorsalsegment das Rückenmark durchschneidet; die Regulierfähigkeit bleibt dann zwar nicht intakt, aber sie wird doch nicht mehr völlig aufgehoben; die chemische Regulation besteht weiter, die physikalische wird dagegen geschädigt (H. FREUND und GRAFE). Während nämlich nach Halsmarkdurchschneidung die Wärmeproduktion bei sinkender Temperatur nicht regulativ wie sonst steigt, sondern im Gegenteil sinkt, findet man nach Brustmarkdurchschneidung erstens, daß die Kalorienproduktion weit über die Norm gesteigert ist in Anpassung an eine Steigerung der Wärmeabgabe, welche von der Störung in der Gefäßregulation herrührt, und zweitens beobachtet man, daß diese Kalorienproduktion noch zunimmt, sobald das Tier abgekühlt wird. Denselben Effekt wie nach Durchschneidung am 8. Zervikalsegment erhält man auch, wenn man die Durchschneidung im Thorakalmark mit der Exstirpation des Ganglion stellatum kombiniert.

Was kann man daraus schließen? Wahrscheinlich handelt es sich um Sympathikusfasern, welche von dem Wärmezentrum aus innerviert werden; *man kann das Wärmezentrum direkt als ein Innervationszentrum für den Sympathikus auffassen*. Dafür ist erstens darauf aufmerksam zu machen, daß die meisten thermoregulatorischen Vorgänge, Gefäßtonus, Schweißbildung, Muskeltonus, dem Sympathikus unterstellt sind. Zweitens ist durch KARPLUS und KREIDL und durch ASCHNER gezeigt, daß, wenn man die Regio hypothalamica an der Hirnbasis, also die Gegend des Infundibulum und des Tuber cinereum reizt, man deutliche Sympathikusreizeffekte, wie Pupillen- und Lidspaltenerweiterung, Blutdrucksteigerung, Glykosurie, Uterus-, Blasen- und Rektumkontraktionen beobachtet. Drittens kann man gerade so gut, wie durch den Wärmestich, auch durch typische Erregungsmittel des Sympathikus Fieber erzeugen, z. B. durch Tetrahydronaphthylamin, Adrenalin u. a. (H. H. MEYER). Diese wirken zwar auch auf die peripheren Endigungen des Sympathikus erregend (siehe Kapitel 26); hier kommt es aber auf den Angriff im Zentrum an. Denn die Mittel verlieren ihre fiebererzeugende Wirkung, wenn vorher der Thalamus abgetrennt worden ist. Viertens sprechen auch die eben angeführten Rückenmarksdurchschneidungen dafür; denn erst vom 1. Thorakalsegment ab verlaufen Nervenfasern aus dem Rückenmark durch die Rami communicantes albi zum

Grenzstrang des Sympathikus; solange also noch den Erregungen vom Wärmezentrum über das Halsmark Bahnen ins sympathische Nervensystem offen stehen, so lange kann mindestens noch ein Rest von Wärmeregulationsfähigkeit erhalten bleiben.

Wie weit der Einfluß des Wärmezentrums über den Sympathikus hinweg in die Organe hinein sich erstreckt, ist noch nicht ganz klar. Daß von dem Zentrum aus der Gefäßtonus, die Schweißbildung und der Muskeltonus dirigiert werden, ist sicher. Außerdem untersteht dem Zentrum aber wahrscheinlich auch der Stoffwechsel der Bauchorgane; denn beim Stichfieber steigt die Temperatur am frühesten und am stärksten im Bauch, speziell in der Leber; in dieser schwindet dann auch das Glykogen, während es in den Muskeln noch nicht angegriffen wird, und im Hungerzustand macht der Wärmestich oft kein Fieber (HIRSCH und ROLLY).

Dieser Einfluß ist aber vielleicht zum Teil kein direkter, sondern wird mehr oder weniger auch durch die Drüsen mit innerer Sekretion (s. Kap. 18) übermittelt. Dafür sprechen vor allem Versuche von L. ADLER über die Wirkung der Zufuhr von Schilddrüsen-, Nebennieren-, Pankreassubstanz u. a. auf die Körpertemperatur von Winterschläfern. Einen winterschlafenden Igel kann man z. B. durch eine Injektion von Schilddrüsenextrakt in die Bauchhöhle erwecken, wobei seine Körpertemperatur rapid in die Höhe steigt; nach einiger Zeit klingt die Wirkung ab, und das Tier fällt in den lethargischen Anfangszustand zurück. Ein Beispiel dafür gibt das folgende Versuchsprotokoll:

Um 10^h wird dem einen Igel 1 ccm Schilddrüsenextrakt injiziert.

Zeit	Rektaltemperatur		Atemzüge pro Minute		Bemerkungen	
	Versuchstier	Kontrolltier	Versuchstier	Kontrolltier	Versuchstier	Kontrolltier
16. II. 10h	6,2 ^o	6,0 ^o	6	7	Schläft, Atmung oberflächlich	Schläft, Atmung oberflächlich
11h	7,0 ^o	6,5 ^o	14	8	Atmung etwas tiefer	„
11h 55'	22,0 ^o	6,8 ^o	38	9	Atmung tief und laut	„
12h 30'	35,0 ^o	6,5 ^o	52	7	Wach, läuft umher, Atmung tief	„
5h	30,0 ^o	6,0 ^o	61	8	Läuft umher	„
17. II. 10h 15'	7,0 ^o	6,5 ^o	9	7	Schläft	„
18. II. 9h 45'	7,0 ^o	6,5 ^o	7	7	Schläft	„

Ebenso bildet eine Injektion von Nebennierenextrakt, weniger stark auch Thymusextrakt einen Weckreiz. Dagegen wirkt Pankreasextrakt gerade umgekehrt; es bremst die Anfachung des Lebensprozesses durch die verschiedenen genannten Stoffe. Dem entspricht durchaus die auch sonst antagonistische Stellung des Pankreas als Drüse mit innerer Sekretion zu den übrigen.

Die Extrakte wirken nach ADLER direkt auf den Stoffwechsel; jedenfalls reagieren die Tiere in der geschilderten Weise auch nach Ausschaltung des Wärmezentrums.

Den Zusammenhang zwischen Schilddrüsenfunktion und Winterschlaf ergibt noch ein zweiter Befund von ADLER, nämlich das histologische

Bild der Schilddrüse ist im Schlaf- und im Wachzustand ganz verschieden; die Drüse des schlafenden Tieres bietet das Bild einer Atrophie, gegen das Erwachen zu verändert sie sich mehr und mehr gegen das Wachbild hin. —

Die Erörterungen über den Energiewechsel, welche dieses und das vorletzte Kapitel füllten, sollen nicht abgeschlossen werden, ohne noch ein Wort über die **physiologische Bedeutung der Lichtenergie** für den Menschen zu sagen. Im Gegensatz zur Wärme kommt hier nur die Aufnahme der Energie in Frage. Aber dabei interessiert uns nicht derjenige große Anteil der Lichtenergie, welcher beim Auftreffen auf die Oberfläche des Körpers in Wärme umgewandelt wird, sondern es sollen nur die *photochemischen Prozesse* behandelt werden, d. h. diejenigen Reaktionen, bei welchen entweder das Licht als Katalysator fungiert, oder bei denen Lichtenergie direkt in chemische Energie umgewandelt wird. Solche photochemischen Reaktionen, die in den Ablauf der Lebensvorgänge eingreifen können, gibt es in großer Zahl; viele organische Verbindungen und viele Enzyme sind lichtempfindlich. Damit ist zugleich auch erklärt, warum das Licht auf allerlei Zellformen reizend, schädigend oder tödlich wirkt. Beim Menschen und beim höheren Tier kommt als primäre Lichtwirkung allein *die Wirkung auf die Haut* in Frage.

Wir wollen mit einem eklatanten Fall beginnen: es gibt gewisse Farbstoffe, welche die Haut ganz ähnlich wie eine photographische Platte gegen Licht zu sensibilisieren vermögen, z. B. Eosin oder Erythrosin. v. TAPPEINER hat gefunden, daß, wenn man zu einer Aufschwemmung von Bakterien, Infusorien, roten Blutkörperchen u. a. die „*photodynamischen*“ Farbstoffe (welche sämtlich auch die Eigenschaft haben, zu fluoreszieren), hinzusetzt, sie so lange unschädlich sind, als die Zellsuspensionen im Dunkeln gehalten werden, daß aber, wenn man sie dem Licht exponiert, die Bakterien und Infusorien zugrunde gehen und die Blutkörperchen hämolysieren. Spritzt man einem Tier mit weißem Pelz solche Farbstoffe unter die Haut, so entsteht bei der Belichtung eine Entzündung der Haut und der Konjunktiven, die Tiere kratzen sich heftig, die Augenlider verkleben, und oft werden die Tiere von einer steigenden Mattigkeit befallen, bekommen Atemnot und gehen unter Krämpfen zugrunde; Tiere mit dunklem Pelz bleiben dagegen von der Lichtwirkung verschont (HAUSMANN). In intensivem Licht können die Erscheinungen so akut verlaufen, daß in wenigen Minuten der „Lichttod“ eintritt, während gleich behandelte Tiere im Dunkeln vollkommen gesund bleiben.

Diese merkwürdige Erscheinung erhält nun eine allgemein-biologische Bedeutung dadurch, daß photodynamische Farbstoffe auch unter den Stoffwechselprodukten vorkommen. So hat HAUSMANN festgestellt, daß man Tiere von heller Hautfarbe mit *Hämatoporphyrin* (siehe S. 89) stark sensibilisieren kann; Hämatoporphyrin zirkuliert aber nicht bloß in pathologischen Fällen, wie nach Sulfonal- oder nach Bleivergiftung, im Blut und macht dann ihre Haut deutlich lichtempfindlich, sondern in Spuren kommt es wahrscheinlich immer vor, so daß man wohl nicht zu weit geht, wenn man die Vermutung ausspricht, daß dank der Anwesenheit von Hämatoporphyrin und ähnlichen Stoffen das Licht einen gewissen Hautreiz ausübt, welcher neben anderem wohl die physiologische Basis dessen ist, was man als erregende und die Stimmung hebende Wirkung hellen Wetters empfindet.

Gelegentlich kommt beim Menschen auch eine besondere Belichtungs-erkrankung der Haut vor, die *Hydroa aestiva*, bei welcher als Begleiterscheinung häufig die Ausscheidung großer Mengen von Hämatoporphyrin im Harn festgestellt worden ist.

Verwandt mit dieser zuletzt genannten Erkrankung ist der *Fagopyrismus*, der Hautausschlag, welcher das Vieh nach Fütterung mit Buchweizen (*Fagopyrum*) befällt. Wenn die Tiere lange gesund im Stall gestanden oder auch bei trübem Wetter draußen geweidet haben, dann werden sie mit einem Male im Sonnenschein krank; betroffen werden aber nur die Tiere mit hellem Fell oder bei gefleckten Tieren werden allein die hellen Stellen krank. Manche Viehzüchter halten deshalb bloß schwarze Tiere. Selbst 3—4 Wochen nach der letzten Buchweizenfütterung kann der Fagopyrismus noch ausbrechen. Hier handelt es sich um einen alkohollöslichen, dem Chlorophyll verwandten Farbstoff, welcher in den Samen enthalten ist und photodynamische Wirkung besitzt. Auch die bekannte in Italien und Rumänien weit verbreitete Maiskrankheit des Menschen, die *Pellagra*, zu deren Symptomen gleichfalls Hautaffektionen gehören, wird von vielen als Sensibilisationskrankheit aufgefaßt. Maisgefütterte Tiere bleiben gesund, wenn sie im Dunkeln gehalten werden, oder wenn sie ein dunkles Fell haben. In Illinois sollen an Pellagra nur die Hellhäutigen, nicht die Neger erkranken.

Aber auch ganz unabhängig von der Gegenwart besonderer photodynamischer Farbstoffe entfaltet das Licht in der Haut Reizwirkungen. Jeder kennt den „Sonnenbrand“, d. h. die Rötung der Haut, welche nach intensiver Besonnung mit einer charakteristischen mehrstündigen Latenz auftritt, und die sich daran anschließende Pigmentwanderung, welche gegen erneute starke Lichtreize Schutz gewährt. Die Intensität dieses Einflusses ist eine Funktion der Wellenlänge (FINSSEN); ultraviolettes Licht entfaltet viel heftigere Wirkungen als die langwelligen Strahlen; daher der „Gletscherbrand“ in großen Höhen, in denen das leicht absorbierbare ultraviolette Licht noch reichlich in der Atmosphäre enthalten ist, und deshalb die Pockenbehandlung mit rotem Licht, weil die Entzündungs- und Eiterungsprozesse auf der Haut unter dieser Bestrahlung einen milderen Verlauf nehmen, als bei dem gewöhnlichen Lichteinfluß. Die Reizwirkung erstreckt sich aber auch über die Haut hinaus. So hat HASSELBALCH gezeigt, daß intensives, besonders an ultravioletten Strahlen reiches Licht die Atmung vertieft und verlangsamt und zwar derart, daß eine einzige Bestrahlung noch monatelang auf die Atmung fortwirken kann. Dieser Einfluß der Haut auf die Atmung erinnert an eine andere, schon von langer Zeit von ENGELMANN beobachtete Fernwirkung des Lichts. Besonnt man bei Fröschen allein die hinteren Extremitäten, während die vorderen Extremitäten und der Kopf gegen Licht völlig abgedeckt sind, so kommen in der Netzhaut die gleichen Bewegungen von Zapfen und Pigment zustande, wie bei Belichtung der Augen (siehe Kapitel 29).

Aber auch das gewöhnliche Tageslicht erregt die Haut; es erzeugt ein gewisses Maß von Durchblutung und von Pigmentierung. Die Polarreisenden, welche die Polarnacht hinter sich haben, oder die Arbeiter, die bei schwach rotem Licht mit der Herstellung photographischer Platten beschäftigt sind, fallen daher durch die wachsfarben blasse blutlere Haut auf. Die Fernwirkung des gewöhnlichen Lichts auf die Atmung macht sich in jahreszeitlichen Unterschieden in der Frequenz und in der Tiefe geltend (HASSELBALCH).

16. Kapitel.

Lymphbildung und Exkretion des Harns.

Die Bedeutung und Zusammensetzung der Lymphe 231. Bedingungen der Lymphbildung 232. Die Lymphdrüsen 234. Die Zusammensetzung des Harns 235. Die Bildung des Harns 238. Die Harnentleerung 243.

Die zahlreichen Abbauprodukte, deren Bildung im Stoffwechsel wir kennen gelernt haben, werden von den Zellen nach außen abgegeben und würden sich in ihrer Umgebung anhäufen, wenn nicht ein Strom von Flüssigkeit die Organe durchspülte; diese Flüssigkeit wird als *Gewebsflüssigkeit* oder auch als **Lympe** bezeichnet. Sie stammt ursprünglich aus dem Blut her, und da lange nicht alle Zellen in unmittelbarer Nachbarschaft von Blutgefäßen liegen, so dient die Gewebsflüssigkeit auch dazu, den Zellen die nötige mit dem Blutstrom herangeschaffte Nahrung zuzuführen. Die „Drainage“ der Gewebe durch die Lymphe erfüllt also *zweierlei Zwecke, die Lieferung von Material für die Assimilation und die Entfernung von Dissimilationsprodukten*. Die Zufuhr aus dem Blut erfolgt durch Austritt von Plasmabestandteilen durch die Gefäßwand hindurch in die Interstitien, die Abfuhr geschieht dadurch, daß sich die Gewebsflüssigkeit in kapillaren Lymphgefäßen sammelt, welche sich zu größeren Lymphstämmen vereinen; diese sammeln sich schließlich im Ductus thoracicus, welcher seinen Inhalt in die Vena subclavia sinistra ergießt.

Durch ihren Ursprung ist es verständlich, daß die *Zusammensetzung der Lymphe* qualitativ derjenigen des Blutplasmas gleicht. Man findet in ihr gelöst Serumalbumin, Serumglobulin, Fibrinogen, die Blutsalze, kleine Mengen Fett, Cholesterin, Lecithin und zahlreiche der Stoffwechselprodukte. Jedoch ist zum Unterschied vom Blut die Zusammensetzung höchst inkonstant; sie wechselt von Organ zu Organ und schwankt mit der Intensität des Stoffwechsels hin und her. Statt des Eiweißgehalts des Blutplasmas von ungefähr 16% findet man nur 0,3—5% in der Lymphe; besonders dadurch macht die Lymphflüssigkeit den Eindruck eines verdünnten Plasmas. Wie das Blutplasma, so gerinnt auch die Lymphe spontan; infolge der Geringfügigkeit der Fibrinogenmengen ist das Gerinnsel aber locker, schwammig oder gallertig. Besonders auffällig ist der Wechsel im Fettgehalt; nach einer fettreichen Mahlzeit wird die Lymphe des Ductus thoracicus, besonders aber die Darmlymphe milchig-weiß durch das darin enthaltene emulgierte Fett; die Darmlymphe führt deshalb den Namen des *Milchsafts* oder *Chylus* (siehe S. 67).

Auch *zellige Elemente* enthält die Lymphe wie das Blut, nämlich *Lymphozyten* (siehe S. 81) in außerordentlich wechselnden Mengen, wenig zahlreich in der eigentlichen Gewebsflüssigkeit, reichlicher in den Lymphgefäßen, und da die Lymphozyten von den Lymphdrüsen produziert werden, findet man sie reichlicher in den Lymphgefäßen, welche aus den Lymphdrüsen austreten, als in den zuführenden. Vereinzelt kommen auch *rote Blutkörperchen* in der Lymphe vor.

Die *Lymphmenge*, welche beim Menschen täglich durch den Ductus thoracicus ins Venenblut ergossen wird, ist unbekannt. Bei einem 10 kg schweren Hunde hat HEIDENHAIN 640 ccm gemessen. I. MUNK und ROSENSTEIN beobachteten bei einem Mädchen von 60 kg Körpergewicht, welche am Unterschenkel eine Lymphfistel hatte, in 12—13 Stunden einen Ausfluß von 1134—1372 ccm nach Nahrungsaufnahme, im Hunger etwas weniger.

Über die Bedingungen für die **Bildung der Lymphe** bestehen noch zahlreiche Unklarheiten. Da die Lymphe vom Blutplasma abstammt, so wird man in erster Linie in Erwägung ziehen, ob sie nicht unter der Wirkung des Blutdrucks durch *Filtration* entsteht (LUDWIG). Man kann mancherlei Beobachtungen dafür anführen, so z. B., daß, wenn man einem Tier eine größere Menge Blut von einem andern durch Transfusion einverleibt und so den Blutdruck steigert, sich das Gefäßsystem eines großen Teils des Überschusses dadurch entledigt, daß es Plasma ins Gewebe austreten läßt, während die Körperchen zurückbleiben, also an Zahl pro Volumeinheit zunehmen; ferner wirkt venöse Stauung und dadurch Erhöhung des Filtrationsdrucks in den Kapillaren vielfach lymphtreibend, besonders bei Stauung in Darm und Leber. Aber unter anderen ähnlichen Umständen bleibt der zu erwartende Übertritt aus; z. B. ändert sich die Zahl der Blutkörperchen nicht, wenn man in der vorderen Körperhälfte eines Tiers durch Kompression seiner Aorta oder wenn man durch Splanchnikusreizung oder durch elektrische Reizung der durchschnittenen Medulla oblongata den arteriellen Blutdruck in die Höhe treibt.

Ein zweites Moment, das berücksichtigt werden muß, ist der Austausch zwischen Blut und Geweben durch *Osmose* und *Diffusion*. Als einen Diffusionsaustausch haben wir früher (S. 103) den Gaswechsel der Organe, die sogenannte „innere Atmung“ aufgefaßt. Auch wandern Sulfat- oder Jodidionen entlang ihrem Konzentrationsgefälle, je nachdem man Lösungen davon ins Blut oder in die Gewebe injiziert, und spritzt man Kochsalzlösungen unter die Konjunktiva des Auges, so findet man, daß hypotonische Lösungen durch vorherrschende Wasserresorption, hypertonische Lösungen durch vorwiegende Salzresorption der Isotonie zustreben (WESSELY).

Von besonderer Bedeutung ist der osmotische Druck des Eiweißes, für welches im Gegensatz zu den kristalloiden Stoffen die Blutgefäßwände undurchlässig sind. Infolgedessen kann der Kapillardruck nur so lange Flüssigkeit ins Gewebe treiben, als er die Differenz der osmotischen Drucke des im Plasma und des in der Gewebslymphe enthaltenen Eiweißes übersteigt. Es ist nicht unwahrscheinlich, daß der Kapillardruck auf der arteriellen Seite der Kapillargebiete, der Eiweißdruck auf der venösen Seite überwiegt, da der Blutdruck im Kapillargebiet sehr stark sinkt (s. S. 147) und die Eiweißkonzentration des Plasmas nach den Venen hin ansteigt; auf die Weise müßte eine Durchspülung

der Organe mit Lymphe, also Zufuhr von kristalloidem Nahrungsmaterial und Abfluß von Zersetzungsprodukten zustande kommen (BAYLISS).

Ein dritter besonders wichtiger Faktor ist von ASHER als *Arbeit der Organe* bezeichnet worden; nämlich der Lymphabfluß aus einem Organ ist im allgemeinen um so kräftiger, je stärker sich das Organ betätigt. Reizt man z. B. bei einem Hund die Chorda tympani, so sezerniert die Gl. submaxillaris stärker, und zugleich fließt in vermehrtem Maß Lymphe aus den Lymphgefäßen der Drüse. Man könnte meinen, daß dies von der gleichzeitigen Vasodilatation in der Drüse herrührt (siehe S. 22); aber wenn man die Drüse mit Atropin vergiftet und dann die Chorda reizt, so steigert sich der Lymphfluß nicht, obwohl die Durchblutung gerade so wie vorher anschwillt (ASHER und BARBÈRA). In ähnlicher Weise kann man den Lympherguß vergrößern, indem man bei der Leber die Gallenbildung durch intravenöse Injektion von taurocholsaurem Natrium oder von Hämoglobin, bei der Pankreasdrüse die Saftabscheidung durch Einspritzung von Sekretin anregt (BAINBRIDGE). Ferner haben schon CLAUDE BERNARD und RANKE beobachtet, daß eine tätige Drüse oder ein tätiger Muskel dem sie durchströmenden Blut Wasser entziehen.

Sucht man diesen Phänomenen eine physikalisch-chemische Deutung zu geben, so wird man erstens daran zu denken haben, daß im allgemeinen beim Stoffwechsel der Organe große Moleküle in zahlreiche kleine zertrümmert werden, und da der osmotische Druck eine Funktion der Molekühlzahl ist, so wird demnach *mit der Steigerung des Stoffwechsels eine Steigerung des osmotischen Drucks* Hand in Hand gehen. Von dieser Stoffwechselwirkung kann man sich z. B. überzeugen, wenn man einem Hund beide Nieren herausnimmt; da die Nieren sonst dafür sorgen, den molekularen Überschuß in Gestalt von Endprodukten des Stoffwechsels aus dem Körper zu entfernen, so steigt jetzt — auch wenn das Tier hungert — der osmotische Druck des Blutes fort und fort an, sein Gefrierpunkt (siehe S. 78) sinkt also z. B. von $-0,56^{\circ}$ auf $-0,75^{\circ}$. Bei der Steigerung des Stoffwechsels entstehen in den Organen aber speziell als Spaltprodukte auch Säuren, wie Kohlensäure und Milchsäure, und Säuren vergrößern besonders stark *die Quellbarkeit der die Organe aufbauenden Kolloide*. So kann man sich als unmittelbaren Effekt der Organarbeit vorstellen, daß aus dem durchströmenden Blut teils durch Osmose und teils durch Quellung Wasser angesogen wird.

Dieses Wasserüberschusses entledigen sich sodann die Organe, und dafür können mehrere Faktoren in Rechnung gestellt werden, nämlich erstens der *Turgor der Organe* (LANDERER); indem die arbeitenden Organe sich prall mit Gewebswasser füllen, gerät ihre mit elastischen Elementen durchsetzte Kapsel in Spannung und vermag auf die Weise Flüssigkeit abzapfen (wenigstens unter der Voraussetzung, daß die Strömungswiderstände periodisch wechseln). Zweitens wird jeder von außen auf die Organe ausgeübte Druck den Lymphabstrom befördern, zumal da in den Lymphgefäßen *Klappen* vorhanden sind, welche ähnlich den Venenklappen die Strömung nur in der einen Richtung nach dem Ductus thoracicus hin zulassen. Ferner führen die Lymphgefäße *peristaltische Kontraktionen* aus (HELLER), welche wiederum zusammen mit den Klappen die Lymphabströmung besorgen. Sodann wird bei jeder Inspirationsbewegung infolge der Zunahme des negativen Druckes im Thorax Lymphe in den Ductus thoracicus angesogen. Endlich gibt es lokale Spezialeinrichtungen für die Beförderung der Lymphe; dazu gehören die *glatten Muskeln*, welche in

der Kapsel und in den Trabekeln der Lymphdrüsen enthalten sind und wohl den Inhalt der Drüsen auspressen können; die *Darmzotten* pumpen vermöge ihrer rhythmischen Bewegungen (siehe S. 65) die Lymphe der zentralen Chylusgefäße in die größeren Chylusgefäße des Mesenteriums, und manche Tiere sind im Besitz von *Lymphherzen* als eigenen Transportmitteln für die Lymphe; beim Frosch liegen z. B. zwei solcher Herzen zu beiden Seiten des Kreuzbeins und zwei oberhalb der Schulter.

Auf besondere chemische Mittel der Lymphbildung, die sogenannten *Lymphagoga*, hat HEIDENHAIN aufmerksam gemacht; es sind das allerhand Fremdstoffe, wie Extrakte aus Blutegeln, Krebsmuskeln, Muscheln und Erdbeeren, Bakterien, ferner Tuberkulin, Pepton, Hühnereiweiß, Galle. Die Wirkung dieser Mittel ist noch nicht genügend analysiert.

Die *Geschwindigkeit*, mit welcher die Lymphe sich durch die Lymphgefäße ergießt, ist gering; WEISS stellte am Hauptlymphstamm vom Hals des Pferdes eine Geschwindigkeit von 240—300 mm pro Minute fest, also eine etwa 60mal geringere Geschwindigkeit als in einem größeren Blutgefäß. In den kleinen Lymphgefäßen, aus deren Zusammenmündung die großen hervorgehen, ist die Geschwindigkeit also entsprechend noch viel kleiner.

Zu dem Lymphgefäßapparat gehören auch die schon erwähnten **Lymphdrüsen**. Sie sind von Strecke zu Strecke in die Lymphbahnen eingeschaltet und produzieren die Lymphozyten, welche sie durch ihre efferenten Lymphgefäße abgeben. Daher sinkt die Leukozytenzahl im Blut, wenn man den Ductus thoracicus unterbindet, und wenn andererseits eine krankhafte allgemeine Hyperplasie der Lymphdrüsen zustande kommt, so wird das Blut mit Lymphzellen überfüllt, es kommt zu *Leukämie*. Bekannt ist das Anschwellen der „regionären Lymphdrüsen“, wenn lokal eine Infektion, z. B. eine Angina oder ein Abszeß in einem „hohlen“ Zahn zustande kommt; gerade dieser pathologische Prozeß verdeutlicht besonders gut den Zweck der Lymphdrüsen. Die von dem Infektionsherd abgegebenen Bakterien und ihre Toxine werden in den Lymphbahnen fortbewegt, sie reizen die Wandungen der Lymphgefäße, so daß sie sich entzünden, man sieht sie alsdann als rote Stränge durch die Haut hindurchschimmern. Die eingeschalteten Lymphdrüsen bilden aber ein Hindernis für die weitere Ausbreitung der Infektion über den ganzen Körper, teils indem sie rein mechanisch als Filter die Infektionserreger abfangen, teils indem sie sie und ihre Toxine mit Hilfe der Leukozyten durch Phagozytose (siehe S. 83) unschädlich machen. Auch andere geformte Fremdkörper werden durch die Lymphdrüsen zurückgehalten, z. B. Kohlepartikeln, welche eingeatmet aus den Lungen durch deren Lymphgefäße den Drüsen im Lungenhilus zugeführt werden. Die Lymphdrüsen dienen aber wahrscheinlich auch schon unter normalen Umständen dazu, im Stoffwechsel gebildete giftige Produkte unschädlich zu machen und so den Körper vor einer Autointoxikation zu schützen. Jedenfalls hat ASHER nachgewiesen, daß Lymphe, die durch Massage gewonnen wurde und deshalb nur kurze Zeit in den Lymphdrüsen verweilen konnte, in die Blutbahn injiziert für das eigene Tier giftig ist, da Blutdruck und Puls dadurch geändert werden. —

Die Stoffwechselendprodukte, welche, in den Organen entstanden, mit der Lymphe dem Blut zugeführt werden, werden nun als Schlacken aus dem Körper entfernt. Dies geschieht teils durch die Lungen, welche das Kohlendioxyd eliminieren, teils durch den Dickdarm, dessen Drüsen

z. B. Kalk und Eisen zur Ausscheidung bringen; vor allem werden die festen wasserlöslichen Zerfallsprodukte aber *durch Nieren und Schweißdrüsen* abgegeben.

Inwieweit dies für die Nieren der Fall ist, lehrt uns *die Chemie des Harns*. Wir haben bereits (siehe Kapitel 12) erfahren, daß, wenn wir die hauptsächlichsten Endprodukte des Eiweißstoffwechsels herzählen — nämlich Harnstoff, Harnsäure, Kreatinin und Purine —, wir damit zugleich auch die wichtigsten der organischen Bestandteile des Harns nennen. Der Harn enthält in der Tat, wenn wir von den anorganischen Salzen absehen, ganz überwiegend Derivate des Eiweiß- bzw. Nukleoproteidumsatzes.

Unter den organischen Bestandteilen spielt die wichtigste Rolle der *Harnstoff*. Er wird täglich im Mittel in einer Menge von 20—30 g ausgeschieden. Die Menge richtet sich in erster Linie nach der Größe der Eiweißzufuhr (siehe S. 174 und 188).

Der Harnstoff ist sehr leicht löslich in Wasser, daher kristallisiert er aus dem Harn nur beim Eintrocknen oder Eindampfen aus. Der bekannteste Nachweis ist die *Biuretreaktion*: wenn man trockenen Harnstoff erhitzt, so schmilzt er, gibt Ammoniak ab und geht dabei in Biuret über: $\text{NH}_2\text{—CO—NH—CO—NH}_2$; dieses, in verdünnter Natronlauge gelöst und mit etwas Kupfersulfat versetzt, gibt eine violette Färbung (ähnlich wie eine Eiweiß- oder Peptonlösung, deren „Biuretreaktion“ (siehe S. 28) aber nicht auf der Bildung von Biuret beruht).

Hinter dem Harnstoff bleibt an Menge weit zurück das *Kreatinin*; im Mittel wird etwa 1 g pro Tag ausgeschieden.

Seine Anwesenheit im Harn verrät sich durch eine charakteristische Farbenreaktion: versetzt man eine Probe Harn mit einer frisch bereiteten Lösung von Nitroprussidnatrium und einigen Tropfen Natronlauge, so erscheint eine rubinrote Farbe, die rasch zu gelb abbläßt (WEYLSche Reaktion).

Auch *die Harnsäure* ist nur in relativ kleinen Quantitäten vorhanden, zu etwa 0,7 g pro Tag. Sie wird in Form ihrer Salze, der *Urate* abgesondert. Da diese schwer löslich sind, so fallen sie leicht aus, besonders aus konzentriertem Harn und besonders bei Abkühlung. Das sich bildende Sediment besteht hauptsächlich aus *Mononatriumurat*, es ist durch Mitreißen von Harnfarbstoff gelblich bis gelbbrot gefärbt; die letztere Farbe hat ihm den Namen Ziegelmehlsediment (*Sedimentum lateritium*) eingetragen. Ein nur durch die Urate getrübtter Harn wird wieder klar, sobald man ihn erwärmt. Die freie Harnsäure ist noch schwerer löslich als die Urate; säuert man daher den Harn mit etwas Mineralsäure an, so kristallisiert die Harnsäure fast quantitativ in eigentümlichen durch den Harnfarbstoff rötlich gefärbten Kristallen aus (siehe Abb. 69).

Die Kristalle sind durch die sogenannte *Murexidprobe* (Murex = Purpurschnecke) als Harnsäure zu identifizieren: dampft man ein wenig Harnsäure mit



Abb. 69. Harnsäurekristalle von verschiedener Form (nach LENHARTZ).

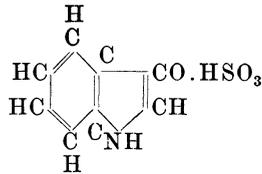
etwas Salpetersäure ein, so entsteht ein gelbroter Stoff, welcher mit etwas Ammoniak versetzt purpurrot, mit etwas Natronlauge blauviolett wird. Die Reaktion spielt sich in der Weise ab, daß die Harnsäure durch Oxydation mit der Salpetersäure in Alloxanthin übergeführt wird, welches mit Ammoniak Purpursäure bzw. purpursaures Ammon bildet.

In noch kleineren Mengen als die Harnsäure sind im Harn die übrigen Purine enthalten, wie *Heteroxanthin*, *Paraxanthin* u. a. (siehe S. 181).

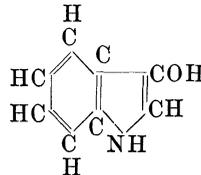
Ferner findet man *Hippursäure* oder Benzoyl-Glykokoll (siehe S. 174), in größeren Mengen bei Pflanzenkost, in kleineren bei Fleischkost. Die Menge richtet sich nach der im Körper vorhandenen Quantität Benzoesäure. Diese entsteht zum Teil aus verschiedenen stickstofffreien, in der Pflanzennahrung enthaltenen Säuren, teils bildet sie sich durch Eiweißfäulnis im Dickdarm, indem die aromatischen Aminosäuren desaminiert und weiter abgebaut werden, z. B. $C_6H_5 \cdot CH_2 \cdot CH(NH_2) \cdot COOH \rightarrow C_6H_5 \cdot CH_2 \cdot CH_2 \cdot COOH \rightarrow C_6H_5 \cdot COOH$. Daher kann man bei Fleischfressern durch Desinfektion des Darms mit Kalomel die Hippursäure zum Verschwinden bringen (BAUMANN). Die Hippursäure entsteht dadurch, daß die sich bildende Benzoesäure mit beim Eiweißabbau frei werdendem Glykokoll reagiert; die Verkopplung geschieht beim Hund in der Niere (SCHMIEDEBERG und BUNGE).

Dem Eiweißstoffwechsel entstammen auch die sogenannten *Ätherschwefelsäuren*, die Verbindungen von Phenol, Kresol, Indol und Skatol mit Schwefelsäure. Die organischen Komponenten entstehen wie die Benzoesäure durch Eiweißfäulnis im Dickdarm (siehe S. 58); die Paarung mit Schwefelsäure geschieht offenbar zu dem Zweck, die giftigen Fäulnisprodukte unschädlich zu machen (siehe S. 59). Von besonderem Interesse ist die Ätherschwefelsäure, welche sich vom Indol herleitet, die *Indoxylschwefelsäure* oder das *Harnindikan*, welches sich leicht in Indigo überführen läßt und sich dadurch zu einer kolorimetrischen Bemessung des Grades der Darmfäulnis eignet.

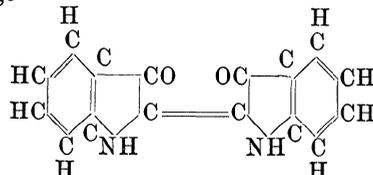
Versetzt man eine Lösung von Harnindikan



mit konzentrierter Salzsäure, so spaltet sich Indoxyl



ab; dieses geht in Gegenwart von schwachen Oxydationsmitteln, wie Eisenchlorid oder Chlorkalk, in Indigo



über, welcher hinzugegebenes Chloroform beim Umschütteln blau färbt.

Von organischen Bestandteilen des Harns sind weiter die *Harnfarbstoffe* zu nennen, vor allem das *Urochrom*, von unbekannter Herkunft, daneben in ganz kleinen Mengen *Hämatoporphyrin* (siehe S. 89 u. 229), *Uroerythrin* und *Urobilin*, das Derivat der Gallenfarbstoffe (s. S. 49 u. 56).

Endlich gehört zu den organischen Harnkomponenten, welche in ganz kleinen Mengen vorzukommen pflegen, die *Oxalsäure*; sie stammt größtenteils aus den vegetabilischen Nahrungsmitteln, in denen sie neben anderen organischen Säuren enthalten ist. Im Harnsediment findet man häufig oktaedrische Kristalle von Kalziumoxalat.

Wenden wir uns nun zu den *anorganischen Bestandteilen*! Unter den *Anionen* überwiegen die *Chlorionen*. Daneben findet man *Phosphationen*, welche teils aus dem Zerfall der Nukleine und *Lezithine* hervorgehen, teils von der Nahrung her stammen. Ferner *Sulfationen*; sie entstehen vor allem durch Oxydation des Eiweiß-Schwefels (s. S. 39 u. 46); daher gehen im allgemeinen die Ausscheidung von Stickstoff und die von Sulfaten parallel. Endlich enthält der Harn auch etwas *Karbonationen*.

Die wichtigsten *Kationen* sind *Kalium*, *Natrium*, *Kalzium*, *Magnesium* und *Ammonium*. Von Ammonium wird täglich etwa 0,7 g ausgeschieden; es entsteht beim Eiweißabbau und wird offenbar durch Bindung an die im Stoffwechsel frei werdenden anorganischen Säuren der Umwandlung in Harnstoff entzogen. Denn wenn man einem Menschen oder Hund Säure zuführt, so erscheint entsprechend mehr Ammoniak im Harn; ebenso ist im Diabetes entsprechend der Bildung von Acetessigsäure und β -Oxybuttersäure die Ammoniakausscheidung gesteigert.

Die *Reaktion des Harns* ist verschieden; der Fleischfresserharn reagiert gewöhnlich sauer, der des Pflanzenfressers entweder neutral oder alkalisch. Der Harn des Menschen reagiert gewöhnlich schwach sauer, die H-Ionenkonzentration liegt etwa zwischen 10^{-5} und 10^{-7} . Die saure Reaktion rührt von den im Eiweiß- und Nukleinstoffwechsel gebildeten Säuren, Harnsäure, Schwefelsäure, Phosphorsäure her, die alkalische Reaktion kommt in der Hauptsache so zustande, daß die Alkalien der Pflanzensäuren im Körper zu kohlen-saurem Alkali verbrannt werden. Auch der Harn des Pflanzenfressers wird sauer, wenn er hungert, also vom eigenen Fleisch lebt.

Der sauer reagierende Harn ist gewöhnlich klar und trübt sich allenfalls nachträglich durch die sich abscheidenden schwer löslichen Urate. Der alkalische Harn ist von vornherein getrübt durch die Phosphate und Karbonate der Erdalkalien. Daher wird der alkalische Harn



Abb. 70. Harnsediment bei ammoniakalischer Harnsäuregärung (nach LENHARTZ). Kristalle von Tripelphosphat (sogenannte Sargdeckelkristalle) und von harnsaurem Ammonium.

klar, sobald man ihn ansäuert. Die alkalische Reaktion kann in pathologischen Fällen aber auch von Ammoniak herrühren; nämlich wenn der Harn z. B. in der Blase infiziert wird, dann kommt es durch den *Micrococcus ureae* zur *ammoniakalischen Harngärung*, bei welcher der Harnstoff hydrolytisch in Ammoniak und Kohlensäure gespalten wird, entsprechend der Gleichung:



Diese selbe Gärung bedingt auch bei dem an der Luft sich zersetzenden Harn den penetranten Ammoniakgeruch. Auch der ammoniakalische Harn ist trübe durch die Erdalkaliphosphate und -karbonate; außerdem enthält sein Sediment Kristalldrusen des unlöslichen Ammoniumsalses der Harnsäure und die charakteristischen sargdeckelförmigen Kristalle des Magnesiumammoniumphosphats, des sogenannten *Tripelphosphats* $\text{Mg}(\text{NH}_4)(\text{PO}_4)$ (siehe Abb. 70).

Die *molekulare Konzentration* des Harns ist, im Gegensatz zum Blut (siehe S. 78), großen Variationen unterworfen; sein Gefrierpunkt schwankt zwischen $-0,075^\circ$ und $-2,6^\circ$, für gewöhnlich liegt er aber zwischen $-1,3^\circ$ und $-2,3^\circ$. Der Harn ist also für gewöhnlich im Verhältnis zum Blut ($\Delta = -0,56^\circ$) hypertonisch.

Den großen Schwankungen der molekularen Konzentration entsprechen große Schwankungen im *spezifischen Gewicht*. Dieses liegt gewöhnlich zwischen 1,017 und 1,020, kann aber auch einerseits 1,002 und andererseits 1,040 betragen.

Endlich wechselt auch stark die *Harnmenge*. Im Mittel rechnet man mit einer Ausscheidung von 1500 ccm, aber auch Mengen von 400 und von 3000 ccm kommen unter normalen Umständen vor.

Überblicken wir nun noch einmal die Summe der in dem Harn enthaltenen gelösten Stoffe, so begegnen wir ausschließlich Abfallprodukten aus dem Stoffwechsel, welche keine Verwendung mehr im Haushalt unseres Körpers finden. Der Harn repräsentiert also den Typus des Exkrets, welches, wie früher (S. 49) definiert wurde, vom Sekret eben durch den Mangel an noch brauchbaren Bestandteilen unterschieden ist. Die im Harn enthaltenen Stoffe sind auch so gut wie samt und sonders — eine Ausnahme bildet nur die Hippursäure (S. 236) — im Blut schon präformiert, sind also nur durch die Nieren aus dem Blutplasma in den Harn zu befördern. Wenn wir uns also jetzt der Frage zuwenden, **wie die Nieren den Harn bereiten**, so ist demnach die zu lösende Aufgabe eigentlich im Vergleich mit den bei anderen Drüsen gegebenen Verhältnissen (siehe S. 22) besonders einfach. Dennoch steht die Wissenschaft, trotz mehr als 70jähriger intensiver Forschung, noch ganz und gar in den Anfängen der Erkenntnis.

Von vornherein soll uns ein einfacher Vergleich zwischen der Zusammensetzung des Harns und derjenigen des Blutplasmas, aus welchem der Harn offenbar gebildet wird, darüber belehren, daß der einstige heroische Versuch von C. LUDWIG (1844), die Harnbildung allein durch Filtration und Osmose zu erklären, nicht gelingen kann. Wir sahen schon, daß der Harn des Menschen für gewöhnlich zum Blut stark hypertonisch ist; beim Übergang von Plasma in Harn wird also eine osmotische Druckdifferenz, und zwar von mehreren Atmosphären hergestellt. Dazu muß von den lebenden Zellen irgendwie *osmotische Arbeit* verrichtet werden, ähnlich wie eine Arbeit ungefähr von der Größe

$A = v \frac{p_1 - p_0}{2}$ geleistet werden muß, wenn ein Gasvolumen v vom Druck p_0 auf den Druck p_1 gebracht werden soll (DRESER). Erst unter diesem Gesichtspunkt versteht man, wozu die Nieren bei ihrer unausgesetzten Tätigkeit sehr viel Sauerstoff verbrauchen, und um so mehr, je stärker sie sezernieren (BARCROFT), obwohl für die Bildung der Harnbestandteile, weil sie alle schon im Blut vorgebildet sind, gar keine chemische Arbeit zu leisten ist; der Sauerstoffverbrauch beträgt im Mittel $\frac{1}{11}$ des gesamten Sauerstoffverbrauchs des Körpers, obwohl die Nieren nur etwa $\frac{1}{162}$ des Körpergewichts ausmachen. Es wird also reichlich chemische Energie aufgewendet, um den Harn zu produzieren.

Auch wenn man nicht die molekulare Gesamtkonzentration ins Auge faßt, sondern die Partialkonzentrationen, wird man zu demselben Schluß geführt. So beträgt der Harnstoffgehalt im Plasma etwa 0,05%, im Harn oft mehr als 2%, der Kochsalzgehalt im Plasma etwa 0,58%, im Harn über 1%; umgekehrt sinkt im allgemeinen die Konzentration vom Plasma zum Harn beim Traubenzucker, da sie im Plasma etwa 0,1%, im Harn 0% beträgt; auch Eiweiß enthält der Harn gewöhnlich nicht trotz des hohen Eiweißgehalts im Plasma. Es wird also an den einzelnen chemischen Bestandteilen verschieden große osmotische Arbeit und Arbeit in verschiedener Richtung ausgeführt.

Fragt man nun nach dem inneren „Mechanismus“, mit Hilfe dessen die Nieren dies leisten, so kommt man schon auf Grund der *histologischen Struktur* zu gewissen Annahmen.

Die Niere baut sich bekanntlich aus einer großen Zahl nebeneinander geordneter Harnkanälchen auf, welche sämtlich in das Nierenbecken einmünden. Jedes Harnkanälchen (siehe Abb. 71) ist ein ganz auffallend langer gewundener Schlauch, welcher mit einer ampullenförmigen Erweiterung in der Nierenrinde blind endet. Die Ampulle ist trichterförmig eingestülpt, etwa so wie man den Ballon an einer Gummispritze mit dem Finger einstülpen kann. Der Trichter, die sogenannte *Bowman'sche Kapsel*, umhüllt einen Gefäßknäuel, den *Glomerulus*, welcher dadurch gebildet ist, daß ein Ast der Arteria renalis sich unvermittelt auf eine kurze Strecke zu einem kurzen Kapillarnetz aufsplittert. Die Wand jedes Nierenkanälchens ist von Epithelien besetzt, welche größtenteils — besonders in den gewundenen Abschnitten, den *Tubuli contorti* — den Typus des Drüsenepithels aufweisen. Dies histologische Bild legt den Gedanken nahe, daß in den Glomerulis hauptsächlich die Harnflüssigkeit abgeschieden wird, während auf dem langen Weg durch die Kanälchen durch die Tätigkeit der Epithelien die spezifische, dem Harn eigen-

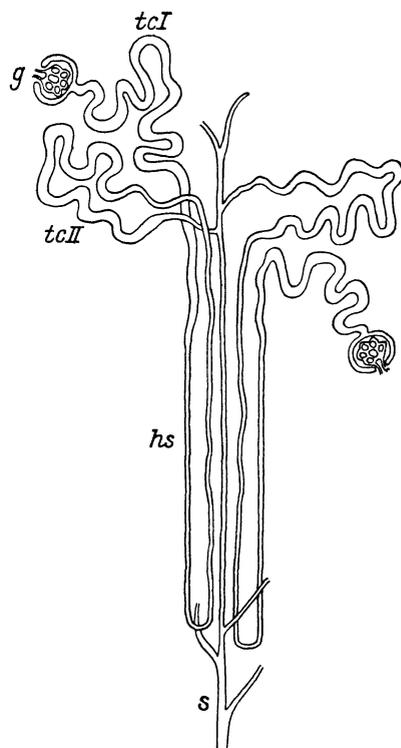


Abb. 71. Schema zweier Harnkanälchen.

g = glomerulus. tc I = tubulus contortus I. Ordnung. tc II = tubulus contortus II. Ordnung. hs = HENLE'sche Schleife. s = Sammelföhrchen.

tümliche Zusammensetzung zustandekommt. Insbesondere wird man auch vermuten, daß die Flüssigkeit, welche den Anfang der Harnkanälchen zwischen den beiden Blättern der BOWMANSchen Kapsel füllt, aus dem in den Glomeruluschlingen strömenden Blut durch den Blutdruck abgepreßt wird.

Die nächstliegende und scheinbar einfachste experimentelle Aufgabe ist hiernach, festzustellen, *ob Harnmenge und Blutdruck parallel gehen*. Dies ist nun zweifellos oft der Fall. Aber in zahlreichen anderen Fällen vermißt man auch jeden Zusammenhang. Wir wollen sehen, worauf das beruht. Setzt man z. B. durch einen kräftigen Aderlaß oder durch Vagusreizung oder durch Durchschneidung des Halsmarks den Blutdruck herab, so vermindert sich die Harnmenge (C. LUDWIG, GOLL, GRÜTZNER); durchschneidet man dagegen die Gefäßnerven, welche am Hilus der Niere eintreten, und erzeugt auf die Weise eine lokale Vasodilatation in der Niere und damit eine Drucksteigerung in ihren Kapillaren, so nimmt die Harnmenge zu (CLAUDE BERNARD). In diesen Beispielen verhält sich also die Niere äußerlich wie ein totes Filter, welches nach Maß des Filtrationsdrucks Flüssigkeit durchtreten läßt.

Anders in folgendem Versuch: wenn man einem Kaninchen das Blut eines anderen transfundiert, so daß seine Blutmenge um etwa 50% zunimmt und der kapillare Blutdruck dementsprechend ansteigt, so nimmt die Harnmenge doch nicht oder nur ganz unbedeutend zu (MAGNUS). Dieser Widerspruch mit der Filtrationstheorie der Harnbildung läßt sich auf folgende Ursachen zurückführen: ein großer Teil der Blutflüssigkeit verläßt alsbald nach der Transfusion das überfüllte Gefäßsystem, indem sie durch die Gefäßwände ins umliegende Gewebe übertritt; dies äußert sich in einer Zunahme der Blutkörperchenzahl pro Volumeneinheit Blut (siehe S. 232); außerdem wird aber auch das Blutplasma eingedickt, da die Blutgefäßwände, ebenso wie es auch andere tierische Membranen bei der Filtration tun, einen Teil des Eiweiß aus dem übertretenden Plasma zurückhalten. Wenn man nun die wahrscheinliche Annahme macht, daß schon das Glomerulusfiltrat ebenso wie der Harn vollkommen eiweißfrei ist, so ist ähnlich wie bei der Lymphbildung (S. 232) ein Teil der hydrostatischen Druckdifferenz zwischen dem Blut in den Glomeruli und der Flüssigkeit im Anfang der Harnkanälchen dazu aufzuwenden, um gegen den osmotischen Druck des Eiweißes eine eiweißfreie Flüssigkeit in die BOWMANSche Kapsel abzapfen. Ist also der Eiweißgehalt des Plasmas erhöht, so verbleibt ein entsprechend kleinerer Teil des hydrostatischen Überdrucks für die Filtration. So kann es kommen, daß der Anstieg des Kapillardrucks bei der Bluttransfusion in seinem Effekt durch einen entsprechenden Anstieg des osmotischen Drucks des Plasmaeiweißes annulliert wird. Daß das Eiweiß in diesem Sinn wirken kann, dafür lassen sich Versuche von KNOWLTON anführen: injiziert man ins Blut abwechselnd Ringerlösung mit und ohne Zusatz von 5% Gelatine, so geht die Harnbildung jedesmal zurück, wenn die Gelatine, für welche tierische Membranen ähnlich undurchlässig sind, wie für Eiweiß, dem Blut zugemischt wird.

Noch eine weitere Beobachtung, welche mit der Filtrationstheorie anscheinend disharmoniert, findet bei Berücksichtigung des osmotischen Drucks und der Nichtfiltrierbarkeit des Eiweißes wohl eine Deutung. Es ist der Filtrationstheorie oft die alte Beobachtung von FRERICHS entgegengehalten worden, daß bei Kompression der Nierenvene die Harnproduktion rasch absinkt, obwohl der kapillare Filtrationsdruck dabei steigt;

wenn man aber bedenkt, daß sich bei der Kompression die Blutgeschwindigkeit entsprechend verlangsamt, also schon ein relativ geringfügiger Übertritt von Flüssigkeit aus dem wenigen durchfließenden Blut in die Harnkanälchen genügt, um den Eiweißgehalt des Plasmas stark zu steigern, so versteht man, daß der hydrostatische Druckanstieg eventuell durch den osmotischen Druckanstieg in bezug auf das Eiweiß überkompensiert wird.

Außerordentlich umfangreich sind die Beobachtungen über *Diurese*, d. h. über Vermehrung der Harnproduktion durch Injektion von Lösungen der verschiedensten Kristalloide, wie Harnstoff, Traubenzucker, Kochsalz, Natriumsulfat und andere Salze. Allen diesen Injektionen folgt unmittelbar eine starke Harnflut; gleichzeitig steigt meistens der arterielle Blutdruck, teils direkt infolge der Flüssigkeitszufuhr, teils weil bei Verwendung hypertotonischer Lösungen Wasser aus den Geweben in die Blutbahn osmotisch eingesogen wird; ferner erweitern sich speziell die Nierengefäße, so daß man die reichlichere Durchblutung der Nieren sowohl onkographisch (siehe S. 151), als auch durch Messung der Menge des aus der Nierenvene pro Zeiteinheit ausfließenden Blutes nachweisen kann (MAGNUS, BARCROFT und BRODIE). Der Eintritt der Diurese ist also als Folge besserer Filtrationsbedingungen doppelt begreiflich. Aber nun läuft die Diurese oft nur anfänglich der Blutzufuhr parallel, später können beide ganz unabhängig voneinander werden, so daß z. B. eine kräftige Diurese noch fortbesteht, wenn die Kreislaufverhältnisse schon wieder ganz normal geworden sind. Teilweise ist auch dies jedenfalls wieder darauf zurückzuführen, daß durch die Versuchsbedingungen der Eiweißgehalt des Blutes verändert wird, und zwar wird er diesmal durch das injizierte Diuretikum herabgesetzt, das Blut wird verwässert und auf die Weise leichter filtrierbar gemacht. Aber als wesentliches Moment kommt hinzu, daß *auf jede Störung in der Zusammensetzung des Blutes die Niere aktiv mit einer Tätigkeit ihrer Epithelien reagiert, welche darauf hinzielt, die Blutzusammensetzung zur Norm zurückzuführen*. Dies wird deutlich ersichtlich, wenn wir z. B. die Diuresen nach Injektion einer Kochsalzlösung und einer Natriumsulfatlösung miteinander vergleichen (MAGNUS, SOLLMANN); bei der Diurese durch die Natriumsulfatlösung wird ein Harn abgeschieden, welcher außer Wasser viel Natriumsulfat, dagegen sehr wenig Kochsalz enthält, manchmal sogar fast frei davon ist, obwohl natürlich im Blut reichlich Kochsalz zirkuliert; dagegen bei der Kochsalzdiurese stimmt der Prozentgehalt an Kochsalz im Harn um so vollständiger mit dem des Plasmas überein, je stärker die Harnflut ist. Die Nieren befördern also aktiv den Fremdstoff aus der Blutbahn heraus, und diese Aktivität macht sich auch darin geltend, daß bei der Natriumsulfatdiurese der Sauerstoffverbrauch der Nieren stark ansteigt, während Kochsalz für den Gaswechsel indifferent ist; sobald man die Nierenzellen aber ihrer Arbeitsfähigkeit beraubt, indem man sie z. B. durch Sublimat vergiftet, so folgt auf eine Natriumsulfatinjektion auch nicht mehr die Produktion des typisch zusammengesetzten Harns, und ebensowenig steigt der Sauerstoffkonsum der Nieren (BARCROFT und H. STRAUB).

An welchen Stellen der Nieren erfolgt nun diese Zellarbeit, und was ist ihre Natur? Diese beiden Fragen können heute nur ganz unbefriedigend beantwortet werden; *an der Sekretionsarbeit sind wahrscheinlich alle Abschnitte der Harnkanälchen bis zu den Sammelröhren hin beteiligt*; vom Arbeitsmechanismus wissen wir nichts.

Daß die Glomeruli mit den BOWMANSchen Kapseln nicht bloß ein totes Filter bedeuten, sondern daß gleich hier am Anfang der Kanälchen Arbeit lebender Zellen geleistet wird, dafür läßt sich folgendes anführen: vergiftet man die Epithelien der Harnkanälchen einer Niere bei einem Hund von unten her, indem man vom Nierenbecken aus eine Fluornatriumlösung einspritzt — eine Methode, die freilich ihren Zweck nur unvollkommen erreichen kann —, so wird von der Niere ein stark hypotonischer Harn geliefert, während die andere gesunde Niere gleichzeitig normalen hypertonen Harn produziert (DE BONIS). Es sieht also so aus, als ob in den Glomeruli wesentlich reines Wasser abgeschieden wird, was natürlich einen starken Aufwand an osmotischer Arbeit bedeuten würde. Ähnliches lehrt ein Versuch von GRÜN WALD. Er ernährte Kaninchen fast chlorfrei, sie bilden dann einen fast chlorfreien Harn. Injiziert man den Tieren nun etwas Sublimat und vergiftet auf die Weise die dafür besonders empfindlichen Nierenepithelien, so fahren die Nieren, wohl mit Hilfe ihrer unbeschädigten Glomeruli, fort, aus dem immer noch reichlich Chlor enthaltenden Blut den chlorarmen Harn abzuschcheiden.

Wenn danach in den Anfang der Harnkanälchen nicht bloß durch Filtration ein blutisotones Filtrat des Plasmas eintritt, sondern auch ein hypotonisches Sekret, so muß, da der normale Harn hypertonic ist, nun irgendwie im weiteren Verlauf der Harnkanälchen eine Konzentrierung ihres Inhalts herbeigeführt werden. Dies kann entweder durch Abscheidung in die Harnkanälchen oder durch Rückresorption aus ihnen ins Blut geschehen. Wahrscheinlich kommt beides in Betracht.

Was die *Rückresorption* anlangt, so wollen wir uns von deren notwendigem Umfang etwa durch folgende Berechnung eine Vorstellung machen: das Blutplasma enthalte 0,05% Harnstoff, daraus werde in 24 Stunden ein Harn von 2% in einer Menge von 1500 ccm gebildet; dann müssen durch Filtration 60 l Flüssigkeit aus dem Blut in die Harnkanälchen abgegeben werden, von denen 58,5 l Wasser wieder zurückzuresorbieren sind. Das ist an sich wohl möglich, da 500—600 l Blut in den 24 Stunden die Nieren passieren.

Aber Einengung des Glomerulusfiltrats allein genügt nicht, da der Harn, wie wir (S. 239) sahen, nicht einfach wie konzentriertes Blutplasma zusammengesetzt ist; es müssen demnach auch gelöste Stoffe mit rückresorbiert werden. Dies ist nun z. B. für den Traubenzucker durch NISHI wahrscheinlich gemacht. NISHI analysierte Stücke der Nierenrinde und des Nierenmarks auf ihren Gehalt an Traubenzucker und fand, daß die Rinde Zucker enthält, während das Mark fast davon frei ist. Man wird daraus schließen, daß im Anfang der Harnkanälchen (im Gebiet der Tubuli contorti) der aus dem Blut übergetretene Zucker noch anwesend ist, während er im weiteren Verlauf (in den HENLESchen Schleifen) durch Rückresorption wieder verschwindet.

Ein besonders eindrucksvolles Bild von der Mitarbeit der Epithelien erhält man, wenn man nach dem Vorgang von HEIDENHAIN verschiedene Farbstoffe in die Blutbahn injiziert. Es zeigt sich alsdann bei der mikroskopischen Untersuchung, daß gewisse Farbstoffe, für welche die wenigsten Zellen des Körpers durchlässig sind, gerade in den Epithelien der Tubuli contorti reichlich gespeichert werden (GURWITSCH, HÖBER); das ist ein Beweis für die besondere Befähigung der Nierenepithelien zum Stofftransport. Diese Speicherung der Farben kann nun an sich

ebensowohl bedeuten, daß die Farbstoffe auf dem Weg in den Harnkanälcheninhalt als auch auf dem umgekehrten Weg der Rückresorption ins Blut sich befinden. Für das zweite, für die Rückresorption, spricht, daß die Anfärbung der Epithelien stets an ihrem gegen das Lumen gerichteten Abschnitt beginnt, und daß das Maximum der Farbstoffausscheidung im Harn zu einer Zeit erreicht wird, wo die Epithelien erst anfangen, den Farbstoff in ihrem Innern zu speichern (ASCHOFF, VON MÖLLENDORFF).

Mikroskopisch ist aber auch versucht worden, den Ausscheidungsweg der normalen, ungefärbten harnfähigen Stoffe, wie Harnstoff, Harnsäure, Purinbasen, zu verfolgen. Für den Harnstoff wurde das so angestrebt, daß bei einem Tier unmittelbar nach dem Töten in die Aorta eine Lösung von Xanthidrol eingespritzt wurde, welches mit dem Harnstoff eine schwer lösliche kristallisierende Verbindung eingeht, wobei sich zeigte, daß reichlich Kristalle nur in den Epithelien der Tubuli contorti zu finden sind und außerdem innerhalb der Kanallumina weiter abwärts (OLIVER). Dies ist wohl kaum anders als so zu deuten, daß die Epithelien der Tubuli contorti den Harnstoff speichern und abscheiden, und daß dann im Verlauf der Kanälchen durch Rückresorption von Wasser der Harnstoff noch weiter eingeengt wird.

Zur Ausübung ihrer osmotischen Arbeit bedarf es möglichster Unversehrtheit der Epithelien. Dies äußert sich in lange bekannter Weise in ihrer großen Empfindlichkeit gegen Zirkulationsstörungen; eine ganz kurz währende Unterbrechung des Blutstroms kann die Nierentätigkeit für viele Stunden schädigen. Zu den physiologischen Bedingungen gehört insbesondere aber auch eine bestimmte Elektrolytmischung, wie wir das ja auch für die Betätigung von Herz, Muskeln, Zentralnervensystem u. a. kennen gelernt haben. HAMBURGER zeigte z. B., daß, wenn man durch die Niere vom Frosch Ringerlösung von bestimmter Zusammensetzung mit einem Zusatz von 0,1% Traubenzucker hindurchleitet, von der Niere bestenfalls 0,03% retiniert werden, daß, sowie man aber den KCl- oder den CaCl₂-Gehalt der Lösung etwas ändert, mit dem CaCl₂ z. B. von 0,0075% auf 0,015% herauf-, oder auf 0,005% heruntergeht, das Retentionsvermögen verschwindet, also aller Traubenzucker durchgelassen wird.

Die Harnentleerung erfolgt periodisch, obwohl der Harn, entsprechend der ununterbrochenen Bildung von Stoffwechselendprodukten, andauernd von der Niere abgeschieden wird. Dies beruht auf der Einschaltung der Blase als Reservoir in die Ausführungswege.

Aus dem Nierenbecken befördert zunächst der Ureter den Harn. Es geschieht durch peristaltische Kontraktionen, welche rhythmisch über den Ureter mit einer Geschwindigkeit von 2—3 cm pro Sekunde hinlaufen; die Wellen folgen einander in einem Tempo von $\frac{1}{4}$ —1 Minute je nach der Stärke der Nierentätigkeit. Man kann mit dem Zystoskop den rhythmischen Flüssigkeitseintritt in die Blase beobachten, wenn man den Harn durch Verabreichung von Indigkarmin blau färbt (VÖLCKER). Die Bewegungen des Ureters sind automatisch; jedoch können sie durch von außen herantretende Sympathikusäste aus dem N. splanchnicus und dem N. hypogastricus beschleunigt werden.

Der Harn sammelt sich auf diese Weise in der Harnblase. Er verweilt dort oft stundenlang, wobei ein freilich langsamer Austausch durch Diffusion und Osmose mit dem Blut stattfinden kann (BAYLISS).

Die *Entleerung* erfolgt durch eine in die Blasenwand eingelassene glatte Muskulatur.

Man unterscheidet eine äußere dünne Lage von wesentlich meridional verlaufenden Muskelfasern, eine mittlere kräftige Schicht von Zirkulärfasern und ein inneres lockeres Maschenwerk, das wieder vorwiegend in Längsrichtung verläuft. Die Längsmuskulatur ist am Blasengrund teilweise an die Symphyse, beim Mann auch an die Prostata angeheftet. Der ganze Muskelapparat wird als *M. detrusor urinae* bezeichnet. Der Ausgang der Blase in die *Urethra* kann durch zwei Sphinkteren verschlossen werden. Der eine, der *M. sphincter trigonalis* oder *M. sphincter vesicae internus*, bildet eine Fortsetzung der Blasenwandmuskulatur, welche von der Rückwand der Blase, vom Trigonum Lieutaudi herkommt; der andere, der *M. compressor urethrae* oder *M. sphincter vesicae externus* besteht aus quergestreiften Fasern; er liegt zum Teil dem Sphincter internus auf und umfaßt den proximalen Abschnitt der Harnröhre.

Die *Innervation* dieser Muskulatur geschieht unmittelbar von einem Nervenetz aus, welches in die Blasenwand eingelagert ist.

Dies Nervenetz wird von außen her doppelt innerviert, erstens sympathisch durch Fasern, welche aus dem 4.—6. Lumbalsegment des Rückenmarks stammen, über den Grenzstrang in das Ganglion mesentericum inferius und von dort im N. hypogastricus zum Plexus hypogastricus und zur Blase gelangen, zweitens parasymphatisch durch Fasern, welche aus dem 2.—4. Sakralsegment entspringen und im N. pelvicus (N. erigens) ebenfalls den Plexus hypogastricus und die Blase erreichen.

Beide Fasersorten wirken auf den M. detrusor und auf die Sphinkteren sowohl fördernd als auch hemmend. Reizt man z. B. den N. hypogastricus elektrisch, so kommt zunächst eine Blasenkontraktion zustande, welcher sich dann eine Erschlaffung anschließt, geradeso wie bei der Reizung eines Gefäßnerven oft erst Vasokonstriktion und danach Vasodilatation auftritt. Beide Wirkungen sind an gesonderte Nervenfasern gebunden; nach Nikotinvergiftung bleibt z. B. allein die Kontraktionsphase übrig (STEWART, LANGLEY).

Dies ganze neuromuskuläre System ist dem Zentralnervensystem unterstellt. Wird das Lumbosakralmark zerstört, so tritt Blasenlähmung auf, d. h. der bis dahin von einem *Centrum vesicale* unterhaltene Tonus des Detrusor und der Sphinkteren wird aufgehoben (BUDGE, GOLTZ und EWALD); infolgedessen stellt sich *Harnträufeln* (*Incontinentia urinae*) ein. 2—3 Tage nach der Verletzung kommt aber wieder ein tonischer Sphinkterenschluß zustande; das *Centrum vesicale* erteilt also nicht primär die Impulse für die Blasenmuskulatur, vielmehr ist es nur peripher gelegenen Innervationsstätten (sympathische Ganglien, Plexus vesicalis) übergeordnet. Die Verhältnisse liegen demnach bei der Blase analog wie beim Rectum (siehe S. 61), wie sich auch aus dem Weiteren ergibt. Nach Wiederherstellung des Sphinkterentonus kann also wieder Harn gehalten werden, er wird nur periodisch entleert; jedoch sind die Portionen kleiner als normal, die Entleerung geschieht auch nicht vollständig, ferner fließen kleine Mengen Harn auch bei zufälligen Innervationen der Bauchdecken oder bei lebhaften Körperbewegungen aus der Blase aus. Es besteht also sowohl eine gewisse Detrusor- wie auch eine Sphinkterenschwäche. Die sonst wirksamen Reize zur Harnentleerung, wie z. B. Kältewirkung auf die Bauchdecken und die Gegend des Damms oder psychische Einflüsse, sind natürlich nach der Zerstörung des Reflexzentrums im Lumbosakralmark wirkungslos.

Weitere Aufklärung über die physiologische Bedeutung des *Centrum vesicale* gewähren Beobachtungen an Menschen oder Tieren, bei denen das Lumbosakralmark durch einen höher oben gelegenen Rückenmarks-

schnitt isoliert worden ist. In solchen Fällen findet man eine fast normale Blasenfunktion; die entleerten Harnmengen sind so groß wie gewöhnlich, und die Entleerung geschieht vollständig. Nur die sonst vom Gehirn ausgehenden Hemmungen (siehe Kapitel 22) fehlen, so daß alle möglichen geringfügigen Hautreize Harnlassen auslösen; durch die Isolierung des Lumbosakralmarks sinkt also der Mensch wieder auf die Stufe des kleinen Kindes zurück, bei dem die Hemmungslosigkeit der Reflexe neben anderem durch die Häufigkeit des „Sichnaßmachens“ gekennzeichnet ist.

Das Gehirn ist hiernach in der Weise an dem Akt der Harnentleerung beteiligt, daß es den Detrusoronus zu vermindern, den Sphinkteronus zu steigern vermag. Aber auch das Gegenteil ist möglich; durch Impulse vom Gehirn aus kann der Detrusoronus gesteigert, der Sphinkteronus gehemmt werden. Damit ist *das Harnlassen bis zu einem gewissen Grade der Willkür unterstellt*, es kann jederzeit herbeigeführt oder hinausgeschoben werden. Im allgemeinen erfolgt die Harnentleerung so: wenn die Blase sich mehr und mehr füllt, so teilt sich die dadurch zustande kommende periphere Erregung dem Großhirn mit, es kommt zu dem *Gefühl des Harndrangs*. Dies Gefühl kann aber bei sehr verschiedenem Füllungszustand der Blase eintreten; das richtet sich ganz nach der Höhe des Blasonus. Im Gegensatz zum Skelettmuskel, bei welchem zu jeder bestimmten Länge nur eine bestimmte Spannung gehört, können nämlich bei der glatten Muskulatur ganz verschiedene Längen der gleichen Spannung zugeordnet sein (siehe Kapitel 20). Bei der Blase kann man dies nachweisen, indem man z. B. in eine Blasenfistel ein Manometer einlegt; dann zeigt sich unter anderem, daß im Schlaf der Blasonus sinkt, so daß die Blase sich mehr und mehr füllen kann, ohne daß es durch Spannung ihrer Wandung zu Harndrang kommt; es zeigt sich, daß beim Erwachen der Tonus steigt, daß bei willkürlicher Unterdrückung des Harndrangs der Tonus wieder sinken kann u. a. So kommt es, daß für gewöhnlich zwar bei einer Spannung von etwa 150 mm Wasser 200 bis 250 ccm Harn von der Blase entleert werden, daß aber ebensogut auch schon bei einer Füllung mit 70 ccm oder erst bei einer Füllung mit 600 ccm die Spannung von etwa 150 mm erreicht wird und Harndrang und Entleerung zustande kommen. Das Gehirn leitet dabei die Harnentleerung so ein, daß es die Blasenmuskulatur nicht direkt innerviert, sondern über die peripheren Ganglien auf sie wirkt. Diese nur mittelbare Innervation äußert sich deutlich in der großen Latenzzeit, mit welcher allein man willkürlich, d. h. ohne daß vorher Harndrang zu bestehen brauchte, die Blase entleeren kann. Ganz verschieden davon ist die Wirkung auf den quergestreiften *M. sphincter vesicae externus*, welcher, wie alle quergestreifte Muskulatur im Gegensatz zur glatten, der Willkür direkt unterstellt ist; mit Hilfe dieses Muskels, welcher vom *N. pudendus* versorgt wird, kann man plötzlich durch Kompression der Urethra den Harnstrahl unterbrechen oder kann in einem gegebenen Moment trotz starken Harndrangs den Harn verhalten. Die analoge Rolle spielt bei der Defäkation der *Sphincter ani externus*.

17. Kapitel.

Ausscheidungen der Haut.

Der Schweiß 246. Der Talg 247. Die Milch; ihre Zusammensetzung 248. Das Kolostrum 252. Die Bildung der Milch 253.

In dem vorangehenden Kapitel hätte neben der Physiologie des Harns und der Harnbildung die Erörterung noch eines Drüsenproduktes Platz finden können, welches chemisch durchaus Exkretcharakter hat; das ist der *Schweiß*. Das Kapitel über den Wärmehaushalt hat uns aber gelehrt, daß dem Schweiß noch die zweite wichtige Aufgabe zufällt, die Körpertemperatur zu regulieren, dadurch, daß er auf der Hautoberfläche verdunstet. In dieser Hinsicht kann man das Produkt der Schweißdrüsen auch als Sekret ansehen und es anderen Sekreten der Haut, wie dem *Talg* und der *Milch* an die Seite stellen.

Der *Schweiß* ist wegen seiner *Zusammensetzung* mit Recht oft als verdünnter Harn bezeichnet worden. Er enthält nur sehr wenig gelöste Stoffe, nur etwa 2% Trockensubstanz; davon sind drei Viertel anorganische Salze, ein Viertel organische Verbindungen. Unter den ersteren überwiegt das Kochsalz, von den letzteren ist etwa die Hälfte Harnstoff; daneben findet man von Harnbestandteilen noch Kreatinin, Indikan, Harnsäure, ferner Fettsäuren, Ammoniak. Die *Reaktion* ist neutral oder schwach sauer. Der *Geruch* rührt von freien Fettsäuren her, welche aus dem Hauttalg entstehen. Entsprechend der geringen Konzentration an gelösten Stoffen beträgt das *spezifische Gewicht* nur 1,002—1,010, die *Gefrierpunktserniedrigung* 0,08—0,37°; der Schweiß ist also zum Blut stark hypotonisch. Dieser Reichtum an Wasser steht natürlich im Zusammenhang mit der zweiten Hauptfunktion des Schweißes, durch Wasserverdunstung die Körpertemperatur zu regulieren. Seine exkretorische Funktion tritt besonders in solchen Fällen mehr in den Vordergrund, in denen die Nieren darin zu wenig leisten; so steigt bei Anurieen irgendwelcher Art, z. B. infolge von Nierenentzündung, die Schweißkonzentration eventuell so an, daß sich bei der Verdunstung Harnstoffkristalle auf der Haut ablagern.

Die *Menge* des Schweißes schwankt innerhalb weitester Grenzen. Wir sahen (S. 223), daß in heißem Klima bei starker körperlicher Arbeit unter Umständen 10—15 l abgedunstet werden müssen, damit die Körpertemperatur normal bleibt; in solchen Fällen wird das Wasser, wenn es nicht durch reichliche Aufnahme genügend zur Disposition steht,

den übrigen Geweben entzogen, vor allem aber versiegt dann der Harn. Es ist auch leicht zu beobachten, daß im Sommer und Winter zwischen Harn- und Schweißbildung ein antagonistisches Verhältnis besteht.

Die *Schweißdrüsen* sind über die Haut verschieden reichlich verteilt, sie sezernieren auch an verschiedenen Stellen mit verschiedener Stärke. Der Mensch schwitzt besonders stark an Handtellern und Fußsohlen, Achselhöhle, Stirn und Nasenrücken. Pferd und Schaf schwitzen auf der ganzen Haut, Hund und Katze nur an den nackten Zehenballen. Zum Zweck der Wärmeregulation durch Verdunstung tritt deshalb beim Hund an die Stelle der Schweißbildung die Wärmedyspnoe und das Heraushängenlassen und Bespeicheln der Zunge (siehe S. 224).

Die Schweißdrüsen geraten nur auf Nervenreiz in Tätigkeit; die *Innervation* erfolgt durch parasympathische Fasern, welche innerhalb des Sympathikus vom Grenzstrang aus auf dem Weg der Rami communicantes grisei den Spinalnerven beigemischt werden (siehe Abb. 135 in Kap. 26). Reizt man z. B. bei einer Katze den Ischiadikus, so sieht man Schweißperlen aus den Zehenballen austreten. Es handelt sich dabei aber nicht etwa um bloße Innervation von Vasodilatoren, sondern um spezifisch sekretorische Nerven. Dafür spricht u. a. die weitgehende Unabhängigkeit der Schweißbildung vom Grad der Durchblutung; so treten die Schweißtröpfchen auf Ischiadikusreiz auch noch am amputierten Bein auf (LUCSINGER), und der Angst- und der Todesschweiß bilden sich, während die Haut leichenblaß ist. Ferner kann man, gerade so wie bei den Speicheldrüsen, auch die Schweißdrüsenerven durch Pilocarpin zu höchster Tätigkeit anregen und sie durch Atropin lähmen (siehe S. 22).

Unter natürlichen Verhältnissen wird die *Tätigkeit der Schweißdrüsen entweder reflektorisch angeregt oder durch Blutreize, welche auf das Zentralnervensystem wirken*. Der Schweiß bricht z. B. lokalisiert am Handteller aus bei lokaler Erwärmung oder bei Arbeitsleistung der Hand. Eine reflektorische Wirkung in die Ferne stellt man durch die Beobachtung fest, daß, wenn man den zentralen Stumpf des durchschnittenen Ischiadikus bei einer Katze reizt, an den Zehenballen der übrigen drei Beine Schweiß hervorperlt, und ärgert man eine Katze durch Verhalten eines Hundes, so schwitzen alle vier Extremitäten (LUCSINGER). Die zentrale Erregung auf dem Blutweg kommt immer dann in Betracht, wenn dem Blut irgendwie, durch ausgebreitete Erwärmung der Haut oder durch starke Körperarbeit, Gelegenheit gegeben ist, eine höhere Temperatur anzunehmen als normal. Am deutlichsten ist dieser Zusammenhang, wenn man von einer herumgelegten Manschette aus das Karotisblut bei einer Katze erwärmt; es schwitzen dann auch die hinteren Extremitäten, obwohl die Körpertemperatur im Hintertier sich nicht geändert hat (KAHN). LUCSINGER durchschnitt bei der Katze die hinteren Wurzeln und brachte sie dann in einen Schwitzkasten; der Schweißausbruch, welcher danach erfolgt, rührt nicht von einer direkten Temperaturwirkung auf die Haut her, sondern ist zentral bedingt; denn durchschneidet man einen Ischiadikus, so schwitzt das betreffende Bein nicht mit. Auch asphyktisches Blut (siehe S. 116) erregt die Schweißzentra des Rückenmarks.

Ein zweites wichtiges Sekret der Haut ist der **Talg**, welcher als ölige Masse vor allem in den Talgdrüsen der behaarten Haut, deren Ausführungsgänge in die Haarfollikel einmünden, gebildet wird, und

welcher auf der Oberfläche der Haut zu einer schmierig-festen Substanz erstarrt. Die *chemische Untersuchung* des Talgs, der in mit Petroläther getränkten Wattebäuschen von der Haut abgerieben ist, ergibt, daß in ihm kein eigentliches Fett, kein Fettsäureglyzerinester enthalten ist, sondern wahrscheinlich ein Gemisch von Estern verschiedener höherer Fettsäuren mit einwertigen Alkoholen. Unter den letzteren befinden sich Cholesterin und Oxycholesterin, welche, mit den Fettsäuren gekoppelt, die sogenannten *Lanoline* (LIEBREICH, LINSER) darstellen; ferner soll nach RÖHMANN Oktadecylalkohol in den Estern enthalten sein. Außerdem finden sich freie Fettsäuren, freies Cholesterin, eine wachsartige Substanz Lanocerin und Salze niederer Fettsäuren.

Physiologisch bedeutsam ist, daß im Gegensatz zu den Fettsäureglyzeriden die Hautfette mit Wasser ziemlich gut benetzbar sind und demzufolge reichlich Wasser aufnehmen können. Auf die Weise ist die Haut für Wasser nicht undurchgängig und ermöglicht die *Perspiratio insensibilis* (siehe S. 221). Andererseits ist der Fettcharakter der Hautfette doch immerhin so weit gewahrt, daß sie die Benetzung der Haut erschweren, so daß z. B. Wasser von der Haut ziemlich leicht abläuft, und daß bei längerem Aufenthalt in Wasser die Epidermis nur sehr allmählich und nur in den oberflächlichsten Schichten aufquillt. Der Hauttalg macht ferner die Haut geschmeidig und verhütet, daß sie trocken und rissig wird. Endlich bieten für die Einfettung der Haut die Lanoline den Vorteil, daß sie nur schwer von Bakterien gespalten werden; sie werden also weniger leicht ranzig als die Fettsäureglyzerinester, verursachen also auch weniger leicht einen ranzigen Geruch und eine Reizung der Haut durch die freien Fettsäuren. Von dieser geringeren Angreifbarkeit der Lanoline war schon früher (S. 67) einmal die Rede, als wir feststellten, daß sie nicht resorbiert werden können, weil die Lipasen des Darms sie nicht zu hydrolysieren vermögen.

Von ganz besonderer Bedeutung ist ein drittes Sekret, das man vielleicht mit hierher zu den Hautdrüsenprodukten rechnen darf, die *Milch*. Ihre Bildung ist die erste Leistung, welche wir kennen lernen, die nicht im Interesse des eigenen Körpers geschieht, sondern mit welcher der Körper Vorsorge trifft für die nächste Generation. Deshalb steht auch die Entwicklung der Milchdrüse in Zusammenhang mit anderen Vorbereitungen des Körpers auf die Schaffung der nächsten Generation, und diesen Zusammenhang haben wir hier aufzudecken. Ferner haben wir uns mit der Milch als solcher vom Standpunkt der Ernährungsphysiologie zu beschäftigen; denn die Milch stellt ja monatelang die ausschließliche Nahrung für den Säugling dar, muß also in ihrer chemischen Zusammensetzung eine hohe Vollkommenheit als Nahrungsmittel zum Ausdruck bringen. Endlich interessiert uns die normale Art der Darreichung der Milch durch die Brust, durch welche Mutter und Kind noch weit über den Zeitpunkt der Geburt hinaus miteinander „verwachsen“ sind, so dass das Kind notwendigerweise in den Schutz der Mutter gestellt bleibt.

Wir beginnen mit der *chemischen Zusammensetzung der Milch*. Das auffallendste Kennzeichen dieses Sekrets ist seine Farbe. Sie rührt bekanntlich davon her, daß das *Fett* der Milch in mikroskopisch kleinen Tröpfchen im Milchplasma zu einer feinen Emulsion verteilt ist. Die Zahl der Tröpfchen beträgt 1—6 Millionen pro cmm, ihr Durchmesser schwankt zwischen 2 und 5 μ . Die weiße Farbe kommt dadurch zustande,

daß bei der Verschiedenheit der Brechungsindices von Fett und Milchplasma das auf die Fetttröpfchen auffallende Licht total reflektiert wird. Die Emulsion zeigt einen hohen Grad von Beständigkeit; infolge der Schweredifferenzen zwischen dem Suspensionsmittel und den suspendierten Fetttröpfchen geschieht zwar ähnlich wie beim Blut, wo die schwereren Blutkörperchen sich allmählich im Plasma zu Boden senken, auch hier eine Entmischung, die spezifisch leichteren Fetttröpfchen scheiden sich als „Rahm“ an der Oberfläche der Milch ab; aber die Entmischung erfolgt doch nur langsam und unvollständig. Während Kuhmilch z. B. 2,7—4,3% Fett enthält, besteht der Rahm zu ungefähr 25% aus Fett, die abgerahmte „Magermilch“ enthält aber auch noch etwa 0,8%; nur wenn man die Trennung durch Zentrifugieren vornimmt, gewinnt man eine Magermilch von etwa 0,1% Fett. Die Beständigkeit der Emulsion rührt davon her, daß jedes Fetttröpfchen von einer Haut aus Kasein überzogen ist; wie wir früher (S. 44) sahen, daß, wenn man eine künstliche Emulsion durch Schütteln von Öl in schwach alkalischem Wasser herstellt, jedes Öltröpfchen sich an seiner Oberfläche mit einer Schicht von Seife umgibt, so spielt hier das Kasein der Milch die Rolle der Seife, und die Oberflächenmembranen verhindern hier wie dort, daß die einzelnen Tröpfchen konfluieren. Wenn man den Rahm dann „schlägt“, so zerplatzen die Häutchen und das Fett vereinigt sich zu großen Massen, zu „Butter“; die „Buttermilch“ bleibt übrig. Das Fett der Milch besteht größtenteils aus Olein und Palmitin; außerdem enthält es die Glyceride niederer Fettsäuren. Ferner ist dem Butterfett etwas Lezithin und Cholesterin beigemischt.

Das eben erwähnte *Kasein* ist der wichtigste Eiweißkörper der Milch, er ist für sie spezifisch. Das Kasein gehört zu der Gruppe der Phosphorproteide (siehe S. 41), da es ebenso wie die Nukleoproteide durch einen Gehalt an Phosphorsäure ausgezeichnet ist; jedoch ist es von diesen dadurch unterschieden, daß in seinem Molekül die für die Kernsubstanzen charakteristischen Purinbasen fehlen (siehe S. 180). Wie die Milch uns schon durch ihren Suspensionscharakter an das Blut erinnert, so ist sie auch darin mit dem Blut vergleichbar, daß sie durch Umwandlung des Kaseins gerinnen kann; in Gegenwart von Labferment (siehe S. 29) bildet sich eine kompakte Masse, die aus dem koagulierten Kasein, dem *Parakasein*, und den in dem Gerinnsel eingeschlossenen Fetttröpfchen besteht; aus dieser Masse scheidet sich allmählich eine opaleszente Flüssigkeit ab, die „Molke“. Diese Gerinnung erinnert besonders auch darin an die Fibrinogengerinnung im Blut, daß sie an die Gegenwart von Kalksalzen gebunden ist; entfernt man die reichlich in der Milch enthaltenen Kalksalze mit Oxalat oder Fluorid (siehe S. 71), so bleibt die Milch auch in Gegenwart von Labferment flüssig. Im einzelnen ist aber der Gerinnungsvorgang doch von dem des Blutes verschieden (HAMMARSTEN, FULD und SPIRO). Nämlich auch in Abwesenheit von Kalksalzen wandelt das Labferment das Kasein um, so daß das Kasein danach, auch wenn das Labferment durch Erhitzen zuvor inaktiviert worden ist, bei erneutem Zusatz von Kalksalzen und unter Bindung von Kalk ausflockt. Dabei wird zugleich das Kasein gespalten; denn nach der Gerinnung bleibt eine kleine Menge einer albumosenartigen Substanz, das *Molkeneiweiß* in Lösung. Außer in Gegenwart von Lab fällt das Kasein auch beim Ansäuern der Milch aus; auch diese Eigenschaft der Unlöslichkeit bei Gegenwart von anorganischen oder organischen

Säuren teilt es mit den Nukleoproteiden. Wird Milch also spontan sauer, dadurch, daß Luftbakterien den in der Milch enthaltenen Zucker zu Milchsäure vergären, so erstarrt sie in der bekannten Weise zu „dicker Milch“.

Das Kasein der Kuhmilch ist von dem der Frauenmilch verschieden; Lab erzeugt in Frauenmilch ein feinflockiges Koagulum, während sich das Kasein aus der Kuhmilch in größeren Massen abscheidet; ferner ist das Frauenkasein schwerer durch Säuren fällbar als das Kuhkasein. Aus dem aus Kasein und Fett bestehenden Gerinnsel, welches durch Labferment niedergeschlagen worden ist, aus dem Quark, entsteht durch einen „Reifungsprozeß“ der Käse; dabei wird durch Bakterien das Eiweiß teilweise peptonisiert, auch tiefer abgebaut, sogar desaminiert, es werden Fettsäuren frei u. a.

Neben dem Kasein enthält die Milch noch einfache Eiweißkörper in kleinen Mengen, *Laktalbumin* und *Laktoglobulin*.

Auch die Kohlehydrate sind in der Milch vertreten, und zwar in Form von *Milchzucker* (oder *Laktose*). Seine Gärungsfähigkeit wurde schon erwähnt. Diese spielt auch eine Rolle bei der Bereitung eines bekannten aus Milch hergestellten Nahrungsmittels, das wir von den Kaukasusvölkern übernommen haben, des Kefyrs. Es handelt sich dabei darum, daß durch Zusatz des aus Hefen und Bakterien bestehenden Kefyrferments der Milchzucker gespalten (siehe S. 60) und dann in Alkohol und Kohlensäure vergoren wird; daneben entstehen Milchsäure und durch Umwandlung der Eiweißkörper Peptone. Durch Überwuchern der Kefyripilze über die übrigen Bakterien soll die Eiweißfäulnis im Darm eingeschränkt werden (siehe S. 60).

In kleinen Quantitäten enthält die Milch von organischen Stoffen ferner *Harnstoff*, *Kreatin* und *Kreatinin*, außerdem „*Vitamine*“ (siehe S. 183). Bemerkenswert ist ihr fast vollständiger Mangel an *Purinen*; daher die Verordnung von Milch bei Behandlung der Gicht (siehe S. 182)!

Endlich findet man in der Milch *anorganische Salze*, unter ihnen auffallend viel Kalziumphosphat, das zur Bildung der Knochen-substanz im wachsenden Säugling dient.

Alle diese Bestandteile der Milch sind, wie die *quantitative Analyse* lehrt, in ziemlich bestimmten Mengen vorhanden. Ausdruck dessen ist die relativ konstante molekulare Konzentration, welcher eine Gefrierpunkterniedrigung von 0,54—0,59° entspricht. Die Milch ist also mit dem Blut der Säugetiere isotonisch. Auch das spezifische Gewicht schwankt nur innerhalb des kleinen Bereichs von 1,028—1,035 sowohl bei der Kuhmilch als auch bei der Milch der Frau. Der Gehalt an den wichtigsten organischen Bestandteilen ist aber von Tierart zu Tierart recht verschieden, wie die folgende Tabelle lehrt:

Tierart	Eiweiß	Fett	Zucker	Salze
Mensch . . .	1—2	3—4	6—7	0,2
Esel	2,1	1,3	6,3	0,3
Pferd	2,0	1,1	6,7	0,3
Kuh	3,5	4,0	4,8	0,7
Ziege	3,7	4,1	4,5	0,85
Hund	9,9	9,6	3,2	0,7

Auf Grund dieser Analysenergebnisse ist die Milch der Eselin und der Stute öfter als der Frauenmilch besonders ähnlich bezeichnet worden. Die als Ersatz der Muttermilch gebräuchlichste Kuhmilch enthält erheblich mehr Eiweiß und Salze, weniger Zucker. Darauf gründet sich die Vorschrift der Kinderärzte, die Kuhmilch für die Ernährung des menschlichen Säuglings mit Wasser zu verdünnen und ihr dann Milchzucker zuzusetzen.

Die verschiedene Zusammensetzung der Milch der verschiedenen Tierarten scheint in Zusammenhang mit der Geschwindigkeit zu stehen, mit welcher die saugenden Jungen wachsen; dafür spricht die folgende Zusammenstellung:

Tierart	Zahl der Tage bis zur Verdoppelung des Geburtsgewichts	In 100 Teilen Milch sind enthalten		
		Kalorien	Eiweiß	CaO, MgO, P ₂ O ₅
Mensch . . .	180	70	1,2	0,08
Rind	47	65	3,3	0,46
Ziege	20	80	5,0	0,6
Schaf	12	105	5,6	0,6
Schwein . . .	8	170	7,5	0,8
Hund	8	135	9,7	1,0
Kaninchen	6	160	15,5	1,9

Also diejenigen Stoffe, welche für den Aufbau der Zellen notwendig sind, die Eiweißkörper und gewisse Salze, scheinen im allgemeinen dem Säugling in um so konzentrierterer Form in der Milch geboten zu werden, je rascher er sich entwickelt.

Auch die relativen *Mengen der anorganischen Salze* sind für die Tierart kennzeichnend; es sei dafür auf die Angaben auf S. 214 verwiesen, wo gezeigt wurde, daß die Aschenbestandteile der Milch der Hündin in ihren relativen Mengen ganz merkwürdig mit den Aschenbestandteilen im Hundesäugling übereinstimmen, welcher seinen Körper aus der Milch aufbaut. Auch dafür kommt es nach BUNGE auf die Wachstumsgeschwindigkeit an; denn während bei den schnell wachsenden Tieren, wie Kaninchen, Hund und Meerschweinchen, diese Übereinstimmung vorhanden ist, wird sie beim Menschen und beim Rind vermißt. Für den Menschen z. B. gelten nach CAMERER und SÖLDNER folgende Zahlen:

	Es sind enthalten in 100 g Asche von	
	Säugling	Frauenmilch
K ₂ O	7,8	31,4
Na ₂ O	9,1	11,9
CaO	36,1	16,4
MgO	0,9	2,6
P ₂ O ₅	38,9	13,5
Cl	7,7	20,0

Die Asche der Milch ist hier also ganz abweichend von der des Säuglings zusammengesetzt. Kaninchen und Hunde wachsen aber nach der Geburt so rasch, daß sie schon in 6 bzw. 8 Tagen ihr Körpergewicht verdoppeln, während der Mensch dazu etwa 180 Tage braucht.

Aus all dem ist zu folgern, daß die Muttermilch für das Neugeborene ein Nahrungsmittel sein muß, das kaum zu ersetzen ist. Es kommt noch hinzu, daß die Milch in verschiedenen Perioden der Laktation verschieden zusammengesetzt ist, die Brustdrüse sich also anscheinend fortwährend den sich ändernden Bedürfnissen des Säuglings anpaßt. Zum Beispiel ist der Eiweiß- und der Salzgehalt in der Frauenmilch in den ersten Tagen des Säugens am höchsten und nimmt dann allmählich ab, während der Milchzuckergehalt umgekehrt allmählich ansteigt. So wird es begreiflich, daß die „Brustkinder“ im großen und ganzen viel besser gedeihen als die „Flaschenkinder“, wenn dafür auch noch andere Verhältnisse geltend zu machen sind (siehe S. 253).

Nur an zwei Bestandteilen ist die Milch so arm, daß man vielleicht mit dem oft für sie verwendeten Prädikat eines „vollkommenen Nahrungsmittels“ zurückhalten möchte. Erstens mangeln, worauf bereits aufmerksam gemacht wurde, die Purine, welche zum Aufbau der Kernsubstanz unentbehrlich sind, also auch dem wachsenden Säugling zugeführt werden sollten. Aber wahrscheinlich kann der Säugling sie in der Milch deshalb entbehren, weil er sie selber synthetisch aufbaut (siehe S. 182). Und zweitens ist die Milch überaus arm an Eisen. Dieser Mangel, welcher für die ausreichende Hämoglobinbildung gefährlich werden könnte, wird aber wahrscheinlich so ausgeglichen, daß das Neugeborene von der Mutter einen Eisenvorrat mitbekommt, mit welchem es seine Bedürfnisse bestreiten kann, bis es zu eisenreicherer Nahrung übergeht (BUNGE). Dafür kann man u. a. die folgende für das Kaninchen geltende Tabelle (nach BUNGE) anführen:

Alter des Tieres	mg Fe in 100 g Körpersubstanz	Alter des Tieres	mg Fe in 100 g Körpersubstanz
1 St. nach der Geburt	18,2	22 Tage nach der Geburt	4,3
1 Tag „ „ „	13,9	24 „ „ „ „	3,2
4 Tage „ „ „	9,9	27 „ „ „ „	3,4
7 „ „ „ „	6,0	35 „ „ „ „	4,5
13 „ „ „ „	4,5	46 „ „ „ „	4,1
		74 „ „ „ „	4,6

Der relative Eisengehalt des Kaninchens sinkt also bis in die 4. Woche nach der Geburt, um von da ab wieder etwas zu steigen und sich dann konstant zu halten. In der 4. Woche beginnen aber die jungen Kaninchen zu Grünfutter überzugehen. So würde die von mancher Seite gemachte Angabe verständlich, daß Kinder, welche zu lange allein an der Mutterbrust genährt werden, anämisch werden. Jedenfalls können die Jungen von Muttertieren, welche eisenarm ernährt worden sind, das Bild einer schweren Blutarmut gewähren (M. B. SCHMIDT).

Eine besondere Beschaffenheit hat die Milch, welche in den ersten Tagen nach der Geburt in spärlichen Mengen abgesondert wird; sie wird mit einem eigenen Namen als **Kolostrum** bezeichnet. Das Kolostrum sieht gelblich aus. Es enthält neben den Fetttröpfchen in Suspension die sogenannten Kolostrumkörperchen; das sind Leukozyten, in deren Protoplasma größere und kleinere Fettgranula liegen. Der Eiweißgehalt des menschlichen Kolostrums ist höher als bei der Milch; er beträgt etwa 3%; beim Erhitzen koaguliert das Kolostrum.

Zur **Bildung der Milch** kommt es bekanntlich, nachdem während der Gravidität das Drüsengewebe gewuchert und nachdem die Geburt erfolgt ist. Die Bildung ist ein echter Sekretionsprozeß. Dafür ist kennzeichnend, daß mehrere der wesentlichsten Bestandteile, Kasein und Milchzucker, nicht im Blut präformiert sind, sondern von der Drüse neu gebildet werden. Wie das geschieht, ist nicht bekannt. Ob das Fett in der Milchdrüse, wenigstens zum Teil, neu entsteht, ist unsicher. Jedenfalls ist festgestellt, daß Nahrungsfett in die Milch übergehen kann; es sei daran erinnert, daß, wenn man jodiertes Fett verfüttert, ein Teil davon in der Milch wiedergefunden wird (siehe S. 164). Wenn manche Tiere in der Milch für längere Zeit erheblich mehr Fett abgeben, als sie in der Nahrung aufnehmen, so beweist das natürlich nicht, daß das Plus in der Milchdrüse entstanden ist; es ist nur irgendwo im Körper neu gebildet (siehe S. 165). Auch andere Nahrungsbestandteile außer Fett können in die Milch übergehen; so ändert sich bekanntlich der Geschmack und der Geruch der Milch, wenn Kühe von Trockenfutter zu Grünfutter übergehen. Im allgemeinen ist aber die Zusammensetzung der Milch nur sehr wenig durch die Ernährung zu beeinflussen.

Außer in der Bildung spezifischer Bestandteile äußert sich die Lebenstätigkeit der Milchdrüse auch darin, daß sie aus dem Blut bestimmte Stoffe in bestimmter Menge ausliest. Wir sahen, daß sie z. B. den Blutsalzen gegenüber so verfährt. Obwohl aber die Salze in der Milch in ganz anderen Mengeverhältnissen enthalten sind, als im Blut, so ist doch der osmotische Druck in beiden Flüssigkeiten der gleiche (siehe S. 250).

Diese ganze Drüsenaktion ist nicht an die Mitwirkung des *Nervensystems* im Sinne eines Sekretionszentrums gebunden. Das geht am deutlichsten aus den Beobachtungen von GOLTZ und EWALD an einer Hündin mit verkürztem Rückenmark hervor. Das Tier, bei dem das Thorakal- und Lumbosakralmark operativ entfernt war, gebar in normaler Weise eine Anzahl Junge, von denen eines an die Brustdrüsen angelegt und überreichlich mit Milch versorgt wurde. Dabei rötete sich und schwoll jedesmal diejenige Drüse, an welcher das Junge gerade trank. Ob der Saugreiz überhaupt über nervöse (sympathische) Elemente auf die Milchdrüse wirkt, ist nicht sicher. Auf alle Fälle vermehrt das Saugen die Ergiebigkeit der Drüsentätigkeit, was für die Beurteilung der angeblich in erschreckendem Maß verbreiteten Stillunfähigkeit der Frauen von Wichtigkeit ist; denn diese als Degenerationszeichen gedeutete Erscheinung ist vielfach nur vorgetäuscht durch mangelnde Gewissenhaftigkeit und mangelnde Ausdauer von seiten der Stillenden. Wie hoch die natürliche Ernährung des Säuglings mit der Muttermilch zu veranschlagen ist, darauf wurde bereits hingewiesen (siehe S. 252). Die Unersetzlichkeit der Muttermilch folgt nicht bloß aus ihrer spezifischen Zusammensetzung; hinzukommt, daß die Milch nur beim unmittelbaren Bezug aus der Drüse dem Säugling keimfrei zugeführt wird, während die Kuhmilch der Sterilisierung bedarf, und selbst wenn diese mit aller Sorgfalt ausgeführt wird, gehen dabei wichtige Bestandteile von Vitamincharakter leicht zugrunde (siehe S. 183). Auch werden die Brustkinder von der Mutter im allgemeinen ungleich sorgsamer gepflegt als die Flaschenkinder.

Von den Ursachen der *Entwicklung der Brustdrüse* im Verlauf der Schwangerschaft wird im folgenden Kapitel (siehe S. 276 u. 278) die Rede sein.

18. Kapitel.

Die Hormondrüsen.

Die Nebennieren 255. Die Epithelkörper 261. Die Schilddrüsen 262. Die Hypophyse 268. Das Pankreas 271. Die Thymusdrüse 273. Die Milz 274. Die Keimdrüsen 275.

Wir werden in diesem Kapitel noch einmal auf den Stoffwechsel der Organe zurückkommen. Wenn wir früher gefunden haben, daß die Intensität des Stoffwechsels durch Einflüsse von seiten des Nervensystems verändert werden kann, wenn wir z. B. feststellten, daß auf einen Kältereiz, welcher die Haut trifft, durch Vermittlung des Zentralnervensystems der Tonus und damit der Stoffwechsel der Muskeln zunimmt, oder daß chemische Erregungen verschiedener Art, welche an den Schleimhäuten des Intestinaltrakts angreifen, reflektorisch mit einer gesteigerten Tätigkeit der Verdauungsdrüsen beantwortet werden, so sind diesen nervösen Einflüssen nun noch ganz andersartige Erregungen an die Seite zu stellen, nämlich *Erregungen durch chemische Substanzen, welche auf dem Blutweg an die Organe gelangen*, um deren Stoffwechsel zu beeinflussen. Wir sind allerdings auch früher schon derartigen Wirkungen begegnet; das Kohlendioxyd, das in den Muskeln bei ihrer Tätigkeit gebildet wird, erregt z. B. durch Vermittlung des Blutes das Atemzentrum und das Gefäßzentrum in der Medulla oblongata, oder Eiweiß, das aus irgend einem Organ aus irgend einem Grunde austritt und nun als blutfremdes Eiweiß in Zirkulation kommt, veranlaßt ein entferntes Organ, wie die Leber, zur Produktion von spezifischen Antikörpern. In diesem Kapitel wird es sich indessen um besondere Stoffe handeln, welche von besonderen Drüsen zu dem Zweck gebildet werden, in den Chemismus ganz bestimmter Organe einzugreifen und dadurch in ihnen eine Funktionsänderung zu veranlassen. Es ist freilich gleich vorweg zu sagen, daß wir über das physiologische Ausmaß dieser Beeinflussung noch recht wenig wissen. Wahrscheinlich weicht im allgemeinen der Typus dieser Anregungen auf dem Blutweg von dem Typus der nervösen Erregungen ab; wenn durch diese der Stoffwechsel in kürzester Zeit in einem oder dem anderen Sinn verändert werden kann, so handelt es sich bei der chemischen Erregung durch die besonderen Drüsenprodukte wohl meist — nicht immer — um Reaktionen, welche sich auf größere Zeiträume erstrecken. Sicher wissen wir heute nur, daß, wenn diese chemischen Agentien ganz fehlen, oder

wenn sie in einer von der Norm erheblich abweichenden Konzentration anwesend sind, schwere Veränderungen bemerkbar werden. Im voraus ist ferner zu sagen, um die Bedeutung dieser Agentien gleich ins rechte Licht zu rücken, daß kaum ein Organ ihrem Einfluß entzogen ist; Herz und Gefäße, Atmungsorgane, die großen Verdauungsdrüsen, das Bindegewebe und die Knochen, Muskeln und Nervensystem sind von diesen besonderen Sekreten abhängig und nicht bloß in ihrem Stoffwechsel, sondern auch in den für sie charakteristischen Funktionen.

Was nun die Drüsen anlangt, in denen die Sekrete gebildet werden, so sind sie anatomisch dadurch gekennzeichnet, daß sie entweder gar keinen Ausführungsgang haben und deshalb ihr Sekret direkt in die Blutbahn oder indirekt über die Lymphgefäße in die Blutbahn entleeren — dazu gehören vor allem die Schilddrüse, die Nebenschilddrüsen, die Hypophyse, die Nebennieren und die Thymusdrüse — oder dadurch, daß sie zwar durch einen Ausführungsgang ein Sekret auf irgendeine Schleimhautfläche entleeren, daß sie aber außerdem auch noch ein zweites Sekret ins Blut schicken — solche Drüsen sind u. a. das Pankreas und die Keimdrüsen. Wegen dieser Eigenart, ihr Produkt nicht nach „außen“, sondern nach „innen“ abzugeben, werden sie als *Drüsen mit innerer Sekretion* oder als *endokrine Drüsen*, ihr Sekret auch als *Inkret* (ROUX) bezeichnet. Mit STARLING bezeichnet man sie auch als *Hormondrüsen* und nennt die wirksamen Stoffe in den Sekreten *Hormone*, d. h. anregende Stoffe (*ὄργανον* = anregen).

Die Hormondrüsen sind lange Zeit wenig beachtet worden, weil man von ihrer Bedeutung kaum etwas wußte; heute stehen sie mit im Zentrum des Interesses und der experimentellen Studien. Die Anregung zu diesen letzteren ist vornehmlich von der Klinik ausgegangen. Seitdem im Jahre 1855 ADDISON die nach ihm benannte Krankheit auf einen zerstörenden Prozeß in den Nebennieren zurückführte, seit man den Zusammenhang zwischen der Akromegalie (siehe S. 268) und der Erkrankung der Hypophyse, zwischen der kropfigen Vergrößerung der Schilddrüse und dem Kretinismus, dem Myxödem und der BASEDOWschen Krankheit (siehe S. 263 u. 267) erkannte, seitdem wandte man sich mehr und mehr dem Tierexperiment zu, welches bald einen seiner größten Erfolge in der Entdeckung von v. MERING und MINKOWSKI erlebte, daß durch Exstirpation des Pankreas als Folge des Ausfalls eines Pankreashormons schwerer Diabetes entsteht. So mehrten sich rasch die Erfahrungen, daß neben dem nervösen Kontakt zwischen weit entfernt voneinander gelegenen Organen eine nicht minder wichtige chemische Korrelation existiert, und so erleben wir heute eine Renaissance der Humoralphysiologie und -pathologie, nach welcher die Humores, die Körperflüssigkeiten, durch ihre chemische Zusammensetzung maßgeblich sind für Gesundheit und Krankheit, und deren einstige Herrschaft noch in den Begriffen der „schlechten Säfte“, der „Leicht- und Schwerblütigkeit“, der „blutreinigenden Mittel“, des „sanguinischen Temperaments“ und dergleichen fortlebt. Im folgenden soll nun die Physiologie der einzelnen Hormondrüsen dargestellt werden.

Die *Nebennieren*, welche in bekannter Weise beim Menschen den oberen Polen der Nieren aufliegen, bilden nur den Hauptteil einer als *Nebennierensystem* bezeichneten ganzen Gruppe kleiner und kleinster Drüsen. Nämlich die beiden verschiedenen Gewebe, aus denen die eigentlichen Nebennieren aufgebaut sind, die Rindensubstanz und die Mark-

substanz, kommen jede für sich noch an anderen Orten vor, die Marksubstanz vor allem längs des Sympathikus, zum Teil in größeren Zellanhäufungen als sogenannte „Paraganglien“, die Rindensubstanz als „versprengte Nebennierenkeime“ oder „akzessorische Nebennieren“ in den Nieren, neben den Keimdrüsen und zerstreut hinter dem Peritoneum. Die Marksubstanz wird auch als „chromaffine Substanz“ bezeichnet, weil sie sich mit chromsauren Salzen gelbbraun färbt; durch diese Reaktion ist sie leicht kenntlich zu machen. In der Verbreitung der Rinden- und der Marksubstanz in Form der Paraganglien und akzessorischen Nebennieren gibt es von Tier zu Tier und ebenso beim Menschen zahllose Variationen. Allein schon dadurch wird es begreiflich, daß in der Geschichte der Physiologie der Nebennieren die Ansichten über die Folgen ihrer Exstirpation hin und her geschwankt haben. Lebensgefährlich ist die Exstirpation nur dann, wenn der größte Teil des Nebennierensystems entfernt wird. Was jede der beiden Substanzen für sich bedeutet, ist heute noch nicht genügend erkannt.

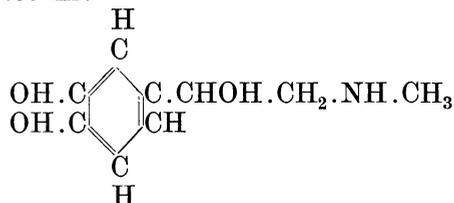
Nach *Totalexstirpation des Systems der Nebennieren* tritt der Tod binnen kurzem ein. Hunde bleiben die ersten 2—3 Tage gesund, dann verlieren sie die Lust zu fressen, die Muskeln werden schlaff, die Tiere liegen kraftlos am Boden, es entwickeln sich ausgesprochene Lähmungen, die Körpertemperatur sinkt; dann gesellen sich dazu Dyspnoe und Herzschwäche, und in dieser allgemeinen Prostration gehen die Tiere ein. In der kurzen Krankheitszeit sinkt das Körpergewicht rapide, schneller als durch den Hunger allein zu erklären wäre; auffallend ist der starke Glykogenschwund in der Leber, gepaart mit Hypoglykämie. Auch bei der mehr chronisch verlaufenden ADDISONschen Krankheit des Menschen herrscht das Symptom der Abmagerung und der Kraftlosigkeit, der „Adynamie“ vor; zugleich beobachtet man niedrigen Blutdruck, niedrige Körpertemperatur, oft Diarrhöen und als auffallendste Erscheinung eine schwarzbraunfleckige Pigmentierung der Haut. Die Anlage zu dieser „Melanodermie“ gibt es jedoch auch beim Tier, da in ausgeschnittenen Hautstücken von nebennierenexstirpierten Tieren noch postmortal im Thermostaten eine starke Pigmentbildung zustandekommt.

Fragt man nun nach der Ursache dieses meist rasch tödlichen Verlaufs, so könnte man zunächst in Erwägung ziehen, ob nicht wenigstens zum Teil die Verletzung sympathischer Nerven daran Schuld ist, da die Nebennieren in inniger Beziehung zum Sympathikus stehen, sowohl genetisch als auch dadurch, daß ihr Mark reichlich sympathische Nervenfasern und Ganglienzellen enthält. Dagegen spricht jedoch, daß man die Nebennieren allseitig von der Umgebung bis auf den Gefäßstiel loslösen und unter die Rückenhaut verlagern kann, ohne daß Störungen eintreten; entfernt man danach aber in einer zweiten kleinen Operation die dislozierten Drüsen, so entwickelt sich das typische Krankheitsbild (BIEDL). Das spricht dafür, daß es auf die Drüsensubstanz selber ankommt.

Wir werden nun sehen, daß in der Physiologie der Hormondrüsen zwei Experimente immer wieder eine Rolle spielen, wenn es gilt zu beweisen, daß es auf eine innere Sekretion ankommt, nämlich erstens das Transplantationsexperiment und zweitens das Experiment der Einverleibung eines Drüsenextrakts. Kann man zeigen, daß das als Hormondrüse angesprochene Organ von seiner Bildungsstätte fortgenommen und an eine andere Stelle im Körper verpflanzt und zur Einheilung gebracht werden kann, ohne daß die Störungen eintreten, welche

die bloße Exstirpation nach sich zieht, so ist damit erwiesen, daß von der fraglichen Drüse nicht auf dem Nervenwege, d. h. reflektorisch die Einflüsse auf den übrigen Körper übermittelt werden. Und wenn es glückt, die Folgen der Drüsenexstirpation dadurch hintanzuhalten, daß man entweder Extrakte der Drüse injiziert oder — noch einfacher — die Drüsensubstanz verfüttert — eine Maßnahme, die als „Organtherapie“ bezeichnet wird —, so ist dargetan, daß in dem Nachweis spezifischer chemischer Bestandteile in den Hormondrüsen der Schlüssel zum Verständnis ihrer Funktion gelegen ist. Beide Experimente glücken nun nicht im Fall der Nebennieren. Für die Transplantation sind die Nebennieren zu empfindlich, sie gehen zugrunde, ehe sie genügend eingeeilt, d. h. vaskularisiert worden sind, und auch die Verfütterung ist unwirksam, offenbar weil die Nebennierenhormone zu leicht zerstört werden. Allenfalls kann eine Extraktinjektion für kurze Zeit die Folgen der Nebennierenexstirpation mildern.

Um so sicherer gestellt ist die Annahme, daß die Nebennieren durch innere Sekretion wirken, durch die Reindarstellung eines spezifischen Hormons, des *Adrenalins* oder *Suprarenins*. Nachdem OLIVER und SCHAEFER im Jahre 1894 gefunden hatten, daß ein Extrakt aus der Marksubstanz der Nebennieren beliebiger Tiere den Blutdruck in außerordentlichem Maße zu steigern vermag, wurde von TAKAMINE der wirksame Stoff isoliert. Unter seinen Reaktionen ist die bekannteste eine smaragdgrüne Färbung mit Eisenchlorid. Die chemische Konstitution wurde dann von PAULY und FRIEDMANN ermittelt; Adrenalin ist l-Methylamino-äthanolbrenzkatechin:



Diese Feststellung der Konstitution hat prinzipiell eine um so größere Bedeutung, als das Adrenalin bisher das einzige Hormon ist, dessen chemische Konstitution vollständig aufgeklärt ist; es kann darum auch auf künstlichem Wege hergestellt werden.

Wir wollen nun ausführlich die *Wirkungen des Adrenalins* erörtern, um danach zu prüfen, inwieweit die Krankheitssymptome nach der Nebennierenexstirpation als Adrenalin-Ausfallserscheinungen gedeutet werden können. Die mannigfaltigen Einflüsse lassen sich einheitlich zusammenfassen in den Satz: *das Adrenalin ist ein Reizmittel für den Sympathikus*. Damit ist zugleich gesagt, daß der Wirkungsbereich des Adrenalins der ganze Körper ist; denn alle unserer Willkür nicht unterstellten, alle sogenannten autonomen Organe werden unter anderem vom Sympathikus dirigiert (siehe Kapitel 26).

Beginnen wir mit den glatten Muskeln! Am bekanntesten ist die Reaktion der Gefäßmuskulatur, welche enorm empfindlich ist. Beim Frosch lassen sich schon 0,00000125 mg Adrenalin durch die Verlangsamung des Blutaustritts aus einem angeschnittenen Gefäß nachweisen (LAEWEN, P. TRENDELENBURG). Beim Säugetier wird durch Zunahme des Gefäßtonus der Blutdruck schon durch 0,0005 mg pro kg um 15—25 mm Quecksilber gehoben. Besonders stark sprechen die Gefäße

im Splanchnikusgebiet an, weniger in Hirn, Herz und Lungen. Daher ist das Adrenalin ein wirksames Mittel bei einem Kollaps durch Herzschwäche oder durch Hirnanämie; denn das Blut wird dadurch aus dem großen Eingeweidegebiet mehr in die bedrohten Bezirke verschoben. Das Adrenalin wirkt aber keineswegs bloß tonussteigernd, auch die Vasodilatoren werden erregt; da aber für gewöhnlich der erstere Einfluß überwiegt (s. S. 148), so ist Gefäßverengung der meist beobachtete Effekt. Von praktischer Bedeutung ist der gegenteilige Effekt aber z. B. beim Herzen, dessen Koronargefäße nur vasodilatatorisch versorgt werden, so daß man mit Adrenalin den Koronarkreislauf zu verbessern vermag. Das Adrenalin wirkt teils indirekt über das Zentralnervensystem (siehe S. 227), teils durch direkten Angriff auf die Gefäßwand. Letzteres wird dadurch erwiesen, daß auch ausgeschnittene Gefäßstücke sich noch unter Adrenalineinfluß kontrahieren (siehe S. 149). Diese lokale Reaktion macht man sich häufig bei kleinen chirurgischen Eingriffen zunutze. Z. B. injiziert man vor einer Zahnextraktion Adrenalin mit etwas Novokain, erstens um die Blutung zu stillen, und zweitens um die Resorption des Novokains zu verlangsamen und damit dessen anästhesierende Wirkung in die Länge zu ziehen. Dazu trägt auch die Kontraktion der Lymphgefäße mit bei.

Die Blutdrucksteigerung nach Adrenalininjektion ist zum Teil auch Herzwirkung. Nämlich infolge der Reizung des Herzsymphathikus wird sowohl der Schlag verstärkt als auch die Frequenz erhöht, besonders deutlich, wenn vorher die Vagi durchschnitten wurden.

Im Intestinaltrakt macht sich die Adrenalinwirkung auf die glatte Muskulatur in verschiedener Weise geltend, da der Sympathikus teils hemmende teils fördernde Fasern enthält. Der Tonus der Kardia und die Peristaltik von Magen und Darm wird durch das Adrenalin vermindert, der Schluß des Pylorus und der Ileozökalklappe wird dagegen verstärkt, unter Umständen also eine spastische Kontraktur des Darms gelöst.

Die Bronchialmuskulatur wird durch Sympathikusreizung zur Erschlaffung gebracht; dem entspricht die Wirkung des Adrenalins. Man benutzt es daher auch mit Vorteil, um einen asthmatischen Krampf der Bronchen zu kupieren (s. S. 118).

Auch der Blasantonus (siehe S. 244) wird durch Adrenalin verringert, die Uteruskontraktionen dagegen, insbesondere bei Gravidität, angeregt, so daß man eine Zeitlang Adrenalin zur Verstärkung der Wehentätigkeit empfahl. Ferner werden die *M. arrectores pilorum* durch Adrenalin zur Kontraktion gebracht; in auffallendem Maß macht sich dies bei manchen Tieren im Sträuben der langen Rückenborsten bemerkbar.

Am Auge bewirkt das Adrenalin vor allem Mydriasis, d. h. Erweiterung der Pupille infolge der Erregung des *M. dilatator iridis*; am ausgeschnittenen Froschauge kann man auf die Weise Adrenalin noch in einer Konzentration von 1:20 Millionen nachweisen. Zu der Wirkung auf die Iris kommt eine Lidspaltenerweiterung durch Reizung des HORNERschen Muskels (*M. palpebralis tertius* s. *tarsalis sup.*) und eine Vorwölbung des Auges (*Protrusio bulbi*) durch Reizung des *M. orbitalis* hinzu.

Sympathisch innerviert sind außer den glatten Muskeln auch die Drüsen. Daher verursacht Adrenalin eine vorübergehende Steigerung der Tränen-, der Speichel- und der Magensaftsekretion.

Von besonderer Bedeutung ist die Wirkung des Adrenalins auf den Stoffwechsel. Injiziert man 0,01—1 mg Adrenalin subkutan oder in die Blutbahn, so erscheint für einige Stunden Zucker im Harn (BLUM). Diese *Adrenalinglykosurie* beruht darauf, daß das Glykogen der Leber mobilisiert und als Zucker ins Blut ausgeschüttet wird; die Glykämie ist darum im allgemeinen um so stärker, je glykogenreicher die Leber ist. Eine Adrenalininjektion ist also ein Modus, auf künstliche Weise vorübergehend Diabetes zu erzeugen. Weit länger bekannt ist ein anderer Modus: CLAUDE BERNARD entdeckte schon 1854, daß, wenn man an bestimmter Stelle (siehe Kapitel 23) in die Medulla oblongata einsticht, eine vorübergehende starke Glykosurie eintritt; man bezeichnet die Verletzung als *Zuckerstich* oder als *Piquüre*. Wahrscheinlich ist die unmittelbare Ursache für den Diabetes bei beiden Methoden dieselbe. CLAUDE BERNARD stellte nämlich schon fest, daß der Zuckerstich ohne Erfolg ist, wenn vorher die Nervi splanchnici durchschnitten wurden; denselben Effekt hat es, wenn man die Sympathikusendigungen mit Ergotoxin lähmt (POLLAK). Man kann danach den *Zuckerstich als eine Reizung des Sympathikus innerhalb des Rückenmarks* auffassen. Nachdem dann die Adrenalinglykosurie entdeckt war, wurde bei den intimen Beziehungen des Sympathikus zu den Nebennieren mit Recht vermutet, daß *der Splanchnikus der sekretorische Nerv für die Nebennieren* ist, dessen Erregung durch den Stich Adrenalin ins Blut treibt, welches dann weiter auf die Leber wirkt. In der Tat ist auch nachgewiesen worden, daß, wenn man den Splanchnikus elektrisch reizt, Adrenalin ins Blut übertritt. ASHER und ELLIOT zeigten das folgendermaßen: da die Reizung des Splanchnikus den Blutdruck in erster Linie dadurch steigert, daß sie die Gefäße in den Bauchorganen verengt (s. S. 149 u. 152), so wurden zunächst alle Bauchorgane exstirpiert mit alleiniger Ausnahme der Nebennieren und dann erst der Splanchnikus, welcher einen feinen Faden an die Nebennieren entsendet, gereizt; da auch jetzt noch der Blutdruck anstieg, so mußte ein Übertritt von Adrenalin aus den Nebennieren die Ursache sein. Ferner ist durch KAHN gezeigt, daß nach dem Zuckerstich die Menge der chromaffinen Substanz im Mark der Nebennieren abnimmt, daß dieser Schwund jedoch ausbleibt, wenn vorher die Splanchnici durchschnitten wurden, und endlich ist festgestellt, daß, wenn Kaninchen die Exstirpation der Nebennieren eine Zeitlang überleben, der Zuckerstich trotz reichlichen Glykogenbestands in ihrer Leber keine Glykosurie auslöst (KAHN). Also muß man schließen, daß *der Zuckerstich über die Nebennieren wirkt*.

Der Kohlehydratstoffwechsel ist aber — wie vorausgreifend schon hier bemerkt werden mag — noch von anderen Inkreten beherrscht. Das allerbekannteste und auch das stärkste Mittel, einen Diabetes zu erzeugen, ist nach VON MERING und MINKOWSKI die *Pankreasekstirpation*. In diesem Fall ist es nun der Wegfall eines Hormons, durch den die Glykosurie zustande kommt, wie es im Fall der Nebennieren die Zufuhr des Hormons, des Adrenalins ist, welche die Glykosurie auslöst. *Nebenniere und Pankreas stehen also zueinander im Verhältnis von Antagonisten* (s. dazu S. 228); aus dem Gleichmaß ihrer Funktion resultiert der normale Kohlehydratstoffwechsel, wahrscheinlich dadurch, daß ein Pankreashormon den Sympathikus hemmt, wie Adrenalin ihn reizt. Darauf deutet u. a. folgende Beobachtung von O. LOEWI hin: bringt man einem Tier ein wenig Adrenalin in den Konjunktivalsack, so tritt im allgemeinen

die beschriebene Mydriasis nicht ein, weil das Adrenalin zu langsam resorbiert wird, als daß die jeweils im Auge vorhandenen Spuren die Sympathikusendigungen im M. dilatator iridis genügend erregten, ist aber das Pankreas vorher exstirpiert, so ist durch den Wegfall seines Hormons die Empfindlichkeit des Sympathikus so gesteigert, daß die Adrenalinmydriasis nun doch zustande kommt. So kann man also eventuell einen Diabetes durch die Pupillenreaktion diagnostizieren.

Überblicken wir noch einmal die ganze Summe der Adrenalinwirkungen, so erhellt ohne weiteres, welche große Bedeutung der Tätigkeit der Nebennieren zuzusprechen ist; ist es doch der größte Teil der Organe, welcher ihnen unterstellt ist, und deren normale Erregbarkeit von einem normalen Ausmaß ihrer Tätigkeit abhängt. In dieser Hinsicht gewinnt die anfangs erwähnte anatomische Tatsache erneut für uns an Interesse, daß die chromaffine Substanz, die das Adrenalin bildet, den Sympathikus mehr oder weniger begleitet. Aber trotz dieser Vielfältigkeit der Wirkungen ist nicht anzunehmen, daß sich die Funktion der Nebennieren in der Bildung des einen Hormons erschöpft. Rekapitulieren wir z. B. noch einmal die Symptome der ADDISONschen Krankheit des Menschen, so verstehen wir nun zwar, daß ein niedriger Blutdruck gefunden wird, daß — wohl infolge der Beschleunigung der Peristaltik und des Klaffens des Ileozökalsphinkters — Diarrhöen eintreten, daß infolge der Störung im Gefäßtonus die Körpertemperatur sinkt, aber die Melanodermie ist nicht erklärt, und ob die schwere Adynamie auf ein Sinken des vom Sympathikus abhängigen Muskeltonus (siehe Kapitel 20) zu beziehen ist, ist unsicher. Auch kann man die ADDISONsche Krankheit nicht durch dauernde Zufuhr von Adrenalin heilen. Ferner wissen wir noch nichts von der Funktion der Rindenschicht der Nebennieren; nach manchen Angaben ist gerade deren Ausfall ganz besonders gefährlich (BIEDL).

Wenden wir uns nun zur Physiologie der **Schilddrüse** und der **Nebenschilddrüsen** oder **Epithelkörper!** Auch hier ist das experimentelle Studium, vor allem die planmäßige Ausführung von Totalexstirpationen durch die Klinik angeregt worden. Die Schweizer Chirurgen REVERDIN und KOCHER teilten nämlich 1882 die Beobachtung mit, daß sich nach der Wegnahme von zu *Kropf* vergrößerten Schilddrüsen ein Symptomenbild einstellt, welches an eine besonders in England beobachtete, mit einer Schrumpfung der Schilddrüse einhergehende Krankheit, das *Myxödem*, erinnert. Dieses äußert sich in einer Anschwellung der Haut infolge einer schleimigen Verquellung im Unterhautbindegewebe, wobei gleichzeitig die Epidermis durch besondere Trockenheit ausgezeichnet ist, so daß sie rissig und runzelig wird; auch an anderen Epithelgebilden zeigen sich Störungen, die Haare fallen aus, die Nägel und Zähne werden defekt. Dazu kommt eine allgemeine Schwerfälligkeit, welche sich ebenso sehr in den körperlichen wie in den psychischen Handlungen ausdrückt. Befällt die Krankheit Kinder, so tritt als auffallendste Erscheinung eine starke Verzögerung des Wachstums hinzu. Noch an eine andere ihnen besonders naheliegende Erkrankung wurden die Schweizer Chirurgen durch ihre Beobachtungen an Kropfexstirpierten erinnert, nämlich an den im Gebirge vielfach endemischen *Kretinismus*, welcher sich ebenfalls in Zwergwuchs, Trockenheit der Haut und geistiger Stumpfheit äußert und in den meisten Fällen vom Auftreten eines Kropfes, einer *Struma*, einer zwar vergrößerten, aber degenerierten Schilddrüse begleitet ist. Gerade so werden nun auch die Patienten nach der Kropfexstirpation,

gewöhnlich im Verlauf einiger Monate, von geistiger und körperlicher Müdigkeit, von Frieren, von Verdickungen der Haut, besonders im Gesicht befallen, so daß der Ausdruck etwas Starres bekommt, und unter starker Abmagerung pflegen die Patienten langsam zugrunde zu gehen. Dieser Zustand ist als *postoperatives Myxödem* oder als *Kachexia strumipriva* bezeichnet worden. Jedoch wurden öfter auch stürmischere Operationsfolgen beobachtet, nämlich schwere *tetanische Krämpfe*, unter denen die Patienten infolge von Herzschwäche oder Versagen der Atemmuskeln sterben.

Alle diese Erscheinungen sind auch im Tierexperiment wiedergefunden worden. Dabei ergab sich aber alsbald ein merkwürdiges Faktum; während nämlich Fleischfresser, wie Hund, Katze und Fuchs, gewöhnlich unter den akuten Erscheinungen der „*Tetanie*“ erkranken, entwickelt sich bei Pflanzenfressern, wie Kaninchen, Schaf, Ziege, das Bild der Kachexie. Das hat jedoch, wie GLEY zeigte, nichts mit der Ernährungsweise zu tun, sondern hängt damit zusammen, daß im ersten Fall die Nebenschilddrüsen in nächster Nachbarschaft, zum Teil sogar im Innern der Schilddrüsen liegen, so daß sie bei der Exstirpation der letzteren mit beseitigt oder leicht verletzt werden, während sie im zweiten Fall weiter entfernt irgendwo, in ziemlich wechselnder Lage am Hals zu finden sind. So wurde durch die Laboratoriumserfahrungen die Aufmerksamkeit auf die unscheinbaren „Epithelkörper“ gelenkt, um die man sich bis dahin kaum gekümmert hatte. Die Tetanie ist danach als eine Krankheit für sich anzusprechen, sie wird passend als *Tetania parathyreopriva* (ERDHEIM) bezeichnet. Beim Menschen liegen zwei der Nebenschilddrüsen gewöhnlich der Kapsel der Schilddrüse von außen an und werden daher bei der Kropfexstirpation gewöhnlich geschont. Nur wenn sie zufällig mit verletzt werden, treten mehr oder weniger deutliche Tetaniesymptome auf.

Inwiefern ist nun zu zeigen, daß diese beiden verschiedenen Drüsenarten Hormondrüsen sind? Zwei Experimente wurden S. 256 als Hauptbeweise für das Vorhandensein einer inneren Sekretion angeführt, die Transplantation und die Verfütterung.

Prüfen wir mit diesen Experimenten zunächst die *Funktionsweise der Epithelkörper*. Auch hier lassen sich, wie im ähnlichen Fall bei den Nebennieren, die Ausfallserscheinungen nicht durch Verfütterung oder durch Injektion eines Extrakts von Nebenschilddrüsen bekämpfen. Hingegen ist die Transplantation öfter mit Erfolg ausgeführt. So hat v. EISELSBERG folgenden Fall beschrieben: eine Patientin erkrankte nach einer Kropfoperation an schwerer Tetanie. Alle Versuche, dieselbe durch Verabreichung von Tabletten aus getrockneten Epithelkörpern oder durch Narkotika zu bekämpfen, schlugen fehl. Nach einem Jahr wurde der Patientin eine Nebenschilddrüse implantiert, welche der frischen Leiche eines 3 Tage alten Kindes entnommen war, einige Zeit später wurde noch eine zweite Drüse aus einem verunglückten Arbeiter verpflanzt; danach verschwand die Tetanie andauernd fast vollständig.

Die *Tetania parathyreopriva* erinnert in ihrer leichten Form an Erscheinungen von Tetanie, wie sie beim Menschen seit langem beobachtet werden. So gibt es eine *Maternitätstetanie*, welche bei der Menstruation, in der Gravidität oder während der Laktation auftritt, eine *Kindertetanie* oder *Spasmophilie*, welche besonders durch Glottiskrampf, durch Krämpfe der Respirationsmuskeln, durch Kontrakturen in den Unterarmen („Ge-

burtshelferstellung der Hände“) (Abb. 72), durch mechanische und galvanische Übererregbarkeit der peripheren Nerven, durch Übererregbarkeit des Zentralnervensystems (z. B. Vorkommen sog. subjektiver optischer Anschauungsbilder, d. h. die Fähigkeit, optische Eindrücke nachträglich in voller natürlicher Leibhaftigkeit wieder zu erleben) eventuell durch gewisse Psychosen ausgezeichnet ist.

Charakteristisch ist ferner ein starker Kalkverlust aus Skelett und Zähnen; letzterer macht sich besonders deutlich in Zahnschmelzdefekten bemerkbar (ERDHEIM). In allen diesen Fällen hat man des öfteren Blutungen oder Zeichen von Degeneration in den Epithelkörpern gefunden.



Abb. 72. Geburtshelferstellung der Hände bei Tetanie (nach FALTA).

Die Haupterscheinung der Tetanie, die Neigung zu Krämpfen, ist wahrscheinlich auf zwei Momente zurückzuführen, erstens auf den Kalkverlust und zweitens auf das Kreisen eines Krampfgiftes. Auch im Experiment kann man nämlich durch bloße Entfernung von Kalk die Erregbarkeit steigern, wie Muskeln z. B. in reiner kalkfreier Kochsalzlösung in fibrilläre Zuckungen verfallen. Auch wird der Schlag des Froschherzens durch Serum von parathyreopriven Katzen gerade so verändert, wie durch ein an Kalk verarmtes Serum (P. TRENDELENBURG). Das Kalkdefizit im Serum ist aber auch direkt nachzuweisen. Dem entsprechend läßt sich die Tetanie mehr oder weniger durch Kalkmedikation bekämpfen (MAC CALLUM und VÖGTLIN), wobei u. a. auch die subjektiven Anschauungsbilder sich verlieren (JAENSCH). Als zweites Moment für die tetanischen Erscheinungen scheint aber nach englischen Autoren noch hinzuzukommen, daß im Blut eine Anreicherung von Guanidin und Dimethylguanidin erfolgt, welche beide Krämpfe erzeugen; die Aufgabe der Epithelkörper bestände danach — abgesehen von ihrer Regulierung des Kalkstoffwechsels — weniger in der Abscheidung eines Hormons als in der Neutralisierung dieser

Gifte, die wohl dem Kreatinstoffwechsel entstammen. Dimethylguanidin kann ja durch einfache Dekarboxylierung aus Kreatin gebildet werden:



Auch die **Schilddrüse** läßt sich als Hormondrüse charakterisieren. Bevor wir aber darauf eingehen, müssen wir erst noch das vorher schon gezeichnete Bild des Schilddrüsenmangels, das Bild der *Athyreosis*, vervollständigen.

Macht man junge Tiere operativ athyreotisch, so ist die auffallendste Folge die Wachstumsstörung. Besonders die langen Röhrenknochen werden befallen, indem die enchondrale Ossifikation an den Epiphysen gestört wird. Dadurch erhalten die Knochen eine kurze gedrungene Form mit verdickten Epiphysen, die Gestalt wird zwergenhaft klein (siehe Abb. 73). Von dem abnormen Wachstum der Epithelgebilde war schon früher die Rede. Dadurch entstehen verkümmerte Hörner und Klauen; in der Abbildung der athyreotischen Ziege manifestiert sich die Störung in dem struppigen Fell. Zum Teil beruht die Gedrungenheit der Form auch auf dem Vorhandensein von Meteorismus, d. h. auf einer Blähung der Eingeweide. Der Stoffwechsel ist hochgradig herabgesetzt, die Stickstoffausscheidung sowie der respiratorische Gaswechsel sind vermindert; infolgedessen ist auch die Körpertemperatur unternormal. Aus dem gleichen Grunde ist die Assimilationsgrenze für Zucker (siehe S. 177) erhöht, und es kommt leicht zu Fettansatz; Regenerationen, wie z. B. die Blutkörperchenneubildung nach einem Blutverlust, die Kallusbildung nach einem Knochenbruch, die Granulation von Wunden oder das regenerative Auswachsen von Achsenzylindern aus dem zentralen Stumpf eines durchschnittenen Nerven verlaufen stark verzögert. Die Genitalien entwickeln sich mangelhaft, so daß die Geschlechtsreife spät oder gar nicht eintritt. Im geistigen Wesen äußert sich die Athyreosis durch Intelligenzmangel und durch Apathie. Die Hypophyse vergrößert sich, ebenso, wenigstens häufig, die Thymusdrüse.

Die Athyreosis des erwachsenen Organismus, die Kachexia strumipriva, bietet alle dieselben Symptome dar; allein die Wachstumsstörung fehlt natürlicherweise.

Etwas abweichend verhält sich der durch die Degeneration der Schilddrüse erzeugte *endemische Kretinismus*. Zwar prägen auch hier Zwergwuchs, Idiotie und die trockene pergamentene runzelige Haut das Bild der Athyreosis. Aber charakteristisch ist die frühzeitige Ossifikation, welche dadurch, daß sie auch die Schädelbasis ergreift, die eigentümliche tiefliegende Nasenwurzel und die Prominenz der Stirn erzeugt (siehe Abb. 74). Ferner ist die lange Lebensdauer der Kretins auffallend; denn die Kachexia strumipriva führt im allgemeinen nach längstens 7 Jahren zum Tod. Die Lidspalte ist klein, die Pupille eng; dies zusammen mit der Schädelkonfiguration gibt den Kretins die merkwürdig verschmitzte Physiognomie.



Abb. 73. Zwei Ziegen aus dem gleichen Wurf, die rechte vor 4 Monaten am 21. Lebensstage thyroidektomiert, die linke normal (nach v. EISELSBERG) (aus BIEDL, Innere Sekretion).

Mit besonderem Eifer hat man der *äußeren Ursache des Kretinismus* nachgeforscht; das ist auch nur allzu begreiflich, da viele Tausende von Gebirgsbewohnern von der Krankheit befallen werden. Doch alle Bemühungen um eine Aufklärung sind bisher vergeblich gewesen. Seit man den eigentümlichen Jodgehalt der Schilddrüse erkannt hat, auf welchen wir nachher zu sprechen kommen, hat man

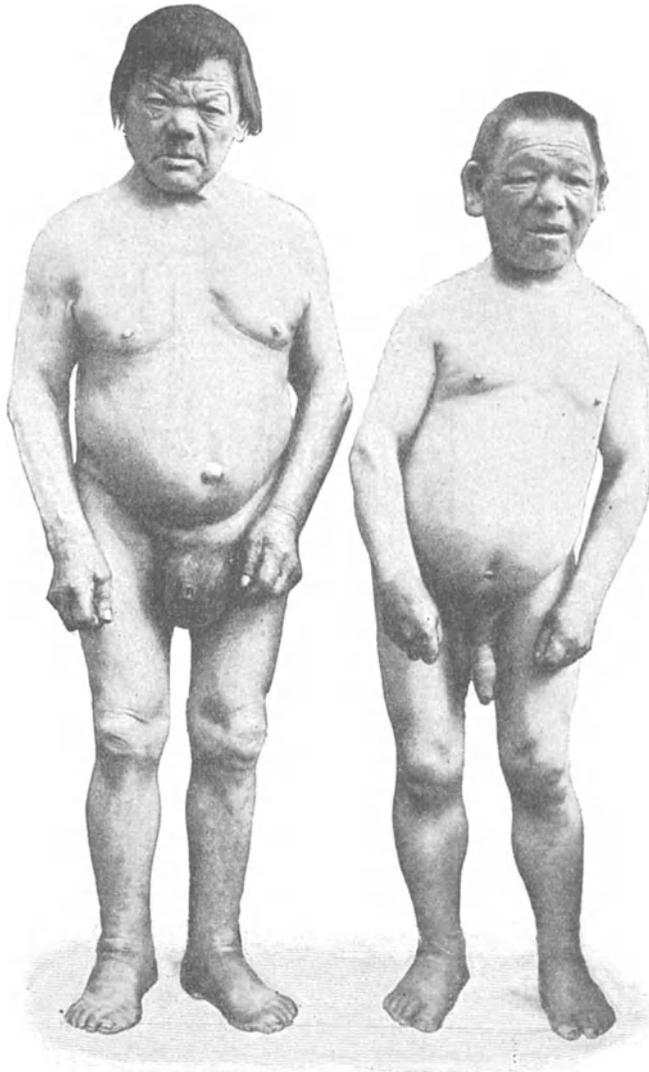


Abb. 74. Zwei Kretins. Körperlänge 140 und 130 cm (aus WEYGANDT, Psychiatrie).

einem Mangel an Jod in den Gebirgsgewässern die Schuld gegeben. Aber weder ist ein solcher nachgewiesen, noch besteht eine deutliche gesetzmäßige Beziehung zwischen dem Jodgehalt der Schilddrüse bzw. der Struma und ihrer funktionellen Wertigkeit. Indessen auch unabhängig von dieser speziellen Hypothese von der Bedeutung des Jods hat man den Kretinismus mit einer irgendwie besonderen Beschaffenheit des Trinkwassers in Beziehung gebracht. Vor allem BIRCHER glaubte festgestellt zu haben, daß der Kretinismus nur auf bestimmten geologischen Gebirgsformationen vorkommt, und daß dadurch z. B. auch die merkwürdigen Fälle erklärt

würden, daß in einer Gemeinde, welche sich aus einer Quelle mit „Kropfwasser“ versorgt, die meisten Bewohner eine vergrößerte Schilddrüse haben, während in einer nahe benachbarten Gemeinde, die ihr Trinkwasser aus einer anderen Gesteinsformation herleitet, Kretinismus nicht vorkommt. Aber auch diese Theorie hat einer schärferen Kritik nicht Stand gehalten (LANDSTEINER, HIRSCHFELD und KLINGER). Gegenwärtig neigt man eher dazu, ein Miasma als Ursache zugrunde zu legen.

Wenden wir uns nun zur Charakterisierung der *Schilddrüse als einer Hormondrüse!* Das Transplantationsexperiment hat hier den stringenten Beweis der inkretorischen Funktion geliefert (SCHIFF). Es ist oft bei Mensch und Tier gelungen, die Kachexia strumipriva durch Einpflanzen von Schilddrüsenewebe unter die Haut, in die Milz, ins Peritoneum oder in Röhrenknochen hinein mehr oder weniger zu bekämpfen.



Abb. 75. Myxödematöse Frau vor der Abb. 76. Dieselbe Frau 7 Monate
Behandlung später
(nach J. A. ANDERSSON) (aus TIGERSTEDT, Lehrbuch der Physiologie).

PAYER beschrieb kürzlich folgenden Fall: einem achtjährigen athyreotischen Kinde, das total verblödet war, obwohl es seit Jahren Schilddrüsen-tabletten bekam, wurde ein Teil der Schilddrüse seiner Mutter in die Milz implantiert. Während es bis dahin im Verlauf von drei Jahren nur 6 cm gewachsen war, wuchs es nach der Operation in einem halben Jahr 12 cm, in einem Jahr 18 cm. Haut, Haare, Nägel bekamen ein normaleres Aussehen. Das Kind fing an zu sprechen und zu spielen. Nach zweieinhalb Jahren erfolgte dann aber ein Rückfall, weil die eingepflanzte Drüse degenerierte.

Ein vortrefflicher Hormonbeweis ist ferner folgende klinische Beobachtung von v. EISELSBERG: auch die zur Geschwulst gewucherten Drüsenzellen eines Schilddrüsenkarzinoms produzieren noch Hormon; daher kam es nach Entfernung eines karzinomatösen Kropfes zu Kachexia strumipriva; nachträglich entwickelte sich dann aber aus metastasierten Zellen der Geschwulst im Knochen ein neuer Krebsknoten, unter dessen Wachstum die Symptome der Kachexie schwanden, um von neuem aufzutreten, als auch dieser Knoten operativ entfernt wurde.

Auch die „Organotherapie“, d. h. die Ernährung mit der Hormondrüsen-substanz, hat sich in zahlreichen Fällen von Athyreosis oder Hypo-

thyreoidismus als wirksam und für den Menschen ungemein segensreich erwiesen, so daß sie z. B. in den österreichischen Alpenländern zur Bekämpfung des Kretinismus von Staats wegen eingeführt worden ist. Am sichersten gelingt die Besserung (d. h. Hebung) des Stoffwechsels; der respiratorische Gaswechsel steigt bis um 80%, die Stickstoff- und Wasser-ausscheidung nimmt zu, dadurch sinkt das Körpergewicht und die teigige Schwellung der Haut wird geringer (KOCHER, FALTA und EPPINGER). Aber auch die übrigen Erscheinungen von Insuffizienz können zurückgehen, wie ein Blick auf die Abb. 75 und 76 lehrt. In sehr sinnfälliger Weise äußert sich die Anregung des Stoffwechsels im Erwecken des Winterschläfers durch Injektion von Schilddrüsenextrakt; das von ADLER am Igel angestellte Experiment wurde S. 228 geschildert.

In überaus deutlicher Weise dokumentiert sich der Einfluß des Schilddrüseninkrets auf Stoffwechsel und Wachstum auch, wenn man

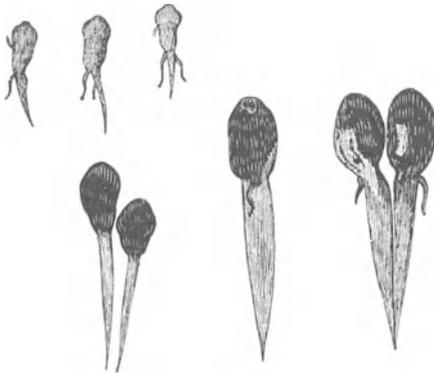


Abb. 77. Froschlarven aus dem gleichen Laich. Links oben drei Larven nach einwöchentlicher Fütterung mit Schilddrüse; rechts unten drei Larven nach ebenso langer Fütterung mit Thymus. Links unten zwei Kontrolltiere (nach GUDERNATSCH).

es an Kaulquappen verfüttert. GUDERNATSCH ernährte diese mit Stückchen der verschiedensten Organe und bekam sehr deutliche Effekte vor allem mit Thymus und mit Schilddrüse. Während die Thymustiere lange Zeit wuchsen, ohne zu metamorphosieren, trat bei den Schilddrüsentieren die Metamorphose sehr verfrüht ein. Auf die Weise entsprachen dem gleichen Entwicklungsstadium bei Thymusfütterung Riesenlarven, bei Schilddrüsenfütterung Zwergtiere (siehe Abb. 77). Offenbar beruht dies darauf, daß die Schilddrüsen-substanz den Stoffwechsel und damit auch die Entwicklung mächtig beschleunigt; so kommt es, daß am Ende der Metamorphose die Menge

an organischer Substanz im Körper bis auf ein Drittel der ursprünglich vorhandenen Menge reduziert sein kann (ROMEIS). Umgekehrt wird die Metamorphose, ähnlich wie durch Thymusfütterung, bei Schilddrüsenatrophie um Monate verzögert (ADLER).

Die chemischen Studien an der Schilddrüse haben einigen Aufschluß auch über die *Hormone* gebracht. BAUMANN entdeckte, daß die Schilddrüse Jod in organischer Bindung enthält, und isolierte durch Kochen mit Schwefelsäure einen bis zu 9% Jod enthaltenden Körper, das *Jodothyrin*, welches wenigstens in einer Beziehung der Schilddrüsen-substanz bei ihrer Verfütterung ähnelt, nämlich in der Steigerung des Stoffwechsels. OSWALD zeigte, daß der genuine jodhaltige Körper ein Globulin ist, welches in dem bekannten „Kolloid“ der Schilddrüsen-follikel enthalten ist, das *Jodthyreoglobulin*. Auch dies hebt bei Verfütterung den Stoffwechsel, außerdem verstärkt es die Wirkung des Adrenalins auf den Gefäßtonus und auf den Blutdruck, ohne jedoch selber blutdrucksteigernd zu wirken (ASHER), es steigert die Erregbarkeit des Vagus und des N. depressor, regt die automatischen Bewegungen des Darms und der Blase an, kurz begünstigt die Wirkungen derjenigen

Nerven, welche die der Willkür nicht unterstellten Organe versorgen, des Sympathikus und seiner Antagonisten (ASHER). Das Jodthyreoglobulin ist aber wahrscheinlich nur eine Verbindung von Eiweiß mit dem eigentlichen aktiven Körper. Das kann man schon deshalb vermuten, weil bei der Verfütterung das Globulin im Verdauungskanal abgebaut wird. In der Tat haben ABDERHALDEN, KAHN und ROMEIS gefunden, daß auch die Produkte einer tiefgehenden Aufspaltung der Schilddrüsensubstanz durch die Verdauungsenzyme sowie eiweißfreie kochbeständige Dialysate von Schilddrüsentabletten noch die von GUDERNATSCH beobachtete Entwicklungsbeschleunigung an Kaulquappen erzeugen. Schließlich ist neuerdings KENDALL und OSTERBERG die Isolierung der aktiven Jodverbindung, des „*Thyroxins*“, aus 3000 kg Schilddrüse und ihre Synthese gelungen; es ist eine dreifach jodierte Indolpropionsäure, also offenbar verwandt mit dem Tryptophan (s. S. 58). Ähnliche Wirkungen entfalten nach ABELIN Tyramin (S. 59), Dijodtyramin und Dijodtyrosin.

Wie die Tetania parathyreopriva, so hat man auch öfter die *strumipriva Kachexie als Intoxikation* durch kreisende Stoffwechselprodukte aufgefaßt, welche normalerweise von der Schilddrüse abgefangen und unschädlich gemacht werden. Schon durch den Nachweis, daß die Schilddrüsensubstanz bei intravenöser Zufuhr ihre Wirkungen entfaltet, wird diese Annahme aber unwahrscheinlich. Dazu kommt noch, daß die Anwesenheit der Hormone im Blut der Schilddrüsenvene durch die eben angeführte Reaktion der Adrenalinverstärkung nachzuweisen ist (EIGER); ferner zeigte ASHER, daß während der Reizung der auch die Schilddrüse versorgenden Kehlkopfnerve die Erregbarkeit des Vagus und des Sympathikus steigt. Daraus kann man beiläufig vielleicht folgern, daß es richtige *sekretorische Nerven der Schilddrüsen* gibt, welche das Sekret nur nicht wie sonst in einen Ausführungsgang, sondern ins Blut hineintreiben.

Verfüttert man an ein normales Tier große Dosen von Schilddrüsensubstanz, so treten Erscheinungen auf, welche man auch beim Menschen als Krankheitssymptom kennt, und welche man als Ausdruck eines *Hyperthyreoidismus* auffassen kann, da sie Punkt für Punkt das Gegenstück zur Athyreosis bilden: der Stoffwechsel ist dabei gesteigert, infolgedessen kommt es zu Abmagerung, die Assimilationsgrenze für Kohlehydrate ist herabgesetzt, die Knochen sind lang und schlank; beim hyperthyreotischen Menschen ist die Haut feucht, jugendlich durchblutet und zart, seine geistigen Funktionen sind rege, er hat oft lebhaft subjektive Anschauungsbilder (s. S. 262) und leidet unter Angst- und Aufregungszuständen, die Pupillen sind weit, die Lidspalten vergrößert, die Augen vorgewölbt (Exophthalmus) (s. Abb. 78). Alle diese Symptome findet man beim Menschen in der sogenannten *BASEDOWschen Krankheit*, welche demgemäß als die Folge einer Überfunktion der Schilddrüse aufzufassen ist. Diese ist dabei, ähnlich wie beim Kretinismus, vergrößert. Aber die Vergrößerung geht nicht mit einer Degeneration, sondern im Gegenteil mit einer Hypertrophie des Drüsengewebes Hand in Hand. Infolgedessen läßt sich oft die BASEDOWsche Krankheit durch operative Verkleinerung der Schilddrüse heilen. Bemerkenswert ist, wie manche Symptome des Hyperthyreoidismus an die Wirkungen des Adrenalins erinnern; auch das Adrenalin erniedrigt die Assimilationsgrenze für Zucker, es erweitert die Pupillen und erzeugt „Glotzaugen“; auch die Herzkazeleration, welche Adrenalin hervorruft, gehört zu den Hauptsymptomen der BASEDOWschen Krankheit. So regt also offenbar auch das Schilddrüsensekret den Sympathikus an, wie das Adrenalin; *die Schilddrüse wirkt als Synergist der Nebennieren* (FALTA und EPPINGER).

Noch eine Hormondrüse ist funktionell mit der Schilddrüse nahe verwandt, die **Hypophyse** oder *Glandula pituitaria*, der *Hirnanhang*. Wiederum ist hier das experimentelle Studium der Funktion erst durch die klinische Beobachtung angeregt worden. PIERRE MARIE entdeckte nämlich im Jahre 1886 den Zusammenhang einer seltenen Erkrankung des Menschen, der sogenannten *Akromegalie*, mit Veränderungen der Hypophyse. Das hervorstechendste Symptom der Akromegalie sind, wie der Name besagen soll, Vergrößerungen der hervorragenden Teile am Körper; Hände und Füße werden durch Knochenneubildung plump. Ferner werden Gesicht, Zunge und Kehlkopf durch Bindegewebswucherung und Verdickung der Epidermis deformiert. Dazu kommen seelische Trägheit, Störungen in den Sexualfunktionen, Verlust der männlichen

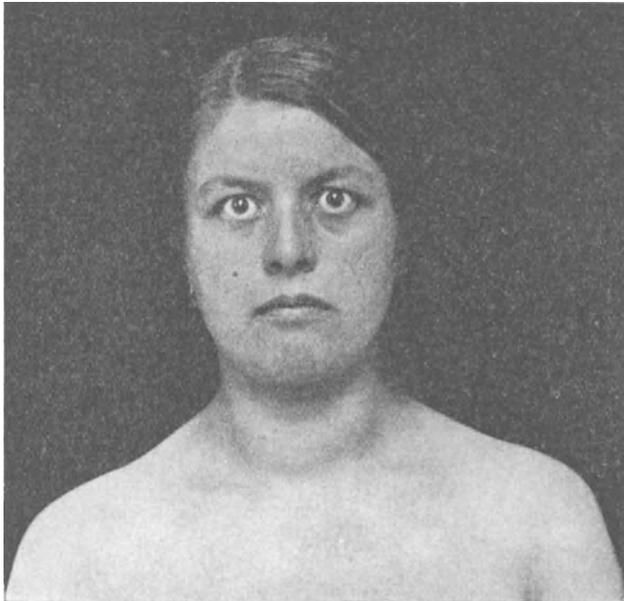


Abb. 78. Morbus Basedowii (nach FALTA).

Potenz und der Menstruation, ferner häufig Glykosurie. Tritt die Erkrankung frühzeitig, tritt sie vor allem in der Pubertätszeit auf, so wird das Knochenwachstum oft noch in anderer Weise gestört; die langen Röhrenknochen, besonders der unteren Extremitäten, wachsen stark, es kommt zu *Riesenwuchs* oder *Gigantismus*; dabei bleiben die Genitalien auf einer kindlichen Stufe stehen, ebenso die geistigen Funktionen. Als eine andere Form der jugendlichen Hypophysenerkrankung wird die *hypophysäre Fettsucht* (*Dystrophia adiposogenitalis*) (A. FRÖHLICH) aufgefaßt, bei welcher neben den Störungen im Sexualapparat Veränderungen des Stoffwechsels in den Vordergrund treten, welche sich am auffallendsten in einer starken Fettablagerung äußern. In allen diesen Fällen tritt zu den genannten Erscheinungen eine Vergrößerung der Hypophyse hinzu.

Die Akromegalie entsteht durch ein Adenom der Hypophyse, d. h. durch eine Geschwulst, bei welcher die Drüsensubstanz gewuchert ist; diese Tumorbildung führt oft zu Hirndrucksymptomen, und bei

der Nachbarschaft zum Chiasma opticum zu Sehstörungen oder zu Erblindung. Dem pathologisch-anatomischen Befund nach kann man die Akromegalie als die Folge eines „*Hyperpituitarismus*“, einer Überfunktion der Hypophyse auffassen, ähnlich wie die BASEDOWsche Krankheit eine Überfunktion der Schilddrüse bedeutet. Dafür spricht, daß die Chirurgen durch partielle Exstirpation des Tumors ausgezeichnete Heilerfolge erzielen, nämlich abgesehen von der Beseitigung der schweren Sehstörungen, Verkleinerung von Gesicht und Händen, Verdünnung der Haut, Wiedererwachen der Geschlechtsfunktionen. Der Gigantismus ist mit der Akromegalie pathogenetisch nahe verwandt; dafür spricht vor allem die Tatsache, daß der Gigantismus in späteren Jahren öfter in Akromegalie übergeht. Die *Dystrophia adiposogenitalis* ist dagegen als *Hypopituitarismus* aufzufassen. Die angeführte Vergrößerung der Hypophyse spricht nicht gegen diese Ansicht, da hier nicht ein Adenom die Ursache für die Vergrößerung abgibt, sondern irgend eine andere

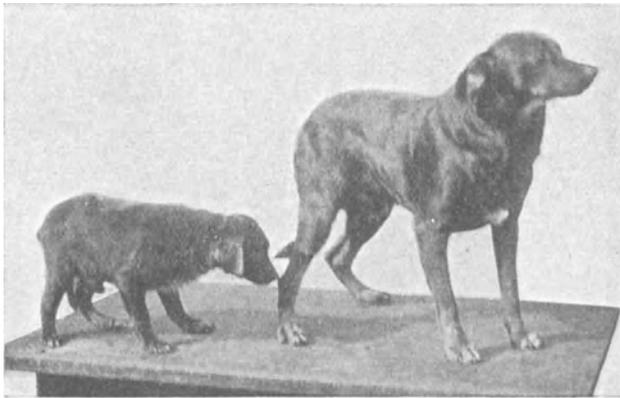


Abb. 79. Hunde aus dem gleichen Wurf, 12 Monate alt. Dem linken wurde im Alter von 2½ Monaten die Hypophyse exstirpiert (nach ASCHNER).

das Drüsengewebe konsumierende Geschwulst; die Geschwulst ist hier also der Struma bei einem Kretin zu vergleichen. Die Auffassung als Hypopituitarismus wird u. a. durch solche klinische Fälle nahegelegt, bei denen nach einer Verletzung der Hypophyse, z. B. durch ein Geschoß, das in die Schädelbasis eindrang (MADELUNG, BEHR), die hypophysäre Fettsucht zum Ausbruch kam.

Die experimentellen Studien der Hypophysenfunktion bestehen teils in Exstirpationen, teils in organotherapeutischen Versuchen. Die *Exstirpation* ist bei der verborgenen Lage der Hypophyse äußerst schwierig; jedoch ist sie in letzter Zeit teils vom Rachen aus (ASCHNER), teils nach Entfernung großer Stücke des Schädeldachs und nach Verschiebung des Gehirns von der Gehirnbasis aus (BIEDL, KARPLUS und KREIDL) einwandfrei geglückt. Die Totalexstirpation führt zu einem wohl umschriebenen Krankheitsbild (siehe Abb. 79): bei wachsenden Tieren bleibt das Wachstum auf dem Jugendstadium stehen, die Tiere behalten die infantile gedrungene Körperform, besonders die kurze Schnauze, im Unterhautbindegewebe lagert sich reichlich Fett ab, der Pelz bleibt wollhaarig; auf infantiler Stufe bleiben auch die inneren

und äußeren Genitalien; der Stoffwechsel ist herabgesetzt, die Assimilationsgrenze für Zucker erhöht, die Körpertemperatur niedrig; auch die Adrenalinglykosurie ist schwerer hervorzurufen, ebenso wie die Mydriasis durch Adrenalin; geistig sind die Tiere meist stumpf. Der Zustand erinnert also in mehrfacher Hinsicht an die strumipriva Kachexie, und die Verwandtschaft mit der Funktion der Schilddrüse ist um so auffälliger, als regelmäßig nach der Hypophysektomie die Schilddrüse hypertrophiert. Ebenso evident, wie bei der Schilddrüse, ist der Synergismus mit der Nebenniere. Exstirpation bei erwachsenen Tieren ist von weniger auffallenden Störungen gefolgt: der Stoffwechsel wird auch dann herabgesetzt, das Fettpolster vermehrt, die Sexualtätigkeit abgeschwächt.

Diese ganzen Erscheinungen treten nun aber nur auf, wenn der *Vorderlappen* und die *Pars intermedia* der Hypophyse weggenommen werden; die Entfernung des *Hinterlappens* scheint gleichgültig. Vorderlappen und *Pars intermedia*, welche sich embryonal aus dem Rachenepithel entwickeln, bestehen aber aus Drüsengewebe, sie bilden die *Adenohypophyse*; der *Hinterlappen*, welcher sich ursprünglich als *Neurohypophyse* (oder *Infundibularteil*) aus dem dritten Hirnventrikel ausstülpt, enthält Neuroglia und Ependymzellen. So verweisen die Exstirpationsversuche auf den *Vorderlappen* als den Hauptträger der innersekretorischen Funktion.

Im Gegensatz dazu haben nun aber auffallenderweise die Versuche, durch *Verfütterung* oder durch *Injektion von Hypophysensubstanz* den Körper zu beeinflussen, gelehrt, daß prägnante Reaktionen bloß mit den Bestandteilen des *Hinterlappens* zu erzielen sind, oder vorsichtiger ausgedrückt: nicht mit der Substanz des *Vorderlappens*, da es vielleicht auch auf die Produkte der *Pars intermedia* ankommt. Injiziert man Hypophysenextrakt intravenös, so steigt der arterielle Blutdruck (OLIVER und SCHAEFFER); die Wirkung erinnert also an die des Adrenalins, sie ist aber vor allem darin verschieden, daß sie minutenlang anhält, und daß eine zweite nachfolgende Injektion den Druck nicht von neuem steigert, im Gegenteil eine Drucksenkung veranlaßt. Nach HOWELL hängt diese Reaktion allein von der Substanz des *Hinterlappens* ab. Sie beruht in erster Linie auf einer Tonuserhöhung der Gefäßmuskulatur. In ähnlicher Weise werden auch die glatten Muskeln in anderen Organen erregt; so steigt der Tonus der Blase, die Kontraktionen des Darms werden verstärkt und vor allem wird der Tonus des Uterus erhöht; führt dieser langsame rhythmische Kontraktionen aus, so wird ihre Frequenz gesteigert. Diese von DALE entdeckte Wirkung hat die Hypophysensubstanz zu einem höchst wertvollen und viel verwendeten Arzneimittel für die Geburtshilfe gemacht, um eine zu schwache Wehentätigkeit anzuregen (Pituitrin, Pituglandol, Hypophysin). Zu den charakteristischen Wirkungen der Hypophysensubstanz gehört schließlich noch eine starke Steigerung der Harnproduktion und eine starke, aber vorübergehende Förderung der Milchsekretion. Die geschilderten Wirkungen sind also, mindestens teilweise, Reizwirkungen auf den Sympathikus. Dies legt den Gedanken nahe (ASCHNER), daß die Hypophyse ihr Inkret vielleicht nicht bloß in die Blutbahn absondert, sondern in den nahe benachbarten 3. Ventrikel, wo die Hormone in unmittelbare Berührung mit der *Regio hypothalamica* kämen, welche ein Sympathikuszentrum oder, wie es ASCHNER genannt hat, ein Eingeweidezentrum repräsentiert (siehe S. 227 und Kapitel 26).

Aus den angeführten Beobachtungen folgt, daß die Hypophyse jedenfalls mehrere *Hormone* produziert. Einige derselben, welche in ihrer Wirkung auf den Blutdruck und auf den Uterus aber nur quantitativ differieren, sind von FÜHNER aus dem Hinterlappen isoliert worden und sind als *Hypophysin* im Handel. Das Präparat ist eiweißfrei, es besteht aus den Salzen mehrerer in verdünntem Alkohol löslicher, kristallinisch abscheidbarer Basen, deren Konstitution bis jetzt unbekannt ist.

Könnten die bisher besprochenen Hormondrüsen, Nebennieren, Schilddrüse und Hypophyse, in gewisser Hinsicht als Synergisten bezeichnet werden, so tritt ihnen nun als Antagonist die **Pankreasdrüse** gegenüber. Wir haben in dieser früher eine Drüse kennen gelernt, welche durch die „äußere“ Sekretion des Bauchspeichels eine Hauptrolle bei der Verdauung spielt; hier handelt es sich um eine zweite Funktion des Pankreas, um seine Hormonbildung.

Es wurde bereits (S. 255) die im Jahre 1889 von v. MERING und MINKOWSKI gemachte Entdeckung erwähnt, daß nach Totalexstirpation des Pankreas eine schwere Störung des Kohlehydrat-Stoffwechsels zustande kommt: wenige Stunden nach der Operation erscheint Traubenzucker im Harn, die *Glykosurie* erreicht nach etwa drei Tagen ihren Höhepunkt, und von nun ab wird ein Harn ausgeschieden, welcher bis zu 20% Traubenzucker enthalten kann. Gleichzeitig besteht Polyurie und als Folge des großen Verlustes an Nahrungsstoff und an Wasser Polyphagie und Polydipsie, Durst und Hunger. Dieser *Diabetes mellitus* wird als „schwerer“ Diabetes bezeichnet; das soll heißen, daß nicht, wie bei manchen Formen von sogenanntem „leichten“ Diabetes, bei Aussetzen jeglicher Kohlehydratzufuhr die Glykosurie schwindet, sondern daß auch bei ausschließlicher Eiweiß-Fettdiät die Zuckerausscheidung fortbesteht. Wir haben früher (S. 177) gesehen, daß dieser Zucker zweifellos aus dem Eiweiß, zum Teil wohl auch aus dem Fett herstammt.

Es ist nun mit Sicherheit festgestellt, daß diese schwere Ernährungsstörung nichts mit dem Ausfall der äußeren Sekretion der Bauchspeicheldrüse zu tun hat; denn einerseits erzeugt Unterbindung des Ductus pancreaticus keinen Diabetes, andererseits kann man den Pankreaskopf mit dem Ausführungsgang exstirpieren, — so lange nur ein Rest von Drüsensubstanz im Körper verbleibt, entsteht auch kein Diabetes. Schon $\frac{1}{50}$ der Drüsensubstanz kann genügen, um die Glykosurie zu verhindern.

Die unmittelbare Ursache der Glykosurie ist die kurze Zeit nach der Totalexstirpation einsetzende *Hyperglykämie* (siehe S. 176), und diese kommt in erster Linie dadurch zustande, daß die Leber und die Muskeln ihren Glykogenbestand in Form von Zucker ins Blut ausschütten; *die Organe verlieren ihre bisherige Fähigkeit, Glukose als Glykogen zu retinieren*. Sie verlieren jedoch nicht absolut das Vermögen der Glykogenspeicherung; füttert man z. B. einen diabetischen Hund mit Lävulose, so setzt er einen großen Teil derselben als Glykogen an. Nur Glukose kann nicht mehr fixiert werden. Aber außerdem wird man auch mit einer *verminderten Fähigkeit des Körpers, den Zucker zu verbrennen*, zu rechnen haben, da auch bei nicht übermäßiger Zufuhr von Nahrung fort und fort Zucker durch die Nieren ausgeschieden wird.

So steht also im Zentrum der durch die Pankreasexstirpation gesetzten Störungen die Alteration des Kohlehydratstoffwechsels. Aber auch der Eiweiß- und der Fettstoffwechsel sind verändert; sie sind ge-

steigert, und dadurch ist die Abmagerung bis zum Skelett zu erklären, welche trotz Polyphagie den schweren Diabetes charakterisiert. Eine Sekundärersehung ist die früher erörterte Bildung der *Acetonkörper* aus den Fettsäuren, welche als Folge der mangelhaften Kohlehydratzerlegung zu deuten war (siehe S. 168); durchströmt man die Leber eines pankreaslosen Hundes mit Blut, so treten in dieses reichlich Acetonkörper über (EMBDEN). An der Vergiftung durch diese Stoffe geht der zuckerkranke Organismus oft im „Coma diabeticum“ zugrunde.

Daß der Ausfall eines Hormons für all dieses verantwortlich zu machen ist, das folgt nun mit Sicherheit aus *Transplantationsversuchen*. Entfernt man die Bauchspeicheldrüse, bringt aber ein Stück davon unter der Haut so zur Einheilung, daß der eventuell darin gebildete Pankreassaft sich nicht in dem Drüsengewebe staut und es durch seine Enzyme zerstört, sondern durch eine Fistel nach außen abfließen kann, so bleibt der Diabetes aus; sobald aber dieser letzte Rest durch eine zweite Operation, welche an sich weit harmloser ist als die erste, entfernt wird, kommt die Erkrankung zustande. In eigentümlicher Weise hat FORSCHBACH bewiesen, daß es auf die Funktion eines Hormons ankommt; er brachte zwei Hunde in Parabiase, d. h. er heilte operativ die beiden Tiere zusammen, so daß ihre Blutbahnen miteinander kommunizierten; wurde dann das eine Tier pankreatektomiert, so wurde es doch nicht diabetisch, offenbar weil die Funktion der einen Drüse für beide Tiere ausreichte. In natürlicher Parabiase leben miteinander Mutter und Fötus; CARLSON exstirpierte bei einer trächtigen Hündin gegen Ende der Gravidität das Pankreas und fand, daß auch 5 Tage nach der Operation im Harn noch keine Spur von Zucker enthalten war. Dann machte er den Kaiserschnitt und entfernte aus dem Uterus sechs Junge; schon 14 Stunden nachher zeigte die Mutter eine sich steigernde Glykosurie.

Das antidiabetische Hormon des Pankreas verläßt die Drüse auf dem Lymphwege. BIEDL fand nämlich, daß, wenn man den Ductus thoracicus unterbindet, oder wenn man die Lymphe aus dem Duktus dauernd ableitet, Glykosurie zustande kommt; injiziert man aber Duktuslymphe einem diabetischen Tier in die Blutbahn, so wird der Diabetes temporär vermindert. Die Abscheidung des Hormons untersteht, wie die Bildung des „äußeren“ Pankreassaftes, der Vaguswirkung; denn reizt man die zum Pankreas hinziehenden Vagusfasern, so nimmt der Gehalt des Blutes an Traubenzucker ab (ASHER und DE CORRAL). Die Anwesenheit des antidiabetischen Hormons im Blut verrät sich nach HÉDON durch die Erscheinung, daß die Überleitung von Blut aus der Karotis eines gesunden Tieres in die Karotis eines diabetischen bei dem letzteren die Glykosurie eine Zeitlang beseitigen kann.

Es wurde anfänglich gesagt, daß die Pankreasdrüse ein Antagonist zu Schilddrüse, Hypophyse und Nebennieren sei. Worin dieser Antagonismus sich äußert, ist klar: wie die Überfunktion dieser drei Drüsen die Assimilationsgrenze für Zucker herabgesetzt, so bewirkt beim Pankreas das gleiche die Unterfunktion bzw. die Exstirpation. Ebenso verhält sich der übrige Stoffwechsel, und ein neuer Beweis ist die S. 228 bereits erwähnte Hemmung, die man mit Pankreassubstanz auf die sonst prompt einsetzende Erweckung des winterschlafenden Igels durch Schilddrüsenextrakt ausüben kann. Ferner wird die Adrenalglykosurie durch Injektion von Duktuslymphe gehemmt (BIEDL), es neutralisieren sich also sozusagen Nebennieren- und Pankreashormon,

und die Adrenalinmydriasis, welche normalerweise vom Konjunktivalsack aus nicht hervorzurufen ist, kommt, wie früher (S. 259) schon erwähnt wurde, beim pankreasesstirpierten, also für Adrenalin sensibilisierten Tiere zustande (O. LOEWI).

Wie soll man sich nun *die Wirkung des antidiabetischen Hormons* vorstellen? Es stehen sich hauptsächlich zwei Theorien gegenüber; nach der einen beruht die Zuckerkrankheit darauf, daß das Vermögen, den Zucker abzubauen, gestört ist, nach der anderen handelt es sich um eine vermehrte Neubildung. Wahrscheinlich ist beides richtig.

Was die erste Theorie anlangt, so ist sie nicht so zu verstehen, daß das Oxydationsvermögen des Körpers allgemein herabgesetzt wäre. Dagegen spricht, daß z. B. nahe Verwandte der Glukose, wie Glykuronsäure, Zuckersäure, Schleimsäure, Lävulose vom Diabetiker leicht verbrannt werden. Sondern speziell der Traubenzuckerabbau soll gestört sein. Dafür kann etwa auf das früher (S. 179) angegebene Faktum verwiesen werden, daß, wenn man einem Zuckerkranken reichlich Kohlehydrat zuführt, sein respiratorischer Quotient nicht alsbald ansteigt, so wie beim Normalen (S. 176), sondern unverändert bleibt. Es ist aber auch die direkte Angabe gemacht worden, daß das überlebende schlagende Herz eines diabetischen Tieres, welches mit einer traubenzuckerhaltigen Lösung durchströmt wird, weniger Zucker verbraucht als ein normales Herz; ist dies auch vorläufig für das Herz bei Pankreasdiabetes noch unsicher, so ist es doch für das adrenalin-diabetische Herz erwiesen (O. LOEWI und WESELKO). Ferner vermag die Leber von pankreatektomierten Hunden nicht so, wie die normale Leber, aus Traubenzucker Milchsäure zu bilden (EMBDEN), d. h. diejenige Verbindung, welche wohl allgemein eine Etappe im Totalabbau der Kohlehydrate darstellt.

Die zweite Theorie, die Zurückführung der Zuckerkrankheit auf vermehrte Neubildung von Zucker, kann erstens für sich in Anspruch nehmen, daß gleich nach der Exstirpation des Pankreas ebenso wie nach Injektion von Adrenalin oder nach der Piquüre der Gehalt der Leber an Glykogen durch Umwandlung in Zucker gewaltig sinkt. Ferner ist durch A. FRÖHLICH und POLLAK gezeigt, daß in den ausgeschnittenen Lebern von pankreatektomierten Fröschen im Vergleich zu Normallebern der Glykogenabbau und die Traubenzuckerabgabe gesteigert sind. Ob außerdem auch die Bildung von Zucker aus anderen Stoffen vermehrt ist, ist unsicher.

Schließlich bleibt noch die sich von selber aufdrängende Frage zu beantworten, ob die funktionelle Zweiteilung des Pankreas nicht auch histologisch zum Ausdruck kommt, oder ob das äußere und das innere Sekret am selben Ort gebildet werden. Von LAGUESSE ist zuerst 1893 die Meinung geäußert worden, daß die sogenannten *LANGERHANSschen Inseln* im Pankreas die endokrinen Elemente darstellen, und diese Anschauung hat sich allmählich ziemlich durchgesetzt. Zu ihren Gunsten wird hauptsächlich folgendes angeführt: unterbindet man den Ductus pancreaticus, so degeneriert die Drüse mehr oder weniger; aber die Inseln bleiben oft erhalten; Glykosurie tritt gewöhnlich nur anfänglich auf. Exstirpiert man dann aber später den degenerierten Drüsenrest, so kommt es zu Diabetes. Ferner findet man beim Diabetes des Menschen in ungefähr 70% der Fälle pathologische Veränderungen im Pankreas; fast immer sind dabei die *LANGERHANSschen Inseln* geschädigt, sie zeigen Degenerationszeichen oder sind atrophisch, und die Zahl der Inseln ist im Verhältnis zur Norm deutlich herabgesetzt.

Zu den Drüsen mit innerer Sekretion ist des ferneren die **Thymusdrüse** zu rechnen. Die Kenntnisse über ihre Funktionsweise sind aber noch recht unsicher. Nach ihren eigenartigen anatomischen Verhältnissen wird man ihre Hauptbedeutung in einem Einfluß auf den jugendlichen heranwachsenden Organismus suchen. Denn es ist bekannt, daß *die Drüse ungefähr zur Pubertätszeit ihre höchste Entwicklungsstufe erreicht*,

um von da ab einen Involutionsprozeß durchzumachen. Das geht z. B. aus folgenden für die menschliche Thymusdrüse geltenden Wägungsdaten (nach HAMMAR) hervor:

Alter:	Gewicht der Thymusdrüse in g:	Gewicht pro 1000 g Körpergewicht:
neugeboren	13,3	4,2
1—5 Jahre	23,0	2,2
6—10 „	26,1	1,2
11—15 „	37,5	0,9
16—20 „	25,6	0,5
21—25 „	24,7	0,4
26—35 „	19,9	0,3
36—45 „	16,3	0,3
46—55 „	12,8	0,2

Die Drüse ist also absolut am schwersten zwischen 11 und 15 Jahren, relativ am schwersten bei der Geburt.

In der Tat lassen nun auch die wenigen feststehenden physiologischen Beobachtungen einen *Zusammenhang mit der körperlichen, speziell auch der geschlechtlichen Entwicklung* erkennen.

Es ist viel Mühe darauf verwendet worden, bei jugendlichen Individuen die Thymusdrüse total zu entfernen. Der Eingriff ist sowohl wegen des Alters der Tiere als auch wegen der Lage des Organs sehr eingreifend, und infolgedessen sind die Angaben über die Folgen widerspruchsvoll. Übereinstimmend wird eine Störung des Knochenwachstums angegeben: die Röhrenknochen bleiben kurz und haben verdickte Epiphysen wie bei der Rachitis; da die Kalkablagerung nur mangelhaft erfolgt, so bleiben die Knochen weich und brechen leicht, die Frakturen heilen infolge unzureichender Kallusbildung schlecht. Auch die Entwicklung der Geschlechtsfunktionen verläuft abnorm; öfter ist das Wachstum der Keimdrüsen beschleunigt, in anderen Fällen die Spermatogenese aufgehoben. Hinzu kommen Störungen im Nervensystem: die thymektomierten Tiere sind träge und muskelschwach und von psychischer Indolenz, welche sich allmählich bis zu Verblödung steigert (*Idiotia thymopriva*); die histologische Grundlage dafür bildet eine Quellung der Ganglienzellen und Wucherung der Gliazellen (KLOSE und VOGT).

Auf einen Zusammenhang zwischen Thymusfunktion und Entwicklung deuten auch die früher (S. 266) erwähnten Versuche an Froschlarven von GUDERNATSCH, welche ergaben, daß Fütterung mit Thymus die Metamorphose verzögert, so daß Riesenlarven entstehen. Ferner ist bekannt, daß Kastration die normale Involution der Thymusdrüse stark verlangsamt, wie umgekehrt eine stärkere sexuelle Tätigkeit — z. B. wenn Stiere als Zuchtstiere verwendet werden — die Rückbildung beschleunigt (PATON und HENDERSON).

Die Thymusdrüse spielt ferner, wie die histologischen Untersuchungen lehren, als *Produktionsstätte für rote und weiße Blutkörperchen* eine Rolle.

In dieser Hinsicht ist sie mit einem anderen Organ verwandt, dessen Besprechung hier mit angegliedert werden kann, weil wir es auch bei ihm mit einer Drüse ohne Ausführungsgang zu tun haben, nämlich mit der Milz. Es ist hier schwieriger, zu einer Einsicht in ihre Bedeutung

zu gelangen, als bei anderen Organen, weil das nächstliegende orientierende Experiment, die Totalexstirpation, ohne merkliche Störungen überstanden wird. Auch beim Menschen ist öfter die Splenektomie vorgenommen, ohne daß eine Beeinträchtigung der Gesundheit die Folge war. Man muß sich danach wohl vorstellen, daß die Funktion der Milz rasch von anderen für sie eintretenden Organen übernommen wird.

Die Histologie lehrt nun, wie schon angedeutet wurde, daß *die Milz ein Organ der Blutbildung* ist; man findet, wenigstens in der Embryonalzeit, Erythroblasten, und Leukozyten werden dort während des ganzen Lebens reichlich gebildet. Daher übertrifft die Zahl der Leukozyten im Milzvenenblut gewöhnlich bei weitem die Zahl im arteriellen Blut. Aber die Milz hat auch während des ganzen Lebens irgendwie mit der Erythrozytenbildung zu tun; denn bei Tieren, die etwa durch einen starken Aderlaß anämisch gemacht sind, kommt nach Splenektomie die Blutregeneration nur sehr verzögert zustande. Dies beruht zum Teil darauf, daß die Milz das zur Hämoglobinbildung notwendige Eisen speichern hilft. Wenn man ein Tier entmilzt, so verliert es, wie ASHER gezeigt hat, andauernd größere Mengen von Eisen durch Ausscheidung ins Kolon, als ein normales Tier.

Die Milz besorgt aber auch den Abbau der stetig im Kreislauf sich verbrauchenden Blutkörperchen; als Ausdruck dessen sieht man in der Milz Phagozyten, welche zerfallende Blutkörperchen einschließen, man findet freie Blutpigmente und erhält mit Schwefelammon oft eine kräftige Eisenreaktion. An dem Abbau der Blutkörperchen arbeitet die Milz in verschiedener Weise mit. Erstens begünstigt sie die Hämolyse; nicht daß sie selbst hämolytisch wirkt, aber sie steigert das hämolytische Vermögen der Leber (ASHER). Wenn daher in pathologischen Fällen aus unbekanntem Gründen die Blutkörperchen eine verminderte Resistenz besitzen, so daß sie leicht reichlich zerfallen, kann dieser Zustand wirksam durch die Splenektomie bekämpft werden (EPPINGER). Die Milz aktiviert ferner die Leber bei deren hämoglobinzerstörender Tätigkeit. Dadurch wird es verständlich, daß die Bildung der Gallenfarbstoffe, welche ja Derivate des Hämoglobins sind, durch Entmilzung vermindert wird (PUGLIESE).

Endlich hängt von der Milz auch anscheinend irgendwie *der Bestand an Thrombozyten* ab; denn in Fällen von Thrombopenie, d. h. von Mangel an Thrombozyten (s. S. 85), der sich in Neigung zu Blutungen äußert, kann Milzexstirpation den gefährlichen Zustand beseitigen.

Wenden wir uns zum Schluß den **Keimdrüsen** als endokrinem Gewebe zu. Wie etwa bei der Bauchspeicheldrüse ist auch hier die äußersekretorische Tätigkeit derart in die Augen springend, daß man darüber lange Zeit die endokrine Funktion übersehen oder ihr wenigstens nicht die volle Beachtung geschenkt hat. Dabei ist es nur notwendig zu sehen, wie die Wegnahme der Keimdrüsen, die Kastration, die seit langem zu den verschiedensten Zwecken bei Tier und Mensch vollzogen worden ist, den ganzen Körper in allen seinen Teilen verändert, um sich klar zu machen, daß die Produktion von Spermatozoen und von Eiern nicht das Einzige ist, was die Keimdrüsen leisten, daß die Männlichkeit und die Weiblichkeit sich weit über die Abgabe der Geschlechtszellen hinaus in bestimmten morphologischen und physiologischen Charakteren manifestiert, welche irgendwie von dem Vorhandensein der Keimdrüsen abhängen.

Vergegenwärtigen wir uns dafür nur die *Hauptzüge des Kastratentypus*, wie er beim Menschen in die Erscheinung tritt. Verändert werden infolge der Kastration sowohl die primären als auch die sekundären

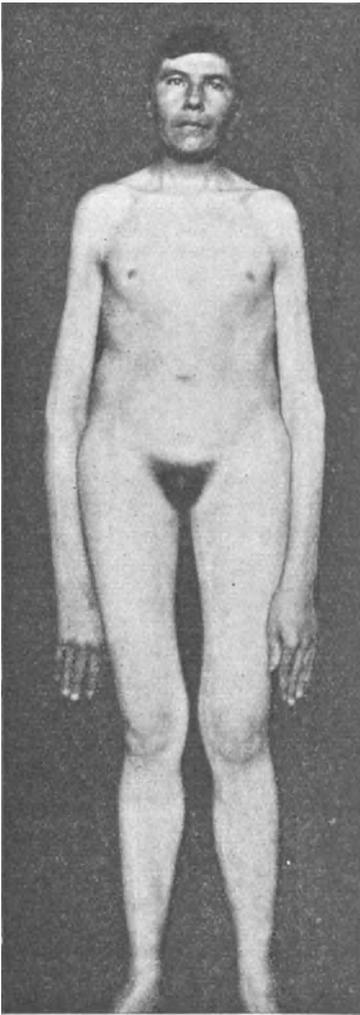


Abb. 80. 24 Jahre alter, im 5. Lebensjahr kastrierter Mann. Gesamtlänge 184 cm, Spannweite 204 cm, Unterlänge 108 cm (nach TANDLER und GROSZ).

Sexualcharaktere. Unter den primären Sexualcharakteren versteht man bekanntlich die außer den Keimdrüsen unmittelbar als Geschlechtsteile in Betracht kommenden Organe, Penis, Prostata, Samenblase, Uterus, Vagina u. a., unter sekundären alle übrigen an der sexuellen Differenzierung sich beteiligenden Teile und Eigenschaften. Was nun die primären Geschlechtszeichen anlangt, so verursacht die Kastration eine mangelhafte Entwicklung, wenn die Operation frühzeitig, eine Rückbildung, wenn sie in späteren Jahren ausgeführt wird. Von sekundären Geschlechtszeichen sei zuerst das Skelett erwähnt. Beim männlichen Kastraten tritt die Verknöcherung an den Epiphysenknorpeln verspätet ein, es bleibt also der infantile Typus länger erhalten. Dadurch kommt es, daß die Extremitäten im Verhältnis zum Rumpf übermäßig lang werden (Abb. 80). Auch beim Schädel erfolgt die Verknöcherung an den Nähten verspätet. Beim Weib behält das Becken die kindliche Form. Die Haut der männlichen Kastraten entbehrt der charakteristischen Behaarung, die Scham-, Axillar- und Barthaare erscheinen nicht oder spärlich. Ferner entwickelt sich beim Weib die Brustdrüse nicht über den kindlichen Typus hinaus. Im Unterhautbindegewebe wird oft reichlich Fett abgelagert. Die Ursache hierfür ist, wie Respirationsversuche lehren, eine Herabsetzung des Stoffwechsels um etwa 20%. Dieser Fettansatz beim Kastrierten ist eine so allgemeine Erscheinung, daß bekanntlich die Viehzüchter sie sich zu nutze machen, um Schweine, Rinder, Hähne auf Fett zu mästen. Ferner ist beim Kastraten die Muskelkraft vermindert. Psychisch besteht oft tiefe Depression, unterbrochen

von Aufregungszuständen. Bekannt ist endlich der Einfluß auf das Kehlkopfwachstum und damit auf die Höhe des Stimmklangs.

Sehen wir nun zu, was sich zugunsten der Auffassung anführen läßt, daß diese Erscheinungen von dem Ausfall bestimmter Keimdrüsenhormone herrühren. Vor allem wird hier das Beweismaterial vom *Transplantationsexperiment* geliefert, dessen Erfolg überaus frappant ist. Die Verpflanzung der Keimdrüsen ist der älteste Versuch einer Drüsen-

transplantation überhaupt; schon 1849 glückte BERTHOLD die Einheilung von Hoden bei kastrierten Hähnen, und er zeigte damit, daß die Hähne im Gegensatz zum Kapaun im Besitz aller Attribute ihres Geschlechts, des Kammes und der Halslappen, des Krähens, der Kampflust bleiben. Aber dieser Versuch geriet für Jahrzehnte fast in Vergessenheit. Neuerdings ist dann von STEINACH die Hodenverpflanzung bei Ratten mit gleichem Erfolg wie bei den Hähnen ausgeführt worden, und kürzlich wurde von LICHTENSTERN ein Fall veröffentlicht, bei dem ein im Felde Verwundeter, welcher durch ein Explosivgeschloß beide Hoden verloren hatte, und bei dem bereits die üblichen Folgen der Kastration in einer auffallenden Fettablagerung, in der Abnahme der männlichen Behaarung, im Mangel jeglicher Erregbarkeit des Geschlechtstriebes offenbar wurden, durch die Implantation eines Hodens geheilt und vor den Erscheinungen des Kastratentums glücklich bewahrt werden konnte. Häufiger ist die

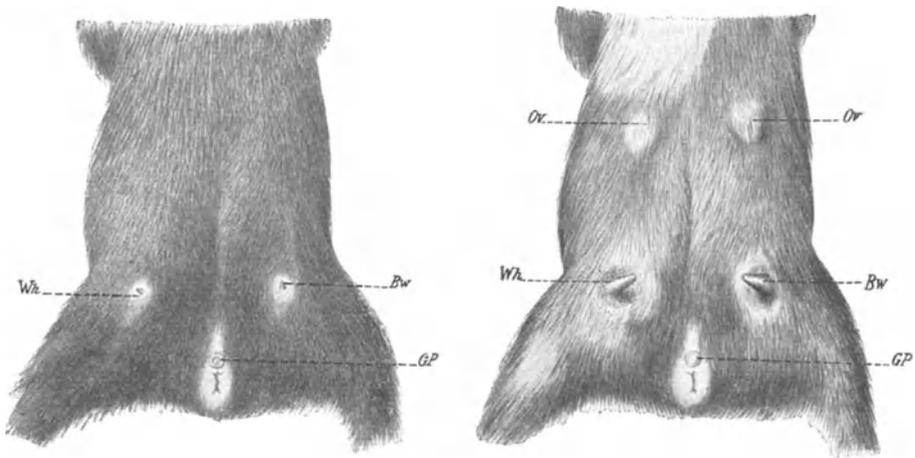


Abb. 81. Links normales, rechts feminisiertes Meerschweinchenmännchen (nach STEINACH). Bw = Brustwarze, Wh = Warzenhof, Gp = Glans penis, Ov = subkutan implantiertes Ovarium.

Implantation von Ovarien gelungen, besonders bei Hühnern, Kaninchen und Affen (HALBAN), aber auch beim Weib ist sie so geglückt, daß die verschwundene Menstruation wieder eintrat und die Involution des Uterus wieder rückgängig wurde. Besonders die Effekte der Hodentransplantation sind für die Hormontheorie beweiskräftig; denn die äußere Sekretion der verpflanzten Hoden, die Erzeugung von Spermatozoen, hört ja auf, die Erhaltung der Maskulinität hängt also nicht unmittelbar von der Samenbereitung ab.

Von unübertrefflicher Überzeugungskraft sind aber vor allem die Versuche von STEINACH, in welchen die *Keimdrüsen männlicher und weiblicher Tiere ausgetauscht* wurden; jungen kastrierten Männchen wurden Ovarien, jungen kastrierten Weibchen wurden Hoden unter die Haut verpflanzte; die Männchen wurden dadurch „feminisiert“, die Weibchen „maskuliert“, d. h. es wurden durch das Implantat die heterosexuellen Eigenschaften hervorgerufen, — ein Beweis dafür, daß jede der beiden Keimdrüsen ihre besonderen Hormone produziert, welche nur einerlei Geschlechtscharaktere zur Entwicklung bringen. So bekamen

die feminierten Männchen von Ratten das grazilere weibliche Skelett, den weicheren Pelz, das stärkere Fettpolster, vergrößerte Brustwarzen mit einem Warzenhof (siehe Abb. 81), sie zeigten weibliche Reflexe, wie das Heben des Schwanzes in Gegenwart des dadurch angelockten normalen Männchens, sie waren feige und ängstlich statt aggressiv, sie wurden von Männchen verfolgt und besprungen, ja die Entwicklung des weiblichen Typus ging infolge der besonders starken Wucherung der implantierten Keimdrüsen sogar über das gewöhnliche Maß hinaus, so daß die Brustdrüsen sich voll entwickelten und anfangen, Milch zu sezernieren, mit welcher die feminierten Männchen wie die geduldigsten Mütter junge Tiere säugten. Schwieriger gelang die Maskulierung von Weibchen; auch durch sie wurde das eine Geschlecht mit den Kennzeichen des anderen, dem groben Skelett, dem großen Kopf, dem struppigen Haarkleid, dem männlichen Geschlechtstrieb, der Kampflust u. a. behaftet.

Auch das Experiment, ein sekundäres Sexualorgan wie die Brustdrüse zu verpflanzen und nun an seinem neuen Einheftungsort von den kreisenden Hormonen beeinflussen zu lassen, ist gelungen. Es ist bekannt, daß das Parenchym der Brustdrüse in der Zeit der Pubertät, besonders aber in der Zeit der Gravidität wuchert und, nachdem die Geburt erfolgt ist, anfängt Milch zu bilden. Daß es dafür nicht auf nervöse Impulse ankommt, wie man früher annahm, war schon aus den Erfahrungen von GOLTZ und EWALD am Hund mit verkürztem Rückenmark zu entnehmen. Diese hatten bei einer trächtigen Hündin das Rückenmark vom oberen Brustmark an bis zum Sakralmark extirpiert (siehe Seite 253); als einige Tage danach die Geburt regulär erfolgt war, fing die Drüse an zu sezernieren und die Zitzen röteten sich, während das Junge trank. RIBBERT fand nun, daß beim Meer-schweinchen die Brustdrüse, die er vom Bauch aufs Ohr transplantiert hatte, ebenfalls während der Trächtigkeit anschwellt und, nachdem die Jungen geworfen waren, Milch produzierte. Auch für den Menschen gibt es analoge Erfahrungen: von den miteinander verwachsenen „parabiotischen“ (siehe S. 272) Zwillingsschwestern BLAZEK wurde die eine gravid, während der Schwangerschaft entwickelten sich auch bei der anderen sekundäre Graviditätszeichen, wie Pigmentierung der Haut, Anschwellung der Schilddrüse und Vergrößerung der Brustdrüsen, und nach der Geburt zeigte sich bei beiden eine schwache Milchsekretion (BASCH).

Wenden wir uns zu dem zweiten Hauptexperiment der Hormonphysiologie, zur *stomachalen oder intravenösen Einverleibung von Drüsen-substanz*. Auch dafür sind die Versuche mit Keimdrüsen vorbildlich gewesen; denn mit seiner Mitteilung über die die physischen und geistigen Kräfte steigernden Wirkungen von Hodensaftinjektionen inaugurierte im Jahre 1889 BROWN-SEQUARD die ganze Ära der Organotherapie. Manche derartiger Hormoneinflüsse sind in die Augen springend. So brachte NUSSBAUM kastrierten Fröschen Hodenstücke in den Rückenlymphsack und fand, daß ihre Vorderarmmuskeln und Daumenschwielen, welche beide dem Umklammerungsreflex dienen, so wie zur Zeit der Geschlechtsreife hypertrophierten; auch die Auslösung des Umklammerungsreflexes wird nach STEINACH bei kastrierten Männchen wieder ermöglicht durch Injektion von Hodensubstanz. Ganz analog wachsen bei Kapaunen Kamm und Bartlappen stärker, wenn Hodensubstanz verfüttert wird (LOEWY). Eklatant ist auch der Einfluß auf

den Stoffwechsel; es wurde bereits (S. 276) bemerkt, daß nach Kastration der respiratorische Gaswechsel bis um 20% verringert ist; umgekehrt kann man durch Verfütterung oder Injektion von Hoden- oder von Ovarialsubstanz den gesunkenen Stoffwechsel wieder um 30—50% heben (LOEWY und RICHTER). Im Zusammenhang damit steht der Einfluß von Hodenextrakten auf die Muskelkraft; nach ZOTH und PREGL wird dadurch die ergographische (siehe Kap. 20) Muskelleistung ganz beträchtlich gesteigert.

Was nun die Produktionsstätte der Sexualhormone anlangt, so könnte man nach Analogie mit der Pankreasdrüse mit ihrer doppelten Funktion vermuten, daß auch hier exokrine und endokrine Funktion histologisch differenziert werden können, und STEINACH u. a. vertreten auch in der Tat die Ansicht, daß die Hormonfunktion bei den Hoden von den eigentümlichen, zwischen den Tubuli seminiferi gelegenen LEYDIGSchen Zwischenzellen, bei den Ovarien von den obliterierten Follikelzellen ausgehe, daß es also neben der Gonaden produzierenden Drüse eine „Pubertätsdrüse“ gebe. Andere Autoren bekämpfen jedoch diese Ansicht und verlegen die Hormonproduktion entweder in die Keimzellen selbst oder beim Hoden wohl auch in die SERTOLISchen Stützzellen. Für die Entscheidung dieser Lokalisationsfrage ist jedenfalls von Bedeutung, daß die Produktion von Gonaden weitgehend unterdrückt werden kann, ohne daß die äußeren Zeichen der Maskulinität oder Femininität reduziert sind. Bekannt ist z. B. die hohe Empfindlichkeit der Keimzellen für Röntgenstrahlen, die diesen Zellen mit allen lebhaft sich teilenden Zellen gemeinsam ist, wie den Zellen der Keimzentren der Lymphfollikel, den Zellen im Stratum germinativum der Haut, den Zellen rasch wachsender Tumoren; Bestrahlung der Hoden mit Röntgenstrahlen führt also zu Sterilität. Während nun aber nach regelrechter Kastration die früher geschilderten Folgen alsbald bemerkbar werden, während z. B. so auffallende Geschlechtsabzeichen, wie das Geweih des Rehbocks oder der Kamm des Hahns, nicht zur Ausbildung gelangen, behalten die mit Röntgenstrahlen sterilisierten Tiere äußerlich den vollen maskulinen Typus (TANDLER und GROSZ). Auch die Natur führt ähnliche Experimente aus. Bei sogenanntem *Kryptorchismus* des Menschen und der Tiere handelt es sich z. B. meist nicht bloß um den Nichteintritt des Descensus testicularum, sondern auch um eine mangelhafte Entwicklung der Hoden. Dabei ist aber häufig nur die Spermatogenese verloren gegangen, während trotz der Sterilität die Sexualcharaktere und der Geschlechtstrieb normal entwickelt sind.

Über die Produktionsstätte von Ovarialhormonen kann man heute eines sicher aussagen, nämlich daß das jeweils nach einer Ovulation sich bildende Corpus luteum dafür in Betracht kommt. Dieses hat nach L. FRAENKEL die Bedeutung, die Einbettung des Eies in die Uterusschleimhaut zu ermöglichen; seine periodische Bildung durch Proliferation des Follikelepithels bereitet immer wieder aufs neue die Uterusschleimhaut zur Aufnahme eines Eis vor; bleibt diese Einbettung dann deswegen aus, weil das Ei nicht befruchtet worden ist, so kommt es zu menstrueller Blutung und Rückbildung der Schleimhaut (siehe S. 284). Der Zusammenhang mit dem gelben Körper wird dadurch bewiesen, daß seine Zerstörung beim Kaninchen den Eintritt oder die Fortentwicklung der Gravidität verhindert, und daß, wenn man beim Weibe das von der letzten Ovulation herrührende Corpus luteum galvano-

kaustisch beseitigt, die nächste Menstruation ausbleibt. Aus den Ovarien und aus Corpora lutea ist auch eine lipoide Substanz extrahiert worden (FELLNER, EDMUND HERRMANN), deren Injektion die Entwicklung der weiblichen Sexualcharaktere mächtig anregt.

Hiermit haben wir die Physiologie der wichtigsten Drüsen mit innerer Sekretion kennen gelernt. Aus der Darstellung geht die außerordentlich große Bedeutung der chemischen Korrelation der Organe als Gegenstück zu ihrer nervösen Korrelation hervor. Jedoch mag zum Schluß hervorgehoben werden, daß diese Produktion von „anregenden“ Stoffen, von Hormonen, nicht eine Domäne der endokrinen Drüsen ist, wenn man unter Hormonen nichts weiter versteht, als eben anregende Stoffe. So ist schon öfters die Kohlensäure, welche in allen Organen bei der vermehrten Funktionsleistung in vermehrter Menge entsteht, als Atmungshormon bezeichnet worden, weil es über die Medulla oblongata die Atmung anregt. Auch die Milchsäure oder das Histamin könnten als Hormon bezeichnet werden, insofern als sie bei erhöhter Organtätigkeit korrelativ die Blutgefäße des arbeitenden Organs zur Erweiterung bringen, wie wir früher (S. 150) bei der Besprechung der „funktionellen Hyperämie“ gesehen haben. Es sei auch noch einmal auf das Sekretin hingewiesen (s. S. 32 u. 45), das in der Magen- und Darmschleimhaut produziert wird und auf dem Blutweg Magen und Pankreas zur Sekretion veranlaßt. Chemische Beziehungen von Organ zu Organ spielen wohl überhaupt eine Rolle von noch kaum geahnter Größe; so sei etwa daran erinnert, daß, wenn sich im Auge des Triton nach Herausnahme der Linse vom Rand der Iris aus eine neue Linse bildet, die Anregung zu der Regeneration von der Netzhaut ausgeht, welche einen löslichen Stoff produziert, der durch Diffusion durch den Glaskörper hindurch an die Iris gelangt (WACHS), und daß, wenn sich über einer unter die Haut transplantierten Linse das Hautepithel zu einer Art durchsichtiger Kornea umbildet, das darauf beruht, daß unter dem Einfluß von der Linse entstammenden chemischen Substanzen die schwarzen Pigmentkörnchen auswandern, die LEYDIGSchen Schleimzellen sich zurückbilden und das Epithel sich verdünnt (FISCHEL), — also Analoga zu anderen hormonalen Einflüssen auf die Regeneration (siehe S. 263), nur daß das „Regenerationshormon“ hier nicht von einer eigentlichen Hormondrüse gebildet wird. Auch bei den Pflanzen scheint die hormonale Übertragung von Reizen von weittragender Bedeutung zu sein (FITTING, G. HABERLANDT).

19. Kapitel.

Fortpflanzung und Wachstum.

Das Sperma 281. Erektion und Ejakulation 283. Die Eier; Ovulation und Menstruation 284. Befruchtung und Entwicklung des Eies 285. Das Wachstum 288.

Die Fortpflanzungsfähigkeit gehört, wie wir schon in den einleitenden Betrachtungen des ersten Kapitels gesehen haben, zu den Hauptkriterien des Lebens. Sie besteht in der Fähigkeit der Organismen, aus sich heraus lebendige Teile zu entwickeln, welche von ihrem Ursprungsort losgelöst zu neuen Individuen sich umgestalten oder heranwachsen, die denjenigen, von denen sie abstammen, den „Eltern“, ähnlich sind. Uns interessiert hier wesentlich die sogenannte *geschlechtliche Fortpflanzung*, d. h. diejenige Form der Fortpflanzung, bei welcher zwei verschiedene Lebewesen, Lebewesen von verschiedenem „Geschlecht“, in ihrem Innern verschiedene „Keimzellen“, die *männlichen und die weiblichen Geschlechtszellen* produzieren, welche, nachdem sie sich von dem elterlichen Körper losgelöst haben, miteinander verschmelzen müssen, damit sich ein neues den Eltern ähnliches Wesen entwickelt.

Die Lehre von der Fortpflanzung gründet sich bisher in erster Linie auf morphologische Untersuchungen über Struktur und Bildung der Keimzellen und über den Verlauf und die Folgen des als *Befruchtung* bezeichneten Verschmelzungsvorgangs. Die Physiologie der Fortpflanzung, welche hier allein in Betracht kommen soll, hat es vor allem mit den Lebenseigenschaften der Keimzellen zu tun und mit den inneren Bedingungen für das Zustandekommen der Befruchtung und der daraus entspringenden *Entwicklungserregung*; wir stoßen jedoch bei dieser Lehre vorläufig auf Schritt und Tritt auf ungelöste Fragen.

Die männlichen Geschlechtszellen werden bei den höheren Tieren im **Samen** oder **Sperma** aus den Hoden entleert. Der Samen ist eine schleimige, klebrige, ziemlich konsistente Flüssigkeit, von opaleszentem, beinahe milchigem Aussehen und eigentümlichem Geruch. Kurz nach der Entleerung nimmt seine Konsistenz noch zu, der Samen wird gallertig, um sich wenige Minuten danach mehr zu verflüssigen.

Die *chemische Analyse* ergibt einen Gehalt an Trockensubstanz von etwa 10%; davon sind etwa 9% organische Substanz. In dieser findet man reichlich Nukleoproteide, Albumin, Muzin, Lezithin und Cholesterin. Ferner scheiden sich aus dem austrocknenden Samen Kristalle einer stickstoffhaltigen Base, des Spermins aus, welche den Geruch des Samens bedingen soll.

Die milchige Opaleszenz des Samens rührt vor allem von den darin suspendierten Keimzellen, den **Samenfäden** oder **Spermatozoen**, her, ähnlich wie die Farbe der Milch von den suspendierten Fetttröpfchen herrührt. Im Mittel findet man in einem Kubikmillimeter 60 000 Samenfäden; da bei einer Ejakulation des Menschen 0,75—6 ccm Sperma entleert werden, so werden also auf einmal mehrere Millionen Samenfäden abgegeben.

Das Auffallendste an den Samenfäden ist ihre *Beweglichkeit*. Diese fehlt noch im Hoden und in den meisten Partien des Nebenhodens. Die Beweglichkeit wird wahrscheinlich erst durch die Beimischung des Prostatasekrets herbeigeführt. Die Bewegungen bestehen entweder in einem pendelnden Hin- und Herschlagen des Schwanzes, welches ein Hin- und Herwackeln des Kopfes verursacht, wobei das Spermatozoon nur langsam von der Stelle kommt, oder der Schwanz führt schlängelnde Bewegungen aus, welche den Kopf geradeaus vorschieben. Die Progression beträgt etwa 3—4 mm pro Minute. Schwach alkalische Reaktion belebt, saure Reaktion lähmt die Bewegungen.

Bei den Säugetieren findet nun die Vereinigung der Samentierchen mit den weiblichen Keimzellen in den obersten Abschnitten des Genitaltrakts, in der Tube oder auf der Oberfläche des Ovariums statt; es fragt sich, wie die Samentierchen dorthin finden. PFEFFERS bekannte Entdeckung, daß die Schwimmrichtung bei den Spermatozoen der Farne durch chemische Stoffe bestimmt wird, welche von dem Archegonium in das angrenzende Wasser abgegeben werden, ließ vermuten, daß auch bei der Orientierung der tierischen Samenfäden *Chemotaxis* im Spiele ist. In der Tat ist durch CHROBAK und durch O. LOEW gezeigt, daß das schwach alkalische Zervikalsekret des Uterus und das Tubensekret positiv, der saure Vaginalsekret negativ chemotaktisch auf die Spermatozoen wirken. Wenn diese also in die Scheide ejakuliert sind, so können sie an der Portio vaginalis des Uterus durch den in die Vagina herausragenden Pfropf von Zervikalsekret in den Uterus hineingelockt werden.

Für die Weiterbewegung von dort zur Tube hinauf und in dieser aufwärts dürfte dann hauptsächlich die *negativ rheotaktische Reaktion* der Samenfäden in Betracht kommen. Erzeugt man nämlich in der Flüssigkeit, in welcher die Samentierchen schwimmen, eine sanfte Strömung, so orientieren sich die Samentierchen alsbald gegen diese Strömung (РОТН). Da nun Uterus und Tube mit einem Flimmerepithel ausgekleidet sind, dessen Schlag eine Strömung nach außen unterhält, so müssen sich die Samentierchen gegen den Strom einstellen, wie KRAFT auch wirklich bei Spermatozoen von Kaninchen auf der Tubenschleimhaut einer Kuh beobachtet hat.

Auf diesem Weg sollen nun die Spermatozoen einer vom Ovarium ausgestoßenen Eizelle begegnen. Da dies Ausstoßen nur in längeren Intervallen geschieht, müssen die Spermatozoen innerhalb des weiblichen Körpers eine Zeitlang überleben. Es sind denn auch z. B. im Eileiter der Henne noch 40 Tage nach der Begattung lebende Spermatozoen gefunden worden, bei der Fledermaus müssen sie ein halbes Jahr im Uterus lebendig erhalten bleiben, da die Begattung im Herbst, die Abstoßung der Eier vom Ovarium und damit die Befruchtung erst im Frühjahr erfolgt, und beim Weib hat DÜRSEN bei Gelegenheit einer Operation noch 3½ Wochen nach der Kohabitation lebende Spermatozoen in der Tube nachgewiesen.

Der im Hoden gebildeten Samenflüssigkeit mischen sich auf ihrem Weg nach außen noch mehrere Drüsensäfte bei. Erstens ergießen die

Samenblasen ihr zähes gelbliches Sekret ins untere Ende der Samenleiter; zu welchem Zweck, ist für den Menschen nicht sicher bekannt. Bei den Nagetieren gerinnt nach CAMUS und GLEY das Samenblasensekret bei Berührung mit dem Saft der Prostata; es bildet sich auf die Weise ein Pfropf, welcher die Vaginalöffnung verschließt und das Ausfließen des Samens verhindert. Bei Säugetieren dient es vielleicht nur dazu, die Menge der bei der Kohabitation ejakulierten Flüssigkeit zu vergrößern (NAGEL). Die frühere Lehre, daß die Samenbläschen ein Receptaculum seminis bilden, wird heute nicht mehr anerkannt.

Das Sekret der **Prostata** ist trübe und dünnflüssig; in ihm ist der Stoff enthalten, welcher dem Sperma den eigentümlichen Geruch verleihen soll, das *Spermin*. Die besondere Beziehung der Prostata zur geschlechtlichen Tätigkeit offenbart sich darin, daß die Prostata sich zur Pubertätszeit vergrößert, und daß sie durch Kastration verkleinert wird; die letztere Tatsache hat mit Rücksicht auf die im Greisenalter öfter zustande kommende, der Harnentleerung in quälender Weise hinderliche Prostatahypertrophie chirurgisch-therapeutische Bedeutung. Nach STEINACH und FÜRBRINGER dient das Prostatasekret dazu, die Bewegungen der Samenfäden anzuregen.

Das Sekret der **Cowperschen Drüsen** endlich ist schleimig. Bei der Kohabitation wird es wahrscheinlich durch den Musculus bulbo-cavernosus in die Harnröhre ausgepreßt. Wozu es dient, ist nicht bekannt.

Der Erguß des Samens ist ein Reflexakt, dem bei den Säugetieren gewöhnlich ein anderer Reflex vorausgeht, welcher für die Einführung des Penis in die weibliche Vagina die Vorbedingung ist, die **Erektion**. Sie kommt dadurch zustande, daß sich die Schwellkörper (*Corpora cavernosa*) des Penis strotzend mit Blut füllen. Die Schwellkörper stellen ein System von Lakunen dar, das zwischen Arterien und Venen eingeschaltet ist. Die Füllung könnte einesteils durch vermehrten Blutzufuß durch die Arterien, anderenteils durch verminderten Abfluß aus den Venen erfolgen. Wahrscheinlich ist das erste das Entscheidende; denn bei der Erektion wird der Penis nicht zyanotisch, wie bei einer venösen Stauung, und seine Temperatur steigt, wie bei einer arteriellen Hyperämie (EXNER). Nach KÖLLIKER und v. EBNER spielen besondere glatte Muskeln des Penis die Hauptrolle; es werden nämlich erstens die erwähnten Lakunen von Muskelfasern, die in den Trabekeln der *Corpora cavernosa* verlaufen, umspinnen, derart, daß ihre Kontraktion eine Entleerung bewirken muß, und zweitens findet man in den Arterien des Penis, besonders an ihrem Übergang in das Lakunensystem, polsterartige Verdickungen der Intima, in welche ebenfalls Muskelfasern eingelagert sind, so daß bei ihrer Kontraktion die Polster in das Lumen der Arterien vorgebuchtet werden und den Blutzufuß erschweren müssen. Die Erektion kann danach so zustande kommen, daß reflektorisch der Tonus dieser glatten Muskulatur sinkt. Daneben findet bei der Erektion wohl auch eine gewisse Erschwerung des venösen Abflusses statt, dadurch, daß die geschwellten *Corpora cavernosa* auf die Venen drücken und daß auch die *M. bulbo-* und *ischiocavernosi* die Venen zum Teil komprimieren.

Die zentrifugale Leitung der Erregung bei dem Erektionsreflex erfolgt im *N. erigens*, wie von ECKHARD durch elektrische Reizung gezeigt worden ist.

Die **Ejakulation** geschieht durch eine Reihe von rhythmischen Kontraktionen. An dieser sind erstens die Längs- und Ringmuskeln des Vas deferens beteiligt, welches sich bei Reizung zugleich verkürzt und verengt. Zweitens kontrahieren sich wahrscheinlich die Muskelbündel, welche die Drüsenläppchen der Prostata umfassen, und pressen das Sekret in die Harnröhre. Drittens und vor allem ziehen sich die Muskeln der Urethra und die M. bulbo- und ischiocavernosi ruckweise zusammen.

Das Zentrum für den Erektions- und Ejakulationsreflex, das **Centrum genito-spinale** ist im Sakralmark gelegen; seine Zerstörung hebt die Reflexe auf (GOLTZ). Im speziellen ist das Zentrum ins untere Sakralmark zu lokalisieren; denn nach Quertrennung des Rückenmarks im Lumbalteil und selbst im oberen Sakralteil bleiben die Reflexe erhalten, ja sie können durch die Isolierung sogar gesteigert werden. Darauf ist es wohl zu beziehen, daß man bei Erhängten und Enthaupteten gelegentlich eine Erektion hat zustande kommen sehen. —

Die *weiblichen Geschlechtszellen*, die **Eier**, entwickeln sich im Ovarium aus den Primordialfollikeln. Zu Beginn der Pubertät sind in den Eierstöcken des Weibes etwa 30—40 000 Eier vorhanden; von diesen reift im allgemeinen zu einem bestimmten Zeitpunkt immer nur eines und wird sodann vom Ovarium abgestoßen. Da die Abstoßung ungefähr in einem vierwöchentlichen Intervall erfolgt, so werden von den 30—40 000 Eiern in der Zeit der Geschlechtstätigkeit des Weibes, d. h. ungefähr zwischen dem 15. und 50. Lebensjahr, nur etwa 400 Eier verbraucht.

Die Reifung eines Eies geschieht innerhalb eines GRAAFSchen Follikels; platzt dieser, so schwemmt die in ihm enthaltene Flüssigkeit das Ei mit aus in die Bauchhöhle; aus dem geborstenen Follikel wird durch Wucherung des Follikelepithels und der Bindegewebszellen der Theca folliculi ein Corpus luteum (siehe S. 279).

Mit der regelmäßigen Abstoßung eines Eies, mit der *Ovulation*, steht nun eine zweite Erscheinung im Zusammenhang, die *Menstruation*, d. h. die vierwöchentliche Blutung aus den Genitalien. Die Uterusschleimhaut macht nämlich eine periodische Umwandlung durch. Von einem bestimmten Zeitpunkt ab beginnt sie allmählich zu schwellen und sich aufzulockern, die Drüsen schläuche wuchern, die Sekretion nimmt zu; all das ist begleitet von einer Steigerung der Durchblutung. Haben diese Vorgänge einen gewissen Höhepunkt erreicht, so löst sich die Schleimhaut in ihren tieferen Partien in einzelnen Fetzen unter starkem Blutaustritt los und wird ausgestoßen. Danach beginnt eine Regeneration, indem die Reste des Drüsenepithels durch Wucherung die Wundfläche zudecken. Dann beginnt der ganze Prozeß von neuem.

Diese periodische Umwandlung der Uterusschleimhaut ist, wie schon früher erörtert wurde, von einer innersekretorischen Tätigkeit des Ovariums abhängig. Dafür wurde angeführt (S. 279), daß es ohne Ovarium keine Menstruation gibt, und daß die regelmäßige Menstruation auch dann fortbestehen kann, wenn die Ovarien zwar extirpiert, aber an einen anderen Ort transplantiert worden sind. Nach FRAENKEL ist es, wie wir auch schon sahen (S. 279), speziell das Corpus luteum, welches die Umwandlungen im Uterus anregt. Für diese Auffassung ist von Wichtigkeit, daß die Ovulation, an welche sich die Bildung des Corpus luteum anschließt, im allgemeinen zeitlich nicht mit der Menstruation zusammenfällt; am häufigsten findet man einen frisch geborstenen

Follikel um den 8. Tag nach Beginn der menstruellen Blutung bzw. etwa drei Wochen vorher. Wahrscheinlich stellt die Auflockerung und Wucherung der Uterusschleimhaut, welche jeder Menstruation folgt, eine Vorbereitung zur Aufnahme eines befruchteten Eis dar. Bleibt die Befruchtung jedoch aus, dann nistet sich das Ei nicht in die Schleimhaut ein, sondern verläßt den Uterus, und dieser stößt seine Schleimhaut unter Blutaustritt ab.

Jede menstruelle Blutung dauert im Mittel 3—5 Tage; es werden dabei 30—200 g mit Uterussekrete und Vaginalschleim untermischten Blutes ausgeschieden.

Ungefähr mit dem 50. Lebensjahr erlischt die Ovulation; die Menstruation verliert um diese Zeit des sogenannten *Klimakteriums* ihre strenge Periodizität, und die Blutungen werden unregelmäßig, teils spärlich, teils überreichlich. Ovarium und Uterus bilden sich zurück, Verengung der Scheide, Schrumpfung der Schleimhaut, Schwund der Behaarung, Aufhören der Libido sexualis bilden weitere Zeichen der *senilen Involution*. —

Wenn sich nun Spermatozoon und Ei innerhalb des weiblichen Organismus im **Befruchtungsvorgang** vereinigen, so wird dadurch der Anstoß zur Entwicklung eines neuen den Eltern ähnlichen Wesens gegeben. Es gehört zu den interessantesten Aufgaben der Physiologie festzustellen, worauf die *Entwicklungserregung* zurückzuführen ist. Man hat sich zu ihrer Lösung zunächst von folgendem morphologischen Gesichtspunkt leiten lassen: Vor der Befruchtung macht das Ei einen *Reifungsprozeß* durch, welcher darin besteht, daß sein Kern an die Oberfläche rückt, und daß das Ei sich dann zweimal nacheinander in zwei ganz ungleiche Hälften teilt, so daß neben dem protoplasmareichen reifen Ei zwei kleine sogenannte Pol- oder Richtungskörperchen entstehen, welche im Verhältnis zu ihrer Masse viel Kernsubstanz enthalten. Der Eikern (oder „weibliche Vorkern“) hat also bei der Reifung eine Reduktion seiner Chromatinmasse erfahren. Diese Reifung erfolgt beim Säugetierei entweder noch, solange es im GRAAFschen Follikel eingeschlossen ist, oder nach seiner Ausstoßung kurz vor der Befruchtung. Die Reifung könnte nun den Sinn haben, das Ei aufnahmefähig für neues Chromatin zu machen, welches ihm durch die Vereinigung mit einer anderen Zelle, dem Spermatozoon, zugeführt würde; damit würde es dann auch fähig zu neuen Teilungen. Aber es ist experimentell bewiesen worden, daß diese Deutung verkehrt ist; BOVERI u. a. zeigten, daß auch kernlose Fragmente von Eiern befruchtungsfähig sind, und daß sich daran eine Entwicklung anschließt, die freilich nur bis zum Gastrulastadium führt. BOVERI selber führte den Anstoß zur Entwicklung durch das Eindringen der Samenzelle darauf zurück, daß erst die Samenzelle ein aktives Zentrosoma, das die zur Teilung notwendigen Plasmastrahlungen anregt, in die weibliche Keimzelle einführe. Es hat sich jedoch gezeigt, daß auch bei der künstlichen Entwicklungserregung ohne Spermatozoon, auf welche wir gleich genauer zu sprechen kommen, regelmäßige Plasmastrahlungen auftreten, und daß sich sogar in kernlosen Eifragmenten durch bestimmte Einflüsse künstlich Zentrosomen und Plasmastrahlungen erzeugen lassen (WILSON).

Aber selbst wenn die genannten morphologischen Hypothesen der Entwicklungserregung richtig wären, bliebe vom Standpunkt des

Physiologen zu fragen, was für physikalische oder chemische Kräfte bei dem maßgebenden morphologischen Prozeß ins Spiel treten. Deshalb kann man sagen, daß ein wirkliches Verständnis für den entwicklungs-erregenden Einfluß der Befruchtung eigentlich erst angebahnt ist, seit, vor allem durch J. LOEB, gezeigt wurde, daß die Entwicklung auch ohne Spermatozoon rein mit Hilfe einfacher chemischer und physikochemischer Mittel in Gang gesetzt werden kann. LOEB experimentierte vor allem mit Seeigeleiern, bei welchen in der Natur der Anstoß zur Entwicklung stets von einem Spermatozoon ausgeht, aber er zeigte, daß sie auch zu *künstlicher Parthogenese* angeregt werden können, wenn man sie aus dem normalen Meerwasser für kurze Zeit in Meerwasser überträgt, dessen osmotischer Druck irgendwie, durch Zusatz eines Elektrolyten oder eines Nichtleiters, um etwa 50% erhöht ist. Bringt man sie nach 1—2 Stunden in das normale Meerwasser zurück, so entwickeln sie sich über das Morula- und Blastulastadium hinaus bis zu der kompliziert gestalteten Larvenform des sogenannten Pluteus. Läßt man die Eier aber in dem hypertonen Meerwasser liegen, so verfallen sie alsbald der Auflösung.

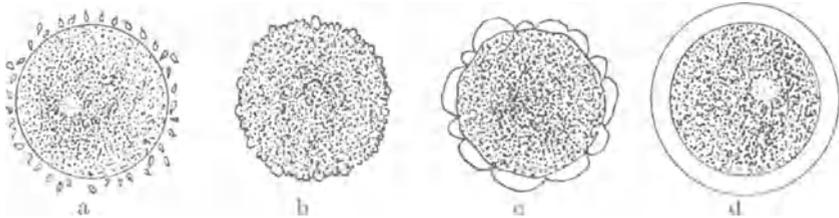


Abb. 82. Bildung der Befruchtungsmembran beim Seeigelei (nach J. LOEB). a = unbefruchtetes Ei, von Spermatozoen umschwärmt, b—d = verschiedene Stadien in der Entstehung der Befruchtungsmembran.

Diese künstliche Entwicklungserregung bleibt nun aber in mehrfacher Beziehung hinter dem Ideal der natürlichen Entwicklung zurück. Der auffälligste Unterschied ist der, daß bei der Parthenogenese nicht, wie sonst unmittelbar nach der Befruchtung, eine *Befruchtungsmembran* um das Ei herum gebildet wird (siehe Abb. 82). Auch die Furchung verläuft abnorm; die Zerklüftung des Protoplasmas in die Blastomeren erfolgt ungleichmäßig, die Kernteilung geht in den Blastomeren nicht gleichzeitig vor sich u. a. Deshalb versuchte LOEB die natürlichen Vorgänge noch besser zu imitieren, und es glückte ihm auch, Mittel für die künstliche Bildung einer Befruchtungsmembran aufzufinden; es eignen sich dafür alle solche Stoffe, welche fähig sind, bei längerer Einwirkung einen als *Cytolyse* bezeichneten Zellzerfall herbeizuführen. Solche Mittel sind Benzol, Chloroform, Äther, freie Fettsäuren, Saponin, gallensaure Salze, artfremdes Serum, also Stoffe aus allen möglichen chemischen Kategorien, denen allen aber, wie gesagt, die Eigentümlichkeit zukommt, cytolytisch zu wirken. Legt man die unbefruchteten Seeigeleier für wenige Minuten in Meerwasser und etwas Cytolytikum, überträgt sie dann für 5—10 Minuten in normales Meerwasser, bringt sie danach für ca. 1 Stunde in hypertones Meerwasser und dann wieder in normales Meerwasser zurück, so können sich eventuell 100% der Eier auszeichnen zu regelrechten Larven entwickeln (siehe Abb. 83); ja neuerdings ist es sogar durch gewisse Modifikationen des LOEBschen Rezeptes gelungen, partheno-

genetisch noch weit über das Pluteusstadium hinauszukommen, fast bis zum ausgebildeten Seeigel (DELAGE, SHEARER und LLOYD).

Natürlich erhebt sich nun sofort die Frage, wie die Cytolyse und die Steigerung des osmotischen Drucks die Entwicklungsvorgänge auslösen. Darüber ist bisher wenig mehr als folgendes bekannt: Unmittelbar nach der Befruchtung steigt bei den Eiern der Sauerstoffverbrauch stark an, und genau so steigt er bei der künstlichen Membranbildung (O. WARBURG, LOEB); auf welche Weise die Cytolytika das aber bewirken und welche Bedeutung es hat, ist strittig. Läßt man die Cytolytika länger als nötig wirken, so sind es, wenigstens zum Teil, die starken Verbrennungsprozesse, welche die Cytolyse herbeiführen; denn durch Wasserstoffeinleitung oder durch Zusatz von etwas Zyankali, welches die Oxydationen lähmt, läßt sich der Zellzerfall aufhalten.

Die Methode von LOEB ist mit ihrem Anwendungsbereich nicht auf die Seeigel beschränkt, sondern mehr oder weniger ist sie auch für die Eier von Mollusken, Würmern, Insekten und Amphibien zu brauchen. Darin liegt die allgemeine Bedeutung dieser Versuche.

Man kann nun nach diesen Erfahrungen annehmen, daß es auch bei der natürlichen Befruchtung durch das Spermatozoon auf zweierlei ankommt, erstens auf die Anregung zur Bildung einer Befruchtungsmembran und zweitens auf ein Moment, welches der Wirkung der Hypertonie entspricht. Zugunsten dieser Annahme läßt sich vor allem folgendes anführen: es ist der Versuch gemacht worden, Tierformen, welche einander sehr unähnlich sind, wie z. B. Echinodermen und Mollusken, miteinander zu bastardieren. Dabei hat sich gezeigt, daß, auch wenn das Spermatozoon sich mit dem Ei verbindet, die Entwicklung doch oft nicht in Gang kommt, daß sich aber doch wenigstens die Befruchtungsmembran bildet. In solchen Fällen gelingt es dann oft noch, durch Behandlung mit hyper-

tonischem Meerwasser die weitere Umbildung anzuregen (KUPELWIESER, GODLEWSKI). Das fremde Spermatozoon enthält also offenbar eine generell wirksame membranogene Substanz, und es ist ROBERTSON auch gelungen, eine solche zu isolieren; sie ist wasserlöslich und hitzeunempfindlich und ist als *Oozytin* bezeichnet worden.

Natürlich kommt dem Spermatozoon außerdem die längst anerkannte Fähigkeit zu, die väterlichen Eigenschaften auf das Ei bzw. auf den sich entwickelnden Embryo zu übertragen. Daß davon aber die hier in den Vordergrund gestellte entwicklungserrigende Fähigkeit als etwas Besonderes abzugrenzen ist, dafür mag etwa noch folgende Beobachtung angeführt werden: wenn man Eier von *Bufo vulgaris* mit Sperma von *Rana fusca* oder Eier von Triton mit Sperma von *Salamandra* befruchtet, so sterben die Bastarde schon nach kurzer Zeit ab, weil die beiden artverschiedenen Protoplasmen irgendwie einander schädlich beeinflussen. Wenn man aber die Spermatozoen zuvor mit Radium bestrahlt, so schreitet die Bastardentwicklung ungleich länger fort (O. HERTWIG). Nach der Deutung von HERTWIG beruht dies darauf, daß die Radiumbehandlung die Fortpflanzungsfähigkeit des Spermplasmas aufhebt und nur seine entwicklungs-

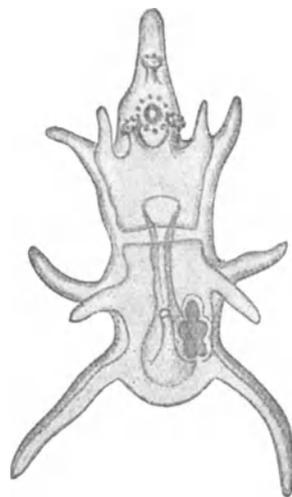


Abb. 83. Parthenogenetisch entstandene Larve (Bipinnaria-Stadium) von *Asterias glacialis* (nach DELAGE). (Aus WINTERSTEINS Handbuch d. vergleich. Physiologie.)

erregende Fähigkeit übrig läßt, d. h. er betrachtet die sich entwickelnden Bastarde als parthenogenetische Larven.

Neben der chemischen Entwicklungserregung gibt es noch *andere Methoden der künstlichen Parthenogenese*. So hat TICHOMIROW die unbefruchteten Eier von *Bombyx mori* durch Bearbeiten mit einer Bürste, MATHEWS die Eier von *Asterias* durch bloßes Schütteln zur Entwicklung gebracht; BATAILLON vermochte durch leichtes Verletzen mit einer Nadel die Eier von Fröschen und Kröten so zu erregen, daß die Entwicklung bis zur Metamorphose weiter ging. Abb. 84 zeigt den Effekt des BATAILLONschen Stiches, wie er allerdings nur an zweien von 10 000 angestochenen Eiern erhalten wurde. Ferner haben DELAGE und LILLIE bei Echinodermen durch kurzdauernde Temperatursteigerung die Entwicklung hervorgerufen. Die genauere Analyse all dieser Beobachtungen wird



Abb. 84. Parthenogenetisch durch BATAILLONschen Stich erzeugte Frösche (nach J. LOEB und BANCROFT). (AUS WINTERSTEINS Handbuch d. vergleich. Physiologie.)

wohl später einmal lehren, woher die physikalischen Mittel ähnliche Wirkungen auf das Ei ausüben, wie die chemischen Mittel. Für den BATAILLONschen Stich ist bereits nachgewiesen, daß nur dann die Entwicklung in Gang kommt, wenn mit dem Stich Spuren von Blut, insbesondere von Leukozyten in das Innere des Eis übertragen werden. Über die Natur der Entwicklungserregung bei Säugetiereiern ist bisher nichts bekannt.

Wenn hiermit die Betrachtung unserer Kenntnisse von den unmittelbaren Folgen der Befruchtung abgeschlossen wird, so gewährt ein Rückblick nichts weniger als Befriedigung. Erinnern wir uns, daß die Fortpflanzungsfähigkeit zu den Hauptkriterien des Lebens gehört (siehe S. 8) so ist es überraschend wenig, was wir bisher über die inneren Bedingungen der mannigfachen Teilungs- und Gestaltungsvorgänge zu sagen haben, welche alsbald nach der Verschmelzung der beiden Keimzellen in die Erscheinung treten. Eine Ursache für diesen

Stand unserer Kenntnisse ist darin zu sehen, daß die experimentelle Forschung das Studium dieses Grundphänomens der lebendigen Substanz erst neuerdings gepflegt hat, und wenn wir uns nunmehr, in natürlichem Anschluß an die Physiologie der Fortpflanzung und Entwicklung, der Physiologie des *Wachstums* zuwenden, so werden wir uns auch da und aus ähnlichen Gründen mit einer skizzenhaften Darstellung begnügen müssen, welche in gar keinem Verhältnis zu der Bedeutung des Themas steht. Denn abgesehen davon, daß auch das Wachstum zu den generellen Charakteristiken des Lebens gehört, abgesehen davon, daß rein äußerlich das Hervorwuchern der gewaltigen Zellmasse eines erwachsenen Körpers aus der winzigen befruchteten Eizelle heraus zu den eindrucksvollsten Lebensvorgängen gehört, sind auch praktische Medizin und Nationalökonomie, sind insbesondere Pädiatrie und Tierzuchtlehre aufs lebhafteste an der Vervollkommnung der Wachstumsphysiologie interessiert.

Unter *Wachstum* verstehen wir bei einem Organismus die Zunahme an Volumen, welche im allgemeinen darauf zurückzuführen ist, daß sowohl die Zahl der Zellen als auch die Masse der Interzellulärsubstanz,

manchmal auch die Größe der Zellen sich vermehrt; jedoch muß die Zunahme, wenn sie nicht den Charakter pathologischen Wachstums erhalten soll, so beschaffen sein, daß zwischen den einzelnen chemischen Bestandteilen und zwischen den einzelnen Formelementen ein gewisses normales Verhältnis bestehen bleibt. So ist es z. B. nicht als Wachstum zu bezeichnen, wenn der „Erwachsene“ jenseits seiner Wachstumsperiode durch reichliche Fettablagerung an Volumen zunimmt, oder wenn sich, etwa im Gefolge einer Kreislaufsstörung, reichlich Gewebswasser zwischen den Zellen der Organe einlagert und ein „Ödem“ verursacht.

Als *äußeres Maß des Wachstums* verwendet man bei den Säugetieren vornehmlich *das Körpergewicht und die Körperlänge*. Die Zuwächse an Gewicht und Länge in ein und derselben Zeitspanne sind im allgemeinen in der Jugend groß und nehmen allmählich mehr und mehr ab bis zum Stadium

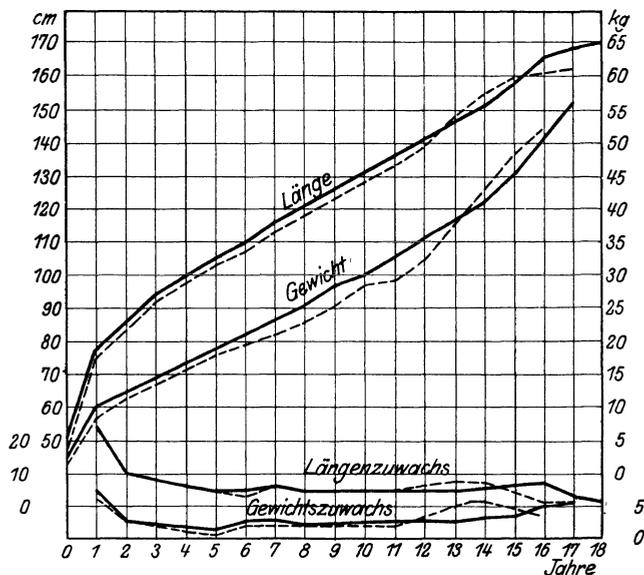


Abb. 85. Wachstumskurve für Knaben (—) und Mädchen (----).

des Ausgewachsenseins, oder anders ausgedrückt: die Wachstumsgeschwindigkeit ist zu Anfang des Lebens groß und verkleinert sich allmählich bis zum Wert Null. Dies kommt in der *Wachstumskurve* zum Ausdruck, welche im allgemeinen bei Abtragung der Zeiten auf der Abszisse, der Gewichte oder Längen auf der Ordinate eine gegen die Abszisse konkave Linie darstellt. Aber in der Steilheit des Anstiegs und besonders in kleineren, Variationen der Wachstumsgeschwindigkeit entsprechenden Schwankungen unterscheiden sich die Wachstumskurven der einzelnen Tierspezies in charakteristischer Weise voneinander. Die mittleren Gewichts- und Längenkurven des Menschen für die Zeit der Jugend sind in der Abb. 85 dargestellt.

Der Mensch wird mit einem Durchschnittsgewicht von 3000—3500 g geboren, die Schwankungen des *normalen Geburtsgewichts* gehen jedoch bis etwa 2400 g einerseits und 5000 g andererseits. Die *normale Geburtslänge* beträgt 50—51 cm. Innerhalb der ersten 5—6 Monate steigt das Körpergewicht auf etwa 6400 g, es findet also in dem ersten Halbjahr

ungefähr Verdoppelung statt (siehe Seite 251). Zu Ende des ersten Jahrs beträgt das Gewicht etwa 9500 g, die Länge 77 cm. Aus den Kurven in Abb. 85 ist zu ersehen, daß das Wachstum im 6. oder 7. Lebensjahr sich ein wenig beschleunigt, und daß eine ausgesprochene *zweite Streckungsperiode* mit entsprechender Steigerung der Gewichtszunahme bei den Knaben vom 14.—16., bei den Mädchen vom 12.—14. Lebensjahr statthat; dabei scheint das Längenwachstum hauptsächlich ins Frühjahr, die Gewichtszunahme in den Herbst zu fallen. Die Lebensjahre der zweiten Streckungsperiode sind diejenigen, welche der Pubertätszeit unmittelbar vorausgehen oder schon mit ihr zusammenfallen; die Pubertät setzt bei den Mädchen früher ein als bei den Knaben. Die Folge davon ist, daß etwa vom 12. Jahr ab die Mädchen, welche bis dahin im allgemeinen in den Maßen hinter den Knaben zurückstehen, die Knaben überflügeln; vom 16. Jahr ab kehrt sich aber das Verhältnis wieder um. Die Mädchen sind dann vom 17.—18. Jahr ab „erwachsen“, während bei den Knaben die Länge noch bis zum 21. Jahr zunimmt.

Die äußeren Veränderungen durch das Wachstum sind von *inneren Wachstumserscheinungen* begleitet, welche in Änderungen der chemischen Zusammensetzung zum Ausdruck gelangen. Allgemein findet man eine *Abnahme des Wassergehalts* mit dem Alter. Die folgende Tabelle enthält z. B. Daten für diese Wasserverarmung beim Kaninchen (nach FEHLING):

Embryo von 15 Tagen	. 91,5%	Wasser
„ „ 21 „	. 86,3	„ „
„ „ 24 „	. 85,0	„ „
„ „ 27 „	. 82,1	„ „
„ „ 30 „	. 79,4	„ „
Neugeborenes	77,8	„ „
Erwachsenes Tier	69,2	„ „

Der relative Wasserverlust beginnt also intrauterin und setzt sich extruterin fort. Ähnlich liegen die Verhältnisse beim Menschen.

Mit der Abnahme des Wassergehalts steigt natürlich der Gehalt an festen Stoffen. Bei dieser Steigerung prävaliert das Fett, wie der folgenden Tabelle nach THOMAS für die Katze zu entnehmen ist:

Alter	% Wasser	% Fett	% Eiweiß	% Salze
neugeboren	80,4	1,7	14,1	2,6
9 Tage alt	79,7	3,8	13,1	2,2
14 „ „	73,8	7,1	15,0	2,5
83 „ „	66,7	7,9	20,1	3,2

Die Anlagerung von Fett findet besonders lebhaft um die Zeit der Geburt statt, also um die Zeit, welche den Übergang vom warmen und gleichmäßig temperierten Aufenthalt im mütterlichen Leib zu der kühlen Umgebung der Außenwelt bildet; daher ist der Fettgehalt schon bei der Geburt besonders groß bei solchen Tieren, wie den Meerschweinchen, welche gleich nach der Geburt vom Muttertier emanzipiert und völlig homoiotherm sind. Auch der menschliche Embryo setzt im letzten Schwangerschaftsmonat besonders viel Fett an.

Die Steigerung im Salzgehalt kommt besonders den Knochen zugute; das äußert sich auch darin, daß überwiegend der Gehalt an Kal-

zium und Phosphor steigt, während der Gehalt an Natrium und an Chlor, zum Teil wohl infolge der Verdrängung des Kochsalzreichen Knorpels durch die Knochensubstanz, sogar zurückgeht.

Fragt man nun nach der Ursache für diese verschiedenen Äußerungen des Wachstums, so ist es selbstverständlich, daß irgend ein *innerer* „Wachstumstrieb“ die Hauptsache ist. Was man sich darunter zu denken hat, davon später! Aber es ist auch leicht festzustellen, daß *äußere Einflüsse* das Wachstum mit beherrschen, wenn sie auch nur als sekundäre Faktoren aufzufassen sind. So ist es ja bekannt, daß kümmerliche und ungesunde Lebensverhältnisse, Mangel an Nahrung und Bewegung sowie Krankheit die Entwicklung aufhalten.

Unter den äußeren Einflüssen steht an Wichtigkeit die *Nahrungszufuhr* obenan. Nicht daß sich durch überreichliche Zufuhr, besonders etwa durch Zufuhr von Eiweiß, das Wachstum über das gewöhnliche Maß hinaus steigern ließe. Aber umgekehrt verändert *Unterernährung* das Wachstum; Körpergewicht und Körperlänge bleiben hinter der Norm zurück. Von der Wachstumsstörung werden aber nicht alle Teile

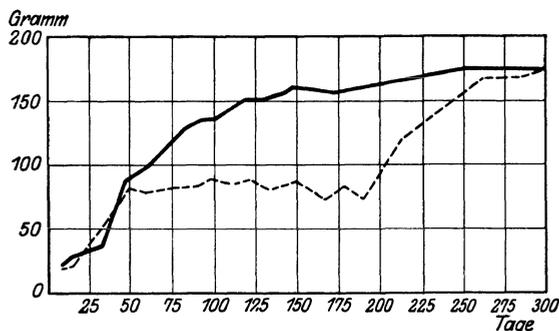


Abb. 86. Gewichtskurve zweier Ratten bei zureichender (—) und bei zeitweilig unzureichender (---) Ernährung (nach H. ARON).

gleichmäßig stark betroffen; namentlich wächst das Skelett weiter, während das Fettgewebe und später auch die Muskulatur relativ und manchmal auch absolut schwinden. Ist die Unterernährung nur vorübergehend, so wird, ebenso wie nach einer die Entwicklung störenden Krankheit, das, was im Wachstum versäumt wurde, rasch wieder nachgeholt, wie etwa die Kurve Abb. 86 erkennen läßt. Selbst wenn durch Nahrungsmangel das Wachstum bis über die Zeit der normalen Wachstumsperiode hinaus gehemmt wird, zeigt sich, sobald wieder reichlicher Nahrung zufließt, daß der Wachstumstrieb inzwischen nicht erloschen ist (ARON, L. B. MENDEL), wenn auch die Einbuße dann nicht wieder völlig ausgeglichen werden kann.

Eine das Wachstum störende Unterernährung braucht aber nicht bloß darin zu bestehen, daß das Nahrungsquantum ungenügend ist, sondern die Nahrung kann auch falsch zusammengesetzt sein dadurch, daß der eine oder andere notwendige Bestandteil fehlt oder knapp ist; die resultierende Wachstumsstörung ist dann die Folge einer — wie man sagen kann (siehe dazu auch S. 186) — *partiellen Unterernährung*. Wieviel gegebenenfalls auf die richtige Mischung ankommt, das geht mit besonderer Deutlichkeit aus der schon früher (S. 214 und S. 251) angeführten Beobachtung hervor, daß die Milch, namentlich in bezug

auf ihre Aschenbestandteile, den Bedürfnissen des wachsenden Organismus in höchst vollkommener Weise angepaßt ist. Der Begriff der partiellen Unterernährung wurde bereits an dem Beispiel einer Nahrung erläutert, welche dadurch minderwertig ist, daß in ihrem Eiweiß die eine oder andere für den Körper notwendige Aminosäure fehlt, wie z. B. bei dauerndem Ersatz des Eiweißes durch den eiweißähnlichen Leim wegen des Mangels an Tyrosin und Tryptophan der Körper allmählich an Unterernährung zugrunde geht (siehe S. 170). Solches Aminosäure-Defizit kann nun auch besonders das Wachstum, d. h. die Gewichts- und Größenzunahme bei einem sich entwickelnden Tier stören oder gar vollkommen zum Stillstand bringen (RÖHMANN, OSBORNE und MENDEL u. a.). In der folgenden Kurve nach OSBORNE und MENDEL (Abb. 87) handelt es sich z. B. um die Ernährung einer Ratte mit Kasein; enthält die Nahrung 18% Kasein, so geht das Wachstum flott vorwärts, bei 9% Kasein erfolgt es viel langsamer. Das liegt aber nicht an Eiweißmangel im ganzen,

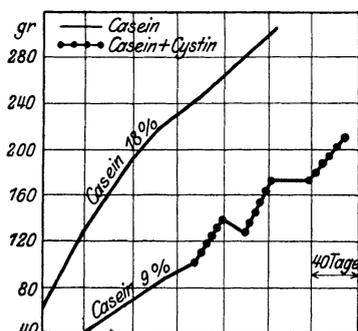


Abb. 87. Wachstumsbeschleunigung durch Zystin bei unzureichender Ernährung von Ratten mit Kasein (nach OSBORNE und MENDEL).

sondern bloß daran, daß das Kasein so wenig Zystin im Molekül enthält, daß der Bedarf daran durch Darreichung von 9% Kasein nicht gedeckt wird. Sobald man zu den 9% Kasein etwas reines Zystin dazu gibt, geht das Wachstum mindestens so gut vonstatten, wie bei 18%, wie die punktierten Kurvenstücke, welche für die jedesmaligen Zystinzusätze gelten, lehren. Natürlich brauchte die Zulage nicht in einer reinen Aminosäure zu bestehen, sondern in praxi würde man den Erfolg weit einfacher durch Zugabe eines Eiweißkörpers erzielen, welcher die mangelnde Aminosäure in genügender Menge enthält, wie man z. B. den Eiweißkörper des Mais, das Zein, in welchem Tryptophan und Lysin fehlen und das deshalb, wenn es der einzige Eiweißrepräsentant ist, das Wachstum bremst, vorteilhaft durch Laktalbumin ergänzen kann. Wie in diesen Fällen das Defizit an bestimmten Aminosäuren, so kann es in anderen Fällen ein Defizit an bestimmten Salzen, an Lipoiden oder auch an „Vitaminen“ sein, das die partielle Unterernährung verursacht. Darüber wurde schon in Kap. 12 Einiges gesagt.

Aus all dem folgt, daß, wenn es darauf ankommt, sich die Faktoren des normalen Wachstums klar zu machen, die Frage der Ernährung in ihrer Bedeutung gar nicht überschätzt werden kann. Namentlich der Landwirt wird großen praktischen Nutzen aus der Einsicht ziehen, daß z. B. noch so viel von einem bestimmten billigen Futtermittel trotz seines anscheinend zweckentsprechenden Gehalts an Nährstoffen und Kalorien das Wachstum nicht recht zu fördern vermag, daß aber ein kleiner Zusatz, der nach seinem Energiegehalt fast wertlos ist, genügen kann, um daraus ein vollwertiges Futter herzustellen. Auch der Pädiater wird eventuell in der vorwiegenden eintönigen Verwendung eines bestimmten Nährstoffgemisches, auch wenn es Eiweißkörper, Kohlehydrate und Fette in richtigen Verhältnis gemischt enthält, den Grund für eine mangelhafte Entwicklung finden.

Der partiellen Unterernährung läßt sich eine *partielle Überernährung* an die Seite stellen, durch welche sich das Wachstum in exzessivem Maße steigern läßt — so wenig es auch, wie gesagt, möglich ist, durch einfache Überfütterung Riesenwuchs zu erzeugen. Als Nahrungsbestandteile, welche in diesem Sinn auf das Wachstum wirken, sind manche *Hormone* zu bezeichnen. Man denke nur an die zwerghafte Gestalt der athyreotischen Kretins und an den Gegensatz dazu, die lang aufgeschossenen jugendlichen Basedow-Kranken, ferner an die erfolgreiche Beeinflussung des Wachstums zurückgebliebener kretiner und myxödematöser Kinder durch Darreichung von Schilddrüsenpräparaten. Die Thymusdrüse wird vielfach — teils wegen ihrer eigenartigen Involution, welche sie schon bis zur Zeit der Pubertät durchmacht, teils wegen der Beobachtungen am Skelett thymektomierter Tiere — als ein Organ angesehen, welches in der Jugendzeit ein „Wachstumshormon“ produziert, und auch die früher angeführten Versuche von GUDERNATSCH, in welchen durch Fütterung hyperthymisierte Froschlarven sich zu Riesenlarven entwickelten, sprechen dafür. Erinnerung sei ferner an die Akromegalie und vor allem an den Gigantismus, welche als Folgen einer Überproduktion der Hypophysenstoffe aufgefaßt werden müssen. Ein Gegenstück dazu ist wieder die Großwüchsigkeit, welche aus der Unterfunktion der Keimdrüsen hervorgeht; so sahen wir, daß die Eunuchen durch unproportionierte Hochbeinigkeit ausgezeichnet sind, und daß die Kastration auch am übrigen Skelett Wachstumsänderungen erzeugt; auch die kleinere Gestalt der Frau, die frühere Beendigung ihres Wachstums wird von manchen auf das frühere Einsetzen der Geschlechtsreife zurückgeführt.

Handelt es sich bei allen diesen Beobachtungen mehr oder weniger um äußere Einflüsse auf das Wachstum, so bleibt dabei die Frage nach den *inneren Ursachen des Wachstums* noch offen. Der innerlich bedingte Wachstumstrieb dokumentierte sich für uns in der artspezifischen Gestaltung der Wachstumskurve, und er trat uns in dem Fortbestehen des Wachstums selbst im Hungerzustand entgegen, wo alle Anregungen von seiten der Nahrung wegfallen. Man könnte nun meinen, daß mindestens ein Teil der inneren Ursachen des Wachstums in den eben angeführten Hormonen gefunden sei, und in der Tat hängt ja ohne Zweifel die Ausgestaltung des Körpers im ganzen und im einzelnen von den allgemein oder lokalisiert wirkenden Hormonen ab. Aber auch wenn wir den Hormonen diese Bedeutung zuerkennen, bleibt nach dem Wie ihrer Wirkung zu fragen. Eine bestimmte Antwort gibt es bis jetzt nicht. *Die innere Ursache des Wachstums ist nicht bekannt.*

Man kann allenfalls versuchen, auf die Frage mit Hypothesen zu antworten, wie eine solche z. B. aus folgenden Beobachtungen abgeleitet wurde: Die Eier vom Frosch sind, so lange sie sich im Ovarium befinden, mit seinen Säften isotonisch; daher schwellen sie auf und gehen zugrunde, wenn man sie in Wasser überträgt. Anders die befruchteten Eier; sie sterben umgekehrt in einer mit den Säften des Frosches isotonischen Lösung und entwickeln sich in normaler Weise nur in Wasser. Das hängt nach BACKMAN und RUNNSTRÖM damit zusammen, daß durch die Befruchtung in einer im einzelnen nicht bekannten Art und Weise der osmotische Druck der Eier stark herabgesetzt wird. Sind die Eier nun ins Wasser abgesetzt, so steigt mit ihrer Entwicklung der osmotische Druck in ihnen wieder langsam mehr und mehr an, um schließlich den normalen osmotischen Druck der Säfte des Frosches abermals zu erreichen. BACKMAN und RUNNSTRÖM wiesen dies in der Weise nach, daß sie durch Zerpressen der Eier oder der Embryonen einen Brei herstellten, dessen Gefrierpunktserniedrigung als Maß des osmotischen Drucks bestimmt wurde; sie fanden:

Befruchtete ungeteilte Eier	$\Delta = 0,045^{\circ}$
Embryonen mit halbmondförmigem Urmund	0,042 ^o
Embryonen mit ringförmigem Urmund	0,215 ^o
5 Tage alte Larven	0,230 ^o
20—25 Tage alte Larven	0,405 ^o

Das gleiche Verhalten wurde von BACKMAN und von BIALASZEWICZ auch bei anderen Amphibien, bei Fischen und bei Hühnerembryonen festgestellt. Auf Grund dessen kann man annehmen, daß die allmähliche osmotische Drucksteigerung den Sinn hat, zunächst einmal durch kontinuierliches Einsaugen von Wasser in das sich entwickelnde Gewebe eine Volumenzunahme zu erzielen, welche äußerlich als Wachstum imponiert (DAVENPORT, SCHAFER); nachträglich müßten sich dann in das turgeszente Gewebe irgendwie feste Stoffe einlagern. Man kann freilich die Beobachtungen auch so deuten, daß die osmotische Spannung, ähnlich wie es für das Pflanzenwachstum öfter angenommen wurde, nur eine Wachstumsbedingung, nicht die Wachstumsursache ist.

Andere Hypothesen über die Natur des Wachstumsvorgangs sollen wegen ihrer Unsicherheit hier beiseite gelassen werden.

Zweiter Teil.

Physiologie der animalischen Funktionen.

20. Kapitel.

Die Muskeln.

Reizungsmethoden 296. Die Muskelzuckung 298. Die Muskelkraft 300. Die Ermüdung 301. Die Muskelströme 303. Der Tetanus 307. Der Tonus 309. Der Stoffwechsel der Muskeln 312. Die Wärmeproduktion 315. Die Leichenstarre 318. Theorie der Muskelkontraktion 318. Das Stehen 320. Das Gehen 322.

Mit dem Kapitel über die Lehre von der Muskeltätigkeit wenden wir uns zu dem zweiten großen Abschnitt der Physiologie, zur *Physiologie der animalischen Funktionen*, welche wir schon zu Anfang dieses Buches der Physiologie der vegetativen Funktionen gegenübergestellt haben. Diese Art der Einteilung der Physiologie, die seit etwa hundert Jahren, seit BICHAT sie vorschlug, herkömmlich geworden ist, stammt aus einer Zeit, in der die Lebenserscheinungen bei Tier und Pflanze noch durch eine weit tiefere Kluft getrennt schienen, als es heute anerkannt wird. Bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts nahm man noch an, daß auch in denjenigen Funktionen, mit welchen wir uns bisher hauptsächlich beschäftigt haben, Tier und Pflanze einen Gegensatz bilden; die Pflanze wurde als assimilierender, synthetisch tätiger, reduzierender, endotherm arbeitender Organismus aufgefaßt, während beim Tier von alledem die Kehreseite, nämlich Dissimilation, Abbau, Oxydation, exothermes Reagieren hervortritt. Aber heute wissen wir ja seit langem, daß diese Charakterisierung der Pflanze vornehmlich für ihre Chlorophyll führenden Vertreter richtig ist, und auch nur so lange, als Licht auf sie einstrahlt. Und daß auf der anderen Seite, bei den Tieren, die synthetischen Fähigkeiten erheblich stärker ausgebildet sind, als man sonst annahm, das haben uns ja gerade die Forschungen der letzten Jahrzehnte, über die auch hier im Kapitel über den Stoffwechsel berichtet wurde, gelehrt. Trotzdem ist die Gegenüberstellung von vegetativen und animalischen Funktionen auch weiterhin gerechtfertigt, aber in einem anderen Sinne, nämlich so, daß alle die vegetativen Funktionen, mit denen wir uns bisher beschäftigt haben, die Nahrungsaufnahme, die Stoffwanderung, die Atmung, der Stoffwechsel, die Sekretion und Exkretion, die Fortpflanzung und das Wachstum, zwar auch im Leben der Tiere ihre Rolle spielen, aber daß

außerdem das Tier noch durch Funktionen ausgezeichnet ist, durch deren Besitz es sich auffallend von der Pflanze unterscheidet. Ja man kann sagen, daß dieser Besitz derart in die Augen springt, daß man sogar über dem Trennenden das Verbindende bei Tier und Pflanze zuerst übersieht. Denn der unbefangene Beobachter erblickt in einer Katze, einer Taube und selbst in einem Krebs ein Wesen, das ihm deshalb verwandt ist, weil es, wie er selber, die Welt mit Empfindungen und Gefühlen zu erfassen, weil es, wie er selber, der Welt mit Wollen und Begehren, mit Zuneigung und Feindschaft gegenüberzutreten scheint, und dies vor allem, weil es wie er selber und zum Unterschied von den rein passiven Pflanzen handelnd Stellung nimmt zu den Vorgängen um ihn, und für alles das gebraucht es seine Sinne, sein Gehirn, seine Muskeln, lauter Organe, welche er bei den Pflanzen vermißt. Nun ist freilich auch dieser Gegensatz wieder auf die Spitze getrieben; die niederen, namentlich die festsitzenden Wirbellosen haben in ihrer Wesenheit unzweifelhaft viel Pflanzenhaftes, und die „empfindliche“ Mimose, die Insekten fangende und verzehrende Drosera und die umherkriechenden Myxomyzeten tragen tierische Charakterzüge. Aber im großen ganzen ist doch zu sagen, daß wir mit der Physiologie der animalischen Funktionen ein Gebiet betreten, an dem wir als tierische Organismen und vor allem als empfindende Wesen noch unmittelbarer interessiert sind als am Bisherigen. —

Wir beginnen den Abschnitt über die animale Physiologie mit der Physiologie der Bewegung, deren Organe die **Muskeln** sind.

Im großen ganzen kann man beim höheren Tier zwei Sorten von Muskeln unterscheiden, die Skelettmuskeln und die Viszeralmuskeln. Die *Skelettmuskeln* bewirken vornehmlich die Stellungnahme unseres Körpers zur Umwelt, dadurch, daß sie die einzelnen Teile des Knochengerüsts gegenseitig in Bewegung setzen. Sie sind kompakte Massen langer, nebeneinander geordneter Muskelfasern, welche im mikroskopischen Bild durch *Querstreifung* charakterisiert sind. Bei Erregung verkürzen sie sich im allgemeinen rasch, die Erregungsimpulse fließen ihnen gewöhnlich vom Zentralnervensystem zu. Besonders sind sie auch dem Gehirn unterstellt und sind damit *Organe der Willkür*. Die *Viszeralmuskeln* dagegen führen die Bewegungen der Eingeweide aus, sie umschließen, gewöhnlich schichtweise angeordnet, Hohlräume, wie die Lumina von Magen und Darm, von Blase und Uterus, von Gefäßen und Bronchen. Sie sind aus kürzeren, spindelförmigen, nicht quergestreiften, sondern *glatten Muskelfasern* zusammengesetzt, welche teils nebeneinander, teils in Längsrichtung aneinander gereiht sind. Ihre Verkürzung erfolgt im allgemeinen langsam und oft unabhängig vom Zentralnervensystem, der willkürlichen Beeinflussung sind sie gewöhnlich entzogen. Diese Gegenüberstellung ist jedoch nicht für alle Fälle richtig. So besteht z. B. der *M. ciliaris* des Auges aus glatten Muskelfasern und kann trotzdem bei der Akkommodation willkürlich betätigt werden, und andererseits gehört etwa der *M. stapedius* des Ohres zu den quergestreiften Muskeln, und doch gelingt es nicht, ihn absichtlich zu innervieren.

Wenn man die Funktion der Muskeln experimentell untersuchen will, so kann man sich zu ihrer Erregung verschiedener Reize bedienen. Die natürlichen Verhältnisse imitiert man bei der „indirekten“ *Erregung*, d. h. bei der Erregung von den Nerven aus, welche sich zu sämtlichen Muskeln hinbegeben. Eine künstliche „direkte“ *Erregung* kann durch mechanische, osmotische, chemische, thermische oder elektrische Reizung geschehen.

Mechanisch kann man einen Muskel in einfacher Weise erregen, indem man z. B. einen schwachen Schlag auf ihn ausübt; bei dieser Form der Reizung werden aber leicht die oberflächlichen Muskelfasern zerquetscht. Thermische Reize sind nur wirksam, wenn der Temperatursprung rasch erfolgt; auch das ist ohne Schädigung schwer auszuführen. Chemische Reize, z. B. Betupfen mit Mineralsäuren, mit kalkfällenden Mitteln, wie Natriumzitrat oder Natriumoxalat, mit Alkohol, Chloroform u. a.,

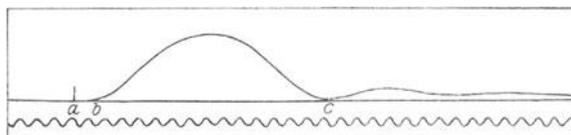


Abb. 88. Isotonische Muskelzuckung.

a = Reizmoment. b—c = Kontraktion. Nach der Kontraktion einige elastische Nachschwingungen. Unten Stimmgabelschwingungen (1 Schwingung = $\frac{1}{100}$ Sek.).

und osmotische Reize, z. B. Einlegen in konzentrierte Kochsalzlösung, greifen ebenfalls die Muskulatur an und setzen dabei nicht sämtliche Fasern zu gleicher Zeit, sondern zunächst nur die oberflächlichen in Funktion. Günstiger ist unter den künstlichen Reizen der elektrische; denn der elektrische Strom durchsetzt sofort den ganzen Muskel, ferner macht es keine methodischen Schwierigkeiten, ihn beliebig kurze Zeit wirken zu lassen, und seine Stärke läßt sich ausgezeichnet dosieren. Aus diesen Gründen wird der elektrische Reiz auch vornehmlich ver-

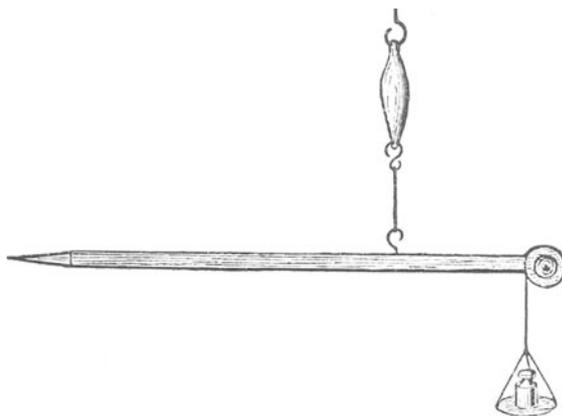


Abb. 89. Muskelhebel für isotonische Kontraktionen.

wendet und spielt auch in der medizinischen Praxis eine große Rolle. Über die verschiedenen Methoden der elektrischen Reizung und ihre Wirkung wird darum später (siehe Kap. 21) noch mehr gesagt werden.

In denjenigen Versuchen, welche zum Studium der Muskeltätigkeit ausgeführt wurden, ist weitaus am häufigsten der Induktionsstrom benutzt worden, welcher, mit Hilfe des DU BOIS-REYMOND'schen Schlitteninduktoriums durch gegenseitige Verschiebung der Primär- und Sekundärspule in seiner Intensität abgestuft, einen überaus flüchtigen Reiz, einen Induktionsschlag ausübt. Läßt man einen solchen auf einen ausgeschnittenen überlebenden Muskel, etwa auf den Gastroknemius eines

Frosches wirken, so antwortet dieser mit einer **Muskelzuckung**. Sie besteht in einer rasch vorübergehenden Verkürzung und Verdickung. Das Gesamtvolumen ändert sich dabei nicht (I. R. EWALD).

Den Verlauf der Zuckung in ihren Einzelheiten kann man nur erkennen, wenn man sie graphisch registriert. Zu dem Zweck hängt man den Muskel an einem Ende auf, befestigt am anderen einen Hebel, welcher in einer Schreibspitze endigt, und führt, während der Muskel gereizt wird, mit großer Geschwindigkeit eine Schreibfläche, etwa die Zylinderfläche einer Kymographiontrommel (siehe S. 145) an der Schreibspitze vorbei. Man erhält dann eine *Muskelkurve*, deren Abszissenwerte Zeiten, deren Ordinatenwerte Hubhöhen darstellen (siehe Abb. 88). Der Schreibhebel verzeichnet die Längenänderung des Muskelhebels exakt, wenn der Hebel an sich möglichst wenig Masse hat, und die Spannung des Muskels durch ein Gewicht erfolgt, welches nahe der Drehachse des Hebels, etwa an einer kleinen Rolle angreift (siehe Abb. 89). Würde nämlich der Hebel schwer sein oder die Last an einem langen Hebelarm angreifen, so würde die Trägheit der zu bewegendem Masse anfänglich die Verkürzung verzögern, bis die Spannung des Muskels einen gewissen Betrag erreicht hat; weiterhin, wenn die Massen in Schwingung versetzt sind, würden diese aber entsprechend ihrer Trägheit in dem einmal erreichten Bewegungszustand verharren, sich also unabhängig von dem Muskel fortbewegen, die vom Hebel geschriebene Kurve würde zu einer Schleuderkurve, welche von der Muskelkurve mehr oder weniger abweicht. Bei der beschriebenen Anordnung ist dagegen das Trägheitsmoment des an dem kurzen Hebelarm befestigten Gewichts so gering, daß die Schleuderung vermieden ist, der Muskel also bei gleichmäßiger Spannung, oder wie FICK es nannte, „*isotonisch*“ arbeitet.

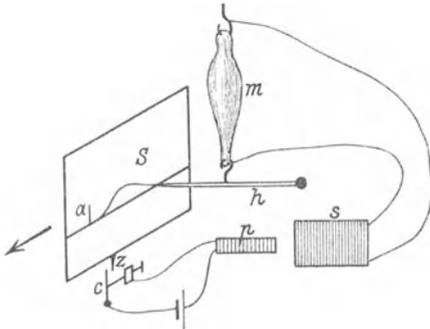


Abb. 90. Anordnung zur Aufzeichnung einer Muskelkurve (nach HERMANN).

Die isotonische Muskelzuckung verläuft im allgemeinen entsprechend der Abb. 88; aufsteigender und absteigender Ast der Kurve sind an nähernd symmetrisch gestaltet. Die leichten Schwingungen am Ende der Kurve rühren von der Elastizität des belasteten Muskels her und haben mit der eigentlichen Zuckung nichts zu tun. Gleichzeitig geschriebene Stimmgabelschwingungen lassen erkennen, daß *die Zuckung beim Skelettmuskel vom Frosch etwa 0,10''—0,17'' dauert*. Aber bei jedem Tier ist die Zuckungsdauer je nach der Muskelsorte verschieden. Bei vielen Tieren, z. B. bei Kaninchen und Hühnern, sind die Muskeln auch nach ihrer Farbe verschieden, man kann *rote und weiße (blasse) Muskeln* unterscheiden; die Zuckung der roten verläuft gedehnter als die der weißen (RANVIER). Die roten Muskeln findet man hauptsächlich da, wo es auf dauernde Betätigung ankommt, sie dienen zum Spannen von Faszien und Sehnen, zum Kauen, zur Atmung; die weißen Muskeln dagegen werden für vorübergehende, aber rasche Bewegungen, also vor allem zur Lokomotion benutzt. In Anpassung an diese verschiedene Funktion sind die roten Muskeln weniger ermüdbar als die weißen. Die Zuckung der *glatten Muskeln* verläuft viel gestreckter; sie dauert oft 50—100'', die Erschlaffungsphase ist dabei erheblich länger als die Kontraktionsphase.

Die Verkürzung beginnt nicht im Moment der Reizung, sondern erst nach einer gewissen *Latenzzeit (Stadium der latenten Reizung)*. Man mißt diese Zeit etwa auf folgende Weise (siehe Abb. 90): der am unteren Rand der beweglichen Schreibfläche S angebrachte Zahn z öffnet bei

deren Vorbeischnellen an der Schreibspitze einen im Primärkreis eingeschalteten Kontakt *c*, wodurch im Sekundärkreis ein Öffnungsinduktionsschlag erzeugt wird, welcher den Muskel zur Kontraktion und zur Verzeichnung einer Kurve veranlaßt. Bewegt man nun ein zweites Mal die Schreibfläche ganz langsam an der Schreibspitze entlang, so zeichnet diese bei Öffnung von *c* eine Senkrechte *a*, deren Fußpunkt einige Millimeter vor der Abhebung des aufsteigenden Kurvenastes von der Abszisse gelegen ist; dieser Abstand entspricht der Latenzzeit (siehe auch Abb. 88). Sie ist aus der Geschwindigkeit der vorbeischnellenden Schreibfläche zu berechnen und beträgt beim Skelettmuskel etwa 0,004—0,01". Doch ist sie in Wahrheit jedenfalls kürzer, da die Kontraktion stets nur an einer Stelle beginnt und dadurch zunächst die benachbarten Stellen, entsprechend der Elastizität des Muskels gedehnt werden; auf die Weise wird die Hebung der Schreibspitze etwas verzögert. Die gemessenen Werte der Latenzzeit sind um so größer, je langsamer die Zuckung verläuft; bei glatten Muskeln beträgt sie 0,5—1". Bei indirekter Reizung ist die Latenzzeit der Skelettmuskeln noch um etwa 0,005" länger, auch wenn man von der für die Fortleitung der Erregung im Nerven verbrauchten Zeit (siehe Kap. 21) absieht; der Übergang der Erregung vom Nerven auf den Muskel ist also mit einem besonderen Zeitverbrauch verbunden (BERNSTEIN).

Wie gesagt, beginnt bei Reizung die Kontraktion an einem Punkt; von dort pflanzt sie sich wellenförmig fort. Man kann die Geschwindigkeit der Ausbreitung dieser *Kontraktionswelle* messen, indem man auf zwei voneinander entfernte Stellen eines Muskels Schreibhebel auflegt, welche die Verdickung registrieren; man findet alsdann für den Skelettmuskel beim Frosch etwa 3 m, beim Kaninchen 5—10 m, beim Menschen 10—15 m; für glatte Muskeln dagegen nur 10 mm und weniger pro Sekunde (BERNSTEIN, HERMANN). Von der Reizstelle breitet sich die Kontraktionswelle nach beiden Seiten über den Muskel aus; da bei vielen Muskeln der Nerv in der Mitte ihrer Länge eintritt, so laufen also bei der Erregung vom Nerven aus zwei Kontraktionswellen gleichzeitig in entgegengesetzter Richtung über den Muskel. Der Muskel hat demnach *doppelsinniges Leitungsvermögen*.

Die Hubhöhe bei einer Muskelkontraktion hängt unter anderem von der Reizstärke ab. Erregen wir z. B. mit einem elektrischen Strom, so läßt sich eine Stromstärke finden, bei welcher der Muskel eben nur mit einer ganz leichten Kontraktion reagiert. Man bezeichnet den so wirksamen Reiz als *Schwellenreiz* oder als *Reizschwelle*. Schwächere Ströme sind dann als „*unterschwellige Reize*“ anzusehen. Läßt man die Reizstärke von der Schwelle ab anwachsen, so nimmt mit der Reizstärke die Hubhöhe zu, aber nur bis zu einer gewissen Größe, weitere Steigerung der Reizstärke vermehrt den mechanischen Effekt nicht. Zu „*maximalen Zuckungen*“ gehören also gleicherweise „*maximale*“ und „*übermaximale*“ Reize. Dies beruht darauf, daß das Alles- oder Nichts-Gesetz (S. 127) nur scheinbar für den Skelettmuskel nicht gilt. Nämlich der Muskel setzt sich aus zahlreichen Fasern zusammen, die nicht alle die gleiche Reizschwelle haben; beim Schwellenreiz für den ganzen Muskel sprechen also nur die allererregbarsten Fasern, diese aber sogleich maximal an, dann folgt bei geringer Steigerung der Reizstärke eine zweite Gruppe von Fasern und so fort, bis der Schwellenwert für alle Fasern erreicht ist (LUCAS). Das Herz verhält sich nur dadurch anders, daß bei ihm die Erregung eines Muskelements sich gleich auf alle übrigen fortpflanzt.

Die Hubhöhe ist ferner von der Länge der Muskelfasern abhängig; je länger der Muskel, desto größer die Hubhöhe. Dies beruht darauf, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Kontraktion so groß ist, daß das Ende des Muskels längst von der Kontraktionswelle erreicht ist, wenn auch der Anfang sich noch in Kontraktion befindet.

Ein dritter Faktor der Hubhöhe ist die Belastung. Im allgemeinen nimmt die Hubhöhe mit steigender Belastung ab; nur bei schwacher Belastung nimmt sie anfänglich oft zu. Läßt man die Belastung mehr und mehr anwachsen, so gelangt man zu einem Gewicht, welches der Muskel eben nicht mehr zu heben vermag. Diese Last ist ein Maß für das Kontraktionsvermögen, sie repräsentiert die **Muskelkraft**. Bestimmt man dieselbe für verschiedene Muskeln, so findet man, daß die *Muskelkraft unabhängig von der Länge, aber proportional dem Querschnitt ist* (ED. WEBER). Unter Querschnitt ist dabei die Summe aller Querschnitte der einzelnen Muskelfasern zu verstehen. Ist ein Muskel also schräg gefasert, oder ist der Verlauf der Fasern gefiedert, so ist der „*physiologische Querschnitt*“ größer als der physikalische, die Kraft solcher Muskeln also relativ zu ihrem physikalischen Querschnitt groß.

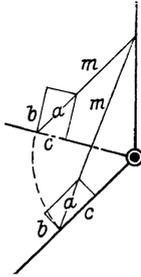


Abb. 91. Änderung der Kraftkomponenten eines Beugemuskels im Verlauf der Beugung.

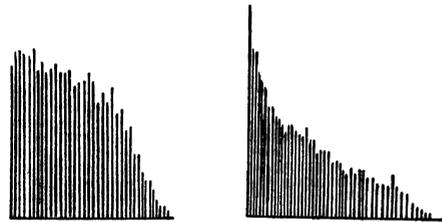


Abb. 92. Ermüdungskurven von individuell verschiedener Form, unter den gleichen Bedingungen aufgenommen.

Man begegnet solchem Aufbau aus schrägen kurzen Fasern da, wo große Lasten zu bewältigen, dem Aufbau aus parallellaufenden langen Fasern da, wo große Hubhöhen zu erzielen sind.

Die Kraft des Muskels ist am größten zu Anfang der Kontraktion und nimmt mit deren Fortschreiten mehr und mehr ab. Dies lehrt der *SCHWANNsche Versuch*: man hängt einen Muskel an einem Ende auf und bringt an seinem anderen Ende ein Gewicht an, das man unterstützt, so daß der Muskel es erst im Verlauf seiner Kontraktion von seiner Unterlage abhebt; nun kann man es durch beliebige Annäherung der Unterlage an den oberen Aufhängepunkt so einrichten, daß der Muskel entweder gleich bei Beginn der Kontraktion mit dem Gewicht belastet wird, oder erst wenn er sich bereits um ein kleineres oder größeres Stück seiner Ruhelänge verkürzt hat; je nachdem wird die maximale Last, welche er eben zu heben vermag, größer oder kleiner sein. Dies Verhalten spielt bei den natürlichen Leistungen unserer Muskeln eine große Rolle: sei in der Abb. 91 durch eine Linie *m* ein Muskel dargestellt, welcher, an einem Knochen entspringend, über ein Gelenk weg an einem zweiten Knochen inseriert; wenn sich der Muskel verkürzt, so werden die beiden Knochen gegeneinander gebeugt. Die in Richtung des Zugs wirkende Kraft des Muskels sei durch *a* dargestellt; sie kann nach dem Kräfteparallelogramm

in zwei Komponenten zerlegt werden, in die wirksame tangential gerichtete Komponente *b* und in die gegen die Drehachse gerichtete und darum unwirksame Komponente *c*. Die Zeichnung lehrt nun, daß mit Zunahme der Beugung die wirksame Kraftkomponente zunächst größer und größer wird. Wäre das nicht der Fall, so würde mit fortschreitender Beugung ein den unteren Knochen belastendes Gewicht wegen der Abnahme der Muskelkraft schwerer und schwerer gehoben; so aber spüren wir von der Abnahme nichts, weil sie durch die Zunahme der wirksamen Kraftkomponente kompensiert wird.

Die Muskelkraft, auf die Einheit des Querschnittes 1 cm^2 und auf die Ruhelänge des Muskels bezogen, heißt *absolute Muskelkraft*. Sie beträgt für den Frosch-Gastroknemius im Mittel 1,8 kg, für den Bizeps und Brachialis des Menschen im Mittel 11 kg (BETHE). Für den Menschen wurden die ersten Werte von ED. WEBER so bestimmt, daß die größte Last aufgesucht wurde, die ein Mensch eben noch zu heben vermag, dadurch, daß er sich auf die Zehen stellt; mißt man den Hebelarm von den Metatarsusköpfchen bis zur Ferse als dem Angriffspunkt der Kraft der Wadenmuskulatur, ferner den Hebelarm von den Metatarsusköpfchen bis zum Angriffspunkt der Last, d. h. dem Schnittpunkt der Schwerlinie des Körpers mit dem Fuß (siehe S. 320), und endlich den physiologischen Querschnitt der Wadenmuskulatur an einer Leiche von ähnlicher muskulöser Beschaffenheit wie die Versuchsperson, so läßt sich die absolute Kraft berechnen.

Der Satz, daß die Hubhöhe mit steigender Belastung abnimmt, gilt im allgemeinen wohl bei isotonischer Anordnung, dagegen nicht, wenn sich die Spannung während der Kontraktion ändert. Die Spannung kann z. B. wachsen, wenn der Muskel gegen eine gespannte Feder arbeitet oder wenn er ein an seinem Ende befestigtes Gewicht heben soll, dessen Trägheit erst zu überwinden ist. Unter diesen Umständen, wo der Muskel statt isotonisch sich „auxotonisch“ kontrahiert, wachsen die Hubhöhen bis zu einem gewissen Maß mit der Belastung; jeder Spannungszuwachs wirkt sozusagen als neuer Reiz, welcher den Muskel zu stärkerer Kontraktion veranlaßt.

Wird ein Muskel längere Zeit beansprucht, so zeigen sich Erscheinungen von **Ermüdung**. Diese äußert sich erstens in einer *Abnahme der Hubhöhe*. Reizt man den Muskel z. B. rhythmisch mit maximalen Reizen, so sinkt (nach einem anfänglichen Stadium der Zunahme, der sogenannten „Treppe“) die Hubhöhe kontinuierlich bis auf Null ab. Der Abfall ist um so steiler, je größer die Belastung ist, und je rascher die einzelnen Reize aufeinander folgen. Der Zuckungsverlauf wird ferner darin durch die Ermüdung abgeändert, daß die Zuckung mehr Zeit in Anspruch nimmt als sonst; besonders das Stadium der Erschlaffung zieht sich in die Länge. Das geht bei hochgradig ermüdeten Muskeln so weit, daß nach der Kontraktion überhaupt keine vollständige Erschlaffung mehr zustande kommt, sondern ein *Verkürzungsrückstand* oder eine *Kontraktur* übrig bleibt. Leichte Grade von Verkürzungsrückstand sieht man übrigens auch häufig beim unermüdeten Muskel, wenn er sehr wenig belastet wird (siehe Abb. 88, S. 297). Der Verlangsamung des Kontraktionsablaufs entspricht auch eine Verlangsamung der Kontraktionswelle; sie kann so ausgesprochen werden, daß bei lokaler Reizung die Kontraktion am Reizort stehen bleibt; es bildet sich ein sogenannter *idiomuskulärer Wulst*. Man kennt die Erscheinung besonders vom absterbenden Muskel, welcher auf einen Schlag mit einem Lineal quer zur Faserrichtung oder beim Darüberstreichen mit solcher Wulst-

bildung reagiert. Durch Ermüdung wird ferner die Kraft des Muskels herabgesetzt, seine Reizschwelle erhöht.

Läßt man den vollständig ermüdeten Muskel ruhen, so tritt *Erholung* ein, auch dann, wenn er ausgeschnitten und somit aus dem Kreislauf ausgeschaltet ist. Man sollte das letztere vielleicht nicht erwarten; denn die Ermüdung beruht natürlich darauf, daß der Muskel bei seinen Leistungen von seinem Gewebsmaterial verbraucht, und daß sich Zersetzungsprodukte als „Ermüdungsstoffe“ ansammeln; das Blut aber kann neues Nährmaterial heranschaffen und die Zersetzungsprodukte fortspülen. Wenn trotzdem auch ohne Blutzufuß ein gewisses Maß von Erholung zustande kommt, so beruht das darauf, daß der Sauerstoff der Luft gewisse Ermüdungsstoffe, auf die wir später bei der Erörterung des Muskelchemismus näher eingehen werden (siehe S. 312), beseitigt; dafür muß aber der Sauerstoff Zeit haben, ins Innere des Muskels hineinzudiffundieren.

Ein durchbluteter Muskel erholt sich nicht nur leichter, sondern er ermüdet auch schwerer. Wird er z. B. irgendwie in regelmäßigem Rhythmus erregt, so kann er, wenn die Erholungspausen zwischen den einzelnen Erregungen eine gewisse Mindestgröße einhalten, praktisch unermüdetlich arbeiten, bei schnellerem Reiztempo sinkt aber auch seine Leistungsfähigkeit. Beim Menschen hat man Erfahrungen darüber vor allem mit dem *Ergographen* von Mosso gesammelt.

Dieser besteht aus einem Gestell, in welchem der Unterarm horizontal in Supinationshaltung durch Riemen fixiert wird; um den Mittelfinger wird ein Ring gelegt, von welchem ein Seil über eine Rolle zu einem Gewicht führt. Die Beugemuskelatur des Fingers hat nun rhythmisch das Gewicht so hoch wie möglich zu heben; die Hubhöhen werden mit Hilfe eines an dem Seil und senkrecht zu seiner Verlaufsrichtung befestigten Schreibhebels auf einer Kymographiontrommel registriert.

Man erhält auf die Weise „Ermüdungskurven“ von der Art der in Abb. 92 (S. 300) reproduzierten. Ihr Verlauf ist, abgesehen von individuellen Eigentümlichkeiten, natürlich wieder abhängig von der Größe der Belastung und von dem Reiztempo, von der Größe der Erholungspausen, ferner aber auch vom allgemeinen Wohlbefinden, vom Ernährungszustand, von der Übung, bei willkürlicher Innervation der Muskulatur vom Grad und von der Erschöpfbarkeit der Willenskraft, von der Mitwirkung geistiger Arbeit und anderem mehr. Der Ergograph ist daher besonders häufig auch bei experimentell-psychologischen Studien in Anwendung gekommen.

Man hat diese Erfahrungen am Ergographen auch in die Praxis der beruflichen Arbeit übertragen, welche ja sehr häufig rhythmischen Charakter hat. TAYLOR, der Urheber der „wissenschaftlichen Betriebsführung“, die heute nach ihm als „Taylorisierung“ bezeichnet wird (siehe S. 202), hat z. B. bei Schaufelarbeitern neben der zweckmäßigsten Schaufelbewegung die günstigste Schaufellast und das günstigste Schaufeltempo festgestellt, bei welchen ein Leistungsoptimum erzielt werden kann, hat ferner, je nach dem zu schaufelnden Material, z. B. Erz oder Kohle, die Schaufelgröße der günstigsten Schaufellast adaptiert und erreichte auf diese Weise, daß 140 Arbeiter in der gleichen Zeit dasselbe leisteten wie sonst 500 Arbeiter, daß der Durchschnittsarbeiter statt 16 Tonnen 59 bewältigte, ohne dabei mehr zu ermüden.

Die Muskelkontraktion ist außer mit der Produktion von mechanischer Arbeit noch mit zwei weiteren energetischen Äußerungen verknüpft, mit der Produktion von Wärme und von Elektrizität. Der Zusammenhang von Wärmebildung und Arbeitsleistung hat uns schon früher beschäftigt, es wird hier aber noch einmal (siehe S. 315) darauf zurück-

zukommen sein. Auch der elektrischen Äußerung der Muskeltätigkeit, dem sogenannten Aktionsstrom, sind wir schon einmal, im Kapitel über die Herzphysiologie begegnet; die Aktionsströme des schlagenden Herzens haben, wie wir dort (S. 134) sahen, einen so charakteristischen Verlauf, daß ihre Registrierung als Elektrokardiogramm nicht nur ein allgemein physiologisches, sondern vor allem auch klinisches Interesse beansprucht. Die Aktionsströme der Skelett- und Eingeweidemuskeln stehen in dieser Hinsicht hinter den Herzströmen zurück, sie bilden nur unauffällige und anscheinend nicht sehr beachtenswerte Begleiterscheinungen der beiden anderen wichtigen energetischen Äußerungen der Muskel-funktion. Aber man muß sich nur einerseits klar machen, daß die elektrischen Organe der elektrischen Fische, welche nach ihrer embryonalen Entwicklung mit den Muskeln nahe verwandt sind, und welche vermöge der in ihnen hergestellten Spannungen von mehreren hundert Volt mächtige Schläge austeilen, in ihrem Bau und namentlich in ihrem Mangel an irgendwelchen Leitern erster Klasse von allen physikalischen Apparaten ähnlicher Wirksamkeit völlig abweichen, um sofort das theoretische Interesse an diesen Erscheinungen stark zu beleben; andererseits muß man sich ins Gedächtnis rufen, daß die Erscheinungen der „tierischen Elektrizität“ an der Eingangspforte der gesamten modernen Elektrizitätslehre stehen, welche die Hilfsmittel geschaffen hat, um Millionen von Motoren zu treiben, Riesenstädte zu erleuchten und viele Tausende von Kilometern voneinander entfernte Orte telegraphisch, telephonisch und drahtlos miteinander zu verbinden.

Als GALVANI im Jahre 1786, mit Experimenten an Froschmuskeln beschäftigt, die Muskeln, welche mit kupfernen Haken an dem eisernen Gitter der Terrasse aufgehängt waren, zucken sah, sobald sie zufällig mit beiden Metallen zugleich in Berührung kamen, als er diese Experimente dann systematisch wiederholte und stets dadurch Kontraktionen auszulösen vermochte, daß er die Muskeln mit einem aus zwei Metallen bestehenden Bogen berührte, da glaubte er mit seinen Versuchen in den Muskeln schlummernde Lebenskräfte zu wecken; er stellte sich vor, daß ein Muskel vermöge der in ihm wohnenden tierischen Elektrizität ähnlich wie eine Leydener Flasche geladen sei, und daß die Vereinigung der beiden Elektrizitäten durch den metallischen Bogen die Lebensäußerung der Bewegung auslöse. GALVANIS Gegner VOLTA wies jedoch schlagend nach, daß die polaren Gegensätze auch unabhängig von irgendwelchen Lebenserscheinungen auftreten, wenn man irgend einen feuchten Leiter zwischen zwei Metalle schaltet, und legte damit den Grund zum „Galvanismus“ und zum Aufbau der ganzen Lehre von der strömenden Elektrizität. Aber ein wichtiger Versuch, den GALVANI weiter anstellte, blieb zunächst unbeachtet: auch wenn man einen Muskel nicht mit einem Bogen aus zwei Metallen „schließt“, sondern mit dem eigenen Nerven, indem man z. B. das proximale Ende des am Gastroknemius hängenden N. ischiadicus auf den Sehenspiegel des Muskels oder noch besser auf einen frischen Querschnitt desselben fallen läßt, auch dann macht der Muskel eine Zuckung; diese „Zuckung ohne Metalle“ ist in der Tat, wie wir gleich sehen werden, ein Zeichen für das Vorhandensein von „tierischer Elektrizität“.

Die einfachste und dabei sehr sinnenfällige Demonstration eines bioelektrischen Stromes ist aber wohl der Nachweis des 1838 von MATTEUCCI entdeckten **Ruhestromes des Muskels**. Wenn man von einem

Muskel ein Stück abschneidet und eine Stelle der unverletzten Muskeloberfläche einerseits, eine verletzte Stelle andererseits mit einem Galvanometer in leitende Verbindung bringt, so beobachtet man eine Abweichung der Galvanometernadel, welche stunden-, ja tagelang bestehen bleibt. *Die verletzte Stelle, der „Querschnitt“, verhält sich dabei negativ gegen die unverletzte Stelle, den „Längsschnitt“*; wie also bei einem Daniellelement ein Strom vom positiven Kupferpol im äußeren Schließungsbogen zum negativen Zinkpol verläuft, so verläuft beim verletzten ruhenden Muskel ein „Ruhestrom“ vom Längsschnitt durch den äußeren Schließungsbogen zum Querschnitt. Die elektromotorische Kraft des Muskelelements beträgt in maximo etwa 0,08 Volt (E. DU BOIS-REYMOND).

Im einzelnen sind *die Spannungen auf der Muskeloberfläche* folgendermaßen verteilt: wenn das schraffierte Rechteck der Abb. 93 den Längsschnitt durch einen aus parallelen Fasern bestehenden zylindrischen Muskel bedeutet, dessen Fasern an beiden Enden quer durchgeschnitten sind, dann findet man die größte elektro-

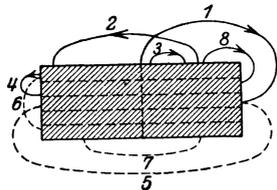


Abb. 93. Schema der Verteilung der elektrischen Spannungen auf der Oberfläche eines mit zwei Querschnitten versehenen Muskels.

motorische Kraft des Ruhestroms, wenn man von der Mitte eines Querschnitts und vom „Äquator“, d. h. der den Zylinder in zwei gleiche Hälften teilenden, in Querrichtung verlaufenden Linie ableitet (1). Aber man erhält auch Spannungsunterschiede, wenn man von zwei Punkten der unverletzten Oberfläche, des Längsschnitts, welche verschieden weit vom Äquator (2, 3), oder wenn man von zwei Punkten des Querschnitts, welche verschieden weit von dessen Mittelpunkt entfernt sind (4), ableitet; nur sind die elektromotorischen Kräfte kleiner als bei der günstigsten

Schaltung (1). Dagegen beträgt die Potentialdifferenz 0, wenn man symmetrische Punkte des Längsschnitts oder des Querschnitts miteinander verbindet (5, 6, 7).

Wenn so also ein Strom zustande kommt, sobald man Längs- und Querschnitt eines verletzten Muskels leitend miteinander verbindet, dann muß es bei der großen Stromempfindlichkeit von Muskeln oder Nerven auch möglich sein, diese durch ihren eigenen Ruhestrom zu erregen. Das ist denn auch wirklich durch GALVANIS klassisches Experiment, der „*Zuckung ohne Metalle*“ gezeigt. Läßt man, wie beschrieben, das proximale Ende des Nerven, welches distal mit dem „Längsschnitt“ des Muskels verwachsen ist, auf den Muskelquerschnitt fallen, so fließt im Moment der Berührung der Ruhestrom durch den Nerven, welcher auf diesen Reiz anspricht und den Muskel zum Zucken bringt. Ähnlich ist folgender Versuch: wenn man einen Sartorius vom Frosch aufhängt, sein unteres Ende quer abschneidet und nun das verletzte Ende in Ringerlösung eintaucht, so zuckt der Muskel im Moment des Eintauchens, offenbar, weil die Ringerlösung einen äußeren leitenden Schließungsbogen zwischen Längs- und Querschnitt herstellt.

Nach all dem ist Verletzung die Vorbedingung für den Ruhestrom; und in der Tat hat HERMANN gezeigt, daß *völlig unverletzte Muskeln*, wie man sie nur bei sehr sorgfältiger Präparation erhalten kann, *stromlos sind*. Damit wird der Ruhestrom eigentlich in das Gebiet des Pathologischen verwiesen und sollte uns deshalb hier vielleicht gar nicht weiter

beschäftigen. Immerhin ist er ein Lebensphänomen; denn in ihrer Totalität *abgestorbene Muskeln sind stromlos*. Für die Entstehung des Ruhestromes kommt es also jedenfalls in irgend einer Weise auf den Gegensatz von Leben und Tod des Protoplasmas an. Aber vor allem hat E. DU BOIS-REYMOND schon 1843 an dem verletzten Muskel eine Beobachtung gemacht, welche seine elektrischen Eigenschaften durchaus zum Objekt der Physiologie macht: wenn ein verletzter Muskel die Galvanometernadel aus ihrer Ruhelage abgelenkt hat, und man erregt von seinem Nerven aus durch einen Induktionsschlag eine Zuckung, so schwankt die Nadel alsbald für kurze Zeit gegen ihre Ruhelage zurück, vollführt, wie DU BOIS-REYMOND es ausgedrückt hat, eine „*negative Schwankung*“, um sich danach wieder auf den ursprünglichen, von dem Ruhestrom herrührenden Stand zurückzugeben; die negative Schwankung des Ruhestroms dauert etwa 0,004". Dieser Versuch demonstriert, daß die Tätigkeit des Muskels vom Auftreten eines flüchtigen elektrischen Stromes begleitet ist, welcher dem Ruhestrom entgegengerichtet ist; HERMANN hat den Strom **Aktionsstrom** genannt.

Die negative Schwankung kommt offenbar folgendermaßen zustande: gerade so, wie eine verletzte Stelle sich negativ gegen eine unverletzte Stelle verhält, so *verhält sich eine tätige Stelle negativ gegen eine ruhende*; wenn also ein Muskel von seinem Nerven aus erregt wird, so läuft von der Eintrittsstelle des Nerven aus nicht bloß eine Kontraktionswelle, sondern auch eine *Negativitätswelle* über den Muskel hin. Leitet man z. B. bei einem Gastroknemius von einem Ende aus der Gegend der Eintrittsstelle des N. ischiadicus und vom anderen Ende, welches durch Abschneiden der Achillessehne verletzt worden ist, zum Galvanometer ab (siehe Abb. 94), so wird der Ruhestrom, welcher in Richtung des Pfeils 1 fließt, durch den Aktionsstrom von der Richtung des Pfeils 2 im selben Moment mehr oder weniger aufgehoben, in welchem die Erregung ins Bereich der ersten Elektrode gelangt, weil sich dann sowohl die erregte Stelle, als auch der Querschnitt negativ verhalten. Eilt die Erregungswelle dann weiter, so gelangt sie zum Querschnitt, der bereits negativ ist, sein elektrisches Verhalten also nicht weiter ändern wird, während dasjenige Ende, an welchem der Nerv eintritt, inzwischen wieder positiv geworden ist.

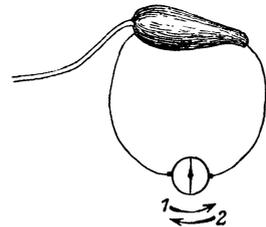
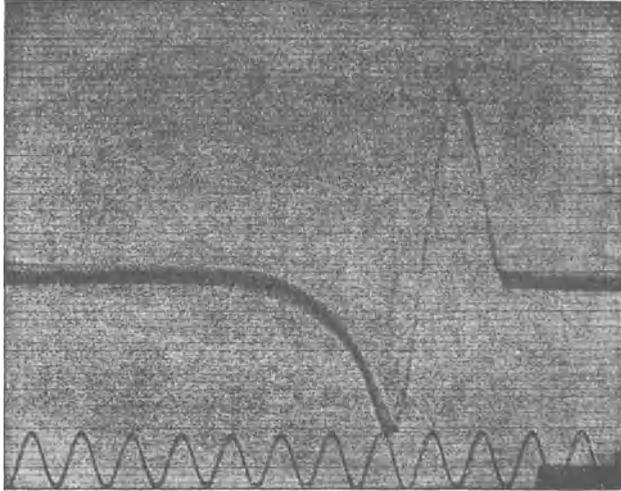


Abb. 94. Negative Schwankung des Ruhestroms.

Registriert man gleichzeitig die Negativitäts- und die Kontraktionswelle, so findet man, daß *die negative Schwankung schon ins Latenzstadium hineinfällt*. Dies läßt sich auf einfache Weise auch folgendermaßen demonstrieren: wenn man den Nerven eines Nervmuskelpreparates auf ein langsam schlagendes Herz legt, dessen Latenzstadium ziemlich groß ist, so wird der Muskel im Tempo des Herzschlages durch die Aktionsströme des Herzens gereizt, aber die Muskelzuckung geht der Herzaktion stets voraus. Dies beweist, daß der elektrische Vorgang der Erregung zugeordnet ist und nicht der Kontraktion. Besonders deutlich folgt das aus der Feststellung, daß auch ein Herz, das etwa durch Camangel zum Stillstand gekommen ist, noch ein annähernd unverändertes Elektrokardiogramm produziert (MINES).

Ist die eben angegebene Deutung der negativen Schwankung richtig, dann läßt sich nicht bloß das Vorkommen, sondern auch die Beschaffenheit der *Aktionsströme unverletzter Muskeln* voraussagen. Erregt man einen unverletzten stromlosen Muskel von seinem Nerven aus, während man von seinen beiden Enden zum stromanzeigenden Instrument ableitet, so wird beim Eintritt der Erregung in den Muskel ein Strom zustande kommen, welcher im äußeren Schließungsbogen von dem

←



$\frac{1}{148}''$

Reizung

Abb. 95. Diphasischer Aktionsstrom der Unterarmflexoren des Menschen (nach GARTEN). (Aus WINTERSTEINS Handbuch der vergleich. Physiologie).

noch untätigen Muskelende zu dem tätigen Ende, an dem der Nerv eintritt, gerichtet ist; kurz darauf, wenn die Erregungswelle sich bis ans andere Ende ausgebreitet hat, und inzwischen das zuerst tätige Ende zur Ruhe zurückgekehrt ist, wird ein entgegengesetzter Strom zustande kommen. *Der Aktionsstrom des unverletzten Muskels* muß also *doppelphasisch* sein. Will man sich hiervon überzeugen, so ist das Galvanometer dafür nicht geeignet; denn es ist viel zu träge, als daß

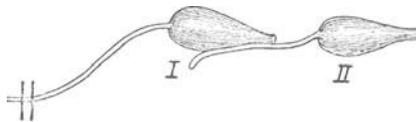


Abb. 96. Sekundäre Zuckung.

es den beiden entsprechend der großen Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erregungswelle rasch aufeinander folgenden, entgegengesetzten Stromimpulsen folgen könnte. Dagegen ist das Kapillarelektrometer und vor allem das Saitengalvanometer V (s. Abb. 46, S. 133) trägheitsfrei genug, um den diphasischen Aktionsstrom wiederzugeben. Abb. 95 stellt das Photogramm eines Saitengalvanometerausgangs dar, welcher durch Erregung der menschlichen Unterarmflexoren durch einen Induktionsschlag vom N. medianus aus hervorgerufen wurde.

Die Tatsache, daß der unversehrte tätige Muskel einen Strom erzeugt, ist übrigens lange bekannt und ohne jeden Apparat schon 1842 von MATTEUCCI demonstriert worden (siehe Abb. 96): stellt man sich zwei Nervmuskelpräparate her, legt den Nerven des zweiten auf den Muskel des ersten und reizt dann den Nerven des ersten mit einem Induktionsschlag, so kontrahiert sich nicht nur Muskel I, sondern auch

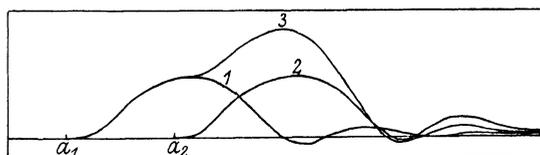


Abb. 97. Superposition zweier Einzelzuckungen (1 und 2), welche in den Zeitmomenten a_1 und a_2 erregt werden. 3 = die durch die Superposition entstandene Kurve.

Muskel II vollführt eine „sekundäre Zuckung“, weil er durch den Aktionsstrom des Muskels II von seinem Nerven aus gereizt wird.

Kehren wir nun zunächst wieder zu den mechanischen Leistungen des Muskels zurück, so haben wir uns zu vergegenwärtigen, daß die bisher allein erörterte Muskelzuckung eine Kontraktionsform darstellt, welche im Leben — wenigstens bei den Skelettmuskeln — nur eine untergeordnete Rolle spielt. Die Bewegung, welche diese Muskeln ganz vorwiegend

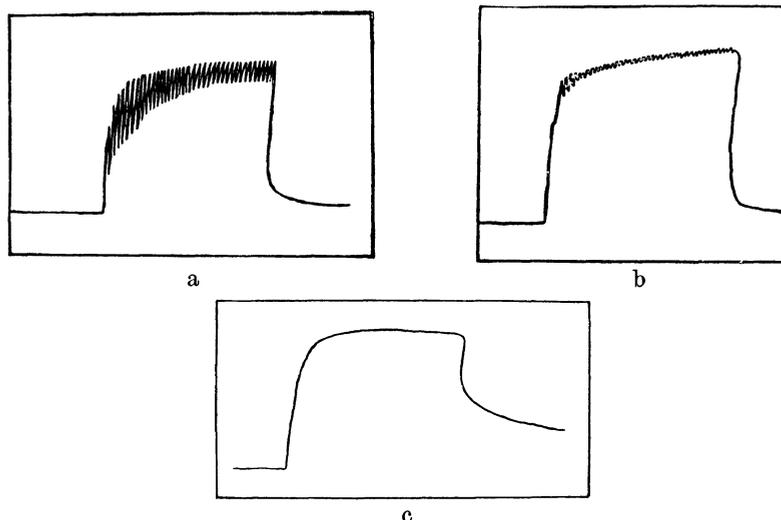


Abb. 98. Superposition von Zuckungen durch Reize von immer größerer Frequenz.
a und b = unvollkommener, c = vollkommener Tetanus.

ausführen, ist nicht eine flüchtige, in Bruchteilen einer Sekunde sich abspielende Kontraktion, sondern eine *Dauerverkürzung* oder ein **Tetanus**, vergleichbar der krampfhaften und lange andauernden Zusammenziehung, welche die Muskeln im Gefolge einer Infektion mit den Tetanusbazillen befällt. Experimentell kann man einen Tetanus beim ausgeschnittenen Muskel am einfachsten so erzeugen, daß man ihn statt mit einem einzelnen mit zahlreichen rasch aufeinander folgenden Induktions-

schlägen reizt, wie man sie z. B. durch Einschalten eines WAGNERSCHEN Hammers in den Primärkreis eines DU BOIS-REYMONDSCHEN Schlitteninduktoriums erhält (siehe Abb. 98c).

Das *Zustandekommen des Tetanus* kann man nach HELMHOLTZ analysieren, indem man statt eines einzelnen zunächst zwei Induktionsschläge rasch nacheinander auf den Muskel wirken läßt. Erfolgt der zweite Schlag zu einer Zeit, wo der durch den ersten Schlag gereizte Muskel noch nicht wieder erschlaft ist, so kontrahiert dieser sich abermals, und zwar ungefähr mit einer Stärke, als wenn er von seiner Ruhelänge ausginge; die beiden Zuckungen superponieren oder summieren sich also (siehe Abb. 97). Läßt man drei Induktionsschläge in geeignetem Abstand wirken, so superponieren sich drei Zuckungen. Es ist klar, daß auf die Weise, auch wenn jeder Reiz für sich eine maximale Zuckung erzeugen würde, durch *Superposition* eine Hubhöhe von einer Größe zustande kommt, welche die maximale Hubhöhe bei einer einzelnen Zuckung weit übersteigt.

Folgen bei einem Froschmuskel, dessen Zuckung etwa $\frac{1}{10}$ " dauert, zahlreiche Reize in einem zeitlichen Abstand von weniger als $\frac{1}{10}$ ", aber mehr als $\frac{1}{20}$ ", so muß eine Dauerverkürzung zustande kommen, bei welcher die Hubhöhe fortwährend im Tempo des Reizes etwas steigt oder fällt, es kommt zu einem *unvollständigen* oder *diskontinuierlichen Tetanus* (siehe Abb. 98a und b). Wirken aber mehr als 20 Reize pro Sekunde, d. h. wirkt jeder folgende Reiz, noch bevor der Muskel Zeit findet, aus dem vom vorhergehenden Reiz angeregten Kontraktionszustand in Erschlaffung überzugehen, so resultiert ein *vollkommener* oder *kontinuierlicher Tetanus* (siehe Abb. 98c). Hieraus ergibt sich, daß ein Muskel auf eine um so geringere Reizfrequenz mit glattem Tetanus anspricht, je langsamer seine Einzelzuckung verläuft. Daher bekommt man beim Froschmuskel einen vollkommenen Tetanus im allgemeinen mit 12—20 Reizen, bei roten Muskeln des Kaninchens mit 10, bei weißen mit 20—30, bei glatten Muskeln schon mit 6 und weniger Reizen pro Sekunde. Daher ist auch die für einen kontinuierlichen Tetanus zureichende Reizfrequenz um so kleiner, je ermüdet der Muskel ist (siehe S. 301).

Wie gesagt, übersteigt das Maß der *Verkürzung im Tetanus* in der Regel bei weitem die maximale Hubhöhe bei einer Einzelzuckung; der tetanisierte Muskel vermag sich um 65—85% seiner Ruhelänge zu kontrahieren. Dies wird folgendermaßen erklärt: ähnlich wie bei der auxotonischen Kontraktion der Spannungszuwachs als Reiz für eine weitere Zunahme der Spannung wirkt (siehe S. 301), so bewirkt hier bei der tetanisierenden Erregung der zweite Reiz, der den durch den ersten Reiz bereits in Spannung versetzten Muskel trifft, eine weitere Zunahme der Spannung.

Auch die *Muskelkraft* ist *im Tetanus* größer, als bei einer einzelnen Zuckung.

Im Tetanus geht der Muskel anscheinend in eine neue Ruhelage über, welche sich von dem gewöhnlichen Ruhezustand durch eine andere Form, nämlich durch geringere Länge und größere Dicke auszeichnet. In Wirklichkeit entspricht diese äußerliche Ruhe aber durchaus keinem innerlichen Ruhezustand. Erstens kann man das an den *elektrischen Eigenschaften des Muskels während des Tetanus* erkennen. Während die den Einzelreizen entsprechenden Zuckungen bei frequenter Reizung im Tetanus miteinander völlig verschmelzen, bleiben die zugehörigen *Aktionsströme* im allgemeinen separiert; der dauerverkürzte Muskel läßt daher die Saite des Saitengalvanometers im Tempo der rhythmischen Reize hin und her schwirren. Auch die Dauerverkürzungen, welche die Muskeln des Menschen im allgemeinen ausführen, sind als Tetani

aufzufassen; denn wenn man einen Muskel während seiner natürlichen, z. B. willkürlichen Anspannung mit dem Saitengalvanometer verbindet, so registriert dieses zahlreiche diphasische Aktionsströme, welche in Intervallen von etwa $\frac{1}{50}$ — $\frac{1}{200}$ '' aufeinander folgen (PIPER, DITTLER und GARTEN). Abb. 99 zeigt die elektrischen Oszillationen des Zwerchfells bei seiner natürlichen Innervation (nach DITTLER und GARTEN).

Die innerliche Diskontinuität der Tätigkeit während des Tetanus findet ferner in dem sogenannten Muskelton einen Ausdruck. Setzt man ein Stethoskop auf den Bizeps und läßt ihn willkürlich anspannen, so hört man ein dumpfes Geräusch. Den eigenen Muskelton kann man zu hören bekommen, wenn man die äußeren Gehörgänge verschließt und dann die Kiefer durch Anspannung der Kaumuskelatur fest aufeinander preßt. Nach HELMHOLTZ entspricht dem Muskelton ein Oszillationsrhythmus von 12—20 pro Sekunde. Tetanisiert man einen ausgeschnittenen Muskel künstlich durch frequente elektrische Reize, so hört man einen Muskelton von der Frequenz des Unterbrechers. Mit der diskontinuierlichen Erregung hängt allerdings der Muskelton nicht

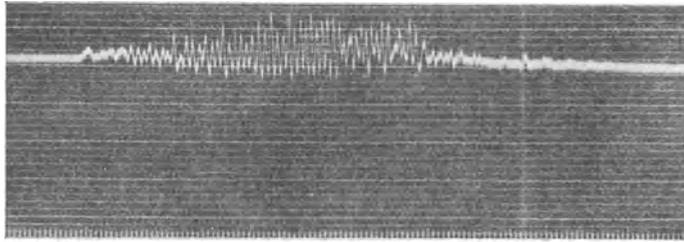


Abb. 99. Natürlicher Aktionsstrom des Zwerchfells bei der inspiratorischen Kontraktion (nach DITTLER und GARTEN).
Unten $\frac{1}{148}$ -Sekunden-Marken.

allein zusammen; denn auch bei der Herzsysteme hört man einen Muskelton (siehe S. 132), obwohl die Systole, nach ihrem Aktionsstrom zu urteilen, keinem Tetanus, sondern einer Einzelzuckung entspricht.

Für die innerliche Tätigkeit während der Dauerverkürzung sprechen aber vor allem die *Ermüdungserscheinungen*. Tetanisiert man einen ausgeschnittenen Muskel längere Zeit, so schwindet die Verkürzung mehr und mehr, oder hebt man durch willkürliche Anspannung der Schultermuskulatur den Arm, so sinkt er nach einiger Zeit langsam herab. Die Ermüdung dokumentiert sich außerdem auch darin, daß ein Tetanus besonders leicht von einem *Verkürzungsrückstand* oder einer *Kontraktur* gefolgt ist (siehe Abb. 98c).

Dies läßt vermuten, daß nicht bloß beim Übergang vom Ruhezustand in die Dauerverkürzung eine Arbeit geleistet wird, welcher selbstverständlich auch ein bestimmter chemischer Umsatz im Muskel entspricht, sondern daß der Muskel auch *während des Tetanus* „innere Arbeit“ leistet, d. h., daß zur Aufrechterhaltung des Tetanus ein Verbrauch von Stoffen stattfindet.

Bevor wir jedoch auf diese chemische Seite der Muskelaktion zu sprechen kommen, ist noch eine andere Form von Dauerverkürzung zu erörtern, der sogenannte **Tonus**. Betrachtet man die Dauerverkürzung mit den Augen des Technikers, so erscheint es im Vergleich mit der

erstaunlichen Vollkommenheit zahlreicher Einrichtungen unseres Körpers höchst unzweckmäßig, wenn zur dauernden Befestigung einer emporgehobenen Last dauernd Arbeit geleistet werden muß, statt daß man eine Sperrvorrichtung nach Art eines Hakens anbringt, die das Herabsinken der einmal gehobenen Last ohne Energieaufwand verhindert. Nun dient der Tetanus der natürlichen Muskelbewegungen zwar vielfach nur dem vorübergehenden Hochhalten einer gehobenen Masse. Aber in manchen Fällen muß doch ein Zug oder Druck entgegen einer Kraft über lange Zeiträume, eventuell sogar lebenslänglich ausgeübt werden, ohne daß Ermüdung erfolgen darf, so z. B. von seiten der Gefäßmuskeln, welche die Arterien umspannen. In solchen Fällen scheint nun in der Tat die *Dauerverkürzung* öfter *ohne innere Arbeit* aufrecht erhalten zu werden; man spricht dann statt von Tetanus von Tonus, welcher letzterer sich also äußerlich gar nicht vom Tetanus unterscheidet, die Differenz erkennt man erst bei genauerer Analyse (BETHE). Dies sei an einem Beispiel dargelegt: Die aus glatten Muskelfasern bestehenden Schließmuskeln mancher Muscheln befinden sich andauernd in Spannung, da sie dem starken elastischen Zug der an den Schalen ansetzenden und diese öffnenden Schloßbänder das Gleichgewicht zu halten haben; sie ermüden dabei zeitlebens nicht. Wenn man ihren Tonus steigert, dadurch daß man eine Schale von der anderen durch ein angehängtes Gewicht loszureißen sucht, so tritt auch dann keine Ermüdung ein. Es kommt aber auch zu keiner Steigerung des Stoffwechsels. Wir werden nachher den Chemismus der Muskelaktion genau zu erörtern haben und werden dabei erfahren, daß im Tetanus der respiratorische Gaswechsel des Muskels erhöht ist; die Belastung der Muschelschale hat jedoch keinerlei Steigerung des Sauerstoffkonsums zur Folge (BETHE, PARNAS). Leitet man von dem Schließmuskel zu einem Saitengalvanometer ab, so bleibt die Saite ruhig, solange der Tonus konstant ist; nur wenn der Muskel sich verkürzt, z. B. wenn man die halbgeöffnete Muschel durch einen mechanischen Reiz zum Schließen veranlaßt, dann oszilliert die Saite wie beim Tetanus, aber nur solange, als die Verkürzung zunimmt (A. FRÖHLICH und H. H. MEYER).

Im Gegensatz zu den Muskeln, mit welchen wir es bisher zu tun hatten, geht also der Schließmuskel der Muscheln von einem Ruhezustand, in welchem er sich ganz wie ein totes elastisch gespanntes Band verhält, unter dem Einfluß eines Reizes zu einem neuen Ruhezustand über, in dem seine elastische Spannung eine andere, eine größere oder kleinere ist. Dies setzt voraus, daß, wiederum im Gegensatz zu den bisher betrachteten Muskeln, durch Erregung nicht bloß Spannung, Tonussteigerung erzeugt werden kann, sondern auch Entspannung, Tonuslösung.

Derartigen entgegengesetzten Erregungseffekten sind wir übrigens schon an anderer Stelle begegnet; so kann ja der Gefäßtonus nicht bloß vermittelt der Vasokonstriktoren gesteigert, sondern auch vermittelt der Vasodilatoren verringert werden; der Sympathikus wirkt auf das Herz positiv, der Vagus negativ inotrop. Auch weiß man durch Untersuchungen von BIEDERMANN, daß die quergestreiften Muskeln der Krebschere doppelt innerviert und durch elektrische Reize je nachdem sowohl zur Kontraktion als auch zur Entspannung zu bringen sind.

Ähnlich wie die Schließmuskeln der Muscheln verhalten sich nun noch andere Muskeln, namentlich auch Muskeln von Säugetieren. So gehen bei Vergiftung mit dem Tetanustoxin oder dem Alkaloid Bulbokapnin, ferner in der Hypnose und bei spastischen Kontrakturen infolge von Rückenmarkserkrankungen beim Menschen die Skelettmuskeln in einen Zustand langanhaltender Starreverkürzung über, während

deren weder Aktionsströme noch ein Muskeltonus auf eine „innere Arbeit“ hindeuten (A. FRÖHLICH und H. H. MEYER, BORNSTEIN und SÄNGER). Auch der Stoffwechsel ist im Gegensatz zum Tetanus bei manchen krankhaften Kontrakturen (infolge von Hydrozephalus oder bei spastischer Spinalparalyse) nicht erhöht gefunden (BORNSTEIN, GRAFE). Aber auch unter völlig physiologischen Bedingungen können Skelettmuskeln tagelang in Dauerverkürzung verharren, ohne Zeichen von Ermüdung oder sonst Zeichen innerer Arbeit zu gewähren. Das beste Beispiel ist die Umklammerung des Froschweibchens durch das Männchen, während deren die Galvanometersaite zu der von den Pektoralmuskeln abgeleitet wird, völlig in Ruhe bleibt, während sie sofort in Schwingungen gerät, wenn durch sensible Reizung, z. B. infolge einer irgendwie bedingten Lockerung der Umklammerung, der Tonus verstärkt, d. h. über den Tonus ein Tetanus darübergelagert wird (KAHN). Die Skelettmuskeln können also offenbar beide Sorten von Dauerverkürzung, Tonus und Tetanus, nebeneinander ausführen. Bei Seeigeln und Muscheln dienen dieser Doppelfunktion verschiedene Muskeln (v. UEXKÜLL); bei den Skelettmuskeln hängt die Tonusfunktion vielleicht mit dem Sarkoplasma zusammen, das in den für Dauerbetätigung mehr beanspruchten roten Muskeln (s. S. 298) reichlicher enthalten ist als in den weißen (BOTTAZZI). Ob die zweierlei Innervation der Muskeln mit markhaltigen Spinalnerven und mit marklosen Sympathikusästen (PERRONCITO, BOEKE) etwas mit der funktionellen Zweiteilung zu tun hat, ist noch strittig.

Die „innere Arbeit“ im Tetanus ermüdet den Muskel, wie wir gesehen haben, stark. Der Tonus als eine Ruheverkürzung ermüdet dagegen nicht. Man kann daher auch die Unermüdbarkeit als ein einfaches Merkmal des Tonusmuskels betrachten, wie es BETHE getan hat. BETHE wählte als Maß der Ermüdbarkeit den sogenannten „Tragerekord“; darunter versteht er das Produkt aus dem vom verkürzten Muskel pro cm² Querschnitt gehaltenen Gewicht und der maximalen Zeit, während deren das Gewicht getragen wird. Er fand folgende Werte:

Tier	Art des Muskels	Belastung in g	Tragezeit in Stunden	Muskelquerschnitt in cm ²	Tragerekord
Teichmuschel	Schließmuskel belastet	450	480	0,15	1,44 Mill.
Kaninchen	Zirkulärmuskeln der Karotis	35—54	26000 ¹⁾	0,01—0,013	67,6—140 Mill.
Mensch	Oberarmbeuger	31 500	0,25—0,5	25—30	287—575
Mensch	Oberarmbeuger	81 000	0,033—0,05	25—30	98—148
Kröte	Gastroknemius	300	0,1	0,45	67
Frosch	Gastroknemius	300	0,0111	0,5	6,7

¹⁾ = Lebensdauer von ca. 3 Jahren.

Man sieht, wie außerordentlich die Tragerekorde des Muschelschließmuskels und der Tonusmuskulatur der Karotis diejenigen der im allgemeinen nur für vorübergehende Leistungen beanspruchten Muskeln überragen.

Es wäre aber verkehrt anzunehmen, daß in jedem Falle länger anhaltender Anspannung der kraftvergeudende Tetanus vermieden werden könnte. So hat BUYTENDYK festgestellt, daß während der tagelang anhaltenden sogenannten *Enthirnungsstarre*, welche die Körpermuskulatur nach SHERRINGTON befällt, wenn man den Hirnstamm in der Vierhügel-

region durchtrennt (siehe Kap. 23), rhythmische Aktionsströme von den gespannten Muskeln abzuleiten sind, und O. COHNHEIM und VON UEXKÜLL fanden, daß im Gegensatz zur Muschel beim Sipunculus und beim Blutegel ein erhöhter Tonus in der Leibesmuskulatur von stärkerem Sauerstoffverbrauch begleitet ist. Es muß also bis jetzt in jedem einzelnen Fall von Dauerverkürzung entschieden werden, ob es sich um Tetanus oder um Tonus handelt.

Wenden wir uns nun dem die mechanischen Vorgänge begleitenden **Stoffwechsel der Muskeln** zu, welcher soeben schon berührt wurde. Der Muskel besteht, abgesehen von seinen 70—80% Wasser, hauptsächlich aus besonderen Eiweißkörpern, welche als *Myosin* und als *Myogen* bezeichnet worden sind. Daneben finden sich in kleineren und wechselnden Mengen verschiedene Kohlehydrate, nämlich *Glykogen*, *Dextrin*, *Maltose* und *Glukose*. Der außerdem im Muskel enthaltene sogenannte Muskelzucker oder *Inosit*, von der empirischen Formel der Glukose $C_6H_{12}O_6$, ist kein Kohlehydrat, sondern ein Benzolderivat, nämlich Hexahydrohexaoxybenzol $C_6H_6(OH)_6$. Den Kohlehydraten steht genetisch nahe die *Fleischmilchsäure*, die rechtsdrehende Form der α -Oxypropionsäure $CH_3.CHOH.COOH$. Ferner enthält der Muskel stickstoffhaltige „*Extraktivstoffe*“, wie Kreatin, Kreatinin, Purinbasen, etwas Fett, Lipoide, Farbstoffe und Salze. An welchen dieser Komponenten spielt sich nun der die Kontraktion begleitende Stoffwechsel ab?

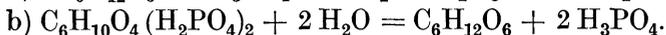
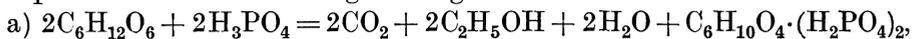
Seit REGNAULT und REISET ist bekannt, daß Muskularbeit den respiratorischen Gaswechsel, den Konsum von Sauerstoff und die Produktion von Kohlensäure steigert. Das gilt aber nicht bloß für den ganzen Körper, sondern es ist von HERMANN u. a. auch für den isolierten Muskel bewiesen worden. Der Muskel arbeitet also anscheinend wie die Motoren der Technik auf Grund einer Verbrennungsreaktion. Nach der Zusammensetzung des Muskels könnte man am ersten, so wie LIEBIG, vermuten, daß das Brennmaterial Eiweiß ist; aber wir haben früher (S. 203) erfahren, daß nach den Untersuchungen von VOIT und PETTENKOFER über den Stoffwechsel des Arbeitenden gerade diese Annahme abzulehnen ist; denn die Menge der stickstoffhaltigen Stoffwechselprodukte nimmt bei der Arbeit im allgemeinen nicht zu. Wohl aber schwinden die Kohlehydrate, Glykogen und Traubenzucker.

Es sieht also so aus, als ob die mechanische Energie des Muskels aus der bei der Verbrennung von Kohlehydraten frei werdenden Energie herstammt. Das ist aber nicht so ohne weiteres klar. Wenn ein ausgeschnittener Muskel arbeitet, so schlägt seine Reaktion von neutral in sauer um, indem sich mehr und mehr Milchsäure in ihm ansammelt (E. DU BOIS-REYMOND). Ist der Muskel durchblutet, so ist die Milchsäure auch im Venenblut nachzuweisen (v. FREY); die Produktion ist aber um so reichlicher, je schlechter die Blutversorgung, d. h. hier, je schlechter die Sauerstoffzufuhr ist. Sperrt man die Sauerstoffzufuhr nun vollkommen, indem man den ausgeschnittenen Muskel in eine Atmosphäre von reinem Stickstoff hängt, so bleibt er doch arbeitsfähig (HERMANN); freilich ermüdet er rascher, als in Gegenwart von Sauerstoff. Das gleiche gilt vom Herzmuskel, dessen Sauerstoffaufnahme durch Vergiftung mit Blausäure blockiert wurde (WEIZSÄCKER). Während der anoxybiotischen Arbeit ist die Kohlensäureabgabe sehr gering, die Produktion null; denn es wird nur so viel CO_2 abgegeben, als im Muskel in Form von $NaHCO_3$ schon präformiert vorhanden war und nun durch die sich bildende Milch-

säure ausgetrieben wird (FLETCHER). Der Wert der anoxybiotisch geleisteten Arbeit ist dabei so groß, daß er keinesfalls auf Rechnung der kleinen, im Muskel absorbiert gewesenen Sauerstoffmengen, die nun zur Oxydation herangezogen werden, gesetzt werden kann.

Wir kommen daher zu dem Schluß, daß *die Arbeitsleistung des Muskels nicht unmittelbar auf einer oxydativen, sondern irgendwie auf einer gärungsartigen Reaktion beruht, in welcher Kohlehydrate in Milchsäure umgewandelt werden*. Der Sauerstoff ist für die Arbeit freilich nicht belanglos, da bei seiner Abwesenheit ziemlich rasch Ermüdung eintritt. Immerhin konnte WEIZSÄCKER feststellen, daß man beim arbeitenden Herzmuskel des Frosches den Sauerstoffverbrauch durch Vergiftung mit Zyankali für 20—30 Minuten bis auf 36% der Norm herunterdrücken kann, ohne daß die Arbeitsleistung vermindert wird, und daß man durch stärkere Dosen Zyankali den Sauerstoffverbrauch sogar völlig aufheben kann, ohne daß die Arbeit unter 60—80% der Norm heruntersinkt. Welche positive Rolle aber der Sauerstoff spielt, das lehren folgende Beobachtungen: ist ein in Stickstoff arbeitender Muskel total ermüdet worden, so erholt er sich vollkommen bei Zufuhr von Sauerstoff; zugleich verschwindet die Milchsäure, und es wird reichlich CO₂ abgegeben (FLETCHER und HOPKINS). Der respiratorische Quotient ist gleich 1. *Die chemischen Vorgänge bei der Muskeltätigkeit zerfallen also in zwei Phasen, eine Arbeitsreaktion, die Bildung von Milchsäure aus Kohlehydrat, und eine Erholungsreaktion, die Entfernung der Milchsäure unter Verbrauch von Sauerstoff*. Dies Bild der wesentlichen Prozesse wird vortrefflich ergänzt durch die Feststellung von VERZÁR, daß der arbeitende Muskel der Katze dem ihn durchströmenden Blut den Sauerstoff mindestens zum großen Teil nicht während, sondern erst nach der Kontraktion entnimmt.

Die Arbeits- und die Erholungsreaktion können aber keineswegs durch die zwei einfachen Gleichungen formuliert werden: a) C₆H₁₂O₆ = 2 C₃H₆O₃; b) 2 C₃H₆O₃ + 6 O₂ = 6 CO₂ + 6 H₂O, sondern der chemische Verlauf ist komplizierter. Wenn man einen Preßsaft aus Muskeln herstellt, so findet man, daß die Milchsäurebildung auch darin noch zustandekommt. Zugleich tritt eine mit der Milchsäure äquivalente Menge freier Phosphorsäure auf. Setzt man nun aber Glykogen oder Traubenzucker hinzu, so steigt die Milchsäureproduktion nicht, wie man wohl erwarten könnte (EMBDEN). Dies läßt vermuten, daß die unmittelbare Vorstufe der Milchsäure nicht ein Kohlehydrat ist; vielmehr ist es eine Kohlehydratphosphorsäure, wie sie nach den Untersuchungen von IWANOFF und HARDEN als Zwischenprodukt auch bei der alkoholischen Gärung des Zuckers auftritt, entsprechend den Reaktionsgleichungen:

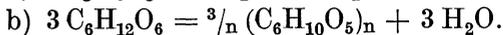


In der Tat fand EMBDEN, daß allein Zusatz von Hexosephosphorsäure die Milchsäureproduktion im Muskelpreßsaft steigert, und daß sich ferner aus dem genuinen Preßsaft Hexosephosphorsäure abscheiden läßt; er nannte die Verbindung deshalb *Laktazidogen*. Ihre Bedeutung für den Muskelchemismus geht u. a. aus den Beobachtungen von EMBDEN hervor, daß erstens der Laktazidogengehalt der Muskeln in Beziehung zu ihrer Arbeitsfähigkeit steht; je rascher Muskeln arbeiten können, desto reicher sind sie an Laktazidogen; weiße Muskeln enthalten also mehr als rote; zweitens nimmt der Laktazidogengehalt bei starker Muskelarbeit merk-

lich ab; dabei kann es zugleich zu einer deutlichen Ausschwemmung von Phosphorsäure in den Harn kommen.

Die Arbeitsreaktion kann man somit als eine Vergärung von Kohlehydrat zu Milchsäure ansehen mit intermediärer Bildung von Hexosephosphorsäure, und diese Auffassung ist um so einleuchtender, als wir bereits (S. 179) erfuhren, daß die Atmung des Muskels ebenso an die Anwesenheit eines „Atmungskörpers“ gebunden ist, wie die Gärfähigkeit der Hefe an die Anwesenheit eines Koferments“ und daß das Koferment der Gärung mit dem Atmungskörper der Muskeln zu identifizieren ist (MEYERHOF).

Noch komplizierter ist der chemische Vorgang in der Erholungsphase (MEYERHOF). Verfolgt man nämlich an einem ermüdeten Muskel den Erholungsvorgang in Gegenwart von Sauerstoff, so zeigt sich, daß der Sauerstoffverbrauch nur etwa $\frac{1}{4}$ so groß ist, als man nach der verschwundenen Menge Milchsäure zu erwarten hätte unter der Voraussetzung, daß die Milchsäure verbrennt; die gleichzeitige CO_2 -Produktion entspricht aber dem Sauerstoffverbrauch bei der Milchsäureverbrennung, da der respiratorische Quotient gleich 1 ist. Neben einem oxydativen Milchsäureschwund gibt es also noch einen andersartigen Verbrauch von Milchsäure, und MEYERHOF fand, daß die nicht oxydativ verschwindende Milchsäure quantitativ in Traubenzucker bzw. Glykogen übergeht. Die Erholungsreaktion kann also etwa so formuliert werden:



Diese Gleichung bringt zum Ausdruck, daß nur $\frac{1}{4}$ so viel Sauerstoff in Reaktion tritt, als der Totalverbrennung der verschwindenden Milchsäure entsprechen würde.

Hieraus können wir schließen, daß es für die Arbeitsleistung des Muskels auf die Milchsäurebildung ankommt; nachdem diese dann aber entstanden ist, wird sie nicht einfach oxydativ völlig beseitigt, sondern durch Koppelung mit der Verbrennung eines preisgegebenen Teils zum andern Teil zu Kohlehydrat resynthesiert, also zu erneuter Verwendung bereitgestellt.

Dieser mit der Arbeit verknüpfte Prozeß ist nun aber nichts anderes als die Steigerung der Ruheatmung des Muskels. Denn vergleicht man den Stoffwechsel des ruhenden Muskels in Sauerstoff und in der Anaerobiose, so zeigt sich, daß auch in letzterem Fall Milchsäure entsteht, und zwar viermal soviel als dem Sauerstoffverbrauch im gleichen Zeitraum entspräche, wenn die Kohlehydrate auf dem Weg über die Milchsäure direkt verbrennen würden; d. h. auch in der Ruheatmung entsteht jeweils etwa viermal so viel Milchsäure als verbrennt, und der bei der Verbrennung verbleibende Rest wird fortlaufend wieder in Glykogen zurückverwandelt. Der zur Kontraktion führende Reiz ruft also nur die Steigerung dieses ganzen im Muskel sich dauernd abspielenden Kreisprozesses hervor (MEYERHOF).

Der soeben geschilderte Stoffumsatz betrifft aber nur die Muskelzuckung und den Muskeltetanus. Das Zustandekommen des Tonus scheint auf anderen Reaktionen zu beruhen; es werden dabei wahrscheinlich nicht die Kohlehydrate, sondern die Eiweißkörper angegriffen. Dafür kann erstens die Beobachtung von A. FRÖHLICH und H. H. MEYER angeführt werden, daß bei der Muskelstarre, welche das Tetanustoxin hervorruft (siehe S. 310) nicht nur kein Glykogen schwindet, sondern daß im Gegenteil der Glykogengehalt gelegentlich zunimmt. Zweitens entbehrt nach EMBDEN die glatte Muskulatur, welche vielfach Tonusmuskulatur ist, des Laktazidogens fast völlig. Andererseits richtet sich nach PEKELHARING die Menge von Kreatin im Muskel nach der Höhe seines Tonus (siehe S. 175). So ist in der Enthirnungsstarre (siehe S. 311), ferner bei künstlicher Dauerver-

kürzung der Muskeln durch Nikotin, Koffein oder Rhodansalz der Kreatingehalt vermehrt, und da der Tonus wahrscheinlich vom Sympathikus abhängt, so findet man Kreatinzunahme auch nach Injektion von Sympathikusreizmitteln, wie z. B. Adrenalin und Tetrahydronaphthylamin (RIESSER) (siehe S. 227 u. 257), Abnahme des Kreatins dagegen nach Durchschneidung des Sympathikus (JANSMA).

Der Stoffumsatz im Muskel verursacht nicht bloß seine mechanischen Reaktionen, sondern auch die **Produktion von Wärme**. Es ist eine der geläufigsten physiologischen Erkenntnisse, daß Muskelarbeit von Wärmebildung begleitet ist; bei der Besprechung des Stoff- und Energiebedarfs hatten wir diesen Zusammenhang schon eingehend zu berücksichtigen. Es sei ferner daran erinnert, daß heftige Muskelkrämpfe die Körpertemperatur oft auf fieberhafte Höhe steigern.

Aber die Erwärmung läßt sich auch am isolierten Muskel bei seiner Betätigung nachweisen (HELMHOLTZ, HEIDENHAIN); man benutzt dafür entweder das Thermometer oder besser das viel empfindlichere Thermoelement.

Man verwendet dieses am besten in der Art, daß man eine große Zahl von Lötstellen (30—40) dicht nebeneinander anbringt und den Muskel auf sie darauf lagert (BÜRGER, A. V. HILL). Ein in den Thermokreis eingeschaltetes Galvanometer zeigt dann bei der Aktion des Muskels einen Ausschlag. Die Geschwindigkeit, mit welcher dieser Ausschlag zustande kommt, sein Maximum, die Art seines Abklingens ist eine sehr komplizierte Funktion des Wärmefflusses vom Muskel ins Thermolement und in die Umgebung des Muskels, des Wärmefflusses von der wärmeren zur kälteren Lötstelle, der Wärmekapazität des Muskels und der Elektrode, der Trägheit des Galvanometers und anderer Momente. Trotzdem vermag die Anordnung bei zweckmäßiger Eichung Aufschluß über Größe und zeitlichen Verlauf der Wärmeproduktion im Muskel zu geben.

Bei der Untersuchung der Wärmeproduktion eines an seinen beiden Enden fixierten und in Tetanus versetzten Froschmuskels nahm HILL die Eichung in folgender einfacher Weise vor: er verglich den Gang des Galvanometerzeigers infolge einer kurz dauernden Erregung des Muskels durch den Wechselstrom eines Induktoriums mit dem Gang, wie er dann zustande kommt, wenn man den gleichen Muskel abgetötet und gleich lange mit dem Wechselstrom durchsetzt; wenn man im zweiten Fall den Wechselstrom in zweckentsprechendem Maß verstärkt, so tritt die JOULEsche Stromwärme an die Stelle der Wärme, welche der lebende Muskel auf den Reiz mit dem schwächeren Strom produziert, während alle übrigen physikalischen Bedingungen des Versuchs unverändert geblieben sind. Auf diese Weise fand HILL, daß der zeitliche Verlauf der Wärmeproduktion im Tetanus weitgehend von dem Verlauf der künstlichen Durchwärmung abweicht; nach der Tetanisierung kehrt der Galvanometerzeiger viel langsamer in seine Ruhelage zurück, als nach der künstlichen Durchwärmung des toten Muskels, so daß man zu dem Schluß kommt, daß *einer nur wenige Sekunden dauernden Erregung des Muskels eine mehrere Minuten anhaltende Wärmeproduktion entspricht*.

Für diese Erscheinung gewinnen wir sofort ein Verständnis, wenn wir uns der chemischen Vorgänge bei der Muskelaktion erinnern. Wir fanden, daß diese in zwei Teile zu zerlegen sind, in eine arbeitliefernde Reaktion, die Bildung von Milchsäure, und in eine Erholungsreaktion, welche der Arbeitsreaktion nachfolgt und in einer oxydativen und resynthesierenden Beseitigung der Milchsäure besteht. In ähnlicher Weise *setzt sich die bei der Muskelaktion produzierte Wärme aus zwei Summanden zusammen, aus der initialen rasch gebildeten Arbeitswärme und aus der danach langsam entstehenden Restitutionswärme*. Zugunsten dieser Deutung können

u. a. folgende Beobachtungen angeführt werden: läßt man den Muskel sich statt in Luft in einer Atmosphäre von Stickstoff anspannen, so ist der Verlauf der Wärmeproduktion vom Verlauf der Wärmebildung bei der künstlichen Durchwärmung nicht zu unterscheiden; die an die Gegenwart von Sauerstoff gebundene Restitutionswärme fällt also fort. Der protrahierte Verlauf der Wärmebildung kommt ferner auch dann mehr und mehr in Wegfall, wenn man den in Luft hängenden Muskel mit kurzen Intervallen mehrmals erregt; offenbar wird der im Muskelinnern für die Restitution verbrauchte Sauerstoff nicht rasch genug durch Nachdiffundieren von der umgebenden Luft her ersetzt, so daß die inneren Muskelfasern mehr und mehr anoxybiotisch arbeiten müssen.

Das Verhältnis der Restitutionswärme zur initialen Arbeitswärme beträgt nach HILL ungefähr 1:1, wobei wir von neueren noch nicht ganz sichergestellten Messungen absehen wollen, die ein Verhältnis zwischen 1:1 und 1,5:1 ergeben.

Bemerkenswerterweise wird aber auch die Initialwärme nicht auf einmal zu Beginn der Kontraktion abgegeben. HILL und HARTREE konnten vielmehr durch sorgfältige mathematische Analyse des photographierten Galvanometeraussschlages bei Kontraktion des an seinen beiden Enden fixierten Muskels drei Phasen der Wärmebildung unterscheiden. Die erste entspricht der Anspannung des Muskels, ein kleinerer Abschnitt der Aufrechterhaltung der Spannung und schließlich ein dritter, der etwa 30% der Gesamtwärme gleich ist, wird erst bei der Erschlaffung abgegeben. Diese letztere ist nichts anderes als die in Wärme verwandelte potentielle Energie der elastischen Spannung.

Der Muskel entspricht nach alledem also einer Doppelmaschine. Deren einer Teil könnte etwa durch einen Akkumulator repräsentiert gedacht werden, welcher Arbeit leistet und Wärme produziert und sich dabei erschöpft; der zweite Teil wäre dann durch einen Dynamo gegeben, welcher, von einem Verbrennungsmotor angetrieben, den erschöpften Akkumulator wieder auflädt (HILL).

Die vom tätigen Muskel produzierte Wärme ist nun um so größer, je größer seine Spannung und je größer seine Länge während der Anspannung ist (HEIDENHAIN, HILL). Dafür sprechen folgende Beobachtungen: fixiert man den Muskel an seinen beiden Enden, so daß er sich nicht verkürzen kann, sondern sich „isometrisch“ betätigen muß, so gerät er bei Reizung in einen Spannungszustand, in dem er sich zu verkürzen strebt. Die Spannung richtet sich nun u. a. nach der Reizstärke, und je größer die bei verschiedenen Reizen erreichte Spannung ist, desto größer ist auch die gleichzeitig auftretende Wärmemenge. Läßt man den Muskel sich aber verkürzen, so nimmt während der Kontraktion seine Spannung mehr und mehr ab, wie z. B. die Kraftmessungen beim SCHWANNschen Versuch (siehe S. 300) ergeben haben; daher ist bei gleicher Reizstärke die Wärmeproduktion der Kontraktion um so kleiner, je stärker die Länge abnimmt, je größer also die Hubhöhe ist.

Wir können die Betätigung des Muskels demgemäß so auffassen, daß er bei der Erregung infolge der chemischen Umsetzungen in Spannung versetzt, sozusagen in ein elastisch gespanntes Band verwandelt wird. Fehlt ihm alsdann durch Fixierung seiner Enden die Möglichkeit sich zu verkürzen, so verwandelt sich die gesamte elastische Energie in Wärme. Vermag er sich jedoch zu verkürzen, so geht ein größerer oder kleinerer Teil der Spannungsenergie in äußere Arbeit über. Bezeichnen wir das Verhältnis der Arbeit zur gesamten umgesetzten Energie (beide in demselben kalorischen Maß gemessen) als „*Wirkungsgrad*“, so findet man,

wenn man die Belastung variiert, in maximo einen Wirkungsgrad von etwa 30%.

Am ausgeschnittenen Muskel ist allerdings der Wirkungsgrad nicht ohne weiteres direkt festzustellen, weil die Wärme, wie gesagt, nicht auf einmal abgegeben wird und daher auch nicht dem maximalen Galvanometerausschlag proportional ist. Hierzu bedarf es vielmehr indirekter Methoden, wobei die Wärmeproduktion aus dem Sauerstoffverbrauch und aus der Milchsäurebildung berechnet wird (MEYERHOF). Diese Methoden stehen jedoch an Genauigkeit bisher den am lebenden Körper ausgeführten Messungen nach. Wir dürfen aber doch aus ihrer Anwendung folgern, daß der maximale Wirkungsgrad auch des ausgeschnittenen Muskels sich unter günstigen Bedingungen zu etwa 25—30% ergibt, gerade so wie aus den früher (S. 202) zitierten Stoffwechselversuchen.

Nachdem wir auf den vorigen Seiten die chemischen Umsetzungen im Muskel und die Wärmeproduktion betrachtet haben, ist es nun noch nötig, beide in Vergleich zu setzen, und zwar sowohl für den Vorgang der Kontraktion (anaerobe Phase, Arbeits- oder Ermüdungsphase) wie für die oxydative Erholung (Restitutionsphase) (MEYERHOF). Wenn bei der Kontraktion aus Glykogen Milchsäure entsteht, so werden pro 1 g Milchsäure hierbei im Durchschnitt 375 (kleine) Kalorien frei. Die Differenz der Verbrennungswärmen von 0,9 g Glykogen (entsprechend 1 g Glukose) und 1 g verdünnter Milchsäure ist nach neueren Bestimmungen etwa 170 Kal. (3772—3601). Hierzu kommt noch eine Reaktion der Milchsäure mit Eiweiß, in der eine beträchtliche (negative) Dissoziationswärme der Proteine auftritt:

$\text{CH}_3 \cdot \text{CHOH} \cdot \text{COOH} + \text{Protein} - + \text{Na}^+ = \text{CH}_3\text{CHOH} \cdot \text{COO}^- + [\text{Protein} \cdot \text{H}] + \text{Na}^+$; das Eiweiß wird also entionisiert, wobei in vitro gut 140 Kal. entstehen. Im Muskel ist dieser Vorgang aber offenbar mit einer noch höheren Wärmebildung, nämlich bis zu 200 Kal. verknüpft. Somit rührt die Differenz zwischen der Kontraktionswärme und der chemischen Entstehungswärme der Milchsäure nur von dem Zurückbleiben der Säure im Muskel her. Tritt diese in die Außenlösung über, wie bei der Milchsäurebildung im zerkleinerten Muskel, so erhält man in der Tat nur die thermochemische Größe 170 Kal.

Bei der oxydativen Erholung nach erschöpfender Ermüdung werden nun von 4 Molekülen Milchsäure 3 zu Glykogen restituiert, während eines verbrennt. Der Kohlehydratumsatz muß also, auf die verbrannte Menge Milchsäure bezogen, 3772:4 = 943 Kal. entsprechen. Hiervon sind aber die 375 Kal. der Kontraktionsphase abzuziehen; denn die Rückverwandlung der Milchsäure und die erneute Dissoziation des Eiweißes mittelst des durch den Milchsäureschwund frei gewordenen Alkalis verlaufen mit negativer Wärmetönung. Mithin müssen in der Erholungsphase 943 — 375 = 568 Kal. auftreten gegenüber den 375 Kal. der Kontraktionsphase. Danach ist zu erwarten, daß bei direkter Wärmemessung etwa 40% der Gesamtwärme während der Arbeit und 60% während der Erholung zum Vorschein kommen. Das findet sich tatsächlich im Experiment bestätigt (s. S. 316).

Während die Differenz der Verbrennungswärme des Glykogens und der Milchsäure also nur 4,5% der Verbrennungswärme des Glykogens beträgt, macht der Muskel durch den beschriebenen Vorgang mindestens 40% der Verbrennungswärme disponibel. Das ist für die Betätigung des Muskels aber vollkommen ausreichend, da ja der Wirkungsgrad, wie wir sahen, in maximo nur 30% beträgt.

Nach der Erörterung der mechanischen, chemischen und thermischen Äußerungen der Muskelaktion wenden wir uns nunmehr noch einem besonderen Muskelphänomen zu, bei welchem diese verschiedenen Vorgänge wiederum miteinander verbunden auftreten, nämlich der **Leichen- oder Totenstarre**. HERMANN hat *die Totenstarre als eine letzte Kontraktion des Muskels* bezeichnet; wir werden sehen, wie richtig seine Auffassung ist. Die Totenstarre kommt dadurch zustande, daß die Muskeln sich langsam verkürzen und verdicken und dabei hart werden, wie Muskeln bei der Kontraktion. Gewöhnlich werden nicht alle Muskeln gleichzeitig von der Starre befallen, sondern sie beginnt in Herz und Zwerchfell, breitet sich dann auf Nacken- und Kiefermuskulatur aus und befällt darauf den Rumpf, die oberen und unteren Extremitäten (NYSTENsche Regel). Die Zeit, zu welcher die Totenstarre nach dem Tode einsetzt, schwankt zwischen 10 Minuten und etwa 7 Stunden. Wärme begünstigt, Kälte verzögert ihren Eintritt; daher tritt die Starre auch beim Warmblüter früher ein als beim Kaltblüter. Sehr wesentlich ist der Funktionszustand vor dem Tode; nach starker Arbeit werden die Muskeln rasch starr; gehetztes Wild erstarrt z. B. fast unmittelbar nach dem Tode. Auch eine schlechte Blutzirkulation begünstigt den Eintritt der Starre.

Die Ursache ist in den *chemischen Vorgängen* in der Muskulatur zu suchen. Auch im ruhenden Muskel des toten Tiers entsteht Säure, nur langsamer, als bei der Tätigkeit; es wird etwas CO_2 abgegeben, und es bildet sich Milchsäure, welche, da die Blutzirkulation aufgehoben ist, sich mehr und mehr ansammelt. Auch hier stammt die Milchsäure aus dem Schwund einer entsprechenden Menge Glykogens, welches nach allem Bisherigen die einzige Quelle der Milchsäurebildung im Muskel darstellt. Ferner wird bei der Totenstarre *Wärme* gebildet.

Wir konstatieren also, daß die Starreverkürzung mit denselben inneren Veränderungen einhergeht, wie die Kontraktion. Deshalb ist es wohl berechtigt anzunehmen, daß die Milchsäure, indem sie sich im Muskel anreichert, schließlich ebenso wie irgendeine Säure (S. 297) als Reiz wirkt und eine Kontraktion auslöst, die ihrerseits die Milchsäurebildung noch weiter verstärkt. Zugunsten dieser Annahme läßt sich die Beobachtung anführen, daß in einer Atmosphäre von reinem Sauerstoff die Starre oft überhaupt nicht zustande kommt (FLETCHER, WINTERSTEIN), offenbar, weil die sich bildende Milchsäure, wie in der Restitutionsphase der normalen Muskelkontraktion (siehe S. 314), oxydativ beseitigt wird.

Auch die folgenden Tatsachen sprechen für die Verwandtschaft von Starreverkürzung und Kontraktion: der Eintritt der Starre wird verzögert, wenn man die Muskelnerven durchschneidet, dagegen beschleunigt, wenn man die Nerven reizt, wenn auch nur so schwach, daß es nicht zu sichtlichen Kontraktionen kommt. Das absterbende Nervensystem sendet also wahrscheinlich leichte Impulse in die Muskeln und bewirkt eine raschere Milchsäurebildung, als wenn die Nerven durchschnitten sind.

Einige Stunden nach dem Eintritt der Totenstarre kommt spontan eine *Lösung der Starre* zustande.

Es bleibt nun schließlich noch zu fragen, *auf welche Weise die durch einen Reiz angeregten inneren physikalischen und chemischen Prozesse die Spannung und eventuell Verkürzung der Muskelfasern herbeiführen*. Eine umfassende diese Frage beantwortende **Theorie der Muskelkontraktion** kann jedoch noch nicht gegeben werden. Betrachtet man den Muskel mit den Augen des Technikers, so wird man zunächst dazu neigen, in ihm eine Maschine zu sehen, welche sich analog den Motoren

der Technik betätigt, d. h. so, daß die Verbrennungswärme einer Oxydationsreaktion zum größeren oder kleineren Teil in Arbeit übergeführt wird; man wird also den *Muskel als eine Wärmekraftmaschine* ansehen. Aber ganz abgesehen davon, daß das Studium des Muskels uns keinerlei Anhaltspunkte für eine Analogie im Mechanismus gewährt, welcher bei der technischen Maschine auf einer Expansion von durch die Verbrennung erzeugten Gasen beruht, läßt sich der Vergleich mit der Wärmekraftmaschine auch auf Grund einer allgemeinen thermodynamischen Betrachtung ablehnen (A. FICK). Nach dem zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie (CARNOT, CLAUSIUS) ist nämlich der Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine gleich $\frac{T_1 - T_0}{T_1}$, wenn $T_1 - T_0$

die Temperaturdifferenz zwischen dem Kessel und dem Auspuff, in der absoluten Skala gemessen, darstellt. Setzen wir nun den Wirkungsgrad der Muskelmaschine zu 30% an, so ist, da für den ruhenden Warmblütermuskel $T_0 = 273^\circ + 37^\circ$ ist, $\frac{T_1 - 310}{T_1} = 0,30$, also $T_1 = 443^\circ$ absolut $= 170^\circ$. Die kontraktile Substanz müßte sich also, um einen Wirkungsgrad von 30% zu erzielen, auf 170° erwärmen, was wenig wahrscheinlich ist. Aber selbst, wenn man zugibt, daß sich ja nicht der ganze Muskel zu erwärmen braucht, sondern daß nur die feinen Muskelfibrillen oder noch feinere Elemente die eigentlich Arbeit leistenden Strukturen sind, so müßte man bei der Kontraktion mit einem Temperaturgefälle von mehreren tausend Grad pro Millimeter zwischen arbeitenden und nicht arbeitenden Teilen rechnen, was ein sonst nirgends vorkommendes Maß von Wärmeleitungsvermögen bedeuten würde. Aber auch die spezielle Betrachtung der Vorgänge bei der Muskelkontraktion führt zu einer Ablehnung der genannten Auffassung; denn wir haben ja gesehen, daß der Arbeitsphase bei der Muskelaktion überhaupt keine Verbrennungsvorgang zugrunde liegt, sondern die eigentümliche gärungsartige Reaktion der Milchsäurebildung.

Aus diesen Gründen wird der *Muskel als eine chemodynamische Maschine* aufgefaßt, d. h. als eine Maschine, in welcher chemische Energie nicht erst über die Zwischenstufe der Wärmeenergie, sondern direkt in mechanische Energie übergeführt wird. Derartige Maschinen gibt es; für den Muskel ist insbesondere eine Betätigungsweise in Erwägung gezogen worden, bei welcher durch die chemischen Reaktionen die *Oberflächenspannung* der kontraktilen Fasern geändert wird (BERNSTEIN). Eine Steigerung der Oberflächenspannung würde zu einer Verkleinerung der Oberfläche führen, und einer Verkleinerung der Oberfläche würden Verkürzung und Verdickung der Fasern natürlich gleich kommen. Die Oberflächenspannungstheorie hat vor allem zum Verständnis der amöboiden Bewegungen beigetragen (BERTHOLD, RHUMBLER). Wie weit sich die Vorgänge bei der Muskelkontraktion ihr anpassen lassen, darüber läßt sich heute noch ebensowenig mit Sicherheit eine Entscheidung treffen, wie über die Brauchbarkeit anderer Hypothesen, die aufgestellt worden sind. —

Wenn wir bisher fast nur den einzelnen Muskel in seiner Funktion betrachtet haben, so haben wir dabei eine Betätigungsweise studiert, wie sie in der Natur eigentlich niemals vorkommt. Denn die Bewegungen, welche die einzelnen Teile des Körpers gegeneinander ausführen, kommen immer durch *die kombinierte Aktion einer ganzen Anzahl von Muskeln*

zustande, welche vom Zentralnervensystem zu ihrer gemeinsamen Tätigkeit angeregt werden, indem den einzelnen Muskeln zeitlich und intensiv verschiedene Erregungen zufließen. Wir werden diese „Koordination“ der Muskeln durch das Zentralnervensystem später (siehe Kapitel 22) genauer zu analysieren haben. Hier soll nur der Effekt solcher kombinierten Aktionen an zwei Beispielen erörtert werden, welche als die beiden häufigsten Formen der Zusammenfassung zahlreicher Einzelmuskeln unseres Körpers von besonderem Interesse sind, nämlich der Zustand des *Stehens* und der Vorgang des *Gehens*.

Beim *Stehen* verhält sich der ganze Körper wie eine starre Masse. Da aber die einzelnen Körperteile ihre Lage auch mehr oder weniger gegeneinander verändern können, so müssen sie für das Stehen gegenseitig festgestellt sein. Dies könnte teils dadurch geschehen, daß die einzelnen Teile so übereinander aufgebaut werden, daß das Lot vom Schwerpunkt des höher gelegenen Teils in die mit dem nächst niederen Teil gemeinsame Unterstützungsfläche hineinfällt, teils könnten bei mangelndem Gleichgewicht der Massen Sehnen und Bänder durch ihre Spannung die gegenseitige Fixierung besorgen. Träfe beides zu, dann

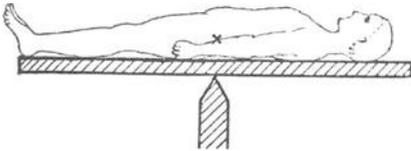


Abb. 100. Bestimmung des Schwerpunktes im Körper des Menschen (nach BORELLI).

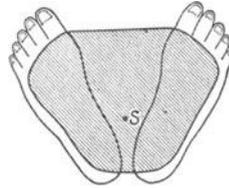


Abb. 101. Die Unterstützungsfläche des Körpers beim Stehen in bequemer Haltung (nach BRAUNE und O. FISCHER).
s = Schnittpunkt der Schwerlinie mit der Unterstützungsfläche.

wäre das Stehen bloße Sache der Statik. Aber schon die Ermüdung, welche längeres Stehen verursacht, beweist, daß auch Muskeln bei der gegenseitigen Feststellung der Körperteile mitwirken müssen.

Die Haltung des Körpers beim Stehen ist individuell recht verschieden; auch der einzelne kann verschieden stehen, z. B. einerseits in einer „bequemen“, andererseits in „militärischer“ Haltung. Wir wollen das *Stehen in bequemer Haltung* betrachten.

Voraussetzung für das Stehenkönnen ist, daß das Lot, welches vom Schwerpunkt des ganzen Körpers gefällt wird, in die Unterstützungsfläche des Körpers hineinfällt. Den *Schwerpunkt* bestimmt man an der Leiche, indem man sie in der beim Stehen eingenommenen gegenseitigen Haltung der Körperteile gefrieren läßt und dann nacheinander an mindestens zwei verschiedenen Punkten aufhängt; der Schwerpunkt liegt dann jedesmal senkrecht unter den Aufhängepunkten bzw. in einer der Ebenen, in denen die Aufhängeschnur gelegen ist, deren Schnittpunkte mit dem aufgehängten Körper man auf dessen Oberfläche anzeichnen kann. Am Lebenden kann man die Höhe des Schwerpunkts leicht in der Weise feststellen, wie es BORELLI schon im 17. Jahrhundert machte, daß man ein auf einer horizontalen Schneide ruhendes Brett so verschiebt, daß es sich in der Schwebelage befindet, und daß man dann den Menschen in seiner Längsachse senkrecht zur Schneide auf das Brett legt und durch Verschieben des Körpers wieder Gleichgewicht herstellt (siehe Abb. 100). Der Schwerpunkt liegt dann senkrecht über der Schneide. Man findet so, daß im allgemeinen der Schwerpunkt in der Höhe des zweiten Sakralwirbels senkrecht unter dem Promontorium gelegen ist; natürlich wechselt die Lage je nach der Entwicklung des Skeletts, der Muskeln, des Gehirns und nach der Füllung der Eingeweide.

Die *Unterstützungsfläche* ist diejenige Fläche, welche sämtliche Unterstützungspunkte in sich einschließt, beim Säugetier also die äußersten Stützpunkte der vier Extremitäten. Abb. 101 zeigt die Form der Unterstützungsfläche *beim Menschen in bequemer Haltung*; die Projektion des Schwerpunktes *s* ist mit eingezeichnet.

Die *Standfestigkeit* des Körpers, gemessen durch die von irgend einer Seite her wirkende Kraft, die nötig ist, um den Körper umzukippen, ist dann offenbar um so größer, je größer die Unterstützungsfläche, je schwerer der Körper, je niedriger der Schwerpunkt über der Unterstützungsfläche und je näher die Projektion des Schwerpunktes an der Mitte der Unterstützungsfläche gelegen ist.

Fragen wir nun, *auf welche Weise die einzelnen Körperteile beim Stehen gegeneinander festgestellt sind*. Um dies zu beurteilen, ist es notwendig, die Lage der *Schwerpunkte der einzelnen Teile* im Verhältnis zu den sie unterstützenden Flächen zu kennen.

Der Schwerpunkt des Kopfes liegt offenbar vor der Unterstützungsfläche des Atlantookzipitalgelenks; denn im Schlaf oder im Tode sinkt der Kopf vornüber, so daß das Kinn auf die Brust zu liegen kommt. Die Nackenmuskulatur ist also beim Stehen andauernd kontrahiert, und bewirkt so die *Feststellung des Kopfes gegen den Hals*. Nach BRAUNE und O. FISCHER, von welchen die exaktesten Bestimmungen der Teilschwerpunkte des Körpers herrühren, liegt der Schwerpunkt des Kopfes 0,5 cm vor der frontal gerichteten Drehachse des Atlantookzipitalgelenks.

Auch die *Steifung der Halswirbelsäule* in sich und die Verhinderung ihres Vornübersinkens ist Sache der Nackenmuskulatur.

Die *übrige Wirbelsäule* hat infolge der Bänder- und Knorpelverbindungen zwischen den einzelnen Wirbeln nur eine ziemlich beschränkte Beweglichkeit; die Lendenwirbelsäule ist dabei biegsamer, als die Brustwirbelsäule. Das Vornübersinken, das namentlich infolge der Belastung durch den Thorax zustande kommen müßte, wird durch tonische Anspannung der Rückenmuskeln, zum Teil auch durch Anspannung der Bauchmuskeln, welche die Eingeweide nach rückwärts und aufwärts gegen die Wirbelsäule drängen, verhindert.

Auch die *Feststellung des Rumpfes gegen die Beine im Hüftgelenk* wird von Muskeln besorgt. Der gemeinsame Schwerpunkt von Kopf, Rumpf und Armen liegt nämlich etwa 0,8 cm hinter der frontal durch beide Hüftgelenke gelegten Achse. Der Körper müßte also nach hinten umkippen; dafür wird er aber durch den Zug von Muskeln, welche vor den Hüftgelenken vorbeilaufen, vor allem durch den Ileopectus, auch durch den Rectus femoris bewahrt.

Betrachten wir weiter Kopf, Rumpf, Arme und Oberschenkel als eine einzige starre, in sich versteifte Masse, so geht aus der Beobachtung, daß deren Schwerpunkt etwa 1 cm vor der frontal gerichteten Kniegelenkachse gelegen ist, hervor, daß zur *Feststellung des Kniegelenks* nicht, wie man lange Zeit annahm, ein Zug von seiten des Extensor quadriceps erforderlich ist, um ein Hintenüberfallen unmöglich zu machen, sondern daß im Gegenteil die Kniebeugemuskulatur betätigt werden muß, um eine Überstreckung im Knie zu verhindern; die Bänder auf der Rückseite des Kniegelenks wirken dabei mit.

Was endlich die *Feststellung im Sprunggelenk* anlangt, so ist auch dafür eine Muskelaktion nötig; denn die Schwerlinie des ganzen Körpers fällt vor die Achse der Sprunggelenke. Der wirksame Zug wird von der Wadenmuskulatur, d. h. vor allem von Gastrocnemius und Soleus entfaltet.

Das Aufrechtstehen verlangt also die Entfaltung einer ausgebreiteten Muskeltätigkeit. Würde zu deren Ersparung eine Haltung eingenommen,

bei welcher alle Teilschwerpunkte senkrecht übereinander liegen, so daß ein labiles Gleichgewicht resultierte, so käme eine Haltung zustande, welche als recht unbequem empfunden wird.

Die verschiedenen genannten Muskeln müssen beim Stehen natürlich in einem ganz bestimmten Ausmaß angespannt werden, und wie es für alle Körperbewegungen in entsprechendem Maß gilt, so werden die Muskeln auch bei dieser ihrer statischen Funktion durch Anspannung ihrer Antagonisten unterstützt (siehe Kapitel 22). Die Kontrolle über den Effekt der notwendigen Innervationen übernehmen die auf Druck oder Zug ansprechenden Sinnesorgane der Muskeln, der Sehnen, der Gelenke und der Haut (siehe Kapitel 34 u. 35), ferner die Augen, welche Schwankungen des Körpers bemerken, und die Labyrinth, welche im Dienst der Tonusregulation stehen (siehe Kapitel 35). Die Wirksamkeit all dieser das Stehen sichernden Apparate wird vor allem dann klar, wenn das eine oder andere „sensible“ Organ aus irgend einem Grunde fortfällt; das Stehen wird dann auffallend schwankend (siehe S. 349).

Leichte Schwankungen durch fortwährendes Korrigieren der Haltung gehören zur Norm; man hat sie mit Hilfe eines senkrecht auf dem Scheitel angebrachten Pinselchens registriert, welches gegen eine über dem Körper aufgehängte horizontale Fläche schreibt (LEITERSTORFER).

Die Notwendigkeit, beim Stehen eine Anzahl von Muskelgruppen in Tätigkeit zu versetzen, macht, wie schon bemerkt wurde, das Stehen ermüdend. Auch *der Stoffwechsel wird, im Verhältnis zur Bettruhe, nicht unerheblich gesteigert*; das militärische Stehen erfordert sogar etwa 26% Mehrumsatz (siehe S. 201).

Das Gehen ist viel schwieriger zu analysieren als das Stehen.

Eine richtige Auffassung wurde eigentlich erst möglich mit Einführung der Serienmomentphotographie durch MUYBRIDGE. MAREY bediente sich dieser Methode in der Art, daß er die Versuchsperson schwarz bekleidete und nur die Linien, welche den wichtigsten Skeletteilen entsprechen, durch aufgesetzte weiße Streifen erhellte; wenn der Gehende sich dann vor einem schwarzen Hintergrund vorbeibewegte, so wurden von dem Film allein die Bewegungen der hellen Linien aufgenommen. BRAUNE und O. FISCHER ersetzten die weißen Streifen durch aufgenähte GEISSLERSche Röhren.

Beim Gehen wird der Rumpf abwechselnd von einem der beiden Beine getragen und zugleich vorwärts geschoben, während das andere Bein an dem ersten vorbeischiebt. Man kann bei jeder Gehphase danach das „Standbein“ von dem „Schwingbein“ unterscheiden. Die photographische Registrierung ergibt, wenn man von einem Doppelschritt 20 Aufnahmen macht und eine Auswahl davon auf einer Zeichnung darstellt, das Bild Abb. 102. Daraus ist folgendes zu entnehmen:

Das Schwingbein wird zum Standbein, indem es mit seiner Ferse den Boden berührt; dabei ist das Bein nach vorne gehalten und leicht im Knie gebeugt (siehe 1 und 9). Indem es nun mehr und mehr in eine senkrechte Stellung übergeht, wird es mehr und mehr gestreckt; dann neigt es sich vornüber und wird, um den Schwerpunkt des Körpers nicht stark sinken zu lassen, durch Streckung im Fußgelenk verlängert. Dabei wickelt sich die Ferse und dann die Sohle mehr und mehr vom Boden ab, und der Körper wird durch den Fuß vorwärtsgestemmt. Der Körper schaukelt also auf seiner Sohle vornüber.

Während das Standbein den Körper stützt und stemmt, pendelt das Schwingbein, wie gesagt, an ihm vorbei, jedoch nicht rein passiv, wie noch die Gebr. WEBER lehrten, sondern unter steter Mitwirkung

der Muskulatur. Gleich wenn es sich nach vollkommener Streckung vom Boden ablöst, wird sein Knie ziemlich kräftig gebeugt und der Fuß dorsalflektiert (12); im Verlauf des Schwingens wird es dann wieder mehr und mehr gestreckt.

Das Gehen geschieht aber nicht so, daß jedes Bein gleich lange Stand- und Schwingbein ist, d. h., daß der Körper in jedem Augenblick immer nur auf einem Bein steht, sondern das eine Bein steht schon, während das andere noch seine Sohle vom Boden abwickelt und dabei den Körper vorwärts stemmt; danach beginnt es erst zu schwingen und

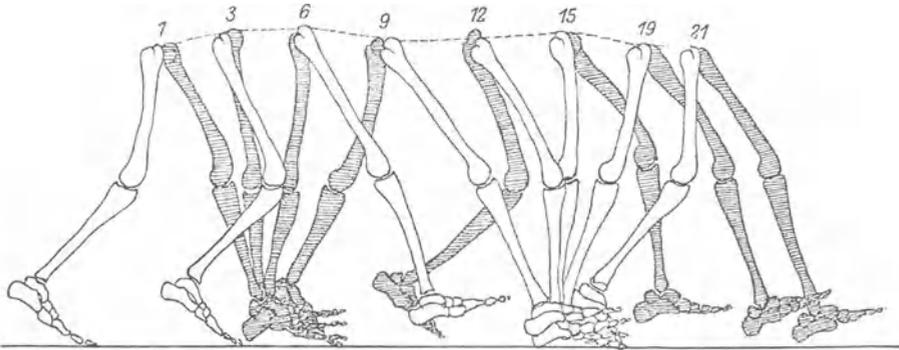


Abb. 102. Gehbewegung nach BRAUNE und O. FISCHER (abgeändert nach R. du BOIS-REYMOND).

hört schon zu schwingen auf, während das andere Bein sich noch in der inzwischen eingenommenen Stemmstellung befindet. Man kann dies schematisch durch die Abb. 103 andeuten, in welcher die geraden Linien die Intervalle des Stehens, die gebogenen Linien die Intervalle des Schwingens bezeichnen; man sieht, daß das Zeitverhältnis von Schwung und Stand etwa 2:3 ist.

Der Schwerpunkt wird bei dieser Art des Gehens abwechselnd um etwa 4 cm gehoben und gesenkt.

Die rhythmische Vorwärtsbewegung ist von *seitlichen Schwankungen* des Körpers begleitet. Der Körper wird nämlich aktiv nach der Seite des jeweiligen

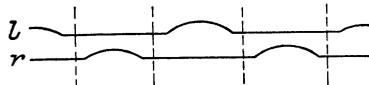


Abb. 103. Schema der Zeiten des Stehens und Schwingens der Beine beim Gang.

Standbeins verschoben; sonst würde er nach der Seite des Schwingbeins hin umfallen. Er erreicht den Höhepunkt der seitlichen Verschiebung in dem Moment, in welchem das Standbein senkrecht steht. Zu Beginn des Schwingens folgt dann die Verschiebung nach der Gegenseite. Ferner führt der Rumpf beim Gehen Drehbewegungen aus, die Arme werden passiv und aktiv pendelnd bewegt, und der Rumpf wird vornübergeneigt, um so mehr, je rascher der Gang ist.

So ist es wohl verständlich, daß, obwohl der Schwerpunkt des Körpers nur geringe Schwankungen in der Vertikalebene ausführt, das Gehen einen erheblichen Energieaufwand bedeutet; dementsprechend ist der Stoffwechsel im Verhältnis zur völligen Ruhe je nach der Gehgeschwindigkeit um 100—300% gesteigert (siehe S. 201), wovon der Hauptanteil auf die Leistungen des Standbeins entfällt.

21. Kapitel.

Die Nerven.

Zentrifugale und zentripetale Nerven 324. Das doppelsinnige Leitungsvermögen 325. Die Neurofibrillen als leitende Elemente 326. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erregung im Nerven 327. Reizungsmethoden; der elektrische Reiz 328. Der Aktionsstrom des Nerven; Theorie der bioelektrischen Ströme 332. Der Elektrotonus und das PFLÜGERSche Zuckungsgesetz 334. Die Ermüdbarkeit und der Stoffwechsel des Nerven 338.

Schon im vorhergehenden Kapitel war davon die Rede, daß die Bewegungen im allgemeinen so zustande kommen, daß den Muskeln von den Nerven aus Erregungsimpulse zufließen. So ist es das Gegebene, daß wir uns jetzt zunächst der *Physiologie der Nerven* zuwenden. Doch würde die Bedeutung der Nerven von vornherein ungenügend gekennzeichnet, wenn nicht auch gleich an diejenigen Nerven erinnert würde, welche dazu dienen, die Erregungen der Sinnesorgane durch äußere Reize aufzunehmen und zum Zentralnervensystem weiterzuleiten, von wo aus die Erregungen alsdann an die die Muskeln versorgenden Nerven weitergegeben werden können.

Auf diese Weise können die Nerven weit voneinander entfernte Organe im Körper untereinander in Beziehung setzen, und da dies, wie wir sehen werden, meistens rasch geschieht, so liegt es wesentlich an der Funktion des Nervensystems, daß wir den aus zahlreichen Einzelorganen aufgebauten Organismus als ein einheitliches Ganzes funktionieren sehen, wengleich auch das Blut als Träger der inneren Sekrete zu dieser Harmonie der Teile mit beiträgt (siehe Kapitel 18).

Wir schreiben somit von vornherein den Nerven als wichtigste Funktion die *Funktion der Reizleitung* zu und unterscheiden *zentripetale* oder *afferente Nerven*, welche die Erregung dem Zentralnervensystem zuführen, von *zentrifugalen* oder *efferenten Nerven*, in welchen der Erregungsvorgang vom Zentralnervensystem fortläuft. Die zentripetalen Nerven werden vielfach auch als „*sensible*“ *Nerven* bezeichnet, weil ihre Erregung erfahrungsgemäß meistens eine Empfindung in uns auslöst. Doch ist dieser Name in all den zahlreichen Fällen unangebracht, wo wir, wie beispielsweise bei der Erregung niederer wirbelloser Tiere, nicht das mindeste Urteil über das Empfindungsleben haben können; er wird deswegen passend durch die nichts präsumierende Bezeichnung *rezeptorischer Nerv* ersetzt (BEER, BETHE und VON UEXKÜLL), d. h. ein Nerv, welcher den ein Sinnesorgan treffenden Reiz aufnimmt. Die zentrifugalen

Nerven sind meistens *motorische Nerven*, welche eine Muskelkontraktion veranlassen; doch kann die Wirkung auf den Muskel, wie beim Herzen oder beim Darm, auch in einer Akzeleration oder in einer Hemmung bestehen. In anderen Fällen enden die zentrifugalen Nerven statt an Muskeln an Drüsen und fungieren als *sekretorische Nerven*. Mit einem gemeinsamen Namen werden die zentrifugalen Nerven den rezeptorischen als *effektorische Nerven* gegenübergestellt.

Ein Nerv hat aber gewöhnlich zu gleicher Zeit die Fähigkeit sowohl zentripetaler als auch zentrifugaler Leitung. Das kommt daher, daß er aus einzelnen Nervenfasern zusammengesetzt ist, von welchen ein Teil das Zentralnervensystem mit den Sinnesorganen, ein anderer Teil mit den Muskeln verbindet. Solche Nerven heißen *gemischte Nerven*. Sie können beide Funktionen zu gleicher Zeit natürlich nur dann versehen, wenn der Erregungsvorgang sich nicht von einer Faser auf die andere ausbreiten kann, sondern wenn jede Faser, wie die Drähte in einem Kabel, isoliert leitet. Diese Eigenschaft müssen aber die Nerven besitzen; sonst wäre es z. B. nicht zu verstehen, daß der Druck auf zwei nahe beieinander gelegene Punkte der Haut oder die Belichtung zweier eng benachbarter Punkte der Netzhaut zwei gesonderte Empfindungen auslöst, oder es wäre nicht zu verstehen, daß eine isolierte Bewegung im Finger ausgeführt werden kann, ohne daß gleichzeitig durch Überspringen der Erregung auf die sensiblen Fasern alle möglichen Empfindungen im Arm auftreten. Experimentell wird die isolierte Leitung am besten so bewiesen, daß man die einzelnen Wurzeln, aus denen sich ein Nerv bei seinem Ursprung aus dem Rückenmark zusammensetzt, jede für sich reizt; man erhält dann je nach der Wurzel Kontraktionen in lauter verschiedenen Muskelpartien.

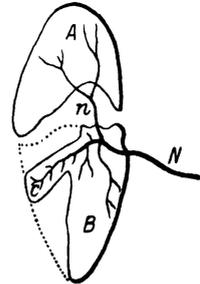


Abb. 104. Zwei-
zipfelversuch am
M. gracilis (nach
KÜHNE).

Aber wenn auch eine jede Nervenfasern für gewöhnlich die Erregung nur in einer Richtung, entweder zentrifugal oder zentripetal, fortleitet, so hat sie doch die Fähigkeit des **doppelsinnigen Leitungsvermögens**; sie verhält sich wie ein in einem elektrischen Stromkreis liegender Draht, der an sich den Strom in jeder Richtung zu leiten vermag, ihn aber, solange er in der bestimmten Schaltung festgelegt ist, immer nur in einer Richtung leitet. Diese Feststellung ist natürlich für die Theorie der Nervenleitung von prinzipieller Bedeutung. KÜHNE führte zum Beweis des doppelsinnigen Leitungsvermögens den folgenden sogenannten *Zweizipfelversuch* aus: er zerschnitt den M. gracilis vom Frosch so (siehe Abb. 104), daß die Hälfte A nur noch durch den Nervenast n mit der Hälfte B und ihrem Anhang C zusammenhing. Wenn man nun z. B. C reizt, so zuckt sowohl B als auch A.

Noch überzeugender ist ein Versuch von BABUCHIN: an das elektrische Organ des Zitterwelses begibt sich eine einzige Nervenfasern, deren Erregung einen elektrischen Schlag des Organs auslöst. Die Innervation des Organs geschieht so, daß der Achsenzylinder der Nervenfasern sich in seine Neurofibrillen aufsplittert, welche sich nun an die verschiedenen Partien des Organs begeben. Reizt man einen Ast der Faser, so entlädt sich das ganze Organ.

Der eleganteste Beweis ist von GOTCH und HORSLEY geführt. Wir werden bald genauer erörtern, daß der erregte Nerv gerade so einen Aktionsstrom produziert, wie der erregte Muskel (siehe S. 332); beim lebenden Nerven ist der Aktionsstrom überhaupt das einzige Dokument seiner Erregung, während der Muskel ja seine Erregung offensichtlicher durch die Kontraktion, eine Drüse durch ihre Sekretion manifestiert. Wir werden ferner erfahren, daß die effektorischen Fasern das Rückenmark durch die vorderen Wurzeln verlassen, die rezeptorischen ins Rückenmark durch die hinteren Wurzeln eintreten. Wenn man nun mit Elektroden von den vorderen Wurzeln, welche an der Bildung des Ischiadikus beteiligt sind, zu einem Kapillarelektrometer ableitet und dann den Ischiadikus peripher reizt, dann zeigt das Elektrometer einen Aktionsstrom an; ebenso, wenn man peripher vom Ischiadikus ableitet und dann die betreffenden hinteren Wurzeln reizt.

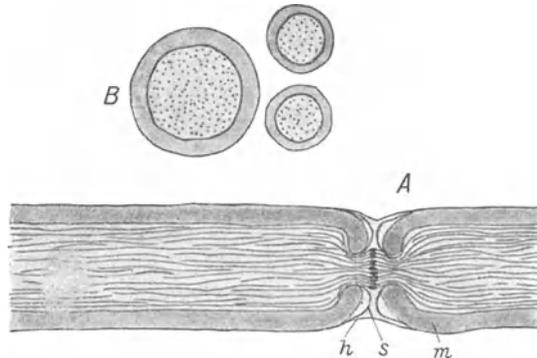


Abb. 105. Markhaltige Nervenfasern mit RANVIERSchem Schnürring im Längsschnitt (A) und im Querschnitt (B) (nach BETHE).
m = Markscheide, h = HENLESche Scheide, s = SCHWANNsche Scheide.

Bei der Erregungsleitung kommt es wahrscheinlich in erster Linie auf die **Neurofibrillen** an. Dafür sprechen zunächst rein anatomische Gründe. Wenn man nämlich unter dem Mikroskop ein gefärbtes Präparat von Nervenfasern betrachtet, welche nicht in Alkohol fixiert wurden, weil dabei infolge von Schrumpfung die Neurofibrillen sich zu dem dicken Strang des Achsenzylinders zusammenlagern, sondern wenn man mit Osmiumsäure fixierte Präparate untersucht, so beobachtet man nach BETHE Bilder, wie in Abb. 105, d. h., die einzelnen Neurofibrillen laufen isoliert voneinander durch die Faser, eingebettet in eine „Perifibrillärschicht“. *Die Neurofibrillen sind nun nach BETHE das einzige Element, welches kontinuierlich die ganze Faser durchzieht.* Denn wie Abb. 105A zeigt, ist die (durch Osmium geschwärzte) Markscheide m an den RANVIERSchen Schnürringen unterbrochen, ebenso die SCHWANNsche Scheide s; die HENLESche Scheide h zieht zwar kontinuierlich über die Einschnürungen hinweg, sie gehört indessen kaum noch zur Nervenfasern hinzu. Nach BETHE ist aber — was die Abb. 105A nicht deutlich zeigt — auch die Perifibrillärschicht an den RANVIERSchen Schnürringen durch eine siebartige Platte, welche allein von den Neurofibrillen durchbohrt wird, unterbrochen.

Auch physiologische Gründe sprechen dafür, daß den Neurofibrillen die Funktion der Leitung zukommt. Wenn man einen Nerven lokal

durch einen herumgelegten Faden quetscht, so verliert er, wenn die Umschnürung ein gewisses Maß überschreitet, die Fähigkeit, eine Erregung zu übermitteln; löst man die Umschnürung dann wieder, so kann die Leitungsfähigkeit wiederkehren (DUCCESCHI). BETHE fand nun, daß aus der komprimierten Stelle soviel Perifibrillärsubstanz weggepreßt werden kann, daß sich ihre Menge zur Normalmenge verhält wie 1:654, ohne daß das Leitungsvermögen erlischt. Komprimiert man nun noch stärker, so geht das Leitungsvermögen verloren, zugleich verlieren die Neurofibrillen aber auch ihre gewöhnliche Färbbarkeit. Beides zusammen läßt darauf schließen, daß *es für die Erregungsleitung auf die Neurofibrillen und nicht auf die Perifibrillärsubstanz ankommt.*

Kehren wir nun noch einmal zu der isolierten Leitung in den Nervenfasern zurück. Man hat die Markscheide öfter mit der Isolationsmasse eines Kabels verglichen; aber das ist unzutreffend, weil auch bei den marklosen Nerven z. B. des Sympathikus die isolierte Leitung besteht. Die Ursache ist bisher nicht bekannt. Die einzelnen Neurofibrillen sind wahrscheinlich nicht gegeneinander isoliert, sondern die Erregung kann von einer Fibrille auf die andere überspringen. Wenigstens muß man das wohl aus dem vorher geschilderten Zweizipfelversuch von KÜHNE und vor allem aus dem Versuch von BABUCHIN an dem elektrischen Nerven schließen, dessen Achsenzylinder sich in die einzelnen Neurofibrillen aufsplittert, und bei dem die Erregung eines Teiles der Neurofibrillen die übrigen zur Miterregung bringt.

Die Geschwindigkeit, mit welcher sich der Erregungsvorgang im Nerven fortpflanzt, ist meßbar, geradeso, wie die Ausbreitung der Kontraktionswelle im Muskel (siehe S. 299). Bis zum Jahre 1850, in welchem HELMHOLTZ zum erstenmal solch eine Messung vornahm, galt es als ausgemacht, daß die Wirkung der Nerven auf der mit unmeßbarer Geschwindigkeit erfolgenden Ausbreitung eines imponderablen Agens beruhe; „schnell wie ein Gedanke“ ist auch heute noch der Ausdruck für einen Vorgang von ungeheurer Geschwindigkeit, wobei ja wiederum die Fortpflanzung eines nervösen Vorgangs, nämlich eines Vorgangs in der Substanz des Gehirns gemeint ist. HELMHOLTZ glaubte jedoch u. a. deshalb eine endliche Geschwindigkeit voraussetzen zu dürfen, weil wenige Jahr vorher von BESSEL auf die „persönliche Zeit“ der Astronomen aufmerksam gemacht war, d. h. auf die individuellen, mehr als $\frac{1}{10}$ Sekunde ausmachenden Schwankungen in den Angaben der Astronomen über den Durchgang eines Sterns durch das Fadenkreuz eines Fernrohres. HELMHOLTZ schloß daraus, daß die Fortpflanzung der Erregung vom Auge zum Zentralnervensystem und von da aus zur registrierenden Hand Zeit, und zwar je nach der Individualität des Beobachters verschiedene Zeit brauche.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erregung im Nerven wurde von HELMHOLTZ zuerst am Nervenmuskelpräparat des Frosches bestimmt. Er maß zu dem Zweck die Latenzzeit der Kontraktion einmal bei Erregung des Nerven an einer nahe bei seinem Eintritt in den Muskel gelegenen Stelle und ein zweites Mal an einem möglichst weit vom Muskel entfernten Punkt. Macht man die Bestimmung an dem S. 298 beschriebenen Apparat, so werden auf der rasch an der Spitze des Muskelhebels vorbeischießenden Schreibfläche zwei Muskelkurven verzeichnet, welche etwas gegeneinander verschoben sind, so wie die Abb. 106 es zeigt. Aus der Verschiebung der Kurven gegeneinander und aus der Geschwindigkeit der Schreibfläche

läßt sich alsdann die Differenz der beiden Latenzzeiten ermitteln; mißt man dann noch die Entfernung zwischen den beiden gereizten Nervenpunkten, so ergibt sich die Fortpflanzungsgeschwindigkeit.

Auf diese Weise bestimmten HELMHOLTZ und BAXT auch die *Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erregung beim Menschen*, indem sie einmal den N. medianus in der Achselhöhle, das zweite Mal nahe am Handgelenk reizten und die Verdickung der Daumenballenmuskulatur registrierten.

Als Ergebnis dieser Messungen fand HELMHOLTZ beim Froschnerven eine Fortpflanzungsgeschwindigkeit von nur 24—27 m, beim Menschen einen ähnlichen Wert, nämlich 33 m pro Sekunde. In neueren Messungen wurden bei verschiedenen warmblütigen Tieren die Reizelektroden direkt an den Nerven angelgt, und das Einlaufen der Erregung im Muskel wurde bei Tier und Mensch nicht mechanisch, sondern mit dem Saitengalvanometer registriert. Das Ergebnis war *für die Warmblüter einschließlich des Menschen eine Fortpflanzungsgeschwindigkeit von etwa 70 m pro Sekunde* (GARTEN). Die Geschwindigkeit mit welcher sich die Erregung im Nerven ausbreitet, ist also nicht einmal so groß, wie die Schallgeschwindigkeit (333 m), also mit der Ausbreitung des Lichts im imponderablen Äther (300 Millionen m) gar nicht zu vergleichen. Vielmehr ist die Geschwindigkeit nur 7—10mal so groß, wie die Fortpflanzungs-

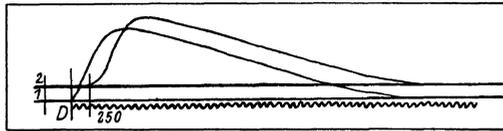


Abb. 106. Messung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erregung im Nerven (nach MAREY).

D = Stimmgabelkurve (1 Schwingung = $\frac{1}{250}$ Sek.).

geschwindigkeit der Kontraktionswelle im Muskel (siehe S. 299), sie ist ungefähr $2\frac{1}{2}$ mal so groß wie diejenige eines guten Schnellzuges (100 km pro Stunde).

Die *Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist je nach der Tiersorte und je nach den äußeren Bedingungen verschieden groß*. So sinkt sie z. B. beim Murmeltier während seines Winterschlafes bis auf 1 m ab. Ferner ist sie bei den marklosen Nerven wirbelloser Tiere nur klein, beim Hummer 6—12 m, beim Tintenfisch 2 m, bei der Nacktschnecke Ariolimax nur 40 cm und bei der Teichmuschel Anodonta sogar nur 1 cm pro Sekunde (CARLSON, CREMER). Sie hat im allgemeinen einen um so geringeren Wert, je langsamer die Kontraktion der zugehörigen Muskulatur vonstatten geht. Durch Temperaturerniedrigung kann man die Geschwindigkeit künstlich herabsetzen; sie sinkt auch bei der Narkose und infolge von langanhaltender ermüdender Reizung (siehe dazu S. 338).

Bisher haben wir die Art der **künstlichen Erregung des Nerven** noch ganz unberücksichtigt gelassen. Geradeso, wie der Muskel (siehe S. 297), so kann auch der Nerv durch die allgemeinen Protoplasma-reize, also mechanisch, chemisch, osmotisch, thermisch oder elektrisch gereizt werden, und dabei gilt auch hier wieder, daß der Angriff von außen rasch bis zu einer gewissen Stärke anschwellen muß. So kann man einen *mechanischen Reiz* durch einen Schlag, Schnitt oder durch Zug ausüben, er ruft aber nur dann eine Zuckung hervor, wenn die Deformation brüsk erfolgt; HEIDENHAIN beklopfte den Nerv

mit einem kleinen Elfenbeinhammer, welcher durch einen elektromagnetischen Unterbrecher rhythmisch bewegt wird, einen sogenannten *Tetanomotor*, und erzeugte dadurch einen Tetanus. Damit ein *chemischer Reiz* mit genügender Geschwindigkeit eine größere Zahl von Nervenfasern trifft, muß man das Chemikale in relativ großer Konzentration anwenden; so sind Säuren, manche Salze, Alkohol u. a. wirksam. Da aber nicht alle Fasern gleichzeitig und gleich stark betroffen werden, so reagiert der dem Nerven anhängende Muskel nicht mit einer einheitlichen Kontraktion, sondern mit sogenannten *fibrillären Zuckungen* oder mit *Flimmern*, d. h. mit unregelmäßigen Zusammenziehungen der einzelnen Fasern (siehe auch S. 79). Einen *osmotischen Reiz* übt man am besten mit einer konzentrierten Salz- oder Zuckerlösung aus; ebenso wirkt Vertrocknen durch die Wasserentziehung. Auch dabei kommt es zu fibrillären Zuckungen. Ein *thermischer Reiz* wird durch schnelles Abkühlen bis unter 0° oder Erwärmen auf 40—45° erzeugt; taucht man z. B. den Ellbogen in Eiswasser und kühlt auf die Weise den Ulnaris, so manifestiert sich die Reizung durch Schmerzen im Ausbreitungsgebiet des Nerven und durch Zuckungen. Allmähliche Änderung der Temperatur bis über eine gewisse Grenze erzeugt nicht Reiz, sondern im Gegenteil Lähmung.

Während bei all den genannten Formen der Reizung eine Beschädigung der empfindlichen Nerven, gerade so wie beim Muskel, fast nicht zu vermeiden ist, läßt sich der **elektrische Reiz** so fein dosieren, daß er der natürlichen Art der Erregung an die Seite gestellt werden kann. Ferner gelingt es allein mit dem elektrischen Strom, alle Fasern eines Nerven, so wie im Leben, zu gleicher Zeit in Tätigkeit zu versetzen, weil der elektrische im Gegensatz zu den übrigen künstlichen Reizen sofort den ganzen Nerven durchsetzt und seine sämtlichen Fasern erregt.

Man verwendet den elektrischen Strom in verschiedener Form und erzielt damit Wirkungen, welche wegen ihrer theoretischen und praktischen Bedeutung genauer zu erörtern sind. Unter Form ist dabei die Kurve des Stromverlaufs, also die Art des Stromanstiegs, seine Dauer und die Art des Stromabfalls zu verstehen.

Schicken wir einen *konstanten galvanischen Strom* von geeigneter Stärke durch einen Nerven, so *reagiert der anhängende Muskel mit einer Zuckung nur im Moment der Schließung und im Moment der Öffnung*, während er in der Zeit der konstanten Durchströmung im allgemeinen in Ruhe verharrt. Läßt man den Strom nicht momentan zu seinem konstanten Endwert ansteigen oder abfallen, sondern läßt ihn mehr oder weniger schnell anschwellen oder absinken, wendet man also zur Erregung statt „*Momentreizen*“ „*Zeitreize*“ an (VON KRIES), so ist die Reizwirkung des Stroms im allgemeinen geringer; bei Momentreizung reagiert z. B. ein Froschnerv auf einen 60 mal schwächeren Strom, als wenn man den Strom innerhalb 1 Sekunde bis zur gleichen Höhe ansteigen läßt. Die Reizwirkung kann aber sogar völlig ausbleiben, wenn man den Strom ganz langsam „*einschleichen*“ oder „*ausschleichen*“ läßt. DU BOIS-REYMOND hat diese Erfahrungen zusammen mit anderen, an anderen Stromformen gewonnenen in den Satz zusammengefaßt, daß *es bei der Erregung nicht auf den absoluten Wert der Stromintensität (bzw. Stromdichte) ankommt, sondern auf die Geschwindigkeit der Änderung der Intensität in der Zeit*. Die Geschwindigkeit ist dabei insofern ein relativer Begriff, als es auch vom Objekt abhängt, ob der Anstieg und Abfall des Stromes von größerer oder geringerer Steilheit sein darf. Untersuchen

wir z. B. nicht bloß Nerven, sondern auch Muskeln, so finden wir, daß ein Muskel um so eher auf Zeitreize anspricht, d. h., daß er einen um so flacheren Stromanstieg noch für seine Erregung verträgt, je träger er reagiert (siehe S. 298); Krötenmuskeln sprechen daher noch auf Zeitreize an, wo Froschmuskeln schon versagen.

Das DU BOIS-REYMONDSche Gesetz hat aber nur beschränkte Gültigkeit. Vor allem kommt es beim konstanten Strom außer auf die Stromintensität und die Steilheit ihrer Änderung auch auf die *Dauer des Stromes an*. Läßt man z. B. Stromstöße mit momentanem Stromanstieg und Stromabfall von verschiedener Dauer auf einen Nerven wirken, so gelangt man bei sukzessiver Verkleinerung der Zeit zwischen Schließen und Öffnen zu einer Dauer, unterhalb deren der bis dahin gleich große Effekt einer Zuckung von bestimmter Höhe anfängt kleiner zu werden, um schließlich zu verschwinden (A. FICK, G. WEISS). Die Minimalzeit, oberhalb deren die Zuckung nicht weiter an Höhe gewinnt, ist von GILDEMEISTER als *Nutzzeit* bezeichnet worden; das soll heißen, daß, wenn man durch Schließen des Stromkreises Strom in ein erregbares Objekt hineinschickt, von der elektrischen Energie nur derjenige Bruchteil für die Erregung ausgenützt wird, welcher innerhalb einer gewissen Zeit, eben der Nutzzeit fließt.

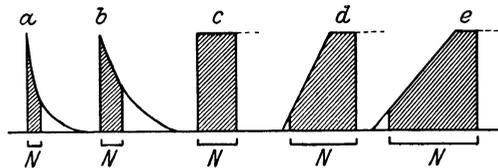


Abb. 107. Abhängigkeit der Nutzzeit (N) von der Stromform (nach GILDEMEISTER).

Die Nutzzeit ist nun keine konstante Größe, sondern sie hängt in charakteristischer Weise von verschiedenen physikalischen und physiologischen Umständen ab. Erstens ist sie *abhängig vom reizbaren Objekt*; sie ist um so größer, je träger das Objekt reagiert (BIEDERMANN). So beträgt sie bei Momentreizung für den Bizeps des Menschen $1-2\sigma$ ($1\sigma = 1/1000$ Sekunde), für den Gastroknemius vom Frosch $3-7\sigma$, für den Gastroknemius der Kröte 13σ , für den Muskel der Krebssehne 300σ (LAPICQUE). Mit der Trägheit der Reaktion hängt es auch zusammen, daß *bei Muskeln, welche, z. B. infolge einer Nervendurchschneidung, degenerieren, die Nutzzeit (bis auf das Mehrhundertfache) verlängert ist* (GILDEMEISTER).

Die Nutzzeit ist ferner *abhängig von der zeitlichen Entwicklung des Reizstroms*. In der Abb. 107 (nach GILDEMEISTER) sind z. B. Ströme von gleicher maximaler Intensität, aber verschiedener Form in ihrem zeitlichen Verlauf dargestellt und durch Schraffierung die Elektrizitätsmengen angedeutet, welche während der Nutzzeit N bewegt werden. (Die Stromkurven a und b entsprechen dem Verlauf von Kondensator-entladungen durch das erregbare Objekt hindurch; bei gegebenem Widerstand geht die Entladung um so langsamer vor sich, je größer die Kapazität des Kondensators.) Die Abbildung zeigt, daß in demselben Sinn, wie die Nutzzeiten, die für die Erregung benötigten Elektrizitätsmengen wachsen.

Dasselbe lehrt auch die Abb. 108, in welcher mehrere „dreieckige“ Stromstöße dargestellt sind, welche eben überschwellige Reize repräsentieren; die dar-

über geschriebenen Zahlen bedeuten die Flächeninhalte und sind ein Maß für die benötigten Elektrizitätsmengen. Auch die in dieser Abbildung niedergelegten Erfahrungen sprechen gegen die allgemeine Gültigkeit des DU BOIS-REYMONDSchen Gesetzes; denn obgleich Stromstärke und Steilheit ihres Anstiegs mehr und mehr sinken, sind die Ströme doch als Schwellenreize untereinander gleichwertig.

Aus den verschiedenen Stromformen erklärt sich auch der bekannte *verschiedene Reizwert von Schließungs- und Öffnungsströmen eines Induktoriums*. Während nämlich bei Schließung und Öffnung gleiche induzierte Elektrizitätsmengen das Organ durchfließen, reagiert dieses im allgemeinen auf die Öffnungen kräftiger, als auf die Schließungen. Das rührt u. a. davon her, daß bei der Schließung durch Selbstinduktion (Extrastrom) der Stromanstieg verzögert und der Strom so zu einem Zeitreiz wird. Die Abb. 109 gibt die Formen des Schließungs- und Öffnungsstromes wieder.

Bei größeren Stromstärken beobachtet man häufig noch eine weitere Abweichung vom DU BOIS-REYMONDSchen Gesetz, nämlich *auch während des konstanten Fließens kann ein Strom reizend wirken*; so ist die Durchströmung eines sensiblen Nerven, z. B. des Ulnaris, von Schmerzen begleitet, und bei Fröschen, welche infolge längerer Abkühlung eine gesteigerte Erregbarkeit erlangt haben, erzeugt konstante Durchströmung Tetanus (VON FREY). Diese Erscheinungen hängen wahrscheinlich mit der Elektrolyse zusammen, welche sich während der konstanten Durchströmung des einen Leiter zweiter Klasse darstellenden Gewebes notwendigerweise vollzieht.

Legen wir uns nun ganz allgemein die Frage vor, *was der elektrische Strom am Nerven oder einem anderen erregbaren Gebilde bewirkt*, so werden wir in jedem

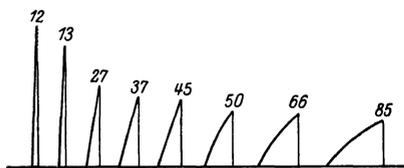


Abb. 108. „Dreieckige“ Stromstöße, bei denen die physiologische Wirkung gleich, die bewegte Elektrizitätsmenge sehr verschieden groß ist (nach GILDEMEISTER).

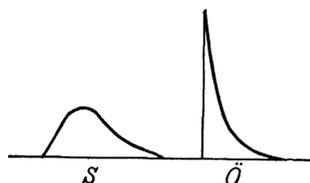


Abb. 109. Verlauf des Schließungs- und Öffnungsinduktionsstroms. Die Flächen, d. h. die bewegten Elektrizitätsmengen sind gleich groß.

Fall bei der Durchtränkung der lebenden Gewebe mit Elektrolytlösung an Ionenbewegungen zu denken haben. NERNST hat nun darauf hingewiesen, daß bei der Durchleitung eines elektrischen Stromes an all den zahlreichen Grenzflächen, welche durch die Plasmahäute der Zellen und durch Fibrillen gebildet werden, Ionenkonzentrationsänderungen ähnlich wie an Elektroden, die in einen Elektrolyten eintauchen, zustande kommen müssen, und hat diese Konzentrationsänderungen als die unmittelbare Ursache der Erregung angesprochen. Nach NERNSTs Vorstellung kommt die Konzentrationsänderung dadurch zustande, daß die Plasmahaut oder die Fibrille als ein zweites Lösungsmittel für die Ionen aufzufassen ist, in welchem die absoluten und relativen Ionen- geschwindigkeiten andere sind, als im Zell- oder Gewebwasser. Nach BETHE ist es wahrscheinlicher, daß die wasserdurchtränkten Häute und Fibrillen durch verschieden starke Adsorption die relativen Beweglichkeiten der Ionen verändern. Nach seinen Untersuchungen an mit Salzlösungen durchtränkten Gelatine- oder Eiweißmembranen ändert sich aber infolge der Durchleitung eines elektrischen Stromes auf den beiden Seiten der Membran nicht bloß die Konzentration der Ionen des Salzes in entgegengesetztem Sinne, sondern auch die Konzentration der Ionen des Wassers H^+ und OH^- , es kommt also zu einer Störung der neutralen Reaktion an den Grenzflächen, und da sich H^+ - und OH^- -Ionen vor den anderen durch besondere chemische Aktivität auszeichnen, so vermutet BETHE in ihnen wohl mit Recht die eigentliche Ursache der Erregung. Von der tatsächlichen Anreicherung dieser Ionen auch an den Grenzflächen lebender Gewebe kann man sich nach BETHE ein deutliches Bild machen, wenn man durch die Stengelzellen von *Tradescantia myrtifolia* einen elektrischen Strom hindurchschickt; diese enthalten nämlich einen violettroten Farbstoff, welcher wie ein Indikator eine Änderung des H^+ - oder OH^- -Gehalts mit einer Änderung seiner Farbe beantwortet, und bei der Durchströmung sieht man nun, wie auf der Seite des Stromeeintritts die Farbe in grün,

auf der Seite des Austritts in rot umschlägt. Der nächste Effekt in dem jedenfalls mehrgliedrigen Erregungsprozeß, welcher sich der Ionenkonzentrationsänderung anschließt, ist wahrscheinlich eine Änderung im Quellungs Zustand der aus Kolloiden aufgebauten und dadurch gegen Ionenkonzentrationsänderungen empfindlichen Häute und Fibrillen (HÖBER) (siehe S. 215).

Natürlich wäre es nun eigentlich die weitere Aufgabe zu zeigen, daß die vorher geschilderten Einflüsse des zeitlichen Verlaufs der elektrischen Ströme quantitativ auf die an den Grenzflächen zustandekommenden Ionenkonzentrationsänderungen zurückgeführt werden können. Diese Aufgabe ist jedoch bisher noch nicht zu lösen.

Irgendwie kommt es nun auch infolge der elektrischen oder sonst einer Art von Reizung zu dem bekanntesten Symptom der Erregung des Nerven, zu dem **Aktionsstrom**, beruhend auf der Negativität der erregten Stelle. *Der Aktionsstrom ist sogar die einzige bisher bekannte Äußerung des Erregtseins beim lebenden Nerven.*

Man hat allerdings gefunden, daß Nerven, welche selbst nur eine Sekunde elektrisch oder mechanisch gereizt worden sind, ein anderes mikroskopisches Aussehen zeigen können, als ungereizte Nerven. STÜBEL beobachtete nämlich, daß das Neurokeratingerüst, welches sich nach Alkoholfixierung des Nerven in

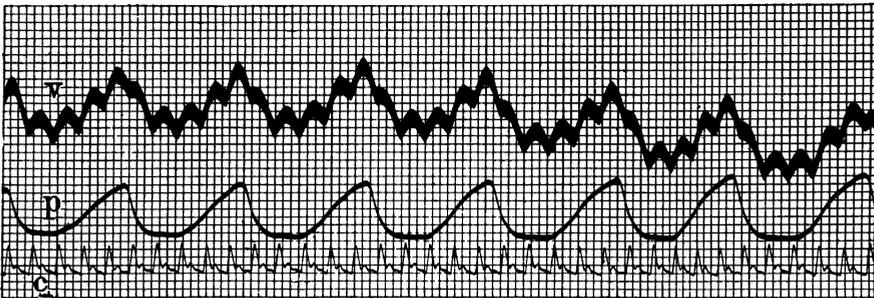


Abb. 110. Elektrovagogramm (nach EINTHOVEN).
c = Pulscurve, p = Atemkurve, v = Elektrovagogramm.
(Aus NAGELS Handbuch der Physiologie.)

der Markscheide zeigt, aus weiteren Maschen besteht, wenn der Nerv vorher gereizt, als wenn er ruhend fixiert wurde. Er schließt wohl mit Recht daraus, daß bei der Erregung ein gewisser Austausch auch zwischen Neurofibrillen und Markscheide stattfinden muß; danach wären also an der Erregungsleitung doch nicht bloß die Neurofibrillen beteiligt, wie es früher (S. 326) angeführte Versuche vermuten ließen. Ferner ist mit dem Mikroskop festgestellt, daß die Aufquellung der Achsenzylinder, welche gewisse Alkalisalzlösungen erzeugen, und welche in ähnlicher Weise wahrscheinlich bei der Erregung zustande kommen, durch die die Erregbarkeit aufhebenden Narkotika ebenfalls aufgehoben wird (HÖBER). Aber dies sind doch nur nachträgliche Befunde am toten Nerven; während der Erregung äußert sich für uns die Betätigung bisher, wie gesagt, allein im Aktionsstrom.

Man weist den Aktionsstrom des Nerven am besten durch Ableiten zu einem Kapillarelektrometer oder einem Saitengalvanometer nach; auf rein physiologischem Wege kann man ihn auch durch *sekundären Tetanus* (siehe S. 308) demonstrieren, indem man den Nerven eines Nervenmuskelpreparats auf einen anderen Nerven darauflegt und diesen elektrisch reizt (HERING). Auch der Aktionsstrom des Nerven ist diphasisch und beruht auf der Fortpflanzung einer Negativitätswelle. Er ist nicht bloß bei künstlicher Reizung, sondern auch unter natürlichen Umständen nachzuweisen. Durchschneidet man z. B. den Vagusstamm und leitet von seinem peripheren Stumpf mit Elektroden zum Saitengalvanometer ab, so erhält man ein „Elektrovagogramm“, wie Abb. 110

es zeigt. Man sieht Schwankungen der Saite, welche synchron mit der Atmung verlaufen, also offenbar durch Erregung des Vagus in der periodisch sich dehnenden Lunge zustande kommen (siehe S. 117). Den Atemschwankungen sind vom Herzschlag abhängige, offenbar durch Erregung beigemischter Depressorfasern verursachte Schwankungen überlagert (LEWANDOWSKY, EINTHOVEN). Jedenfalls kann man auch vom N. depressor eine negative Schwankung erhalten, wenn man den Druck in der Aorta steigert und dadurch die Nervenendigungen auf mechanische Weise erregt (siehe S. 137) (TSCHERMAK). Des weiteren sind von dem durch Licht erregten Auge und von den einzelnen Bezirken der Großhirnrinde, wenn sie von den Sinnesorganen aus durch die sensiblen Nerven erregt ist, Ströme abzuleiten. Kurz überall, wo Nerven sich ausbreiten — und das ist eigentlich der ganze Körper —, da kommen auch Aktionsströme vor.

Die physiologische Bedeutung der Aktionsströme reicht aber, wie bei dieser Gelegenheit hinzugefügt werden mag, noch weiter. *Überall wo man überhaupt von Erregung des Protoplasmas reden kann, da scheint der Aktionsstrom eine Begleiterscheinung zu sein.* So verhält sich, wenn man eine Hälfte eines grünen Blattes besonnt, die andere im Schatten hält, die assimilatorisch tätige belichtete Hälfte negativ gegen die unbelichtete; so antwortet das Blatt einer insektenfressenden *Dionaea* auf einen Reiz nicht bloß mit einer Bewegung, sondern auch mit einem Aktionsstrom. Ferner kennt man beim Tier die *Drüsenströme* als Ausdruck der sekretorischen Tätigkeit und vor allem die mächtige Wirkung des erregten „*elektrischen Organs*“ der elektrischen Fische. Die Drüsenströme der Haut machen sich in eigenartiger Weise in dem sogenannten „*Willkürversuch*“ von DU BOIS-REYMOND und in dem *psychogalvanischen Reflexphänomen* bemerkbar. Beim Willkürversuch leitet man symmetrisch, z. B. von den beiden Händen, zu einem Galvanometer ab; spannt man nun die Muskeln des einen Arms willkürlich an, so macht die Galvanometernadel einen Ausschlag. Die Ursache ist eine die Muskelaktion begleitende Mitinnervation der Schweißdrüsen. Dies ist besonders für den psychogalvanischen Reflex festgestellt. Darunter versteht man die zuerst von TARCHANOFF beobachtete Erscheinung, daß alle möglichen Erregungen, z. B. durch einen Stich, durch Licht, durch Schall, aber auch durch psychische Emotionen, wie sie etwa durch ein bedeutungsvolles Wort, das man der Versuchsperson zuruft, ausgelöst werden können, sich in Schwankungen des Galvanometers kundgeben, mit welchem die Versuchsperson in leitender Verbindung steht (VERAGÜTH). Die Ausschläge sind nun erstens dann am stärksten, wenn man von den besonders schweißdrüsenreichen Hautflächen der Handteller, der Fußsohlen, der Achselhöhlen, der Stirn ableitet, dagegen am schwächsten, wenn die Ableitung von den schweißdrüsenarmen Bezirken der Wangen, des Rückens, des Gesäßes her vorgenommen wird. Zweitens verschwindet das Phänomen für längere Zeit, wenn man dem Reagenten subkutan 1 mg Atropin injiziert und dadurch die Drüsentätigkeit lähmt (siehe S. 22) (LEVA).

Es liegt nahe, schließlich in diesem Zusammenhang auch die Frage aufzuwerfen, wie man sich *das Zustandekommen der bioelektrischen Ströme* erklären soll. Da es sich, wie wir jetzt festgestellt haben, um ein allgemein physiologisches Phänomen handelt, so wird die Erklärung auch von allgemein gültigen Annahmen ausgehen müssen. Das Merkwürdige an den bioelektrischen Strömen ist ja vor allem, daß ihre Erzeuger sich in ihren äußeren Wirkungen zwar wie galvanische Elemente verhalten, aber dabei innerlich ganz anders beschaffen sind. Denn die Leiter erster Klasse, welche als Elektroden zu jedem galvanischen

Element gehören, und an deren Oberfläche gerade die wesentlichen Potential-sprünge zustande kommen, fehlen hier. Darum ist vor allem zu fragen, was an deren Stelle tritt. Wir haben nun schon bei der Erwähnung der Vorstellungen über das Zustandekommen der elektrischen Reizung gesehen (siehe S. 321), daß die Membranen und Fibrillen der Organe sich in ihrem Einfluß auf die Ionenbewegung ähnlich wie Elektroden verhalten können. Im Prinzip werden wir auch zur Erklärung der bioelektrischen Erscheinungen annehmen können, daß die Zellmembranen der Sitz von Elektrodenpotentialen sind. Eine Elektrode ist ja ein Metallstück, welches an seiner Oberfläche eine Sorte von Ionen, die Metallionen, in einen umgebenden Elektrolyten übertreten läßt. Gerade so kann eine Zellmembran, welche auf ihrer dem Protoplasma zugekehrten Innenseite mit einer anderen Elektrolytlösung in Berührung steht, als auf ihrer Außenseite, durch irgendwelche Eigenschaften, durch ein besonderes Lösungsvermögen oder durch Adsorption, dazu befähigt sein, vorzugsweise einer Ionensorte den Durchtritt durch Diffusion zu gewähren; alsdann wird die Membran zum Sitz eines Potentialsprungs (W. OSTWALD, BERNSTEIN). Hat weiter die Membran an einer Stelle der Zelloberfläche andere Eigenschaften, als an einer anderen, so muß zwischen beiden Stellen eine Potentialdifferenz vorhanden sein. St rk schematisiert können wir uns das Zustandekommen des Stromes etwa an Hand der Abb. 111 klar-machen; die schraffierte

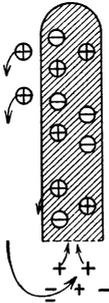


Abb. 111. Schema zur Erklärung des Ruhestroms nach BERNSTEIN.

Fläche bedeute ein Ende einer Muskelfaser, die starke Kontur sei ihre unverletzte Plasmahaut, die gestrichelte Linie unten bedeute einen durch Verletzung erzeugten Querschnitt; vorausgesetzt nun, daß die intakte Plasmahaut für die inneren und äußeren Anionen, die in der Abbildung durch \ominus und $-$ bezeichnet sind, und für

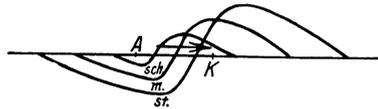


Abb. 112. Erregbarkeitsänderung im Elektrotonus. A = Anode. K = Kathode. sch., m. und st. = Kurven der Änderung der Erregbarkeit durch schwachen, mittelstarken und starken Strom.

das äußere Kation $+$ undurchlässig und allein für das innere Kation \oplus durchlässig ist, so muß ein Strom von der durch die Pfeile markierten Richtung als Ruhestrom des Muskels resultieren. Der Aktionsstrom wäre entsprechend darauf zurückzuführen, daß an der jeweilig erregten Stelle die Ionen andere Durchtrittsbedingungen vorfinden, als an einer ruhenden Stelle.

Kehren wir nach dieser Abschweifung zur Physiologie des Nerven zurück, und zwar noch einmal zu seiner *Durchströmung mit dem konstanten elektrischen Strom*. Die auf die Weise erzeugten Ionenkonzentrationsänderungen an den Grenzflächen (siehe S. 331) gehen nämlich außer mit Erregung mit einer Reihe weiterer physiologischer Zustandsänderungen einher, welche von DU BOIS-REYMOND unter dem Namen des **Elektrotonus** zusammengefaßt worden sind. Während der Dauer der Durchströmung wird erstens *die Erregbarkeit des Nerven verändert*; in der Umgebung der Anode ist sie herabgesetzt, in der Umgebung der Kathode gesteigert. Zwischen den beiden Polen befindet sich ein „Indifferenzpunkt“, an dem die Erregbarkeit unverändert geblieben ist; dieser Punkt liegt bei Anwendung schwacher Ströme mehr zur Anode, bei Anwendung starker Ströme mehr zur Kathode hin. Das Verhalten ist in der Abb. 112 dargestellt; in dieser bedeutet die gerade Linie den Nerven, der Pfeil gibt die Stromrichtung an, die positiven und negativen Ordinatenwerte der Kurven bedeuten die Erregbarkeitsänderungen, die Bezeichnungen sch., m. und st. bedeuten schwache, mittelstarke und starke Ströme. Die Erreg-

barkeitsänderungen werden folgendermaßen nachgewiesen: liegt an einem motorischen Nerven die Kathode näher, die Anode weiter entfernt vom Muskel, hat der Strom also, wie man sagt, absteigende Richtung, so erzeugt schon ein schwächerer zwischen Kathode und Muskel angesetzter Induktionsreiz eine Zuckung oder einen Tetanus, als ohne die Durchströmung; hat dagegen der Strom die umgekehrte, aufsteigende Richtung, so ist die Reizwirkung des Induktionsstromes, der jetzt zwischen Anode und Muskel angreift, herabgesetzt. Zum Nachweis der intrapolaren Veränderungen kann man keinen elektrischen Reiz verwenden, weil Reizstrom und konstanter Strom einander stören würden; man wählt statt dessen mechanische oder chemische Reize. Die Zustandsänderung an der Anode heißt *Anelektrotonus*, die an der Kathode *Katelektrotonus*.

Außer der Erregbarkeit ist *im Anelektrotonus auch die Leitungsfähigkeit herabgesetzt* (PFLÜGER). Durchströmt man den Nerven nämlich in aufsteigender Richtung und prüft wiederum die Erregbarkeit mit einem Induktionsstrom, so äußert sich die Steigerung der Erregbarkeit an der Kathode nur dann in einer verstärkten Zuckung des Muskels, wenn der konstante Strom relativ schwach ist; verstärkt man ihn, so nimmt im Gegenteil die Reizwirkung ab, um bei noch weiterer Verstärkung sogar zu verschwinden. Dies beruht darauf, daß die anelektrotonische Strecke leitungsunfähig geworden ist, so daß die in der Kathodengegend erzeugte Erregung nicht zum Muskel durchgelassen wird.

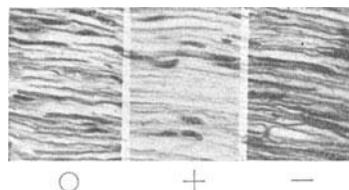


Abb. 113. Polarisationbilder des Nerven (nach BETHE).

Eine dritte Veränderung im Elektrotonus besteht darin, daß *bei Stromöffnung für kurze Zeit der Katelektrotonus in einen Anelektrotonus, der Anelektrotonus in einen Katelektrotonus umschlägt*.

Daß diese physiologischen Erscheinungen mit Ionenkonzentrationsänderungen, d. h. chemischen Veränderungen an den Polen des zugeführten Stroms zusammenhängen, wird sehr anschaulich dadurch bewiesen, daß den physiologischen Änderungen Änderungen in der Färbbarkeit des Nerven unmittelbar nach seiner elektrischen Durchströmung entsprechen (BETHE). Abb. 113 gibt drei Längsschnitte aus einem Forschnerven wieder, in denen man die Achsenzylinder verschieden stark tingiert sieht. Der mittlere Schnitt zeigt eine herabgesetzte Färbbarkeit an der Anode, der rechte eine gesteigerte Färbbarkeit an der Kathode, während der linke Schnitt, aus einer extrapolaren Strecke stammend, den unveränderten Zustand repräsentiert. Dies „Polarisationsbild“ erhält man nach Abtötung oder Narkotisierung des Nerven nicht oder nur angedeutet.

Auf diesen Erscheinungen beruht das sogenannte **Pflügersche Zuckungsgesetz**, d. h. ein eigenartig verschiedenes Verhalten des Muskels, je nachdem sein Nerv von einem aufsteigenden oder absteigenden, von einem schwachen oder starken konstanten Strom durchflossen wird. Das Zuckungsgesetz wird in folgendem Schema zusammengefaßt:

Stromstärke	Aufsteigender Strom		Absteigender Strom	
	Schließung	Öffnung	Schließung	Öffnung
schwach	Zuckung	Ruhe	Zuckung	Ruhe
mittelstark	Zuckung	Zuckung	Zuckung	Zuckung
stark	Ruhe	Zuckung	Zuckung	Ruhe

Zur Erklärung des Gesetzes ist hauptsächlich folgendes zu sagen:

1. Wir haben schon früher gesehen, daß der konstante Strom im wesentlichen nur bei Schließung und bei Öffnung erregend wirkt. Man kann nun zeigen, daß *bei der Schließung die Erregung an der Kathode, bei der Öffnung an der Anode zustandekommt*, oder anders ausgedrückt, *der Beginn des Katelektrotonus und das Verschwinden des Anelektrotonus wirken reizend*; das heißt auch: jedesmal kommt es zur Erregung, wenn die Erregbarkeit ansteigt. Den Beweis für diesen Satz kann man auf verschiedene Art führen. Man kann z. B. die Latenzzeit bei Schließung und Öffnung messen; man findet dann, daß, wenn man einen Strom in aufsteigender Richtung durch den Nerven schiebt, die Schließungszuckung eine größere Latenzzeit hat, als die Öffnungszuckung, weil die Kathode weiter vom Muskel entfernt liegt, als die Anode; bei absteigender Richtung ist das Umgekehrte der Fall (PFLÜGER, VON BEZOLD). Ein sehr anschaulicher Beweis am Muskel, welcher ebenfalls die Erscheinungen des Elektrotonus zeigt, beruht darauf, daß die Muskelkontraktion bei der Schließung an dem der Kathode anliegenden Ende, bei der Öffnung an dem der Anodeanliegenden Ende beginnt; klemmt

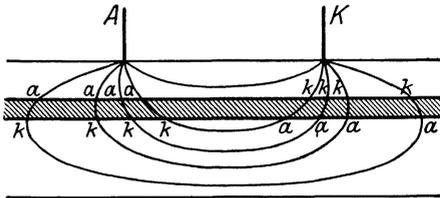


Abb. 114. Der Elektrotonus bei dem in natürlicher Lage befindlichen Nerven.

man nämlich einen Muskel in der Mitte ein, so pflanzt sich, wie unter ähnlichen Umständen beim Nerven (siehe S. 327), die Erregungswelle nicht über die komprimierte Stelle fort; leitet man nun durch die ganze Länge des Muskels den Strom, so zuckt bei der Schließung nur die eine, kathodische, bei der Öffnung nur die andere, anodische Hälfte (HERING).

Ein weiterer Beweis ist das sogenannte „polare Versagen“; wenn man das eine Ende eines Muskels durch Schnitt oder auf chemische Weise, z. B. durch Chloroform abtötet und legt nun die eine Elektrode ans gesunde, die andere ans abgestorbene Ende des Muskels, so zuckt dieser immer nur bei Schließung oder nur bei Öffnung, nämlich beim Schließen, wenn die Kathode, beim Öffnen, wenn die Anode der gesunden Substanz anliegt.

Wenn weiter nach dem PFLÜGERSCHEN Zuckungsgesetz schwache Ströme allein bei der Schließung eine Zuckung erregen, so ist das darauf zu beziehen, daß *der Beginn des Katelektrotonus stärker erregend wirkt, als das Aufhören des Anelektrotonus*.

2. Während das Verhalten bei mittelstarken Strömen ohne weiteres klar ist, bedarf *das Verhalten gegenüber starken Strömen* noch einer Auseinandersetzung. Der aufsteigende Strom erzeugt bei Schließung deshalb keine Zuckung, weil zwar an der Kathode eine Erregung zustande kommt, durch den starken Anelektrotonus aber der Weg zum Muskel infolge der Leitungsunfähigkeit des Nerven blockiert ist. Der absteigende starke Strom verursacht nur eine Schließungszuckung, weil bei der Öffnung zwar durch Verschwinden des Anelektrotonus eine Erregung zustande kommt, zu gleicher Zeit aber der Katelektrotonus in einen Anelektrotonus umschlägt und so wiederum der Erregung der Weg zum Muskel abgeschnitten wird. Zum Beweis sei das Verhalten angeführt, welches ein gemischter Nerv bei Durchströmung darbietet: ist der Strom stark und absteigend, so erfolgt bei Schließung Zuckung,

aber keine Schmerzäußerung; ist der Strom aufsteigend, so erfolgt das Gegenteil, bei Schließung Schmerzäußerung, aber Muskelruhe.

Will man das **Pflügersche Zuckungsgesetz am Menschen** prüfen, so stößt man zunächst auf gewisse Schwierigkeiten, welche davon herrühren, daß hier der Nerv nicht die einzige leitende Verbindung zwischen den Elektroden darstellt, sondern daß der Strom auch die Haut und die den Nerven umgebenden Gewebe durchsetzt. Die Folge davon ist eine Stromausbreitung, wie sie in dem Schema der Abb. 114 angedeutet ist. Man sieht, daß die Stromfäden von den Elektroden nach allen Seiten ausstrahlen, und daß unter jeder Elektrode der Strom sowohl in den Nerven eintritt, als auch aus ihm austritt (HELMHOLTZ). Dadurch kommt es, daß unter der Anode A sowohl Anelektrotonus a, als auch, besonders zu beiden Seiten, Katelektrotonus k herrscht, und daß umgekehrt unter der Kathode Katelektrotonus und außerdem in der Umgebung Anelektrotonus herrscht. Die beiden Pole der Zuleitung erzeugen also am Nerven nicht bloß eine „reelle“ Anode und Kathode, sondern außerdem auch noch eine „virtuelle“ Kathode und Anode.

Um beim Menschen die Reizwirkung zu diagnostischen oder therapeutischen Zwecken lokal zu beschränken, bedient man sich gewöhnlich einer kleinflächigen Elektrode, welche an dem zur Reizung bestimmten Ort angesetzt wird — sie heißt die *differente Elektrode* — und einer in einiger Entfernung angesetzten großflächigen, der *indifferenten Elektrode*. Da es für die Reizung des Nerven nicht eigentlich auf die Stromstärke ankommt (siehe S. 329), sondern auf die Stromdichte, so kann man auf die beschriebene Weise die Stromlinien bis zur wirksamen Dichte an der differentiellen Elektrode zusammendrängen, während sie zugleich an der indifferenten Elektrode bis zur Unwirksamkeit auseinandergezogen sind. Bei normaler Elektrodenfläche (etwa 3 qcm) wird ein innerhalb des menschlichen Körpers gelegener Nerv bei 0,5—2 Milliampere erregt.

Macht man nun die differente Elektrode abwechselnd zur Anode und Kathode, so findet man gewöhnlich ein Zuckungsgesetz gültig, das in die Formel gefaßt zu werden pflegt: KSZ—ASZ—AÖZ—KÖZ (WALLER). Nämlich bei allmählicher Steigerung der Stromstärke kommt es zuerst bei der Schließung zur Zuckung, wenn der wirksame Pol Kathode ist, es erscheint eine sogenannte *Kathodenschließungszuckung*; dann folgt bei weiterer Verstärkung *Anodenschließungszuckung*, dann *Anodenöffnungszuckung* und schließlich *Kathodenöffnungszuckung*. Diese Regel wird folgendermaßen erklärt: zu allererst wird, entsprechend dem PFLÜGERSCHEN Zuckungsgesetz, der Katelektrotonus an der der Kathode zugekehrten Seite des Nerven wirksam, dann der Katelektrotonus an der virtuellen Kathode des Nerven, welche unter der Anode gelegen ist; die darauf folgende Anodenöffnungszuckung ist auf das Verschwinden des Anelektrotonus an der reellen Anode des Nerven zu beziehen, und die Kathodenöffnungszuckung, welche schließlich am spätesten auftritt, rührt von dem Verschwinden des Anelektrotonus an der virtuellen unter der Kathode gelegenen Anode her.

Diese Form, welche das PFLÜGERSCHE Zuckungsgesetz in seiner Anwendung auf den in das lebende Gewebe eingebetteten Nerven annimmt, ist für die praktische Medizin von Bedeutung, weil sie charakteristisch ist für das normale Verhalten des Nerven; in pathologischen Fällen finden sich Abweichungen (ASZ vor KSZ, sog. Entartungsreaktion). Wertvoll ist das Gesetz ferner in seiner Anwendung für die Therapie; man bedient sich gelegentlich der Anode, um bei Krampfständen, Neuralgien und dergleichen durch den Anelektrotonus eine beruhigende Wirkung auszuüben.

Zum Schluß bleibt nun noch von denjenigen Begleiterscheinungen der spezifischen Funktion des Nerven etwas zu sagen, denen wir bei

der Erörterung der in manchen Stücken vergleichbaren Muskelfunktion auf Schritt und Tritt begegnet sind, nämlich von dem *Stoff- und Energie-wechsel* und von der *Ermüdbarkeit des Nerven*.

Schon die auffallend spärliche Versorgung mit Blut läßt vermuten, daß die Abnutzung durch die Funktion beim Nerven gering ist. In der Tat bereitet es im allgemeinen Schwierigkeiten, beim Nerven eine *Ermüdbarkeit* festzustellen. Reizt man einen motorischen Nerven irgendwie längere Zeit, so stellt der Muskel ziemlich bald seine Tätigkeit ein; das beruht natürlich nicht auf einer Ermüdbarkeit des Nerven, sondern auf der Ermüdbarkeit des Muskels. Will man die erstere studieren, so bedarf es dazu irgend eines Kunstgriffes, um den Muskel während der Zeit der Dauerreizung des Nerven von den Erregungsimpulsen abzusperren. BERNSTEIN verwendete dafür das *Kurare*.

Kurare ist ein südamerikanisches Pfeilgift, das die Indianer am Orinoco, am Amazonenstrom und in Guyana zu Jagd- und Kriegszwecken verwenden. Es ist ein Extrakt aus verschiedenen Strychnosarten und enthält an giftigen Bestandteilen vor allem das Kurarin.

Das Kurare lähmt schon in sehr kleinen Dosen die Skelettmuskulatur, und zwar, wie CLAUDE BERNARD und KÖLLIKER schon in den 50er Jahren gezeigt haben, eigentümlicherweise durch Vergiftung der motorischen Endplatten, während sensible Nerven, Zentralnervensystem, motorische Nervenstämme und Muskeln erregbar bleiben; das Kurare blockiert also den Übergang vom Nerv zum Muskel. Dies ist auf folgende Weise gezeigt worden: unterbindet man bei einem Frosch die Art. iliaca oder umschnürt man den Oberschenkel unter Ausschluß des N. ischiadicus und bringt dann etwas Kurare in den Rückenlymphsack, so tritt alsbald Lähmung des ganzen Tieres ein; nur das Bein, dessen Kreislauf unterbrochen worden ist, bleibt verschont; es führt auf Reizung der Haut an irgend einer Stelle Reflexbewegungen, ferner auch Spontanbewegungen aus. Dabei sind bei dieser Versuchsanordnung das Zentralnervensystem, die sensiblen Nerven bis auf diejenigen des aus dem Kreislauf ausgeschalteten Beines, die motorischen Nerven, auch die des unterbundenen Beines oberhalb der Ligatur, dem Gift exponiert, und da sich die Muskeln des unterbundenen Beines bei direkter Reizung normal kontrahieren, so bleibt allein der Schluß übrig, daß eben die motorischen Endplatten gelähmt sind.

Diese Kurarewirkung machte sich BERNSTEIN zum Studium der Ermüdbarkeit des Nerven zunutze. Wenn man nämlich ein Tier durch Kurare gelähmt hat, so kann man die motorischen Nerven stundenlang reizen; wird dann nach langer Zeit das Kurare durch die Nieren aus dem Körper ausgeschieden, so zeigt es sich, daß die Nerven trotz der Reizung inzwischen nicht die Erregbarkeit verloren haben. Am elegantesten führt man den Versuch so aus, daß man nach lange anhaltender Kuraresierung das Gift durch sein Gegengift Physostigmin akut ausschaltet; dann zeigt sich, daß *der Nerv unermüdet geblieben* ist.

Eine andere Methode, den ermüdbaren Muskel zeitweilig sozusagen vom Nerven abzuhängen, ist die Durchleitung eines starken konstanten Stromes in aufsteigender Richtung. Reizt man dann den Nerven oberhalb der stromdurchflossenen Strecke mit tetanisierenden Induktionsschlägen, so verharrt der Muskel wegen des Anelektrotonus in Ruhe, um sofort, als Zeichen der Unermüdbarkeit des Nerven, zu reagieren, wenn man den konstanten Strom unterbricht (BOWDITSCH).

Es gibt auch Bezirke im Körper, an denen sowohl die Muskeln als auch die Nerven schwer ermüdbar sind; so hat BECK den Sympathikus oberhalb des Ganglion cervicale supremum 17 Stunden lang gereizt und während der ganzen Zeit die Pupille erweitert gefunden (siehe S. 356).

Ferner kann man bei Ableitung der Aktionsströme vom Nerven feststellen, daß bei lange anhaltender Reizung die elektrischen Schwankungen nicht an Höhe einbüßen (TUR). Das gilt freilich nicht allgemein; GARTEN hat beim Olfaktorius des Hechtes gefunden, daß er typisch ermüdbar ist; denn die Aktionsströme schwinden in ziemlich kurzer Zeit, um nach Gewährung einer Erholungspause von neuem zu erscheinen.

Auch bei den scheinbar unermüdbaren Nerven läßt sich aber unter besonderen Bedingungen zeigen, daß sie doch auch zu ermüden sind. Wenn man einen Nerven in eine Stickstoffatmosphäre bringt, so erlischt allmählich seine Erregbarkeit. Ist er noch nicht vollständig erstickt, so zeigt er deutlich Ermüdungserscheinungen, die sich z. B. darin äußern, daß er nur noch auf jeden zweiten oder dritten Reiz anspricht und eine Muskelzuckung auslöst (FR. W. FRÖHLICH, v. BAEYER).

Dieser Versuch weist uns auch darauf hin, daß dem Nerven ein wenn auch geringer Stoffwechsel zukommt. Durch Stickstoff gelähmt, kann er sich in Sauerstoff wieder erholen und mit einem empfindlichen Instrument für die Messung des respiratorischen Gaswechsels, etwa von der Art des BARCROFT-Manometers (siehe S. 94), kann man auch feststellen, daß eine schwache Sauerstoffzehrung und Kohlensäureproduktion statthat (THUNBERG). Ja es ist auch die Angabe gemacht, daß bei elektrischer Reizung die Kohlensäureabgabe des Froschnerven merklich zunimmt (HABERLANDT, TASHIRO). Eine dementsprechende Wärmebildung ließ sich jedoch bisher nicht nachweisen.

22. Kapitel.

Das Rückenmark.

Die Reflexe 340. Die Reflexzeit 344. Die irreziproke Reizleitung 345. Die zentrale Rhythmik 345. Die wechselnde Erregbarkeit 345. Die Summation und die Bahnung 346. Die Reflexhemmung 347. Der Reflextonus 348. Ataxie 349. Die Bedeutung der Ganglienzellen 351. Analyse der Lokomotion 353. Segmentale Wurzelinnervation und segmentale Reflexzentra 355. Das Centrum cilio-spinale 356. Centrum ano-, vesico- und genito-spinale 357. Das BELL-MAGENDIESche Gesetz 357. Aufsteigende und absteigende Degeneration 358. Die Leitungsbahnen im Rückenmark 360. Durchschneidungen der Leitungsbahnen 362.

Äußerlich ist das Rückenmark einem dicken Nerven vergleichbar, welcher zahlreiche Äste abgibt, und auch in einer seiner beiden Hauptfunktionen ähnelt es einem peripheren Nerven, nämlich in der *Funktion der Erregungsleitung*. Aber wie es anatomisch vor den meisten peripheren

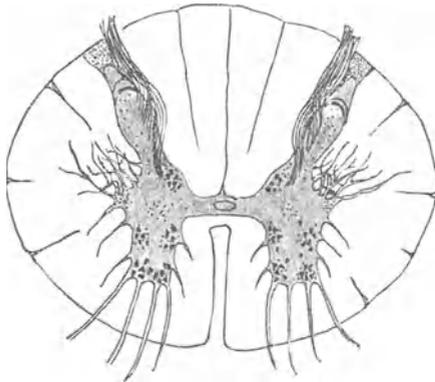


Abb. 115. Querschnitt durch das menschliche Rückenmark.

In der grauen Substanz zahlreiche kleinere und größere Ganglienzellen.

Charakter des Zweckmäßigen, d. h. sie dient der Behauptung des Organismus gegenüber den Eingriffen von seiten der Außenwelt. Die menschlichen Reflexe endlich sind, abgesehen von den schon genannten Eigentümlichkeiten, gegenüber anderen Äußerungen häufig durch das Unbeteiligtbleiben der Seele, durch die *Abwesenheit von Empfindungen und Gefühlen* ausgezeichnet.

Die Reflexaktionen sind in den meisten Fällen *Reflexbewegungen*, wie z. B. die Abwehrbewegung eines Beins, wenn die Haut des Fußes

Nerven durch den Besitz von Ganglienzellen ausgezeichnet ist, welche in seiner grauen Substanz gelegen sind (siehe Abb. 115), so kommt ihm noch eine zweite besondere Funktion zu, welche mit dem Vorhandensein der Ganglienzellen zusammenhängt, die *Reflexfunktion*. Von dieser soll zuerst die Rede sein.

Unter einem **Reflex** versteht man eine auf einen bestimmten Reiz eintretende Aktion, welche dadurch, daß sie mit Regelmäßigkeit zustande kommt, den *Eindruck des Maschinenmäßigen*, durch eine bestimmte innere Organisation Erzwungenen macht. In vielen Fällen hat die Aktion auch den

gekniffen wird. Solche Bewegung besteht aber nicht in der Zuckung des einen oder anderen Muskels, sondern sie ist gewöhnlich aus den zeitlich und intensiv genau abgestuften Kontraktionen mehrerer bestimmter Muskeln zusammengesetzt, ist also eine „koordinierte Bewegung“. In anderen Fällen ist die reflektorisch hervorgerufene Aktion eine *Reflexhemmung*, d. h. die Unterbrechung einer Muskeltätigkeit, in wieder anderen Fällen eine *Reflexsekretion*.

Die *reflexauslösenden Reize* können an irgend einem beliebigen Sinnesorgan angreifen; da aber fast stets in jedem Augenblick die Vorgänge der Außenwelt mehrere Sinnesorgane in Tätigkeit versetzen, so macht das Verhalten des Tieres häufig den Eindruck des Willkürlichen, weil man die Ursachen der verschiedenen gleichzeitig ausgelösten Reflexe nicht deutlich übersieht. Den Eindruck des Gesetzmäßigen in den Reflexerscheinungen erhält man mit Sicherheit nur dann, wenn man dafür sorgt, daß wesentlich ein bestimmter, beabsichtigter Reiz zur Wirkung gelangt. Um dies zum Zweck des Studiums der Reflexe zu erreichen, ist es vorteilhaft, die Haupteingangsstelle für Sinneserregungen, den Kopf, auszuschalten, d. h. das Versuchstier zu dekapitieren. Beim Frosch durchschneidet man zweckmäßig das Zentralnervensystem an der Grenze von Schädel und Wirbelsäule, man durchtrennt dabei das verlängerte Mark; beim Säugetier führt man den Schnitt an der Grenze von Hals- und Brustwirbelsäule aus; für kurzdauernde Versuche kann man auch bei Säugetieren das Rückenmark dicht unterhalb des verlängerten Marks durchtrennen, muß dann aber natürlich für künstliche Atmung sorgen. Man isoliert auf die Weise das Rückenmark und erhält ein sogen. *spinales Tier*. Auch Dezerebrierung genügt vielfach, um eindeutige Reflexaktionen hervorzurufen zu können.

Kneift man bei einem am Kopf aufgehängten spinalen Frosch einen Fuß, so macht das Bein je nach der Stärke des Reizes eine verschieden heftige Abwehrbewegung; legt man an eine Stelle der Haut des Rumpfes ein in Essigsäure getränktes Papierschnitzel, so schleudert das Tier mit einer wohlgezielten Wischbewegung seines Fußes das reizende Agens fort (*Wischreflex*); reibt man mit dem Finger die Brusthaut zwischen den vorderen Extremitäten, am besten bei einem Männchen, so wird der Finger, zumal in der Brunstzeit, vom Frosch fest umklammert, so wie sonst das Weibchen umklammert wird. In allen diesen Beispielen ruft der äußere Reiz eine Erregung in einem zentripetalen Nerven hervor, die Erregung eilt zum „Zentrum“ und wird dort auf eine zentrifugale Bahn übergeleitet; die von der Peripherie einlaufende Erregung wird also sozusagen durch das Zentrum wieder zur Peripherie reflektiert, wie ein Lichtstrahl durch einen Spiegel; zertrümmert man den Spiegel, d. h. bohrt man den Wirbelkanal aus, so erlöschen die Reflexe. Dies ist der Beweis, daß die Reflexaktionen nicht etwa auf einem direkten Übergang der Erregung von einer afferenten auf eine efferente Faser in der Peripherie beruhen, sondern daß das Zentralorgan passiert werden muß.

Aber auch beim unverletzten Frosch lassen sich manche Reflexe mit Bestimmtheit auslösen. Der *Umdrehreflex* besteht in einem prompten Umdrehen in die Normalhaltung, sobald man das Tier auf den Rücken legt. Beim *Kornealreflex* wird das Auge eingezogen und das Lid geschlossen, sobald man die Kornea berührt. Setzt man den Frosch auf die Mitte einer Drehscheibe, so krümmt er bei langsamer Rotation seine Wirbelsäule in einer der Drehrichtung entgegengesetzten Richtung, bei rascherer

Rotation dreht er sich um sich selbst in der Gegenrichtung; man bezeichnet die Reaktion als *Kompaßreflex*, weil der Frosch ähnlich wie die Magnetnadel seine ursprüngliche Stellung im Raum festzuhalten strebt.

Als Beispiel für das Verhalten eines dezerebrierten Tieres kann der großhirnlose Hund angeführt werden, welcher eine Anzahl merkwürdiger, maschinenmäßiger Reaktionen darbietet (GOLTZ). So ruft ein Streichen der Schwanzwurzel lebhaftes Lecken, Streichen über den Unterkiefer Gähnbewegung, Berührung der Seitenhaut des Rumpfes Kratzen mit der Hinterpfote hervor.

Auch beim Menschen lassen sich je nach Umständen bestimmte Reflexe mehr oder weniger leicht auslösen. Auch hier bietet die Ausschaltung des Großhirns eine Erleichterung, nicht bloß weil das Gehirn, wie gesagt, ein Einstrahlungsort für besonders zahlreiche Sinneserregungen darstellt, sondern auch, weil — wie später (S. 348) genauer erörtert werden wird — die Reflexe zum Teil willkürlich gehemmt werden können. Daher lassen sich manche Reflexe, z. B. eine Abwehrbewegung mit dem Arm beim Kitzeln der gleichseitigen Wange, mit besonderer Sicherheit im Schlaf auslösen; daher gelingt es stets, die reflektorische Pupillenverengung bei Lichteinfall herbeizuführen, weil der M. sphincter iridis der Willkür nicht unterworfen ist; daher endlich beantwortet das Rückenmark, nachdem es infolge eines krankhaften Zerstörungsprozesses vom übrigen Zentralnervensystem durch „Querschnittsläsion“ isoliert worden ist, bestimmte Reize mit regelmäßigen Reaktionen, von denen später eine Anzahl aufgezählt wird (siehe S. 353). Eine Zeitlang galt es allerdings als feststehend, daß das isolierte Rückenmark des Menschen zu keinerlei selbständiger Leistung fähig sei, daß beim Menschen also ein Analogon zum spinalen Tier nicht existiere. In Wirklichkeit bewahrt das losgetrennte Rückenmark beim Menschen nur viel seltener die Funktionsfähigkeit als beim Tier, am ersten noch, wenn die Querläsion ganz allmählich zustandegekommen ist. Die Ursache ist wohl eine besonders große Empfindlichkeit der menschlichen zentralnervösen Substanz. Bei jedem Rückenmark machen sich nämlich nach einer Verletzung die sogenannten *Schockerscheinungen* geltend, d. h. eine Zeitlang büßt das Rückenmark seine Funktionsfähigkeit ein. Vom Schock werden vor allem diejenigen Teile befallen, welche sich in der Nähe der Verletzungsstelle befinden; daher sind z. B. unmittelbar nach einer Querdurchtrennung hinter dem verlängerten Mark die vorderen Extremitäten beim Frosch öfter gelähmt, während die hinteren Extremitäten auf Reiz reagieren. Aber je nach der Empfindlichkeit der Tiere breitet sich der Schock verschieden weit aus, und zwar besonders kaudalwärts, und er persistiert verschieden lange; beim menschlichen Rückenmark sind die Schockerscheinungen besonders schwer und nachhaltig.

Aber auch beim gesunden und wachenden Menschen sind gewisse Reflexe stets nachzuweisen und können darum als Symptome einer normalen Erregbarkeit des Zentralnervensystems verwendet werden. Dahin gehört der schon erwähnte *Pupillarreflex*, ferner der *Kornealreflex*, d. h. der Lidschluß bei Berührung der Kornea, die Reflexe des *Hustens* und des *Niesens*, der *reflektorische Speichelerguß*, welcher z. B. zustande kommt, wenn Säure auf die Mundschleimhaut gelangt. Von der Haut sind auszulösen der *Mamillarreflex*, d. h. die Erektion der Mamilla bei Bestreichen des Warzenhofes, der *Bauchdeckenreflex*, d. h. die zuckende Bewegung der Bauchmuskeln, wenn man mit einem harten Gegenstand

darüber streicht, der *Plantarreflex*, das Anziehen des Beins und Krümmen der Zehen, wenn die Fußsohle gekitzelt oder gestochen wird. Neben diesen leicht herbeizuführenden „Hautreflexen“ werden klinisch auch viel verwendet sogenannte „Tiefenreflexe“; das sind Reflexe, bei welchen der auslösende Reiz von unter der Haut gelegenen Körperteilen ausgeht. Dahin gehören vor allem die *Sehnenreflexe*, welche durch Beklopfen oder durch plötzliches Anspannen der Sehnen erzeugt werden. So besteht der *Patellarreflex* oder das *Kniephänomen* in einer raschen und flüchtigen Streckbewegung im Knie auf Beklopfen der Sehne unterhalb der Patella, der *Achillessehnenreflex* in einer Kontraktion der Wadenmuskulatur bei der entsprechenden Reizung der Achillessehne. Der Zweck dieser Sehnenreflexe ist gewöhnlich die Fixierung zweier gelenkig verbundener Skeletteile gegeneinander. So beruht z. B. das Stehen u. a. auf einer Anspannung der Wadenmuskulatur, welche verhindert, daß der Körper im Sprunggelenk vornüberkippt (siehe S. 321); sobald diese Gefahr eintritt, ruft die beim Nachvornfallen sich notwendig vermehrende Spannung der Achillessehne durch mechanische Erregung ihrer sensiblen Nerven eine reflektorische Verstärkung der Anspannung der Wadenmuskeln hervor. Zu den Tiefenreflexen gehören auch die *Periostreflexe*; so verursacht z. B. Beklopfen des Radiusköpfchens eine Zuckung im Supinator longus.

Jedem Reflex liegt als anatomisches Substrat ein „**Reflexbogen**“ zugrunde. Dieser besteht aus einer zentripetalen und einer zentrifugalen Leitung und aus einem Stück Zentralnervensystem, welches der Übertragung der Erregung von der ersten auf die zweite Leitung dient, dem sogenannten „**Reflexzentrum**“. Dieses kann einen mehr oder weniger großen Abschnitt des Zentralnervensystems einnehmen. Wenn wir z. B. auf einen hellen Lichtblitz mit Blinzeln reagieren, so tritt die Erregung auf dem Wege des N. opticus in der Vierhügelregion ins Zentralnervensystem ein und verläßt es tiefer unten an dem Austritt des Fazialis im verlängerten Mark. Wird dagegen der Depressorreflex (S. 137) ausgelöst, so überträgt sich die Erregung eines afferenten Vagusastes, des N. depressor, auf die efferenten Äste desselben Vagus, welche zum Herzen verlaufen.

Der Reflexbogen enthält außer den Nervenfasern mindestens zwei Ganglienzellen. Die Abb. 116 gibt eine schematische Darstellung des Reflexbogens nach HENLE und MERKEL. Darin bedeutet cp eine zentripetale Faser mit der ihr zugehörigen spinalen Ganglienzelle g, sie teilt sich nach ihrem Eintritt ins Rückenmark T-förmig in einen kürzeren absteigenden und einen längeren aufsteigenden Ast, von denen jeder seitliche Fortsätze, *Reflexkollateralen*, zu den Ganglienzellen in den Vorderhörnern der grauen Substanz aussendet, aus welchen die zentrifugalen Fasern cf entspringen. s ist eine *Schalt- oder Strangzelle*,

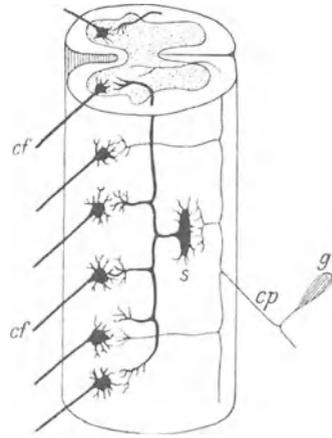


Abb. 116. Schema des Reflexbogens (nach HENLE und MERKEL).

cp = zentripetale Nervenfasern,
cf = zentrifugale Nervenfasern,
g = Spinalganglienzelle, s =
Schalt- oder Strangzelle.

welche mit den Verzweigungen ihres Achsenzylinderfortsatzes öfter als vermittelndes Glied zwischen zentripetale und zentrifugale Faser eingeschaltet ist und ähnlich wie die zentripetale Faser mit ihren Reflexkollateralen verschiedene Rückenmarksniveaus untereinander in Verbindung setzt.

Einen solchen Reflexbogen durchheilt nun die Erregung in einer bestimmten Zeit, der **Reflexzeit**. Diese ist zuerst von HELMHOLTZ 1854 gemessen worden. Die Art der Bestimmung sei an dem Beispiel des *Blinzelreflexes* dargelegt, welcher durch einen elektrischen Schlag ausgelöst wird. GARTEN befestigte zu dem Zweck auf dem oberen und unteren Lid je ein Stückchen weißes Papier und registrierte deren Bewegungen photographisch auf einem über eine Kymographiontrommel gespannten lichtempfindlichen Papier. Abb. 117 ist die Reproduktion einer solchen Aufnahme; darin bedeutet o die dem oberen, u die dem unteren Lid zugehörige Kurve, H die Kurve eines Hebels, welcher im Reizmoment R gesenkt wird und Z eine $\frac{1}{5}$ Sekunden-Markierung. S ist der Beginn der Reaktion des Lidschlags.

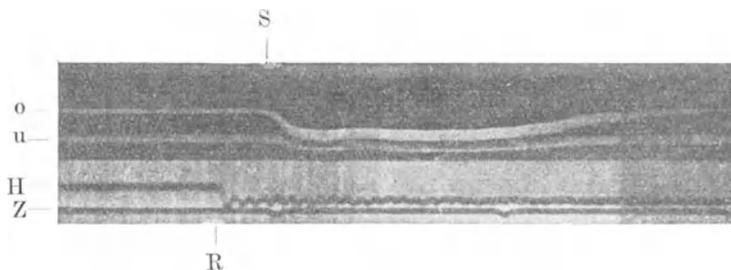


Abb. 117. Messung der Reflexzeit für den Blinzelreflex (nach GARTEN).

Man kann nun von vornherein aussagen, daß die Reflexzeit sich aus verschiedenen Summanden zusammensetzen muß, nämlich aus der *Leitungszeit*, welche während der Passage der afferenten und der efferenten Faser verstreicht, der *Latenzzeit* des Erfolgsorgans, d. h. in den meisten Fällen eines Muskels, und aus der Zeit, welche uns hier am meisten interessiert, nämlich der sogenannten *Umsetzungszeit* oder *Reflexzeit im engeren Sinne*, welche für den Übergang der Erregung von der afferenten auf die efferente Faser verbraucht wird.

Die Reflexzeiten sind je nach dem Reflex verschieden lang. Der Patellarreflex dauert z. B. 0,033—0,15'', der Reflex des Blinzeln auf Lichtreiz 0,05—0,2''. Veranschlagt man bei dem zweiten Reflex die Länge der Leitung auf 30 cm, die Latenzzeit auf 0,01'', so erhält man eine Umsetzungszeit von 0,036—0,186'', wenn man die Fortpflanzungsgeschwindigkeit im peripheren Nerven zu 70 m pro Sekunde ansetzt (siehe S. 328). *Der zentrale Vorgang konsumiert also eine verhältnismäßig lange Zeit.* Ob diese auf Rechnung der Passage der Ganglienzellen zu setzen ist, werden wir später (S. 351) erörtern. Zum Unterschied von der Leitung in der Peripherie ist *die Reflexzeit von der Reizstärke abhängig*, nämlich im allgemeinen um so kürzer, je stärker der Reiz.

Wir stoßen mit der Feststellung dieser Leitungsverzögerung auf eine der *besonderen Eigenschaften der zentralnervösen Substanz*, deren wir gleich noch eine ganze Anzahl kennen lernen werden.

Während bei dem peripheren Nerven, wie wir S. 325 sahen, ein doppelsinniges Leitungsvermögen zu konstatieren ist, findet sich beim Rückenmark eine **irreziproke Leitung**; man weist dies nach, indem man einmal eine hintere Wurzel, welche von rezeptorischen, zentripetal leitenden Fasern gebildet wird (S. 357), elektrisch reizt und von der zugehörigen effektorischen vorderen Wurzel zur Prüfung auf das Erscheinen eines Aktionsstromes zu einem Galvanometer ableitet, und indem man ein zweites Mal umgekehrt die vordere Wurzel erregt und von der hinteren ableitet. Man erhält dann nur im ersten Fall einen Galvanometerausschlag (BERNSTEIN). Das Zentralnervensystem enthält also, bildlich gesprochen, Ventile, welche die Erregung nur in einem Sinne durchlassen. Ähnlich verhalten sich übrigens auch die Systeme motorischer Nerv — Muskel und Sinnesorgan — Sinnesnerv.

Eine dritte Eigentümlichkeit besteht darin, daß das Rückenmark in die motorischen Nerven nicht Einzelerregungen, sondern rhythmische Impulse abschickt; die ins Rückenmark einlaufenden Erregungen werden auf die Weise modifiziert. Denn wenn z. B. ein sensibler Nerv durch einen einzelnen Induktionsschlag erregt wird, so wird der Reiz mit einer Bewegung beantwortet, die nicht eine Zuckung, sondern ein Tetanus ist, wie er allein durch rhythmische Erregung zustande kommt (siehe S. 307). Die **zentrale Rhythmik** ist, wie die Aufzeichnung der Aktionsströme erkennen läßt (s. S. 309), durch 50—200 Impulse charakterisiert.

Weiter ist das Zentralnervensystem gegenüber dem peripheren durch eine *große Empfindlichkeit gegen alle möglichen äußeren Einflüsse* ausgezeichnet, welche sich in einem leicht zu erzeugenden **starken Wechsel der Erregbarkeit** äußert. Während z. B. der periphere Nerv durch Zirkulationsstörungen wenig alteriert wird, stellt das Zentralnervensystem des Warmblüters seine Reflextätigkeit vollständig ein, wenn der Blutstrom auch nur $\frac{1}{2}$ — $1\frac{1}{2}$ Minuten lang unterbrochen wird. Dies wird u. a. durch den alten *STENSONSchen Versuch* aus dem Jahre 1667 demonstriert: Komprimiert man bei einem Kaninchen die Bauchorta und anämisiert auf die Weise das Lendenmark, so werden die Hinterbeine in kürzester Zeit gelähmt; läßt man den Blutstrom dann wieder frei, so kehrt die Beweglichkeit wieder. Diese Lähmung beruht vor allem auf Sauerstoffmangel (VERWORN). Infolgedessen tritt beim Kaltblüter mit seinem geringen Sauerstoffbedürfnis die Lähmung erst nach längerer Zeit ein. Die Temperatur spielt allerdings dabei auch eine Rolle; denn je höher die Temperatur ist, um so rascher wird der Sauerstoff verbraucht. In einer sauerstofffreien Atmosphäre bleiben Frösche z. B. bei 20° tagelang reflexerregbar, bei 10—20° nur 2 Stunden, bei 25° eine halbe Stunde (AUBERT), und während beim Kaninchen, das man von der Aorta aus mit sauerstoffgesättigter, auf 20° gekühlter Ringerlösung durchspült, das Rückenmark noch Reflexe vermittelt, erlischt bei Durchspülung mit körperwarmer Lösung die Erregbarkeit rasch und völlig (WINTERSTEIN). Erwärmt man einen Frosch auf etwa 38°, so gerät er in den Zustand der sog. *Wärmelähmung* (CL. BERNARD), in dem er unbeweglich wie narkotisiert daliegt; die Hauptursache dafür ist die Erstickung des Zentralnervensystems infolge des gesteigerten Sauerstoffbedarfs.

Besonders auffallend läßt sich die Erregbarkeit des Rückenmarks durch gewisse Gifte beeinflussen. *Strychnin* steigert die Erregbarkeit in dem Maß, daß schon ganz schwache, sonst unterschwellige Reize heftige Bewegungen, auf der Höhe der Giftwirkung Tetanus in sämtlichen

Skelettmuskeln auslösen; so verfällt ein Frosch, dem $\frac{1}{10}$ — $\frac{2}{10}$ mg Strychnin injiziert wurden, bei einer leichten Erschütterung seiner Unterlage in Streckkrämpfe, ein vergiftetes Kaninchen bekommt schon, wenn man eine Geige anstreicht, einen Tetanusanfall. Daß es sich dabei um einen zentral und nicht peripher ausgelösten Krampf handelt, wird dadurch bewiesen, daß ein Glied, dessen motorische Nerven durchschnitten sind, im Anfall ruhig bleibt (JOHANNES MÜLLER). Daß die Krämpfe nicht zerebralen Ursprungs sind, ergibt sich durch die Beobachtung, daß auch nach Durchschneidung des Halsmarks das Strychnin seine Wirkung entfaltet, und daß es sich endlich um eine Reflexaktion handelt, folgt daraus, daß nach Durchschneidung der hinteren Wurzeln oder nach Anästhesierung der Haut mit Kokain die Krämpfe ausbleiben. Ähnlich wie das Strychnin wirkt das Gift des *Tetanusbazillus*. Das Gegenteil, eine Herabsetzung bis Aufhebung der Reflexerregbarkeit, bewirken die *Narkotika*, welche zwar sämtliche Protoplasten, tierische und pflanzliche, reversibel zu lähmen vermögen (CL. BERNARD), bei ihrer geringsten wirksamen Dosis aber allein das Zentralnervensystem befallen.

Ein weiteres Charakteristikum der zentralnervösen Substanz des Rückenmarks ist die Erscheinung der **Summation der Erregungen**. Diese ist vergleichbar der Summation oder Superposition der Zuckungen im Tetanus des Muskels (siehe S. 308). Wie dort bei rhythmischer Reizung die Erregungen zwar voneinander gesondert bleiben, wie die Aktionsströme beweisen (S. 309), die Einzelzuckungen aber zu einer Dauerkontraktion von größerer Hubhöhe verschmelzen, so verschmelzen mehrere rasch aufeinander folgende Einzelerregungen eines rezeptorischen Nerven, von welchen jede für sich nicht ausreicht, um eine Reflexaktion auszulösen, im Zentralnervensystem zu einer überschwellig Erregung des effektorischen Nerven. Hängt man z. B. die Füße eines spinalen Frosches in Wasser, durch welches man Induktionsschläge hindurchschickt, so kann das Tier bei einem Einzelschlag in Ruhe bleiben, während es bei frequenter Reizung mit dem gleichen Strom reagiert. Auch zeitlich und zugleich räumlich verschiedene, an sich unterschwellige Reize können durch das Rückenmark summiert werden; so ist z. B. das Zustandekommen des Bauchdeckenreflexes (siehe S. 342) an ein Entlangstreichen über die Bauchdecken mit einem harten Gegenstand geknüpft. Gute Beispiele einer Summationswirkung sind das Husten nach längerer Reizwirkung im Kehlkopfeingang, das Niesen nach längerem Jucken in der Nase, die Ejaculatio seminis durch eine längere periodische mechanische Reizung des Penis.

Nahe verwandt mit der Summation ist die **Bahnung**, d. h. die Erleichterung einer Reflexbewegung durch eine kurz vorausgehende, an sich unwirksame Reizung des Gehirns (EXNER). Wenn man z. B. bei einem Kaninchen einen leichten unterschwellig Hautreiz erzeugt, so kann dieser eine bestimmte Bewegung auslösen, wenn ihm ein elektrischer Reiz der freigelegten Großhirnrinde vorausgeschickt wird, welcher an sich auch unterschwellig ist, aber bei größerer Intensität die gleiche Bewegung erzeugt haben würde (EXNER, BUBNOFF und HEIDENHAIN). Das Reizintervall darf jedoch 0,6 Sekunden nicht übersteigen. Nach SHERRINGTON kann man die von einer zentripetalen Wurzel aus abgeschickte Erregung auch durch vorangehende Erregungen benachbarter Wurzeln bahnen. Die Bahnung ist eine weit verbreitete Erscheinung, der eine große biologische Bedeutung zukommt. Als Beispiel sei darauf

verwiesen, daß der Umklammerungsreflex bei dem Froschmännchen, der die Vorbedingung für die Begattung ist, nur dann in hinlänglicher Stärke auszulösen ist, wenn er durch den chemischen Reiz gewisser von dem geschlechtsreifen Weibchen produzierter „Geruchsstoffe“ gebahnt ist (GOLTZ). — Dem Ausdruck Bahnung liegt die bildliche Vorstellung zugrunde, daß Widerstände weggeräumt, ein Weg ausgefahren wird, wie etwa ein Rad im plastischen Lehmboden eine Spur zurückläßt, welche einem nachfolgenden Gefährt die Vorwärtsbewegung erleichtert. Die physikochemischen Vorgänge im Gehirn, welche dem Lernen, dem Einüben, dem Sicherinnern entsprechen, werden öfter an dem Begriff und dem Bild der Bahnung erläutert.

Das Gegenstück zur Summation und Bahnung ist die **Reflexhemmung**. Darunter versteht man die Tatsache, daß eine Reflexerregung durch eine zweite nicht bloß, wie bei der Summation, gefördert, sondern auch unterdrückt werden kann. Die zentralnervöse Hemmung ist also ganz den peripheren Hemmungen zu vergleichen, wie z. B. dem Einfluß des Vagus, welcher dem Akzeleranseinfluß auf das Herz entgegenwirkt, oder dem Einfluß der vasodilatierenden Nerven, welche den von den Vasokonstriktoren erzeugten Gefäßtonus herabsetzen. Von der Reflexhemmung kann man leicht eine Anschauung gewinnen. So bleibt z. B. der sonst so prompt erfolgende Umdrehreflex beim Frosch (siehe S. 341) aus, wenn man den Hals des Frosches mit einem Gummiband umschnürt oder ihm ungefähr 1 ccm konzentrierter Kochsalzlösung unter die Rückenhaut spritzt. Der GOLTZsche Klopfversuch (siehe S. 137) gelingt nicht mehr, wenn man gleichzeitig mit dem Klopfen des Bauches ein Bein stark reizt. Das Pendeln der Hinterbeine beim spinalen Hund (siehe S. 353) hört sofort auf, wenn man den Hund in den Schwanz kneift. Auch die Schockerscheinungen (siehe S. 342) fallen wohl mehr oder weniger unter den Begriff der Hemmung.

Auch in der Physiologie und Pathologie des menschlichen Rückenmarks spielen die Hemmungserscheinungen häufig eine Rolle: man beißt die Zähne zusammen, wenn man z. B. bei einer kleinen Operation an der Hand nicht vor Schmerz reflektorisch die Hand zurückziehen will, man beißt auf die Zunge, um einen Kitzelreiz zu überwinden, bei heftigen Leibscherzen sinkt man in die Kniee, d. h. der Reflex des Stehens wird gehemmt.

Eine für alle natürlichen Bewegungen besonders wichtige Form der Reflexhemmung ist die *antagonistische Hemmung* (SHERRINGTON). Bringt man etwa bei einer Katze den als Beuger funktionierenden Biceps femoris durch Reiz zur Kontraktion, so erschlafft gleichzeitig die in Tonus befindliche Streckmuskulatur, so daß z. B. das auf einer Streckung beruhende Kniephänomen (siehe S. 343) nicht mehr ausgelöst werden kann. Auch Kneifen des Bizeps oder elektrische Reizung seiner losgelösten Sehne bewirkt die Hemmung des Streckertonus. Das bedeutet, daß, wenn normalerweise eine Beugung ausgeführt wird, gleichzeitig durch die Anspannung rezeptorische Nervenfasern im Muskel und in der Sehne erregt werden und nun reflektorisch die Antagonisten zur Erschlaffung bringen, so daß die Beugung erleichtert wird. Der Ablauf der Bewegungen wird also innerlich reguliert, daher bezeichnet man mit SHERRINGTON die bei der Kontraktion selbst im Innern entstehenden Reize als *propriozeptive Reize*. Solche propriozeptiven Reize haben wir schon früher verschiedentlich kennen gelernt; es sei z. B. auf den auslösenden Reiz beim Depressorreflex verwiesen (siehe S. 137) oder auf die Erregung der sensiblen Vagusendigungen in den Lungen, welche

zu einer „Selbststeuerung der Atmung“ Anlaß geben, die an die eben beschriebene Selbststeuerung der Gliederbewegung erinnert. Wird das Rückenmark durch Strychnin oder Tetanustoxin vergiftet, so wird der Koordinationsmechanismus, welcher Agonisteninnervation und Antagonistenhemmung verkoppelt, gestört, so daß der Reflexreiz gleich starke Krämpfe in beiden Muskelgruppen auslöst.

Der am längsten bekannte Fall von Hemmung ist die sogenannte *zerebrale Hemmung*. SETSCHENOW beobachtete zuerst, daß, wenn man bei einem Frosch das Gehirn einschließlich der Lobi optici extirpiert, die Reflexerregbarkeit steigt. Ein allein des Großhirns beraubter Frosch quakt regelmäßig, wenn man ihm mit einem Finger über die Rückenhaut streicht (GOLTZ). Ähnlich sind beim Menschen nach Ausschaltung des Gehirns die Reflexe entfesselt; man beobachtet es z. B. nach einem „Schlaganfall“ durch eine Blutung ins Gehirn, oder bei einem Anenzephalus, d. h. bei einer Mißgeburt, bei welcher das Gehirn mehr oder weniger unausgebildet geblieben ist, oder auch bei einem Neugeborenen, dessen Gehirn noch nicht fertig ausgebildet (siehe S. 359) und darum wohl wenig tätig ist. Umgekehrt setzt verstärkte Tätigkeit des Gehirns die Reflexerregbarkeit herab; so bleibt das Niesen auf einen Niesreiz, das Husten auf einen Hustenreiz aus, wenn man angestrengt aufmerksam ist, man sinkt in die Knie, d. h. der Reflex des Stehens wird ausgelöscht, wenn eine heftige Gemütsbewegung zustande kommt. Auch darin äußert sich die zerebrale Hemmung, daß man willkürlich Reflexe unterdrücken kann, z. B. das Kniephänomen oder den Blinzelreflex, aber natürlich nur solche Reflexe, bei welchen die beteiligten Muskeln willkürlich bewegt werden können, also nicht den Pupillar- oder den Kremasterreflex.



Abb. 118. BRONDGEESTscher Reflex-tonus beim Frosch. Links (in der Abbildung rechts) die hinteren Wurzeln durchschnitten.

Zur Erklärung der zerebralen Hemmung sind eigene „Hemmungszentra“ angenommen worden, deren Sitz im Gehirn sei. Aber die zerebrale Hemmung ist wohl nicht wesensverschieden von den übrigen Hemmungen. Man muß nur bedenken, daß der Kopf der Träger besonders zahlreicher Sinnesorgane ist, daß also ins Gehirn besonders viele Erregungen einstrahlen, welche Hemmungswirkungen entfalten können, wie irgendwelche direkt ins Rückenmark einstrahlende Erregungen. Für diese Deutung spricht u. a. die Tatsache, daß ein blinder Frosch, welcher mit den Augen das Hauptsinnesorgan neben dem Hautsinn verloren hat, oder auch ein Frosch im Dunkeln wie ein großhirnloser Frosch reagiert; er quakt beim Streichen der Rückenhaut und führt auf Hautreize leichter Abwehrbewegungen aus, als ein sehender Frosch (MERZBACHER).

Charakteristisch ist endlich für die zentralnervöse Substanz des Rückenmarks auch die Eigenschaft, angeregt durch ihm zuströmende Erregungen einen tonisierenden Einfluß auf die Muskeln auszuüben; man spricht dabei kurz von **Reflextonus**. Das Grundexperiment zum Beweis des Reflextonus ist das sogenannte *BRONDGEESTsche Phänomen*. Wenn man einen spinalen Frosch aufhängt, am besten, nachdem man durch mehrstündiges Abkühlen auf Eis seine Reflexerregbarkeit gesteigert hat

(BIEDERMANN), so sieht man, daß die Hinterbeine nicht schlaff herunterhängen, sondern in schwacher Beugstellung verharren, einem Mittelding zwischen der normalerweise eingenommenen Hockstellung und einer durch die Schwerkraft erzwungenen Streckstellung. Dies rührt davon her, daß von Haut, Sehnen und Gelenken der durch die Schwere gestreckten und damit in eine abnorme Haltung geratenen Beine Erregungen ausgehen, welche ein gewisses Maß von tonischer Beugung verursachen; denn sobald man auf einer Seite die afferente Leitung repräsentierenden hinteren Wurzeln durchschneidet, verschwindet der Beugertonus auf dieser Seite, so wie es etwa die Abb. 118 andeutet.

Dem BRONDGEESTschen Experiment analoge Beobachtungen gibt es auch in der menschlichen Pathologie. Bekannt ist die schiefe Verziehung des Gesichts bei einer Lähmung des Fazialis; ähnlich verzerrt wird das Gesicht aber auch, wenn der sensible Trigemini gelähmt wird, weil dann dessen tonisierender Einfluß auf die Gesichtsmuskeln fortfällt. Ferner gibt es eine Krankheit, bei welcher infolge einer übergroßen Reflexerregbarkeit des Rückenmarks die Extremitäten dauernd in stärkster Beugerkontraktur an den Leib gezogen oder in krampfhafter Adduktorenspannung gehalten werden, die sogenannte LITTLEsche Krankheit; man hat öfter mit Erfolg versucht, dadurch Besserung zu schaffen, daß man einen Teil der hinteren Wurzeln des Rückenmarks durchschneidet, der „spastische“ Tonus wird auf die Weise herabgesetzt (FOERSTER).

Auch für die Haltung und Bewegung der einzelnen Extremität ist der Reflexonus von großer Bedeutung. So wurde schon bei den Sehnenreflexen (siehe S. 343) darauf aufmerksam gemacht, daß bei passiver Dehnung eines Muskels oder einer Sehne der Tonus im Muskel reflektorisch zunimmt, und wir sahen ferner (siehe S. 347), daß die Betätigung eines Muskels reflektorisch eine Tonussenkung in seinen Antagonisten auslöst. Daraus folgt, wieviel für die glatte Ausführung einer Bewegung auf die sensible Kontrolle ankommt, ohne die die Bewegung einen schleudernden Charakter annehmen würde. Man spricht deshalb auch mit Recht von einer „*Sensomobilität*“ (EXNER) und versteht darunter eine Bewegungsfähigkeit, welche fast ebenso sehr von der richtigen rezeptorischen, wie von der effektorischen Innervation abhängt. Das soll noch an einigen besonderen Beispielen klargemacht werden: Wenn man bei einem Hund die hinteren Wurzeln für die Extremitäten durchschneidet, so zeigt er gleich nach der Operation Lähmungserscheinungen, wie wenn die motorischen Fasern für die Beine durchschnitten wären; durchschneidet man z. B. bloß die zentripetale Leitung für die hinteren Extremitäten, so schleppt die vordere Hälfte des Tieres die hintere wie tot nach. Allmählich bessert sich der Zustand. Das Tier sinkt zunächst noch in sich zusammen oder läuft mit halbgebeugten Beinen, offenbar, weil der Tonus ungenügend ist; schließlich bleibt nur noch eine *Ataxie* übrig, d. h. die Extremitäten machen schleudernde, ausfahrende Bewegungen, sie werden zu hoch gehoben oder nach vorn geworfen oder überstreckt. Dieser allmähliche und ziemlich weitgehende Ausgleich der ursprünglichen Störung ist so zu erklären, daß andere Sinnesapparate für die ausgefallene Körpersensibilität eintreten; das geht z. B. daraus hervor, daß im Dunkeln oder nach Verletzung der Labyrinth oder nach Ausschaltung gewisser Hirnteile, welche zu den Extremitäten in direkter Beziehung stehen, die Bewegungsfähigkeit aufs neue stark herabgesetzt wird (H. E. HERING,

SHERRINGTON, BICKEL). Ganz ähnliche Beobachtungen kann man beim Menschen machen, wenn bei der *Tabes dorsalis* die zentripetale Leitung des Rückenmarks hochgradig gestört worden ist. Auch dann wird der Gang typisch ataktisch, Arme und Beine können infolge von Tonusmangel stark überbeugt und überstreckt werden, und die große Bedeutung der übriggebliebenen Sinnesorgane erhellet einerseits aus dem bekannten Tabessymptom des ROMBERG'schen Phänomens, d. h. dem Hin- und Herschwanken des Körpers, das sich bis zum Umfallen steigern kann, sobald der Patient die Augen schließt, und andererseits aus der großen Übungsfähigkeit des Gangs und damit Besserungsfähigkeit der Krankheit. Ähnlich sind auch die Erscheinungen bei einem von STRÜMPPELL beobachteten Patienten, bei welchem durch einen Stich ins Genick die zentripetale Leitung auf der einen Seite des Halsmarkes zum Teil durchtrennt war; der Patient konnte den in seiner Rezeptivität beeinträchtigten Arm nur unter Kontrolle der Augen exakt bewegen;

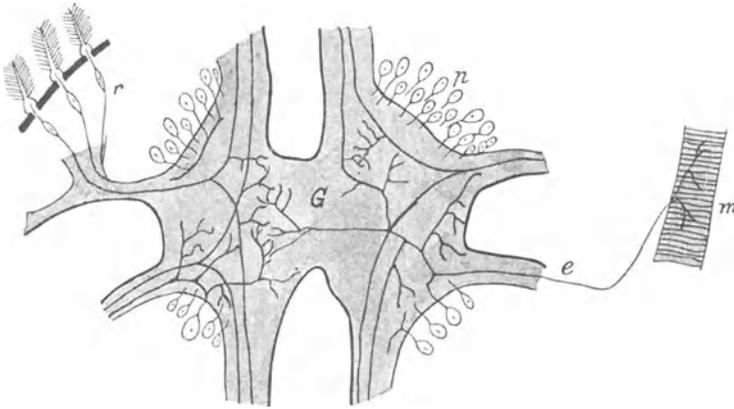


Abb. 119. Schema eines Reflexbogens bei *Carcinus maenas* (nach BETHE).
 G = Ganglion, r = rezeptorische Nervenfasern, an Sinneshaaren endigend,
 e = effektorische Nervenfasern, m = Muskel, p = Ganglienzellpolster.

schloß er die Augen, so sank der gehobene Arm herab, und die Finger konnten einen angefaßten Gegenstand nicht mehr festhalten (siehe auch Kapitel 35). Vergleichbar ist auch die Ungeschicklichkeit der in der Winterkälte frostig gewordenen Finger; denn dabei handelt es sich bloß um einen Ausfall der Sensibilität der Finger durch die Kälte; die Muskeln für die Bewegungen der Finger liegen im Unterarm verborgen. —

Nachdem wir so eine große Anzahl besonderer Eigenschaften der zentralnervösen Substanz kennen gelernt haben, die Leitungsverzögerung, die irreziproke Leitungsfähigkeit, die Fähigkeit, durch einen Einzelreiz angeregt rhythmische Impulse auszusenden, die Fähigkeit, Einzelerregungen zu summieren, die Fähigkeit, Erregungen zu hemmen u. a., erhebt sich die Frage, an was für anatomische Elemente wir uns diese besonderen zentralnervösen Eigenschaften gebunden denken sollen. Das Zentralnervensystem unterscheidet sich vom peripheren Nerven, wenn wir von den besonderen Verhältnissen des vegetativen Nervensystems (Kap. 26) absehen, in seinem Aufbau durch den Besitz von Ganglienzellen neben den Nervenfasern, und wir haben auch schon gesehen, daß die Ganglienzellen an der Organisation des Reflexbogens stets beteiligt sind. Deshalb ist es auch die nächstliegende Annahme, die speziellen Funktionen

der zentralnervösen Substanz in die Ganglienzellen verlagert zu denken. Aber diese Annahme ist nicht mehr einwandfrei seit BETHE gezeigt hat, daß es auch **Reflexe ohne Ganglienzellen** gibt. Beim Taschenkrebs (*Carcinus maenas*), wie bei vielen anderen wirbellosen Tieren, splintern, wie die schematische Abb. 119 zeigt, die rezeptorischen Nervenfasern (r) nach ihrem Eintritt in ein Ganglion (G) des Strickleiternervensystems in ein Filzwerk von Nervenfasern, das sogenannte Neuropil, auf, und aus diesem selben Neuropil entwickeln sich die Nervenfasern (e), welche zu den effektorischen Organen, z. B. einem Muskel (m), hinlaufen. Die Ganglienzellen liegen in Form von Polstern (p) an der Peripherie des Ganglions. Diese anatomischen Verhältnisse legen es nahe, zuzusehen, was aus den Reflexen wird, wenn man die Ganglienzellpolster abschält, das Neuropil aber möglichst unverletzt läßt. Dieses Experiment hat BETHE an dem Ganglion für die zweite Antenne des Krebses ausgeführt. Das Ergebnis war, daß zwar gleich nach der Operation die Antenne gelähmt war, aber am nächsten Tage ihre Reflexerregbarkeit wieder gewann, ja sogar erhöhte Reflexerregbarkeit aufwies, und nun wurde die Antenne nicht bloß bei Berührung flektiert und danach wieder vorgestreckt, sondern ihre Muskeln wurden tonisch innerviert, und unterschwellige Reize wurden summiert. Die Reflexe schwächten sich aber bald mehr und mehr ab und waren am 4. Tage erloschen. Die Ganglienzellen sind also für das Zustandekommen der Reflexe nicht unbedingt notwendig; immerhin geht es nicht dauernd ohne sie, wie der Versuch zeigt, was wohl so zu deuten ist, daß die Lebensfähigkeit der Nervenfasern als Abkömmlingen und Ausläufern der Ganglienzellen an den Kontakt mit dem Protoplasten der Ganglienzelle gebunden ist, welche eine „trophische Funktion“ (siehe S. 372) auf die Fasern ausübt.

Kann man dies Ergebnis beim Taschenkrebs nun verallgemeinern? Bei den Wirbeltieren, welche uns in erster Linie angehen, scheint es so etwas wie ein Neuropil nicht zu geben, und auf alle Fälle liegen im Rückenmark die Ganglienzellen nicht so abseits von den Nervenfasern, wie beim Krebs, wo, ähnlich wie bei den Spinalganglien, die Ganglienzelle dem T-förmigen Achsenzylinderfortsatz nur seitwärts anhängt, so daß es bei den Wirbeltieren gar nicht in Frage kommt, daß die Erregungsvorgänge an den Ganglienzellen vorbeilaufen, ohne sie zu passieren. Vielmehr liegen nach APATHY und BETHE die Verhältnisse so, daß die Neurofibrillen das Ganglienzellprotoplasma durchsetzen; die Abb. 120 nach BETHE gibt ein Bild von diesem Durchtritt der Neurofibrillen durch zwei Pyramidenzellen des menschlichen Gehirns. Wahrscheinlich besteht also eine lange Kontinuität von Fibrillen von den rezeptorischen Organen an durch das Zentralnervensystem hindurch



Abb. 120. Zwei Pyramidenzellen aus dem Großhirn des Menschen (nach BETHE).

bis zu den effektorischen Organen. Ist das aber der Fall, dann wird man sich, wie beim Taschenkrebs, so auch bei den Wirbeltieren die zentralnervösen Eigenschaften irgendwie an die Neurofibrillen gebunden vorstellen müssen, und ob dabei auch das die Fibrillen in den Ganglienzellen umgebende Protoplasma beteiligt ist, bleibt zunächst unentschieden. —

Wenden wir uns nun einer *spezielleren Besprechung der Form der Reflexbewegungen* zu! Wie bereits gesagt wurde, besteht die reflektorisch ausgelöste Bewegung meist nicht in einer flüchtigen Kontraktion eines einzelnen Muskels, sondern in einer Handlung in dem Sinn, daß eine Gruppe von Muskeln zur Ausführung einer „koordinierten Bewegung“ in Aktion, eine antagonistische Gruppe dagegen in Ruhe versetzt wird. Diese Zusammenfassungen sind am besten verständlich vom biologischen Standpunkt der zweckmäßigen Reaktionsweise des Organismus (LANGENDORFF). Dementsprechend beteiligt sich auch je nach der Intensität des Reizes, aber auch je nach dem Ort des Reizes eine größere oder kleinere Anzahl von Muskeln an der Handlung. Aus der Struktur des Zentralnervensystems ist dies wohl so zu erklären, daß *der auf der zentripetalen Leitung einlaufenden Erregung stets zwar verschiedene Bahnen durch das Zentralnervensystem offenstehen, daß aber, je nachdem die Widerstände in den Bahnen kleinere oder größere sind, die Ausbreitung verschieden weit greift*. Ein schwacher Reiz, an einem bestimmten Ort angesetzt, kann darum eine einfache Bewegung auslösen, an einem anderen Ort ausgeübt dagegen eine komplizierte aus mehreren Einzelaktionen bestehende Handlung bewirken; ein solcher durch intrazentrale Verknüpfung mehrerer Leitungen zustande kommender Vorgang, der von LOEB passend als *Kettenreflex* bezeichnet ist, ist z. B. der Schluckakt (siehe S. 26), oder die Brechreaktion (siehe S. 35), oder das Husten (siehe S. 110). Ferner kann ein Reiz von einem bestimmten Ort aus, wenn er schwach ist, eine einfache flüchtige Reaktion, wenn er stark ist, eine langanhaltende und oft für das betreffende Tier charakteristische Form der Bewegung hervorrufen. So bewirkt ein leichter Druck an einem Fuß gewöhnlich eine leichte Beugung im Fußgelenk, ein etwas stärkerer Reiz verursacht eine Beugung im Knie oder auch schon zugleich im Hüftgelenk, ein noch stärkerer Reiz endlich verursacht ein Übergreifen der Erregung auf eine andere Extremität, beim Frosch auf das Vorderbein der gleichen Seite, bei der Schildkröte gewöhnlich auf das andere Hinterbein, und die Bewegung erhält zugleich durch abwechselnde Beugung und Streckung periodischen Charakter. Dabei ist noch bemerkenswert, daß diese selben Bewegungen von ganz verschiedenen Orten ausgelöst werden können; man kann das Bein des Frosches an einer beliebigen Hautstelle reizen und bekommt stets die Beugungen. Es müssen also verschiedene zentripetale Leitungen in eine und dieselbe zentrifugale Bahn einmünden; SHERRINGTON hat dies Schaltungsprinzip als das *Prinzip der gemeinsamen Strecke* bezeichnet. Ein bekanntes Beispiel dafür ist der Kratzreflex des spinalen Hundes, welcher von einem größeren sattelförmigen Bezirk auf der Rumpfhaut ausgelöst werden kann und in einer und derselben rhythmischen Bewegung der Hinterpfote besteht.

Manche aus zahlreichen Einzelaktionen sich zusammensetzende Reflexhandlungen beruhen auch darauf, daß die Ausführung eines Reflexes die Bedingung für einen nächsten in sich begreift. So löst die Füllung des Ösophagus die Öffnung der Kardie aus, die dadurch bedingte Füllung des Magens fördert den Tonus der Magenmuskulatur,

und zugleich regt der Mageninhalt die Sekretion von Magensaft an, der Tonus der Magenmuskeln bewirkt dann Pylorusöffnung, der Übertritt einer Chymusportion in das Duodenum erzeugt darauf wieder reflektorischen Schluß des Pylorus und außerdem Sekretion von Pankreas-saft und peristaltische Bewegungen des Darms usf.

In ähnlicher Weise ist als eine Reflexverkettung wohl auch eine der wichtigsten koordinierten Skelettmuskelbewegungen anzusehen, die **Lokomotion**. Daß diese die Hauptbedingungen für ihr Zustandekommen in den Schaltungen der leitenden Elemente des Rückenmarks findet, wird durch die verschiedenen Beobachtungen über die Fortdauer von lokomotorischen Bewegungen am spinalen Tier bewiesen; Fische und Enten schwimmen nach Abschneiden des Kopfes, geköpfte Hühner laufen davon, geköpfte Tauben fliegen, und auch der spinale Hund kann, wenn man ihn unter dem Rumpf unterstützt, mit allen vier Beinen Laufbewegungen machen. Will man speziell beim Säugetier diese Laufbewegungen analysieren, welche aus abwechselnden Beugungen und Streckungen des einzelnen Beins, alternierend mit den Bewegungen der anderen Beine bestehen, so handelt es sich vor allem um die Aufgabe, aufzuklären, 1. *durch welche Reize Beugungen und Streckungen zustande kommen*, 2. *unter welchen Bedingungen sie im einzelnen Bein rhythmisch aufeinander folgen* und 3. *wie die Bewegung des einen Beins auf das andere so wirken kann, daß eine alternierende Aktion resultiert*. Diese Aufgabe ist größtenteils durch die Untersuchungen von GOLTZ und FREUSBERG und von SHERRINGTON gelöst worden.

Wenn man bei einem spinalen Frosch oder einem spinalen Hund einen Fuß kneift, sticht oder elektrisch reizt, so erhält man eine mehr oder weniger ausgiebige Beugebewegung; der Reiz beschränkt sich in seiner Wirkung aber nicht auf das gereizte Bein, sondern greift auf die andere Seite über und bewirkt eine Streckung des anderen Beins. Der Versuch ist besonders demonstrativ, wenn bei hoher Reflexerregbarkeit der Fußreiz eine langanhaltende Beugung in allen drei Gelenken verursacht; sobald man dann den anderen Fuß kräftig reizt, wird das bisher gebeugt gehaltene erste Bein heftig gestreckt, und das zweite geht in die Beugstellung über. Man bezeichnet diesen Reflex als *gekreuzten Streckreflex*. Außer den Hautreizen bewirkt auch passive Beugung des Beins vermittelst propriozeptiver Reizung von den rezeptorischen Nerven der Muskeln und Sehnen aus die Streckung auf der Gegenseite.

Weniger leicht ist der *gekreuzte Beugereflex* zu beobachten, welcher eine Streckung des Gegenbeins zur Voraussetzung hat. Die Streckung kann entweder passiv vorgenommen werden — sie hat aber nicht immer den gewünschten Erfolg — oder sie kann beim spinalen Hund durch einen besonderen Reflex, den *direkten Streckreflex* (SHERRINGTON), herbeigeführt werden. Wenn man nämlich den Fuß nicht kneift oder elektrisch reizt, sondern nur leicht gegen die Fußsohle drückt, so streckt sich das Bein rasch und kräftig. Vom selben Reizort aus kann man demnach, je nach der Art des Reizes, ganz entgegengesetzte Reaktionen, Beugung oder Streckung, auslösen und jede der beiden ist mit einem anderen gekreuzten Reflex geschaltet.

Bis zu einem gewissen Grad läßt sich auf Grund dieser gekreuzten Reflexe eine länger bekannte Erscheinung am spinalen Hund erklären, welche offenbar mit der Laufbewegung nahe verwandt ist, nämlich das sogenannte *FREUSBERG'sche Phänomen*. Wenn man den Hund an

den Vorderbeinen faßt und die Hinterbeine herunterhängen läßt, so verfallen diese in anhaltendes regelmäßiges, alternierendes Auf- und Abpendeln. Sobald man dann den einen Oberschenkel leicht unterstützt, hört das Pendeln auf, um sofort von neuem zu beginnen, wenn man das gestützte Bein wieder fallen läßt. Man kann sich vorstellen, daß die passive Streckung beim Herunterfallen die erneute Beugung im Gegenbein auslöst, und daß, wenn dieses sich dann wieder passiv streckt, wiederum im Gegenbein Beugung einsetzt.

Aber das rhythmische Hin und Her wird auch noch durch andere Momente veranlaßt. Nämlich erstens schafft jede Bewegung eines Beines die Disposition zur entgegengesetzten Bewegung. Ist z. B. ein Bein irgendwie in Beugstellung übergegangen, und man reizt nun etwa die Hüftgegend, so erfolgt Streckung; bestand dagegen Streckung, so erzeugt der gleiche Reiz in der Hüftgegend Beugung. Man bezeichnet diese Erscheinung als *Reflexumkehr* oder auch als *Schaltungsphänomen* (SHERRINGTON, MAGNUS). Sie ist ein Sonderfall der vielfach gültigen sogenannten UEXKÜLLSchen Regel, nach welcher die Erregung stets in den gedehnten Muskel fließt, d. h. bei Beugung des Beins in die gedehnten Strecker, bei Streckung in die gedehnten Beuger. Der Reflex kommt nur zustande, solange die rezeptorischen Muskelnerven intakt sind.

Von besonderer Bedeutung für die Erklärung der Rhythmik ist die sogenannte *Rückschlagsbewegung*. Darunter versteht man die Erscheinung, daß, wenn man durch einen starken, z. B. elektrischen Reiz eine Beugung auslöst und nun die Reizung plötzlich unterbricht, eine kräftige Streckung nachfolgt (FREUSBERG, SHERRINGTON).

Endlich kann man direkt *rhythmische Bewegungen* auslösen, indem man die Haut, z. B. an der Sohle, fortgesetzt mit richtig dosierten Induktionsströmen reizt. Der Erfolg ist wohl so zu erklären, daß, wenn das gereizte Bein sich beugt, die fortgesetzte Reizung Reflexumkehr, also Streckung auslöst; die Beugung bewirkt aber einen gekreuzten Streckreflex, die Streckung einen gekreuzten Beugereflex. Auch der Wischreflex (siehe S. 341) ist solch eine rhythmische Reaktion auf Grund einer fortgesetzten chemischen Reizung.

So kann man sich also auf Grund dieser Studien die Lokomotion ganz gut durch Verkettung einzelner spinaler Reflexe zustande kommen denken. Der spinale Hund kann nun allerdings nicht laufen, es sei denn, daß man ihn unter dem Rumpf unterstützt. Die Ursache dafür ist aber wohl nur, daß den Muskeln der genügende Tonus fehlt; das Tier sinkt ununterstützt sofort zusammen. Woher es seinen normalen Tonus bezieht, wird später erörtert werden.

Die Beobachtungen am spinalen Hund dürften auch zur Erklärung der Lokomotion des Menschen herangezogen werden. Jedenfalls kann man die einzelnen maßgebenden Reflexe in geeigneten Fällen sämtlich auch beim Menschen mit isoliertem Rückenmark nachweisen (A. БОЕХМЕ).

Die Lehre von den Rückenmarksreflexen erfordert nun abschließend noch eine systematische Erörterung über die **Lokalisation besonders wichtiger Reflexzentra**, deren Kenntnis u. a. wegen ihrer Verwertung für die topische Diagnostik, d. h. für die Diagnose des Sitzes von Rückenmarkserkrankungen, große praktisch-medizinische Bedeutung hat.

Das Rückenmark ist nicht bloß anatomisch, sondern auch funktionell ein segmental oder metamer gegliedertes Organ; die Reflexzentra liegen dementsprechend in bestimmter Anordnung in den verschiedenen Niveaus

des Rückenmarks übereinander. Diese segmentale Anordnung der Reflexzentra spiegelt sich deutlich in der Verteilung der die zentripetale und die zentrifugale Leitung der Reflexbogen bildenden Wurzelfasern auf die peripheren Organe, d. h. vor allem Haut und Muskeln (ECKHARD, TÜRCK, SHERRINGTON). Die Anatomie der peripheren Nerven läßt freilich von dieser **segmentalen Wurzelinnervation** nichts erkennen, insofern als in den verschiedenen Nervenplexus eine derartige Durchmischung von Wurzelfasern aus den verschiedensten Segmenten stattfindet, daß es ein Ding der Unmöglichkeit ist, dieses Fasergemisch durch anatomische Präparation zu entwirren. Wohl aber gelingt die Entmischung durch das Experiment oder durch klinische Beobachtung — besonders deutlich bei den rezeptorischen Nerven der Haut. Nämlich, so regellos die zentripetalen Fasern eines Segments durch die Plexusbildungen auch über verschiedene Nerven verteilt sein mögen, so finden sie sich doch in ihrem Endorgan, der Haut, wieder in einem bestimmten gemeinsamen Feld, der *Wurzelzone* oder dem *Wurzelareal* zusammen. Dies geht mit großer Anschaulichkeit aus der Abb. 121 hervor. In dieser ist auf der linken Hälfte die *Segmentinnervation der Haut*, auf der rechten *die Innervation durch die einzelnen peripheren Hautnerven* zur Darstellung gebracht.

Die Wurzelinnervation findet aber nicht in der Art statt, daß die Fasern einer Wurzel die ausschließliche Versorgung eines Hautareals übernehmen, vielmehr wird jedes Feld von wenigstens zwei benachbarten Wurzeln versorgt, so daß die verschiedenen Hautwurzelzonen einander sozusagen dachziegelartig überlagern. Dem trägt die Abbildung dadurch Rechnung, daß die Linien, auf denen die Bezeichnungen der Segmente angeschrieben sind, nicht die Grenzlinien der Wurzelfelder bedeuten, sondern ihre mittleren Linien, zu deren beiden Seiten sich das betreffende Wurzelfeld erstreckt. Diese Art der Innervation hat zur Folge, daß bei Erkrankung oder Durchschneidung einer

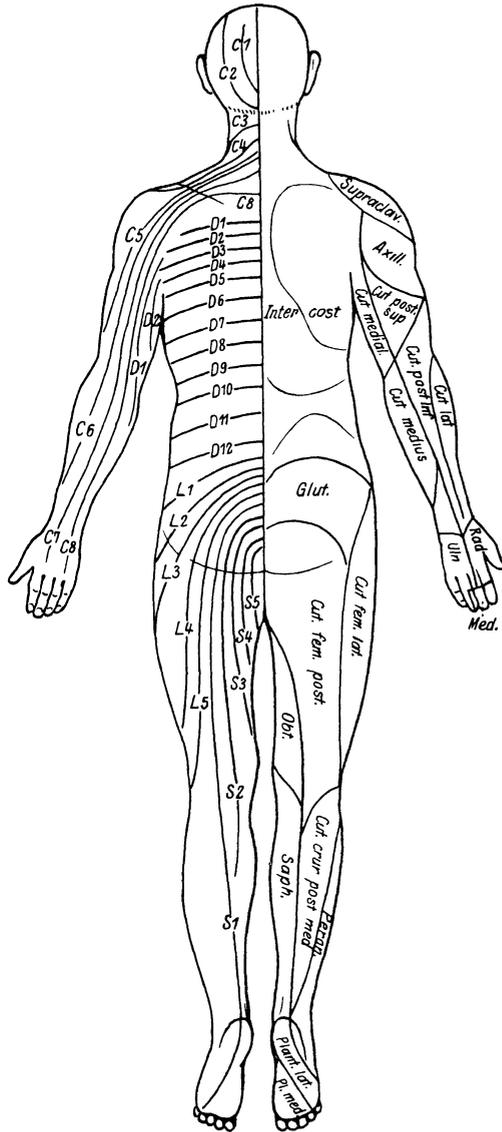


Abb. 121. Segmentinnervation der Haut (nach BING).

einzelnen Wurzel noch keine anästhetische Zone auf der Haut entsteht, sondern erst bei Ausfall von mehr als einer Wurzel.

Welch große Bedeutung die Kenntnis dieser Wurzelinnervation für die Differentialdiagnose zwischen *radikulärer* und *peripherer Lähmung* hat, leuchtet unmittelbar ein.

In ähnlicher Weise lassen sich *Wurzelinnervation* und *periphere Innervation der Muskeln* auseinander halten. Der periphere Nerv, welcher einen Muskel versorgt, entstammt fast stets mehreren Segmenten, und umgekehrt verteilen sich die Fasern einer Wurzel auf mehrere Muskeln. Daher wird im allgemeinen durch die Erkrankung einer motorischen Wurzel ein Muskel noch nicht gelähmt, sondern nur geschwächt, und bei Lähmung einer Muskelgruppe läßt die Auswahl der betreffenden Muskeln erkennen, ob ihr eine Wurzelaffektion oder eine Leitungsstörung in einem peripheren Nerven zugrunde liegt.

Die metamere Verteilung der peripheren Nervenfasern geht nun Hand in Hand mit einer metameren Funktionsverteilung innerhalb des Rückenmarks; das Rückenmark läßt sich in eine Anzahl einzelner **segmentaler Reflexzentra** aufteilen. Bei niederen Wirbeltieren, bei welchen die Schockerscheinungen weniger ausgesprochen sind (siehe S. 342), ist dies durch Durchschneidungsversuche leicht zu demonstrieren. Wenn man z. B. bei einem Frosch das Rückenmark oberhalb und unterhalb des Austritts der Nerven für die vorderen Extremitäten durchschneidet, so bleibt der Umklammerungsreflex (siehe S. 278) bestehen, oder wenn man einen Aal in mehrere Stücke zerlegt, so lassen sich an jedem derselben Reflexbewegungen auslösen. Bei Säugetieren und beim Menschen bringt dagegen oft eine Läsion, welche oberhalb, sogar weit oberhalb des Reflexzentrums liegt, den Reflex zum Verschwinden; man kann daher im allgemeinen nur aussagen, daß ein Reflexzentrum sicher höher gelegen ist, als in diesem oder jenem Segment. Übrigens umfassen manche Reflexzentra unzweifelhaft eine größere Zahl von Segmenten (siehe dazu S. 343 und 352).

Die Zentra für einige der klinisch wichtigen Haut- und Sehnenreflexe werden in die folgenden Segmente lokalisiert:

Bauchdeckenreflex	8.—12. Thorakalsegment
Kremasterreflex	1.—2. Lumbalsegment
Patellarsehnenreflex	2.—4. Lumbalsegment
Achillessehnenreflex	5. Lumbal- bis 2. Sakralsegment
Plantarreflex	1.—2. Sakralsegment.

Außer den Haut-, Sehnen- und Periostreflexen vermittelt das Rückenmark noch einige andersartige Reflexe, deren Zentra, da sie charakteristisch lokalisiert sind, besonders auch für die Diagnose des Sitzes einer Rückenmarkserkrankung besonderes Interesse haben. Zu diesen Zentra gehört erstens das **Centrum ciliospinale** (BUDGE). Aus dem 8. Zervikal- und dem 1.—3. Thorakalsegment entspringen Fasern, welche durch die zugehörigen Rami communicantes in den Halssympathikus eintreten und im Ganglion cervicale superius enden; von dort zieht ein zweites Neuron kopfwärts. Diese Fasern innervieren u. a. drei aus glatten Muskelfasern bestehende Muskeln des Auges, den M. dilatator iridis, den im oberen Augenlid gelegenen HORNERSchen Muskel (M. palpebralis tertius oder M. tarsalis superior) und den die Fissura orbitalis inferior überspannenden M. orbitalis; die Reizung dieser Fasern ver-

ursacht Pupillenerweiterung (Mydriasis), Lidspaltenerweiterung und Protrusio bulbi (Exophthalmus), wie wir früher (siehe S. 258) bei Gelegenheit der Erörterung der Nebennieren- und Schilddrüsenfunktionen bereits erfahren haben. Vermittelt des Centrum ciliospinale können nun diese Fasern reflektorisch erregt werden; so verursacht Verdunkelung des Auges, aber auch psychische Erregung, Schreck, Schmerz, ja auch die bloße Vorstellung von Dunkelheit Pupillenerweiterung. Wird das Zentrum durch eine *Störung im unteren Zervikalmark* funktionsunfähig, so manifestiert sich die Erkrankung durch Miosis (Pupillenverengung), durch Lidspaltenverkleinerung und durch Enophthalmus; bei einseitiger Zerstörung verengt sich nur die eine, gleichseitige Pupille. Zu den charakteristischen Begleiterscheinungen der Erkrankung gehören häufig Atemstörungen, da die Bahnen vom Atemzentrum zu den Respirationsmuskeln durch das Zervikalmark laufen (siehe S. 110 und S. 369), ferner Störungen in der Herztätigkeit, gewöhnlich Pulsverlangsamung, wohl im Zusammenhang mit dem Ursprung der N. accelerantes des Herzens aus dem obersten Brustmark.

Der unterste Abschnitt des Rückenmarks ist speziell der Sitz von Zentra für die Darmentleerung, für die Blasenentleerung und für die Bewegungen des Genitaltrakts. Die Zentra werden als **Centrum anospinale**, **Centrum vesico-spinale** und **Centrum genito-spinale** bezeichnet. Auf ihre Bedeutung für die entsprechenden Tätigkeiten brauchen wir hier nicht noch einmal zurückzukommen, da sie früher (S. 61, S. 243, S. 283, auch S. 388 u. 415) schon zur Genüge erörtert worden sind. Wenn allein das Sakralmark zerstört wird, so gesellt sich zu der Incontinentia alvi, der Incontinentia vesicae und der sexuellen Impotenz noch als charakteristisches Symptom hinzu eine Anästhesie in der Anogenitalregion. Nur wenn auch die Cauda equina mitbetroffen ist, bestehen gleichzeitig auch Lähmungen in den Muskeln der Beine.

Durch das ganze Rückenmark verbreitet liegen schließlich *Reflexzentra für die Gefäßmuskulatur und für die Schweißdrüsen*. Die einzelnen Rückenmarksabschnitte beherrschen dabei bestimmte Gefäß- und Drüsenareale. So gehört etwa zu den Symptomen einer Erkrankung im unteren Zervikalmark außer den bereits genannten Anomalien in der Innervation von Augen-, Herz- und Atmungsmuskeln oft auch eine Störung in der Gefäßinnervation und in der Schweißsekretion des Gesichts. —

Wenden wir uns nun der zweiten Hauptfunktion des Rückenmarks zu, seiner **Funktion der Erregungsleitung!**

Wie ein Baum im Erdreich wurzelt, so ist das Rückenmark mit seinen Wurzeln in die Organe des Körpers eingepflanzt. Wir haben bereits mehrfach davon Notiz genommen, daß die vorderen Wurzeln die motorischen, die hinteren die rezeptorischen Nervenfasern enthalten; den Beweis dafür lieferten vor etwa 100 Jahren CHARLES BELL (1811) und MAGENDIE (1822). Durchschneidet man nämlich die vorderen Wurzeln, so tritt Lähmung ein (BELL), durchschneidet man die hinteren Wurzeln, so geht die Sensibilität verloren (MAGENDIE). Am überzeugendsten demonstriert man das **Bell-Magendiesche Gesetz** durch ein Experiment, das von JOHANNES MÜLLER angegeben wurde: man durchschneidet bei ein und demselben Tier auf der einen Seite die vorderen, auf der anderen die hinteren Wurzeln; reizt man dann das Bein, dessen vordere Wurzeln durchschnitten sind, so bleibt es ruhig, aber das Gegen-

bein reagiert mit Abwehrbewegungen; reizt man dagegen dies letztere, dessen hintere Wurzeln durchschnitten sind, so erfolgt überhaupt keine Reaktion des Tieres, obwohl das gereizte Bein an sich, wie die erste Reizung lehrte, bewegungsfähig ist.

Die vorderen Wurzeln innervieren aber nicht bloß die Skelettmuskeln, sondern sie enthalten außerdem die Vasokonstriktoren, die Pupillomotoren, die Pilomotoren und die Schweiß sezernierenden Nervenfasern; sie sind also rein effektorisch. Die hinteren Wurzeln enthalten dagegen außer den rezeptorischen Fasern bei vielen Tieren auch die effektorischen Vasodilatoren. Dies ist eine tatsächliche Ausnahme von dem Gesetz. Eine scheinbare Ausnahme bildet die Erscheinung der sogenannten *sensibilité récurrente* (LONGET). Nämlich auch bei der Durchschneidung einer vorderen Wurzel kann man bei einem Tier Schmerzäußerungen beobachten. Dies beruht aber nicht auf einem Eintritt rezeptorischer Fasern auf der Ventralseite des Rückenmarks. Denn wenn man die vordere Wurzel durchschnitten hat und reizt nun ihren zentralen und ihren peripheren Stumpf, so erhält man eine Schmerzäußerung nur bei der Reizung des peripheren Stumpfes, und diese Reaktion verschwindet, sobald man auch noch die hintere Wurzel durchschneidet. Also biegen offenbar rezeptorische Fasern aus der hinteren Wurzel an der Vereinigungsstelle von hinterer und vorderer Wurzel in die letztere um, laufen in dieser also, entsprechend der LONGETSCHEN Bezeichnung, sozusagen rückwärts; die Fasern dienen der Innervation der meningealen Hüllen der Wurzeln.

Von vielseitigem Interesse ist die Frage, *welchen Verlauf die Wurzelfasern innerhalb des Rückenmarks nehmen*. Das mikroskopische Querschnittsbild belehrt darüber, daß vornehmlich die weiße Substanz, welche fast nur aus in der Längsrichtung des Rückenmarks verlaufenden markhaltigen Nervenfasern besteht, die Leitungsfunktion ausübt. Aber welchen Anteil die Hinterstränge, welchen die Seitenstränge und die Vorderstränge an der afferenten und an der efferenten Leitung nehmen, ist bei der weitgehenden Homogenität ihres Aufbaus nicht direkt ersichtlich. Es gibt aber Verfahren, um sich über den Verbleib oder den Ursprung der Wurzelfasern zu orientieren.

Die wichtigste Methode ist die Methode der **sekundären Degeneration**. TÜRCK fand im Jahre 1851, daß bei Rückenmarkserkrankungen das Querschnittsbild oft an bestimmten Stellen scharf umgrenzte Felder in der weißen Substanz erkennen läßt, innerhalb deren sämtliche Fasern zerfallen sind, während nahe benachbarte Partien ein völlig normales Aussehen gewähren. Es degenerieren bei bestimmten Krankheiten gewisse Faserstränge durch die ganze Länge des Rückenmarks. Die Ursache ist die Lostrennung der betreffenden Fasern von ihren Ganglienzellen (WALLER); von diesen hängt die Lebensfähigkeit der Fasern ab. Man drückt dies häufig auch so aus, daß man von einem *nutritiven oder trophischen Einfluß der Ganglienzellen* spricht; ein Neuron, bestehend aus der Nervenzelle, dem Achsenzylinderfortsatz und dessen Aufsplitterungen, den Endbäumchen, repräsentiert danach eine nutritive Einheit. Durchschneidet man z. B. eine vordere Wurzel, so degeneriert der periphere Stumpf, weil die Fasern den kontinuierlichen Zusammenhang mit den in den Vorderhörnern des Rückenmarks gelegenen Ganglienzellen, aus welchen sie entspringen, verloren haben; die Degeneration schreitet bis in die letzte Ausbreitung der betreffenden Fasern in der Peripherie

fort. Durchschneidet man dagegen eine hintere Wurzel, so kommt es für den Effekt darauf an, ob der Schnitt oberhalb oder unterhalb des Spinalganglions geführt wird. Durchschneidet man oberhalb, so degeneriert allein das zentrale Stück der Wurzel, weil seine Fasern aus dem Spinalganglion stammen, und die Degeneration erstreckt sich nun in das Rückenmark hinein und breitet sich innerhalb dessen bis zur Endigung der Faser, die oft erst oberhalb des Rückenmarks gelegen ist, aus; *die Degeneration verläuft also „aufsteigend“*. Liegt der Schnitt dagegen unterhalb des Ganglions, so degeneriert das periphere Stück, weil wiederum die Fasern von ihren Ganglienzellen losgelöst sind. Denn jede spinale Ganglienzelle entsendet ja zwei Fasern, eine peripher in die verschiedenen Sinnesorgane der Haut, der Muskeln, der Gelenke, und eine zweite zentralwärts (siehe Abb. 116, S. 343). Diejenigen Fasern endlich, welche innerhalb des Rückenmarks zentrifugal leiten, entspringen zumeist aus Ganglienzellen, welche oberhalb des Rückenmarks, z. B. im Gehirn, gelegen sind; daher sind Verletzungen dort oben von einer „*absteigenden*“ Degeneration gefolgt.

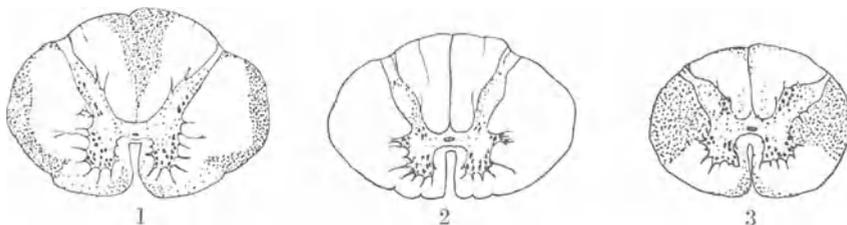


Abb. 122. Sekundäre aufsteigende und absteigende Degeneration im Rückenmark (nach HOCHÉ).

1. Aufsteigende Degeneration im Halsmark. 2. Normales Thorakalmark (zum Vergleich). 3. Absteigende Degeneration im Lumbalmark.

Von sekundärer Degeneration spricht man im Gegensatz zur primären, welche in unmittelbarer Nachbarschaft der verletzten Stelle auftritt und von Quetschungen, Zirkulationsstörungen und dergleichen herrührt. Die sekundäre Degeneration schreitet dagegen allmählich von der Wunde aus den ganzen Achsenzylinderfortsatz des Neurons entlang fort; sie beginnt mit einem Zerfall der Neurofibrillen (BETHE), welchem sich eine Zerklüftung der Markscheide in einzelne größere und kleinere Tropfen anschließt (NASSE, SCHIFF). Der sekundären kann sich später noch eine *tertiäre Degeneration* anschließen, wenn der Zerfallsprozeß ein folgendes Neuron befällt; so kann z. B. die sekundäre absteigende Degeneration der motorischen Bahnen im Rückenmark, wenn sie an den Dendriten der Vorderhornganglienzellen ihr Ende erreicht hat, auf diese übergreifen und eine *tertiäre Degeneration* des peripheren motorischen Nerven einleiten.

Auf die Weise ist es also zu verstehen, wenn oberhalb einer Verletzungsstelle im Rückenmark die aufsteigende Degeneration ein anderes Querschnittsbild in der weißen Substanz hervorruft, als unterhalb die absteigende Degeneration, so wie die Abb. 122 es zeigt.

Eine zweite Methode, um sich über den Verlauf funktionell zusammengehöriger Fasern in der weißen Substanz des Zentralnervensystems zu orientieren, ist die *myelogenetische Methode* von FLECHSIG. Das Zentralnervensystem macht

nämlich im Embryonalleben und zum Teil auch noch postembryonal einen allmählichen Reifungsprozeß bis zu seiner vollen Entwicklung durch. Dies äußert sich darin, daß die Achsenzylinder verschiedener Faserstränge zu verschiedenen Zeiten mit Markscheiden umkleidet werden. Die Untersuchung der Myelogenese hat besonders in der Erforschung der Gehirnstruktur eine große Rolle gespielt.

Ein weiteres Mittel, die physiologische Dignität der einzelnen Abschnitte der weißen Substanz festzustellen, bildet die *teilweise Durchschneidung des Rückenmarks* und die Beobachtung der darauf folgenden Ausfallserscheinungen.

Die gründlichste Aufklärung ist der Verfolgung der sekundären Degeneration zu danken, welche teils als Folge von Krankheitsprozessen, teils als Folge absichtlicher Durchschneidungen untersucht wurde. Auf die Weise ist man zu einer *Felderung der weißen Substanz* gelangt, so wie es etwa das Querschnittsbild aus dem Halsmark in der Abb. 123 schematisch zeigt. Die Felder 1, 2, 4, 5 und 6 repräsentieren aufsteigende, die Felder 3, 7, 8, 9 und 10 absteigende Bahnen.

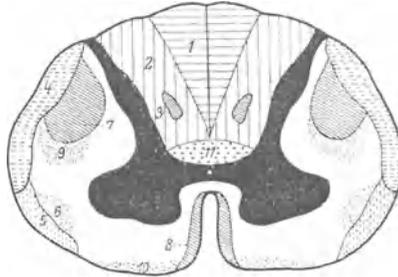


Abb. 123. Schema der Verteilung der Bahnen in der weißen Substanz des Rückenmarks.

1 = GOLLScher Strang. 2 = BURDACHscher Strang. 3 = SCHULTZESches kommaförmiges Bündel. 4 = FLECHSIGsche Kleinhirnseitenstrangbahn. 5 = GOWERSsches Bündel. 6 = Tractus spino-thalamicus. 7 = Pyramidenseitenstrangbahn. 8 = Pyramidenvorderstrangbahn. 9 = MONAKOWSches Bündel. 10 = Tractus vestibulo-spinalis. 11 = ventrales Hinterstrangfeld.

Die *hauptsächlichen aufsteigenden Bahnen* sind:

1. Der *GOLLSche Strang* oder *Funiculus gracilis* (1) und der *BURDACHsche Strang* oder *Funiculus cuneatus* (2). Die beiden bilden den Hauptbestandteil der beiden Hinterstränge. Ihre Fasern entspringen aus den Spinalganglienzellen und enden in den Hinterstrangkernen der Medulla oblongata. Von dort erfolgt die rezeptorische Weiterleitung durch ein zweites Neuron, indem dessen Fasern über die Mittellinie auf die andere Seite hinüberkreuzen und in der medialen Schleife zum Thalamus opticus hinauflaufen; von dort führt ein drittes Neuron durch die Capsula interna zur Großhirnrinde. Diejenigen Nervenfasern, welche im Zervikalmark in den *GOLLSchen* Strängen verlaufen, sind weiter unten in die *BURDACHschen* Stränge eingetreten, oder mit anderen Worten: die Fasern treten zunächst in die lateralen Partien der Hinterstränge ein und rücken weiter aufwärts mehr und mehr medial.

Beim Eintritt in die weiße Substanz teilen sich die Fasern der Hinterstränge, wie früher (S. 343) schon einmal bemerkt wurde, T-förmig in einen langen aufsteigenden und in einen kürzeren absteigenden Ast. Die letzteren Äste sind in dem *SCHULTZESchen kommaförmigen Bündel* enthalten (3), das also absteigend degeneriert.

2. Die *hintere* oder FLECHSIGSche *Kleinhirnseitenstrangbahn*, oder *Tractus spino-cerebellaris posterior* (4). Sie entspringt aus Zellen der an der Hinterhornbasis gelegenen CLARKEschen Säule, welche ihrerseits von den Dendriten von Hinterwurzelfasern umspinnen werden; die Kleinhirnseitenstrangbahn wird also von dem zweiten Neuron einer aufsteigenden Bahn gebildet. Die Fasern verlaufen in der hinteren Randzone des Seitenstrangs ungekreuzt zur Kleinhirnrinde (Wurm).

3. Die *vordere Kleinhirnseitenstrangbahn* oder *Tractus spino-cerebellaris anterior* oder das GOWERSsche *Bündel* (5). Es stammt aus Zellen des Vorder- und Seitenhorns der gleichen und der gegenüberliegenden Seite und begibt sich ebenfalls zum Kleinhirn. Die Fasern verlaufen ventral von der FLECHSIGSchen Bahn am Rand der weißen Substanz.

4. Der *Tractus spino-thalamicus* (6). Er repräsentiert ebenfalls das zweite Neuron einer rezeptorischen Leitung; die Fasern des primären durch die hinteren Wurzeln eintretenden Neurons enden um Zellen der Hinterhörner. Von diesen aus laufen die Fasern durch die vordere Kommissur auf die andere Seite und ziehen in den Vorderseitensträngen, namentlich medial vom GOWERSschen Bündel, diffus verteilt aufwärts zum Thalamus. Von dort führt ein drittes Neuron zur Großhirnrinde.

Die hauptsächlichsten absteigenden Bahnen sind:

1. Die *Pyramidenbahnen* oder *Fasciculi cortico-spinales*. Sie entspringen in der Großhirnrinde in derselben Gegend, an welche der GOLLsche und BURDACHSche Strang und der *Tractus spino-thalamicus* durch ihr zweites und drittes Neuron angeschlossen sind. Von dort ziehen die Fasern durch die Capsula interna, durch den Fuß der Pedunculi cerebri, durch die Brücke und durch die Medulla oblongata abwärts und endigen an den Ganglienzellen der Vorderhörner. Hier beginnt ein zweites Neuron, dessen Fasern durch die vorderen Wurzeln zur Peripherie laufen. Am kaudalen Ende der Medulla oblongata findet eine teilweise Überkreuzung der Fasern statt, die *Pyramidenkreuzung* (*Decussatio pyramidum*). Die an Zahl überwiegenden gekreuzten Fasern bilden die *Pyramidenseitenstrangbahn* (*Tractus cortico-spinalis lateralis*) (7), die ungekreuzten die *Pyramidenvorderstrangbahn* (8). Doch kreuzen auch diese Fasern weiter unten noch größtenteils durch die vordere Kommissur ins Vorderhorn der Gegenseite hinein, so daß sich die *Pyramidenvorderstrangbahn* in den tieferen Partien des Rückenmarks erschöpft.

2. Der *Tractus rubro-spinalis* oder das MONAKOWSche *Bündel* (9). Es stammt aus Ganglienzellen des roten Kerns in der Haube des Hirnschenkels; der Kern steht seinerseits mit der Großhirnrinde in Verbindung. Die Fasern des MONAKOWSchen Bündels kreuzen alsbald nach ihrem Ursprung auf die andere Seite und laufen durch die Brückenhaube und die Medulla oblongata zum Seitenstrang des Rückenmarks; dort liegen sie medial vom *Tractus spino-cerebellaris posterior* und ventral von der *Pyramidenseitenstrangbahn*, zum Teil auch in dieser selbst.

3. Der *Tractus vestibulo-spinalis* (10). Er entspringt aus dem in der seitlichen Wand des IV. Ventrikels nahe dem Kleinhirn gelegenen DEITERSschen Kern, in welchen die Fasern des N. vestibularis vom Labyrinth her einmünden. Seine Fasern laufen ungekreuzt und begeben sich teils in den Seitenstrang, teils in die vordere Randzone des Vorderstrangs. Das Bündel ist nicht scharf umgrenzt.

Neben diesen *langen Bahnen* findet man auch in der weißen Substanz noch *kurze Bahnen*, die, meist aus unregelmäßig verstreut verlaufenden Fasern bestehend, zur Verbindung verschiedener Etagen des Rückenmarks untereinander dienen; sie nehmen besonders das Vorderseitenstranggrundbündel, ferner das *ventrale Hinterstrangfeld* (11) ein.

Sehen wir an Hand der *physiologischen Durchschneidungsversuche*, auch der klinischen Befunde nun zu, inwieweit die Läsion absteigender Bahnen Effektoren, die Läsion aufsteigender Bahnen Rezeptoren außer Funktion setzt! Die reichlich vorhandenen experimentellen Angaben hierüber sind häufig einander widersprechend. Das liegt größtenteils an der Schwierigkeit der Versuche, da es fast unmöglich ist, einzelne Stränge des Rückenmarks isoliert zu durchschneiden, ohne benachbarte oder ohne die graue Substanz mitzuverletzen. Zum Teil sind die Angaben auch deshalb widersprechend, weil der Verlauf der Bahnen bei verschiedenen Tieren ganz verschieden ist; so gehen die für die Motilität so wichtigen Pyramidenbahnen bei der Ratte, der Maus, dem Meerschweinchen, dem Igel, dem Schaf durch die Hinterstränge (EDINGER).

Was die **Störungen der Motilität infolge partieller Durchschneidungen** anlangt, so haben die Versuche von SCHIFF, LUDWIG und WOROSCHILOFF u. a. an Kaninchen und Hunden gezeigt, daß die Motilität hauptsächlich an die Seitenstränge gebunden ist. Sticht man z. B. mit einem schmalen Messer durch das Rückenmark mitten hindurch, so daß Vorderstränge, graue Substanz und Hinterstränge größtenteils durchtrennt werden, während die Seitenstränge als Brücken stehen bleiben, so bleibt die Motilität im wesentlichen erhalten. Das ist nach dem Vorangegangenen gut zu verstehen, da die Pyramidenseitenstrangbahnen die zentrifugalen Hauptbahnen sind.

Wenn aber der genannte Stich auch kaum eine Lähmung von Muskeln verursacht, so erzeugt er doch auffallende Störungen, nämlich eine Herabsetzung des Muskeltonus und eine mangelhafte Koordination und Ungeschicklichkeit in den Bewegungen, und da man ähnliche Erscheinungen nach bloßer Durchschneidung der Vorderstränge beobachtet hat, so ist zu vermuten, daß dafür die Durchtrennung der ventral verlaufenden Tractus vestibulospinales verantwortlich zu machen ist.

Für sich allein kann man die Pyramidenbahnen durch Schnitt nur ausschalten, wenn man sie am Übergang der Medulla oblongata in das Rückenmark aufsucht, wo die Fasern ventral an der Oberfläche gelegen sind und sich in der Decussatio pyramidum teilweise überkreuzen. Bei Hunden und Affen ist diese schwierige Operation öfter ausgeführt worden. Es zeigt sich, daß die Motilität danach keineswegs aufgehoben ist (ROTHMANN); die zentrifugalen Impulse finden also noch andere Wege, welche zum Teil im Tractus rubrospinalis gegeben sind. Aber auch wenn dieser mit ausgeschaltet ist, ist die Beweglichkeit noch nicht erloschen (ROTHMANN).

Beim Menschen werden die Pyramidenbahnen einer Seite am häufigsten durch eine Blutung in die Großhirnrinde oder in die Capsula interna außer Funktion gesetzt. Man spricht von einem Schlaganfall oder einer „Apoplexie“; sie äußert sich unmittelbar in einer „Hemiplegie“, d. h. in einer Lähmung der einen dem Blutungsherd gegenüberliegenden Körperhälfte. Die Reflexe bleiben dabei mehr oder weniger erhalten, sind sogar oft gesteigert (siehe S. 348), nur die Willkür geht verloren.

Die Störungen der Rezeptivität infolge partieller Durchschneidungen äußern sich in besonders charakteristischer Weise in dem BROWN-SÉQUARD'schen *Symptomenkomplex der Halbseitenläsion*, d. h. den Ausfallserscheinungen, welche nach Durchtrennung nur einer, der linken oder der rechten Rückenmarkshälfte zu beobachten sind. Ist beispielsweise die rechte Hälfte des Halsmarks durchschnitten, so besteht natürlich erstens eine Lähmung auf der rechten Seite; diejenigen Muskeln, welche von unterhalb der Verletzungsstelle gelegenen Rückenmarkspartien aus innerviert werden, können also nicht mehr willkürlich, nur noch reflektorisch bewegt werden. Die neben dieser Lähmung bestehenden Störungen in der Erregbarkeit der Sinnesapparate äußern sich auf beiden Seiten. Auf der gekreuzten, linken Seite findet man Unempfindlichkeit oder Unterempfindlichkeit für Temperaturreize und für schmerzhaftes Erregungen (*Thermanästhesie* und *Analgesie*), ferner eine herabgesetzte Empfindlichkeit für Berührungsreize, also eine Störung der „Oberflächensensibilität“. Auf der rechten Seite beobachtet man anfänglich das Gegenteil einer herabgesetzten Empfindlichkeit, eine *Hyperästhesie*, die derart sein kann, daß auf eine leise Berührung der Haut hin Schmerzensschreie ausgestoßen werden. An die Stelle der Hyperästhesie pflegt später eine *Hypästhesie* zu treten, welche sich aber nicht bloß auf die Haut bezieht, sondern auch eine Störung der „Tiefensensibilität“ bedeutet, eine Störung des Muskel-, Sehnen- und Gelenksinns; infolgedessen können Formen, Gewichte, Konsistenzen von Körpern nur mangelhaft beurteilt, Stellungen und Bewegungen der Gliedmaßen schlecht erkannt werden.

Eine befriedigende Erklärung für das Zustandekommen der Hyperästhesie ist bisher nicht gefunden. Die verschiedenen Hypästhesien deuten darauf hin, daß die *Bahnen für die Perzeption der Lage und Stellung ungekreuzt, die Bahnen für die Vermittlung der Berührungsempfindungen teils ungekreuzt und teils gekreuzt durchs Rückenmark verlaufen, während die Bahnen für den Schmerz- und Temperatursinn vollständig überkreuzen*. Bei manchen Tieren können die Bahnen für Schmerzerregung mehrmals von einer Seite auf die andere kreuzen; dafür spricht die Beobachtung, daß nach doppelseitiger Halbseitenläsion in verschiedenen Rückenmarkshöhen die Schmerzempfindlichkeit nicht verschwindet (OSAWA, KARPLUS und KREIDL).

Mit dieser Folgerung stehen weitere experimentelle und klinische Beobachtungen in recht guter Übereinstimmung. Schält man die weiße Substanz so gut wie möglich rund um die graue Substanz des Rückenmarks ab, so bleibt die Schmerz-, die Wärme- und die Kälteempfindlichkeit erhalten; die betreffenden Leitungen müssen also eine Strecke weit durch die graue Substanz verlaufen, was eben für die Kreuzung notwendig ist. Umgekehrt beobachtet man ausgesprochene Analgesie und Thermanästhesie neben geringeren Störungen in der Oberflächensensibilität bei isolierten Zerstörungen der grauen Substanz, wie sie z. B. bei der *Syringomyelie*, einer eigentümlichen mit Höhlenbildung im Rückenmarksgrau einhergehenden Erkrankung des Menschen, oder gelegentlich infolge von zentralen Blutungen oder Eiterungen vorkommen.

Die Störung des Muskel- und Sehnensinnes tritt bei einer häufigen Erkrankung des Menschen in den Vordergrund, bei welcher charakteristischerweise wesentlich die Hinterstränge befallen sind; das ist die *Tabes dorsalis*. Und da, wie wir sahen, die Hinterstränge ungekreuzt

bis zu den Hinterstrangkernen der Medulla oblongata hinauflaufen, so versteht man, warum bei der Halbseitenläsion die Tiefensensibilität allein auf der Seite der Verletzung gestört ist.

Die Oberflächensensibilität ist dagegen bei der Tabes dorsalis nur teilweise aufgehoben. Die Erregungen von der Haut werden ebens teils ungekreuzt in den Hintersträngen, teils aber auch gekreuzt in den Vorderseitensträngen, und zwar in den Tractus spinothalamici aufwärts geleitet.

Ritzt man beiderseits das Rückenmark an der lateralen Oberfläche an, so treten öfter schwere Bewegungsstörungen auf; die Tiere sinken zusammen, besonders im Dunkeln, der Gang wird taumelnd und breit-spurig, die Gliedmaßen werden oft abnorm gestellt. Es handelt sich also um einen Tonusmangel und eine Ataxie, ähnlich wie nach Durchschneidung der Vorderstränge. Die Ursache dafür ist, daß die Tractus spinocerebellares anteriores und posteriores ausfallen, und daß dadurch das zum Teil vom Kleinhirn abhängige *Gleichgewicht des Körpers* gestört wird (siehe dazu Kap. 25).

23. Kapitel.

Der Hirnstamm und die Gehirnnerven.

Die Reflexzentra in der Medulla oblongata 366. Die Pupillenreflexe 367. Die automatischen Zentra des Hirnstammes 369. Die Gehirnnerven 370. Die trophischen Funktionen der Nerven 372. Die Erregungsleitung im Hirnstamm 374. Die Zwangsbewegungen 374. Die Vierhügelregion 374.

Die Fortsetzung des Rückenmarks nach dem Gehirn zu bezeichnet man als *Hirnstamm*, äußerlich ein vielgliedriger Abschnitt, welcher aber doch anatomisch und funktionell einheitlich aufgefaßt werden kann, insofern als er der Ursprungsort für die Hirnnerven, vom Okulomotorius (III) angefangen bis zum Hypoglossus (XII) ist (siehe Abb. 124). Nur der Olfaktorius (I) und der Optikus (II) entspringen höher oben; diese sind ja aber keine eigentlichen peripheren Nerven, sondern vorgestülpte Gehirnabschnitte.

Zum Hirnstamm gehören das *verlängerte Mark* (*Medulla oblongata*), die *Brücke* (*Pons*) und die *Hirnschenkel* (*Pedunculi cerebri*) mit der *Vierhügelregion* (*Corpora quadrigemina*). Fast sämtliche Kerne der Gehirnnerven liegen in dem dorsalen Teil des Hirnstammes und folgen meist dicht aufeinander (siehe die Abb. 125 und 126). Dadurch kommt es, daß dies etwa 10 cm lange Stück Zentralnervensystem eine Menge überaus wichtiger *Reflexzentra* birgt, so daß geringfügige Verletzungen von nur wenigen Millimetern Ausdehnung schwere Störungen verursachen können, welche das Leben gefährden. Man kann sagen, daß keine Partie des ganzen Zentralnervensystems weniger entbehrlich ist als diese, zumal ihr unterer Abschnitt, die *Medulla oblongata*.

Außer diesen hervorragenden Reflexfunktionen kommen dem Hirnstamm aber ebenso wichtige *automatische Funktionen* zu, und als drittes vermittelt es die *Leitung der Erregungen zwischen Gehirn und Rückenmark*.

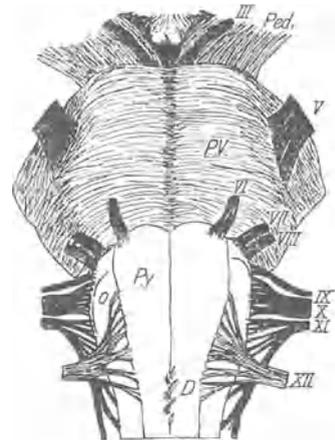


Abb. 124. Der Hirnstamm des Menschen von der Ventralseite (nach BING).
Ped = Pedunculi cerebri,
PV = Pons Varoli, Py = Pyramide, O = Olive, D = Decussatio pyramidum.

In der Medulla oblongata sind vor allem folgende Reflexzentra lokalisiert:

1. *Das Schluckzentrum:* es wird durch Erregung der sensiblen Nerven des Gaumens und des Rachens in Gang gesetzt, die zentripetale

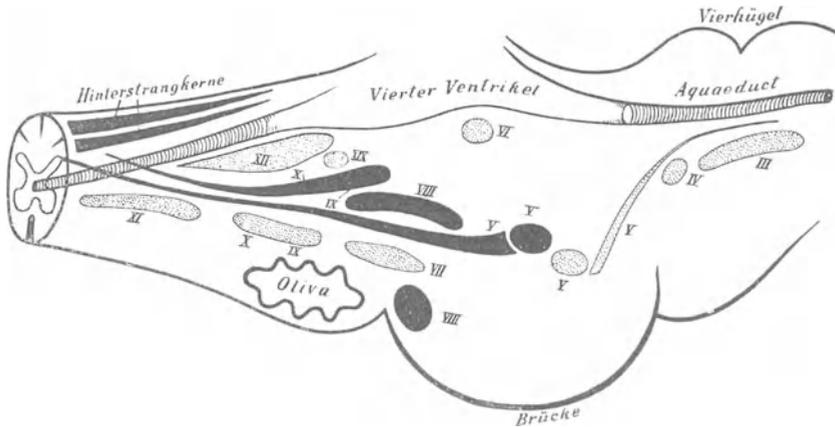


Abb. 125. Verteilung der Gehirnnervenkerne im Hirnstamm des Menschen (nach VILLIGER).

Die motorischen Kerne punktiert, die sensiblen schwarz.

Leitung kommt also dem Trigeminus und dem Glossopharyngeus als Geschmacksnerven, dem Vagus, im speziellen dem Laryngeus superior als Empfänger von Berührungsreizen zu. Als zentrifugale Nerven für die sukzessive koordinierte Aktion der Mund-, Schlund- und Ösophagusmuskeln fungieren Hypoglossus und Fazialis, welche vor allem aus der Speise den Bissen bilden und ihn rückwärts schieben, und Glossopharyngeus und Vagus, welche die Pharynxkonstriktoren innervieren. Die Art der Verkettung der einzelnen Muskelaktionen ist schon früher (S. 26) im Kapitel über die Verdauung geschildert worden.

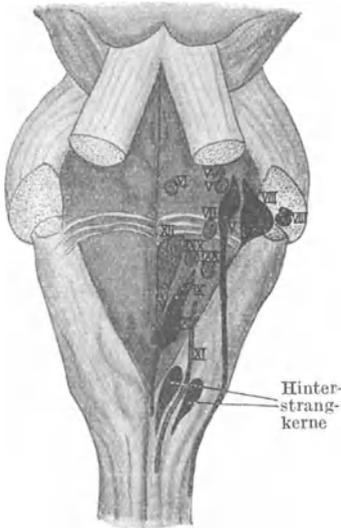


Abb. 126. Der vierte Ventrikel von oben, mit den hineinprojizierten Gehirnnervenkernen.

2. *Das Zentrum für Saugen und Kauen:* Auch dieses wird durch Äste des Trigeminus und Glossopharyngeus erregt; Fazialis, Hypoglossus und Trigeminus vermitteln die motorischen Reaktionen.

3. *Das Zentrum für die Speichelsekretion:* die Zuleitung der Erregungen geschieht in der Hauptsache durch die Geschmacksfasern im Trigeminus und Glossopharyngeus (siehe Kap. 33) und durch den Olfaktorius; die efferenten sekretorischen Fasern verlaufen im Fazialis, Glossopharyngeus und Sympathikus (siehe S. 21).

4. *Das Zentrum für das Erbrechen:* Das Erbrechen wird hauptsächlich durch Vagus und Glossopharyngeus ausgelöst; an dem motori-

schen Akt, welcher außer in Kontraktion des Magens und des Ösophagus auch in der Tätigkeit der Bauchmuskeln, des Zwerchfells, der Thoraxmuskeln, des Kehlkopfes und der Zunge besteht (siehe S. 35), sind zahlreiche Nerven beteiligt.

5. *Die Zentra für Husten und Niesen*: Der Niesakt wird gewöhnlich durch Erregung der Trigeminiendigungen in der Nase, das Husten durch Reizung des N. laryngeus superior ausgelöst; die Erregung wird auf die motorischen Nerven für die Expirationsmuskeln übergeleitet (siehe S. 110).

6. *Das Phonationszentrum*: Durch seine Vermittlung werden reflektorisch Schreie ausgelöst.

7. *Das Zentrum für die Tränensekretion*: Es kann durch chemische Reizung des Trigemini, z. B. mit Essigsäure oder Ammoniak, erregt werden; die Reizbeantwortung erfolgt durch den N. lacrimalis des Trigemini, welchem sekretorische Fazialisfasern über den N. petrosus superficialis maior, das Ganglion sphenopalatinum und den N. zygomaticus zugeführt sind.

8. *Das Zentrum für den Lidschluß*: Es überträgt Erregungen der rezeptorischen Trigeminiendigungen, welche von der Konjunktiva und der Kornea her über das Ganglion ciliare dem Zentrum zugeleitet werden, auf den Fazialis, welcher den M. orbicularis oculi innerviert.

Alle diese Zentra funktionieren unabhängig von höher gelegenen Zentralteilen; die Ursprungsgebiete der an den Reflexen beteiligten Gehirnnerven sind also auch wirklich die Reflexzentra. Das geht z. B. mit großer Deutlichkeit aus den Beobachtungen an sogenannten *Anencephali* hervor, d. h. an menschlichen Mißgeburten, bei welchen infolge einer Entwicklungsstörung das Gehirn fehlt. Selbst solche Anencephali, bei welchen bloß Hinterhirn und Nachhirn ausgebildet sind, d. h. Pons, Cerebellum und Medulla oblongata, sind im Besitz fast aller der aufgezählten Reflexe; sie saugen, schlucken, schreien und niesen, ganz wie gesunde Kinder. Welche große Bedeutung für das Leben diesen Oblongata-Reflexen zukommt, erkennt man am besten an einem anderen Beispiel aus der menschlichen Pathologie, an den Symptomen der *Bulbärparalyse*, dieser seltenen Krankheit, bei welcher allmählich die motorischen Kerne des Bulbus rachiticus — die alte Bezeichnung für die Medulla oblongata — gelähmt werden: die Zunge wird schwerfällig, die Sprache lallend, das Essen ist behindert, weil die Zunge den Bissen nicht zu formen vermag, weil durch Lähmung des M. buccinatorius Speiseteile zwischen Wange und Kiefer liegen bleiben, weil die Schlundmuskulatur nicht funktioniert und mangels eines festen Abschlusses des Rachens gegen den Nasenraum die Speise zur Nase herausfließt, und weil statt des dünnen Chordaspeichels nur mehr ein dickflüssiger Sympathikusspeichel fließt (siehe S. 22); ferner wird die Stimme rau und schwindet durch Kehlkopflähmung schließlich völlig; das Gesicht wird maskenartig starr.

Weiter aufwärts im Hirnstamm sind in der Vierhügelregion Zentra für die Pupillenreflexe gelegen. Die *Pupillenverengung* kommt so zustande, daß die durch Belichtung der Augen erzeugte Erregung der Sehnervenfasern den primären Optikuszentren zugeleitet wird, welche teils im Sehhügel, teils im Corpus geniculatum laterale und teils in den vorderen Vierhügeln gelegen sind; in den letzteren sind die Fasern mit den EDINGER-WESTPHALSCHEN kleinzelligen Lateralkernen des Okulo-

motorius verbunden, welche speziell der Innervation der Irissphinkteren dienen. Da die beiden Lateralkerne auch unter sich verbunden sind, so erfolgt die Pupillenreaktion konsensuell, d. h. auch bei Belichtung nur eines Auges verengen sich beide Pupillen.

Ferner befindet sich in dieser Gegend des Hirnstammes ein zweites, dem Centrum cilio-spinale (siehe S. 356) übergeordnetes *Zentrum für die Pupillenerweiterung*. Wir haben schon früher erfahren, daß bei schmerzhafter Erregung die Pupillen weit werden. Dieser Reflex, den man z. B. durch eine Reizung des N. ischiadicus auslösen kann, könnte zwar, wie wir sahen, auch vom isolierten Rückenmark allein vermittelt werden, aber für gewöhnlich geht er wohl über einen Bezirk, welcher an der Zwischenhirnbasis hinter dem Tractus opticus, lateral vom Infundibulum gelegen ist. Direkte Erregung dieser Stelle durch den elektrischen Strom löst Pupillenerweiterung aus (siehe S. 227), isolierte Zerstörung hebt dagegen den Reflex auf (KARPLUS und KREIDL). Daß es sich nicht bloß darum handelt, daß ein durch schmerzhafte Reizung ausgelöster Erregungsimpuls von der Großhirnrinde herunterlaufend diese Stelle passiert, das beweist die Beobachtung, daß auch nach Abtragung des Großhirns der Reflex erhalten bleibt.

Der Hirnstamm oberhalb der Medulla oblongata ist endlich auch Vermittler der „*Stehreflexe*“ (MAGNUS), d. h. der reflektorischen Tonicierung der bei den verschiedenen Körperstellungen zum Stehen beanspruchten Muskulatur. Wenn man den Hirnstamm in der Vierhügelregion durchtrennt, so entwickelt sich der von SHERRINGTON als „*Enthirnungsstarre*“ bezeichnete Zustand; in diesem werden diejenigen Muskeln, welche beim Stehen der Schwerkraft entgegenwirken, also bei der Katze z. B. die Extensoren der Gliedmaßen, die Heber des Halses und des Schwanzes, in eine starke tonische Kontraktion versetzt, während ihre Antagonisten in schwachem Tonus verharren. Dies macht es erklärlich, daß *das dezerebrierte Tier im Gegensatz zum spinalen steht* (siehe S. 354). Das Stehen ist freilich ein karikiertes Stehen wegen des übertriebenen Tonus der Stehmuskulatur, der ein normales Ausmaß erst unter der Vermittlung des Zwischenhirns annimmt, wie sich am „*Thalamustier*“, dem die Großhirnrinde entfernt ist, zeigen läßt (MAGNUS).

Der Tonus beim dezerebrierten Tier kann nun in gesetzmäßiger Weise durch Beanspruchung verschiedener Reflexapparate auf die Muskeln des Körpers ganz verschieden verteilt werden; die auslösenden Sinnesapparate sind dabei einerseits die Labyrinth, andererseits die rezeptorischen Nerven von Muskeln, Sehnen, Gelenkbändern des Halses. *Zu jeder Stellung des Kopfes im Raum und im Verhältnis zum Rumpf gehört beim dezerebrierten Tier eine ganz bestimmte Körperhaltung*, und daß dafür die beiden genannten Gruppen von Sinnesapparaten verantwortlich zu machen sind, läßt sich nach MAGNUS am besten so beweisen, daß man entweder die eine oder die andere Gruppe ausschaltet, d. h. entweder die Labyrinth exstirpiert oder die hinteren Wurzeln der oberen Zervikalnerven durchschneidet. Dreht man, um ein Beispiel zu geben, bei labyrinthexstirpierten Tieren den Kopf um die Achse Scheitel-Schädelbasis, so werden die Extremitäten auf derjenigen Körperseite, welcher das Kinn zugekehrt ist, gestreckt, auf der Gegenseite gebeugt. Abb. 127 zeigt diesen Effekt vom Hals auf den Rumpf bei einem Kinde, dessen Gehirn durch Blutungen schwer lädiert ist, und das sich offenbar dadurch wie ein dezerebriertes Tier verhält.

Den isolierten Einfluß der Labyrinth zeigt man an solchen Kranken am besten so, daß man durch Eingipsen den Kopf gegen den Rumpf fixiert, so daß keine Halsreflexe durch Drehung der Halswirbelsäule ausgelöst werden können. Legt man nun den Kranken auf ein Brett, das man um seine Frontalachse dreht, so beobachtet man Streckung der Glieder wenn das Kopfende gesenkt, Beugung, wenn das Fußende gesenkt wird.

Wenden wir uns von den Reflexzentra zu den **automatischen Zentra des Hirnstammes**.

1. An Bedeutung steht obenan das *Atemzentrum*, welches etwa in der Höhe der Kerne des 9.—12. Gehirnnerven (siehe Abb. 125 und 126) in der *Formatio reticularis* beiderseits von der Mittellinie gelegen ist, also durch Stich in die Rautengrube im *Calamus scriptorius* getroffen wird. Wir haben früher (S. 113) erörtert, daß die Bezeichnung als automatisches

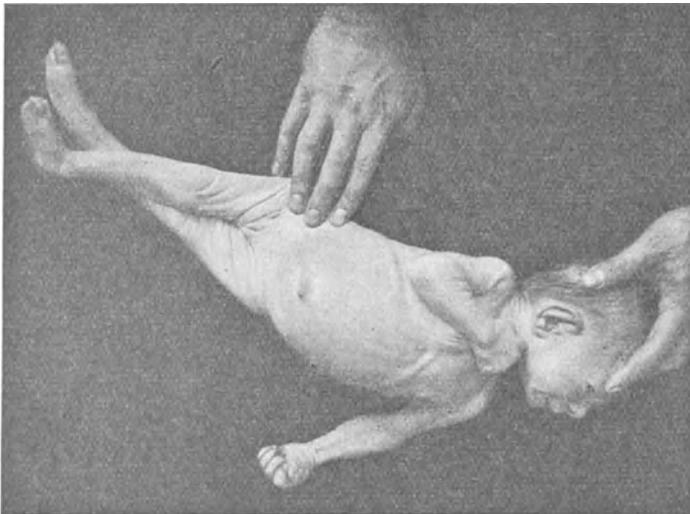


Abb. 127. Tonischer Nackenreflex bei einem durch Gehirnblutungen geschädigten Neugeborenen (nach MAGNUS und de KLEIJN).

Zentrum sich auf den experimentellen Nachweis gründet, daß auch nach weitestgehender Abblendung zentripetaler Reize von der Medulla oblongata die rhythmische Innervation der Atemmuskeln erhalten bleibt. Wir haben aber auch erfahren, daß die Atmung durch Vermittlung des Zentrums in mannigfacher Weise von der Haut, von den Lungen, vom Kehlkopf aus reflektorisch zu beeinflussen ist, und daß vor allem die Blutgase durch unmittelbare Wirkung auf das Zentrum Tempo und Stärke der Atmung verändern. Die zentrifugale Leitung vom Atemzentrum zu den motorischen Kernen für die Atemnerven im Zervikal- und Thorakalmark erfolgt durch die ventralen Abschnitte der Seitenstränge und durch die lateralen Abschnitte der Vorderstränge.

2. Das *Herzhemmungszentrum*: Seine Existenz folgt aus der ebenfalls früher (S. 136) erwähnten Feststellung, daß bei reizloser Ausschaltung der Vagi das Herz rascher schlägt. Es besteht also ein *Vagustonus*, d. h. eine Dauerinnervation der Vagusfasern. Wie beim Atemzentrum, so wirkt auch hier Kohlensäureanreicherung im Blut reizend; das Herztempo

verlangsamt sich z. B. im Beginn einer Erstickung. Und wie dort, so sind auch hier Reflexreize wirksam; es sei etwa an den Depressorreflex (siehe S. 136) oder an den GOLTZschen Klopfversuch (siehe S. 136) erinnert.

3. *Das vasokonstriktorische Hauptzentrum*: Es liegt am Boden des 4. Ventrikels bilateral, ungefähr in der Höhe des Fazialiskerns (siehe Abb. 125 u. 126). Seine elektrische Reizung erzeugt im ganzen Körper Gefäßverengung und demgemäß starke Blutdrucksteigerung; Zerstörung bewirkt das Gegenteil, Erweiterung und Druckabfall. Das Zentrum ist also andauernd in Tätigkeit, die Gefäße sind tonisch innerviert. Auch hier wieder ist die Abhängigkeit der Tätigkeit vom Blutgehalt nachzuweisen; so nimmt im Beginn der Erstickung der Gefäßtonus zu. Hiervon, ebenso wie von der reflektorischen Beeinflussung der Gefäßweite, von den pressorischen und depressorischen Nerveneinflüssen war schon im Kapitel über die Physiologie der Gefäße die Rede (siehe S. 149).

Dort wurde auch schon erwähnt, daß die gefäßtonisierende Wirkung zum Teil auch vom Rückenmark ausgeht. Denn wenn man das Rückenmark unterhalb der Medulla oblongata durchschneidet, so fällt zwar zunächst der Blutdruck ab, aber nach einiger Zeit hebt er sich wieder, weil *vasokonstriktorische Nebenzentren* im Rückenmark vikariierend für das Hauptzentrum eintreten. Durchschneidet man dann abermals weiter unten, so wiederholt sich das gleiche, und selbst nach Ausrottung des ganzen Rückenmarks stellt sich ein gewisser Tonus wieder her, weil auch die peripheren Ganglien noch konstringierende Einflüsse ausüben können. Danach hat also auch das Rückenmark automatische Funktionen.

4. *Das Zuckerzentrum*: Es liegt zwischen den Kernen des Akustikus und des Vagus. Führt man in der Medianlinie der Rautengrube in dieser Höhe den „Zuckerstich“ (CLAUDE BERNARDS *Piquüre*) aus, so stellt sich, wie wir früher sahen (S. 259), eine vorübergehende Glykosurie ein.

Die große Bedeutung des Hirnstamms liegt aber nicht bloß darin, daß er der Sitz lebenswichtiger Zentren ist, sondern da aus ihm die **Gehirnnerven** entspringen, so hängen von ihm auch noch alle diejenigen Funktionen ab, an welchen neben den automatischen und den typischen Reflexfunktionen die Gehirnnerven beteiligt sind. Die wesentlicheren dieser Funktionen sind im folgenden kurz zusammengefaßt:

1. Der *Hypoglossus* dient durch Bewegung der Zunge vor allem dem Sprechen und der Nahrungsaufnahme. Eine halbseitige Lähmung der Zunge durch Verletzung des einen Hypoglossus stört jedoch das Sprechen, Kauen und Schlucken nur wenig. Die halbseitige Lähmung erkennt man daran, daß, wenn die Zunge herausgestreckt wird, die Spitze nach der gelähmten Seite hin abweicht.

2. Die Funktionen des *Vagus* sind außerordentlich vielseitig, da er Schlund, Kehlkopf, Herz und Lungen mit motorischen und rezeptorischen, Magen und Darm mit motorischen und sekretorischen Fasern versorgt. Die Pharynxäste vermitteln den Schlingreflex (S. 27). Den Laryngeus superior sahen wir als rezeptorischen Nerven beim Husten beteiligt (S. 367). Der Laryngeus inferior oder Recurrens innerviert die Kehlkopfmuskeln. Die zentripetalen Herzfasern des Vagus vermitteln den Depressorreflex (S. 136), die zentrifugalen wirken negativ chronotrope, ino- und bathmotrop (S. 136). Die Bronchen werden mit motorischen, konstringierend wirkenden Fasern versorgt (S. 118), die zentripetalen Lungenfasern besorgen die „Selbststeuerung der Lungen“ (S. 117).

Im Magen und Darm wird die Bewegung vom Vagus angeregt (S. 36) ebenso die Sekretion des Magen- und des Pankreassaftes (S. 32 u. 45).

Vom Vagus ist also eine Fülle wichtiger Funktionen abhängig. Durchschneidet man die beiden Vagi bei einem Tier, so ist meistens der Tod durch Lungenentzündung die Folge. Die Ursache dieser sogenannten *Vaguspneumonie* ist teils in der Lähmung der Speiseröhre gelegen, in welcher die verschluckten Speisen sich stauen, bis sie bis an den Kehlkopfingang reichen und in diesen überfließen, teils in einem mangelhaften Verschluss des Kehlkopfs beim Schlucken, so daß durch „Verschlucken“ Speise direkt in die Luftwege eindringt, teils im Fehlen der Sensibilität des Kehlkopfs, so daß der Hustenreflex nicht mehr ausgelöst, die eingedrungene Speise also nicht mehr durch die explosive Expiration des Hustens herausgetrieben wird. So kommt es dazu, daß Speise aspiriert und die Lunge infiziert wird.

3. Der *Glossopharyngeus* ist der Hauptgeschmacksnerv (siehe Kap. 33) und führt außerdem wahrscheinlich der Parotis sekretorische Fasern im N. auriculo-temporalis zu (siehe S. 22).

4. Der *Akustikus* dient mit seiner einen Portion, dem N. *cochlearis*, dem Hören; die andere Portion, der N. *vestibularis*, vermittelt von den Bogengängen und den Statozysten des Labyrinths aus, vor allem in Gemeinschaft mit den beiden spinocerebellaren Strängen (siehe S. 364), die Erhaltung des Körpergleichgewichts (siehe Kapitel 35).

5. Der *Fazialis* ist vor allem Bewegungsnerv für das Gesicht; mit motorischen Fasern versorgt er ferner die Muskeln des äußeren Ohres und den M. *stapedius* im Innern des Ohres. Außerdem enthält der *Fazialis* sekretorische Fasern für die Tränendrüsen (siehe S. 367), die Drüsen der Nasenschleimhaut und für die Glandula submaxillaris und sublingualis (S. 22). Endlich enthält er wahrscheinlich in der Chorda tympani Geschmacksfasern (siehe Kap. 33).

Auffällig gibt sich die Mannigfaltigkeit der Funktionen bei Lähmungen zu erkennen. Bei der doppelseitigen *Fazialisparalyse* fallen alle mimischen Bewegungen fort, das Gesicht ist erstarrt; da der M. *orbicularis oculi* mit betroffen ist, so kann das Auge nicht geschlossen werden (*Lagophthalmus*); die Lähmung des M. *buccinatorius* bewirkt, wie schon auf S. 367 gesagt wurde, daß die Speisen leicht zwischen Wangenschleimhaut und Kiefer hängen bleiben; auch die öfter zu beobachtende Verminderung der Speichelsekretion stört die Nahrungsaufnahme; Pfeifen, Saugen und Pusten gelingen nicht, die Sprache ist wegen der Lippenlähmung gestört; endlich kommt es öfter zu *Hyperakusis*, d. h. einer Überempfindlichkeit des Ohres, infolge der Lähmung des M. *stapedius* (s. Kap. 31). Eine halbseitige Lähmung macht sich vor allem bemerkbar durch die Schiefe der Gesichtszüge; da die Gesichtsmuskeln normalerweise tonisch kontrahiert sind, so hängt die gelähmte Seite, insbesondere der Mundwinkel herab; die Tränen fließen oft deutlich nur einseitig.

6. Der *Abduzens* versorgt den M. *rectus lateralis* des Auges; daher kommt es zu Schielen nach einwärts, zu *Strabismus convergens*, wenn seine Funktion ausfällt.

7. Der *Trigeminus* sendet rezeptorische Fasern in fast die ganze Haut des Kopfes, in die Konjunktiva und Kornea, in die Schleimhaut der Nase und des Mundes und in die Zähne. Der Zunge kann er Geschmacksfasern zuführen. Mit motorischen Fasern versorgt er die Kau-muskeln und den M. *tensor tympani* (über einige Ausfallserscheinungen siehe nächste Seite).

8. Der *Okulomotorius* innerviert einen großen Teil der äußeren Augenmuskeln (bis auf den M. *rectus lateralis* und M. *obliquus superior*),

ferner den *M. levator palpebrae superioris*, den *M. ciliaris* und den *M. sphincter pupillae*. Lähmung des Okulomotorius erzeugt daher ein charakteristisches Symptomenbild, nämlich Hängen des oberen Lides (*Ptosis*), fast mangelnde Beweglichkeit des Bulbus und Schielen nach außen und unten infolge des Zuges von *Rectus lateralis* und *Obliquus superior*, ferner *Mydriasis* und Mangel des Akkommodationsvermögens, also Unfähigkeit, nahe Objekte scharf zu sehen.

Außer den hier aufgezählten Funktionen sind den Gehirnnerven, ebenso wie auch den spinalen Nerven häufig noch **trophische Funktionen** zugeschrieben worden, d. h. außer den gewöhnlichen effektorischen Erregungen sollen den Organen von den Nerven aus auch noch besondere Erregungen zufließen, welche notwendig seien, um sie lebenskräftig und wachstumstüchtig zu erhalten. Das Thema der trophischen Funktionen war eine Zeitlang heiß umstritten; heute können die meisten sogenannten trophischen Störungen anderweitig erklärt werden.

Wir wollen Gründe und Gegenstände für die Lehre von den trophischen Funktionen zunächst an zwei klassischen Beispielen kennen lernen. Die vorher erwähnte *Vaguspneumonie* wurde früher als Folge eines Ausfalls trophischer Einflüsse aufgefaßt. Aber unsere Analyse hat ja schon gezeigt, daß es sich um eine Schluckpneumonie infolge der Anästhesie und Motilitätsstörung in den oberen intestinalen und Respirationswegen handelt (L. TRAUBE). Zum Beweis dessen kann man noch anführen, daß erstens die *Vaguspneumonie* ausbleibt, wenn man allein die Lungenäste der Vagi durch eine tiefe Durchschneidung ausschaltet, und daß sie zweitens trotz Durchschneidung der Vagusstämme auch ausbleibt, wenn man das operierte Tier durch Schlundsonde oder von einer Magen-fistel aus ernährt.

Ein weiteres Beispiel irrtümlicher Deutung knüpft sich an die Beobachtung der Folgen einer *intrakraniellen Trigemindurchschneidung* (LONGET, MAGENDIE). Einige Tage nach der Operation pflegt nämlich die Hornhaut sich zu entzünden, es kommt zu eiteriger Keratitis und weitergreifend zu Panophthalmie, d. h. zur Vereiterung des ganzen Bulbus, ferner bilden sich geschwürige Prozesse auf der Zunge und in der Mund- und Nasenschleimhaut (*Glossitis*, *Rhinitis*). Diese gesteigerte Vulnerabilität im Gebiet des Trigemini ist nun sicherlich im wesentlichen die Folge des Sensibilitätsausfalls am Kopf. Das Auge erkrankt, weil der Staub, der auf die Hornhaut gelangt, nicht reflektorisch durch Lidschlag und durch Tränensekretion beseitigt wird, und weil das operierte Tier nicht merkt, wenn es mit dem Kopf gegen die Wand des Käfigs stößt. Das ist nicht anders, wie wenn der Patient mit *Syringomyelie* sich infolge seiner Thermanästhesie (S. 363) häufig die Finger verbrennt; die Wunden und narbigen Verdickungen beruhen dann auch nicht auf „trophischen Störungen“. SNELLEN hat einem Kaninchen mit durchschnittenem Trigeninus den Ohröffel nach vorn geklappt und auf das obere Augenlid aufgenäht; dann schützt der sensible Ohröffel das Auge, und es kommt trotz Trigemimusmangels nicht zur Keratitis. RANVIER hat durch eine oberflächliche Zirkumzision am Rand der Kornea deren sensible Nerven durchschnitten; auch dann blieb die Keratitis aus, weil die erhaltene Sensibilität in der Umgebung der Hornhaut dem Auge genügenden Schutz gewährte; erst wenn danach in einer zweiten Operation der ganze Trigeninus durchschnitten wurde, dann brach die Keratitis aus. Auch beim Menschen ist wegen unerträglicher Gesicht neuralgien von

FEDOR KRAUSE das Ganglion Gasseri exstirpiert worden; hier blieb die Augenerkrankung aus, weil der Mensch vorsichtiger mit seinen Augen umgeht.

Die Glossitis ist ähnlich einfach zu erklären (ROLLETT): da die Mundschleimhaut nichts mehr perzipiert, so bleiben Speiseteile zwischen den Zähnen, besonders auch zwischen Wangenschleimhaut und Alveolarfortsatz liegen und zersetzen sich; ferner beißt sich das Tier auf die Zunge, und die Wunden infizieren sich. Und aus ähnlichen Gründen kommt es zur Rhinitis.

Aber nicht in allen Fällen von Nervenläsionen sind die Folgen so zwanglos ohne Inanspruchnahme trophischer Funktionen zu erklären. Am allerhäufigsten zeigen sich „*trophische Störungen*“ bei *Rückenmarksverletzungen*, sowohl beim Menschen, wie beim Tier. Beim spinalen Hund kann man fast mit Regelmäßigkeit darauf rechnen, daß kurze Zeit nach der Operation auf der Haut Geschwüre entstehen, welche sich oft rasch in die Breite und Tiefe ausdehnen. Die Geschwüre entstehen stets zuerst an solchen Stellen, welche von der Unterlage gedrückt werden, also vor allem über dem Becken, dem Kreuzbein, den Trochanteren, sind also vergleichbar dem Dekubitus, dem „Durchliegen“, das auch sonst bei schweren Erkrankungen vorkommt. Damit ist schon gesagt, daß die „trophischen Störungen“ nicht bloß durch den Sensibilitätsausfall erklärt werden können. Beim spinalen Tier, welches gelähmt auf seiner Streu daliegt, könnte man natürlich zunächst argwöhnen, daß neben dem Druck auf die Haut die Durchnässung mit Harn und die Beschmutzung mit Kot infolge der Inkontinenz von Blase und Rektum den Dekubitus erzeugen; er ist aber oft auch bei sorgfältigster Pflege des Tiers nicht zu vermeiden (GOLTZ). Vielleicht ist an dem Entstehen des Dekubitus die Vasomotorenlähmung, welche einer Querschnittsläsion des Rückenmarks unmittelbar folgt, stark beteiligt; dafür spräche (siehe S. 370), daß nach einiger Zeit bei sorgsamer Pflege die Geschwüre wieder völlig verheilen. Ganz klar ist aber die Sachlage bisher jedenfalls nicht.

Noch weniger übersichtlich ist die Erscheinung, daß nach Nervendurchschneidung oft *die Haare oder die Zähne ausfallen*, daß *die Knochen brüchig werden*, und daß *das Wachstum der Haare, der Federn, der Nägel, der Knochen gestört* wird. BETHE fand, daß die größere Brüchigkeit der Knochen schon eintritt, wenn bloß die hinteren Wurzeln durchschnitten werden, und TRENDELENBURG konstatierte das gleiche für das Wachstum der Federn.

Zum Gebiet der trophischen Störungen wird endlich und vor allen Dingen die bekannte Tatsache gerechnet, daß alsbald nach Durchschneidung der efferenten Nerven die *quergestreiften Muskeln degenerieren*; sie werden zunächst abnorm elektrisch erregbar, d. h. sie reagieren in anderer Gesetzmäßigkeit (siehe S. 337) auf den elektrischen Reiz als normale Muskeln, sie zeigen „Entartungsreaktion“, und die Nutzzeit (siehe S. 330) wird verlängert; zugleich bekommt die Muskelzuckung einen abnorm trägen Verlauf, und allmählich schwindet dann die kontraktile Substanz völlig. Diese Erscheinungen beruhen keineswegs auf der Lähmung und sind etwas anderes als die sonst häufig vorkommende „Inaktivitätsatrophie“; denn beim spinalen Tier mit erhaltenen Reflexbogen sind die Beine zwar auch oft völlig gelähmt; dennoch kommt es zunächst nicht zur Degeneration ihrer Muskeln.

Nach all dem kommen wir also zu der Feststellung, daß die Einbuße der normalen Nervenversorgung eine verminderte Vitalität und geringere

Widerstandsfähigkeit verursacht, für welche uns eine allseitig befriedigende Erklärung bis jetzt noch fehlt.

Wenden wir uns nun schließlich der **Leitungsfunktion des Hirnstamms** zu! Der Hirnstamm ist die Durchgangsstätte für wichtige lange Bahnen (S. 361), vor allem für solche, welche das Rückenmark mit dem Großhirn und dem Kleinhirn und die letzteren beiden unter sich verbinden.

Diese Bahnen verlaufen im großen ganzen ventral vom Gebiet der Gehirnnervenkerne. Die zentripetalen Leitungen liegen im allgemeinen in der Haube, die zentrifugalen im Fuß. Erstere setzen sich zusammen 1. aus den Neuronen, welche, aus den Kernen der Hinterstränge entspringend, die Fortsetzung des GOLL-Schen und BURDACHSchen Stranges bilden, alsbald nach ihrem Ursprung auf die Gegenseite kreuzen (siehe S. 360) und zum Thalamus hinaufziehen, 2. aus den Tractus spino-thalamicus und 3. in der Medulla oblongata und zum Teil im Pons aus den beiden Tractus spino-cerebellares. Die motorischen Bahnen sind vor allem die Pyramidenbahnen; sie bestehen hier nicht bloß aus kortikospinalen, sondern auch aus „kortikobulbären“ Fasern, die sich zu den motorischen Kernen des Trigemini und Vagus und zu den Kernen des Fazialis und Hypoglossus begeben. Diese kortikobulbären Fasern kreuzen bereits vom Pons ab auf die Gegenseite, während die kortikospinalen Fasern erst im kaudalen Teil der Medulla oblongata, in der Decussatio pyramidum, auf die andere Seite übertreten. Die ebenfalls zentrifugale Bahn, welche vom Nucleus ruber herkommt (siehe S. 361), kreuzt schon weiter oben. Die Verbindung des Großhirns mit dem Kleinhirn wird durch die frontale und durch die okzipitotemporele Brückenbahn vermittelt; diese liegen im Fuß zu beiden Seiten der Pyramidenbahn.

Dieser anatomischen Anordnung entspricht es, daß bei einseitiger Durchschneidung des Hirnstammes die Sensibilität auf der Gegenseite ausfällt, während die motorische Lähmung nicht komplett ist, eben weil die motorischen Bahnen in ganz verschiedenen Höhen kreuzen. Einseitige Verletzung, namentlich im Pons, in den Pedunculi cerebri und den Crura cerebelli ad pontem, verursacht häufig einseitige Bewegungsstörungen, sogenannte **Zwangsbewegungen**, welche das Tier hindern, geradeaus zu laufen. Man unterscheidet *Reitbahn- oder Manègebewegungen*, bei denen das Tier im Kreis umherläuft, *Uhrzeigerbewegungen*, bei denen das Hinterteil des Tieres feststeht und der Vorderkörper sich um ersteres als Achse dreht, und *Roll- oder Wälzbewegungen*, bei denen sich das Tier auf dem Boden um seine Längsachse dreht. Dazwischen gibt es alle Übergänge. Die Kreisbewegungen erfolgen bald nach der verletzten Seite hin, bald nach der Gegenseite. Die merkwürdige Störung rührt teils von der einseitigen unvollständigen Lähmung her, teils von Inkoordinationen durch Reizung und durch Unterbrechung von Bahnen zum Kleinhirn. Mit den Manège-, Zeiger- und Rollbewegungen ist oft *Nystagmus* kombiniert, d. h. zuckende Bewegungen der Augen; auf diese kommen wir später (Kap. 35) noch genauer zurück.

Liegt die Verletzung im Gebiet der Pedunculi cerebri, so gesellen sich zu den Bewegungsstörungen oft noch die Symptome einer Reizung oder einer Läsion der **Vierhügelregion**. Die vorderen Vierhügel sind, wie wir (S. 367) sahen, eines der primären Optikuszentren. Ihre Zerstörung verursacht Sehschwäche, aber nicht Erblindung, ferner Störungen in der Koordination der Augen. Ihre Reizung bewirkt häufig Pupillenerweiterung, Lidhebung und Bewegungen der Augen. Die hinteren Vierhügel stehen im Dienst des Gehörs; Fasern aus dem Nucleus cochlearis der Gegenseite endigen hier. Daher beobachtet man (an Hunden und Affen) bei Läsion dieser Partie eine Schädigung, aber nicht Aufhebung des Hörvermögens, Reizung verursacht häufig Phonation.

24. Kapitel.

Das Großhirn.

Vergleichende Anatomie des Großhirns 377. Das Verhalten nach Exstirpation des Großhirns 378. Die Lokalisationslehre 384. Die Lokalisation der Motilität im Großhirn 385. Restitutionserscheinungen nach Ausschneiden bestimmter motorischer Rindenzentra 391. Die Lokalisation der Sensibilität 393. Weitere Folgen des Ausschneidens der Zentra 393. Die Sehsphäre 395. Die Hörsphäre 397. Geruchs- und Geschmackszentrum 398. Primär- und Sekundärzentra 399. Aphasie 399. Apraxie und Agnosie 402. Die Präponderanz der linken Hemisphäre 403. Der Schlaf 405. Der zeitliche Verlauf der Gehirnvorgänge 405.

Die Lehre von den Funktionen des Großhirns ist wohl derjenige Abschnitt der Physiologie, welcher uns unmittelbar am allermeisten fesselt. Denn das Mysterium des Lebens scheint uns hier in seiner größten Erhabenheit entgegenzutreten. Hier haben wir nicht allein ein Organ vor uns, dessen Architektur, Physik und Chemie wir studieren müssen, um seine Funktionen zu verstehen und seine Bedeutung für das organische Zusammenwirken aller Teile des Körpers richtig einschätzen zu können, sondern das Großhirn gilt uns außerdem als der Sitz und als das Organ der Seele. Denn aus vielen Erfahrungen, die namentlich dem Gebiet der Pathologie des Menschen angehören, können wir folgern, daß Fühlen und Wollen, Denken und Sicherinnern, daß das ganze geistige Leben nur dann seinen natürlichen Verlauf nimmt, wenn das Großhirn gesund ist.

Sobald wir zu dieser Erkenntnis gelangt sind, werden wir aber auch die Frage aufwerfen, wie es wohl zu erklären ist, daß gerade mit den Prozessen im Gehirn seelische Vorgänge Hand in Hand gehen, und indem wir so fragen, öffnen sich vor uns ganz neue andersartige Probleme als bisher; wir leuchten in die Tiefen der naturphilosophischen Untersuchungen hinein.

Aber für die Physiologie ist damit, daß wir in dieser Weise auf den Boden der Metaphysik hinübertreten, auch wenn wir die Frage nach dem Zusammenhang von Gehirn und Seele noch so umfänglich diskutieren würden, nichts gewonnen. Denn schließlich ist, wie wir bald finden werden, das Gehirn auch nur eine Art Reflexorgan, welches, ähnlich wie das Rückenmark und der Hirnstamm, zwischen Rezeptoren und Effektoren vermittelt, und unser Verständnis für seine Verrichtungen wird um kein Jota dadurch vertieft, daß wir uns zu den Erregungsprozessen, die sich im Gehirn abspielen, noch Seelenvorgänge hinzudenken. Objektiv betrachtet ist das Großhirn nichts anderes, als ein Stück Zentralnerven-

system, welches zufolge seiner inneren Organisation eine besondere Reichhaltigkeit in den durch äußere Reize angeregten Bewegungen, eine besondere Fülle von Kombinationen zahlreicher Einzelbewegungen zu „Handlungen“ auf Grund der verschiedensten gegenwärtigen und unter der Nachwirkung der verschiedensten früheren Reize ermöglicht, eine Fülle, die über das Maß der durch das Rückenmark vermittelten Aktionen zwar weit, aber doch nur quantitativ, nicht qualitativ hinaus-

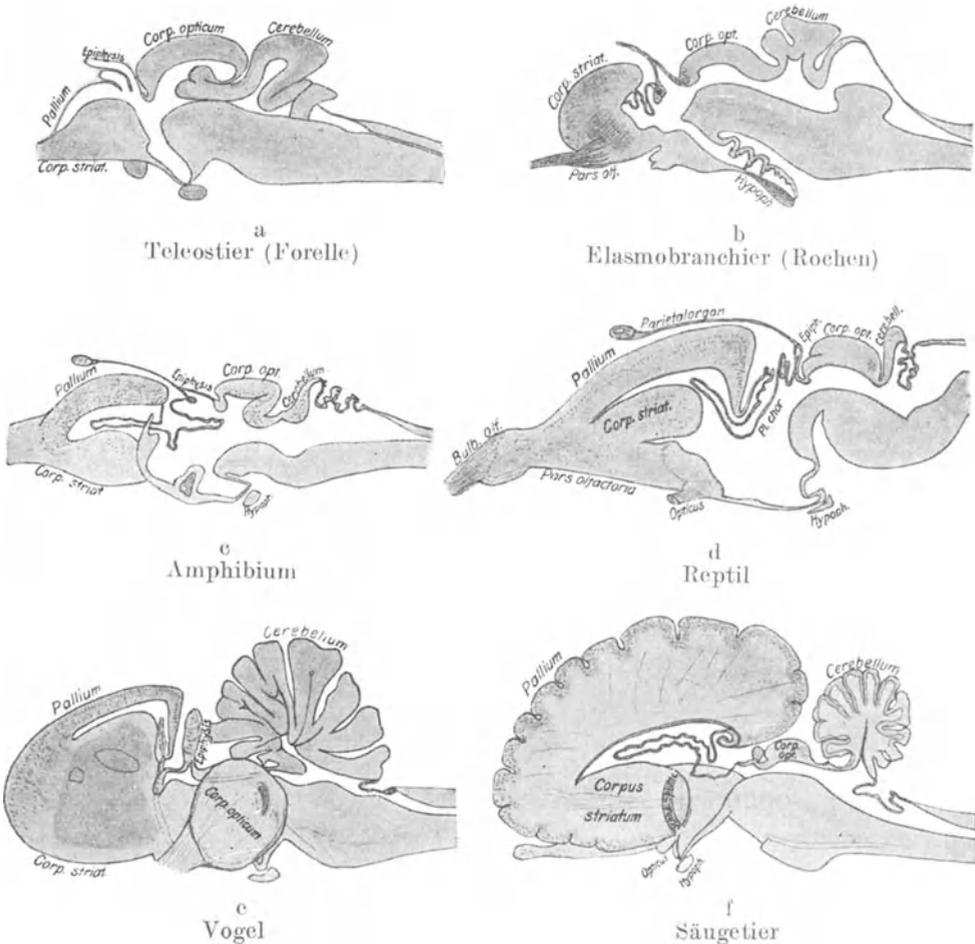


Abb. 128. Sagittalschnitt durch das Großhirn von Wirbeltieren (nach EDINGER).

geht. Daher erfordert das Studium der Großhirnfunktionen prinzipiell auch keine anderen Mittel, als wie wir sie bei irgend einem der anderen Organe angewendet haben; die Schwierigkeiten, welche hier zu überwinden sind, sind nur dem ersten Anschein nach, nicht wirklich andere als irgendwo sonst. Dies auseinanderzusetzen, ist eine der wichtigsten Aufgaben des folgenden Kapitels.

Wenn wir auf diese Vorbemerkungen hin daran gehen wollen, festzustellen, inwiefern und auf welche Weise das Großhirn mehr leistet,

als das übrige Zentralnervensystem, so wollen wir zuerst beachten, daß das Großhirn beinahe als eine Domäne der „höheren Wesen“ zu bezeichnen ist. Unter den Wirbeltieren sind besonders die Säuger damit begabt, und bei den höheren Säugetieren finden wir es stärker entfaltet als bei den niederen. Somit werden wir ein Urteil über die Leistungen

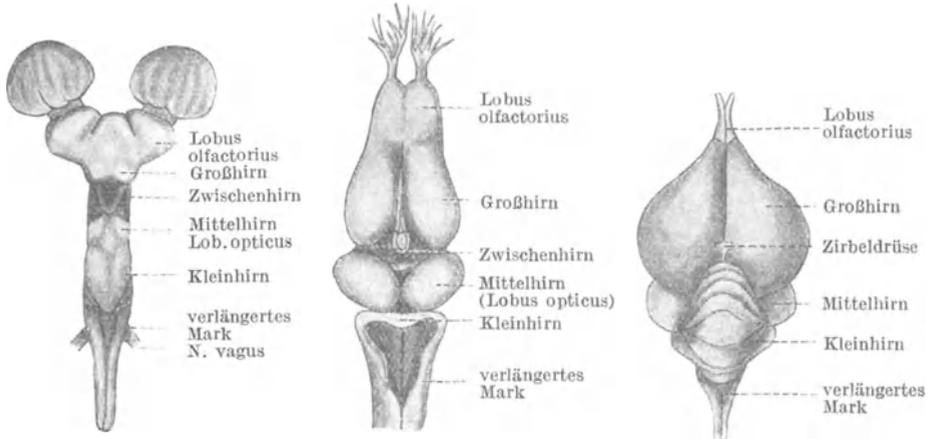


Abb. 129. Gehirn eines Haifisches (nach STEINER.)

Abb. 130. Gehirn eines Frosches (nach ECKER.)

Abb. 131. Gehirn einer Taube (nach WIEDERSHEIM.)

des Großhirns erstens dadurch gewinnen können, daß wir vergleichend-physiologisch verfahren und untersuchen, wodurch sich das Verhalten von Tieren mit schwach und mit stark ausgebildetem Großhirn unterscheidet. Zweitens können wir auch experimentell vorgehen und zusehen, wie sich das Verhalten eines Tieres ändert, wenn wir ihm das Großhirn exstirpieren. Drittens wollen wir die Erfahrungen der Klinik über krankhafte Zerstörungen des Großhirns zu Rate ziehen.

Bevor wir uns aber den Ergebnissen dieser Studien zuwenden, sei ein kurzer Überblick über die **vergleichende Anatomie des Großhirns** vorausgeschickt!

Was man unter Großhirn versteht, entspricht, vergleichend-anatomisch genommen, im wesentlichen dem Vorderhirn. Dessen phylogenetische Entwicklung in der Reihe der Wirbeltiere ist in Abb. 128 in Sagittalschnitten (nach EDINGER) dargestellt.

Im Gehirn des Teleostiers (Forelle) (a) bildet, wie man sieht, den Hauptteil des Vorderhirns das an seinem Boden gelegene *Stammganglion* oder *Corpus striatum*, welchem sich nach vorn der *Lobus olfactorius* anschließt. Seitenwände und Dach bestehen aus einer dünnen Epithellamelle.

Diese Lamelle nun verdickt sich in der aufsteigenden Wirbeltierreihe vom *Corpus striatum* aus mehr und mehr und wird zum *Hirnmantel* oder *Pallium*, welches meist durch eine tiefe Längsfurche in zwei große Abschnitte, die beiden *Hemisphären*, zerfällt. Nur die kaudalste Partie des Vorderhirndachs behält stets den Epithelialcharakter und wird zur *Tela chorioidea*.

Während nun das *Pallium* bei den Elasmobranchiern (b), den Amphibien (c), Reptilien (d) und Vögeln (e) nur eine mäßig starke Entwicklung erfährt, ist es bei den Säugtieren (f) zu einem mächtigen Organ gewuchert, welches an Masse gewöhnlich



Abb. 132. Gehirn eines Hundes (nach MUNK.)

das Stammganglion weit übertrifft und eigentlich allein als Großhirn imponiert. Wenn man daher zum Zweck vergleichend-physiologischer Studien in den verschiedenen Tierklassen das Vorder- oder Großhirn exstirpiert, indem man das Zentralnervensystem vor dem Zwischenhirn quer durchtrennt und die vorderste Partie ausräumt, so ist die relative Masse Gehirns substanz, welche man — abgesehen von dem Corpus striatum und dem Riechlappen — dabei entfernt, sehr verschieden groß (siehe dazu die Abb. 129—132, in welchen die Gehirne, von oben betrachtet, abgebildet sind).

Dem entspricht der physiologische Befund; die **Ausfallserscheinungen nach Exstirpation des Großhirns** sind um so offenkundiger, je massiger das Großhirn ist.

Exstirpiert man das Vorderhirn bei den **Knochenfischen** (Teleostier), so sind an den wenigen einfachen Reaktionen, die man bei diesen Tieren kennt, keinerlei Veränderungen nachzuweisen. STEINER fand bei dem Cyprinoiden *Squalius cephalus*, daß nach der Exstirpation die Schwimmbewegungen gerade so ausgeführt werden, wie vorher. Auch an Spontaneität fehlt es nicht, d. h. an Bewegungen, welche ohne eine bemerkbare äußere Anregung zustande kommen. Auf einen ins Bassin geworfenen Regenwurm schwimmt das großhirnlose Tier ebenso zu, wie auf ein Stück Bindfaden; aber während es den ersteren verschlingt, läßt es das zweite wieder los. Gerade so verhält sich ein normales Tier. Entsprechendes beobachtete VULPIAN beim Karpfen; auch hier ist die spontane Lokomotion nach der Operation erhalten. Er gibt ferner an, daß, wenn er an das Bassin herantrat, die großhirnlosen Tiere sich zusammen mit den normalen vor ihm versammelten und nach dem Futter, das er ihnen zuwarf, schnappten.

Etwas anders verhalten sich die **Elasmobranchier** nach der Vorderhirnwegnahme. Auch hier ist zwar noch die Spontaneität der Lokomotion nach der Wegnahme des Vorderhirns (beim Katzenhai, *Scyllium catulus*) erhalten (BETHE), aber die spontane Nahrungsaufnahme ist verloren gegangen (STEINER, BETHE). Dieser Unterschied beruht jedoch nur darauf, daß die Haiische Riechtiere, *Squalius cephalus* ein Sektier ist. Während der Knochenfisch auf eine ihm zugeworfene Beute grades Wegs zuschießt, umkreist sie der Hai, von den nach allen Seiten diffundierenden Riechstoffen angelockt, in immer engeren Kreisen. Da nun beim Hai mit dem Vorderhirn die mächtig entwickelten Lobi olfactorii mit entfernt werden, so geht naturgemäß auch der Riechreflex verloren. Daher hat hier auch den gleichen Effekt wie die Wegnahme des Vorderhirns die bloße Exstirpation der Riechlappen oder das Auskratzen der Riechschleimhaut.

Wenden wir uns den **Amphibien** zu, bei denen das Pallium ähnlich wie bei den Elasmobranchiern noch sehr wenig entwickelt ist, so haben auch hier die klassischen Studien von GOLTZ und besonders die sorgfältigen Versuche seines Schülers SCHRADER gelehrt, daß, wenn man nichts weiter exstirpiert, als das Großhirn, insbesondere, wenn man auch das Zwischenhirn (siehe Abb. 130) schont, das enthirnte Tier dann sich fast ebenso verhält, wie ein normales. Die Bewegungen erfolgen spontan, selbst von einem erschütterungsfreien Galvanometerpfeiler springen die großhirnlosen Frösche fort. Sie wechseln den Aufenthalt von Wasser und Land. Sie springen und fangen geschickt Fliegen. Zu Anfang des Winters vergraben sie sich. Läßt man sie mit Hilfe einer Schraubvorrichtung vorsichtig ins Wasser hinab, so beginnen die enthirnten Frösche nicht früher und nicht später zu schwimmen als die normalen. Auch dem Feind entziehen sie sich gerade so gut; denn von Nattern werden nicht mehr

großhirnlose Tiere gefangen als gesunde. Immerhin sind Unterschiede zu bemerken. Vor allem ist nach Enthirnung die Reflexerregbarkeit gesteigert, wie das Beispiel des Quakfrosches lehrte (siehe S. 348). Ferner ist ein großhirnloser Frosch, wenn man ihn auch noch blendet, unfähig, seine Nahrung zu finden, während Frösche, die bloß blind sind, das noch können. Dieser Unterschied beruht aber wohl nur auf dem Wegfall der Riechfunktion und nicht auf dem Gehirnmangel. Dagegen beweist eine positive Mitwirkung des Gehirns vielleicht die Angabe von BURNETT, daß großhirnlose Frösche, welche zusammen mit normalen in ein Terrarium gebracht werden, den normalen im Fliegenfangen deutlich unterlegen sind.

Dies Bild des großhirnlosen Frosches bekommt man freilich nur zu sehen, wenn man, wie gesagt, ganz besonders schonend operiert. Für gewöhnlich geht nach dem sog. „GOLTZschen Stich“, d. h. nach einem Stich in der Höhe der hinteren Augenpole, die Spontanität verloren, während die charakteristischen Reflexe des Springens, Kletterns und Umdrehens, ferner Kornealreflex und Labyrinthreflexe (s. Kap. 35) erhalten bleiben.

Wenig bekannt ist über das Verhalten großhirnloser **Reptilien**. Nach FANO verhalten sich operierte Schildkröten ungefähr ebenso wie normale; sie bewegen sich spontan und umgehen ihnen in den Weg gestellte Hindernisse. Spontane Nahrungsaufnahme scheint jedoch bei den enthirnten Schildkröten und Schlangen nicht mehr vorzukommen, und Reize, vor denen sie sich sonst scheuten, treiben sie nicht mehr in die Flucht (SCHRADER).

Am längsten sind die Folgen der Großhirnexstirpation bei den **Vögeln** studiert. Seit FLOURENS (1822) kennt man das Bild der *großhirnlosen Taube*. Sie steht unbeweglich, wie eine Statue, mit eingezogenem Kopf da, wie man sie auch hinstellt. Gereizt öffnet sie vorübergehend die Augen und macht wohl einen Schritt vorwärts, um alsbald wieder in Schlaf zu versinken. Setzt man sie auf den Finger und bewegt den Arm auf und ab, so balanciert sie geschickt mit den Flügeln und dem Schwanz; wirft man sie in die Luft, so fliegt sie eine Strecke und läßt sich dann zu Boden, um wieder in den Zustand der Erstarrung zu verfallen. Niemals frißt sie spontan; auf einem Körnerhaufen stehend kann sie verhungern. Man muß sie also, um sie am Leben zu erhalten, füttern.

Aber dieses von der Norm weit abweichende Verhalten bleibt, wenn man sorgfältig und unter Schonung der Thalami optici operiert, manchmal nur wenige Tage bestehen (LONGET, SCHRADER). An die Stelle der Ruhe tritt dann im Gegenteil eine auffallende Beweglichkeit, das Tier läuft unausgesetzt im Käfig umher. Dabei vermeidet es Hindernisse, sogar solche, welche, wie eine Glasglocke oder eine etwas bestaubte Glasplatte, leicht zu übersehen sind. Sie wendet auch den Kopf nach dem Licht. Das Sehvermögen ist also nicht verloren gegangen. Die großhirnlose Taube hört auch, auf einen Knall öffnet sie manchmal die Augen und hebt den Kopf. Beim Balancieren auf dem Finger verläßt sie unvorhergesehen ihren Sitz und fliegt davon, um sich auf irgend einen Gegenstand niederzulassen. Dabei trifft sie unter ihren Ruheplätzen deutlich eine Auswahl; sitzt sie unbequem, z. B. auf einem sich drehenden Stab oder dem Stöpsel einer Flasche oder einem Globus, der sich unter ihren Füßen bewegt, so späht sie umher und fliegt dann auf eine in der Nähe befindliche andere Stange, von dort auf die Lehne eines weiter entfernten Stuhls, klettert von dieser auf den Sitz und fliegt schließlich zu Boden. Hohe Hindernisse werden auch erklettert, erflattert oder überflogen. Nachts verfällt das Tier in Schlaf.

Hiernach könnte man meinen, daß die großhirnlose Taube ähnlich wie der großhirnlose Fisch oder Frosch fast in nichts von der Norm abweicht. Die eingehendere Beobachtung lehrt aber, daß das durchaus nicht der Fall ist; bei komplizierteren Reaktionen zeigt das Tier tiefgehende Störungen. Z. B. läuft der großhirnlose Täuber zwar girrend bei Tage wochenlang im Zimmer umher, aber das Weibchen, das man hinzusetzt, bleibt unbeachtet. Umgekehrt reagiert das großhirnlose Weibchen nicht auf das Locken des Täubers. Ebenso wenig bekümmert es sich um seine Jungen. „Die eben flügge gewordenen Jungen verfolgen die Mutter, unaufhörlich nach Futter schreiend, sie könnten ebensogut einen Stein um Nahrung bitten“ (SCHRADER). Auch in ihren Schlag kehren die operierten Tauben nicht zurück. Alle Gegenstände sind für das großhirnlose Tier nur eine „Raum erfüllende Masse, es geht einer anderen Taube ebenso aus dem Weg wie einem Stein oder versucht über beide hinwegzusteigen“, es hat weder Freund noch Feind, „in größter Gesellschaft lebt es als Einsiedler“.

In ähnlicher Weise wie die Taube verhalten sich auch andere Vögel. So beschreibt SCHRADER großhirnlose Hühner, welche umherlaufen, Hindernissen ausweichen und in Unruhe geraten, wenn man Erbsen auf den Boden klappern läßt, aber um den Futternapf herum gehen, ohne ihn zu finden. Der großhirnlose Falke reagiert zwar, wenn man seinen Fuß berührt, aber nicht mehr mit Beißen, Fauchen und Gefiedersträuben, sondern nur noch mit Zurückziehen des Fußes; alle Wildheit ist verschwunden. Nähert man dem Tier die Hand, so schreit es ängstlich, schlägt mit den Flügeln und verfolgt gespannt jede Bewegung der Hand. Nach einem vorgehaltenem Stück Fleisch schaut es mit weit aufgesperrem Schnabel. Das Rascheln einer Maus versetzt es in Unruhe. Auf alles Bewegte stürzt es los, mag es nun eine Maus sein oder nur ein Papierball, den der Experimentator in Bewegung setzt. Aber ist die Maus mit den Klauen getötet, dann läßt es sie unbeachtet, es verfällt nicht darauf, sie zu zerhacken und aufzufressen.

Die Störungen, welche die Großhirnextirpation verursacht, sind also höchst charakteristisch. Zahlreiche auch komplizierte Reaktionen auf Sinnesreize kommen glatt auch ohne Großhirn zustande, wie das Balancieren, das Umgehen von Hindernissen, das Auswählen und Hinstreben auf ein bestimmtes optisch wirksames Objekt. Aber bestimmte dieser komplizierten Reaktionen, die man wegen ihrer Mehrgliedrigkeit etwa mit den Kettenreflexen (siehe S. 352) vergleichen kann, sind unmöglich geworden, gleichsam dadurch, daß die Kettenglieder auseinandergerissen sind; hier diente das Großhirn also offenbar der Verkettung, der „Assoziation“ der einzelnen rezeptorischen und effektorischen Erregungen. So folgt dem Fangen der Maus nicht das Fressen, dem Girren nicht das Begatten. Man könnte sagen: die Tiere verhalten sich wie psychisch anomal, wie in ihrer Intelligenz und ihren Instinkten gestört. Aber bringt uns diese Deutung, daß mit der Exstirpation des Großhirns nach BÜCHNERS Ausdruck sozusagen „die Seele stückweise weggeschnitten ist“, dem Verständnis der Hirnfunktion näher? — Der großhirnlose Falke zeigt Reaktionen, die wir als Gemütsbewegungen, als Symptome von Angst und Begehrlichkeit bezeichnen können; im girrenden Täuber regt sich offensichtlich infolge innerer, von den Keimdrüsen ausgehender Reize (siehe Kapitel 18) der Geschlechtstrieb. Aber ähnliche Reaktionen können sogar noch bestehen, wie wir später (S. 383) sehen werden, wenn das Zentralnerven-

system noch viel größere Defekte aufweist. In jedem Fall sind es Handlungen auf Grund komplizierter nervöser Schaltungen, die uns in keinem Punkt begreiflicher werden dadurch, daß wir Psychisches hinzudenken.

Eine besondere Reaktionsweise, die bei zahlreichen Vogelarten deutlich ist, und die bisher noch nicht erwähnt wurde, bedarf aber noch einer genaueren Betrachtung, nämlich die Hervorkehrung einer *Individualität* oder einer Persönlichkeit bei den einzelnen Tieren. Es gibt Äußerungen, die nicht die Gattung charakterisieren, sondern durch die sich ein Individuum vom anderen unterscheidet. Die persönlichen Schicksale bilden dies Verhalten aus. Den deutlichsten Ausdruck dessen bilden bei den Vögeln die Ergebnisse der Dressur. Der Papagei, welcher bestimmte Worte gelernt hat, der Dompfaff, der einige Lieder pfeift, die Gans, die den Gänsejungen kennt, sie sind Individualitäten, und sie sind es dadurch, daß sie ein Gedächtnis besitzen, daß sie sich an bestimmte Wahrnehmungen erinnern können. Was das physiologisch bedeutet, wissen wir nicht; aber wenn man, um es sich verständlich zu machen, von einer „*Plastizität*“ der Gehirnssubstanz spricht, so ist der Ausdruck so allgemein, daß er wohl nicht zuviel besagt. Der Begriff der Plastizität wurde schon früher (S. 347) bei der Erwähnung der „*Bahnung*“ eingeführt; beim Rückenmark gräbt sich aber nur für kurze Zeit eine Spur in seine Substanz ein, wenn eine Erregungswelle hindurchgeht, um alsbald wieder zu „*verwischen*“. Die Substanz des Gehirns ist dauerhafter zu modellieren; so kann man sich *die Prägung neuer Assoziationen, die Lernfähigkeit, welche die Tätigkeit des Gehirns charakterisiert*, verbildlichen. Diese Lernfähigkeit ist sicherlich eine der wichtigsten Eigenschaften des Gehirns; ohne sie, ohne Gedächtnis sind die höheren psychischen Tätigkeiten gar nicht denkbar, und die Differenziertheit in den Äußerungen der höheren Tiere ist darauf basiert. Die Plastizität der Gehirnssubstanz bei den niederen Wirbeltieren, bei Fischen und Amphibien, ist jedenfalls nur eine mäßige; denn von einer Lernfähigkeit beim Frosch weiß man wenig sicheres, sein Gehirn ist also offenbar fast ebenso starr, wie allgemein die Rückenmarksubstanz, und auch die Dressurfähigkeit der Fische und ihre Fähigkeit, Erfahrungen durch das Leben zu sammeln, die Reaktionsweise im Laufe der Zeit den Lebensbedingungen besser anzupassen, ist nur gering. Der höher organisierte Vogel ist den Fischen und Amphibien an Lernfähigkeit unbedingt überlegen. Daß diese Lernfähigkeit eine Funktion ihres Großhirns ist, wird hier übrigens nur vorausgesetzt, ohne daß es bisher bewiesen wäre. Beim Säugetier hört, wie wir gleich erfahren werden, alles Sicherinnern und alles Neuerlernen auf, sobald das Großhirn extirpiert ist.

Die Erfahrungen über großhirnlose **Säugetiere** beziehen sich vornehmlich auf den Hund. Berühmt ist *der Hund ohne Großhirn*, welchen im Jahre 1892 GOLTZ herstellte und 1½ Jahre lang beobachtete; einen zweiten großhirnlosen Hund studierte neuerdings ROTHMANN sogar länger als drei Jahre. Nachdem sich die Tiere von der Operation erholt hatten, gewährten sie folgendes Bild:

Wie bei den übrigen großhirnlosen Wirbeltieren, so ist auch hier die Haltung normal, die Lokomotion erhalten, obwohl die Masse Zentralnervensystem, welche operativ abzutragen war, wegen der gewaltigen Entwicklung des Großhirnmantels unvergleichlich größer ist. Dies beruht auf der kombinierten reflektorischen Einwirkung der Labyrinth- und der rezeptorischen Körpernerven auf die gesamte Muskulatur,

ist also der Effekt einer Summe von „*Stellreflexen*“ (MAGNUS), die jeweilig von einer beliebigen Lage aus die Einnahme einer naturgemäßen Stellung mit normaler Tonusverteilung bewirken, während das in Enthirnungsstarre befindliche Hirnstammtier in der ihm vom Experimentator aufgenötigten Stellung verharrt (siehe S. 368). Der großhirnlose Hund geht spontan umher, läuft auch im Trab und im Galopp; über eine niedrige Hürde vermag er hinwegzusteigen; ja er zieht sich geschickt aus der Affäre, wenn sich eine Falltür unter einem seiner Beine plötzlich öffnet, und er humpelt wie ein gesundes Tier auf drei Beinen, wenn er sich eines zufällig verletzt. Freilich sind die Bewegungen nicht ganz so geschickt wie sonst; z. B. gleitet er auf glattem Boden leicht aus. In seinem Leben wechselt regelmäßig Schlafen und Wachen. Weckt man ihn durch einen Hautreiz, so knurrt er wohl oder bellt oder schnappt auch nach der ihn störenden Hand, wobei er allerdings ungeschickt am Ziel vorbeifährt. Mit der Schnauze in den Futtertrog gesteckt, frißt er selbständig; er leckt auch mit der Schnauze Milch auf, wie ein normaler Hund.

Aber der großhirnlose Hund ist blind, er vermeidet Hindernisse, die in seinen Weg gestellt werden, nicht und erkennt niemanden. Der Reflex des Blinzeln auf Lichteinfall und der Pupillenreflex kommen freilich zustande, also eine gewisse Lichtempfindlichkeit ist vorhanden.

Auch Geräusche werden perzipiert; so kann man ihn mit einer schrillen Pfeife aus dem Schlaf wecken; auf einen lauten Schall antwortet er mit einer Ohrbewegung oder auch gelegentlich damit, daß er sich das Ohr kratzt.

Das Riechvermögen ist natürlich verloren gegangen, da mit dem Großhirn die Endigungsstätten der N. olfactorii entfernt wurden. Dagegen vermag der großhirnlose Hund noch zu schmecken: tut man in sein Futter Chinin oder Coloquinten, so speit er es mit Nase-rümpfen wieder aus.

Sein Schmerzgefühl ist lebhaft; kneift man ihn, so knurrt, bellt oder quiekt er je nachdem; steckt man die Pfote in Eiswasser, so zieht er sie augenblicklich wieder heraus.

Kraut man ihn am Kopf, so antwortet er wohl mit leisem Knurren.

Der Geschlechtstrieb scheint erloschen.

Am auffallendsten ist seine *Teilnahmlosigkeit gegenüber allen Gegenständen seiner Umgebung*. Obwohl er bellen kann, bellt er niemals zusammen mit anderen Hunden. Auf seinen Namen hört er nicht mehr, gegen Lockrufe ist er stumpf, er wedelt nicht mehr freundschaftlich mit dem Schweif, die Peitsche erschrickt ihn nicht, gegen den Wärter, welcher ihn Tag für Tag zum Futterplatz bringt, wehrt er sich täglich mit wütendem Beißen und ist erst beruhigt, wenn er die Schnauze im Trog hat. Jeder Versuch, ihn zu erziehen oder zu irgend etwas abzurichten, mißlingt.

Nach all dem muß man sagen, daß der durch die Großhirnexstirpation verstümmelte Hund zwar noch erstaunlich viel zu leisten vermag, daß aber doch auch schwere Störungen vorhanden sind. Die Sinnesfunktionen sind hier viel stärker alteriert, als etwa bei den Vögeln, welche sich namentlich die optischen Reize ganz anders nutzbar machen können. Allerdings bleibt zu bedenken, daß die Sektion bei dem Hund von GOLTZ ergab, daß der Thalamus opticus größtenteils degeneriert und auch das Corpus geniculatum laterale der einen Seite zerstört war. Vor allem ist *durch den Wegfall aller persönlichen Reaktionen das ganze Wesen des*

Tieres stark automatisiert. Was der großhirnlose Hund noch kann, das sind stereotype Äußerungen; was er persönlich früher erlernte, ist unwiederbringlich verloren gegangen. Vergangenes existiert nicht mehr für ihn, er ist „ein Kind des Augenblicks“ geworden und verhält sich darin vergleichbar einem menschlichen Idioten. Dabei sind seine Automatismen nicht affektlos und wirken deshalb auch nicht ohne weiteres wie die Äußerungen einer „Reflexmaschine“; er gerät gelegentlich in Wut, kraut man ihm den Kopf, so äußert er in einem leisen Knurren ein gewisses Behagen. Die feineren Nuancierungen im Ausdruck durch Gebärde und Töne, die man als besonders starkes Dokument vorhandener Gemütsbewegungen anzusehen pflegt, die fehlen freilich. Aber wenn man auch das Verhalten dahin auslegt, daß Verstand und Gemüt des Tieres durch die Wegnahme des Großhirns stark reduziert worden sind, — wieviel Psychisches den übrig gebliebenen Reaktionen noch anhaftet, wird man nie entscheiden können, ebenso wie man angesichts der komplizierten durch äußere Reize angeregten Leistungen des Rückenmarks eine „Rückenmarksseele“, von der PFLÜGER sprach, weder je beweisen noch wirklich überzeugend ableugnen kann.

Neuerdings ist es KARPLUS und KREIDL sowie MAGNUS auch geglückt, *Affen* (*Macacus rhesus*) nach der Herausnahme beider Hemisphären zu beobachten. Die meisten Tiere gingen allerdings kurz nach dem Eingriff zugrunde, die längste Beobachtungsdauer betrug 26 Tage. Die Tiere waren durch die Operation erheblich stärker mitgenommen, als die großhirnlosen Hunde. Immerhin war die Beweglichkeit erhalten geblieben; die Bewegungen des Kopfes und der Augen erfolgten sogar anscheinend unbehindert; die Extremitätenbewegungen waren dagegen schwer beschädigt. Es wurde aufrechtes Sitzen und Stehen beobachtet (siehe Abb. 133), auch Greifen mit einer Extremität. Die Pupillen verengerten sich auf Lichteinfall, starke Geräusche weckten die Tiere auf, schwaches Rufen bewirkte Bewegungen der Ohrmuscheln.

Schließlich gibt es auch einige Beobachtungen an *großhirnlosen Menschen*, freilich nur an Neugeborenen, welche als Anenzephalien, d. h. gehirnlos zur Welt kamen. Wie weit die Fähigkeiten ihres reduzierten Zentralnervensystems mit den Fähigkeiten der entsprechenden Zentralnervensystemanteile des Erwachsenen in Parallele gesetzt werden dürfen, das wissen wir nicht. Solche Anenzephalien nun können mit ihren Extremitäten Strampelbewegungen machen, wie normale Säuglinge, sie greifen, wie diese, mit der Hand, sie saugen und schlucken, schreien und weinen; genährt schlafen sie „befriedigt“ ein; tut man Chinin in die Milch, so verziehen sie das Gesicht wie vor Ekel zu einer Grimasse; kurz, sie benehmen sich, wie auch sonst Neugeborene sich benehmen, selbst wenn ihr Gehirn bis in die Gegend des Trigeminusaustritts unentwickelt geblieben ist. Die meisten Anenzephalien lebten nur wenige Tage. Nur EDINGER und B. FISCHER beschrieben einen Anenzephalien, welcher $3\frac{3}{4}$ Jahre am Leben blieb; seine Gliedmaßen befanden sich in starker Kontrakturstellung, und er schrie Tag und Nacht.



Abb. 133. *Cercopithecus pentaurista*, $4\frac{3}{4}$ Stunden nach Exstirpation der Großhirnhemisphären unter Schonung der Thalami. Stehen mit halbgebeugten Beinen, normale Kopfhaltung (nach MAGNUS).

Schließen wir hiermit die Erörterungen über die Leistungen der Wirbeltiere ohne Großhirn, so läßt sich das Ergebnis, rein physiologisch gesprochen, kurz dahin zusammenfassen, daß ein hochentwickeltes Großhirn dazu befähigt, eine ungeheure Zahl von Erregungen miteinander zu assoziieren, und zwar nicht bloß derart, daß eine in einem bestimmten Moment ins Gehirn einlaufende Sinneserregung in diese und jene der ungezählten effektorischen Bahnen weiter geleitet werden kann, sondern vor allem auch dadurch, daß frühere, eventuell weit zurückliegende Erregungen die Wirkung späterer Erregungen mit beeinflussen, z. B. so, daß die spätere Erregung sicherer und schneller einen bestimmten Weg einschlägt (Übung) oder so, daß die spätere Erregung eine Erregung, welche ein früherer Reiz bewirkte, von neuem wachruft (Erinnerung), und daß sie dadurch einen anderen Weg einschlägt, als sie sonst einschlagen würde (Erfahrung).

Was weiß man nun darüber, wie das Gehirn diese Unmasse von Schaltungen bewirkt? Heute stehen wir auf dem Standpunkt, daß *das Großhirn sich aus einer großen Zahl von Teilorganen zusammensetzt*, von welchen ein jedes seine besondere Funktion besitzt, welche aber nicht unabhängig nebeneinander existieren, sondern untereinander verbunden und dadurch zu einer funktionellen Einheit zusammengeschlossen sind. Jahrzehntlang hat im 19. Jahrhundert, von der großen Autorität von FLOURENS gestützt, die entgegengesetzte Lehre gegolten, daß jeder Teil des Gehirns für die Ausübung seiner Funktionen gleichwertig, und daß man durch beliebig lokalisierte Teilexstirpationen die Gehirnfunktionen zwar schwächen, aber keine einzige gesondert aufheben könne, obwohl schon 1819 FRANZ JOSEPH GALL in seiner *Phrenologie* ein System der *Lokalisation der verschiedenen Gehirnfunktionen* aufgestellt hatte. GALLS Gedankengang war dabei der, daß, wenn bei einem Menschen eine psychische Fähigkeit besonders hervorrage, dies auch in der Vorbuchtung einer besonderen Hirnpartie und demzufolge auch in einer lokalisierten Buckelung des Schädeldachs zum Ausdruck kommen könne. Seine Studien, namentlich an den Schädeln und Gehirnen von Menschen, die durch besondere Eigenschaften des Geistes oder des Charakters ausgezeichnet waren, wie Genies, Verbrecher, Wahnsinnige, bizarre Originale, ließen ihn das Gehirn in eine Anzahl von Einzelhirnen aufteilen, welche „Sitz“ des Mitleids, der Kindesliebe, der Vorsicht, der Ruhmsucht, des Bekämpfungstriebes und dergleichen seien. Er zerstückelte also die Seele in lauter Einzelseelen, deren jede aber wiederum eine volle seelische Persönlichkeit repräsentiert. Ganz abgesehen von der ungeheuerlichen Kritiklosigkeit, welche GALL bei seinen phrenologischen Untersuchungen walten ließ, braucht man sich jedoch nur die Frage vorzulegen, wie man sich die physiologische Funktion eines seiner Einzelhirne vorstellen soll, um einzusehen, daß es sich bei dem Versuch einer Lokalisation der Gehirnfunktionen, welche von der Psychologie ausgeht, allenfalls darum handeln kann, zuerst zu den Elementen der psychischen Vorgänge, etwa zu einer Licht- oder zu einer Druckempfindung den zugehörigen lokalisierten Erregungsvorgang aufzusuchen, um von da aus stufenweise zu einer Lokalisierung komplizierterer Funktionen vorzudringen.

So baut sich die moderne **Lokalisationslehre** denn auch auf ganz anderen Grundlagen auf. Ihre Vorläufer sind zwei klinische Beobachtungen. Die eine stammt von BOULLAUD (1825), einem Schüler GALLS,

ergänzt durch DAX (1836) und BROCA (1861), welche auf Grund sorgfältiger klinischer und pathologisch-anatomischer Untersuchungen die Angabe machten, daß die koordinierte Innervation der am Sprechen beteiligten Muskeln durch eine Läsion im unteren Abschnitt der 3. linken Frontalwindung aufgehoben wird. Die andere rührt von HUGHLINGS JACKSON (1864) her, welcher fand, daß die lokalisierten oder richtiger lokalisiert beginnenden epileptiformen Krämpfe, welche öfter nach Schädelverletzungen periodisch auftreten, von lokalisierten Läsionen der Großhirnrinde herrühren (sog. Rindenepilepsie im Gegensatz zur

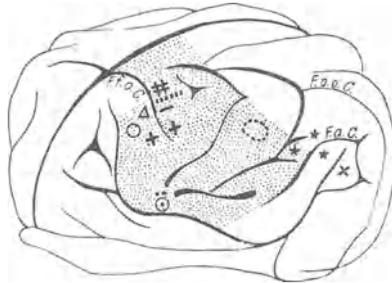


Abb. 134. Motorische Zentra auf der linken Großhirnhemisphäre des Hundes (nach HITZIG).

- Ausdehnung der erregbaren Zone punktiert.
- △ Hals-, Nacken- und Rumpfmuskulatur.
 - Hebung der Lider und Pupillendilatation (zugleich frontales Blickzentrum).
 - + Extension und Adduktion des Vorderbeines.
 - + Beugung und Rotation des Vorderbeines.
 - Bewegung von Vorder- und Hinterbein.
 - ... Bewegung des Schwanzes.
 - ‡ Bewegung des Hinterbeines.
 - ⊙ Kontraktion des Orbicularis oculi (Lidschluß und Hebung von Mundwinkel und Backe gegen das Auge) und Hebung oder Seitenwendung des Auges auf der Gegenseite, evtl. in Form von zwei entgegengesetzten Ausschlägen — sog. Herd für Bewegung und Schutz des Auges, einseitig wirksames zentrales okulomotorisches Zentrum.
 - Vorstrecken der Zunge.
 - .. Kieferöffnung.
 - ⚡ Schluß der Kiefer, Retraction der Zunge und der Mundwinkel.
 - *** sowie × Ohrbewegungen.
- F.f.o.C. FERRIERS frontales okulomotorisches Zentrum oder präzentrales Blickzentrum (teilweise mit ○ zusammenfallend).
- F.o.o.C. FERRIERS okzipitales okulomotorisches Zentrum oder Blickzentrum.
- F.a.C. FERRIERS aurikulares Zentrum (Ohrbewegungen).

genuinen Epilepsie). Die eigentlichen Eckpfeiler der Lokalisationslehre sind aber durch die experimentellen Untersuchungen von FRITSCH und HITZIG geschaffen, welche im Jahre 1870, entgegen der bis dahin allgemein herrschenden Lehre, daß die Gehirnssubstanz auf künstliche Weise nicht zu erregen sei, zeigten, daß von bestimmten Stellen der Großhirnrinde aus durch elektrische Reize bestimmte Bewegungen hervorgerufen werden können. Diese Stellen bezeichnet man als **motorische Zentra** oder *Foci* oder als *Rindenfelder*. Insofern als man Grund hat anzunehmen, daß von hier aus auch unter natürlichen Verhältnissen die Impulse für die willkürliche Innervation der Muskulatur ausgehen, spricht man auch wohl von *psychomotorischen Zentra*.

Bei den höheren Wirbeltieren, beim Menschen, beim Affen, auch beim Hund bilden die motorischen Zentra im wesentlichen einen zusammenhängenden sattelförmigen Bezirk auf der Mitte der Gehirnoberfläche, eine *motorische Zone*, wie aus den Abb. 134—138 zu entnehmen ist. Beim

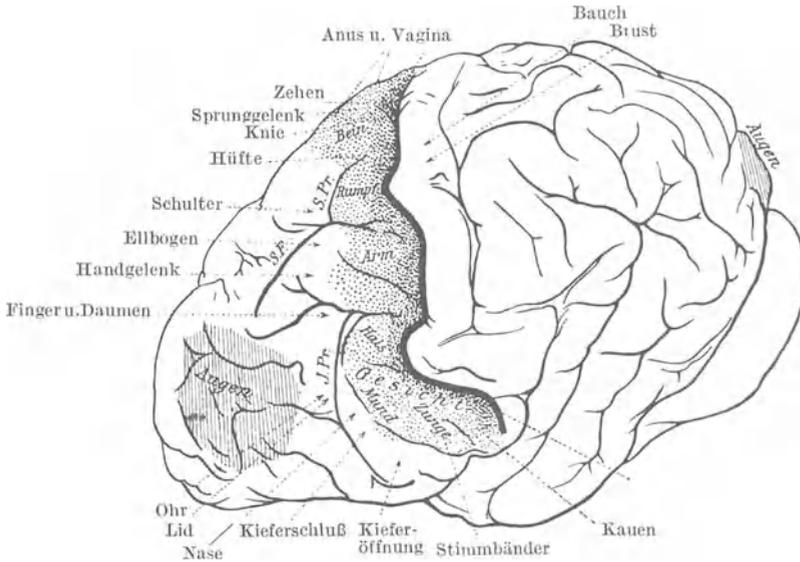


Abb. 135. Motorische Zentra auf der linken Großhirnhemisphäre des Schimpansen (nach SHERRINGTON und GRÜNBAUM).

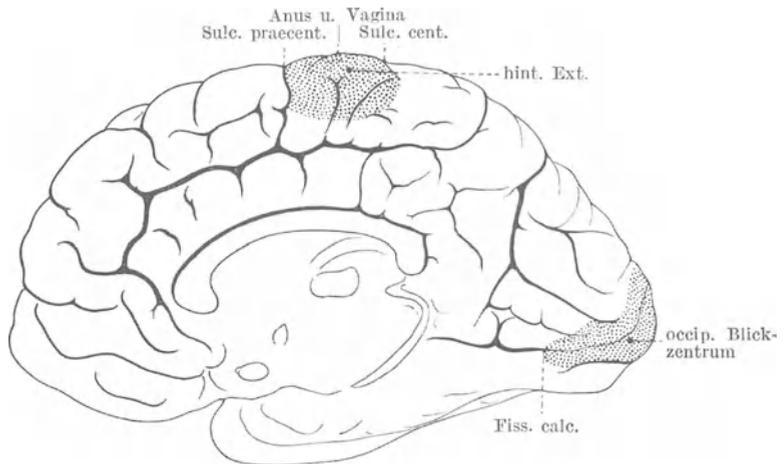


Abb. 136. Motorische Zentra auf der medialen Fläche der rechten Großhirnhemisphäre des Schimpansen (nach SHERRINGTON und GRÜNBAUM).

Hund (Abb. 134) liegt diese Zone in ihrem medialen Teil, d. h. zu beiden Seiten der Fissura longitudinalis cerebri, im Gyrus sigmoideus posterior hinter dem Sulcus cruciatus, weiter lateral nimmt sie auch den Gyrus sigmoideus anterior und den Gyrus coronalis ein. Bei dem Affen ist der hauptsächlichste erregbare Bezirk die Gegend des Sulcus centralis Rolandi; bei den Anthropoiden (Schimpanse) (Abb. 135, auch Abb. 136)

Ferner kann man von der Extremitätenregion aus eine starke Blutdrucksteigerung erzeugen.

Abseits von der motorischen Hauptzone befindet sich im Frontalhirn jederseits ein präzentrales Blickzentrum, von dem aus man Bewegung der Augen nach der Gegenseite und Pupillenerweiterung erregen kann, im Okzipitalhirn und seitlich bis in den Gyrus angularis hinein ein okzipitales Blickzentrum, auf dessen Reizung ebenfalls Augen, Kopf, Lider und Pupillen reagieren, und endlich im Temporalhirn ein Zentrum, dessen Reizung von Bewegungen des Ohrs gefolgt ist.

Von großer Bedeutung ist es, daß alle diese Zentra nicht bloß elektrisch, sondern auch mechanisch, chemisch, osmotisch, in Krankheiten auch durch entzündliche Prozesse, also wohl eine Kombination dieser verschiedenen Reize, in Gang gesetzt werden können. Die physiologische Erregung geschieht jedenfalls von afferenten Fasern aus, deren es, wie die mikroskopischen Bilder lehren, in jedem winzigen Rindenabschnitt eine ungeheure Anzahl gibt. Die wichtigsten afferenten Fasern für die Foci im Gyrus praecentralis, also für die Zentra fast sämtlicher Skelettmuskeln, sind Assoziationsfasern vom Gyrus postcentralis her, welcher, wie vorgreifend bemerkt sei, der Einstrahlungsort für die rezeptorischen Leitungen der Haut, Muskeln, Sehnen und Gelenke darstellt. Daher kommt es, daß man bei den Anthropoiden durch etwas stärkere Reizung auch vom Gyrus postcentralis aus Bewegungen in den einzelnen Körperteilen hervorrufen kann, und daß an sich unwirksame Reize, welche man im Gyrus praecentralis anbringt, durch ebenfalls an sich unwirksame Reize im Gyrus postcentralis über die Reizschwelle gehoben werden können (SHERRINGTON und GRÜNBAUM); dies ist also eine Art Bahnung.

Die Effekte der Reizung im Gebiet der erregbaren Zonen sind nun durch eine Anzahl von Eigentümlichkeiten charakterisiert: 1. *Die durch künstliche Reizung von der Hirnrinde ausgelösten Bewegungen sind nicht Zuckungen einzelner Muskeln, sondern sind Bewegungen von Muskelkombinationen, welche den natürlichen willkürlichen Bewegungen entsprechen*, also z. B. Beugung oder Streckung im Schulter- oder Fußgelenk, auch verbunden mit Abduktion, Adduktion oder Rotation, oder rhythmisches Kauen. Die Imitation der natürlichen Bewegungsformen äußert sich besonders auch in der *reziproken Innervation der Antagonisten*. Wie wir früher bei den Rückenmarksreflexen erfahren haben, geht häufig mit der Kontraktion eines Muskels die Entspannung seiner Antagonisten durch Tonushemmung Hand in Hand (siehe S. 347); so auch hier. SHERRINGTON durchschnitt z. B. den linken Okulomotorius und Trochlearis; reizt man alsdann denjenigen Rindenort, von dem aus normalerweise ein Blicken beider Augen nach rechts auszulösen ist, so geht nicht bloß das rechte Auge nach rechts, sondern auch das linke; da aber im linken Auge diejenigen Muskeln, welche eine Rechtsbewegung erzeugen können, gelähmt sind, so kann die Rechtsbewegung allein auf eine Tonushemmung im linken M. rectus lateralis zurückgeführt werden. BETHE untersuchte Armamputierte, die mit Hilfe der (nach SAUERBRUCH)

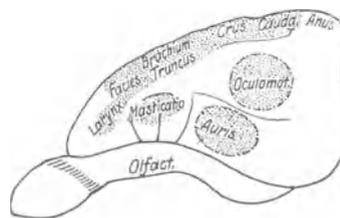


Abb. 141. Motorische Zentra auf der linken Großhirnhemisphäre des Kaninchens (nach FERRIER und MANN).

isolierten Muskelwülste ihres Oberarmstumpfs das Ersatzglied bewegen. Auch hier war festzustellen, daß bei jeder Armbeugung mit dem Beugerwulst der Streckerwulst erschlaffte und umgekehrt (s. Abb. 142).

2. *Die Organisationshöhe eines Tieres dokumentiert sich in der Differenziertheit der Rindenzentra.* Vergleicht man z. B. die Schemata, in welchen die motorischen Zentra für Hund und Affe eingetragen sind (Abb. 134 und 135), so sieht man, daß in der Extremitätenregion des Affen viel mehr Foci für Einzelbewegungen angegeben sind, als beim Hund.

3. Höchst auffallend ist, daß *die von einem Zentrum ausgelöste Bewegung im allgemeinen kontralateral erfolgt.* Die Ursache dafür ist natürlich die früher (S. 361ff.) erwähnte Kreuzung der Bahnen. Als wichtigste kortikofugale Bahn der höheren Säugetiere lernten wir die Pyramidenbahn kennen (S. 361); sie entspringt in der vorderen Zentralwindung aus den allein in dieser (nicht auch in der hinteren Zentralwindung) vorkommenden Riesenpyramidenzellen, in der Medulla oblongata erfährt sie ihre bekannte Hauptkreuzung. Die zweitwichtigste motorische Bahn ist der Tractus rubrospinalis (siehe S. 361), welcher vom roten Haubenkern aus an die motorische Rinde angeschlossen ist; auch seine Fasern kreuzen.

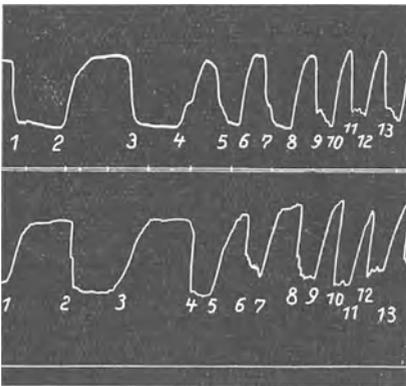


Abb. 142. Reziproke Innervation der Antagonisten. Oben Strecker-, unten Beugerkontraktion; die Zahlen geben das in verschiedenem Tempo erteilte Kommando „Beugen“, „Strecken“ an (nach BERTHE und KAST).

Die kontralaterale Innervation ist aber nicht die einzige. Namentlich die für gewöhnlich bilateral in Tätigkeit gesetzten Organe, wie Zunge, Kiefer, Rachen, Kehlkopf, Augen, werden auch von einer Hemisphäre aus leicht bilateral bewegt. Es gibt aber allgemein neben der kontralateralen auch eine homolaterale Innervation von der Rinde aus, die sich

durch stärkere Reizung demonstrieren läßt, und die besonders auffällig ist, wenn man vorher die andere Hemisphäre exstirpiert hat.

4. *Übersteigt die Reizstärke ein gewisses Maß, dann treten an die Stelle der gewöhnlichen Bewegungseffekte Krämpfe* von klonischer Natur, d. h. Schüttelkrämpfe wie bei der Epilepsie. Diese Krämpfe beginnen stets in der dem Reizort zugeordneten Muskelpartie der gekreuzten Seite, um sich von da aus weiter auszubreiten, und zwar greift die Erregung in der Rinde von einem Zentrum auf die nächst benachbarten über, nie wird ein Zentrum übersprungen. Die Vermittlung von Zentrum zu Zentrum geschieht durch kurze Assoziationsfasern; daher kann man durch Umschneidung des gereizten Zentrums den Krampf lokalisieren. Diese Verhältnisse sind besonders interessant vom Standpunkt der menschlichen Pathologie, weil sie eine Nachahmung der JACKSONSchen *Rindenepilepsie* (siehe S. 385) darstellen.

Schon FRITSCH und HIRZIG stellten sich die Frage, ob die mit ihrer Methode entdeckten Foci wirklich die Orte sind, von denen auch unter natürlichen Verhältnissen die Erregungen zu den betreffenden Muskel-

gruppen ausgehen, und ob nicht vielleicht Stromschleifen, welche in die Tiefe des Gehirns abirren, die Reizeffekte bedingen, und sie beantworteten ihre Frage durch das nahe liegende Experiment, den mit den Elektroden abgegrenzten Fokus der grauen Rinde auszuschneiden; diese **Exstirpationsversuche** lehrten, daß dieselbe Funktion, welche vorher durch den künstlichen Reiz wachgerufen war, nun bei dem Tier gestört oder sogar aufgehoben ist. Nach Wegnahme des Armzentrums wird also die Bewegung des Arms gelähmt, nach Exstirpation des Kehlkopfzentrums die des Kehlkopfs usw. Einer eleganteren Methode der Rindenausschaltung bediente sich W. TRENDELENBURG; er befestigte im Schädeldach von Affen kleine gebogene Metallrohre, deren Biegung einen bestimmten Rindenbezirk berührte. Leitet man nun plötzlich durch solch ein Rohr eiskaltes Wasser, so wird der betreffende Rindenteil außer Funktion gesetzt, und die zugehörige Muskulatur, die eben noch für Bewegungen gebraucht wurde, erlahmt, um alsbald wieder aktionsfähig zu werden, wenn der Eiswasserstrom unterbrochen wird. Aber auch nach der Exstirpation kann sich merkwürdigerweise mit der Zeit die Störung einigermaßen wieder verlieren. Bis zu welchem Grad dies geschieht, ist vor allem abhängig von der Art des operierten Tiers. Beim Hund kommt die Restitution ziemlich leicht zustande, schwerer beim Affen und hier wieder schwerer beim Anthropoiden als beim niederen Affen, und am unvollkommensten restituiert das menschliche Gehirn.

Über die Möglichkeiten, die *Restitutionserscheinungen* zu deuten, ist viel gestritten worden. Wenn nach einem herdförmigen Insult der Rinde zunächst ein großer Teil der Körpermuskulatur auf der gegenüberliegenden Seite gelähmt ist und nun im Laufe der nächsten Wochen die Lähmungen mehr und mehr zurückgehen, so daß schließlich nur eine wenig umfangreiche Motilitätsstörung übrigbleibt, so kann dies erstens darauf beruhen, daß durch Quetschungen, Zirkulationsänderungen, entzündliche Prozesse in der Umgebung der eigentlich verletzten Stelle ein größerer Rindenbezirk funktionsunfähig wird, daß aber mit dem allmählichen Schwinden dieser *Schockerscheinungen* die eigentlichen von der Läsion herrührenden *Ausfallerscheinungen* manifest werden, welche dann allein übrig bleiben. Nach einer ganz anderen Deutung kommt die Restitution so zustande, daß nach Wegfall eines Rindenteils andere Teile vikariierend eintreten, wofür in der außerordentlichen Reichhaltigkeit an einander durchflechtenden Nervenfasern mit einer fast unbegrenzten Assoziationsmöglichkeit eine genügende anatomische Basis gegeben zu sein scheint; man hat zur Erklärung der Kompensationsvorgänge geradezu von einem *Wandern der Zentra* gesprochen.

Beide Deutungen können richtig sein. Wenn z. B. ein Infektionsherd in der Rinde die Ursache einer Lähmung ist, so läßt sich leicht zeigen, daß die Größe der Lähmung jedenfalls zum Teil von der akzessorischen Schädigung der den Herd umgebenden Rindenpartien durch die Infektion herrührt; denn wenn man den Infektionsherd dadurch beseitigt, daß man das betreffende Rindenstückchen exzidiert, so wird dadurch der gelähmte Bezirk nicht vergrößert, sondern im Gegenteil verkleinert, offenbar weil die Entzündungserscheinungen in der Umgebung des Herdes nunmehr rasch schwinden (MALINOWSKY). Seit man gelernt hat, unter möglichster Schonung der Gehirnssubstanz mit glatten Schnitten und streng aseptisch zu operieren, haben auch die von vornherein auftretenden Ausfallerscheinungen an Umfänglichkeit stark eingebüßt,

Daß aber *Rindenbezirke auch neue Funktionen übernehmen, sogar völlig „umlernen“* und eine Funktion, welche bis dahin an einen anderen Rindenteil gebunden war, ausüben können, das ist besonders durch neuere Erfahrungen der Chirurgen wahrscheinlich geworden. Daß man dabei mit Recht von einem Umlernen spricht, beweist die vielfältig vom Arzt zu konstatierende Tatsache, daß eine Lähmung, z. B. nach einer Rindenblutung, durch systematische Übungen des Patienten eventuell noch nach Jahren mehr oder weniger beseitigt werden kann. Was nun die neueren Erfahrungen der Chirurgen anlangt, so handelt es sich erstens darum, daß, wenn z. B. infolge der als „Kinderlähmung“ bekannten Erkrankung des Rückenmarks die Beuger des Unterschenkels total gelähmt sind, man einen Teil der Streckmuskulatur auf die Beugeseite verlagern und durch Transplantation ihrer Sehnen auf der Beugeseite befestigen und nun durch lang anhaltende Übung es erreichen kann, daß die ehemaligen Strecker zwanglos als Beuger benutzt werden. Noch anschaulicher ist folgendes Verfahren, bei welchem es sich nicht um Muskel-, sondern um Nervenverpflanzung handelt: ist aus irgend einem Grund der Fazialis gelähmt und degeneriert, so pflöpft man den Akzessorius oder einen Akzessoriusast auf den peripheren Fazialis; die Fasern des Akzessorius wachsen dann in den bindegewebigen Scheiden des degenerierten Fazialis peripherwärts aus, bis sie die vom Fazialis innervierte Muskulatur erreicht und sich mit ihr vereinigt haben. Will der Patient jetzt die Schulter bewegen, so verzieht sich sein Gesicht; durch Übung kann er es aber allmählich erreichen, daß er ganz von selbst wieder seine mimischen Muskeln mehr oder weniger gut beherrscht. Noch mehr empfohlen wird die Pflöpfung des Hypoglossus auf den Fazialis; da die Zunge von beiden Seiten innerviert wird, so wird infolgedessen das Kauen und Sprechen nur wenig gestört, obwohl die eine Zungenhälfte atrophiert. Für diesen Verlust tauscht der Patient den Vorteil ein, daß seine starren Züge sich wieder beleben. Freilich wird das Sprechen öfter in lästiger Weise von Mitbewegungen des Gesichts begleitet; aber Übung hilft dabei viel. Endlich seien die interessanten Angaben von MARINA erwähnt, welcher bei Affen Augenmuskeln miteinander vertauschte, indem er sie am Bulbus löste und dann an den Insertionsstellen anderer Muskeln wieder annähte; löst man z. B. den vom Okulomotorius versorgten M. rectus medialis und heftet statt seiner den vom Trochlearis innervierten M. obliquus superior an, so lernt der M. obliquus superior schon nach 3—4 Tagen als Konvergenzmuskel fungieren, und seine Kontraktion assoziiert sich in der gleichen Zeit auch mit derjenigen des M. sphincter iridis, so daß wie gewöhnlich (siehe Kap. 28) Konvergenz und Pupillenverengung Hand in Hand gehen. In allen diesen Fällen muß eine völlige Neuprägung in den Assoziationen verschiedener Hirnteile, die „Ausschleifung“ neuer Bahnen (siehe S. 381) zustande kommen.

Was geschieht nun, wenn *die ganze motorische Zone einer Hemisphäre entfernt* wird? Dies Experiment ist besonders beim Hund häufig ausgeführt worden (HIRZIG, H. MUNK, GOLTZ u. a.). Es zeigt sich, daß unmittelbar nach der Operation das Tier auf der Gegenseite schwer geschädigt, aber nicht total gelähmt ist. Es vermag mühsam zu gehen, fällt aber leicht durch Einknicken der Beine nach der Gegenseite um; auch die Gesichtsmuskulatur der Gegenseite wird kaum bewegt. In wenigen Tagen ändert sich jedoch das Bild; die Bewegungsstörungen gleichen sich so weit aus, daß der unbefangene Beobachter zunächst gar keine

Abweichungen von der Norm bemerkt; der Hund kann stehen, gehen, laufen, springen. Erst das eingehende Studium weist erhebliche Veränderungen auf. Der Gang ist auf der Gegenseite etwas schleudernd; sobald man das Tier in etwas schwierige Situationen bringt, benimmt es sich ungeschickt und hilflos; so zieht es, wenn sich plötzlich unter einem Bein der Gegenseite eine Falltür öffnet, das Bein nicht geschickt heraus; bringt man es in irgend eine abnorme Lage, so bleibt es hilflos liegen und findet sich nur mehr zufällig daraus heraus; stellt man es auf den Tisch, so zögert es herunterzuspringen, oder wenn es springt, so fällt es krachend auf den Boden, indem die Beine nicht genügend gesteuert werden.

All dies beruht nicht allein auf dem Vorhandensein von Motilitätsstörungen, sondern, wie wir gleich sehen werden, auch auf Sensibilitätsstörungen, und mit dieser Feststellung stoßen wir zum ersten Mal auch auf ein Symptom von **Lokalisation der Sensibilität**. Diese Lokalisation ist bei Tieren nicht ganz leicht vorzunehmen. Man ist darauf angewiesen, festzustellen, wo sich nach einer Exstirpation in der Rinde Störungen der Oberflächen- oder Tiefensensibilität am Körper finden. Ein anderes weit schonenderes Verfahren besteht in der Bepinselung der Rinde mit Strychnin, in deren Folge eine starke Hyperästhesie in bestimmten Hautarealen je nach dem Ort der Bepinselung auftritt; Reizung der hyperästhetischen Zone führt alsdann zu Krämpfen, die lokal in der zugehörigen Muskulatur ausbrechen und dann nach Art eines epileptischen Anfalls den ganzen Körper befallen (DUSSEY DE BARENNE, AMANTEA). Beim Hund fällt nun die psychomotorische Zone mit der *psychosensorischen Zone* oder sogenannten **Körperfühlsphäre** (H. MUNK) zusammen, welche die Projektion der rezeptorischen Nervenendigungen der Haut, der Muskeln, der Sehnen, der Gelenke repräsentiert. Bringt man bei einem Tier, dessen motorische Zone entfernt ist, z. B. an der Haut der Gegenseite irgendwo eine Klemme an, so läuft der Hund, davon gepeinigt, unruhig umher, aber es fällt ihm nicht ein, durch eine wohlgezielte Bewegung mit der Pfote die Klemme abzustreifen (GOLTZ); oder er setzt beim Stehen den einen Fuß verkehrt, mit der Sohle nach oben, auf den Boden und korrigiert seine falsche Stellung nicht, oder er rutscht beim Laufen viel leichter aus als sonst. Auch der schon erwähnte ataktische Gang ist ein deutliches Symptom von Sensibilitätsstörung (siehe S. 350).

Sind nach dem eben Gesagten die gröberen der hauptsächlich der Lokomotion dienenden Körperbewegungen, die sogenannten *Gemeinschaftsbewegungen*, nach der Wegnahme der motorischen Zone relativ gut erhalten, so verhält es sich ganz anders mit den *Einzelbewegungen*, bei welchen eine isolierte Muskelgruppe zu einem Spezialzweck in Gang gesetzt wird. Z. B. reicht der Hund auf der Gegenseite nicht mehr die Pfote, es gelingt ihm nicht mehr, ein Stück Fleisch, das vor ihm vergraben ist, auszuscharren oder einen Knochen zum Benagen zwischen den Vorderpfoten festzuhalten, er kann nicht mehr über eine quer gespannte Schnur herübersteigen und dergleichen (GOLTZ).

Selbst wenn man *bei einem Hund beide motorische Zonen exstirpiert*, bleiben die Gemeinschaftsbewegungen einigermaßen erhalten, wenn auch der Grad der Unbeholfenheit noch größer ist, als bei einseitiger Wegnahme. Das Fressen stößt auf die größten Schwierigkeiten; der Hund benimmt sich dabei höchst ungeschickt, es gelingt ihm nur mit Mühe, einen Knochen zu erfassen oder ein Stück Fleisch, das ihm vor-

gehalten wird, zu erschnappen. Die Einzelbewegungen sind fast unmöglich geworden; der Hund lernt es nie wieder, die Pfote zu geben (H. MUNK, BECHTEREW).

Nicht viel anders verhalten sich *die niederen Affen nach Wegnahme der einen motorischen Zone*. KARPLUS und KREIDL haben bei Makakus eine ganze Hemisphäre entfernt und dabei auch das Corpus striatum und den Thalamus opticus zum Teil mitzerstört und gesehen, daß erstaunlicherweise die Tiere schon wenige Stunden nach der Operation aufrecht dasitzen und fressen. Anfangs ist allerdings die Motilität und Sensibilität auf der kontralateralen Seite sehr beeinträchtigt; aber schon nach 3 bis 4 Wochen ist für den flüchtigen Beobachter auch hier das Verhalten anscheinend normal. Die charakteristischen Gemeinschaftsbewegungen des Laufens und Kletterns sind fast ungestört, insbesondere werden dabei beide Hände und Füße benutzt. Freilich zeigt sich, daß die Gitterstäbe des Käfigs nicht immer richtig von sämtlichen Fingern umgriffen werden, oder daß der Affe beim Laufen über eine Leiter zwischen die Sprossen fährt (GOLTZ). Ferner bevorzugt er die homolaterale Hand, wenn eine Frucht zu ergreifen ist, wenn er sich laust und dergleichen. Immerhin läßt sich durch geduldige Dressur erzwingen, daß der Affe schließlich ein Stück Zucker stets mit der kontralateralen Hand ergreift; charakteristischerweise verzehrt er es dann aber nicht mit derselben Hand, sondern er öffnet mit der gesunden Hand die geschädigte wie eine Zuckerdose und holt sich das Stück Zucker heraus (GOLTZ).

Die Restitutionsfähigkeit ist danach also auch bei den Affen recht groß. Immerhin ist zu sagen, daß, wenn in der motorischen Zone partielle Exstirpationen vorgenommen sind, in den Einzelbewegungen deutlichere und dauerhaftere Störungen übrigzubleiben pflegen als beim Hund.

Dies gilt in noch weit ausgesprochenerem Maß, wenn wir uns nun den *Ausfallerscheinungen beim Menschen* zuwenden. Freilich ist dabei von vornherein zu berücksichtigen, daß diese Ausfallerscheinungen in den meisten Fällen von krankhaften Prozessen im Gehirn, von Blutungen, Geschwülsten, Abszessen und dergleichen herrühren. Aber auch da, wo sie durch glatte Rindenexzisionen veranlaßt sind, sind sie gewöhnlich nachhaltiger, als bei irgend einem Tier. Der Unterschied ist besonders auffallend in der Richtung, daß beim Menschen *auch die Gemeinschaftsbewegungen schwer geschädigt* werden; die Extremitäten geraten in einen lang anhaltenden Zustand schlaffer Lähmung, und wenn später eine gewisse Restitution einsetzt, so ist charakteristisch eine auffallende Kontrakturstellung („spastische Parese“) der Gliedmaßen. Im allgemeinen werden die Arme stärker betroffen als die Beine und diese wieder stärker als der Rumpf. Die Einzelbewegungen sind natürlich noch stärker gestört als die Gemeinschaftsbewegungen; können z. B. alle Finger noch ganz gut gestreckt werden, so mißlingt der Versuch, einen einzelnen Finger für sich zu bewegen; glückt eine Kniebeuge, so bekommt es der Patient nicht fertig, allein das Knie oder allein die Hüfte zu beugen. Zu den Kennzeichen herdförmiger Gehirnaffektionen beim Menschen gehört auch eine Veränderung der Reflexe. Die Hautreflexe, z. B. der Bauchdecken-, der Plantar-, und der Mamillarreflex (siehe S. 342), sind meistens erloschen; die Sehnenreflexe (S. 343) sind dagegen häufig gesteigert.

Fast stets gehört zu den Herderscheinungen beim Menschen auch eine *Störung der Sensibilität*; sie ist schwächer, wenn der Herd in der vorderen, als wenn er in der hinteren Zentralwindung sitzt. Sie äußert sich in einer Herabsetzung oder Aufhebung der Berührungsempfindlichkeit der Haut und der Tiefenempfindlichkeit der Muskeln, Sehnen und Gelenke. Daher kann sich der Patient allein durch das Gefühl über die Lage seiner Körperteile zueinander nicht orientieren und vermag die Formen von Körpern durch Betasten und Umgreifen nicht zu erkennen. Manchmal findet man das Symptom der *Allocheirie*, d. h. die Angabe, daß ein Hautreiz nicht an der Stelle verspürt wird, an der er ansetzt, sondern an der symmetrischen Stelle der gegenüberliegenden Körperseite. Dies ist wohl so zu erklären, daß, wenn die für gewöhnlich bevorzugte zentripetale Leitung zur gegenseitigen Hemisphäre verlegt ist, das homolaterale Zentrum erregt und die Empfindung auf dessen Gegenseite projiziert wird. Endlich gehören zu den sensiblen Ausfallserscheinungen *ataktische Bewegungen*.

Auch über die *Vertretung der übrigen Sinnesorgane in der Rinde* ist man teils durch Tierexperimente, teils durch klinische Beobachtungen unterrichtet. Naturgemäß leiden die Ergebnisse der Experimente an weit größerer Unsicherheit, als wenn es sich um die Lokalisation der Motilität handelt; denn da die Tiere nichts aussagen können, so ist man darauf angewiesen, aus ihrer Reaktionsweise auf die größere oder geringere Einengung ihrer Rezeptivität zu schließen.

Die Funktion des Sehens ist an das Okzipitalhirn gebunden. Beim Menschen erstreckt sich die **Sehsphäre** auf die Umgebung der Fissura calcarina, auf den Cuneus und die obere Partie des Gyrus lingualis (siehe Abb. 143) und greift auch auf die Konvexität der Hemisphäre über. Wird dieser Teil beidseitig zerstört, so kommt es bei Tier und Mensch zur sogenannten *Rindenblindheit* (H. MUNK); darunter ist eine Blindheit zu verstehen, bei welcher ein eigentliches Sehen nicht mehr möglich ist, bei welcher aber der Pupillen- und auch der Blinzelreflex noch ausgelöst werden kann. Manchmal ist Rindenblindheit auch die Folge einer Verletzung im Gyrus angularis (Abb. 139); die Ursache ist eine Mitverletzung der GRATIOLET'schen Sehstrahlung, welche vom Thalamus und vom Corpus geniculatum laterale her zur Calcarinarinde aufsteigt (siehe Abb. 143).

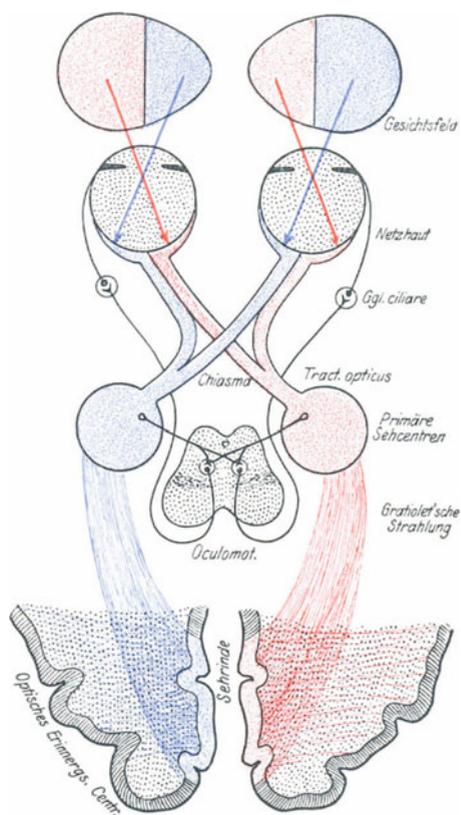


Abb. 143. Verlauf der Sehbahnen beim Menschen (nach BING).

Wird nur eine Sehsphäre zerstört, dann kommt es zu *Hemianopsie*, d. h. zu einem Ausfall des Gesichtsfeldes der Gegenseite. Die Störung beruht auf der Kreuzung der Optikusfasern und bedeutet je nach der Art des befallenen Tiers für die beiden Augen einen verschiedenen Grad der Störung. Beim Hund kreuzen die nasalen Dreiviertel der Optikusfasern, und nur das temporale Viertel zieht ungekreuzt zur gleichseitigen Hemisphäre. Die Folge davon ist, daß nach Zerstörung einer Sehsphäre das kontralaterale Auge fast blind ist, bis auf einen kleinen nasalen Bezirk seines Gesichtsfeldes, von welchem aus Strahlen auf das temporale Viertel seiner Netzhaut fallen; umgekehrt ist das homolaterale Auge sehend bis auf einen entsprechend kleinen nasalen Gesichtsfelddefekt. Bei Affen und Menschen dagegen sind die beiden ganzen linken Netzhauthälften in der linken, die ganzen rechten Netzhauthälften in der rechten Hemisphäre vertreten (H. MUNK) (siehe Abb. 143); einseitiger Ausfall der Sehsphäre bedingt daher Unfähigkeit, mit den homonymen Netzhauthälften zu sehen, man spricht von *homonymer lateraler Hemianopsie*. Wir werden später (siehe Kap. 30) erfahren, daß diese Verschiedenartigkeit in der Verteilung der Optikusfasern auf die beiden Netzhäute davon abhängt, daß die Gesichtsfelder für die beiden Augen in verschiedenem Maß gemeinsam sind.

Die Lokalisation der Netzhauterregungen auf der Sehrinde geschieht nun nicht in der Weise, daß Punkt für Punkt der Netzhaut sozusagen auf die Rindenfläche projiziert ist. Dagegen spricht schon die Tatsache, daß kleine herdförmige Läsionen keine inselförmigen Defekte im Sehfeld, sogenannte Skotome (siehe Kap. 29) verursachen, sondern die nach der Verletzung anfänglich vorhandenen Sehstörungen werden, ähnlich wie in der motorischen Zone, alsbald ausgeglichen. Andererseits kann man eine Projektion auch nicht ganz ablehnen. Beim Hund bewirkt Exstirpation des vorderen Teils der Sehsphäre hauptsächlich einen Defekt im unteren, Exstirpation des hinteren Teils einen Defekt im oberen Gesichtsfeld; der mediale Bezirk des Gesichtsfelds wird durch Verletzung lateral, der laterale durch Verletzung medial ausgelöscht (H. MUNK). In ähnlicher Weise repräsentiert beim Menschen die obere Partie der Calcarinagegend den oberen, die untere den unteren Netzhautquadranten; man beobachtet entsprechende *Quadrantenanopsien*. Insbesondere ist diejenige kleine Stelle der Netzhaut, welche wir zum Sehen hauptsächlich verwenden, die Fovea centralis (siehe Kapitel 29), nicht in einem scharf umgrenzten Rindenbezirk vertreten; im Gegenteil die zugehörige Lokalisation ist offenbar diffus und sogar beidseitig; denn bei Sehrindendefekten bleibt das foveale Sehen am allerlängsten erhalten; selbst bei doppelseitiger ausgedehnter Zerstörung des Calcarinagebiets behalten die Foveae öfter einen Sehrest.

An Stelle der Rindenblindheit ist die Folge von Störungen in der Sehsphäre öfter sogenannte *Seelenblindheit* (H. MUNK). Darunter versteht man die Erscheinung, daß zwar die Dinge noch gesehen, aber in ihrer Eigenart nicht voll erkannt und entsprechend gewertet werden. Ein Hund geht z. B. noch um ein Hindernis herum, aber auf den Anblick seines Herrn oder des Futtertrogs oder der Peitsche reagiert er nicht mehr so wie sonst; oder streut man ihm Trauben und Korkstückchen hin, so frißt er beide gleichmäßig, spuckt die Korkstückchen aber sofort wieder aus (LUCIANI). Die Beobachtung am Menschen lehrt, daß die Seelenblindheit auf einem mehr oder weniger starken Verlust

seines optischen Erinnerungsvermögens beruht; sein taktiles, sein akustisches oder sonst ein Erinnerungsvermögen kann dabei vollständig erhalten sein. Ein Patient findet sich z. B. in seiner eigenen Wohnung oder auf der Straße nicht mehr zurecht, obwohl er beim Herumgehen nirgends anstößt; er erkennt seinen Freund erst, wenn er spricht; mit irgend einem sonst geläufigen Gebrauchsgegenstand weiß er nichts anzufangen, solange er ihn nur sieht; er erkennt seinen Zweck erst, wenn er ihn in die Hand nimmt. Die Störungen durch Seelenblindheit können dabei einen recht verschiedenen Grad haben; manchmal kann die Form und die Farbe der Gegenstände genau beschrieben werden, aber ihre Bedeutung bleibt unverständlich; in anderen Fällen ist „der Farbensinn abgespalten“, über die Farbigekeit können keine Aussagen mehr gemacht werden. Diese Störung kommt gelegentlich als *Hemichromatopsie* auch einseitig vor.

Die Ursache der Seelenblindheit ist gewöhnlich eine doppelte Erkrankung der Sehrinde, insbesondere auf der Konvexität des Okzipitalhirns gegenüber der Calcarinarinde (siehe Abb. 143). Wird der Gyrus angularis befallen, so kommt noch eine besondere Art Seelenblindheit zustande, die *Wortblindheit* oder *Alexie*; dabei geht speziell das Erinnerungsvermögen für die Bedeutung der Schriftzeichen verloren. Der Patient kann nicht mehr lesen, obwohl er die Buchstaben sieht und sie sogar abzuschreiben vermag; sie haben für ihn nur noch Formenwert, keinen Bedeutungsinhalt.

Das Okzipitalhirn ist nicht bloß Einstrahlungsort für die optische Faserung, sondern, wie früher (S. 389) bereits erwähnt wurde, auch Abgangsstelle für *zentrifugale Impulse zu den Augenmuskeln* (siehe Abb. 134 bis 136). Besonders Verletzungen gegen den Gyrus angularis hin verursachen Störungen in den Augenbewegungen, ferner auch Störungen in der *Tiefenwahrnehmung*, so daß sowohl Affen wie Menschen zu kurz oder zu weit greifen (H. MUNK).

Wie die Sehsphäre, so ist auch die **Hörsphäre** bei Tier und Mensch in den beiden Gehirnhälften korrespondierend gelagert, nämlich im Temporalhirn, vor allem in der ersten Temporalwindung (H. MUNK, FERRIER). Sie ist der Einstrahlungsort für die vom Corpus geniculatum mediale herkommende Hörstrahlung (VON MONAKOW). Werden bei einem Hund beide Hörzentren zerstört, so tritt völlige Taubheit (*Rindentaubheit*) ein, während deren nicht einmal mehr die akustischen Reflexe, Ohrbewegungen oder Heben des Kopfes, ausgelöst werden können, welche beim total großhirnlosen Tier (Hund und Affe) noch erhalten sind (siehe S. 382 und 383). Wird die Zerstörung nur einseitig ausgeführt, so zeigt sich das Gehör zunächst auf der Gegenseite stark beeinträchtigt; allmählich nimmt jedoch die Hörfähigkeit wieder zu, woraus zu schließen ist, daß jedes Ohr in beiden Hemisphären vertreten ist (LUCIANI). Anscheinend ist die Perzeptionsfähigkeit für höhere Töne beim Hund an die vorderen, die für tiefere Töne an die hinteren Partien der Hörinde gebunden (H. MUNK). Wird das Temporalhirn nur partiell zerstört, so resultiert eine der Seelenblindheit analoge *Seelentaubheit*, d. h. das Tier reagiert noch auf Schall, aber es macht durch keinerlei individuelle Reaktionen kenntlich, daß es die Bedeutung eines Anrufs, eines Peitschenknalls oder dergleichen begriffen hat (H. MUNK).

Ganz ähnlich wie beim Tier liegen die Verhältnisse beim Menschen, auch hier ist eine Rinden- und eine Seelentaubheit zu unterscheiden.

Eine Lokalisation bestimmter Tonhöhen an bestimmte Orte hat sich nicht sicher feststellen lassen. Die Seelentaubheit des Menschen äußert sich besonders auffallend in der sogenannten *Worttaubheit*, dem Gegenstück zur Wortblindheit; der Patient hört noch das gesprochene Wort, aber so wie irgend ein Geräusch, das Verständnis für die Sprache ist ihm abhanden gekommen (siehe dazu auch S. 401). Auch *Tontaubheit*, *sensorische Amusie*, eine Unfähigkeit, Tonhöhen wie sonst zu unterscheiden, kommt vor, oder bestimmte Geräusche, wie das Rollen eines Wagens, das Rasseln der Straßenbahn, werden nicht mehr erkannt.

Was endlich die **Lokalisation des Geruchs und des Geschmacks** anlangt, so ist darüber kaum etwas Bestimmtes bekannt. Nach den anatomischen Untersuchungen ist die Riechsphäre in die Gegend des Gyrus hippocampi und des Cornu Ammonis zu verlegen; physiologische und klinische Erfahrungen stellen dies jedoch keineswegs sicher. Die Schmecksphäre wird von manchen in die Gegend des Riechzentrums lokalisiert, von anderen dagegen in den Bereich der Zentra für die Mund- und Kieferbewegungen. —

Was wir nun bis hierher an Rindenzentra kennen gelernt haben, das läßt sich in der Hauptsache unter den Begriff der *Primärzentra* zusammenfassen, wenn darunter solche Zentra verstanden werden, welche als Orte der Einstrahlung sensorischer Nervenfasern oder der Ausstrahlung motorischer Nervenfasern mit dem Körper, seinen Sinnesorganen und seinen Muskeln in direkter Verbindung stehen. Ziehen wir dazu die Tatsache in Rechnung, daß die Sinneszentra und die motorischen Zentra unter sich durch Assoziationsfasern verbunden sind, so haben wir schon ein gewisses Verständnis für die Funktionen des Großhirns erlangt. Auch manche Befunde, welche dem hier gezeichneten relativ einfachen Bild von der Lokalisation der Gehirnfunktionen durchaus zunächst zu widersprechen scheinen, werden uns begreiflicher, sobald wir die interzentralen Verknüpfungen beachten. So gelangen neben den „Schulfällen“ immer wieder in der Klinik Fälle zur Beobachtung, in denen eine beschränkte Verletzung an einer Stelle des Gehirns von unverhältnismäßig schweren Störungen gefolgt ist, welche den Ausfall mehrerer weit von der eigentlichen Verletzungsstelle entfernt gelegener Zentra vortäuschen. Diese „Fernwirkungen“ beruhen häufig unzweifelhaft darauf, daß wichtige Verbindungsbahnen zwischen weit auseinander liegenden Rindengebieten zerstört wurden. Das Vorhandensein solcher Bahnen erklärt wohl auch eine interessante Beobachtung von EWALD: Einem Hund wurden ins Schädeldach an mehreren Stellen Elektroden eingeschraubt, mit Hilfe deren die Gehirnrinde bald da, bald dort erregt werden konnte der Hund wurde nun an den zu den Elektroden führenden Leitungsdrähten wie an einer Leine geführt und konnte, während er „ahnungslos“ umherlief, gereizt werden. Es zeigte sich, daß dieser oder jener Körperteil keineswegs nur dann eine Reizbewegung ausführte, wenn das zugehörige typische Zentrum von dem elektrischen Schlag getroffen wurde, sondern daß mitten aus der Sehsphäre gelegentlich Bewegungen des Vorderbeins, mitten aus der Hörsphäre Kieferbewegungen auszulösen waren, daß öfter auch statt der Gegenseite die Gleichseite auf den Reiz ansprach. Der Effekt wechselte bemerkenswerterweise namentlich auch je nachdem, was für eine Haltung das Tier im Reizmoment gerade eingenommen hatte. Man muß sich diese Verhältnisse wohl so erklären, daß in dem komplizierten Flechtwerk von Assoziations-

fasern, welche die verschiedenen Hirnteile untereinander verbinden, je nach dem augenblicklichen Erregungszustand des Gehirns bald dieser, bald jener Weg besser gebahnt ist.

Würde sich nun das Großhirn bloß aus den Primärzentra und den sie verknüpfenden Bahnen zusammensetzen, so wäre es nicht anders aufzufassen, als wie ein kompliziertes Gefüge von Reflexbogen, prinzipiell ebenso organisiert wie das Rückenmark. Aber ein Blick auf das Bild eines Gehirns, auf dessen Oberfläche die Primärzentra eingezeichnet sind (siehe Abb. 134—138), weckt in uns die Frage, welche Aufgabe alle diejenigen großen Rindengebiete zu erfüllen haben, welche von Primärzentra nicht besetzt sind, und hinzu kommt die früher (S. 381) erörterte Feststellung, daß erst der Besitz des Gehirns vielen Tieren die Fähigkeit verleiht, Erfahrungen zu sammeln und dadurch zu lernen, so daß sie sich nicht mehr wie Automaten oder wie Reflexapparate verhalten, welche auf Grund angeborener fester nervöser Verknüpfungen reagieren; die zugrunde liegenden materiellen Eigenschaften der Gehirnssubstanz bezeichneten wir bildlich als „Plastizität“. Inzwischen haben wir nun mehrmals konstatiert, daß die Erfahrungen offenbar mit Hilfe besonderer Rindenanteile gesammelt werden, daß an diesen also sozusagen die Erinnerungsbilder haften: das optische Erinnerungsvermögen ist hauptsächlich an die Konvexität der Okzipitalrinde lateral von der Calcarinagegend gebunden; denn Verlust dieses Gebietes verursacht „Seelenblindheit“; das optische Erinnerungsvermögen speziell für die Schriftzeichen ist in die Gegend des Gyrus angularis zu lokalisieren; denn Herde, welche hier sitzen, erzeugen „Wortblindheit“ oder Alexie; „Seelentaubheit“ resultiert bei beschränkten Verletzungen des Temporalhirns. Wir können daher jetzt schon die Annahme machen, welche durch die weiteren Ausführungen gerechtfertigt werden wird, daß den Primärzentra *Sekundärzentra* übergeordnet sind, welche „im Dienst“ höherer psychischer Funktionen stehen, als es etwa einfache Sinnesempfindungen sind. Was bei der Verletzung dieser sensorischen Sekundärzentra als Ausfallserscheinung entsteht, kann ganz allgemein mit dem Ausdruck *Agnosie*, Mangel an Erkenntnisvermögen, bezeichnet werden. Das Gegenstück zu den sensorischen sind motorische Zentra, in welchen ebenfalls auf Grund von Erfahrung und Übung besondere nervöse Schaltungen gebildet werden können, welche bestimmte Bewegungskombinationen ermöglichen. Die Folgen der Zerstörung dieser Zentra bezeichnet man als *Apraxie* (LIEPMANN), als Unfähigkeit zum „Handeln“, d. h. zur Ausführung ganz bestimmter erlernter Bewegungen. Wir wollen nun die Bedeutung der Sekundärzentra für Gnosis und Praxis zunächst an einem Beispiel kennen lernen, und zwar an dem Beispiel des Sprechens und der **Sprachstörungen durch Rindenläsionen.**

Die *Sprache* ist ein charakteristischer Besitz des Menschen, welcher von jedem einzelnen neu erworben werden muß. Vorbedingung für das Erlernen ist eine Unversehrtheit der Hörfunktion. Zwar kann man bekanntlich auch ohne Gehör das Sprechen lernen, wie die Taubstummen es beweisen; immerhin ist es außerordentlich erschwert. Als Kind lernt nun der Mensch ganz bestimmte Klänge, Wortklänge, mit bestimmten Wahrnehmungen assoziieren; es bilden sich dadurch Vorstellungen, etwa die Vorstellung eines Hundes, einer Biene, einer Rose, welche immer wieder durch die Worte „Hund“, „Biene“, „Rose“ wachgerufen werden

können. Soll nun auf eine Anzahl von Wortklängen hin eine Antwort erteilt werden, soll z. B. die durch das Wort „Rose“ geweckte Vorstellung in ihren Einzelheiten sprachlich beschrieben werden, so müssen dem Sprechenden erstens die Worte im Gedächtnis gegenwärtig sein, welche die Vorstellung „rot“, „duftend“, „stechend“ ausdrücken; zweitens muß er gelernt haben, die beim Sprechen beteiligten zahlreichen Muskeln des Kehlkopfs, des Rachens, der Zunge, der Lippen so fein abgestuft zu innervieren, daß die bestimmten Worte wohl artikuliert herauskommen.

Nach dieser nur oberflächlichen Analyse der Sprechfunktion können wir schon voraussehen, daß ein Verlust des Sprechvermögens, eine **Aphasie**, auf verschiedenen Wegen zustande kommen könnte, nämlich ganz allgemein *entweder durch Störungen in der rezeptiven, speziell akustischen oder durch Störungen in der expressiven motorischen Sphäre*. Wir wollen nun die hauptsächlichsten der wirklich vorkommenden Aphasieformen betrachten, dabei aber vollkommen absehen von denjenigen einfachsten Formen der Aphasie, welche von einer Lähmung der Sprechmuskeln oder von einer richtigen Taubheit herrühren.

Am längsten bekannt ist die sogenannte *motorische oder BROCA'sche Aphasie*. Hier ist das Sprechvermögen vorhanden, obwohl jeder einzelne der am Sprechen beteiligten Muskeln vom Gehirn aus innerviert werden kann, obwohl der Patient zu schlucken, zu kauen, zu pfeifen, zu singen, zu rufen vermag. Er kann weder spontan reden, noch kann er nachsprechen. Dabei versteht er alles, was gesagt wird; will er aber antworten, so bleibt es bei vergeblichen Bemühungen, welche sich oft in auffallenden Bewegungen des Mundes äußern. In manchen Fällen bleiben wohl auch Wort- oder Satzreste erhalten, namentlich Laute, die viel gebraucht und sozusagen reflektorisch erzeugt werden, wie „ja“ oder „nein“ oder ein im Affekt ausgestoßener Fluch. Seltener kommen sogenannte „Paraphasien“ vor, d. h. Wortverstümmelungen, welche das Symptom einer mangelhaften Koordination darstellen; statt Lippe sagt der Patient Lippe, statt Tischler Tilscher (VON STRÜMPPELL).

Häufig geht die Aphasie noch mit *Agraphie* einher, d. h. mit einer Unfähigkeit zu schreiben, obwohl Arm und Hand an sich frei beweglich sind. Weder gelingt das Spontanschreiben noch das Schreiben auf Diktat; häufiger ist der Patient dagegen imstande, etwas, was ihm vorgeschrieben ist, zu kopieren; auch besonders geläufige Worte, wie der Name und der Wohnort, können wohl noch geschrieben werden.

Aphasie und Agraphie sind typische Apraxien. Sie gehen nun fast immer mit einer ganz bestimmt lokalisierten Läsion im Großhirn einher, nämlich, wie schon einmal (S. 385) erwähnt wurde, mit einer Läsion im Fuß der dritten Stirnwindung; dieser Ort ist also das *motorische Sprachzentrum*. Besonders bemerkenswert ist dabei, und wird uns noch später (S. 403) beschäftigen, daß meistens die völlige Sprachlähmung nur dann zustande kommt, wenn die dritte linke Stirnwindung Sitz des Herdes ist; nur Linkshänder — und das sind etwa 5% der Menschheit — werden aphasisch bei einer Verletzung in der rechten Hemisphäre.

Ganz etwas anderes ist die sogenannte *sensorische oder WERNICKE'sche Aphasie*; hier liegt, wie schon der Name besagt, die Störung auf der rezeptiven Seite der „Sprechbahn“. Die sensorische Aphasie ist dadurch charakterisiert, daß der Patient zwar hören, aber nicht verstehen kann, die Wortklänge haben keine Bedeutung mehr für ihn, es assoziieren

sich mit ihnen keine bestimmten Vorstellungen mehr, die Muttersprache klingt wie eine fremde Sprache. Die sensorische Aphasie beruht also auf einer sonderbaren Art von Taubheit, welche zweckmäßig als *Worttaubheit* bezeichnet worden ist (siehe S. 398); sie ist eine typische Agnosie. In manchen Fällen ist eine gewisse Verständigung mit dem Patienten noch dadurch möglich, daß es durch mehrmaliges Vorsagen gelingt, ihm die Worte faßlich zu machen; in anderen Fällen vermag er wenigstens die ersten Worte eines Satzes aufzufassen. Dabei ist die „innere Sprache“ erhalten, d. h. er hat eine Vorstellung von dem Wortklang an sich und von seiner Bedeutung, so daß er imstande ist, spontan zu sprechen. Aber da die von ihm produzierten Worte wegen der Worttaubheit nicht der richtigen Kontrolle unterliegen, so kommt es oft zu paraphasischem Sprechen, bei welchem die Worte bis zur Unverständlichkeit verstümmelt sein können. Charakteristisch ist auch, im Gegensatz zur motorischen Aphasie, eine oft außerordentliche Redseligkeit, die mit dem prägnanten Ausdruck *Logorrhöe* bezeichnet worden ist.

Wie die motorische Aphasie mit der Agraphie, so ist die sensorische Aphasie häufig mit *Alexie* oder *Schriftblindheit* vergesellschaftet. Dies Unvermögen, speziell Schriftzeichen zu erkennen, kann ganz unabhängig von der sonstigen Seelenblindheit (siehe S. 396) vorkommen.

Die sensorische Aphasie kommt dadurch zustande, daß die erste Schläfenwindung, besonders in ihrem hinteren Gebiet, erkrankt; dort befindet sich also ein *sensorisches Sprachzentrum*. Bei Rechtshändern sitzt der Herd stets links, eine Erkrankung rechts verläuft bei den Rechtshändern fast symptomlos. Während die Aphasie bei Verletzung des motorischen Sprachzentrums oft permanent wird, restituiert die Sprechfunktion relativ leicht bei Verletzung des sensorischen Sprachzentrums. Alexie stellt sich in der Regel dann ein, wenn auch die Rinde hinter der ersten Schläfenwindung im Gyrus angularis erkrankt.

Eine dritte Form von Aphasie kommt dadurch zustande, daß der Patient zwar hört und das Gehörte versteht, daß ihm aber, wenn er antworten will, die notwendigen Worte nicht einfallen. Der Patient verhält sich also ähnlich, wie jemand, der sich vergeblich auf ein bestimmtes Wort besinnt, das ihm momentan aus dem Gedächtnis geschwunden ist. Man spricht deshalb von *amnestischer Aphasie* oder von *Amnesie*, auf deutsch Vergeßlichkeit. Sucht man dem Patienten beizuspringen, indem man ihm eine Anzahl für seine Antwort in Betracht kommender Worte vorsagt, so findet er das passende Wort heraus. In Fällen unvollständiger Amnesie macht der Patient häufig den Versuch, ein fehlendes Wort weitläufig zu umschreiben, oder es kommt vor, daß er oft nur die Anfangsbuchstaben der Worte im Gedächtnis behalten hat, oder es sind nur gut eingelernte Wortreihen übriggeblieben, wie die Zahlen oder die Wochentage, die er wohl vorwärts, aber nicht rückwärts herzusagen vermag.

Die amnestische Aphasie kommt selten für sich allein vor; meist ist sie mit verschiedenen Graden von motorischer oder sensorischer Aphasie kombiniert. Dementsprechend ist die zugrundeliegende Krankheit auch nicht bestimmt lokalisiert; man findet pathologische Prozesse bald in der unteren Frontalwindung, bald im Temporallhirn.

Nach all dem gelingt es also, nicht bloß mit der Methode der psychologischen Analyse die Sprechfunktion in mehrere Akte zu zerlegen,

sondern *physiologisch baut sich das Sprechen aus einer Reihe von Hirntätigkeiten auf, indem bestimmte Rindenbezirke, welche miteinander assoziiert sind, der Reihe nach in Funktion treten.* Auch diese Leistung entspricht also schließlich dem Schema des Reflexbogens, nur mit dem Unterschied, daß die Verknüpfungen nicht von Anfang an bestehen, sondern offenbar mehr oder weniger erst während des Lebens gebildet werden.

In ähnlicher Weise wie das Sprechen, so sind nun anscheinend auch andere Praxien und Gnosien des Menschen von bestimmten Hirnteilen abhängig.

Es gibt sehr verschiedene Grade von **Apraxie** und **Agnosie**. Eine einfache Apraxie ist es z. B., wenn ein Mensch die Fähigkeit verliert, bestimmte Ausdrucksbewegungen mit dem Arm auszuführen, z. B. mit der Faust zu drohen oder mit der Hand zu winken. Die Bewegungen, die er statt dessen ausführt, sind an sich vollkommen geordnet, nur sind es andere als beabsichtigt, oder sie sind nicht richtig aus den Einzelbewegungen zusammengestellt. Ein Patient kann z. B. auf Aufforderung den Arm heben, dann eine Faust machen, dann die Faust hin und herbewegen; befiehlt man ihm aber zu drohen, so gelingt es nicht, sondern er fuchtelt statt dessen ziellos mit dem Arm umher. Andere einfache Apraxien sind etwa die Unfähigkeit, militärisch zu grüßen, ein Zündholz anzustecken, an die Tür zu klopfen. Von einfachen Agnosien sei die als *Stereoagnosie* oder *Astereoagnosis* bezeichnete Störung des Tastsinnes erwähnt; ein Patient kann z. B. eine an sich intakte Berührungs- und Tiefenempfindlichkeit besitzen; aber er findet in seiner Tasche nicht das Taschentuch und die Börse, die er optisch sofort erkennt (EDINGER). Höchst merkwürdig ist das Auseinanderfallen komplizierterer Handlungen in ein sinnloses Gemisch von Einzelaktionen, so, wenn der Patient ein Stück Fleisch mit der Gabel vom Teller essen soll, erst zaudert, dann die Gabel ergreift, sie wieder fortlegt, das Fleisch mit der Hand faßt, dann wieder unschlüssig umherblickt und nicht von der Stelle kommt, oder wenn er das Streichholz anzündet und es darauf neben die Zigarre in den Mund steckt. Solche wirren Ereignisse können dem Beobachter eine Schwachsinnigkeit vortäuschen, welche in Wirklichkeit gar nicht vorhanden ist; er bemerkt aber leicht seinen Irrtum, wenn die Apraxie nur einseitig ist; denn dann können die gestellten Aufgaben von der nicht apraktischen Körperseite ganz korrekt gelöst werden.

Den Agnosien und Apraxien liegen in der Mehrzahl der Fälle ausgedehnte Scheitellappenherde zugrunde (LIEPMANN), aber auch Stirnhirnaffektionen gehen gelegentlich mit schwerer Apraxie einher. Es handelt sich demnach um Erkrankungen, welche sich nicht innerhalb, sondern in der Umgebung der Primärzentra abspielen. Wir werden auf die Annahme hingelenkt, daß diejenigen Rindengebiete, welche als Sekundärzentra (S. 399) bezeichnet wurden, einen gewaltigen Schaltapparat repräsentieren, welcher die Aufgabe hat, die einzelnen Teile der Primärzentra in derjenigen ungeheuren Mannigfaltigkeit miteinander zu verknüpfen, welche der Reichhaltigkeit und dem individuellen Charakter der menschlichen Handlungen entspricht.

Sind wir mit den Lokalisationsversuchen bis hierher gelangt, so erhebt sich ganz von selbst die Frage, ob vielleicht auch gewisse Bezirke des Großhirns als Organe der höchsten psychischen Funktionen angesprochen werden dürfen. Die Frage ist vielfach und unter mannig-

faltigen Gesichtspunkten erörtert worden; Lösungen sind mit anatomischen, mit experimentell-physiologischen und mit klinischen Methoden gesucht, ohne daß eine Einigkeit erzielt worden wäre.

Von vergleichend-anatomischer Seite ist namentlich *das Stirnhirn als „Sitz“ der Intelligenz* bezeichnet worden; es wird dafür geltend gemacht, daß mit der Zunahme des intelligenten Verhaltens in der Reihe der Tiere auch der vor den Primärzentra frontal gelegene Hirnabschnitt an Masse zunimmt (MEYNERT). So ist nach EDINGER der Stirnlappen klein bei Ziege und Känguruh, größer bei der Katze, im allgemeinen noch größer beim Hund und erlangt bei dem Affen unter den Tieren die größte Ausdehnung. Noch erheblich stärker ist das Stirnhirn dann beim Menschen entwickelt, und hier sind es wiederum die primitiven Rassen, welche von den höheren an Ausdehnung des Stirnhirns übertroffen werden.

Auch die Klinik kann manche Argumente zugunsten dieser Lokalisierung des intelligenten Verhaltens anführen. Schwachsinnige Menschen sind häufig durch ein wenig voluminöses Frontalhirn und eine dem äußerlich entsprechende fliehende Stirn ausgezeichnet; eine von Geburt an bestehende Verkümmern der Stirnlappen geht stets mit Idiotie einher; die zu starker geistiger Verblödung führende progressive Paralyse ist pathologisch-anatomisch besonders durch eine degenerative Atrophie des Stirnhirns gekennzeichnet. Andererseits ist freilich auch oft konstatiert, daß akute Erkrankungen und Verletzungen des Stirnhirns, selbst wenn sie beidseitig sind, fast symptomlos verlaufen können; auch weist die Klinik den Sitz der höheren geistigen Tätigkeiten vielfach in das Scheitelhirn.

Das Experiment endlich hat gelehrt (GOLTZ, FERRIER, ROTHMANN), daß, wenn man bei Hunden oder Affen das Stirnhirn doppelseitig extirpiert, die Dressurfähigkeit mehr oder weniger gestört und dadurch der Eindruck von Imbezillität hervorgerufen wird. Besonders hervorstechend sind aber die *Änderungen im Charakter*, welche nach der Operation hervortreten; die Tiere verlieren ihre Anhänglichkeit, sie werden unfolgsam, ihr Wesen wird hemmungslos, früher sanfte Tiere werden bissig.

Mit diesen wenigen Angaben sind die Hauptgrundlagen für eine Zentralisation der höheren psychischen Tätigkeiten genannt. Bedenkt man einerseits, daß es vom psychologischen Standpunkt aus ein von vornherein völlig unbefriedigendes Unternehmen ist, gerade die kompliziertesten psychischen Operationen unanalysiert als Ganzes einem gesonderten Hirnteil zuzuschreiben, und daß andererseits von der Physiologie großer Abschnitte des Gehirns, wie das Frontalhirn des Menschen einer ist, nur so spärliche und dazu keineswegs widerspruchsfreie Angaben gemacht werden können, so ist damit der gegenwärtige Stand der Hirnforschung charakterisiert, welche trotz der bewunderungswürdigen großen Erfolge der Lokalisationslehre mit der durch sie geschaffenen Möglichkeit, die Gehirnvorgänge bis zu einem gewissen Grad mit den Reflexvorgängen des Rückenmarks in Parallele zu setzen, doch noch höchst lückenhaft ist.

Schließlich müssen wir nun noch einmal auf eine vorher (S. 400) hervorgehobene interessante Feststellung zurückkommen, nämlich auf die **Präponderanz der linken Hemisphäre** bei der Ausübung der Sprechfunktion und ihren Zusammenhang mit der Rechtshändigkeit. Diese Bevorzugung der einen Hirnhälfte bei der überwiegenden Zahl der Men-

schen — wie gesagt, sind etwa 95% Rechtshänder — beschränkt sich keineswegs bloß auf das Sprechen und auf die Verwendung der Hände. Der Rechtshänder gebraucht gewöhnlich bei einseitigen Handlungen auch den rechten Fuß lieber als den linken, z. B. beim Stoßen, er kneift das rechte Auge leichter zu als das linke; die Klinik lehrt ferner, daß nicht bloß die Aphasie, sondern auch die Agraphie und Alexie für gewöhnlich durch linkssitzende Gehirnherde hervorgerufen werden.

Man kann also verallgemeinernd voraussetzen, daß die Mehrzahl der Menschen linkshirig ist; das soll heißen, daß — freilich in quantitativ recht verschiedenem Maß — das linke Gehirn für die rezeptorischen und effektorischen Funktionen von größerer Wichtigkeit ist, als das rechte. Die Beobachtungen am kranken Menschen haben diese Annahme mehr und mehr gerechtfertigt, und zwar ist die Präponderanz der linken Hemisphäre physiologisch so zu verstehen, daß *die linke Hemisphäre auch für das, was die rechte Hemisphäre leistet, die Oberleitung übernommen hat.*

Wenn nämlich infolge einer links sitzenden Erkrankung die rechte Seite gelähmt oder apraktisch geworden ist, so ist sehr häufig auch die linke Seite apraktisch, wie wenn auch rechts ein Herd vorhanden wäre. Die Linksapraxie bedeutet dabei nicht etwa bloß eine „Linkischkeit“, also eine Ungeschicklichkeit, sondern eine richtige Apraxie; der Patient weiß z. B. nicht mehr mit der linken Hand die Ausdrucksbewegung des Drohens auszuführen (S. 402), er kann nicht mehr an die Tür klopfen, den Schlüssel ins Schlüsselloch stecken und dergleichen. Ganz anders, wenn der Herd rechts sitzt; dann ist zwar die linke Körperhälfte betroffen, aber für die Bewegungen der rechten Seite ist der Herd absolut indifferent. All das gilt jedoch nur für den Rechtshänder; beim Linkshänder liegen die Verhältnisse gerade umgekehrt; da sind die rechts sitzenden Herde die gefährlicheren, weil sie nicht bloß Lähmungen auf der linken Seite, sondern auch Rechtsapraxie verursachen.

Nach LIEPMANN hat man sich die Abhängigkeit der rechten von der linken Hemisphäre durch die große *Kommissurenfasern des Balkens* vermittelt zu denken; dafür spricht vor allem folgendes: lokalisiert sich ein Erkrankungsprozeß im Corpus callosum oder in der Balkenstrahlung im Centrum ovale, dann können Störungen auftreten wie bei einem rechts sitzenden Herd, der Kranke wird linksapraktisch. Der rechten Hemisphäre werden also auf dem Weg der Balkenstrahlung Anregungen, welche für ihre Funktion notwendig sind, zugeführt.

Die Subordination der rechten Hemisphäre ist aber keine absolute. Namentlich bei Kindern, welche durch eine Erkrankung linksaphasisch geworden sind, wird die Sprache durch vikariierendes Eintreten der rechten Hemisphäre gut restituiert, wobei die stärkere Verselbständigung der rechten Hand durch das Schreibenlernen besonders wohlthätig zu wirken scheint. Es wird auch berichtet, daß ein Erwachsener, welcher von Geburt rechtshändig war, aber infolge einer Verletzung links schreiben lernen mußte, später durch eine Erkrankung in der rechten Hemisphäre aphasisch wurde. Endlich gibt es Beobachtungen an Patienten, welche durch eine diffuse Erkrankung der linken Hirnhälfte bis zur Hilflosigkeit apraktisch geworden waren und in ihrem gestörten Gebahren (siehe S. 402) einen vollständig vertrottelten Eindruck machten, bis dann durch systematische Übungen der linken Hand die rechte Hemisphäre allmählich unabhängig gemacht und damit eine erstaunliche Besserung

im ganzen körperlichen und seelischen Verhalten erzielt wurde (LIEPMANN). —

Die rezeptorischen wie die effektorischen Fähigkeiten des Gehirns unterliegen starken und auffallenden Schwankungen, welche sich im Wachsein und im Schlaf äußern. Der Schlaf besteht in der Hauptsache in einer zeitweiligen Herabsetzung oder Aufhebung der motorischen Impulse und des Bewußtseins. Dieser Ruhezustand ist ein in hohem Maße physiologisches Bedürfnis unseres Körpers, wie nicht bloß aus der Tatsache zu entnehmen ist, daß der Schlafzustand im allgemeinen etwa ein Drittel des Lebens umfaßt, sondern auch aus der experimentellen Feststellung an jungen Hunden, daß ein künstliches Wachhalten durch äußere Reize auf die Dauer äußerst schädlich, ja todbringend wirkt (DE MANASSEINE). Die periodische Verminderung der Tätigkeit erstreckt sich auch auf das Rückenmark. Denn auch die Reflexerregbarkeit ist im Schlaf vermindert; zur Auflösung der Hautreflexe, der Sehnenreflexe, des Kremasterreflexes u. a. bedarf es stärkerer Reize als gewöhnlich. Auf diese Beobachtungen baut sich eine Methode zur Messung der Tiefe des Schlafes auf; man bestimmt zu verschiedenen Zeiten während des Schlafens die Reizschwelle, oberhalb deren Erwachen zustande kommt. So fand KOHLSCHÜTTER durch Anwendung von Schallreizen, daß im allgemeinen der Schlaf in der ersten bis zweiten Stunde nach dem Einschlafen seine größte Tiefe erreicht, daß die Tiefe danach rasch wieder absinkt, und daß weiterhin der Schlaf mehrere Stunden lang konstant und ziemlich oberflächlich bis zum Erwachen fortdauert. Öfter beobachtet man aber auch, daß dem ersten Tiefenmaximum ein zweites flacheres nachfolgt (MÖNNINGHOFF und PIESBERGEN).

Auch bei anderen Körperfunktionen ist — in mehr oder weniger deutlicher Abhängigkeit vom Zentralnervensystem — die Herabsetzung während des Schlafes zu konstatieren. So schlägt das Herz verlangsamt. Die Atmung ist ruhiger, aber gleichzeitig vertieft. Die Sekretion der Tränendrüsen, der Speichel- und Schleimdrüsen und der Nieren ist eingeschränkt; dies ist besonders deutlich etwa bei der im Schnupfen pathologisch gesteigerten Nasensekretion, welche gewöhnlich nach dem Einschlafen aufhört. Dagegen ist nach PAWLOW die Tätigkeit der Verdauungsdrüsen während des Schlafes unvermindert. Ferner sind die Bewegungen des Magendarmtrakts ebenso wie der Tonus der Blasenmuskulatur verringert (s. S. 245), während der Schluß der Sphinkteren von Mastdarm und Blase anscheinend unverändert ist. Eine Folge der zahlreichen Funktionseinschränkungen, namentlich die Folge der Erschlaffung der Skelettmuskeln ist schließlich eine starke Herabsetzung des respiratorischen Gaswechsels.

Die Ursache für den Eintritt des Schlafzustandes ist noch unbekannt. Man hat sie erstens in Veränderungen in der Durchblutung des Gehirns gesucht. In der Tat erzeugt ja eine kurzdauernde Unterbrechung in der Zirkulation, experimentell z. B. durch Kompression der Karotiden, Bewußtlosigkeit (Ohnmacht), die eine gewisse Ähnlichkeit mit dem Schlaf hat. Auch hat man bei Tieren und Menschen, deren Schädelhöhle durch Trepanation eröffnet war, teils durch Inspektion, teils durch Registrierung der Volumschwankungen des Gehirns, indem die Schädelkapsel sozusagen als Plethysmograph verwendet wurde, gefunden, daß im Schlaf die Durchblutung sinkt (DONDERS, CHRISTERN); doch werden auch die gegenteiligen Angaben gemacht (CZERNY, BRODMANN). Eine andere Hypothese führt den Schlaf auf eine Narkose des Gehirns mit Kohlensäure zurück, die sich infolge verlangsamer Zirkulation mehr und mehr anhäuft (DUBORS, OVERTON).

Übrigens ist der Schlaf keineswegs eine allein vom Großhirn abhängige Erscheinung; denn GOLTZ berichtet, daß auch beim großhirnlosen Hund der regelmäßige Wechsel von Schlafen und Wachen zu beobachten ist, wenn auch „Ruhe und Schlaf von viel kürzerer Dauer waren als bei normalen Hunden“.

Zum Schluß dieses Abschnitts sind nun noch einige Worte über den zeitlichen Verlauf der Gehirnvorgänge zu sagen. Auch damit setzen wir die Physiologie des Gehirns mit der des Rückenmarks in Beziehung. Die Zeit, welche der Erregungsprozeß braucht, um, von einem Rezeptor aus inszeniert, durch das Rückenmark zu einem effektorischen Organ hinzulaufen, wurde als Reflexzeit bezeichnet (siehe S. 344). Entsprechend versteht man unter der Reaktionszeit des Menschen diejenige Zeit, welche verstreicht zwischen Reiz und bewußter willkürlicher Reaktion auf den Reiz (EXNER, WUNDT). Mit dieser Einbeziehung von psychischen

Momenten in die Definition wird die Reaktion zu einem *Erregungsvorgang unter Mitbeteiligung des Großhirns* gestempelt.

Die einfachste Form der *Reaktionszeitmessung* besteht darin, daß im Moment der Reizung (z. B. durch Aufleuchten einer elektrischen Lampe) ein elektrischer Strom geschlossen und dadurch gleichzeitig ein elektromagnetisches Signal betätigt wird, welches den Beginn der Erregung auf einer bewegten Schreibfläche verzeichnet, und daß durch die darauf folgende willkürliche Reaktion (z. B. einen Druck mit dem Finger) der Stromkreis wieder geöffnet und dadurch das Signal abermals in Bewegung gesetzt wird.

Der Verlauf solcher Messungen hat nun gelehrt, daß, im Gegensatz zur Reflexzeit, auch unter scheinbar gleichen Reizbedingungen bei kurz aufeinanderfolgenden Erregungen erhebliche Variationen in der Zeit vorkommen, welche von dem Grad der Aufmerksamkeit, von der augenblicklichen Stimmung, von der Übung und dergleichen abhängen, — Variationen, welchen also offenbar Gehirnvorgänge zugrunde liegen, die die psychischen Tätigkeiten begleiten, über die wir aber bei unseren gegenwärtigen Kenntnissen von der Physiologie des Großhirns, speziell von den vielfältigen Wegen, welche eine ins Gehirn einlaufende Erregung nehmen kann, nichts weiter auszusagen vermögen.

Im allgemeinen findet man, daß bei starker Anspannung der Aufmerksamkeit die Reaktionszeit nach wenigen Reizen auf ein Minimum absinkt, welches, abgesehen von der Länge der peripheren Nervenbahn, *eine für das Individuum charakteristische Größe*, die sog. *persönliche Zeit* (siehe S. 327), darstellt.

Außerdem ist die Reaktionszeit abhängig von der Art des gereizten Sinnesorgans. In dieser Hinsicht wurden z. B. die folgenden Zeiten in σ ($= \frac{1}{1000}$ Sekunden) gemessen (nach WUNDT):

Schall	Licht	elektr. Hautreiz	Beobachter
149	200	182	HIRSCH
180	188	154	DONDERS
150	224	154	HANKEL
167	222	201	WUNDT
136	150	133	EXNER
120	193	117	V. KRIES
122	191	146	AUERBACH
125	150	—	CATELL

Nach dieser Tabelle dauert die Reaktionszeit auf Licht also länger als auf Schall oder auf einen elektrischen Hautreiz. Die Angaben weichen untereinander nicht unerheblich ab. Dafür kann, abgesehen von der Individualität, auch die Reizstärke verantwortlich sein; im allgemeinen ist die Reaktionszeit um so kürzer, je stärker der Reiz.

Die Reaktionszeit ist weiter abhängig von körperlicher und geistiger Ermüdung.

Ferner kommt es darauf an, ob der Reagent seine Aufmerksamkeit mehr auf den zu erwartenden Sinnesreiz oder auf die Muskeltätigkeit einstellt; man bezeichnet die erste Reaktionsform als *sensorielle Reaktion*,

die zweite als *muskuläre Reaktion*. Im allgemeinen ist die letztere um ungefähr $\frac{1}{10}$ Sekunde kürzer als die erstere (L. LANGE).

In den zeitlichen Ablauf des Reaktionsvorgangs lassen sich nun noch leicht zahlreiche komplizierende Faktoren einführen, z. B. dadurch, daß genauere Angaben über den Reiz verlangt werden, daß etwa die Form oder die Farbe eines optischen Reizes oder daß ein Tonintervall erkannt werden soll (*Erkennungsreaktion*), oder dadurch, daß die Aufgabe gestellt wird, daß nur auf den einen von zwei verschiedenen Reizen, etwa rotes oder blaues Licht, reagiert werden darf (*Unterscheidungsreaktion*), oder auch dadurch, daß mehrere verschiedene Reize mit mehreren verschiedenen Bewegungen beantwortet werden müssen (*Wahlreaktion*). Sämtliche derartige Komplikationen verlängern natürlich die einfache Reaktionszeit.

Zu einer Vertiefung unserer Kenntnisse von der Physiologie des Gehirns tragen alle diese Messungen, so groß auch ihre praktische Bedeutung sein mag, nichts bei, weil wir über die die psychischen Vorgänge begleitenden Gehirnprozesse zu wenig wissen.

25. Kapitel.

Das Kleinhirn.

Der Bau des Kleinhirns 408. Exstirpationsversuche 409. Reizung der Kleinhirnrinde 410.

In der Physiologie des Zentralnervensystems vom Menschen spielt das Kleinhirn nur eine Nebenrolle; der eindringlichste Beweis dafür ist wohl der, daß gelegentlich das Kleinhirn durch einen Erkrankungsprozeß allmählich gänzlich konsumiert wurde, ohne daß die Einbuße sich durch besonders schwere oder auch nur auffallende Störungen bemerkbar gemacht hätte. Die relativ untergeordnete Rolle kann man einigermaßen schon aus der vergleichenden Anatomie der Wirbeltiergehirne ablesen; denn diese belehrt darüber (s. Abb. 128 S. 376), daß das Kleinhirn verhältnismäßig massig bei den Fischen und Vögeln entwickelt ist, dagegen bei Amphibien und Reptilien nur eine kümmerliche Ausbildung erfahren hat und bei den Säugetieren zwar an sich recht voluminös ist, immerhin gegenüber dem mächtigen Gebilde des Großhirns stark in den Hintergrund gedrängt ist. Diese anatomischen Verhältnisse scheinen nun auch mit den Ergebnissen des physiologischen Experiments, nach denen *das Kleinhirn als ein Organ zur Erhaltung des Körpergleichgewichts* aufzufassen ist, gut übereinzustimmen. Denn die Erhaltung des Gleichgewichts spielt augenscheinlich im allgemeinen bei den Fischen und Vögeln eine größere Rolle als bei den Amphibien und Reptilien und auch bei den Säugetieren; die Schwimm- und Flugbewegungen verlangen, namentlich wenn sie flink und elegant ausgeführt werden sollen, sicherlich eine viel feinere Koordination der Muskeln als die Bewegungen auf dem festen Boden, zumal die langsamen und kriechenden Bewegungen bei Amphibien und Reptilien; auch sind unter den Fischen und Vögeln die guten Schwimmer und Flieger durch ein besonders stark entwickeltes Kleinhirn ausgezeichnet. Dennoch finden wir bei genauerem Zusehen, daß die bisherigen experimentellen Studien uns nur außerordentlich unvollkommen darüber unterrichtet haben, in welcher Weise das Kleinhirn bei der Erhaltung des Körpergleichgewichts eigentlich eingreift.

Die Lehre von den Funktionen des Kleinhirns gründet sich, ähnlich wie die Physiologie des Großhirns, vornehmlich auf Exstirpations- und Reizungsversuche. Betrachten wir hier nur die Verhältnisse bei den Säugetieren!

Wenn man beim Hund eine **Exstirpation der einen Hemisphäre des Kleinhirns** ausführt (LUCIANI, LEWANDOWSKY, H. MUNK), so sind schwere Störungen auf der Operationsseite die Folge. Das Tier liegt zunächst auf dieser Seite mit abnorm gespannten Extremitäten und mit gegen die Operationsseite gekrümmter Wirbelsäule; der Kopf ist nach der gesunden Seite verdreht. Macht das Tier den Versuch sich aufzurichten, so sinkt es nach der Operationsseite um und verfällt häufig in Rollbewegungen um die Längsachse; auch Zeiger- und Reitbahnbewegungen kommen gelegentlich vor; die Augen zeigen oft Nystagmus (siehe S. 374) nach der Gegenseite.

Nach einigen Tagen beginnt das Tier sich etwas zu erholen. Es vermag zu stehen, aber infolge einer großen Ermüdbarkeit auf der kranken Seite, einer „*Asthenie*“ und „*Atonie*“, fällt es häufig um. Der Gang ist unsicher und taumelnd, nicht immer geradeaus, sondern nach der Operationsseite hin kreisend. Außer den auffallenden Störungen in der Motilität sind auch Störungen der Sensibilität festzustellen: der Gang ist ataktisch und stolzierend nach Art eines Hahns; bei der Ausführung von Einzelbewegungen verfällt das betreffende Glied in Zittern, weil es nicht geradewegs auf die erstrebte Stelle hingeführt werden kann („*Intentionszittern*“), die Glieder der Operationsseite werden öfter inkorrekt gestellt, der Fußrücken z. B. nach unten.

Verstreicht längere Zeit nach der Verletzung, so kann fast völlige Restitution eintreten; die Bewegungen bleiben oft nur noch ein wenig ataktisch. Offenbar beruht die Restitution größtenteils auf einer Kompensation durch das Großhirn; denn sobald dieses lädiert wird, brechen sofort die schweren Störungen, welche der Kleinhirnexstirpation unmittelbar folgten, in voller Heftigkeit wieder hervor.

Nach der **totalen Kleinhirnexstirpation** beim Hund zeigen sich auf beiden Seiten dieselben schweren Störungen, wie nach Wegnahme einer Hemisphäre auf der einen Seite. Die Tiere sind zunächst völlig haltlos, weil ihren Muskeln jeder Tonus fehlt, der Kopf schwankt hin und her. Allmählich lernen aber auch sie sich wieder aufrichten. Zunächst werden dabei die Vorderbeine spastisch gestreckt, der Kopf rückwärts gehoben; die Tiere überschlagen sich infolgedessen leicht nach hinten. Später laufen sie torkelnd umher und fallen dabei bald nach der einen, bald nach der anderen Seite. Die Bewegungen sind ataktisch übertrieben.

So kann man also von *zerebellarer Ataxie* und *zerebellarer Hypotonie* als den Hauptsymptomen der Kleinhirnläsion sprechen.

Dieser taktische und tonisierende Einfluß wird nun, wie die Folgen **partieller Exstirpationen** lehren, von bestimmten Kleinhirnabschnitten auf bestimmte Muskelgruppen ausgeübt, so daß man demnach auch beim Kleinhirn von einer *Lokalisation* oder *Zentralisation* seiner Funktionen sprechen kann (ROTHMANN, VAN RIJNBERK).

Schaltet man den Lobus quadrangularis der Hemisphäre einer Seite aus (siehe Abb. 144), so wird das gleichseitige Vorderbein befallen; seine Bewegungen werden ataktisch, der Lagesinn ist gestört. Verletzung des Lobus semilunaris superior schädigt das gleichseitige Hinterbein. Vom Lobus semilunaris inferior ist die Rumpfmuskulatur abhängig, so daß bei doppelseitiger Zerstörung der Rücken einsinkt. Tonsille und Flocculus (siehe Abb. 145) wirken besonders auf die Kopfmuskulatur; werden sie lädiert, so wird der Kopf nach der Operationsseite hin geneigt. Die Verletzungen des Wurms haben doppelseitige Störungen

im Gefolge; Zerstörungen weiter nach vorn bedingen eine Neigung nach vorn zu fallen, Zerstörungen weiter nach hinten bewirken dagegen Fallen nach rückwärts; Verletzung im unteren Teil des Lobus anterior schädigt das Kauen und die Bewegungen der Stimmbänder.

Dem vivisektorischen Ergebnis beim Hund entsprechen die *klinischen Erfahrungen beim Menschen*. Zwar kann, wie schon gesagt wurde, gelegentlich eine allmähliche Konsumption des ganzen Kleinhirns durch einen Erkrankungsprozeß fast symptomlos zustandekommen; allenfalls sind heftige Kopfschmerzen und Schwindel Begleiterscheinungen des Zerfalls. Aber bei akuten Erkrankungen kommt es zu schweren Störungen

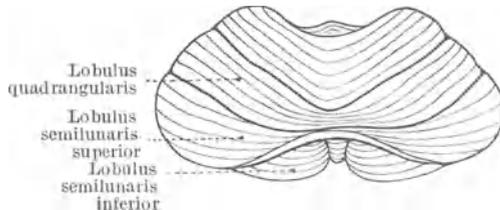


Abb. 144. Kleinhirn des Menschen von oben (nach VILLIGER).

des Stehens und Gehens. Der Gang wird wie der eines Trunkenen, taumelnd und im Zickzack, manchmal fällt der Patient hintenüber. Beim Stehen schwankt er hin und her. Die Einzelbewegungen pflegen im Verhältnis zu den Gemeinschaftsbewegungen weniger geschädigt zu sein; die oberen Extremitäten sind auch gewöhnlich weniger betroffen als die unteren. Charakteristisch ist eine Koordinationsstörung, welche als *Adiadochokinesie* bezeichnet wird (*diadoxhē* = Aufeinanderfolge): der Patient ist nicht imstande antagonistische Muskelgruppen in raschem Tempo hintereinander in Bewegung zu setzen, z. B. rasch abwechselnd

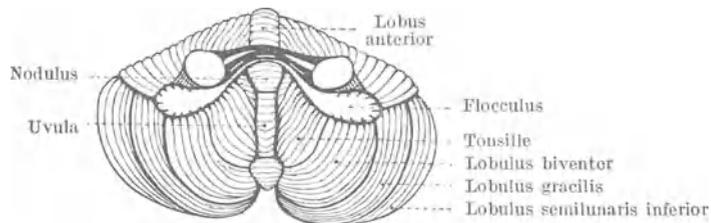


Abb. 145. Kleinhirn des Menschen von unten und vorn (nach VILLIGER).

zu pronieren und zu supinieren. Damit verwandt ist wohl auch die die Zerebellarerkrankungen oft kennzeichnende skandierende Sprache. Ferner kommt Nystagmus vor und als Zeichen einer Disharmonie in den Angaben der verschiedenen Sinnesorgane, des Vestibularapparats, der Organe der Haut- und Tiefensensibilität, der Augen, die Erscheinung des Schwindels (siehe dazu Kapitel 35).

Wenden wir uns nun den **Reizversuchen** zu, so unterscheiden sich ihre Ergebnisse von den entsprechenden Befunden beim Großhirn vor allem darin, daß von der Kleinhirnrinde aus viel schwerer Bewegungen auszulösen sind; man braucht viel stärkere elektrische Ströme, was nach EDINGER darauf zurückzuführen ist, daß die zerebellifugalen

Bahnen nicht unmittelbar in der Rinde entspringen, sondern in der Tiefe in den zentral gelegenen Kernen. Erhält man Reizeffekte, so sind sie fast stets, wiederum im Gegensatz zum Großhirn, gleichseitig, und dies wird gewöhnlich darauf zurückgeführt, daß erstens die Fasern des Tractus vestibulo-spinalis, welche über den DEITERSschen Kern mit dem Kleinhirn verbunden sind, ja auch ungekreuzt verlaufen, und daß zweitens von der Kleinhirnrinde der einen Seite Fasern zum Nucleus ruber der Gegenseite hinüberkreuzen, von dem aus dann der Tractus rubro-spinalis abwärts zieht, welcher durch seine Kreuzung den Effekt der ersten Kreuzung annulliert.

Besonders deutliche isolierte Bewegungen erhält man bei Reizung des Lobus quadrangularis, nämlich Bewegungen der Zehen oder auch des ganzen Vorderbeins der gleichen Seite (ROTHMANN); Reizung des Oberwurms bewirkt Augenbewegungen. Auch die Reizungsergebnisse demonstrieren demnach eine Vertretung verschiedener Körperabschnitte durch verschiedene Anteile des Kleinhirns.

Wie übt nun normalerweise das Kleinhirn seine Einflüsse auf den Körper aus? Bis vor kurzem faßte man das Kleinhirn als ein großes Reflexzentrum auf, durch dessen Vermittlung den Muskeln im allgemeinen ein genügender Tonus und bei Lageänderungen des Körpers den einzelnen Muskelgruppen die notwendigen korrektiven Tonusänderungen zugeführt werden; die anregenden Impulse zu dieser Tätigkeit sollte das Kleinhirn teils von der Haut, den Muskeln, Sehnen und Gelenken auf dem Wege des im Kleinhirn endenden Tractus spinocerebellaris, teils vom Labyrinth aus vermittelt des Nervus vestibularis und seiner mit dem Kleinhirn verbundenen Kerne empfangen; die zentrifugale Bahn wurde wesentlich in dem Tractus vestibulo-spinalis und im Tractus rubro-spinalis erblickt. Mit dieser Auffassung stimmte die Angabe gut überein, daß der Tonus der Körpermuskulatur ebensowohl bei der Zerstörung der Labyrinth sinke (s. Kap. 35) wie bei Durchschneidung der Tractus spino-cerebellares (s. S. 364).

Diese Auffassung von der das Gleichgewicht erhaltenden Funktion des Kleinhirns kann aber nur zum Teil richtig sein; denn wir wissen durch neue Versuche von de KLEIJN und MAGNUS, daß das Labyrinth seine Einflüsse auf die Stellung der verschiedenen Körperteile (die wir übrigens später, Kapitel 35, im einzelnen kennen lernen werden), unabhängig vom Kleinhirn ausübt. Man kann das Kleinhirn samt seinen Kernen total entfernen, ohne daß die Labyrinthreflexe, speziell die tonischen die jeweilige Körperhaltung bestimmenden Reflexe (s. S. 368) erlöschen; diese sind vielmehr nur an die Intaktheit des Hirnstamms gebunden. Andererseits treten die für die Labyrinthwegnahme charakteristischen schweren Gleichgewichtsstörungen (s. Kapitel 35) an kleinhirnexstirpierten Tieren noch gerade so deutlich in die Erscheinung, wie beim normalen Tier (de KLEIJN und MAGNUS, B. LANGE). Die Labyrinth sind also für die Einnahme bestimmter Stellungen und für die Ausführung bestimmter Muskelkoordinationen notwendig, das Kleinhirn ist es nicht; so vermögen kleinhirnlose Hunde zu schwimmen (LUCIANI) und kleinhirnlose Tauben zu fliegen (B. LANGE), während die labyrinthexstirpierten Tiere das nicht können.

Wenn nach all dem die sonst gangbare Vorstellung hinfällig wird, daß das Kleinhirn in weitgehendem Maße auf Impulse der Labyrinth antwortet, indem es die zum Stehen und Gehen gleich notwendigen tonischen Innervationen der Muskulatur bewirkt, so bleibt doch noch zunächst die Annahme berechtigt, daß der Einfluß des Kleinhirns auf das Körpergleichgewicht, der sich namentlich in den geschilderten Folgen der Kleinhirnexstirpation so eindringlich äußert, von den Erregungen abhängt, welche ihm auf dem Wege der Tractus spinocerebellares von der Körperperipherie her zufließen. Wie weit diese Auffassung richtig ist, bedarf aber erneuter Erforschung.

26. Kapitel.

Das vegetative Nervensystem.

Das sympathische und das parasympathische Nervensystem 414. Ihr Antagonismus im pharmakologischen Verhalten 415. Zentripetale Leitung im vegetativen Nervensystem 415. Zentrale Erregung des Sympathikus und der Ausdruck der Gemütsbewegungen 416.

Das Großhirn kann man als das Organ der bewußten Willkürhandlungen bezeichnen. Aber es vermag seine Willkür über das Rückenmark und die Spinalnerven hinweg lange nicht auf alle Teile unseres Körpers auszuüben, sondern, wie wir im Verlauf dieser Darstellungen vielerorts erfahren haben, sind vor allen Dingen die Eingeweide mit ihren glatten Muskeln und ihren Drüsen, ferner das Herz, die Blutgefäße, die Organe der Haut, die Iris u. a. der Willkür entzogen, obwohl sie mit dem Zentralnervensystem durch eigene Nervenfasern verbunden sind. *Dieses System von Nerven, welches also unwillkürlich in Aktion tritt, wird wegen seiner hauptsächlichlichen Verbreitung auf die Organe der vegetativen Funktionen als das vegetative oder auch als das viszerale Nervensystem, wegen seiner Unabhängigkeit von der Willkür auch als autonomes Nervensystem bezeichnet.*

Wir sind auf seine Bedeutung im einzelnen schon häufig zu sprechen gekommen; hier soll die Betätigungsweise nun noch einmal systematisch erörtert werden.

Vorausgeschickt sei aber eine kurze **Anatomie des vegetativen Nervensystems**, die nicht weniger charakteristisch ist als seine Physiologie, in erster Linie dadurch, die seine Nervenfasern niemals direkt vom Zentralnervensystem, in welchem sie entspringen, bis zur Peripherie ziehen, sondern daß sie durch eine Ganglienzelle unterbrochen werden; d. h. die aus dem Zentralnervensystem kommende Faser endet mit einem Endbäumchen an einer irgendwo außerhalb des Zentralnervensystems gelegenen Ganglienzelle, und aus dieser entspringt ein zweites Neuron, dessen Achsenzylinderfortsatz dann die Peripherie erreicht. Diese anatomische Besonderheit ist erst durch eine physiologische Reaktion erkannt worden. Die Ganglienzellen des viszeralen Nervensystems sind nämlich selektiv empfindlich gegen Nikotin. Verbreitet man dieses bei einem Tier durch intravenöse Injektion über den ganzen Körper oder bepinselt man lokal die Ganglien des viszeralen Nervensystems mit einer 0,5%igen Nikotinlösung, so unterbricht man die nervöse Leitung, welche auf die

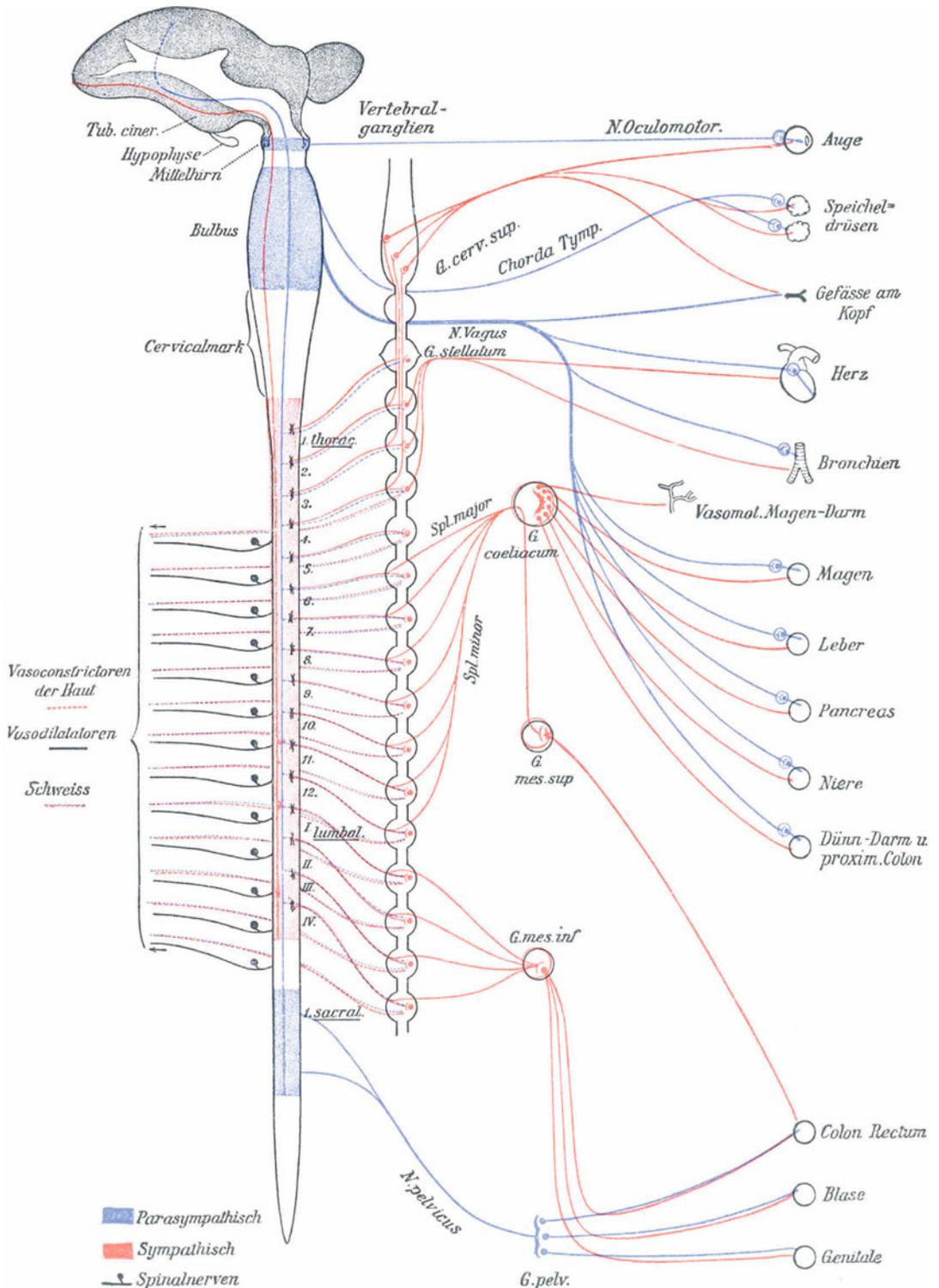


Abb.146. Schema vom Aufbau des vegetativen Nervensystems (nach H. H. MEYER und GOTTLIEB). (Aus MEYER-GOTTLIEB, Experimentelle Pharmakologie. 3. Aufl.)

Weise ihren Aufbau aus *präganglionären* und aus *postganglionären Fasern* manifestiert (LANGLEY). Solche Ganglien sind z. B. die Ganglien des sympathischen Grenzstrangs, das Ganglion coeliacum, das Ganglion ciliare u. a.

Das vegetative Nervensystem setzt sich nun aus zwei Hauptteilen zusammen, aus dem sympathischen und aus dem parasympathischen Nervensystem (LANGLEY). In dem Schema der Abb. 146 nach H. H. MEYER und GOTTLIEB sind die beiden Teile durch rote und blaue Farbe auseinandergehalten.

Das sympathische Nervensystem oder kurz der Sympathikus entspringt aus dem Thorakolumbalmark, aus dessen Wurzeln markhaltige Fasern über die Rami communicantes albi in den Grenzstrang und in die nach oben sich anschließenden Zervikalganglien hineinlaufen. Diese wegen ihrer Lage zur Seite der Wirbelsäule als *vertebrale Ganglien* bezeichneten Nervenknotten geben wiederum Fasern ab, welche teils direkt, teils über die *prävertebralen Ganglien* des Sympathikus (Ganglion coeliacum, Ganglion mesentericum superius und inferius) ihre Erfolgsorgane erreichen. Aber wenn auch eine Faser mehrere Ganglien nacheinander durchsetzt, so findet eine Unterbrechung der Leitung, wie sich mit der Nikotinmethode beweisen läßt, doch stets nur an einer einzigen Stelle statt. Die pupillendilatierenden Fasern passieren z. B. das Ganglion stellatum und die Zervikalganglien, da man durch Reizung unterhalb des Ganglion stellatum Erweiterung bekommt; aber Bepinselung des Ganglion stellatum mit Nikotin unterbricht doch die Leitung nicht, die Fasern laufen also durch das Ganglion stellatum glatt hindurch.

Während die präganglionären Fasern des Sympathikus markhaltig sind, sind die postganglionären marklos. Das ist besonders deutlich bei derjenigen Leitung, welche die Haut mit ihren Gefäßen, ihren Drüsen und glatten Muskeln versorgt; deren präganglionäre Fasern enden nämlich im Grenzstrang, und die postganglionären Fasern treten meistens in den Rami communicantes grisei, deren Farbe von ihrer Marklosigkeit herrührt, in die Spinalnerven zurück, um mit diesen ihre Erfolgsorgane zu erreichen.

Die postganglionären Fasern überwiegen an Zahl über die präganglionären; so ist es möglich, daß sich von einer Wurzel des Zentralnervensystems aus die Erregung auf einen größeren Bezirk ausbreiten kann.

Die Beziehung der einzelnen Wurzeln zu den einzelnen peripheren Organen ist durch systematische Reizung der Wurzeln, kombiniert mit der Nikotinvergiftung (durch CL. BERNARD, GASKELL, LANGLEY u. a.), eruiert worden. Dabei zeigte sich, daß Reizung der Zervikal- und der Sakralwurzeln keine Wirkung auf den Sympathikus hat. *Der Sympathikus entspringt allein aus dem Thorakolumbalmark*, im allgemeinen vom 1. Dorsal- bis zum 2.—5. Lumbalsegment. Weitere Einzelheiten über die Verteilung der Fasern sind aus der Abb. 146 ersichtlich. Danach kommen die postganglionären Fasern für sämtliche Eingeweide des Bauchs aus den prävertebralen Ganglien, für die Haut des Rumpfes und der Extremitäten aus den Ganglien des Grenzstrangs, für den Kopf und für die Brusteingeweide aus den Zervikal- und den obersten Thorakalganglien.

Das parasympathische Nervensystem setzt sich aus Fasern zusammen, welche den Zerebrospinalnerven angehören; sie sind aber dadurch vor den meisten von deren Fasern ausgezeichnet, daß sie erstens der Willkür nicht unterworfen sind, und daß sie zweitens nur über eine periphere Ganglienzelle auf ihr Endorgan wirken. In dieser Art charakterisiert sind Fasern des Okulomotorius, des Fazialis, Glossopharyngeus und Vagus einerseits und Fasern aus dem 2.—4. Sakralsegment andererseits, welche im Nervus pelvicus oder erigenis verlaufen. *Das parasympathische System hat demnach einen sogenannten kranio-bulbären und einen sakralen Abschnitt*; zwischen ihnen und dem Ursprungsgebiet des Sympathikus gibt es Rückenmarksstrecken, von denen aus keinerlei Fasern für die vegetativen Organe entspringen.

Die parasympathischen Fasern des Okulomotorius laufen zum Ganglion ciliare und versorgen den Sphincter iridis und den Ziliarmuskel. Der Fazialis enthält parasympathische Fasern in der Chorda tympani, welche sekretorisch und gefäßerweiternd auf die Speicheldrüsen wirken. Außerdem gibt der Fazialis ebenso wie der Glossopharyngeus sekretorische und gefäßerweiternde Fasern an den Trigeminus ab. Der Vagus versorgt die meisten Organe der Brust und des Bauches mit parasympathischen Fasern.

Der dem Sakralmark entstammende Nervus pelvicus innerviert Colon descendens, Rektum, Anus, Blase und Genitalorgane.

Hieraus folgt, daß *fast sämtliche Organe, welche vom vegetativen Nervensystem abhängen, doppelt innerviert werden, sowohl von sympathischen wie von parasympathischen Nerven.* Wenden wir uns nun der **Physiologie des vegetativen Nervensystems** zu, so wollen wir gleich an die zuletzt genannte anatomische Eigenart anknüpfen mit dem Hinweis, daß *die doppelte Innervation zugleich eine antagonistische Innervation ist;* die einen Nerven wirken hemmend, die anderen fördernd, sei es, daß sie an zwei entgegengesetzt wirkenden Apparaten angreifen, wie in der Iris, sei es, daß sie ein und dasselbe Erfolgsorgan in zweierlei Richtung beeinflussen, wie im Herzen. Beispiele solcher antagonistischen Innervation sind etwa folgende: Am Auge verursacht der Sympathikus Erweiterung, der Okulomotorius Verengerung der Pupille; das Herz wird vom Sympathikus akzeleriert, vom Vagus gehemmt; umgekehrt wird die Peristaltik durch den Splanchnikus gehemmt, durch den Vagus in den oberen, durch den Nervus pelvici in den unteren Darmabschnitten angeregt; die Bronchialmuskeln werden durch den Vagus angespannt, durch den Sympathikus zur Erschlaffung gebracht.

Auch pharmakologisch kommt dieser Antagonismus in interessanter Weise zur Geltung. So gleichartig nämlich das vegetative Nervensystem auf das Nikotin reagiert, so haben seine beiden Bestandteile, das sympathische und das parasympathische Nervensystem, doch gegenüber anderen Giften eine ganz verschiedene Affinität; die Gifte sind teils „sympathikotrop“ und teils „vagotrop“ (H. H. MEYER). Der Sympathikus wird, wie wir schon früher (siehe besonders Kapitel 18) erfahren haben, durch das *Adrenalin* ferner durch β -Tetrahydronaphthylamin gereizt, der Parasympathikus dagegen durch *Muskarin*, *Pilokarpin*, *Physostigmin* und *Cholin*. Umgekehrt wirkt das *Ergotoxin* auf den Sympathikus (wenigstens auf einen Teil desselben) lähmend, das *Atropin* auf den Parasympathikus. So ist z. B. Muskarin ein Hemmungsmittel, Adrenalin ein Beschleunigungsmittel für das Herz; Physostigmin wirkt auf die Pupille konstringierend, Adrenalin dilatierend; und man kann die Pupille weit machen sowohl mit Adrenalin durch Reizung der Sympathikusendigungen im M. dilatator iridis, als auch mit Atropin durch Lähmung der Okulomotoriusendigungen im M. sphincter iridis. Nur die Schweißdrüsen der Haut verhalten sich abweichend; sie werden nicht bloß über den Sympathikus durch Adrenalin erregt, sondern auch durch Pilokarpin, und werden ferner durch Atropin gelähmt, obwohl wir eine parasympathische Innervation bei ihnen bisher nicht kennen. Das Schema der Abb. 146 sucht für dieses abweichende Verhalten eine Erklärung zu geben, indem es eine schwache parasympathische Faserung (blau) dem Thorakolumbalmark und dem Sympathikus beimischt.

Bisher war allein von efferenten Nervenfasern die Rede. Man wird aber mit Recht fragen, ob denn die vegetativen Organe nicht auch mit *zentripetal leitenden Nerven* verbunden sind. Daß die Eingeweide mit afferenten Fasern versehen sind, beweist schon die Tatsache, daß die Organe der Brust und des Bauches unter Umständen lebhaft Schmerzen verursachen können (siehe Kapitel 34). Die afferenten Fasern der Baueingeweide sind im Sympathikus enthalten; Reizung des Vagus unterhalb des Diaphragmas verursacht infolgedessen in den meisten Fällen keinerlei Schmerzäußerung. Die sympathischen Fasern treten auf dem Wege der Rami communicantes albi ins Rückenmark ein, wie Durchschneidungen derselben und Reizungen ihres zentralen Stumpfes

gelehrt haben (LANGLEY). Die sympathischen Nerven für die Haut und die Blutgefäße des Rumpfes und der Extremitäten enthalten dagegen keine zentripetal leitenden Fasern, ebensowenig wie der Sympathikus des Halses. Diese Teile des Körpers werden direkt von den Spinalnerven aus mit afferenten Fasern versehen. Für die Organe der Brust führt der Vagus die afferenten Fasern mit sich, wie wir früher bei Gelegenheit der Erörterung der Selbststeuerung der Atmung und des Depressorreflexes erfahren haben (siehe auch Kap. 34).

Von den afferenten Nerven aus können nun *die Organe des vegetativen Nervensystems* in mannigfacher Weise *reflektorisch beeinflusst* werden; es sei etwa, abgesehen vom Depressorreflex, an den GOLTZschen Klopfversuch, an die Pupillenverengung auf Lichteinfall oder an die Blutdrucksteigerung bei Reizung der Haut erinnert. Auch vom Gehirn aus ist das vegetative Nervensystem zu beeinflussen, wie die Begleiterscheinungen psychischer Erregungen zeigen; denn jede Stimmung äußert sich unwillkürlich in der Betätigung der Eingeweide. So bleibt vor Schreck das Herz stehen, und die Blutgefäße des Kopfes verengen sich, der Anblick einer leckeren Speise treibt Speichel in die Mundhöhle, Freude läßt das Herz rascher schlagen. Ja es genügt bisweilen die lebhaftere Vorstellung der entsprechenden Erregungen, um das vegetative Nervensystem in Tätigkeit zu versetzen; so vermag der bloße Gedanke an ein schreckliches Geschehnis den Puls zu verlangsamen, die deutliche Vorstellung eines dunklen Objektes kann Pupillenerweiterung herbeiführen. Auf die Weise kann sogar bis zu einem gewissen Grad *eine willkürliche Beeinflussung des vegetativen Nervensystems vorgetäuscht* werden.

Dieser Einfluß des Großhirns auf das vegetative Nervensystem ist dadurch begünstigt, daß die einzelnen sympathischen und parasymphathischen Innervationen offenbar im Gehirn an bestimmter Stelle, am Boden des III. Ventrikels vertreten und sogar *zentral zusammengefaßt* sind. Namentlich für den Sympathikus scheint *in der Regio hypothalamica* ein Ort gegeben zu sein, von dem aus durch elektrische Reizung zahlreiche sympathische Funktionen anzuregen sind, wie Pupillen- und Lidspalten-erweiterung, Gefäßkonstriktion, Schweißsekretion, Glykosurie, Uterus-, Blasen- und Rektumkontraktion; auch die Abhängigkeit der Körpertemperatur von dieser Stelle sei noch einmal vermerkt (ECKHARDT, KARPLUS und KREIDL, ASCHNER) (siehe dazu S. 227 u. 270). Heftige *psychische Emotionen setzen darum auch den gesamten sympathischen Apparat in Bewegung, welcher auf die Weise den äußeren Ausdruck der Gemütsbewegungen beherrscht* (H. H. MEYER, METZNER). Denn reizt man z. B. den Halssympathikus bei einer Katze, so erweitern sich die Lidspalten, die Augen treten hervor und bekommen weite Pupillen, schaumiger Speichel tritt aus, und die Haare auf dem Kopf sträuben sich; beim Menschen erblaßt zugleich die Haut und bedeckt sich mit Schweiß. Tritt dazu die Erregung des Grenzstrangs, so sträuben sich auch die Haare auf dem Rücken, bei manchen Tieren, wie Hund und Katze, besonders auf der Mitte des Rückens in einem langen Streifen; beim Menschen verursacht die entsprechende Kontraktion der glatten Hautmuskeln eine „Gänsehaut“, deren Zustandekommen zusammen mit der Kontraktion der Gefäße ein Gefühl von Schauern den Rücken entlang verursacht; das Herz schlägt in verändertem Tempo, und wie die Beobachtung auf dem Röntgensschirm lehrt (siehe S. 33 u. 55), bleibt die Peristaltik stehen, die Sekretion der Verdauungsdrüsen versiegt. So ist es also durchweg

der Ausdruck sympathischer Erregung, wenn man von einer seelischen Erschütterung zu sagen pflegt, sie wirke haarsträubend und mache das Herz stillestehen, der Schreck sei einem ins Gedärm gefahren, oder es laufe einem vor Schreck kalt den Rücken entlang.

Diese Wirkung auf den sympathischen Apparat wird um so mehr zu einer Gesamtwirkung, als ja auch die innere Sekretion der Nebennieren unter dem beherrschenden Einfluß des Sympathikus steht (siehe S. 259) und Adrenalin hinwiederum ein generelles Reizmittel für den Sympathikus darstellt. Dem entspricht die merkwürdige Angabe von CANNON, daß ein überlebendes Stück Katzendarm, welches, im Blut der Katze suspendiert, gewöhnlich mit seinen rhythmischen Bewegungen fortfährt (siehe S. 54), alsbald zum Stillstand kommt, wenn die Katze, welche das Blut spendet, vorher heftig aufgeregt worden ist. In ähnlicher Weise beteiligen sich übrigens auch andere Hormondrüsen an der Einstellung des vegetativen Nervensystems auf einen bestimmten Erregungszustand, z. B. die Schilddrüse, das Pankreas, die Nebenschilddrüsen. Es sei dafür auf das früher Gesagte verwiesen.

27. Kapitel.

Bedeutung und Wesen der Sinnesfunktionen.

Empfindungsmodalitäten und Empfindungsqualitäten 420. Adäquate Reize und spezifische Dispositionen 421. Das Gesetz von den spezifischen Sinnesenergien 422. Reizschwelle und Unterschiedschwelle; das WEBBERSche Gesetz 424.

In zahlreichen der vorangegangenen Abschnitte haben die Sinnesorgane bereits eine Rolle gespielt; denn mag uns die Beobachtung entgegengetreten sein, daß ein Speiseteilchen, welches in den Kehlkopf eingedrungen ist, einen Anreiz zum Husten bildet, mag die Ätzung der Nasenschleimhaut mit Ammoniak Niesen auslösen, mag der Geruch der Nahrung die Speichel- oder die Magendrüsen veranlassen, ihren Saft abzuscheiden, mag eine schmerzhaft Reizung der Eingeweide uns in die Knie sinken lassen, oder mag ein Licht die Pupille verengern, — wo immer wir durch Motion oder Sekretion Stellung zu unserer Umwelt nehmen, stets ist der Angriffspunkt für den Reiz ein Sinnesorgan.

Wir wollen uns nun vor die Frage stellen, was für Einrichtungen es sind, welche die Sinnesorgane zur Reizaufnahme so besonders geeignet machen. Dies ist vor allem eine physiologische Frage. Aber die bei weitem stärkere Anregung, die Natur der Sinnesorgane zu ergründen, welche jeder philosophierende Mensch verspürt, wenn er sich über den Zusammenhang seiner Selbst mit dem, was ihn umgibt, ins Klare zu kommen sucht, fließt aus der Jahrhunderte alten und doch immer aufs neue die Geister erregenden Erkenntnis, daß all unser Wissen von der Welt und von unserem eigenen Körper ohne die Tätigkeit unserer Sinne nicht zu denken ist, oder wie es in dem oft zitierten Satz von LOCKE ausgedrückt ist: nihil est in intellectu, quod non antea fuerit in sensu. Nur durch unsere Sinne empfinden wir die Außenwelt, unsere Sinnesempfindungen sind unsere Umwelt. Man denke sich das Farbige, das Riechende, das Schmeckende, das Schmerzhaftes, das Tönende fort, dann verschwindet unsere Welt; Farben, Töne, Wärmen, Drucke in mannigfaltiger Kombination bedeuten uns die Objekte um uns.

Wir können also die Welt, so wie wir sie als eine Realität vor uns hinstellen, nur erfassen, soweit sie auf unsere Sinne wirkt, sie hat keine von uns unabhängige Wirklichkeit. Dokument dessen ist, daß der Mensch ja auch die Wissenschaft von den Kräften der Außenwelt, die Physik, unbewußt im wesentlichen sinnesphysiologisch und psychologisch modelliert hat: die Akustik ist die Lehre, welche mit dem Gehör zu tun hat, die Optik befaßt sich mit den Lichtempfindungen, welche das Auge

vermittelt, Mechanik und Wärmelehre nehmen Bezug auf den Tast- und Temperatursinn; die Lehren von der Elektrizität und dem Magnetismus aber haben sich nur deshalb spät entwickelt, weil wir die elektrischen und magnetischen Kräfte nicht unmittelbar mit dafür geeigneten Sinnen verspüren können. Hätten wir mehr oder hätten wir andere Sinne, hätten wir einen Sinn für die langen elektrischen Wellen, wie wir einen Sinn für die kürzeren uns als Licht erscheinenden Wellen des Äthers haben, würden Röntgenstrahlen, Magnetfeldschwankungen, korpuskuläre Strahlungen und Gravitationseinflüsse uns unmittelbar erregen, so sähe die Welt ganz anders für uns aus. Schon PROTAGORAS lehrte, daß der Mensch das Maß aller Dinge ist, daß es von unseren Sinnen abhängt, wie uns die Dinge erscheinen, und daß dieser Schein das allein uns Gegebene ist; unsere Sinne treffen also nur eine Auslese unter den Vorgängen in der Außenwelt. Und beachten wir weiter, daß ein und dasselbe Ding je nach dem Zustand unseres Hautsinnnes bald warm, bald kühl, je nach dem Zustand unseres Auges bald schwarz, bald weiß erscheinen kann, daß dieselben Ätherwellen, wenn sie das Auge treffen, von uns als Licht, wenn sie die Haut treffen, von uns als Wärme empfunden werden, dann erkennen wir vollends, daß „die Sinne uns nur Wirkungen der Dinge vermitteln, nicht getreue Abbilder oder gar die Dinge selbst“ (HELMHOLTZ); hinter der Sinnenwelt verbirgt sich das unerkennbare Ding an sich.

Natürlich ist hier nicht der Ort, die erkenntnistheoretischen Probleme, welche soeben mit knappen Worten nur gerade angedeutet wurden, in ihrem ganzen Umfang aufzurollen. Es kam nur darauf an zu zeigen, daß die Sinne ebenso sehr durch die grenzenlose Bedeutung, wie auch durch die Begrenztheit dessen, was sie uns vermitteln, uns fesseln, und daß der Wert sinnesphysiologischer Untersuchungen weit über die Interessen der Naturforschung und der praktischen Medizin hinausragt.

Wir wollen nun zunächst einmal versuchen festzustellen, *was wir unter einem Sinnesorgan zu verstehen haben*. Bei der bekannten, dem Laien geläufigen Einteilung versteht man unter den fünf Sinnen fünf anatomische Bezirke auf der Körperoberfläche, Auge, Ohr, Nase, Zunge und Haut. Diese Einteilung befriedigt aber nicht mehr, sobald man auch an die durch die Sinnesreize verursachten Empfindungen denkt. Denn das „Gefühl“ ist nicht nur an die Haut gebunden, sondern wir fühlen auch mehr oder weniger unsere inneren Organe und können daher davon sprechen, daß Gefühl nicht bloß durch den Hautsinn, sondern auch durch einen Eingeweidesinn, einen Muskelsinn, einen Sehnensinn u. a. vermittelt wird.

HELMHOLTZ legte deshalb auch den Nachdruck bei der Definition der Sinnesorgane auf die *Empfindungen*. Unter einer solchen versteht man einen einfachsten Bewußtseinsvorgang, ein psychisches Element, das sich in etwas noch Einfacheres nicht mehr zerlegen läßt. Die Sonderexistenz einer Empfindung ist allerdings eine Fiktion; denn wir können uns etwas Rotes nicht vorstellen, ohne daß es in der Vorstellung zugleich eine gewisse Form hätte und einen gewissen Ort im Raum einnähme, wir können uns eine Druckempfindung nicht unabhängig von unserer Haut oder sonst einem Körperteil vorstellen. Immer treten die Empfindungen in Komplexen auf, bilden die Bestandteile von *Wahrnehmungen*. Aber halten wir einmal an der Abstraktion der Empfindung fest, dann können wir durch Selbstbeobachtung konstatieren, daß ein

Sinnesorgan, z. B. das Auge, Empfindungen erzeugt, welche wesensverwandt erscheinen, wie rot, gelb, violett, schwarz oder wie ein Rot von größerer oder geringerer Intensität. HELMHOLTZ (1879) bezeichnete diese von einem Sinnesorgan abhängigen Empfindungen als **Empfindungsqualitäten**. Die Wesensverwandtschaft, die Vergleichbarkeit ist dagegen nicht mehr vorhanden, wenn wir die Empfindungen, welche ein anderes Sinnesorgan auslöst, hinzuziehen. Es ist ein Ding der Unmöglichkeit zu sagen, ob der würzige Geruch einer Speise oder die Wärme einer Flüssigkeit oder das Rot einer Blume die größere Stärke hat; heiß und blau oder salzig und der Ton c haben gar nichts miteinander gemein, sie gehören, wie FICHTE es nannte, verschiedenen Qualitätskreisen oder, wie HELMHOLTZ es ausdrückte, verschiedenen **Empfindungsmodalitäten** an. *Ein Sinnesorgan ist danach ein Organ, welches durch die Produktion einer bestimmten Modalität von Empfindungen ausgezeichnet ist.*

Indessen auch diese Definition hat ihre Schwächen. So unüberbrückbar einerseits etwa die Empfindungen des Seh- und des Hörorgans auseinanderzuklaffen scheinen, so leicht meinen wir andererseits Übergänge zwischen den Empfindungen des Geruchs- und des Geschmacksorgans auffinden zu können, wenn wir z. B. den Essiggeruch nicht recht vom Essiggeschmack zu sondern vermögen, oder wenn wir von dem süßen Geruch des Chloroforms sprechen. Ferner werden wir bedenklich, ob nicht der Hautsinn in mehrere Sinne mit verschiedener Modalität aufzuteilen ist und in wie viele. Denn kalt und drückend ist wohl gerade so unverwandt, wie kalt und blau. Aber sind warm und kalt als Qualitäten einer und derselben Modalität aufzufassen, wo doch am Indifferenzpunkt der Temperaturempfindung einerseits die Reihe der Kälteempfindungen verschiedener Intensität, andererseits die Reihe der Wärmeempfindungen beginnt? Und bildet nicht der ebenfalls von der Haut auszulösende Schmerz ein einigendes Band um sämtliche Hautempfindungen?

Vollends unbefriedigend wird die HELMHOLTZsche Einteilung, wenn wir vergleichende Sinnesphysiologie treiben wollen. Denn wir haben uns ja schon mehrfach klar gemacht (siehe S. 381 ff.), daß wir von den Sinnesempfindungen anderer Wesen nur per analogiam reden können, und daß wir es als einen waghalsigen Sprung ins Dunkle empfinden, wenn wir über die Empfindungen etwas aussagen sollen, welche die Sinnesorgane eines Regenwurmes oder einer Qualle produzieren. Und gehen wir von der berechtigten Annahme aus, daß die Sinneswerkzeuge der höheren Tiere aus einfachsten Formen durch Differenzierung entstanden sind, so werden wir, wenn wir allein an das Psychische appellieren, vor die Aufgabe gestellt, darüber auszusagen, ob wohl am Anfang der Entwicklungsreihe ein Empfindungsvermögen für Licht oder eines für Druck gestanden habe, ob den niederen Tieren ein Universal-sinnesorgan, „ein Übergangssinnesorgan“, wie RANKE es nannte, eigen sei, das zugleich Gesichts-, Tast- und Geschmacksempfindungen auslösen könne. Ist nun aber Druck einfacher als Licht? Und können wir uns eine Druckempfindung vorstellen, welcher etwas von Lichtempfindung anhaftet?

Wir müssen also den Versuch machen, *eine rein physische Definition* aufzustellen. Diese ist in der Tatsache zu finden, daß jedes Sinnesorgan darauf eingerichtet ist, den Körper von einer ganz bestimmten

Art von Vorgängen in der Außenwelt zu benachrichtigen; das Sehorgan spricht auf Ätherwellen an, das Gehörorgan auf longitudinale Luftwellen, Geruchs- und Geschmacksorgane auf Änderungen in der chemischen Beschaffenheit der Umgebung usw. Für jedes Sinnesorgan gibt es also einen **adäquaten Reiz** (JOHANNES MÜLLER 1826). Das Zustandekommen der adäquaten Reizbarkeit ist zum Teil leicht verständlich. Dadurch, daß der rezipierende Bestandteil des Auges, die Netzhaut, in die Tiefe einer Knochenhöhle verlagert und überdeckt ist von der prallen Kugel der durchsichtigen Medien des Auges, ist das Auge für Druck, für Schallwellen, für chemische Agenzien unzugänglich gemacht und einzig für Ätherwellen durchlässig. Entsprechend ist das innere Ohr durch seine verborgene Lage der Einwirkung anderer Reize als des adäquaten entzogen. Außerdem sind die empfindlichen Sinnessubstanzen aber auch für die adäquaten Reize irgendwie ganz besonders empfindlich und für andere Reize unempfindlich; so kann man mit chemischen Agenzien auch andere Zellen und Gewebe erregen, aber die chemische Empfindlichkeit der Zunge und der Nase ist besonders groß, dagegen reagieren diese gar nicht auf Druck, Licht, Temperaturänderungen oder Schallwellen, obwohl sie an sich dafür mehr oder weniger zugänglich wären, und obwohl manche andere Gewebe darauf ansprechen. *Die Sinnesorgane besitzen also auch eine „spezifische Disposition“ für bestimmte Reizformen* (NAGEL), deren Bedingungen jedoch noch der Aufklärung bedürfen.

Erst durch diese Einrichtungen ist der Körper befähigt, die Objekte der Umwelt zu unterscheiden, d. h. unter der Voraussetzung einer geeigneten Verknüpfung der einzelnen Sinnesorgane mit bestimmten effektorischen Organen auf die verschiedenen Reize in verschiedener Art und Weise zu reagieren.

Halten wir an dieser Definition der *Sinnesorgane als Organe adäquater Reizbarkeit* fest, dann können wir sie wie irgend ein Objekt der Naturwissenschaft behandeln und bei ihrem Studium prinzipiell von den begleitenden Sinnesempfindungen abstrahieren; aus praktischen Gründen werden wir freilich gut tun, immer wieder auf die Empfindungen zurückzugreifen, weil sie für die Untersuchung der Funktionsweise der menschlichen Sinnesorgane weitaus das bequemste Reagens auf eine Erregung darstellen. Bei dieser Definition werden wir freilich auch leicht dazu kommen, die Zahl oder die Umgrenzung der Sinnesorgane über das gewohnte Maß hinaus zu erweitern. Schon die von I. R. EWALD herrührende Bezeichnung sechster Sinn für denjenigen Teil des Labyrinths, welcher nicht Hörfunktion hat, sondern auf Lage- und Bewegungsänderungen des Körpers bzw. des Kopfes anspricht, begegnet einem gewissen Widerstand, weil dies Organ zwar für eine bestimmte Reizform spezifisch disponiert ist, uns aber keine oder nur höchst undeutliche Empfindungen produziert. Mit dem gleichen Rechte könnte man die Magenschleimhaut oder die Duodenalschleimhaut als chemische Sinnesorgane oder als Teile des Geschmacksorgans ansprechen, weil sie, wie wir früher (siehe S. 31 und S. 34) erfuhren, auf ganz bestimmte chemische Stoffe ansprechen und den Körper zu ganz bestimmten, nämlich sekretorischen Reaktionen anregen.

Der Selbstbeobachtung bei der Erregung der Sinnesorgane verdanken wir auch die Kenntnis, daß es neben den adäquaten noch **inadäquate Reize** gibt, d. h. Reize, welche ungewöhnlich und unvollkommen die Sinnesorgane in Tätigkeit versetzen. Das bekannteste

Beispiel ist die Lichterscheinung, das „Phosphen“, welches man bei einem Druck aufs Auge oder beim Hindurchgehen eines galvanischen Stroms durch den Kopf zu sehen bekommt. Derselbe galvanische Strom erzeugt beim Passieren der Nase eine Geruchsempfindung, beim Passieren des inneren Ohrs ein Geräusch und eine Korrektionsbewegung für die Lage des Körpers. Bedeutsam ist, daß als inadäquater Reiz nicht jede beliebige Reizform auftreten kann, sondern daß die inadäquaten Reize solche sind, welche auch sonst allgemein Erregungswert besitzen, wie eben Druck oder ein elektrischer Strom. Dieselben Reize können sogar vom Sinnesnerven aus die dem zugehörigen Sinnesorgan adäquate Empfindung erregen. Quetscht man z. B. den Ulnaris da, wo er am Ellbogen oberflächlich über den medialen Epikondylus des Humerus verläuft, so spürt man nicht bloß einen Druck in der Haut des Kleinfingerballens, an welcher sich der Ulnaris verbreitet, sondern auch Wärme oder Kälte, und drückt oder elektrisiert man bei einem Defekt im Trommelfell die Chorda tympani innerhalb der Paukenhöhle, so kommt eine deutliche Geschmacksempfindung zustande. Dagegen gelingt es mit Ätherwellen nicht einmal den Optikusstamm zu erregen, wenn er unmittelbar nach der Herausnahme eines Auges bloßliegt, und ebensowenig läßt sich der Akustikus oder sonst ein Sinnesnerv durch Schallwellen erregen.

Die Feststellung der inadäquaten Reizbarkeit gab JOHANNES MÜLLER Anlaß zur Aufstellung seines berühmten und viel erörterten **Gesetzes von den spezifischen Sinnesenergien**. Dieses besagt, daß, wie auch immer die Sinnesnerven erregt werden mögen, sei es vom Sinnesorgan aus, welches durch einen adäquaten oder inadäquaten Reiz getroffen wird, sei es durch direkte Reizung, sei es durch innere, z. B. Blutreize, es stets seine spezifische Betätigungsweise offenbart, d. h. mit der Produktion seiner spezifischen Empfindung reagiert. Mag z. B. Licht oder Druck das Auge treffen, mag der Optikus elektrisch durchströmt werden, oder mögen die Fasern der optischen Leitung im Gehirn irgendwie in Tätigkeit kommen, stets resultiert eine Lichtempfindung. Der Ort der spezifischen Betätigungsweise wurde von JOHANNES MÜLLER anfangs im Sinnesnerven, später im Sinneszentrum erblickt, welches von seinem Sinnesorgan aus vermittelt seines Sinnesnerven erregt wird; letzteren sah er als einen indifferenten Leiter an, dessen Funktion sich in nichts von der Funktion anderer, etwa motorischer Nervenfasern unterscheidet.

Die Bedeutung des Gesetzes ist zweifellos übertrieben worden; man hat ihm eine so allgemeine Gültigkeit zugesprochen, als ob bewiesen wäre, daß bei jedem Sinn die spezifische Energie sowohl durch adäquate als auch durch inadäquate Reizung geweckt werden könne, und daß sich die spezifischen Energien der Sinne nicht bloß in den Empfindungsmodalitäten äußern, sondern daß auch die einzelne Faser der nervösen Sinnesleitung ihre spezifische Energie besitze, derart daß sich ihre Erregung in einer bestimmten Empfindungsqualität offenbare. Wäre dies wirklich der Fall, dann wären die Konsequenzen für die Beurteilung unseres Erkenntnisvermögens sehr weitgehende; denn dann käme es für unsere Wahrnehmungen nicht auf die Natur der Reize, also nicht auf die äußeren Vorgänge in unserer Umwelt an, sondern nur auf die den Nervenfasern von vornherein eigentümliche Art der Betätigung, und nur die spezifische Disposition rettete uns vor steten „Sinnestäuschungen“.

Aber erstens gelingt es keineswegs in der Regel, durch inadäquate Reizung der Sinnesnerven mit einem der allgemeinen Nervenreizmittel

ihre spezifische Energie, d. h. ihre Empfindungsmodalität auszulösen. Wenn seit JOHANNES MÜLLER zum Beweis der mechanischen Erregbarkeit und der spezifischen Energie des Optikus angegeben wurde, daß bei der operativen Entfernung eines Auges im Moment der Nervendurchschneidung eine Lichterscheinung auftritt, so ist die Deutung wahrscheinlich unrichtig; denn die Lichterscheinung rührt wahrscheinlich nicht von der Quetschung des Nerven, sondern von einer gleichzeitigen Zerrung der Netzhaut her, wie eine solche auch jeder Zeit bei einem Druck auf den Bulbus eine Lichtempfindung erzeugen kann. Der Lichtblitz infolge galvanischer Durchströmung des Auges braucht ebenfalls nicht auf die Reizung des Nerven, sondern kann auf die Erregung des Sinnesorgans selber bezogen werden. Ebensovienig gelingt es anscheinend, durch direkte Reizung des Akustikus eine Schallempfindung hervorzurufen, und das gleiche gilt für die Geruchsnerve. Allein für die Geschmacksnervenfasern, welche in der Chorda tympani enthalten sind, steht es fest, daß sie, wie bereits erwähnt wurde, bei mechanischer oder elektrischer Reizung spezifisch ansprechen und deutliche Geschmacksempfindungen auslösen.

Zweitens kann durch inadäquate Reizung noch viel weniger die Fülle der verschiedenen Empfindungsqualitäten von den Sinnesnerven aus ausgelöst werden; dies gelingt selbst von den Sinnesorganen aus nur unvollkommen. Zwar ruft die galvanische Durchströmung des Auges Farbigkeiten hervor, welche nach HELMHOLTZ, G. E. MÜLLER u. a. je nach der Stromrichtung verschieden sind; aber die elektrische Reizung des Gehör- und des Geruchsorgans erzeugt nur undeutliche Sensationen, und auf die gleiche Weise ist beim Geschmackorgan niemals die Qualität des Salzigen oder des Süßen auszulösen, sondern je nach der Stromrichtung ein saurer und ein alkalisch-beißender Geschmack, welche beide mit großer Wahrscheinlichkeit als Folge einer Art elektrolytischer Zersetzung oder einer Membranpolarisation (BETHE) innerhalb des Geschmackorgans aufgefaßt werden können (siehe auch S. 331).

Aus all dem folgt, daß es für das Zustandekommen ganz bestimmter Empfindungsqualitäten doch auf bestimmte Formen der äußeren Reize ankommt, welche vermöge der spezifischen Disposition der Sinnesorgane den Sinnesnerven zugeführt werden, und wenn die Nerven alsdann ansprechen, so muß auch — entgegen der Lehre von der Indifferenz der Nerven als Leitungsorgane — dem jeweilig in ihnen ausgelösten Erregungsvorgang etwas Spezifisches anhaften. Denn verhielten sich die Sinnesnerven geradeso, wie irgendwelche anderen Nerven, dann könnte nicht bloß in dem einen sicheren Fall der Chorda tympani die inadäquate Reizung in der spezifischen Empfindungsmodalität beantwortet werden. *Die Sinne sind also in ihrer anatomischen Totalität, vom peripheren Organ bis zum Zentrum, als dem äußeren Reiz adaptiert anzusehen.* Ob dabei eine und dieselbe Nervenfasern auf verschiedene Reizformen oder nur auf eine einzige abgestimmt ist, ist einstweilen unentschieden.

So orientieren uns also die Sinne vollkommener über die Außenwelt, als es die Lehre von den spezifischen Sinnesenergien zunächst möglich erscheinen ließ; denn wenn sie uns auch nicht „Abbilder“ der Dinge geben (siehe S. 419), so geben sie uns doch wenigstens „Zeichen“ der Dinge, mit Hilfe deren wir uns zurechtfinden können (HELMHOLTZ). Nur unter seltenen und abnormen Bedingungen „täuschen“ sie uns, so etwa, wenn eine Vergiftung mit Santonin uns Gelbsehen verursacht, wenn Bepinseln der Zunge mit Gymnemasäure die Süßempfindung

aufhebt, so daß ein Stück Zucker uns den Eindruck eines Steins macht, wenn der elektrische Schlag durchs Auge die Erscheinung eines Blitzes bewirkt, oder wenn eine Zirkulationsstörung oder sonst ein abnormer Reiz im Sehzentrum in uns eine Gesichtshalluzination erweckt.

Die Relativität und Subjektivität unserer Erkenntnis auf Grund der Sinnesfunktionen äußert sich aber noch in anderer Hinsicht, nämlich nicht bloß, wenn wir die Beziehungen zwischen der Qualität der Empfindungen und der Natur der Vorgänge in der Außenwelt untersuchen, sondern auch, wenn wir die Intensität der Empfindungen mit der Größe der uns erregenden äußeren Vorgänge vergleichen. Wenn z. B. kurz nacheinander verschiedene Drucke auf unsere Haut wirken, so vermögen wir vielfach wohl anzugeben, welcher Druck der größere ist, aber ein genaues Maß für die Reizgröße haben wir in der Intensität der Empfindungen durchaus nicht; *Empfindungen lassen sich überhaupt nicht so wie physikalische Größen messen.*

Aber noch mehr: Jeder Reiz muß eine gewisse Minimalgröße überschreiten, um überhaupt eine Empfindung auszulösen; man bezeichnet diese Größe als die *Reizschwelle*. Je höher der Schwellenwert ist, um so geringer ist die Empfindlichkeit des Sinnesorgans, d. h. seine Fähigkeit, eine Empfindung auszulösen. Auf der anderen Seite kann ein Reiz aber auch in infinitum anwachsen, ohne daß das Sinnesorgan darüber Auskunft zu geben vermöchte; denn die von ihm erregten Empfindungen gehen über ein gewisses Maß nicht hinaus. Auch hierin kommt demnach die Subjektivität unseres Erkennungsvermögens zum Ausdruck.

Nur in einem Fall scheint die Möglichkeit einer Aufstellung quantitativer Beziehungen zwischen Reiz und Empfindung vorzuliegen, nämlich bei der Feststellung der sogenannten *Unterschiedsschwelle*. Darunter versteht man die kleinste Differenz zweier Reizgrößen, welche eben wahrgenommen werden kann. Die Unterschiedsschwelle bestimmt man also z. B., wenn man eine Netzhautstelle mit einer bestimmten Lichtquelle beleuchtet und nun zusieht, um wieviel stärker eine zweite Lichtquelle, die kurz nach der ersten dargeboten wird, sein muß, damit eben ein Helligkeitsunterschied bemerkt wird. Man kann demnach anscheinend den Unterschied zweier physikalischer Größen, zweier Drucke, zweier Schalle oder zweier Lichter, direkt an den eben merklichen Empfindungszuwächsen messen.

Derartige Messungen nahm zuerst E. H. WEBER (1831) im Gebiet des Drucksinns vor. Er legte kurz nacheinander, d. h. in einem Intervall von 15"—30", auf ein und dieselbe Hautfläche verschiedene Gewichte und ließ angeben, wann ein Druckunterschied wahrgenommen wurde. Er fand, daß, wenn jemand z. B. 15 Gewichtseinheiten Belastung eben von 14 unterscheiden, also einen Zuwachs von 1 Einheit wahrnehmen konnte, er nicht 30 von 29, sondern nur 30 von 28, also einen Zuwachs von 2, und nicht 60 von 59, sondern nur 60 von 56, also einen Zuwachs von 4 Einheiten unterscheiden konnte. WEBER leitete daraus die nach ihm als *WEBER'sches Gesetz* bezeichnete Regel ab, daß *die eben merklichen absoluten Reizunterschiede nicht gleich sind, sondern daß sie proportional den Reizintensitäten wachsen*, oder anders ausgedrückt: daß *die relativen Unterschiedsschwellen unabhängig von den absoluten Reizgrößen konstant sind*. Dies Gesetz sollte nicht bloß für Druckgrößen gültig sein, sondern auch für Helligkeiten, für Schallintensitäten, für Temperaturgrößen, u. a. Z. B. folgt die Unabhängigkeit der relativen Unterschiedsschwelle von

der absoluten Reizgröße für Helligkeiten schon aus der einfachen Beobachtung, daß, wenn man eine Photographie betrachtet, die Helligkeitsunterschiede darauf im allgemeinen richtig wiedergegeben erscheinen, auch wenn man die Photographie bei sehr verschiedenen Beleuchtungen betrachtet, obwohl die absoluten Helligkeitsunterschiede dann je nach der Beleuchtung sehr verschieden sind. Ja sogar auf so komplexe Reizgrößen, wie sie in einem Wertgegenstand gegeben sind, ist das WEBERsche Gesetz angewandt worden: die Mark in der Hand des Bettlers hat einen weit größeren Erregungswert, als dieselbe Mark in der Hand des Reichen.

Indessen haben zahlreiche Beobachtungen ergeben, daß die Formulierung von WEBER nur innerhalb gewisser, ziemlich enger Grenzen der Reizintensitäten richtig ist; das Gesetz versagt ebensowohl bei schwachen, wie bei starken Reizen in dem Sinn, daß die Unterschiedsempfindlichkeit dann kleiner wird. Für schwache Druckreize lehrt dies z. B. die folgende Tabelle nach Versuchen von STRATTON:

Anfangsgewicht J	Eben unterscheidbares Vergleichsgewicht	Zuwachs ΔJ	$100 \cdot \frac{\Delta J}{J}$
1	1,5	0,5	50
5	6,0	1,0	20
10	11,01	1,01	10,1
25	26,33	1,33	5,3
50	52,11	2,11	4,2
75	77,76	2,76	3,7
100	103,53	3,53	3,5
150	155,03	5,03	3,4
200	206,40	6,40	3,2

Daß die absolute Größe eines Reizzuwachses nicht entscheidend für das Auftreten einer Empfindung ist, das nachzuweisen bedarf es ja übrigens gar nicht erst besonderer Messungen. Denn zahlreiche gewöhnliche Beobachtungen lehren, daß der gleiche physikalische Vorgang ganz verschiedenen Reizwert hat je nach den Bedingungen, unter denen er zur Wirkung gelangt; ein leises Geräusch z. B., das wir an einem halbwegs ruhigen Ort sofort wahrnehmen, kann bis zur Unmerklichkeit durch ein lautes Getöse übertäubt werden.

Aber die Beziehung zwischen dem eben merklichen Reizzuwachs und dem schon vorhandenen Reiz braucht nicht gerade von der Art der im WEBERSchen Gesetz ausgedrückten einfachen Formulierung zu sein; nach PÜTTER läßt sich die Unterschiedsschwelle viel genauer als eine Exponentialfunktion der Reizintensität darstellen. Wie dem aber auch sein mag, auf jeden Fall *machen uns die Sinnesorgane keine absoluten Angaben über die Reizgrößen, sondern die wahrnehmbaren Unterschiede sind im allgemeinen um so größer, je größer die schon bestehenden Einwirkungen sind.* Wie das vielleicht physiologisch gedeutet werden könnte, soll hier nicht erörtert werden.

28. Kapitel.

Der dioptrische Apparat des Auges.

Strahlengang im zentrierten optischen System 427. Die Kardinalpunkte des Auges; das reduzierte Auge 428. Die optischen Konstanten des Auges 429. Die Akkommodation des Auges 433. Die Grenzen des Akkommodationsvermögens; die Akkommodationsbreite 433. Die Presbyopie 439. Myopie und Hypermetropie 440. Die Pupillenreaktion 440. Die chromatische Aberration 441. Die sphärische Aberration 442. Der Astigmatismus 442. Die mangelhafte Zentrierung 444. Trübungen in den brechenden Medien 445. Das Augenleuchten 447. Der Augenspiegel 447.

Der Gesichtssinn erregt in uns die ganze Fülle der Lichter in ihrer verschiedenen Farbigkeit und Intensität, wir empfinden sie in bestimmter Ausdehnung und an einem bestimmten Ort, sie ordnen sich zu Sehdingen von bestimmter Form und Größe, welche ein bestimmtes Lageverhältnis zueinander einnehmen, gegebenenfalls sehen wir sie in Bewegung. All das beruht zuvörderst auf der Tätigkeit der Netzhaut, welche durch den ihr adäquaten Reiz der Ätherwellen — oder wie wir gewöhnlich sagen — durch Lichtstrahlen hervorgerufen wird. Dementsprechend ist es unsere Hauptaufgabe, die Beziehungen zwischen den physikalischen Vorgängen in der Außenwelt und den physiologischen Prozessen der Netzhaut klar zu legen. Aber zwischen Außenwelt und Netzhaut liegt der dioptrische Apparat des Auges, welcher dazu da ist, die räumlich verschieden verteilten Ausgangspunkte der Lichtstrahlen auf die Netzhaut zu projizieren, so daß diese in entsprechendem Maß an verschiedenen Stellen verschieden erregt wird und dadurch die Möglichkeit einer Unterscheidung der physikalisch-optischen Verhältnisse der Außenwelt gewährt. Von diesem dioptrischen Apparat soll zuerst die Rede sein.

Das Auge ist vergleichbar einer photographischen Kamera; dort wie hier ist der lichtempfindlichen Schicht ein zentriertes optisches System vorgelagert, durch welches den einfallenden Lichtstrahlen ein bestimmter Weg vorgeschrieben wird. Im Hintergrund des Auges entsteht auf die Weise unter bestimmten Bedingungen ein scharfes flächenhaftes Bild der im Raum vor dem Auge befindlichen Gegenstände, wie man sich leicht an einem frischen Rindsauge überzeugen kann, in dessen Kuppe man eine Öffnung hineinschneidet, um in das Innere blicken zu können.

Unter einem *zentrierten optischen System* versteht man ein System dioptrischer Medien, welche mit gekrümmten Flächen aneinander grenzen, deren Krümmungsmittelpunkte auf einer Geraden, der optischen Achse, gelegen sind. Die

Abb. 147 zeigt, wie im Auge die dioptrischen Medien durch Hornhaut, Humor aqueus, Linse und Glaskörper, die Trennungsf lächen durch vordere und hintere Hornhautfl äche und vordere und hintere Linsenfl äche gegeben sind. Das dioptrische System des Auges ist von dem einer photographischen Kamera besonders dadurch unterschieden, daß hinter dem System der gekrümmten brechenden Fl ächen nicht Luft, sondern Glaskörper liegt.

Der Gang beliebiger in ein zentriertes optisches System einfallender Lichtstrahlen läßt sich unter der Voraussetzung, daß die Winkel, welche von den Strahlen und der optischen Achse eingeschlossen werden, nur klein sind, berechnen, wenn die Krümmungsradien der sphärischen brechenden Fl ächen, die Abstände dieser auf der optischen Achse und die Brechungsindizes der brechenden Medien bekannt sind. Die Rechnungen sollen hier nicht durchgeführt, nicht einmal angedeutet, sondern es sollen nur einige der Ergebnisse mitgeteilt werden.

Zunächst betrachten wir den einfachen Fall, daß nur eine Kugelfläche zwei Medien (I und II) mit verschiedenem Brechungsindex voneinander trennt (siehe Abb. 148).

Sei k der Krümmungsmittelpunkt, f_1 der erste und f_2 der zweite Brennpunkt; alsdann gelten folgende Sätze:

1. Strahlen, welche in Medium I in der Richtung auf den Krümmungsmittelpunkt k verlaufen, also auf die Trennungsf läche senkrecht auftreffen, gehen ungebrochen in Medium II über, laufen also durch k hindurch. Solche Strahlen heißen *Hauptstrahlen* oder *Richtungsstrahlen*, k ist also der *Kreuzungspunkt der Richtungsstrahlen*.

2. Strahlen, welche in Medium I achsenparallel laufen, werden an der Grenzfl äche so gebrochen, daß sie sich im Medium II im 2. Brennpunkt f_2 schneiden. Umgekehrt vereinigen sich Strahlen, welche in Medium II achsenparallel verlaufen, in Medium I im 1. Brennpunkt f_1 . Die in f_1 und f_2 senkrecht auf der optischen Achse errichteten Ebenen heißen *erste und zweite Brennebene*.

Satz 1 und 2 ermöglichen es, zu einem Objektpunkt a_1 in Medium I den Bildpunkt a_2 in Medium II zu finden (Abb. 148). Man zieht von a_1 aus als einen Konstruktionsstrahl einen achsenparallelen, als zweiten den Richtungsstrahl. Beide schneiden sich in a_2 . a_1 und a_2 heißen *konjugierte Punkte*; einer ist das Bild des anderen. Die auf der optischen Achse senkrechten Ebenen, welche a_1 und a_2 einschließen, heißen *konjugierte Ebenen*. Ein Bild in der Bildebene I entspricht einem ähnlichen Bild in der Bildebene II.

3. Strahlen, welche in Medium I in beliebiger Richtung, aber parallel zueinander verlaufen, vereinigen sich in einem bestimmten Punkt der 2. Brennebene. Abb. 149 zeigt, daß dieser Punkt leicht zu finden ist, indem man als Konstruktionsstrahl entweder denjenigen Richtungsstrahl zieht, welcher mit den einfallenden Strahlen parallel läuft, oder denjenigen Strahl, welcher f_1 parallel zu den einfallenden Strahlen verläßt. Dieser Satz läßt sich, ähnlich wie Satz 2, umkehren.

Gehen wir nun zu dem Strahlengang im *zentrierten optischen System* mit einer Mehrzahl sphärischer Fl ächen und brechender Medien über, so ergibt die Theorie von GAUSS einige weitere charakteristische Punkte auf der optischen Achse, welche für in beliebiger Richtung eintretende Strahlen die Richtung ihres Austritts aus dem System anzugeben erlauben. Diese Punkte heißen die *Kardinalpunkte* (siehe Abb. 150).

1. F_1 und F_2 sind der *erste* und der *zweite Hauptbrennpunkt*; für sie gilt, wie in dem einfachen System, daß achsenparallel in das System eintretende Strahlen dasselbe in der Richtung verlassen, daß sie sich in F_2 schneiden, und daß umgekehrt Strahlen, welche aus F_1 kommend ins System eintreten, aus ihm achsenparallel austreten.

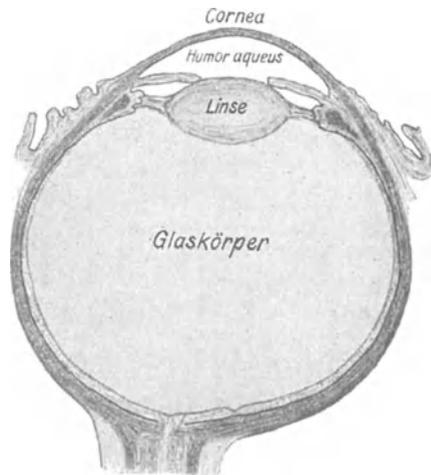


Abb. 147. Schnitt durch das menschliche Auge.

2. H_1 und H_2 heißen die *Hauptpunkte*, die in ihnen auf der optischen Achse senkrecht errichteten Ebenen h_1 und h_2 die *Hauptebenen*. Der Abstand des ersten Hauptpunkts vom ersten Hauptbrennpunkt und der Abstand des zweiten Hauptpunkts vom zweiten Hauptbrennpunkt, die sog. *Hauptbrennweiten*, verhalten sich zueinander wie die Brechungsindizes des ersten und des letzten brechenden Mediums in dem System. Für die Hauptebenen gilt der Satz, daß ein Strahl, welcher in beliebiger Richtung ins System eintretend auf einen bestimmten Punkt, z. B. L_1 , in der 1. Hauptebene gerichtet ist, das System in einer solchen Richtung verläßt, daß er aus einem L_1 senkrecht gegenüberliegenden Punkt der 2. Hauptebene L_2 zu kommen scheint.

3. K_1 und K_2 heißen die *Knotenpunkte*; man findet sie, wenn man die Differenz der beiden Hauptbrennweiten vom 1. und 2. Hauptpunkt aus auf der

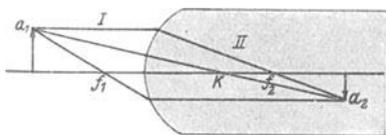


Abb. 148. Strahlengang in einem einfachen optischen System.

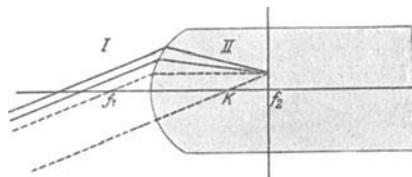


Abb. 149. Strahlengang in einem einfachen optischen System.

optischen Achse abträgt: $H_2F_2 - H_1F_1 = H_1K_1 = H_2K_2$; der Abstand der beiden Knotenpunkte ist daher gleich dem Abstand der beiden Hauptpunkte. Die Knotenpunkte haben die Eigenschaft, daß ein Strahl, welcher in Richtung auf K_1 ins System eintritt, das System in einer Richtung verläßt, als wenn er von K_2 herkäme; der austretende Strahl verläuft also parallel mit der Einfallrichtung.

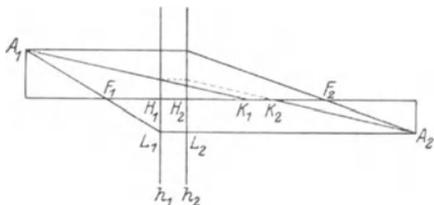


Abb. 150. Strahlengang im zentrierten optischen System.

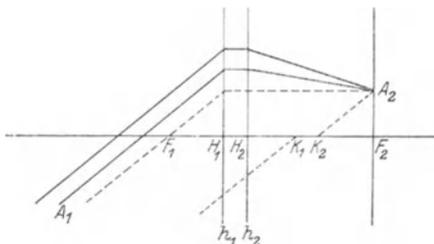


Abb. 151. Strahlengang im zentrierten optischen System.

4. In beliebiger Richtung parallel zueinander ins System eintretende Strahlen vereinigen sich in einem Punkt der 2. Hauptbrennebene. Strahlen, welche aus einem Punkt der 1. Hauptbrennebene austreten, verlassen das System in zueinander paralleler Richtung.

Mit Hilfe dieser Sätze läßt sich zu einem beliebigen vor dem System gelegenen Objektpunkt A_1 , ein Bildpunkt A_2 hinter dem System auf folgende Weise konstruieren: Man ziehe von A_1 einen Strahl durch den 1. Hauptbrennpunkt bis zur 1. Hauptebene in L_1 ; der Strahl wird so gebrochen, daß er durch den senkrecht über L_1 liegenden Punkt L_2 der 2. Hauptebene, also achsenparallel weiterläuft. Entsprechend verläuft ein von A_1 achsenparallel ausgehender Strahl durch F_2 . Einen 3. Strahl richtet man auf den 1. Knotenpunkt, er verläuft parallel dazu aus K_2 kommend weiter. Die drei austretenden Strahlen schneiden sich in A_2 .

Abb. 151 gibt die Konstruktion des Bildpunktes A_2 für einen in unendlicher Entfernung vor dem System gelegenen Objektpunkt A_1 , welcher schräg zur optischen Achse parallele Strahlen aussendet.

Übertragen wir nun diese Verhältnisse auf das Auge! Hat man für dasselbe die Abstände der brechenden Flächen, die Brechungsindizes und die Krümmungsradien bestimmt, — auf die Meßmethoden werden wir noch einzugehen haben —, so kann man die **Kardinalpunkte des Auges** berechnen und mit deren Hilfe den Strahlengang konstruieren.

Die Kardinalpunkte haben im menschlichen Auge nach GULLSTRAND die folgende Lage:

- | | | |
|--------------------------|-----------|-----------------------------|
| 1. Hauptbrennpunkt F_1 | 17,06 mm | vor dem Hornhautscheitel |
| 2. Hauptbrennpunkt F_2 | 24,385 mm | hinter dem Hornhautscheitel |
| 1. Hauptpunkt H_1 | 1,35 mm | „ „ „ |
| 2. Hauptpunkt H_2 | 1,65 mm | „ „ „ |
| 1. Knotenpunkt K_1 | 7,05 mm | „ „ „ |
| 2. Knotenpunkt K_2 | 7,35 mm | „ „ „ |

Sie sind in das Schema der Abb. 152 eingezeichnet. *Der 2. Hauptbrennpunkt (F_2) fällt in die Netzhaut.*

Da die Haupt- und Knotenpunkte nur etwa 0,3 mm voneinander entfernt liegen, so kann man sie zur Vereinfachung der Strahlenkonstruktion zusammenfallen lassen. Man erhält dann das sogenannte **reduzierte Auge** (LISTING), dessen Scheitel 1,5 mm hinter dem Hornhautscheitel (in h) gelegen ist, welches an Stelle der Knotenpunkte einen einzigen Kreuzungspunkt der Richtungstrahlen in der Gegend des hinteren

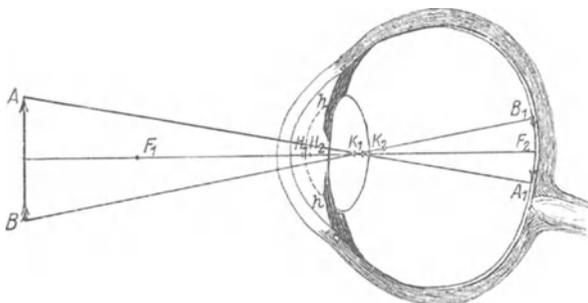


Abb. 152. Die Lage der Kardinalpunkte im Auge.

Linsenpols 7,15 mm hinter dem wahren Hornhautscheitel besitzt, und welches nur Glaskörper als einziges brechendes Medium enthält. In solch einem Auge verhält sich, wie die Abb. 152 zeigt, *die Objektgröße (A B) zur Bildgröße ($A_1 B_1$), wie der Objektabstand vom Kreuzungspunkt der Richtungstrahlen zum Bildabstand von demselben Punkt.* Durch besondere Einrichtungen, von welchen später (S. 433) die Rede sein wird, wird es erreicht, daß, wenigstens innerhalb einer bestimmten Variationsbreite des Objektabstandes, das Bild stets in die Netzhaut fällt. Die Netzhaut kann, solange die Einfallswinkel klein sind, als plan angesehen werden.

Was nun **die Bestimmung der optischen Konstanten des Auges** anlangt, so hat man

1. die **Abstände der brechenden Flächen** an den Durchschnitten gefrorener Augen ausgemessen. Zur Bestimmung des Abstandes der vorderen Hornhautfläche von der vorderen Linsenfläche kann man sich auch des Kornealmikroskops bedienen, welches man einmal auf die mit Kalomel bepuderte Hornhaut und ein zweites Mal auf den der vorderen Linsenfläche direkt aufliegenden Pupillarrand der Iris einstellt.

2. Zur Bestimmung der **Brechungsindizes** füllt man *vorderes Kammerwasser* und *Glaskörpersubstanz* in ein Hohlprisma und mißt den Winkel der totalen Reflexion, oder man macht die Bestimmung mit einem **ABBE'schen Refraktometer**. An der herausgenommenen *Linse* mißt man in Luft die Krümmungsradien, die Brennweite und die Dicke und berechnet

nach einer bekannten Gleichung aus diesen Größen den Index. Vom Brechungsindex der *Hornhaut* kann man absehen, da diese als eine von parallelen Flächen eingeschlossene Lamelle nur eine geringfügige Parallelverschiebung der Strahlen bedingt.

3. Die **Krümmungsradien der brechenden Flächen**, d. h. der Krümmungsradius der Hornhaut, der vorderen und der hinteren Linsenfläche, ist von HELMHOLTZ nach folgendem Prinzip gemessen:

Von einem leuchtenden Objekt, welches sich vor dem Auge befindet, z. B. einer Kerzenflamme, sind im Auge drei Spiegelbildchen zu sehen, die sogenannten **PURKINJE-SANSON'schen Bildchen**, welche durch teilweise Reflexion des Lichtes an den drei genannten Flächen zustandekommen. Das Hornhautbildchen ist, wie die Abb. 153 zeigt, am hellsten und deshalb jedermann bekannt; die beiden Linsenbildchen sind wegen der stärkeren Lichtabsorption im Kammerwasser und in der Linsensubstanz lichtärmer. Hornhaut- und 1. Linsenbildchen sind als Spiegelbilder an konvexen Flächen verkleinert und aufrecht, das 2. Linsenbildchen als Spiegel-



Abb. 153. Die drei PURKINJE-SANSON'schen Bildchen einer Kerze.

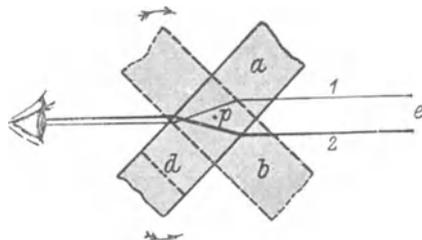


Abb. 154. Schema des Ophthalmometers von HELMHOLTZ.

bild einer konkaven Fläche verkleinert und umgekehrt. Ist nun das leuchtende Objekt relativ klein und relativ weit entfernt von der Spiegelfläche, so gilt die Gleichung:

$$\text{Objektgröße} : \text{Bildgröße} = \text{Objektstand} : \frac{r}{2}.$$

Wenn man also die Objektgröße und den Objektstand kennt und die Bildgröße ausmißt, so kann man den Radius berechnen. Zur Bestimmung der Größe der drei PURKINJE-SANSON'schen Bilder gab HELMHOLTZ das *Ophthalmometer* an.

Das Ophthalmometer besteht, abgesehen von einem Fernrohr, aus zwei gleichen planparallelen Glasplatten *a* und *b*, deren Längsschnitte in der Abb. 154 gezeichnet sind, so daß *d* ihre Dicke bedeutet. Die Platten liegen vom Beschauer der Zeichnung aus hintereinander — die hintere ist punktiert gezeichnet — und sind um die gemeinsame Achse *p* in entgegengesetzter Richtung um gleiche Winkel zu drehen. Die Strahlen 1 und 2, welche von zwei leuchtenden, senkrecht im Abstand *e* übereinander liegenden Punkten ausgehen, werden, wie in der Abbildung angegeben, durch beide Platten parallel verschoben und können bei einem geeigneten Maß der Plattendrehung zusammenfallen. Alsdann sieht das Auge statt zweier leuchtender Punkte nur einen in der Mitte von *e*; die Strahlen sind dann also offenbar um $\frac{e}{2}$ verschoben. Man kann nun diese Verschiebung, wie die Abb. 155

zeigt, leicht berechnen, wenn der Einfallswinkel α , der Brechungsindex $n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$

und die Plattendicke *d* bekannt sind. Die Verschiebung $x = \frac{e}{2}$ ist dann gleich

$$\frac{d \cdot \sin \alpha - \beta}{\cos \beta}.$$

Das Ophthalmometer wird nun am Auge so verwendet, daß man in diesem zwei Flammen sich spiegeln läßt. Jedes der drei PURKINJE-SANSONSchen Bildchen besteht alsdann aus zwei leuchtenden Punkten, welche die Abstände e_1 , e_2 und e_3 einhalten. Man mißt mit dem Ophthalmometer $\frac{e_1}{2}$, $\frac{e_2}{2}$ und e_3 und berechnet die Radien aus der vorher angegebenen Proportion.

Mit diesen Methoden sind folgende Werte für die optischen Konstanten des Auges gefunden worden (GULLSTRAND):

Abstände der brechenden Flächen:

vordere Hornhaut- bis vordere Linsenfläche . . .	3,6 mm
vordere Linsen- bis hintere Linsenfläche	3,6 mm
hintere Linsenfläche bis Netzhaut	16,8 mm
vordere Hornhautfläche bis Netzhaut	24 mm

Brechungsindizes:

vorderes Kammerwasser	1,336
Linse	1,4085
Glaskörper	1,336

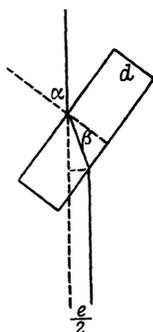


Abb. 155. Strahlenverschiebung durch eine planparallele Platte.

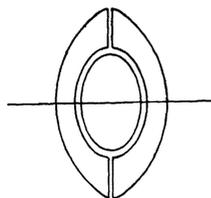


Abb. 156. Schema des Linsenbaus nach HELMHOLTZ.

Krümmungsradien:

vordere Hornhautfläche	8 mm
vordere Linsenfläche	10 mm
hintere Linsenfläche	6 mm

Zu diesen Werten sind noch einige Anmerkungen zu machen.

Der Brechungsindex der Linse von 1,4085 ist ihr sogenannter Totalindex. Die Linse baut sich bekanntlich aus einer großen Zahl von Lamellen auf; von diesen haben die äußeren nur einen Index von 1,376 und von da steigt der Index nach innen zu mehr und mehr an, der Brechungsindex des Linsenkerns beträgt 1,406. In anscheinend paradoxer Weise übertrifft also der Totalindex noch den maximalen Index des Kerns. Dies ist folgendermaßen zu erklären: Der Kern hat nicht nur die höhere Brechkraft, sondern er ist auch stärker gewölbt, als die oberflächlichen Partien; man kann sich also die Linse zerlegt denken in einen bikonvexen, fast kugeligen Kern und zwei ihn umhüllende konkav-konvexe Linsen (siehe Abb. 156). Würde nun die ganze Linse aus Kernsubstanz bestehen, so würde offenbar die Brechkraft der Kernlinse durch die beiden Konkavlinsen geschwächt werden; die ganze Linse muß also an Brechkraft gewinnen, wenn sie nicht homogen ist, sondern wenn der Brechungsindex der Konkavlinsen kleiner ist als der des Kerns.

Die verschiedenen Krümmungsradien bedingen die verschiedene *Größe und Lage der PURKINJE-SANSON'schen Bildchen*. Auf der Abb. 153 bedeutet das linke hellste Bildchen, wie gesagt, das Bildchen, welches durch Spiegelung an der vorderen Hornhautfläche zustandekommt. Es wird von dem mittleren, dem 1. Linsbildchen, an Größe übertroffen, weil die Wölbung der vorderen Linsenfläche geringer ist, als die der Hornhaut. Das rechte von der Spiegelung der hinteren Linsenfläche herrührende Bildchen ist am kleinsten, weil die hintere Linsenfläche am stärksten gewölbt ist. Die von den Konvexspiegeln der Hornhaut und der vorderen Linsenfläche erzeugten Bildchen sind virtuell; das erste liegt, entsprechend dem Krümmungsradius von 8 mm, scheinbar 4 mm hinter der Hornhaut, also etwa in der Pupillarebene (siehe Abb. 157), das zweite, entsprechend dem Radius von 10 mm, scheinbar 5 mm hinter der vorderen, also etwa 1 mm hinter der hinteren Linsenfläche. Das vom Konkavspiegel der hinteren Linsenfläche hervorgebrachte reelle Bildchen liegt etwa 3 mm vor dieser Fläche, also ein wenig hinter der vorderen Linsenfläche. Bei Bewegungen der Lichtquelle bewegen sich die virtuellen Bilder gleichsinnig, das reelle Bild gegensinnig.

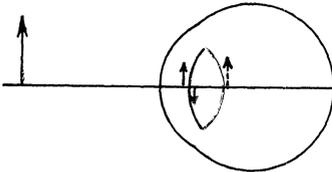


Abb. 157. Die Lage der PURKINJE-SANSON'schen Bildchen im Auge (nach HEINE).

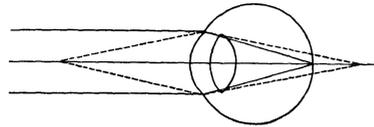


Abb. 158. Strahlengang im Auge bei verschiedenen Objektständen.

Die *Hornhautoberfläche* ist in Wahrheit keine Kugelfläche, sondern angenähert (siehe S. 443) die Fläche eines Rotationsellipsoids, dessen Achse durch die optische Achse gegeben ist; die seitlichen Partien sind also relativ abgeflacht. Auf die Bedeutung dieser Tatsache wird noch zurückzukommen sein.

Nachdem wir nun die Gesetze kennen gelernt haben, welche den Strahlengang im Auge beherrschen, wenden wir uns zu der Frage der *Abbildung verschieden weit entfernter Objekte auf der Netzhaut*. Es ist nach dem Genannten selbstverständlich, daß, wie bei der photographischen Kamera, so auch beim Auge das Bild dem brechenden System näher oder ferner rückt, je nachdem der Objektstand größer oder kleiner gewählt wird. Für das Auge, so wie wir es bisher betrachtet haben, fällt der 2. Hauptbrennpunkt in die Netzhaut (siehe S. 429), d. h. Strahlen, welche von den Punkten eines unendlich fern gelegenen Objekts ausgesandt werden, also parallel ins Auge fallen, werden in der Netzhaut zu Bildpunkten vereinigt; *das Auge ist also auf unendlich eingestellt*. Daraus folgt, daß das Bild eines Objektes, welches sich näher als unendlich vor dem Auge befindet, erst hinter der Netzhaut gelegen sein kann (siehe Abb. 158); die Netzhaut durchschneidet also den Kegel der auf ihren Bildpunkt konvergierenden Strahlen, sie wird darum von dem leuchtenden Objektpunkt nicht punktförmig erleuchtet, sondern flächenförmig in einem sogenannten „Zerstreuungskreis“, und da sich das Objekt aus zahlreichen Punkten zusammensetzt, so besteht das

Bild aus lauter einander teilweise überdeckenden Zerstreungskreisen und muß deshalb unscharf sein (siehe Abb. 159). Daß dies wirklich geschieht, davon kann man sich überzeugen, sobald man einen fern gelegenen Gegenstand ins Auge faßt; alle näher liegenden Gegenstände, denen sich die Aufmerksamkeit zu gleicher Zeit zuwendet, sehen dann verschwommen aus.

Aber ebenso leicht kann man bemerken, daß man auch nahe Objekte mit scharfen Konturen sehen kann. *Das Auge hat also das Vermögen, sich auf verschiedene Entfernungen zu akkommodieren.* Jedoch ist in einem bestimmten Moment das Auge immer nur auf eine bestimmte Entfernung eingestellt, *man kann nicht gleichzeitig nahe und ferne Dinge scharf sehen.*

Es fragt sich, worauf die **Akkommodation des Auges** beruht. Es gibt offenbar dreierlei Möglichkeiten. Entweder können die Abstände der brechenden Flächen von der Netzhaut geändert werden, so wie etwa die Einstellung der photographischen Kamera durch Verschieben der Mattscheibe vorgenommen wird, oder die Brechungsindizes können sich ändern oder endlich die Krümmungsradien. Von diesen verschiedenen

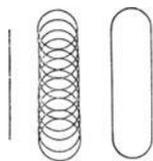


Abb. 159. Abbildung einer Linie in Zerstreungskreisen (nach HELMHOLTZ).

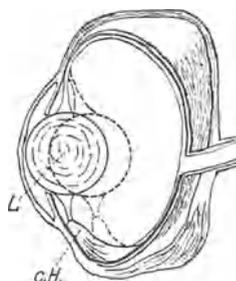


Abb. 160. Durchschnitt durch das Auge vom Hecht. L Linse. cH die Campanula Halleri, welche den M. retractor lentis enthält. Die Stellungsänderung bei der Akkommodation ist durch punktierte Linien angedeutet.

Möglichkeiten hat die Natur, soviel man bisher weiß, die zweite nirgends realisiert, wohl aber die erste und die dritte bei verschiedenen Tierformen in mannigfaltiger Weise zur Ausführung gebracht. Dabei handelt es sich in jedem Fall um die Betätigung von *Akkommodationsmuskeln*, welche das Auge aus dem Zustand der Ruhe in den der Akkommodation überführen.

Betrachten wir in aller Kürze hier nur die Verhältnisse bei den Wirbeltieren!

Das Auge der *Fische* ist in der Ruhe zumeist auf die Nähe eingestellt; Akkommodation bedeutet bei ihnen eine Einstellung in die Ferne. Dies geschieht so, daß die kugelige Linse durch einen Musculus retractor lentis, welcher in der sogenannten Campanula Halleri enthalten ist, gegen die Netzhaut hingezogen wird (siehe Abb. 160) (BEER).

Gerade umgekehrt wird bei den *Amphibien* die in ihrer Form ebenfalls unveränderte Linse durch einen eigentümlichen Muskelapparat ein wenig vorwärts geschoben, so daß eine Einstellung des Auges auf größere Nähe die Folge ist (BEER, C. HESS).

Auch *Reptilien* und *Vögel* akkommodieren in die Nähe. Bei ihnen geschieht dies aber durch eine Deformierung der Linse; nämlich die Muskeln des Ziliarkörpers und der Iriswurzel üben bei ihrer Kontraktion einen kräftigen Druck auf die Peripherie der Linsenoberfläche aus, so daß diese ringförmig eingedrückt wird und die einwärts von der entstehenden Rinne gelegene Linsenmasse nach vorn in Form eines Konus hervorquillt (siehe Abb. 161). Durch die damit verbundene starke Krümmungsvermehrung wächst die Brechkraft der Linse in bedeutendem Maß (C. HESS).

Auch bei den *Säugetieren* geschieht die Akkommodation aus der Ferne in die Nähe durch eine Formänderung der Linse; der Mechanismus ist aber ein völlig anderer als bei Reptilien und Vögeln, und soll uns nun eingehender beschäftigen.

Beleuchtet man ein menschliches Auge schräg von der einen Seite her mit zwei hellen senkrecht übereinander stehenden quadratischen Lichtern und betrachtet es, während es geradeaus in die Ferne blickt, von der anderen Seite her, so daß man die drei PURKINJE-SANSONSchen Bildchen nebeneinander sieht (siehe Abb. 162A) und läßt nun das beobachtete Auge sich auf die Nähe akkommodieren, so sieht man, wie das mittlere von der Spiegelung an der vorderen Linsenfläche herrührende Bild sich stark verkleinert (Abb. 162B), d. h. die beiden leuchtenden Quadrate werden kleiner und rücken gegen das Zentrum der Pupille hin einander näher. Dies beweist, daß *die Wölbung der vorderen Linsenfläche bei der Akkommodation stark zunimmt* (CRAMER, HELMHOLTZ). Mit dem Ophthalmometer hat HELMHOLTZ die Krümmungsänderung

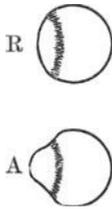


Abb. 161. Schildkrötenlinse mit Iris und Ziliarkörper isoliert. R in Ruhe, A durch elektrische Reizung akkommodiert (nach C. HESS).

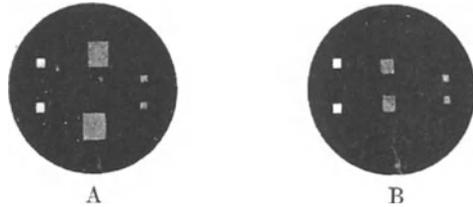


Abb. 162. Die PURKINJE-SANSONSchen Bildchen in der Ruhe (A) und bei der Akkommodation (B) des menschlichen Auges (nach HELMHOLTZ).

genau gemessen und gefunden, daß die Krümmungsradien der drei brechenden Flächen betragen:

	bei Einstellung	
	in die Ferne	in die Nähe
Hornhaut	8 mm	8 mm
vordere Linsenfläche . .	10 mm	6 mm
hintere Linsenfläche . .	6 mm	5,5 mm

Also nimmt auch die hintere Linsenfläche ein wenig an der Wölbungszunahme teil.

Beobachtet man ein menschliches Auge von der Seite her, während es in die Nähe akkommodiert, so kann man deutlich sehen, daß der vordere Linsenpol sich vorschiebt; die vordere Augenkammer flacht sich zugleich vor der Linse ab und vertieft sich dafür in den seitlichen Partien ein wenig. Die Verschiebung des Pols beträgt, mit dem Kornealmikroskop gemessen, etwa 0,4 mm.

Um die akkommodative Formänderung der Linse zu erklären, hat HELMHOLTZ folgende Hypothese aufgestellt: die Linse ist elastisch, sie ist eingeschlossen in die Linsenkapsel; an dieser setzt im Linsenäquator die Zonula Zinnii an, deren radiär verlaufende Fasern an das Corpus ciliare angeheftet sind und einen Zug auf den Äquator ausüben, so daß die Linse dadurch in der Richtung von vorn nach hinten abgeflacht ist. *Bei der Akkommodation rücken durch die Wirkung des Ziliarmuskels die Ziliarfortsätze näher an die Linse heran, dadurch wird die Zonula*

Zinnii und die Linsenkapsel entspannt, und die Linse kann in ihre elastische Ruhelage, in ihre natürliche Form mit größerer Wölbung übergehen (siehe Abb. 163).

Diese Hypothese ist durch eine große Anzahl von Beobachtungen als richtig erkannt:

1. Der *M. ciliaris* besteht aus meridionalen, radiären und zirkulären Fasern. Bei der Kontraktion der den Hauptanteil darstellenden meridionalen Fasern könnte sich das hintere Ende des Muskels sowohl nach vorn, wie das vordere nach hinten zu verschieben. Tatsächlich ist das *Punctum fixum* für den Ziliarmuskel der Ansatz der Chorioidea an der Sklera in der Gegend des *Canalis Schlemmii*; an diesen Punkt wird also die Chorioidea herangezogen und so die Zonula entspannt. HENSEN und VOELCKERS bewiesen dies (1868) u. a. folgendermaßen: sie stachen eine Nadel oberflächlich in den Ziliarmuskel ein und fanden, daß bei elektrischer Reizung das herausragende Ende sich stets nach rückwärts bewegt. Also verschiebt sich die Spitze der Nadel mit dem Ziliarmuskel nach vorn, so daß das *Corpus ciliare* sich der Linse annähern muß.

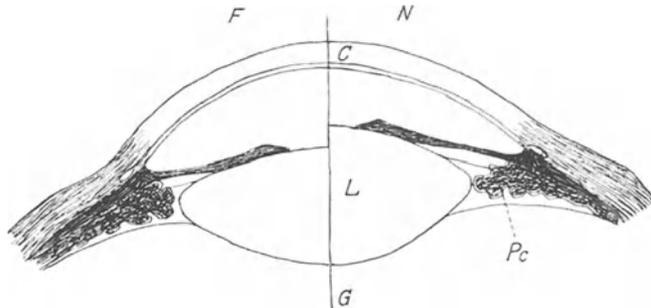


Abb. 163. Die Akkommodation im menschlichen Auge (nach HELMHOLTZ). Links Ruhestellung, Einstellung in die Ferne (F), rechts Akkommodation, Einstellung in die Nähe (N). C Cornea. L Linse. G Glaskörper. Pc Processus ciliaris.

2. Diese Annäherung kann man unter Umständen bei einem Defekt der Iris direkt von vorne sehen.

3. Dabei drückt aber nicht etwa das *Corpus ciliare* auf den Linsenäquator und deformiert auf die Weise die Linse; das *Corpus ciliare* rückt nicht bis zur Berührung an die Linse heran, sondern es wird nur ihr Aufhängeband erschlafft. Dies erkennt man auffallend an dem von C. HESS beobachteten *Linsenschlottern*. Akkommodiert man krampfhaft in die Nähe, so sinkt die Linse, der Schwerkraft folgend, ein wenig abwärts, je nach der Kopfhaltung also in verschiedener Richtung. Subjektiv kann man das folgendermaßen feststellen: man bringt in die vordere Brennebene des Auges — also in ca. 13mm Abstand — eine Lichtquelle, welche parallele Strahlen auf die Netzhaut wirft; befindet sich nun, wie häufig, eine punktförmige Trübung in der Linse, so wirft diese einen Schatten auf die Netzhaut, welcher als dunkles Objekt im Gesichtsfeld erscheint. Während angestrengter Akkommodation bewegt sich nun dieses Scheinobjekt bei Änderung der Kopfhaltung stets entgegen der Schwerkraft. Erleichtert wird die Beobachtung durch Einträufelung von Eserinlösung in den Bindehautsack des Auges; dadurch wird ein vorübergehender Krampf des Ziliarmuskels, also eine dauernde Akkommo-

dationsstellung hervorgerufen. Wird in diesem Zustand eine rasche zuckende Augenbewegung ausgeführt, so kann man oft sowohl subjektiv

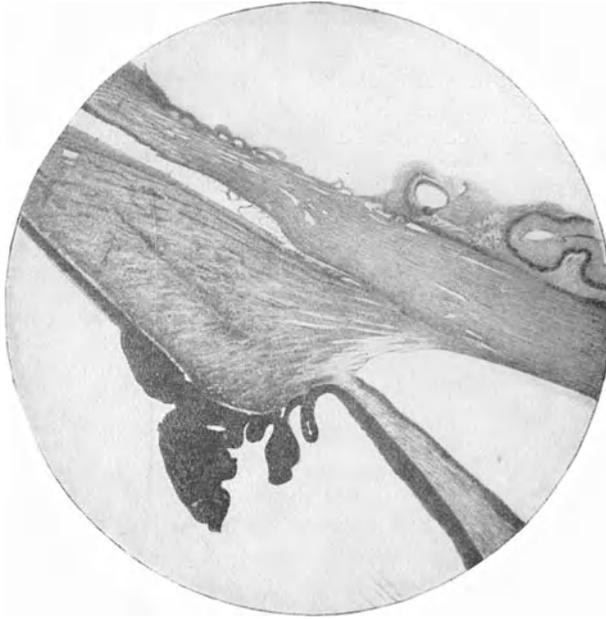


Abb. 164. Schnitt durch das Corpus ciliare eines Affen nach Atropinisierung (nach HEINE). (Aus HELMHOLTZ, Handbuch der physiologischen Optik.)

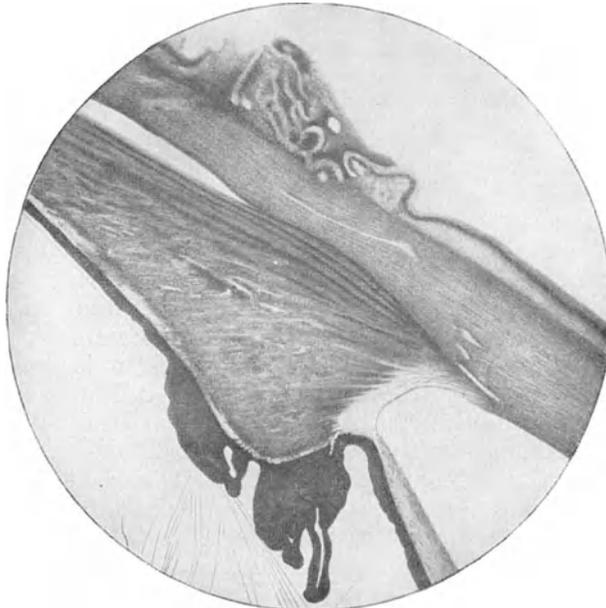


Abb. 165. Schnitt durch das Corpus ciliare eines Affen nach Eserinwirkung (nach HEINE). (Aus HELMHOLTZ, Handbuch der physiologischen Optik.)

als auch objektiv ein richtiges Schlottern, eine Hin- und Herbewegung der Linse feststellen.

4. HEINE hat bei einem Affen in dem einen Auge durch Eserin einen Krampf, in dem anderen durch Atropin eine Lähmung des Akkommodationsmuskels erzeugt und die so fixierten Augen mikroskopisch untersucht. Die Bilder Abb. 164 und 165 zeigen, daß sich durch Verkürzung und Verdickung des Ziliarmuskels das vordere und axialwärts gerichtete Ende des Corpus ciliare in Richtung der vorderen Fläche der Linse, also im Sinne der Entspannung der Zonula verschiebt. Auch die Vertiefung der vorderen Augenkammer im Hornhautiridwinkel ist gut zu erkennen.

Vergleichen wir nun noch einmal diesen Akkommodationsmechanismus mit dem der Reptilien und Vögel, bei welchen ja ebenfalls die Akkommodation in die Nähe auf einer starken Wölbung der vorderen Linsenfläche beruht, so erkennt man den großen Unterschied: bei Reptilien und Vögeln kommt die Linse durch den Akkommodationsakt unter erhöhtem Druck und verläßt ihre ela-

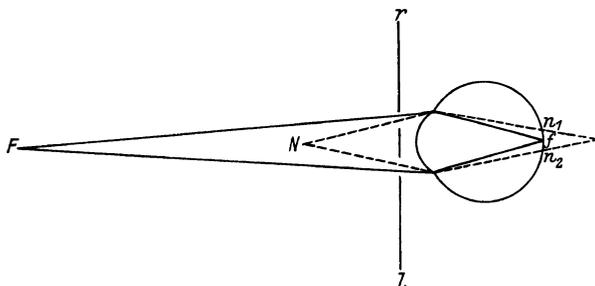


Abb. 166. Schema für den SCHEINER'schen Versuch I.

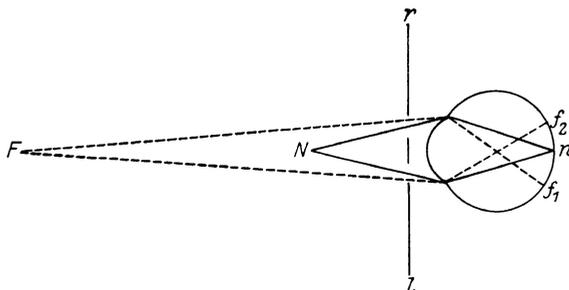


Abb. 167. Schema für den SCHEINER'schen Versuch II.

stische schwach gewölbte Ruheform, bei den Säugetieren kommt die Linse durch den Akkommodationsakt unter geringeren Druck und nähert sich ihrer elastischen stark gewölbten Ruheform.

Die Innervation des Ziliarmuskels besorgt der Okulomotorius. HENSEN und VOELCKERS erhielten dementsprechend Akkommodation bei elektrischer Reizung des Hirnstamms im hinteren Abschnitt des III. Ventrikels, also in der Gegend der Okulomotoriuskerne. Die Okulomotoriusfasern passieren das Ganglion ciliare, in welchem sie eine Unterbrechung erfahren, und gelangen mit den Nervi ciliares breves zum Ziliarmuskel, wie ebenfalls durch Reizungsversuche von HENSEN und VOELCKERS gezeigt wurde. Wie alle parasymphatischen Nervenendigungen, so werden auch diese Okulomotoriusfasern durch Atropin gelähmt und durch Pilocarpin oder Eserin (Physostigmin) gereizt (siehe S. 415). Atropin erzeugt also durch Ruhigstellung des Akkommodationsapparates Einstellung in die Ferne, Unmöglichkeit, nahe zu sehen, Pilocarpin und Eserin erzeugen durch Akkommodationskrampf das Gegenteil.

Die Leistung des Akkommodationsmechanismus, das Auge für das Nahesehen zu befähigen, ist nun aber begrenzt; während der *Fernpunkt* des normalen Auges in der Unendlichkeit liegt, liegt sein *Nahpunkt* nicht unendlich nahe, d. h. im Abstand 0; rückt ein Objekt näher als etwa 10—15 cm an das Auge heran, so erscheint es nicht mehr scharf, offenbar weil das Refraktionsvermögen des Auges nicht mehr genügend gesteigert werden kann, um die vom Objektpunkt divergierenden Strahlen noch in der Netzhaut zur Vereinigung zu bringen.

Will man den *Nahpunkt* des Auges genau bestimmen, so genügt es nicht, eine feine Druckprobe oder dergleichen immer näher an das Auge heranzubringen, weil man nicht genau den Abstand anzugeben vermag, bei dem der Druck eben anfängt, etwas verschwommen auszusehen. Eine genaue Messung gelingt mit dem sog. *Optometer*, welchem ein Versuch des Pater SCHEINER (1619) zugrunde liegt: Betrachtet man durch ein Kartenblatt, in welchem sich horizontal nebeneinander zwei kleine Öffnungen befinden, deren Abstand kleiner ist als der Pupillendurchmesser, zwei Nadeln, welche auf der optischen Achse senkrecht hintereinander stehen, so erscheint diejenige Nadel, auf welche man akkommodiert, einfach, die andere doppelt. Die Ursache ist aus den Abb. 166 u. 167 leicht ersichtlich: ist das Auge auf F eingestellt (siehe Abb. 166), so vereinigen sich sämtliche von F ausgehende Strahlen, also auch die zwei schmalen Bündel, welche durch den Schirm vor dem Auge durchgelassen werden, in f; die zwei von N ausgehenden, die Schirmöffnungen passierenden Bündel könnten sich dagegen erst hinter der Netzhaut zu einem Bildpunkt vereinigen, sie erleuchten dementsprechend zwei kleine Flecke auf der Netzhaut n_1 und n_2 , von denen n_1 der rechten, n_2 der linken Schirmöffnung entspricht; N wird also doppelt gesehen. Umgekehrt, wenn das Auge auf N eingestellt ist (siehe Abb. 167), dann muß F doppelt erscheinen; aber, wie man sich leicht durch abwechselndes Zuhalten des rechten oder linken Lochs im Schirm überzeugen kann, entspricht dem linken Loch das rechte (f_2), dem rechten das linke Doppelbild (f_1).

Zur Nahpunktbestimmung bedient man sich nur einer Nadel und schiebt sie solange näher an das Auge heran, bis trotz maximaler Akkommodationsanstrengung es nicht mehr gelingt, die Nadel einfach zu sehen.

Man findet auf die Weise für einen Normalsichtigen von 20 Jahren den Nahpunkt etwa 10 cm vor dem Auge. Sein *Akkommodationsgebiet* reicht also von ∞ bis 10 cm. Innerhalb dieses Gebietes muß er aber seinen Akkommodationsapparat im wesentlichen nur zwischen 500 und 10 cm anspannen. Denn die Rechnung ergibt für das reduzierte Auge (S. 429) den in der folgenden Tabelle angegebenen zahlenmäßigen Zusammenhang zwischen Objektweite und Bildweite

Objektweite:	Bildweite:
∞ m	23,00 mm
5 m	23,06 mm
1 m	23,30 mm
0,25 m	24,30 mm

Der 2. Hauptbrennpunkt liegt für das reduzierte Auge etwa 23 mm hinter seinem Hornhautscheitel, d. h. in der Netzhaut (siehe S. 429); Strahlen, welche achsenparallel aus der Unendlichkeit kommen, werden hier also zum Bildpunkt vereinigt. Bei 5 m Objektabstand liegt aber das Bild erst 0,06 mm weiter zurück und fällt damit noch in die lichtempfindliche Schicht der Netzhaut (S. 449 ff.), welche ungefähr diese Dicke besitzt. Erst bei weiterer Annäherung würde das Objekt hinter die lichtempfindliche Schicht fallen, wenn nicht die Akkommodation einsetzte.

Das Maß der aufgewendeten Akkommodationsleistung ist die **Akkommodationsbreite** oder *Akkommodationskraft*; sie läßt sich durch die Brechkraft derjenigen Konvexlinse a (Abb. 168) ausdrücken, welche vor das normale ruhende, also auf unendlich eingestellte Auge b davorgesetzt Strahlen, welche aus dem Nahpunkt N kommen würden, achsen-

parallel macht. Die Akkommodationsbreite des 20jährigen ist also gleich der Brechkraft einer Konvexlinse mit der Brennweite von 10 cm. Es ist üblich, die Brechkraft in reziproken Brennweiten auszudrücken und nach Dioptrien zu bemessen. Unter einer Linse von 1 *Dioptrie* (D) versteht man eine Linse von 100 cm Brennweite, bei 2 D Brechkraft liegt die Brennweite in 50 cm, bei 3 D in 33 cm usw. Die Akkommodationsbreite des 20jährigen ist also $A = \frac{100}{10} = 10$ D, während die Brechkraft des

ruhenden, auf unendlich eingestellten Auges, ausgedrückt durch den reziproken Wert der vorderen Brennweite (S. 429), ungefähr gleich 60 D ist.

Liegt der Fernpunkt F nicht in Unendlich, sondern in endlichem Abstand (siehe S. 440), so ist danach die Akkommodationsbreite offenbar gleich $\frac{100}{N} - \frac{100}{F}$. Liegt dagegen F „jenseits unendlich“, d. h. ist die Refraktion des ruhenden Auges so gering, daß nur konvergentes Licht zu einem Bildpunkt vereinigt werden kann (siehe S. 440), muß man also schon vor das ruhende Auge ein Konvexglas setzen, damit ferne Objekte scharf gesehen werden können, so ist die Akkommodationsbreite gleich $\frac{100}{N} + \frac{100}{F}$, wobei F jetzt die Brennweite der Linse bedeutet, welche das ruhende Auge zum Sehen in die Ferne fähig macht.

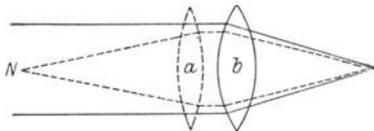


Abb. 168. Zur Definition der Akkommodationsbreite.

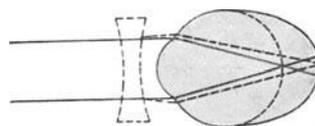


Abb. 169. Strahlengang im myopen Auge und Korrektur der Myopie.

Die Akkommodationsbreite ist eine Funktion des Alters; sie nimmt, wie die folgende Tabelle lehrt, während des Lebens fort und fort ab:

10 Jahre	A = 15	D	50 Jahre	A = 2,5	D
20 „	10	D	60 „	0	D
30 „	7,5	D	70 „	— 1	D
40 „	5	D	80 „	— 2	D

Dies rührt nicht von einem Nachlassen in der Kraft des Ziliarmuskels her, sondern von einer *Abnahme der Elastizität und der Brechkraft der Linse*. Im Laufe der Jahre verdichtet sich nämlich die Linse, so daß die ursprünglich weicheren äußeren Schichten mehr und mehr die Eigenschaft des härteren Kerns annehmen. Warum das eine Minderung der Brechkraft bedeuten muß, ist bei anderer Gelegenheit (S. 431) schon auseinandergesetzt worden. Daß es auch eine Einbuße an der akkommodativen Wölbungsfähigkeit bedeutet, leuchtet ohne weiteres ein.

Diese Veränderung der Linse verursacht ein allmähliches Abrücken des Nahpunktes, das sich bei zahlreichen Arbeiten in der Nähe, namentlich beim Lesen unangenehm bemerkbar macht, sobald in dem Alter zwischen 40 und 50 Jahren der Nahpunkt in den Abstand von 30 bis 40 cm hinausgeschoben ist. Man spricht dann von *Altersweitsichtigkeit* oder *Presbyopie*. Diese kann durch eine geeignete Konvexbrille für das Nahsehen korrigiert werden. Ungefähr im Alter von 60 Jahren wird die Akkommodationsbreite gleich 0. Jenseits davon kann man von einer negativen Akkommodationsbreite von —1 D bis —2 D sprechen, insofern als hier schon das Sehen in die Ferne das Vorsetzen eines Konvexglases erforderlich macht (senile Hyperopie).

Während die Presbyopie einen physiologischen Vorgang zum Ausdruck bringt, handelt es sich bei anderen Refraktionsstörungen, wie bei der so häufigen Kurzsichtigkeit und bei der Übersichtigkeit um pathologische Zustände, und zwar um *Anomalien infolge fehlerhafter Abmessungen im Auge*. Deswegen stellt man der normalen *Emmetropie* die *Ametropien* gegenüber.

Die *Kurzsichtigkeit* oder *Myopie* beruht gewöhnlich auf einem zu langen Bau des Auges. Infolgedessen werden im ruhenden Auge achsenparallele Strahlen schon vor der Netzhaut innerhalb des Glaskörpers zu einem Bildpunkt vereinigt (siehe Abb. 169); nur Strahlen von einer gewissen Divergenz kreuzen sich in der Netzhaut. Der Fernpunkt liegt also in der Endlichkeit, und ebenso ist der Nahpunkt des Auges näher gerückt. Der Tabelle Seite 438 kann man entnehmen, daß, wenn durch den Langbau des Auges die Netzhaut nur etwa 1 mm rückwärts geschoben ist, der Fernpunkt schon auf 33 cm herangerückt wird; es kommen aber auch Verlagerungen um 6—8 mm vor. Da im myopen Auge die Brechkraft relativ zu groß ist, so korrigiert man sie durch Vorsetzen eines Konkavglases (siehe Abb. 169).

Die Myopie ist bekanntlich eine Refraktionsanomalie, welche sich erst allmählich, namentlich im Schulalter, ausbildet; die Ursachen sind hier nicht zu erörtern.

Im Gegensatz dazu ist die *Übersichtigkeit* oder *Hypermetropie* (Hyperopie) eine angeborene Störung. Das Auge ist abnorm kurz; daher kreuzen sich im ruhenden Auge die achsenparallelen Strahlen erst hinter der Netzhaut (siehe Abb. 170), nur konvergent einfallendes Licht, welches von „jenseits unendlich“ kommt, wird in der Netzhaut zu Bildpunkten vereinigt. Fern- und Nahpunkt sind also weiter abgerückt. Zur Korrektur der zu kleinen Brechkraft dient eine Konkavbrille.

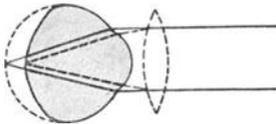


Abb. 170. Strahlengang im hypermetropen Auge und Korrektur der Hypermetropie.

Die *Akkommodationsbreite*, also die Größe der Akkommodationsleistung, kann bei den Ametropien vollkommen normal sein. Bei einem 20jährigen Myopen sei z. B. der Fernpunkt in 33, der Nahpunkt in 7,7 cm Entfernung gelegen; dann ist nach den Betrachtungen auf S. 439 seine Akkommodationsbreite = $\frac{100}{7,7} - \frac{100}{33}$ = 10 D, also ebenso groß, wie nach der Tabelle S. 439 bei einem normalen Emmetropen von 20 Jahren. Sein *Akkommodationsgebiet* ist dagegen von ∞ auf $33 - 7,7 = 25,3$ cm reduziert. Beim Hypermetropen beträgt die Akkommodationsbreite $\frac{100}{N} + \frac{100}{F}$.

Im Kulturleben mit seinen zahlreichen Beschäftigungen in Augennähe sind die Myopen im allgemeinen besser daran, als die Hypermetropen. Denn diese müssen erstens ihren Akkommodationsapparat bereits beim Fernsehen betätigen, und um so mehr beim Nahsehen, so daß ihr Akkommodationsmuskel leicht überanstrengt wird und ermüdet (Asthenopie). Zweitens verschlechtert sich ihr Zustand im Laufe der Jahre durch Presbyopie, während der Myope durch die presbyope Hyperopie normalsichtiger wird.

Mit dem Akkommodationsakt sind noch zwei weitere Bewegungen assoziiert, nämlich erstens eine Konvergenz der optischen Achsen und zweitens Pupillenverengung.

Die *Konvergenzreaktion* besteht in der synergistischen Kontraktion der *M. recti mediales* und dient dem binokularen Sehen; das wird später (siehe Kapitel 30) erörtert werden.

Die *Pupillenreaktion* hat eine mehrfache Bedeutung. Es ist öfter erwähnt worden, daß sich die Pupille reflektorisch auf Lichteinfall verengt. Dies hat den Zweck, durch Ablendung die Netzhaut vor einer Überfülle von Licht zu schützen, geradeso wie das Diaphragma in einer photographischen Kamera die Belichtung der Platte dämpft. Die Ablendung geschieht durch die Kontraktion des *M. sphincter iridis*. Da die Netzhaut sich aber allmählich einer größeren Lichtmenge zu adaptieren vermag (siehe S. 468), so reagiert die Iris auf den Lichteinfall in der Weise, daß nur anfänglich die Pupille rasch verkleinert wird und dann allmählich, entsprechend der fortschreitenden Netzhautadaptation, sich wieder weitet.

Die akkommodative Pupillenverengung verfolgt wohl denselben Zweck, das Auge vor einem Übermaß von Licht, welches von einem nahen Objekt ausstrahlen kann, zu schützen. Außerdem dient sie der Verschärfung der Abbildung, nämlich erstens durch Ablendung der Randstrahlen, welche durch sphärische Aberration (s. S. 442) die Abbildungsbedingungen verschlechtern, und zweitens durch Verkleinerung der Zerstreuungskreise. Wenn ein Körper sich in der Nähe des Auges befindet, so kann in einem bestimmten Moment nur eine seiner Ebenen, auf welche gerade akkommodiert ist, scharf abgebildet werden, die übrigen erscheinen verschwommen. Zur Auffassung aller Einzelheiten gleitet darum das Auge beim Körperlichsehen sozusagen von Punkt zu Punkt, indem seine Akkommodation fortwährend wechselt. Wenn nun aber die Pupille beim Nahesehen sehr eng ist, so werden die Zerstreuungskreise so klein, daß auch bei fehlender Akkommodation die Abbildung nahezu punktuell wird, so daß der ganze Körper in seinen verschiedenen Ebenen angenähert scharf erscheint. Man kann sich diesen Einfluß der Abschirmung durch die Iris gut verdeutlichen, wenn man durch Vorsetzen einer Konvexlinse vor das Auge die Abbildung auf der Netzhaut vollkommen unscharf macht und dann noch ein Kartenblatt mit einem feinen Loch davorhält; alsdann sind die Gegenstände wieder leidlich deutlich (sogenanntes *steno-päisches Sehen*).

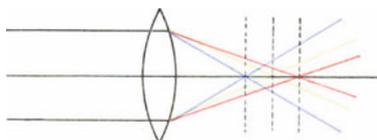


Abb. 171. Chromatische Aberration.

Akkommodation, Konvergenz und Pupillenverengung unterstehen alle drei dem Okulomotorius und sind *zentral im Okulomotoriuskern miteinander assoziiert* (siehe Kapitel 23). Die Innervationen des M. ciliaris und des M. sphincter iridis sind parasymphatisch. Dementsprechend erzeugen Eserin (Physostigmin) und Pilocarpin nicht bloß Akkommodationskrampf (siehe S. 437), sondern auch Pupillenverengung oder *Miosis*; Atropin erzeugt nicht bloß Akkommodationslähmung, sondern auch Pupillenerweiterung oder *Mydriasis*. Eine mydriatische Wirkung kann aber auch — wie beiläufig erwähnt sei — durch Reizung des sympathisch innervierten M. dilatator iridis hervorgerufen werden, z. B. mit Adrenalin (siehe S. 258 u. 415) oder Kokain.

Wenden wir uns nun zu einer Anzahl von **Unvollkommenheiten in der Bilderzeugung**, welche beim Auge nachweisbar sind. HELMHOLTZ hat einmal gesagt, daß, wenn ein Optiker einem ein so nachlässig konstruiertes Instrument anbieten würde, wie das Auge, man es mit Protest zurückgeben würde. Gemeint sind die Fehler der *chromatischen Aberration*, der *sphärischen Aberration*, des *Astigmatismus*, der *mangelhaften Zentrierung* und der *Trübung der optischen Medien*.

Die **chromatische Aberration** beruht bekanntlich darauf, daß die kurzwelligen Lichter stärker gebrochen werden als die langwelligen (siehe Abb. 171). Daher sind die im Gesichtsfeld älterer optischer Instrumente erscheinenden Objekte von störenden farbigen Säumen eingefasst, welche bei den modernen achromatischen Systemen durch die geeignete Kombination verschieden dispergierender und verschieden brechender Glassorten vermieden sind.

Die stärkere Brechung der kurzwelligen, die schwächere der langwelligen Strahlen bedingt es, daß im Auge der Brennpunkt für violettes Licht ungefähr 0,6 mm näher der Hornhaut liegt, als der für rotes Licht.

Infolgedessen kann das Auge niemals so akkommodieren, daß ein weißer Punkt wirklich punktförmig abgebildet wird, sondern er muß gefärbt erscheinen und von einem farbigen Zerstreungskreis umgeben sein; eine weiße Fläche muß entsprechend an den Rändern farbig gesäumt sein, während die Fläche selber infolge der Überdeckung der verschiedenen Farben weiß aussieht.

Im allgemeinen bemerkt man die Chromasie des Auges nicht. Am leichtesten überzeugt man sich von ihrem Vorhandensein, wenn man einen leuchtenden Punkt oder eine leuchtende Linie durch ein Kobaltglas betrachtet, welches nur die äußersten Spektrallichter, Rot und Violett, durchläßt; ist man nämlich auf das rote Licht akkommodiert, so sieht das Objekt rot mit violetterm Saum, ist man auf das violette Licht akkommodiert, so sieht es violett mit rotem Saum aus. Ferner sieht man, wenn man ein schwarzes Blatt Papier so vor das Auge schiebt, daß die Pupille zum Teil zugedeckt wird, die Grenze zwischen schwarz und hell farbig, nämlich je nach der Richtung, in welcher man das Blatt vorschiebt, entweder rötlich-gelb oder violett-blau (HELMHOLTZ). Nach BRÜCKE erscheint eine rote Fläche näher als eine in gleichem Abstand gelegene blaue Fläche, weil man auf die rote Fläche stärker akkommodieren muß, als auf die blaue (siehe S. 487).

Wie die Abb. 171 zeigt, wird die Chromasie schwächer, wenn das Auge auf die mittleren spektralen Lichter, auf Gelb oder Grün, eingestellt ist. Für diese Farben ist das Auge außerdem am empfindlichsten. Daher bleiben die roten und violetten Säume so leicht unbemerkt.

Unter **sphärischer Aberration** versteht man die Tatsache, daß achsenparallele Strahlen an Kugelflächen nicht so, wie bisher angenommen wurde, gebrochen werden, daß sie sämtlich sich im Brennpunkt vereinigen, sondern daß die Randstrahlen eine kürzere Brennweite haben als die zentralen Strahlen. Daraus folgt, daß auch monochromatisches Licht, welches ein Punkt aussendet, nirgends zu einem Bildpunkt vereinigt wird, sondern daß in jeder zur optischen Achse senkrechten Fläche an Stelle eines Bildpunktes ein Zerstreungskreis zu finden ist.

Auch die Linse unseres Auges muß sphärische Aberration zeigen. Aber mehrere Umstände tragen dazu bei, sie möglichst unschädlich zu machen und das brechende System des Auges zu aplanasieren. Eines dieser Momente sah man in der schon (S. 432) erwähnten Tatsache, daß die Hornhaut keine Kugelfläche, sondern die Fläche eines Rotationsellipsoids darstellt; die Randpartien sind also weniger gekrümmt als die Mitte. Aber dieser Vorteil kommt nicht zur Geltung, es sei denn, die Pupille wäre durch Atropin überweit gemacht (AUBERT, GULLSTRAND); sonst fängt die Iris die Randstrahlen ab. Die Iris selber ist eben durch ihre Schirmwirkung der wirksamste Schutz gegen die Aberration. Daß die Enge der Pupille ferner auch durch Verkleinerung der Zerstreungskreise bei unscharfer Einstellung des Auges zur Verbesserung der Abbildung beiträgt (siehe S. 433), ist eine Sache für sich. Die Linse ist aber auch dadurch einigermaßen aplanatisch, daß sie keinen homogenen Brechungsindex besitzt, sondern daß ihre Ränder aus schwächer brechender Substanz bestehen, als das Zentrum.

Der **Astigmatismus** ist der Wortbedeutung nach die Erscheinung, daß ein Punkt, ein Stigma, nicht als solcher, sondern anders wahrgenommen wird. Er beruht auf Unregelmäßigkeiten in der Krümmung der brechenden Flächen, welche von sehr verschiedener Art sind.

Unter *regulärem Astigmatismus* versteht man die Wirkung davon, daß die Hornhautoberfläche — auch abgesehen von der Abflachung ihrer Randpartien — keine Kugelfläche ist, sondern die Oberfläche der Kalotte eines Eies oder richtiger eines Ellipsoids, die man durch einen Schnitt parallel zur Längsachse (nicht senkrecht zur Längsachse) erhalten hat. Solch eine Fläche kann man sich durch die Übereinanderlagerung zweier Zylinderflächen entstanden denken.

Die Abb. 172 stelle zunächst eine solche Zylinderfläche dar, welche zwei verschieden brechende Medien voneinander trennt. aa sei die Achse des Zylinders; diese schneidet eine senkrecht zu ihr stehende Ebene $OPQR$ in k . Dann muß ein in $OPQR$ verlaufender und auf k gerichteter Strahl lk ungebrochen aus dem 1. in das 2. Medium übertreten. Da $OPQR$ die Zylinderfläche in der Kreislinie xy schneidet, so müssen ferner sämtliche Strahlen, welche parallel zu lk in $OPQR$ verlaufen, im Brennpunkt b vereinigt werden. Man denke sich nun oberhalb und unterhalb der Ebene $OPQR$ weitere zu ihr parallele Ebenen und es laufen auch in diesen Ebenen Strahlen, welche untereinander und zu den Strahlen der Ebene $OPQR$ parallel sind, so wird im 2. Medium aus den Brennpunkten in allen

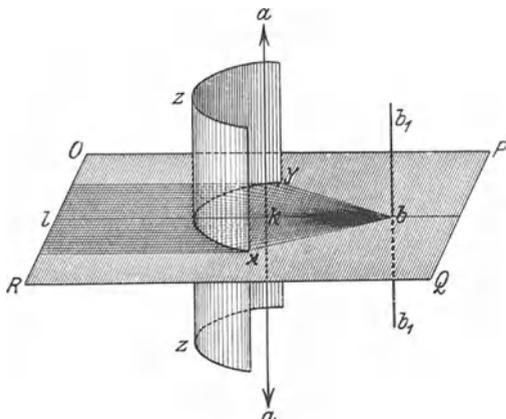


Abb. 172. Brechung an einer Zylinderfläche.



Abb. 173. Keratoskop von PLACIDO.

diesen Ebenen eine Brennlinie b_1b_1 gebildet, welche senkrecht zu b verläuft. Also Strahlen, welche in Medium 1 aus der Unendlichkeit kommend senkrecht zu der Zylinderachse aa auf die Zylinderfläche auffallen, werden im 2. Medium zu einer Brennlinie vereinigt.

Nun sei vor diese eine Zylinderfläche eine zweite so davor gesetzt, daß die Achsen senkrecht zueinander stehen, oder, was auf dasselbe herauskommt, die gegebene Zylinderfläche werde so gekrümmt, daß die in ihr senkrecht zu lk verlaufende Gerade zz zu einem Kreisbogen wird; dann muß die brechende Fläche nun noch eine zweite Brennlinie erzeugen, welche zu der ersten senkrecht steht, und welche sich, wenn die Krümmung zz einen anderen Radius hat, als die ursprüngliche Zylinderfläche (xy), in einem anderen Abstand von der brechenden Fläche befindet, als b_1b_1 .

Eine derartige Beschaffenheit hat aber die Hornhautoberfläche; sie ist in ihren zentralen Partien keine Kugelfläche, sondern verhält sich wie eine Kugelkalotte, welche in einem Durchmesser etwas zusammengedrückt ist und dadurch in dem dazu senkrechten Durchmesser an Wölbung verloren hat. Bezeichnet man die Hornhautmitte als ihren Pol, so haben demnach ihre verschiedenen Meridiane verschiedenen Radius, die Fläche ist „meridianasymmetrisch“.

Man kann nun mit dem Ophthalmometer diese Meridianasymmetrie leicht quantitativ bestimmen, indem man der Drehachse der Platten

des Instruments verschiedene Neigungen gibt (siehe S. 430). Ein einfacher Nachweis stärkerer Grade von regulärem Astigmatismus gelingt mit dem *Keratoskop* (siehe Abb. 173). Das ist eine mit einem Griff versehene Scheibe mit konzentrischen schwarzen und weißen Ringen, welche man in dem zu untersuchenden Auge spiegeln läßt, und dessen Spiegelbild man durch ein Loch im Zentrum der Scheibe betrachtet; bei stärker astigmatischen Augen erscheinen dann die konzentrischen Kreise auf der Hornhaut verzerrt.

Gewöhnlich ist der senkrechte Hornhautmeridian am stärksten, der horizontale am schwächsten gekrümmt; aber auch das Umgekehrte kommt vor, oder stärkste und schwächste Wölbung können auch schräg liegen. Aber stets stehen beim regulären Astigmatismus die Meridiane stärkster und schwächster Wölbung zueinander senkrecht.

Bei der gewöhnlichsten Form der Meridianasymmetrie liegt demnach die vordere Brennlinie horizontal, die hintere vertikal; fällt die vordere Brennlinie in die Netzhaut, dann müssen beim Betrachten der sogenannten *SNELLENschen Strahlenfigur* (siehe Abb. 174) die horizontalen Strahlen scharf, die vertikalen maximal verwaschen aussehen; umgekehrt, wenn die hintere Brennlinie in die Netzhaut fällt. In ähnlicher

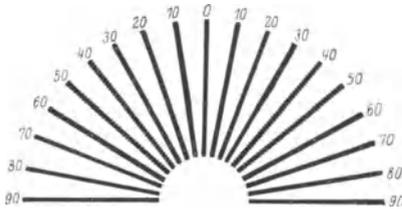


Abb. 174. SNELLENsche Strahlenfigur zum Nachweis des Astigmatismus.

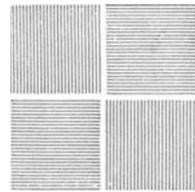


Abb. 175. Zum Nachweis des Astigmatismus.

Weise läßt die Abb. 175 den Astigmatismus erkennen; je nach der Akkommodation können bald die horizontalen und bald die vertikalen Linien verschwommen erscheinen. Bei stark ausgesprochenem Astigmatismus kann man weder ferne noch nahe Objekte deutlich sehen.

Aus dem Gesagten ergibt sich, daß man den Astigmatismus durch Vorsetzen eines Zylinderglases von geeigneter Krümmung und geeigneter Achsenrichtung korrigieren kann.

Der sogenannte *irreguläre Astigmatismus* ist die Folge unregelmäßiger Wölbung an irgend einer der brechenden Flächen. Schon die Benetzung mit Tränen und Schleim oder ein kleiner Epitheldefekt machen die Hornhaut uneben. Ferner verursacht der Aufbau der Linse aus sternförmig angeordneten Fasern notwendigerweise einen komplizierteren Strahlengang. Krankhafte Prozesse können den irregulären Astigmatismus so steigern, daß leuchtende Punkte mehrfach abgebildet, also mehrfach gesehen werden (*Polyopia monophthalmica*). Der irreguläre Astigmatismus normaler Augen ist eine der Ursachen, warum leuchtende Punkte, wie die Fixsterne oder ein fernes Licht, nicht punkt-, sondern sternförmig gesehen werden.

Die letztgenannte Erscheinung kann aber auch von **mangelhafter Zentrierung** herrühren. Denn die Krümmungsmittelpunkte der verschiedenen brechenden Flächen des Auges liegen nachweislich nicht auf einer Geraden. Wenn also Punkte auch dann noch sternförmig erscheinen, wenn beim Sehen unter Wasser die Brechkraft der unregelmäßig gekrümmten Hornhaut ausgeschaltet ist, dann läßt sich dies vielleicht auch auf die mangelhafte Zentrierung zurückführen.

Unvollkommen ist die Bilderzeugung in unserem Auge schließlich auch dadurch, daß der regelmäßige Strahlengang durch **Trübungen in den brechenden Medien** unterbrochen wird. Wir wollen dabei davon absehen, daß die Medien durchweg nicht optisch leer sind, sondern daß die in ihnen enthaltenen Kolloidteilchen das Licht beugen, so daß eine gewisse diffuse Erleuchtung der ganzen Netzhaut die Folge ist. Außerdem kommen aber auch gröbere Trübungen vor, welche teils von der Struktur der die Medien aufbauenden Zellen — besonders bei der Hornhaut und der Linse — herrühren, teils von festsitzenden oder beweglichen Korpuskeln von mehr oder weniger unbekannter Herkunft erzeugt werden.

Diese Trübungen brauchen das Sehen nicht zu stören, da die Schärfe der Abbildung auf der Netzhaut nicht notwendig darunter leidet, sondern nur ein Teil des Lichtes abgefangen wird. Nur wenn die Trübungen relativ groß und wenn sie relativ nahe an der Netzhaut gelegen sind, dann müssen sie einen Ausfall im Gesichtsfeld verursachen. Kleine Trübungen kann man deutlich sichtbar machen, wenn man eine punktförmige Lichtquelle (a Abb. 176) im vorderen Brennpunkt des Auges, also etwa 13 mm vom Hornhautscheitel entfernt, aufstellt; das von ihr ausgesendete divergente Licht fällt dann parallel ins Auge, so daß von den Trübungen (b) Schatten von der Größe der Trübungen (β) auf die Netzhaut geworfen werden (HELMHOLTZ). Da diese Schatten optisch genau so wirken, wie größere dunkle Körper, welche in der Außenwelt vor einem hellen Hintergrund gelegen sind, so täuschen die **entoptischen Erscheinungen**, wie man diese Phänomene bezeichnet, das Vorhandensein greifbarer Körper vor.

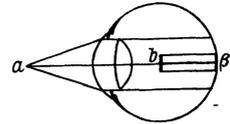


Abb. 176. Nachweis von Trübungen im Augeninnern (nach HELMHOLTZ).

Am bekanntesten sind die von kleinen Glaskörpertrübungen herrührenden sogenannten *fliegenden Mücken* („mouches volantes“); sie treten in Form von kleinen Kreisen mit hellem Zentrum, oft zu Perlschnüren vereinigt, oder als Konglomerate kleiner Kügelchen oder als blasse Streifen auf. Man sieht sie schon, wenn man gegen irgend eine gleichmäßig erleuchtete Fläche, z. B. gegen den hellen Himmel blickt, weil sie der Netzhaut nahe liegen. Sie bewegen sich, wie alle Trübungen, scheinbar, wenn man das Auge wandern läßt. Sie sind aber außerdem unabhängig vom Augapfel beweglich; denn sie wandern auch dann, wenn man mit dem Auge einen bestimmten Punkt fixiert, durchs Gesichtsfeld; meistens scheinen sie abwärts zu sinken, steigen also in Wirklichkeit aufwärts, sind also spezifisch leichter als die Glaskörperflüssigkeit.

Andere Trübungen werden von Schleimflöckchen oder Talgtröpfchen an der Hornhautoberfläche gebildet; dunkle Radien sind auf den strahligen Bau der Linse zu beziehen.

Ziehen wir nun abschließend noch einmal die ganze Summe der Unvollkommenheiten in dem dioptrischen Apparat des Auges in Rechnung, so ergibt sich, daß durch alle die offenkundigen Mängel das Sehen schließlich doch merkwürdig wenig beeinträchtigt wird; denn wenn auch verschiedene Einrichtungen getroffen sind, welche die Mängel zum Teil kompensieren, so bleibt doch als Tatsache bestehen, daß die dioptrischen Fehler die Netzhautbilder unscharf machen, daß wir also dauernd in Zerstreuungskreisen sehen müssen. Im scheinbaren Widerspruch damit ist nun aber das Auflösungsvermögen des Auges, seine Fähigkeit, einander

nahe gelegene Punkte zu unterscheiden, sehr groß (siehe S. 474). Dies ist nur durch eine besondere physiologische Korrektur, durch den sogenannten Simultankontrast, ermöglicht; davon wird aber erst später (S. 464) die Rede sein.

Legen wir uns zum Abschluß der Dioptrik des Auges noch die Frage vor, *was aus dem ins Auge einfallenden Licht wird*. Dem ersten Anschein nach verschwindet es völlig im Auge, da die Pupille schwarz aussieht. Aber die Pupille sieht nicht etwa schwarz aus wie ein Kellerloch. Denn dieses erscheint nur aus der Ferne im Vergleich mit der hellen Umgebung des Mauerwerks durch Kontrast (siehe S. 464) schwarz. Man braucht ja nur nahe an das Haus heranzutreten, um das Innere des Kellers überblicken zu können. Aber die Pupille erscheint selbst bei größter Annäherung schwarz. Man wird deshalb die Schwärze zunächst auf die *Absorption durch das dunkle Pigment* zurückführen, welches als Netzhaut-, Iris- und Chorioidealpigment das Auge von innen auskleidet und denselben Zweck erfüllt, wie die Schwärzung des Inneren einer photographischen Kamera, nämlich das diffus reflektierte Licht zu absorbieren, durch das die Schärfe der Abbildung beeinträchtigt würde. Zugunsten dieser Annahme könnte man die Beobachtungen an albinotischen Tieren (Kaninchen, Katzen) und Menschen anführen, deren Pupillen rot leuchtend

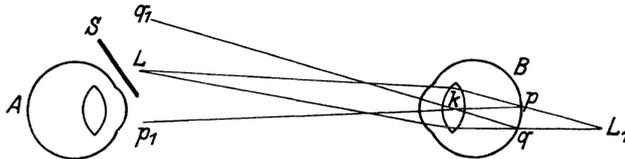


Abb. 177. BRÜCKES Versuch des Augenleuchtens.

aussehen. Aber wenn man bei diesen Tieren über den Augapfel eine Kappe aus Glas deckt, welche derart geschwärtzt ist, daß nur im Zentrum über der Pupille ein Weg für das Licht freibleibt, so sieht die Pupille auch im hellsten Licht ebenso schwarz aus, wie bei einem normalen Tier (DONDERS). Offenbar fällt also beim Albino diffuses Licht auch durch die pigmentlose Sklera ins Auge und tritt dann diffus reflektiert durch die Pupille aus. Rot erscheint diese, weil die Netzhaut reichlich mit Kapillaren durchsetzt ist. Wenn also auch normalerweise ein großer Teil des Lichts durch das Pigment absorbiert werden mag, so wird doch jedenfalls auch einiges Licht am Augenhintergrund reflektiert. Es bleibt deshalb die Frage offen, warum die Pupille schwarz aussieht.

Es gibt noch eine zweite Beobachtung, welche auf einen Zusammenhang zwischen diffuser Reflexion und Pupillenleuchten hinweist. Bei manchen Tieren, z. B. bei Katzen und Hunden, sieht man, auch wenn von einer mangelhaften Pigmentierung nicht die Rede sein kann, im Halbdunkel die Pupillen in einem grünlichen Schimmer aufleuchten. Dies liegt daran, daß bei ihnen die innere Austapezierung der Augen nicht überall schwarzbraun aussieht, sondern in größerer oder geringerer Ausdehnung farbig irisierend (*Tapetum lucidum*). Die Erscheinung beruht auf Interferenz in der Chorioidea, bei manchen Tieren durch feine Kriställchen hervorgerufen, die vielleicht aus Guaninkalk bestehen. Dadurch wird das Licht diffus reflektiert und dringt in allen Richtungen aus der Pupille heraus. Das *Tapetum lucidum* findet sich häufig bei nächtlich lebenden Tieren und hat seine Bedeutung wahrscheinlich darin, daß das schwache Dämmerlicht besser ausgenutzt wird, da es die von ihm getroffenen Netzhautteile infolge der Reflexion mehr als einmal durchsetzt. Da das *Tapetum* vorwiegend die obere Netzhaut-

hälfte einnimmt, so wird es besonders von den vom Erdboden ausgehenden Strahlen getroffen, denen natürlich eine besondere biologische Bedeutung zukommt.

Aber auch bei Tieren ohne Tapetum kann man unter bestimmten Umständen ein **Augenleuchten** zu sehen bekommen als Dokument dafür, daß auch bei ihnen nicht alles Licht im Innern absorbiert wird. Die Bedingung dafür hat BRÜCKE erkannt, nämlich das Auge, welches aufleuchten soll, darf nicht auf die Lichtquelle akkommodiert sein. Wenn in Abb. 177 A das beobachtende, B das beobachtete Auge darstellt, L die Lichtquelle und S einen Schirm, welcher A beschattet, so liegt das Bild von L, wenn B in die Ferne starrt, hinter dessen Netzhaut in L_1 . L bildet also auf der Netzhaut einen Zerstreuungskreis p q. Die durch den Kreuzungspunkt der Richtungsstrahlen k aus B austretenden Strahlen bilden daher einen Kegel $p_1 q_1$. In diesem Kegel steht A und fängt einen Teil der aus B austretenden Strahlen auf, dessen Pupille daher für A rot aufleuchtet. Würde B auf L akkommodiert sein, dann läge L_1 in der Netzhaut von B, L und L_1 wären konjugierte Punkte (siehe S. 427); die von L ausgehenden Strahlen würden also nach L zurückkehren, und nach A gelangte kein Licht.

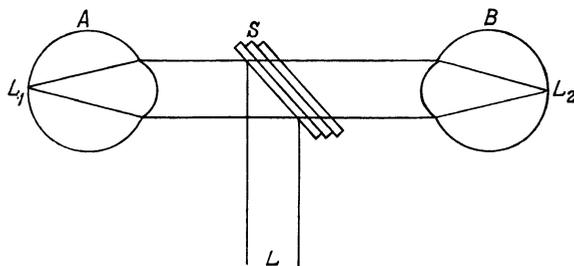


Abb. 178. HELMHOLTZ' Augenspiegel.

Da bei dem BRÜCKESchen Versuch nur ein kleiner Bruchteil des in das beobachtete Auge eintretenden Lichts ins Auge des Beobachters gelangt, so leuchtet die Pupille nur schwach auf. Will man den Augenhintergrund hell erleuchtet sehen, so muß man es also irgendwie so einrichten, daß mehr oder weniger das ganze Bündel austretenden Lichts in das beobachtete Auge gelangt. Diese Fragestellung führte HELMHOLTZ (1851) zu seiner großen Entdeckung des **Augenspiegels**, welche für die moderne Ophthalmologie den Grund gelegt hat. HELMHOLTZ sagte sich, daß *das beobachtende Auge selbst zur Lichtquelle gemacht werden muß*, damit das aus dem beobachteten Auge austretende Licht vollständig zu ihm zurückkehrt. Er löste das Problem überaus einfach in der in Abb. 178 dargestellten Art:

Die vom L ausgehenden Strahlen fallen auf mehrere planparallele Glasplatten S und werden in das zu beobachtende Auge A reflektiert. Die von dem Bild L_1 in A zurückkehrenden Strahlen gelangen durch abermalige Reflexion zum Teil nach L zurück, zum Teil durchdringen sie aber auch S und gelangen in das Auge des Beobachters B, um in L_2 zu einem Bildpunkt vereinigt zu werden. Sind A und B beide emmetrop, dann sind ihre beiden Netzhäute konjugierte Ebenen; infolgedessen muß B die Netzhaut von A in all ihren Einzelheiten erkennen können, wie sie etwa die Abb. 179 zur Darstellung bringt.

Ist A nicht emmetrop, sondern myop, so daß seine Netzhaut konvergenteres Licht ausstrahlt, dann kann B die Netzhaut von A doch scharf

sehen, wenn es entsprechend hypermetrop ist. Man kann im Fall der Ametropie aber auch das beobachtete Auge und das beobachtende Auge durch geeignete Korrektionsgläser (siehe S. 440) emmetrop machen. Vorausgesetzt ist bei diesen Erörterungen stets Akkommodationsruhe.

An die Stelle des von HELMHOLTZ verwendeten Satzes planparalleler Platten hat RUETE den heute meist gebrauchten flachen Konkavspiegel mit zentraler Durchbohrung gesetzt.

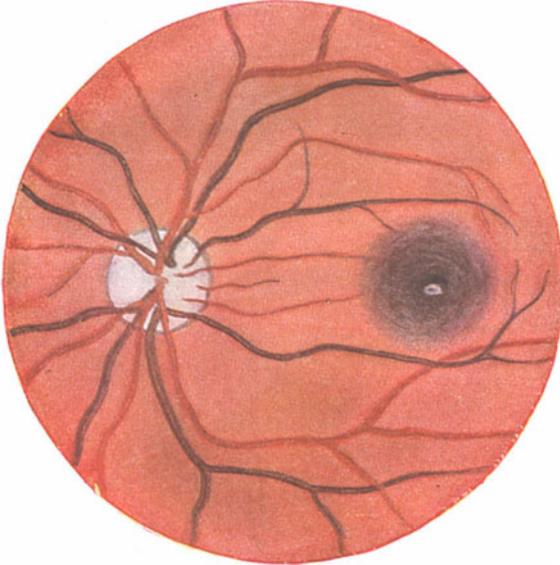


Abb. 179. Normaler Augenhintergrund.

Links die Papilla nervi optici mit der Art. und V. centralis retinae und ihren Verzweigungen. Rechts die Macula lutea, in dem dargestellten Beispiel dunkel pigmentiert, mit zentralem elliptischen Fovealreflex.

haut des beobachteten Auges stark vergrößert. Denn sei der Abstand der beiden Augen etwa 15 cm und sei die Netzhaut des beobachteten Auges A durch die Wegnahme des dioptrischen Apparates bloß gelegt, dann wäre, wie sich aus der

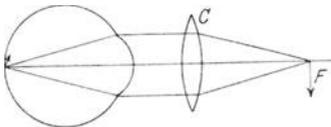


Abb. 180. Augenspiegeln im verkehrten Bild.

Abb. 152 S. 429, ergibt, das Bild von A auf der Netzhaut von B etwa 10mal verkleinert. Demnach muß dem Beobachter B bei dem genannten Abstand die Netzhaut von A beim Augenspiegeln etwa 10fach vergrößert erscheinen.

Einen größeren Bezirk der Netzhaut überblickt man beim *Augenspiegeln im verkehrten Bild* (siehe Abb. 180), wofür man nur den Nachteil einer geringeren Vergrößerung eintauscht. Bei diesem Verfahren beobachtet man wiederum das auf unendlich eingestellte Auge bei Beleuchtung mit einem Konkavspiegel, hält aber zugleich vor das beobachtete Auge eine Konvexlinse (c) von etwa 10 D. Das Bild der Netzhaut, welches beim emmetropen Auge in unendlicher Entfernung gelegen und unendlich groß ist, wird auf diese Weise als reelles umgekehrtes Bild in die Brennebene (F) der vorgehaltenen Linse verlagert und entsprechend verkleinert; die Verkleinerung ist natürlich um so stärker, je stärker die Brechkraft der vorgehaltenen Linse ist. Bei 10 D erscheint die Netzhaut in 6—7facher Vergrößerung, und das reelle in der Luft schwebende Bild kann von dem auf den geeigneten Abstand akkommodierten Auge des Beobachters betrachtet werden.

Auf diese Weise kann man durch die Pupille, ähnlich wie durch ein Schlüsselloch hindurch, einen Teil der Netzhaut überblicken, aber wie beim Schlüsselloch um so mehr, je näher man an das beobachtete Auge herangeht. Man muß dabei allerdings die Schwierigkeit überwinden lernen, trotz des Beobachtens aus nächster Nähe doch die Akkommodation völlig außer Spiel zu setzen.

Man bezeichnet diese Art des Betrachtens als *Augenspiegeln im aufrechten Bild*, weil man die Netzhaut aufrecht sieht. Das Objekt, d. h. die beobachtete Netzhaut und ihr Bild in der Netzhaut des beobachtenden Auges müssen dann gleich groß sein. Infolgedessen erscheint die Netz-

29. Kapitel.

Die Wirkungen der Ätherwellen auf die Netzhaut und die Lichtempfindungen.

Der blinde Fleck 449. Die PURKINJESCHE Aderfigur 451. Der Sehpurpur 452. Die Wanderung des Netzhautpigments und die Kontraktion der Zapfeninnenglieder 453. Die Lichtempfindungen 454. Die Mischung der Farben 457. Die Grundfarben von HELMHOLTZ 460. Die Helligkeiten der Farben und das farblose Spektrum 461. Die Theorie der Gegenfarben von HERING und die Dreikomponentenlehre von YOUNG und HELMHOLTZ 462. Der Simultankontrast 464. Der Sukzessivkontrast 466. Hell- und Dunkeladaptation und die Duplizitätstheorie 468. Die Farbenblindheit 469. Die Verteilung des Farbensinns im normalen Gesichtsfeld 472.

Die Physiologie des Sehens beginnt eigentlich erst mit der Beschreibung der sich in der Netzhaut unter dem Einfluß des Lichts abspielenden Vorgänge; denn die Dioptrik des Auges, mit welcher wir bisher zu tun hatten, ist nicht wesensverschieden von der Physik der gewöhnlichen optischen Instrumente. Daß die Netzhaut der Ort der Erregung des Auges durch das Licht sein muß, folgt aber aus der einfachen Tatsache, daß infolge der Abschirmung durch das Pigmentepithel das Licht nicht über die Netzhaut hinausdringen kann.

Die Netzhaut ist eine Membran von weniger als 0,5 mm Dicke; dennoch besitzt sie eine sehr komplizierte Struktur, welche in der schematischen Abb. 181 angedeutet ist. Es erhebt sich daher *die Frage, in welcher der 10 übereinander liegenden Schichten der Netzhaut die Erregung zustandekommt.*

Zur Entscheidung darüber kann erstens der Nachweis des **blinden oder Mariotteschen Flecks** (1668) herangezogen werden. Schließt man das linke Auge und fixiert mit dem rechten unverwandt das kleine weiße Kreuz in der Abb. 182 aus einer Entfernung von 25—30 cm, so verschwindet die große weiße Scheibe; sie taucht aber alsbald wieder auf, wenn man einen größeren oder geringeren Abstand einhält, oder wenn man den Blick von dem kleinen Kreuz etwas abweichen läßt. Die Erscheinung beruht auf folgendem: Beim Fixieren stellt man das Auge so ein, daß das fixierte Objekt sich im Zentrum der Netzhaut, in der Fovea centralis bzw. auf der Macula lutea abbildet; ein in einem bestimmten Abstand temporalwärts von dem fixierten Objekt gelegenes zweites Objekt muß sich alsdann auf der nasalwärts von der Fovea centralis gelegenen Papilla nervi optici abbilden, und diese ist blind. Es ist leicht

zu berechnen (s. S. 429), in welchem Abstand die Bilder des Kreuzes und der Scheibe in dem eben beschriebenen Versuch auf der Netzhaut liegen; der Abstand beträgt etwa 4 mm, dieselbe Distanz, welche Fovea und Papille trennen. Will man Kreuz und Scheibe aus größerer Entfernung als 25—30 cm betrachten, so muß man sie, wenn die Scheibe verschwinden soll, entsprechend weiter auseinander legen und kann dann auch die Scheibe entsprechend vergrößern.

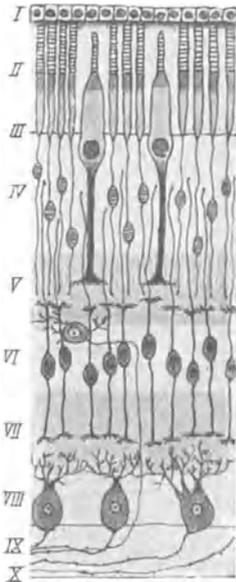


Abb. 181. Schematischer Durchschnitt durch die Netzhaut.

I Pigmentepithelschicht. II Schicht der Stäbchen und Zapfen. III Membrana limitans ext. IV Äußere Körnerschicht. V Äußere retikuläre Schicht. VI Innere Körnerschicht. VII Innere retikuläre Schicht. VIII Ganglienzellschicht. IX Nervenfaserschicht. X Membrana limitans interna.

Die genaue Ausdehnung der blinden Stelle stellt man so fest, daß man eine Bleistiftspitze in den Bezirk der Scheibe bringt und nun die Spitze so weit über den Rand der Scheibe hinaus verschiebt, bis sie eben sichtbar wird. Verfährt man so nach allen Richtungen, so findet man, daß der blinde Fleck ungefähr einem Bezirk wie in Abb. 183 entspricht; die Strecke A B bedeutet ein Drittel des Abstandes, in welchem sich das Auge bei der Betrachtung von der Fixiermarke a entfernt halten muß. Die Fortsätze in der Projektion der blinden Stelle auf das Papier entsprechen dem Abgang der Äste der Art. centralis retinae aus der Papille (siehe Abb. 179).

Der MARIOTTESCHE Versuch beweist, daß jedenfalls *nicht die markhaltigen Nervenfasern der Ort der Erregung durch die Ätherwellen sind*. Aber auch die *marklosen Nervenfasern* in der übrigen Netzhaut, welche in der dem Glaskörper anliegenden Schicht IX zuerst vom Licht getroffen werden, können es nicht sein (HELMHOLTZ), da ja der ganze Sinn der scharfen punktförmigen Abbildung durch die Möglichkeit, daß eine und dieselbe Nervenfaser an ganz verschiedenen Stellen vom Licht erregt werden kann, annulliert würde. Zudem fehlt die Schicht der Nervenfasern ebenso wie die Schicht der Ganglienzellen gerade in der Fovea centralis, der am meisten zum Sehen benutzten Stelle der Netzhaut.

Man kann fragen, warum man die Existenz des blinden Flecks für gewöhnlich gar nicht an einem entsprechenden Ausfall im Gesichtsfeld bemerkt. Das liegt erstens daran, daß wir binokular sehen, so daß ein Objekt, welches sich in dem einen Auge in der Papille abbildet, im anderen Auge auf einer sehenden Stelle zur Abbildung gelangt. Zweitens ist dafür maßgebend, daß auch beim monokularen Sehen die Blindheit allein bemerkt werden kann, wenn die Aufmerksamkeit zugleich auf zwei Objekte gerichtet ist, welche sich in einem bestimmten gegenseitigen Abstand und in einem bestimmten Abstand vom Auge befinden. Drittens erscheinen — wovon noch weiterhin (Seite 474) die Rede sein wird —, allein diejenigen Objekte in voller Schärfe, welche sich bei der Fixierung im Zentrum der Netzhaut abbilden; das exzentrische Sehen ist unscharf und darum weniger eindrucksvoll.

Merkwürdig ist, daß im MARIOTTESchen Versuch beim Verschwinden der weißen Scheibe an deren Stelle das Schwarz der Umgebung gesehen wird; ist der Untergrund andersfarbig, so wird die ausfallende Stelle in der anderen Farbe ergänzt; fällt durch Abbildung im blinden Fleck das Mittelstück eines Kreuzes beim Sehen aus, so wird auch dieses in der Projektion des blinden Flecks ergänzt. Ähnlich verhalten sich auch andere Stellen der Netzhaut, wenn sie infolge eines pathologischen Prozesses erblinden; auch dann äußert sich der Gesichtsfelddefekt, das „Skotom“, nicht als „ein Loch in der Welt“, sondern die blinde Stelle wird



Abb. 182. Figur zum Nachweis des blinden Flecks.

„von der Umgebung her ausgefüllt“. Diese Tatsachen sind aber nicht merkwürdiger als etwa die, daß unsere Temperaturempfindung beim Berühren eines Gegenstandes flächig und nicht körnig ist, trotz des gegenseitigen Abstandes der einzelnen Temperaturpunkte (s. S. 526) u. ä.

Ein zweiter Versuch, welcher zur Lokalisierung der Erregung der Netzhaut dient, ist der Nachweis der Purkinjeschen Aderfigur. Wenn man ein helles zirkumskriptes Licht, z. B. den Fokus einer Linse, von der Seite her aufs Auge, am besten auf die Sklera fallen läßt, während man geradeaus starrt, so taucht vor dem Auge wie das Geäst eines Baumes

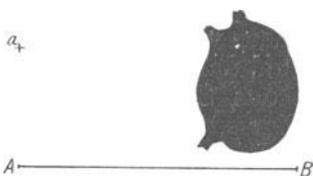


Abb. 183. Die Form des blinden Flecks (nach HELMHOLTZ).

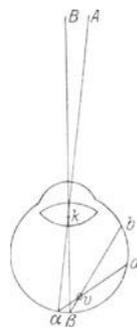


Abb. 184. Wanderung eines Gefäßschattens in der Purkinjeschen Aderfigur bei Bewegung der Lichtquelle (nach HELMHOLTZ).

die Figur der Netzhautgefäße (siehe Abb. 179) auf, gewöhnlich schwarz auf gelbbraunem Grund; wird die Lichtquelle bewegt, so bewegt sich die Aderfigur in gleichem Sinn. Die Erscheinung beruht darauf, daß der Schatten der Gefäße auf die rückwärts von ihnen gelegene empfindliche Schicht der Netzhaut fällt. Nach HELMHOLTZ bemerkt man den Gefäßschatten für gewöhnlich nicht, weil beim Einfall des Lichts von vorn her durch die Pupille andauernd die gleichen Stellen der Netzhaut beschattet und darum an den Schatten gewöhnt sind; erst wenn bei

der seitlichen, besonders der diaskleralen Durchleuchtung der Schatten auf sonst nicht beschattete Teile wirkt, wird er auffällig. Daß Lichtquelle und Aderfigur gleichsinnig wandern, wird durch die Abb. 184 verständlich gemacht; a b ist der Ortswechsel der Lichtquelle, v das Schatten werfende Gefäß und A B der Ortswechsel der Aderfigur. Aus den Strecken A B und a b läßt sich nun der Abstand des Gefäßes v von der lichtempfindlichen Schicht in der Netzhaut berechnen; man findet etwa 0,2—0,3 mm. Da weiter die großen Gefäßstämme in der äußeren retikulären Schicht (siehe Abb. 181 V) liegen, so führt die genannte Distanz in *die Schicht der Stäbchen und Zapfen* (II, IV), *welche danach als Ort der Erregung anzusehen ist.*

Gelegentlich bekommt man die PURKINJESCHE Aderfigur auch schön zu sehen, wenn man morgens beim Aufwachen mit dem ausgeruhten Auge gegen die helle Zimmerdecke blickt (HERMANN).

Noch ein anderes entoptisches Phänomen wird von den Blutgefäßen aus verursacht: wenn man durch die gespreizten vor dem Auge rasch hin und her bewegten Finger gegen einen hellen Hintergrund blickt (VIERORDT), oder noch besser, wenn man durch ein blaues Glas gegen den hellen Himmel sieht (ROOD), so bemerkt man im Gesichtsfeld zahlreiche funkelnde Körperchen, welche sich in geschlängelten Bahnen mit ziemlich großer Geschwindigkeit fortbewegen. Man betrachtet als die Ursache die *in den Netzhautkapillaren strömenden Blutkörperchen.*

Nach der Auffassung von HELMHOLTZ kommt die Erscheinung so zustande, daß sich hier und da ein Blutkörperchen in einer Kapillare festklemmt, daß dahinter sich andere stauen und davor sich das Gefäß leert. Die leere Stelle erscheint dann als helles Körperchen, das sich fortbewegt, wenn die Stauung sich wieder löst. Von anderen wird die Helligkeit als Folge einer mechanischen Reizung durch die sich stauenden Blutkörperchen angesehen; noch andere nehmen an, daß sie von der Brechung des Lichts durch die Blutkörperchen herrührt.

Verweist also die Auslegung des PURKINJESCHEN Versuches auf die Schicht der Stäbchen und Zapfen als eigentliche Sehschicht, so lassen sich zur Stütze dieser Annahme noch weitere und mannigfache Gründe anführen:

Es wurde bereits erwähnt, daß unser Sehen vornehmlich ein foveales Sehen ist. Die Anatomie der Fovea lehrt nun, daß die Netzhaut sich an dieser Stelle bis auf etwa 0,1 mm durch den Schwund ihrer inneren Schichten verdünnt; abgesehen von der Pigmentschicht bleibt nur die äußere Körnerschicht und die Schicht der Stäbchen und Zapfen übrig, und die letztere besteht in der Fovea allein aus Zapfen von besonders schmaler Gestalt; die äußere Körnerschicht wird von den zugehörigen Zapfenfasern und -körnern gebildet. Also *diejenige Stelle der Netzhaut, welche wir vorzugsweise zum Sehen benutzen, besteht fast nur aus Zapfen.*

Eine besondere Bedeutung für die Lokalisation der Erregung und für die Physiologie des Sehens überhaupt hat der **Sehpurpur**. Im Jahre 1876 entdeckte BOLL, daß, wenn man die Netzhaut aus dem Auge eines Tieres herausnimmt, welches sich im Dunkeln aufgehalten hat, sie zunächst purpurrot aussieht, im hellen Tageslicht aber in wenigen Minuten ausbleicht. KÜHNE zeigte, daß man aus der Dunkelnetzhaut mit gallensauren Salzen einen Farbstoff extrahieren kann, eben den Sehpurpur oder das Rhodopsin. Legt man die Netzhaut mit der Stäbchenschicht wieder in das Auge hinein, so findet vom überlebenden Pigment-

epithel aus eine Regeneration des Purpurs statt. Diese geht aber offenbar nicht von dem Pigment selber aus, da die Regeneration auch im Auge des Albinos stattfindet. KÜHNE fand ferner, daß, wenn man das Auge eines im Dunkeln gehaltenen Kaninchens 1—1½ Minuten dem Licht exponiert, auf der Netzhaut, ähnlich wie auf der photographischen Platte, ein Bild der vor dem Auge befindlichen Objekte, z. B. das Bild eines Fensterkreuzes, zustandekommt; er nannte es ein *Optogramm*. Es läßt sich mit 4%iger Alaunlösung fixieren, so daß man es auch im Tageslicht betrachten kann.

Die Ausbleichung des Sehpurpurs geht bei Licht von verschiedener Ätherwellenlänge mit verschiedener Geschwindigkeit vor sich. Im Gelbgrün (530 $\mu\mu$) erfolgt sie am raschesten, etwas langsamer im Grün und Blau, noch langsamer im Gelb und am langsamsten im Rot. Dies ist für die Theorie der Sehpurpurfunktion von Bedeutung (siehe S. 469).

Schon BOLL machte die wichtige Angabe, daß *der Sehpurpur in der Schicht der Stäbchen und Zapfen, und zwar allein um die Stäbchenaußenglieder herum zu finden ist*. Die Fovea centralis ist daher davon frei. Es gibt Tiere, bei denen die Netzhaut keine oder fast keine Stäbchen

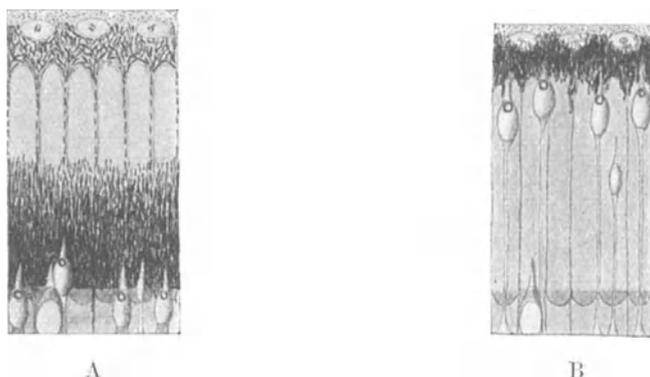


Abb. 185. Schnitte durch die Netzhaut vom Frosch (nach ENGELMANN). A nach Aufenthalt im hellen Tageslicht, B nach längerem Aufenthalt im Schatten. Pigmentzellen der Retina oben. In A Zapfenkörner durch Verkürzung der Zapfennenglieder an die Membrana limitans externa gezogen, in B im äußeren Drittel der Stäbchenschicht gelegen. In A Retinalpigment die inneren Enden der Stäbchen umhüllend, in B in die Pigmentzellen zurückgezogen.

enthält, so die Netzhaut von Huhn, Taube, Schildkröte, bei diesen ist die Netzhaut auch frei von Sehpurpur. Der Sehpurpur hat also speziell etwas mit der Funktion der Stäbchen zu tun. Worin diese besteht, soll erst später (S. 469) erörtert werden.

Das Licht erzeugt noch andere Veränderungen in der Schicht der Stäbchen und Zapfen. Namentlich bei Fischen und Amphibien, weniger bei Reptilien, Vögeln und Säugetieren findet bei Belichtung eine **Wanderung des Netzhauptpigments** nach innen, bei Verdunkelung eine Rückwanderung nach außen statt (BOLL) (siehe Abb. 185). Die Verschiebung der dunklen Farbkörnchen geschieht in den langen fadenförmigen Fortsätzen, welche das Pigmentepithel zwischen die Sehzellen vorschieben kann, und erstreckt sich bei intensiver Belichtung bis zur

Membrana limitans externa. Kurzwelliges Licht wirkt stärker als langwelliges. Die Reaktion erfolgt auch noch am ausgeschnittenen Auge.

Mit der Pigmentvorwanderung geht Hand in Hand eine **Kontraktion der Zapfennenglieder** bei der Belichtung (ENGELMANN und VAN GENDEREN STORT); auch sie ist am ausgesprochensten bei Fischen und Amphibien (siehe die Abb. 185), schwächer bei Reptilien und Vögeln und fehlt fast ganz bei den Säugern. Die Innenglieder können sich um 50—90% ihrer Länge zusammenziehen. Dazu kommt öfter bei Fischen, auch bei Vögeln eine Streckung der *Stäbcheninnenglieder* auf den Lichtreiz.

Die Bedeutung dieser Vorgänge ist vielleicht in folgendem zu erblicken: im hellen Licht überwiegt die Funktion der Zapfen, im Dämmerlicht die der Stäbchen (siehe auch S. 469). Im hellen Licht rücken deshalb die Zapfen in die Bildebene in der Gegend der Membrana limitans externa. Da nun aber die Form und Lichtbrechung der Zapfenaußenglieder bei denjenigen Tieren, bei welchen die genannten Reaktionen besonders deutlich sind, eine Zerstreuung des Lichts auf benachbarte Stäbchen und Zapfen ermöglichen und damit die Sehschärfe gefährden, so wird zwecks optischer Isolierung jeder Zapfen mit einem Pigmentschirm umhüllt. Im Dunkeln weichen demgegenüber die Zapfen eventuell soweit zurück, daß an der Limitans externa eine bloß aus Stäbchen bestehende Schicht übrig bleibt, deren Umkleidung mit Pigment entbehrt werden kann, weil schon die zylindrische Form und die hohe Brechkraft der Stäbchen genügen, um den Übertritt von Licht in die Stäbchenzwischen substanz oder aus dieser zurück durch totale Reflexion zu verhindern (GARTEN).

Außer den Stäbchen und Zapfen könnte nur noch *das Pigmentepithel als lichtempfindliches Element* in Frage gezogen werden. Aber dagegen läßt sich einwenden, daß die Sehschärfe des Auges, d. h. seine Fähigkeit, örtlich verschiedene Lichtreize voneinander zu unterscheiden, einen Grad von Feinheit in der Aufteilung der lichtempfindlichen Schicht in einzelne Elemente zur Voraussetzung hat, welcher wohl in dem zarten Mosaik der Stäbchen und Zapfen, aber nicht in den größeren Bausteinen des Pigmentepithels zu finden ist. Auf die genauen Messungen des räumlichen Unterscheidungsvermögens des Auges werden wir erst später (S. 475) zu sprechen kommen.

Das Ergebnis der physiologischen Untersuchung führt also zu folgender *Auffassung von der Erregung der Netzhaut*: vom dioptrischen Apparat des Auges herkommend durchsetzt das Licht die ganze Netzhaut, erregt sie aber erst in der hintersten Schicht; dort sprechen die Stäbchen wahrscheinlich durch Vermittelung des Sehpurpurs an, welchen das Licht zersetzt; wie die Zapfen erregt werden, ist unbekannt. Der Erregungsprozeß wird sodann wohl durch die eigenartig gestalteten Endigungen der Stäbchen- und Zapfenfasern (Abb. 181 IV) auf die bipolaren Ganglienzellen der inneren Körnerschicht (VI) übertragen und von diesen zu den großen Ganglienzellen (VIII) und zu den Nervenfasern (IX) weiter geleitet. —

Wenden wir uns nun zu Versuchen, welche die Aufklärung der Vorgänge beim Sehen von einer ganz anderen Seite her in Angriff genommen haben. Das Auge ist der Vermittler zwischen den physikalischen Reizen der Außenwelt und den Lichtempfindungen unserer Innenwelt. Bisher verfolgten wir wesentlich die Wirkungen der physikalischen Reize auf das Auge; beginnen wir nun mit den Lichtempfindungen und schließen wir von ihnen aus rückwärts auf das, was das Sehorgan leistet. Dazu ist es notwendig, *die gewaltige Zahl der Lichtempfindungen zunächst einmal in ein System einzugliedern*. Das Verfahren dabei ist rein subjektiv und vernachlässigt absichtlich alle Beziehungen zu dem, was die Physik unter Licht versteht.

Zunächst können wir zwei Gruppen von Lichtempfindungen einander gegenüberstellen, die *farblosen Lichter* und die *Farben*, oder, wie HERING

es bezeichnete, die *tonfreien Farben* und die *getönten oder bunten Farben* (*Farbentöne*).

Die *farblosen Lichter* umfassen alle Abstufungen des Grau vom tiefsten Schwarz bis zum strahlendsten Weiß. Alle diese Lichter sind untereinander verwandt, sie unterscheiden sich nur durch die verschiedenen Grade ihrer Weißlichkeit oder ihrer Schwärzlichkeit voneinander. Sie lassen sich in eine einzige kontinuierliche Reihe einordnen.

Auch die *bunten Farben* bilden eine natürliche Reihe, welche in dem Kontinuum der Spektralfarben gegeben ist. Dieses beginnt mit dem Rot und führt über Orange, Gelb, Grün, Grünblau und Indigo zum Violett. Aber über das Violett hinaus können wir die Reihe mit den Purpurtönen fortsetzen, welche im Spektrum nicht enthalten sind, und gelangen so über den bläulichen und den rötlichen Purpur zum Anfangsglied der Reihe, zum Rot zurück. Die Linie schließt sich also zu einem *Farbenkreis*. In diesem nehmen aber einzelne Qualitäten eine ausgezeichnete Stellung ein. Nämlich gehen wir noch einmal vom Rot aus, so gelangen wir am Gelb zu einem Wendepunkt; denn die verschiedenen Töne des Gelbrot, des Orange und des Rotgelb sind alle untereinander verwandt

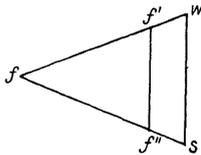


Abb. 186. Verhüllungsdreieck nach HERING.

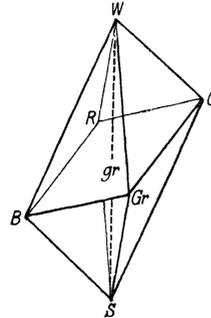


Abb. 187. Farbkörper.

durch ihre Rötlichkeit und ihre Gelblichkeit; jenseits des Gelb kommt aber als etwas Neues hinzu die „Grünvalenz“ und statt deren tritt die „Rotvalenz“ zurück. Ebenso empfinden wir Grün und Blau als natürliche Wendepunkte. Es heben sich also aus der Fülle der bunten Farben vier heraus, die *Urfarben*, wie HERING, oder die *Prinzipalfarben*, wie AUBERT sie genannt hat, nämlich das Urrot, das Urgelb, das Urgrün und das Urblau. Daher setzen wir besser an die Stelle des Farbenkreises ein *Farbenviereck*. In ihm bilden dann Gelb und Blau einerseits und Grün und Rot andererseits *Gegenfarben* (LIONARDO DA VINCI, AUBERT, HERING). Diese schließen einander aus. Denn wohl kann man sich ein Rot vorstellen, dem eine Gelbkomponente anhaftet, eben ein gelbliches Rot, oder ein Blau, dem eine Grünkomponente anhaftet, also ein grünliches Blau; dagegen ein Grün, welches ein wenig rötlich, oder ein Gelb, welches etwas blau aussieht, gibt es nicht.

Die Farbentöne können nun dadurch noch abgeändert werden, daß man ihnen mehr oder weniger Weiß oder Schwarz zumischt. Man gelangt so von den gesättigten Farben zu den *ungesättigten* oder *verhüllten bunten Farben* (HERING). Die *Sättigung* ist also eine zweite Variable, welche wir neben den Farbentönen bei der Analyse unserer Farbeempfindungen herauschälen. Das Maximum der Verhüllung ist jedes-

mal in irgend einem Glied der Schwarz-Weiß-Reihe zu erreichen. Bezeichnen wir in der Abb. 186 mit f irgend eine gesättigte Farbe und repräsentiert die Linie $s w$ die Schwarz-Weiß-Reihe, so entspricht jede Verbindungslinie von f mit einem beliebigen Punkt von $s w$ einer anderen Verhüllung von f . $f s w$ nannte HERING ein *Verhüllungs-dreieck*; es bezeichnet die ganze Mannigfaltigkeit der von einem bestimmten Farbenton ableitbaren verhüllten Farben.

Bis zu einem gewissen Grad kann man dem Gegensatz von Rot und Grün und dem von Blau und Gelb nun auch den Gegensatz von Schwarz und Weiß an die Seite stellen, aber doch nur bis zu einem gewissen Grad. Denn wenn man auch allen verschiedenen Graus den Wert der Empfindungsqualität gerade so zu erkennen mag, wie den verschiedenen Farbtönen, so sind doch die Glieder der Schwarz-Weiß-Reihe zum Unterschied von den Gliedern des Farbensvierecks sämtlich untereinander verwandt, man kann sie alle als Weiß von verschiedener *Helligkeit* definieren, sie also noch in anderer Weise voneinander unterscheiden, als die Farbtöne. Auch von den ungesättigten Farben kann man entsprechend als von Farben verschiedener Helligkeit reden. Die Linie $f_1 f_2$ in dem Verhüllungs-dreieck repräsentiert z. B. verhüllte Farben von gleichem Farbenton und gleicher Sättigung, aber von verschiedener Helligkeit. Endlich sind auch die gesättigten Farben selber in ihre Helligkeit voneinander verschieden. Betrachtet man z. B. ein Sonnenspektrum, so erscheint das Gelb weitaus am hellsten, es folgen Rot und Grün, während Blau und Violett am dunkelsten aussehen. Die Helligkeit ist also eine dritte Variable in der Mannigfaltigkeit der Farbenempfindungen.

Danach können wir das System der Lichtempfindungen etwa durch einen *Farbenkörper* von der Form einer Doppelpyramide räumlich darstellen (siehe Abb. 187). Die Fläche $RGGrB$ stellt darin das Farbensviereck vor; seine Ränder bedeuten die gesättigten Farben, die Innenfläche enthält die Farben, welche mehr oder weniger mit einem bestimmten Grau (gr) verhüllt sind. Das Viereck liegt nicht horizontal, sondern schief, um anzudeuten, daß die „spezifische Helligkeit“ des gesättigten Gelb am größten, die von Blau am geringsten, die von Rot und Grün eine mittlere ist. Die senkrechte Achse WS stellt die Schwarz-Weiß-Reihe dar; irgend ein Schnitt entlang WS legt zwei einander gegenüberliegende Verhüllungs-dreiecke bloß. Ein Horizontalschnitt durch den Farbenkörper trifft Farben gleicher Helligkeit, aber verschiedener Sättigung.

Welches ist nun der **Zusammenhang zwischen all diesen Lichtempfindungen und den physikalischen Reizen**? Wenn wir von der naheliegenden und gewöhnlich gemachten Voraussetzung ausgehen, daß jeder Empfindung ein bestimmter physiologischer Prozeß zugeordnet ist, so heißt diese Frage beantworten eine vollständige physiologische Theorie des Sehens geben, welche in allen Einzelheiten der experimentellen Kritik zu unterliegen hätte. Von dieser Möglichkeit sind wir aber noch weit entfernt.

Beginnen wir die Erörterung mit der Prüfung des Verhältnisses, das zwischen den Empfindungen von gesättigten Farben und den physikalischen Lichtreizen besteht. Farben maximaler Sättigung erhält man auf physikalischem Wege am einfachsten durch Dispersion mit einem Prisma oder durch Beugung mit einem Gitter. Es zeigt sich, daß — mit gewissen Einschränkungen — *die Länge der Ätherwellen bzw. die Schwingungszahl den Farbenton bestimmt*. Jedoch erstreckt sich die Empfindlichkeit des Auges für Ätherwellen nur auf ein bestimmtes Intervall von Wellenlängen. Die elektrischen Wellen und das ultrarote

Licht haben keinen Reizwert, ebensowenig oder fast ebensowenig das ultraviolette Licht und die noch kürzeren Wellen bis zu den Röntgenstrahlen hin. Die Ursache liegt nur zum Teil in der Absorption durch den dioptrischen Apparat, so z. B. für das ultraviolette Licht, welches größtenteils durch die Linse von der Netzhaut abgeschirmt wird. Die Hauptsache ist die Beschränkung der Erregbarkeit der Netzhaut auf bestimmte Wellenlängen.

Das sichtbare Spektrum beginnt im Rot von 800—600 $\mu\mu$ Wellenlänge; Gelb umfaßt dann ungefähr das Intervall 600—580 $\mu\mu$, Grün 580—500 $\mu\mu$, Blau 500—430 $\mu\mu$ und Violett 430—390 $\mu\mu$. In dem Intervall von 800—650 $\mu\mu$ ändert sich beim Rot nicht der Farbenton, nur die Helligkeit. Daran schließt sich das Kontinuum der verschiedenen Farbtöne bis zum kürzestwelligen Violett von etwa 390 $\mu\mu$.

Beachten wir nun, daß allein die Ätherwellen aus dem genannten Intervall den adäquaten Reiz für die Erregung der Lichtempfindungen

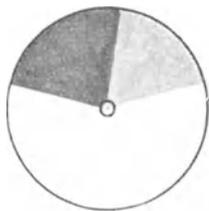


Abb. 188. Drei MAXWELLSche Scheiben (weiß, hellgrau und dunkelgrau) ineinander gesteckt.

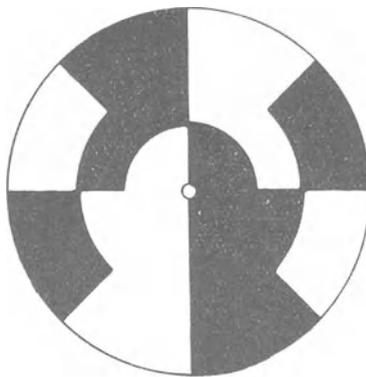


Abb. 189. Weiß-Schwarz-Scheibe nach HELMHOLTZ.

abgeben, so *vermissen wir sofort die Kongruenz der Reize mit den bei der psychologischen Ordnung vorgefundenen Empfindungen*. Wir fragen, von was für Reizen die farblosen Lichter abhängen. Wir vermissen eine exponierte Stellung der Reize, welche die Urfarben auslösen; denn die Reize, welche Urrot (etwa 760 $\mu\mu$), Urgelb (etwa 580 $\mu\mu$), Urgrün (etwa 500 $\mu\mu$) und Urblau (etwa 480 $\mu\mu$) hervorrufen, unterscheiden sich in nichts von den die Übergangsfarben erregenden Ätherwellen. Ferner bleibt offen, wie die verschiedenen Purpurtöne erzeugt werden, und wovon die spezifische Helligkeit der Farben herrührt.

Die Bestrebungen, all dies klar zu legen, haben zur Untersuchung der **Mischung von Farben** geführt. Diese kann auf sehr verschiedene Art ausgeführt werden:

1. Spektralfarben, also gesättigte Farben mischt man durch *verschiebliche Übereinanderlagerung zweier Sonnenspekttra*.

2. Am bequemsten ist die Methode der *rotierenden Scheiben* oder des NEWTONSchen Farbenkreisels. Man benutzt kreisförmige Scheiben aus buntem Papier, welche in der Mitte mit einem Loch und außerdem mit einem radiären Schlitz versehen sind; dadurch können mehrere Scheiben ineinander geschoben werden, so daß von den verschiedenen

gefärbten Scheiben Sektoren von beliebiger Größe bei der Übereinanderlagerung frei bleiben (siehe Abb. 188). Rotiert man die Scheiben auf einer gemeinsamen Achse, so kommt eine subjektive Farbmischung zustande (MAXWELL).

Dies beruht auf der sogenannten **Trägheit der Netzhaut**. Wenn nämlich ein Licht vorübergehend auf das Auge wirkt, so klingt die Netzhauterregung nicht momentan ab, sondern sie überdauert noch kurze Zeit den Reiz, so daß man das Licht noch zu einer Zeit zu sehen glaubt, wo es schon gar nicht mehr da ist; man sieht ein *Nachbild* des Lichts. Ebenso wenig wie das Abklingen ist das Anklingen der Erregung ein momentaner Vorgang; vielmehr muß ein Licht erst eine gewisse Zeit gewirkt haben, ehe es seiner Intensität entsprechend empfunden wird. Daher sieht ein schwächeres Licht, das längere Zeit wirkt, ebenso hell aus, wie ein stärkeres Licht, welches nur kurze Zeit wirkt. Vom Anklingen und Abklingen der Netzhauterregung kann man sich auch durch folgenden Versuch überzeugen: Wenn man eine Scheibe, auf welcher schwarze und weiße Sektoren in der Art der Abb. 189 abwechseln, in immer schnellere Rotation versetzt, so sieht man zuerst in dem äußeren der konzentrischen Ringe sowohl den vorderen als auch den hinteren Rand der einzelnen Sektoren verschwimmen, bald auch in dem zweiten Ringe und schließlich auch in der Mittelscheibe. Steigt die Geschwindigkeit weiter, so verschwindet, mit dem äußeren Ring beginnend und nach innen fortschreitend, das Schwarz und Weiß und an deren Stelle erscheint ein homogenes Grau, welches die ganze Scheibe gleichmäßig erfüllt und von einer Helligkeit ist, als ob das Schwarz und Weiß der einzelnen Sektoren gemischt und gleichmäßig über den ganzen zugehörigen Ring verteilt wäre (TALBOT'scher Satz). Der Eindruck des Grau kommt also dadurch zustande, daß die Weißerregung noch andauert, wenn schon Schwarz dem Auge geboten wird, und umgekehrt. Genau so verschmelzen die farbigen Sektoren auf den MAXWELLSchen Scheiben.

Auf diesen Trägheitserscheinungen beruht auch das bekannte Spielzeug des *Stroboskops* oder *Zootrops* und seine Fortbildung zum *Kinematographen*. In diesen werden vermöge der Trägheit der Netzhaut zahlreiche Bilder zur Verschmelzung gebracht, welche die Bewegung eines Schiffs, eines Reiters, eines Geschosses und dergleichen vortäuschen, deren einzelne Phasen von der photographischen Platte festgehalten sind, die aber zu schnell aufeinander folgen, als daß das träge Auge sie alle im einzelnen festzuhalten vermöchte.

3. Ein weiteres Prinzip, Farben zu mischen, ist in dem LUMIÈRESchen *Autochromverfahren* zur Herstellung farbiger Photographien gegeben. Hierbei verwendet man eine Glasplatte, den Farbraster, auf welchem rot-, grün- und blaugefärbte Stärkekörnchen, über 10 000 pro mm², dicht nebeneinander liegen. Geht Licht durch die Platte hindurch, so mischen sich die Farben der Stärkekörnchen dadurch, daß sich die Körnchen wegen ihrer Kleinheit und wegen ihrer nahen Nachbarschaft auf einem und demselben Sehelement, einem Zapfen der Netzhaut, abbilden. Man sieht dadurch nicht die einzelnen Farben, sondern den Effekt ihrer Mischung.

Bei den drei genannten Verfahren handelt es sich um eine subjektive Mischung der Farben; das nächstliegende Verfahren, Pigmentfarben, Tuschen miteinander zu vermengen, wird uns erst nachher (S. 461) beschäftigen.

Auf jedem dieser Wege entstehen nun *durch Mischung einheitliche Farbenempfindungen, welchen man von ihrer komplexen Herkunft absolut nichts anmerkt*. Wegen ihrer Entstehung heißen sie **Additionsfarben**.

Exemplifizieren wir die Ergebnisse der Farbenmischung zunächst an dem Beispiel der Spektralfarben (HELMHOLTZ), d. h. physikalisch homogener Lichter, von denen ein jedes für sich die Empfindung der gesättigten Farbe erzeugt:

1. Bringt man sämtliche Farbstrahlen des prismatischen Sonnenspektrums zur Wiedervereinigung, so erscheint bekanntlich Weiß, dem nichts von Farbigkeit mehr anhaftet.

2. Mischt man beliebige Paare der Spektralfarben vom längstwelligen Rot bis zum Gelbgrün von etwa $540 \mu\mu$ in beliebigen Mengen (Intensitäten), so kann man sämtliche dazwischen liegende Farben in genau derselben Reinheit und Sättigung erhalten, wie sie die einzelnen reinen spektralen Lichter aufweisen; man kann also z. B. durch geeignete Mengen von Rot und Gelbgrün sämtliche Abwandlungen von Rot über die Orangetöne und über Gelb bis zum Gelbgrün herstellen.

3. Ähnlich lassen sich durch Mischung von Violett und Blaugrün (bis zu etwa $510 \mu\mu$) sämtliche dazwischen liegende Farben des Spektrums, also sämtliche Abwandlungen von Blau erzeugen. Das Ergebnis sind aber Empfindungen, welche nur im Farbenton mit den Spektralfarben übereinstimmen, nicht in der Sättigung; alle diese Mischfarben sind etwas verhüllt.

4. Dies letztere ist viel ausgesprochener, wenn man die mittleren Spektralfarben etwa von Gelb bis Blau mischt. Die Mischfarbe ist hier um so weniger gesättigt, je weiter die Komponenten im Spektrum auseinander liegen. Zu jeder dieser mittleren Farben ist sogar eine andere zu finden, welche mit ihr vermischt das Maximum der Unsättigung, Weiß, ergibt. Solche Farben, welche einander zu Weiß ergänzen, heißen *Komplementärfarben*. Paare derselben sind z. B. Orange und Blau, Gelb und Indigo, Grüngelb und Violett, Blaugrün und Rot usw. Nur zu den Grüntönen findet man keine Komplementärfarbe.

5. Mischt man Violett und Rot, so erscheint eine Farbe, welche sich mit keiner Spektralfarbe vergleichen läßt, nämlich Purpur.

Die Gesamtheit dieser Ergebnisse läßt sich schematisch in einem „*Farbendreieck*“ (Abb. 190) darstellen (HELMHOLTZ). Dessen drei Ecken sind von spektralem Rot, Grün und Violett eingenommen, auf der Basis liegen die Purpurtöne und auf den zwei anderen Seiten die Spektralfarben von Rot bis Grün und von Grün bis Violett. Im Innern des Dreiecks liegen die verhüllten Farben, das Maximum der Verhüllung, Weiß, an einem bestimmten Punkt W. Dieser ist so angebracht, daß er den Schnittpunkt aller derjenigen Geraden darstellt, an deren Enden Komplementärfarben liegen (z. B. rot und blaugrün, violett und grünlichgelb). Die schwache Krümmung der rechten Seite bringt zum Ausdruck, daß die Mischung von zwei auf ihr gelegenen Farben keine völlig gesättigte Farbe gibt; denn die Verbindungslinie zweier ihrer Punkte fällt in die Fläche des Dreiecks, welche nur ungesättigte Farben repräsentiert. Anders bei der linken Seite; diese ist größtenteils geradlinig, die Verbindungslinie zweier ihrer Punkte fällt also mit der Seite zusammen. Das bedeutet, daß die Gemische von Rot bis Gelbgrün so wie die gesättigten Spektralfarben aussehen.

Aus dem Farbendreieck ist ferner abzulesen, welche Mengen oder Intensitäten man von zwei Farben nehmen muß, um eine bestimmte Mischfarbe zu erhalten. Die Abstände zweier Komplementärfarbenpunkte vom Weißpunkt sind z. B. so gewählt, daß die Abstände umgekehrt proportional den Mengen sind,

welche angewendet werden müssen, um Weiß zu erzeugen; also RW Blaugrün und BgrW Rot geben Weiß. Bildlich wird das auch so ausgedrückt: Man denke sich die notwendigen Mengen durch Gewichte dargestellt und diese an den Enden der Geraden aufgehängt, dann liegt W im Schwerpunkt dieses Systems. Repräsentiert der Punkt F ein bestimmtes ungesättigtes Blau, welches aus gesättigtem Blau und aus gesättigtem Orange hergestellt werden soll und bedeutet B und O die Mengen Blau und Orange, welche dafür verwendet werden müssen, so muß sich $B : O = OF : BF$ verhalten.

Das hervorstechendste Ergebnis dieser Darstellung ist, daß den Farben Rot, Grün und Violett eine ausgezeichnete Stellung einzuräumen ist; sie sind von HELMHOLTZ deshalb als Grundfarben bezeichnet worden. Ihre Bedeutung liegt darin, daß man mit ihnen allein durch geeignete Mischung sämtliche übrigen Farben erzeugen kann, freilich nur in angenäherter, aber immerhin größtmöglicher Sättigung; denn das Paar Rot und Grün gibt die eine, das Paar Grün und Violett die andere Hälfte der Spektralfarben, Rot und Violett gibt die Purpurtöne, und da Purpur und Grün komplementär sind, so geben die drei Komponenten Rot, Grün und Violett zusammen Weiß. An Stelle von Rot, Grün und Violett kann man als Grundfarben auch Rot, Grün und Blau wählen, da sich aus

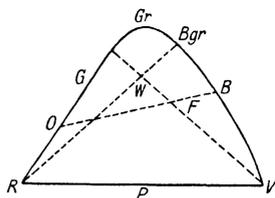


Abb. 190. Farbdreieck nach HELMHOLTZ.

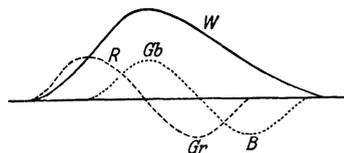


Abb. 191. Schema zur Theorie der Gegenfarben.

viel Blau und wenig Rot Violett erzeugen läßt. Auf die physiologische Bedeutung der Sonderstellung der Grundfarben werden wir bald zu sprechen kommen.

Die Herstellung der Additionsfarben durch Mischung wirft ein interessantes Licht auf die Fähigkeiten des Sehorgans. Sein Vermögen, die Umwelt zu analysieren, ist offenbar beschränkt, besonders im Vergleich mit dem Ohr. Denn dieses kann ja einen Akkord von Schallschwingungen in seine einzelnen Tonkomponenten zerlegen, das Auge kann dagegen einen Akkord von Ätherschwingungen nur als Ganzes erfassen und kann ihn nicht von einem (physikalisch gesprochen) reinen Farbenton unterscheiden. Ob ein Grüngelb aus Rot und Grün gemischt ist oder aus Orange und Gelbgrün, oder ob es homogenes spektrales Grüngelb ist, vermag das Auge nicht zu erkennen. Ferner merkt das Auge nichts davon, daß ein farbloses Licht fast immer (siehe dazu S. 461) durch Mischung von mindestens drei verschiedenen Ätherschwingungen entstanden ist, und die Empfindung von Schwarz ist überhaupt nicht auf die direkte Einwirkung von Ätherwellen zurückzuführen. Man hat aus diesem Grund öfter darüber gestritten, ob man berechtigt ist, von Schwarzempfindung zu sprechen, so wie man von Weiß- oder von Grünempfindung spricht. Der Psychologe wird dies zweifellos bejahen und von seinem Standpunkt aus keinen Unterschied zwischen Schwarz, Grau oder Grün oder sonst einer Farbe anerkennen und nicht einräumen können, daß die Abwesenheit eines eigenen Reizes für die Beurteilung maßgebend

sei (HERING). Zudem bedeutet ein Mangel jeglichen Lichtreizes noch keineswegs Schwarzempfindung. So erzeugt ja z. B. die Blindheit der Papilla nervi optici keinen schwarzen Fleck im Sehfeld, und daß zur Empfindung des tiefsten Schwarzes ganz besondere äußere Bedingungen erfüllt sein müssen, das wird später (S. 465) noch gezeigt werden.

Mischt man nun nicht reine Spektralfarben in der geschilderten Weise, sondern mischt die Farben bunter Papiere mit Hilfe MAXWELLScher rotierender Scheiben, so könnte man vielleicht prinzipiell andere Ergebnisse erwarten, als wie sie in dem Farbendreieck ausgedrückt wurden; denn die Farben bunter Papiere sind, wie die Spektralanalyse zeigt, keine reinen Farben. Was wir an Farben für gewöhnlich zu sehen bekommen, die sog. *Körperfarben*, das sind fast immer Kombinationen von Ätherwellen der verschiedensten Länge. Vermengt man nun z. B. ein gelbes Pigment mit einem blauen, so wie es in der Maltechnik geschieht, so erhält man für gewöhnlich Grün, während nach dem Farbendreieck Gelb und Blau als Komplementärfarben bei der Mischung Weiß oder Grau ergeben. Dies hat folgenden Grund: Wenn auf ein gelbaussehendes Pigment Tageslicht fällt, so wird ein Teil desselben an der Oberfläche reflektiert, ein Teil durchdringt die Pigmentkörnchen, und dabei wird vornehmlich das gelbe Licht, in schwächerem Maß aber gewöhnlich auch Grün und Rot durchgelassen, dagegen Blau und Violett absorbiert. Das durchgedrungene Licht wird dann an tiefer gelegenen Körnchen bei genügend schräger Inzidenz total reflektiert, so daß schließlich in der Hauptsache gelbes, daneben grünes und rotes Licht von dem gelben Pigment ausgestrahlt wird und das Auge des Beobachters erreicht. Da rotes und grünes Licht sich aber subjektiv einigermaßen zu Weiß ergänzen, so wird zusammen mit dem reflektierten gelben Licht der Eindruck eines hellgelben Pigments hervorgehoben. Fällt das Tageslicht auf ein blauaussehendes Pigment, so wird von diesem in erster Linie blaues Licht, außerdem etwas Grün und Violett durchgelassen und dann reflektiert, dagegen Gelb und Rot absorbiert. Mischt man nun die beiden Pigmente, so wird von den Körnchen des blauen Pigments das Gelb und Rot, welches die gelben Körnchen passiert hat, ausgelöscht und von den Körnchen des gelben Pigments wird das Blau und Violett, das die blauen Körnchen passiert hat, ausgelöscht. So bleibt vorwiegend grünes Licht übrig. Dieses Grün wird sachgemäß als eine **Subtraktionsfarbe** bezeichnet.

Hiernach ist klar, daß die physikalische Mischung der Pigmente (in Form von Farbpulvern oder auch in gelöster Form) etwas ganz anderes ist, als die subjektive physiologische Mischung derselben Pigmente, wenn sie auf Papier gestrichen und auf der MAXWELLSchen Scheibe rotiert werden. Im letzteren Fall weicht das Ergebnis nur insoweit von dem Ergebnis der Mischung reiner Spektralfarben ab, als die additive Mischfarbe ziemlich dunkel, also z. B. ein mit rotierenden Scheiben erzeugtes farbloses Licht ziemlich dunkelgrau ist; das beruht darauf, daß von den farbigen Papieren ein erheblicher Teil des auffallenden Lichts wegabsorbiert wird.

Es bleibt bei der Darlegung der Beziehungen zwischen Lichtempfindung und physikalischem Reiz nun noch der **Zusammenhang zwischen der Helligkeit der Farbe und dem Lichtreiz** zu erörtern. Von der „spezifischen Helligkeit“ der Spektralfarben war bereits die Rede (S. 456); die früher gemachten Angaben gelten dabei für mittlere Reizstärken. Geht man nämlich zu immer größeren Reizstärken, also zu immer größeren Schwingungsamplituden über, so steigert sich nicht bloß die Helligkeit, sondern es ändern sich zugleich Farbenton und Sättigung der Spektralfarben; je stärker der Reiz wird, um so mehr nähert sich die Empfindung dem farblosen Weiß. Dabei schwinden Rot und Grün eher als Gelb und Blau. Wendet man dagegen immer geringere Reizstärken an, so verschiebt sich das Maximum der Helligkeit vom Gelb gegen das Grün hin, Rot vermindert seine Helligkeit so, daß es vom Blau an Helligkeit übertroffen wird (sogenanntes *PURKINJESches Phänomen*), weiterhin verschwindet das Rot ganz, und die übrigen Lichter büßen an Farbigkeit mehr und mehr ein; schließlich bleibt von dem ursprünglichen farbigen Sonnenspektrum ein verkürztes farbloses Band

übrig, dessen einzelne Abschnitte sich nur noch durch ihre Helligkeit voneinander unterscheiden. Geht man also auf dem umgekehrten Weg von unterschwelligem durch ein Prisma dispergierten Lichtern aus, die man allmählich verstärkt, so taucht zuerst ein **farbloses Spektrum** auf (HERING und HILDEBRAND), und erst nach diesem „farblosen Intervall“ erscheinen bei weiterer Verstärkung die Farben. Vielleicht darf man hiernach annehmen, daß jeder Farbe stets eine gewisse farblose Komponente beigemischt ist.

Versuchen wir nach all dem nun, uns ein Bild von den Vorgängen im Sehorgan zu machen, welche durch die physikalischen Lichter angeregt werden! Denn um mehr als um ein Bild kann es sich vorläufig nicht handeln, da das Material unserer faktischen Kenntnisse von den Netzhautprozessen, so wie sie vorher mitgeteilt wurden, viel zu geringfügig ist, als daß man mit ihm die Brücke zwischen der psychologischen Ordnung der Lichtempfindungen und der physikalischen Ordnung der Lichtreize zu schlagen vermöchte.

Es sind wesentlich zwei Hypothesen, in welchen die Psychophysik des Sehorgans zum Ausdruck gekommen ist, die **Lehre von den Gegenfarben** von HERING (1878), welche die rein psychologische Betrachtung der Lichtempfindungen zum Ausgang nimmt, und die **Dreikomponentenlehre** von YOUNG (1807) und HELMHOLTZ (1852), welche sich auf den Erfahrungen über die Mischung von spektralen Lichtern aufbaut.

Entsprechend der psychologischen Heraussonderung dreier Paare von „Gegenfarben“ nahm HERING an, daß drei Sehsubstanzen im Auge vorhanden sind, eine *Rotgrünsubstanz*, eine *Gelbblausubstanz* und eine *Weißschwarzsubstanz*, welche von dem einfallenden Licht in verschiedener Weise verändert werden. Rotes, gelbes und weißes Licht sollen die drei Substanzen zersetzen und dadurch Rot-, Gelb- und Weißempfindung verursachen; grünes und blaues Licht sowie Dunkelheit sollen das Gegenteil von Zersetzung, Aufbau, bewirken und so Grün-, Blau- und Schwarzempfindung erregen. Diese Hypothese geht von der allgemein-physiologischen Erfahrung aus, daß, entsprechend den selbstregulatorischen Fähigkeiten der Organismen, zu jeder Zersetzung oder *Dissimilation* auch die Kehrseite, eine *Assimilation*, gehört; eigenartig und mit sonstigen Erfahrungen der Physiologie schwer in Einklang zu bringen ist dabei nur HERINGS Annahme, daß ein äußerer Reiz direkt eine Assimilation auszulösen vermag, so wie es für das grüne und blaue Licht vorausgesetzt wird.

HERING nahm ferner an, daß die Weißschwarzsubstanz bei jeder Lichteinwirkung mit zersetzt wird; daraus folgt, daß jede durch einen Lichtreiz ausgelöste Farbe nicht maximal gesättigt ist, sondern neben ihrer „bunten Valenz“ eine gewisse „Weißvalenz“ hat. Zu dieser Annahme gelangten wir eben schon auf einem anderen Wege bei Betrachtung des Zusammenhangs zwischen Helligkeit und Stärke des Lichtreizes (S. 461).

Die Annahmen von HERING können wir durch ein Schema wie in der Abb. 191 (S. 460) graphisch darstellen. Die Abszisse bedeutet darin die Reihe der spektralen Reizlichter, die positiven und negativen Ordinatenwerte stellen die Dissimilations- und die Assimilationsgröße der drei Sehsubstanzen dar, welche den objektiven Reizen entsprechen.

Die stete Erregung der Weißschwarzsubstanz im Sinne ihrer Dissimilation erklärt auch das Phänomen der Komplementärfarben. Die

Komplementärfarben sind Gegenfarben. Wenn also gelbes und blaues Licht gleichzeitig und gleich stark auf das Auge wirken, dann müssen Dissimilation und Assimilation einander die Wage halten. Es würde demnach gar keine Empfindung resultieren, wenn nicht sowohl von Gelb als auch von Blau die Weißschwarzsubstanz mit zersetzt und damit die Empfindung Weiß wachgerufen würde.

Daß die Übergangsfarben auf die Veränderung zweier Sehsubstanzen zurückzuführen sind, z. B. die Empfindung Gelbgrün auf die Dissimilation der Gelbblausubstanz und die Assimilation der Rotgrünsubstanz, ist selbstverständlich.

Auch der Einfluß der Lichtreizstärke auf die Helligkeit und Sättigung der Farben findet in der Lehre von den Gegenfarben eine Deutung. Wir sahen, daß bei stärkerer Reizung Rot und Grün mehr und mehr verschwinden und von gelben, auch von blauen Tönen abgelöst werden, daß weiterhin aber auch diese zurücktreten und nur Weiß übrig bleibt. Charakteristisch ist also das paarweise Verschwinden der Farbigkeiten. Dies läßt die Deutung zu, daß die Rotgrünsubstanz am ehesten versagt, die Schwarzweißsubstanz dagegen am resistantesten ist, eine Annahme, die auch durch andere Erfahrungen gestützt wird (siehe S. 471 u. 473).

Die *Dreikomponentenlehre* von THOMAS YOUNG und HELMHOLTZ beruht auf der experimentellen Feststellung, daß mit Hilfe dreier Farben, Rot, Grün und Blau (oder Violett) durch Mischung sämtliche übrigen Farben erzeugt werden können; diese Feststellung fand ihren Ausdruck in dem Farbdreieck (S. 460).

Daraufhin wurde das Postulat aufgestellt, daß im Sehorgan drei verschiedene reizbare Bestandteile vorhanden sind, von welchen der eine vornehmlich auf Rot, der zweite auf Grün und der dritte auf Blau anspricht; jeder Bestandteil soll aber auch auf die seinem Hauptreiz benachbarten Lichter mit reagieren. Dies kann schematisch durch die drei Erregungs- oder Valenzkurven der Abb. 192 dargestellt werden. Danach kann also beispielsweise Gelbempfindung entweder von der gleichzeitigen Erregung der Rotkomponente durch rotes, der Grünkomponente durch grünes Licht oder aber von der Erregung beider Komponenten durch dasselbe gelbe Licht herrühren. Es wird weiter angenommen, daß Weißempfindung die gleichzeitige und gleich starke Erregung aller drei Komponenten bedeutet. Alsdann ist auch klar, daß sich zwei Komplementärfarben zu Weiß ergänzen müssen; denn wenn z. B. Rot und Blaugrün komplementäre Lichter sind, so werden durch diese beiden Farben alle drei Komponenten erregt. Ferner ist aus den Kurven abzulesen, daß jeder Farbe eine gewisse Weißvalenz zukommt, da beispielsweise rotes Licht nicht bloß die Rotkomponente erregt, sondern ein wenig auch die Grün- und die Blaukomponente, und endlich folgt aus dem Schema, daß, je heftiger die Reizung, um so vollständiger die Farbtöne durch Weiß verdrängt werden.

Wenn hiernach die beiden Hypothesen den Beobachtungen, welche bei der Mischung der Farben in verschiedenen Mengenverhältnissen gemacht wurden, ungefähr gleich gut gerecht werden, so gilt das nicht mehr, wenn wir nun eine große Zahl weiterer physiologisch-optischer Beobachtungen als Maßstab an die Hypothesen anlegen.

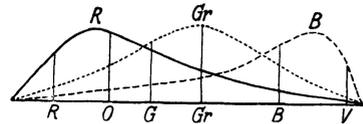


Abb. 192. Schema zur Dreikomponentenlehre.

Von großer Bedeutung für das Sehen sind die *Kontrasterscheinungen*. Unter *Simultankontrast* oder *Nebenkcontrast* versteht man die Erscheinung, daß zwei nebeneinander befindliche Flächen nicht so aussehen, wie es den objektiv von ihnen ausgesandten Lichtern entspricht, sondern als ob jeder Fläche außerdem noch das zu dem Licht der Nachbarfläche kontrastierende Licht (die Gegenfarbe oder die Komplementärfarbe) anhaftete. Legt man z. B. kleine Quadrate, aus dem gleichen grauen Papier ausgeschnitten, auf verschiedene Papierbogen, welche von Schwarz über verschiedene Graustufen bis zum Weiß variieren, so sieht das auf Weiß liegende Quadrat am dunkelsten, das auf Schwarz liegende am hellsten aus, und die anderen zeigen entsprechend abgestufte Helligkeiten (*Helligkeitskontrast*). Legt man ein graues Quadrat auf einen roten Untergrund, so erscheint dem Grau die Kontrastfarbe, nämlich Blaugrün, beigemischt; legt man es auf einen gelben Untergrund, so erscheint es bläulich, auf grünem Grund hell purpurn (rosa) und so fort (*Farbenkontrast*). Dies letztere Experiment gelingt am besten, wenn man bei Papieren von leuchtenden Farben die Grenzkonturen mildert, das Korn

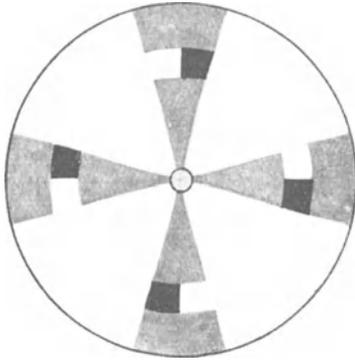


Abb. 193. Scheibe zum Nachweis des simultanen Farbenkontrasts (nach HELMHOLTZ).

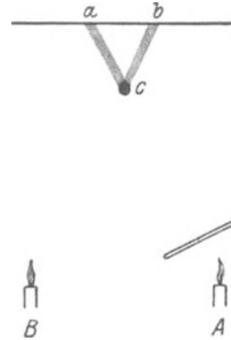


Abb. 194. Farbige Schatten.

und andere Unebenheiten des Papiers verdeckt und die Farbe verhüllt, indem man dünnes Seidenpapier darüberlegt (*Florkontrast*). Einen ähnlichen Effekt hat es, wenn man nach HELMHOLTZ eine Scheibe nach Art der Abb. 193 rotiert. Die grauen Sektoren der Abbildung denke man sich farbig, z. B. grün; alsdann erscheint auf ganz zart grünem Grund zwingend ein rosa Ring, nicht ein grauer Ring entsprechend der Mischung von Schwarz und Weiß. Am bekanntesten ist das Phänomen der *farbigen Schatten* (O. v. GUERICKE 1612): Zwei Kerzen A und B (siehe Abb. 194) werfen auf einen weißen Schirm von dem Stab c zwei Schatten a und b. Hält man nun vor die eine Kerze A ein farbiges, z. B. ein grünes Glas, so sieht der Schirm, von beiden Kerzen her erleuchtet, hellgrün aus; der Schatten b, welcher bloß grünes Licht von A aus empfängt, erscheint leuchtend grün; der Schatten a dagegen, welcher bloß weißes Licht von B aus empfängt und darum auch weiß aussehen sollte, erscheint in der Kontrastfarbe rosa (hellpurpurn).

HERING erklärt alle diese Phänomene durch die Annahme, daß, wenn an einer Stelle der Netzhaut eine der Sehsubstanzen dissimiliert wird, dadurch auf nervösem Wege in der Nachbarschaft ein Assimilationsprozeß angeregt wird, und daß umgekehrt ein Assimilations-

prozeß eine Dissimilation in der Umgebung auslöst. Diese wechselseitige Umstimmung wird auch als *Induktion* bezeichnet (BRÜCKE). Die supponierten physiologischen Vorgänge sind aber bisher noch nicht nachgewiesen; vielleicht spielen sie sich auch gar nicht in der Netzhaut, sondern in einem ihrer Projektionsorte im Zentralnervensystem ab.

HELMHOLTZ sprach zur Erklärung von einer Urteilstäuschung; werde an einer Stelle beispielsweise eine Helligkeit wahrgenommen, so unterliege man leicht der Täuschung, als ob die Nachbarschaft besonders spärlich Licht empfinde, und sei an einer Stelle ein Grau sichtbar und daneben Rot, so erscheine das Grau grünlich, weil man unbewußt den Gegensatz zwischen den Feldern vergrößere. Diese Erklärung wird indessen wenig befriedigen.

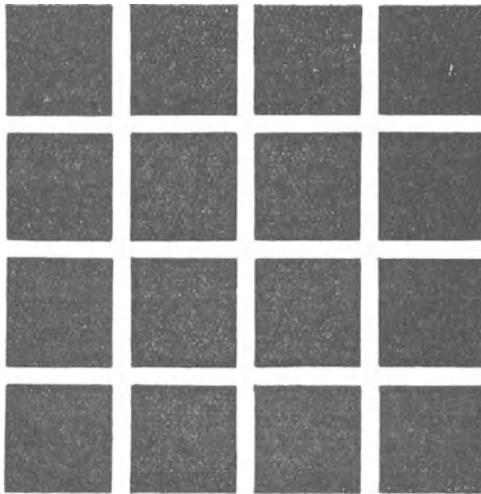


Abb. 195. Zur Demonstration des Randkontrasts (nach HERING).

Eine besondere Form des Simultankontrastes wird als *Randkontrast* bezeichnet. Die Induktion dehnt sich nämlich nicht auf weite Abstände von dem Ort des induzierenden Lichtes aus; in unmittelbarer Nachbarschaft ist die induzierende Wirkung am kräftigsten und klingt dann weiterhin ab. Daher bringt sich der Kontrast an den Rändern der leuchtenden Fläche am deutlichsten zur Geltung. Grenzen z. B. eine schwarze und eine weiße Fläche aneinander, so erscheint unmittelbar neben der weißen Fläche die schwarze extra schwarz, neben der schwarzen die weiße extra weiß. Ein Rot, das an sich gesättigt erscheint, kann auf diese Weise neben Blaugrün noch röter aussehen. Man erkennt so, daß in der Tat, wie schon mehrfach angedeutet wurde, selbst die Spektralfarben nicht gesättigt sind, sondern eine Weißvalenz haben; wirkliche Sättigung ist überhaupt nicht durch objektives Licht, sondern nur physiologisch durch Kontrast zu erzielen, und entsprechend erzeugt man die Empfindung des tiefsten Schwarz nur durch Induktion mit einem umgebenden blendenden Weiß.

Auf Randkontrast beruht es auch, wenn kleine farbige Flecke auf schwarzem Grund stark mit Weiß verhüllt oder sogar farblos aus-

sehen, ferner wenn man beim Betrachten der Abb. 195 an jeder der Kreuzungsstellen der weißen Streifen einen verwaschenen grauen Fleck sieht, weil an der Kreuzungsstelle das Schwarz weniger Gelegenheit findet, Weiß zu induzieren, als an den Streifen selbst.

Die Bedeutung des Simultankontrasts für das gewöhnliche Sehen ist sehr groß. Vor allem kompensiert er die Unschärfe der Abbildung auf der Netzhaut, welche die notwendige Folge der früher erwähnten Fehler des Auges, der sphärischen und chromatischen Aberration, der mangelhaften Zentrierung, der diffusen Beleuchtung durch Beugung und Reflexion ist (siehe S. 445). Die Helligkeit der bei Tageslicht auftretenden Zerstreuungskreise ist in der Mitte am größten und fällt nach dem Rande zu allmählich in die Umgebung ab. Dieser unscharfe Übergang wird nun durch den Simultankontrast einigermaßen beseitigt, indem die helle Mitte ein kontrastierendes Dunkel am Rande erzeugt und die dunkle Umgebung umgekehrt die Helligkeit in der Peripherie des Zerstreuungskreises hebt. Sobald man eine Zeichnung mit scharfen Konturen nicht im hellen Tageslicht, sondern bei stark gedämpftem Licht betrachtet, sieht man sie daher verwaschen, auch wenn die Helligkeitsunterschiede an sich noch ziemlich erheblich sind. „Gleich einem Photographen, der eine mangelhafte Kopie retuschiert, korrigiert also die Wechselwirkung in der Netzhaut das Bild der Außendinge“ (HERING).

Der Simultankontrast bedingt es auch, daß trotz höchst wechselnder Beleuchtung die Sehdinge einen einigermaßen beständigen Eindruck hervorrufen. Die Buchstaben eines Drucks auf weißem Papier sehen z. B. stets schwarz aus, obwohl das vom Schwarz reflektierte Licht ganz außerordentlich variiert. HERING hat z. B. gezeigt, daß das Schwarz der Buchstaben am hellen Mittag dreimal so viel Licht aussenden kann, als das Weiß am frühen Morgen; dennoch erscheinen die Buchstaben auch mittags schwarz, weil das strahlende Weiß der Umgebung zu ihrem effektiven Schwarz noch induziertes Schwarz hinzufügt.

Auch die simultanen Farbenkontraste machen sich alltäglich beim Sehen geltend; so erscheinen uns die weißen Wolken auf dem blauen Himmel gelblich, und die grauen Maulwurfshügel auf der grünen Wiese sehen rötlich aus.

Dem Simultan- oder Nebenkontrast nahe verwandt ist der **Sukzessivkontrast** oder *Nachkontrast*. Dabei handelt es sich darum, daß durch das Reizlicht nicht bloß gleichzeitig die Umgebung der getroffenen Netzhautstelle (wirklich oder scheinbar) affiziert wird, sondern daß die getroffene Stelle selber auch für die Zeit nach der Reizung verändert wird. Die Veränderung macht sich durch ein „*Nachbild*“ (siehe S. 458) bemerkbar. Fixiert man z. B. längere Zeit, etwa 20—40", ein rotes Quadrat auf weißem Grund und richtet sodann den Blick gegen eine weiße Fläche, so erscheint auf dieser im Gebiet der Fixation ein Quadrat in der komplementären, d. h. in blaugrüner Farbe, welches erst nach mehreren Minuten vollständig verblaßt ist. Wandert der Blick von dem roten Quadrat nicht auf eine weiße, sondern auf eine blaugrüne Fläche, so wird auf dieser ein blaugrünes Quadrat von besonders tiefer Sättigung sichtbar; blickt man auf eine rote Fläche, so erscheint als Nachbild ein mit Grau verhülltes rotes Quadrat; blickt man auf eine violette Fläche, so ist das Nachbild blau. Das Nachbild erscheint also stets in einer Farbe, welche der Mischung der Kontrastfarbe (komplementären Farbe) mit der Farbe des Hintergrundes entspricht. Fixiert

man nicht ein farbiges, sondern ein schwarzes Quadrat, so tritt an die Stelle des *Farbenkontrastes* ein *Helligkeitskontrast*; auf weißer Fläche erscheint ein Quadrat in noch hellerem Weiß, auf Rot ein helleres Rot usw.

Als Folge des Sukzessivkontrastes ist es auch aufzufassen, wenn bei längerer Betrachtung ein Weiß an Helligkeit einbüßt, und wenn eine Farbe sich mehr und mehr verhüllt. In den gleichen Zusammenhang gehört die sog. *Lokaladaptation* von HERING, d. h. die Erscheinung, daß bei starrem Fixieren der Unterschied zwischen nebeneinander gelegenen verschiedenen Helligkeiten mehr und mehr verschwindet. Wenn also natürlicherweise der Blick fortwährend von Sehding zu Sehding wandert und nur unter Aufwand von Willenskraft an einem Ort haftet, so ist dies für das Erkennen der Umwelt nur von Vorteil.

Der Sukzessivkontrast läßt sich sowohl vom Standpunkt der Lehre von den Gegenfarben wie von dem der Dreikomponentenlehre deuten. Nach HERINGS Hypothese löst jede Dissimilation einer der Sehsubstanzen automatisch eine Assimilation, jede Assimilation eine Dissimilation aus, und zwar nicht bloß nachträglich, sondern schon während der eine Prozeß im Gang ist, regt sich in steigendem Maße die Gegenreaktion. Danach sollte man erwarten, daß, wenn sich das Auge längere Zeit unter konstanten Bedingungen befindet, sich ein Gleichgewicht zwischen Assimilation und Dissimilation einstellt, welchem eine Grauempfindung entsprechen müßte, und zwar gleichgültig, von welcher der Gegenfarben man ausgeht, ob z. B. von Weiß oder von Schwarz. Das ist nun aber offenbar nicht der Fall. Zwar büßt, wie wir sahen, ein Weiß, das lange Zeit geboten wird, in zunehmendem Maß an Leuchtkraft ein, und im Dunkeln ist das Gesichtsfeld des ausgeruhten Auges nicht völlig dunkel, sondern man sieht das sog. *Eigengrau der Netzhaut*; aber von einer Gleichheit der Endhelligkeiten kann nicht die Rede sein.

Nach der Dreikomponentenlehre ist der Sukzessivkontrast durch Ermüdung der Netzhaut zu erklären (FECHNER, HELMHOLTZ). Wird z. B. einer Netzhautstelle nach Rot Weiß geboten, so haben die Rotkomponenten an Erregbarkeit eingebüßt, und das weiße Licht wirkt mit voller Stärke nur auf die Grün- und die Blaukomponenten; daher erscheint das zum Rot komplementäre Blaugrün. Aber diese Erklärung ist aus manchen Gründen unbefriedigend, schon deshalb, weil auch bei vielstündigem Aufenthalt im hellen Tageslicht sich keine deutliche Ermüdbarkeit des Auges bemerkbar macht, obwohl alle drei Komponenten fortwährend erregt werden und, nach dem Nachbild zu urteilen, die Ermüdung schon nach wenigen Sekunden einsetzen sollte.

Während die länger dauernde Belichtung einer Netzhautstelle ein Nachbild erzeugt, welches mit dem Reiz kontrastiert und deshalb auch als *negatives Nachbild* bezeichnet wird, ruft eine kurz dauernde, aber intensive Belichtung zunächst ein *positives Nachbild* hervor; die Erregung überdauert also den Reiz. Von diesem nur allmählichen „Abklingen“ der Erregung war bereits (S. 458) die Rede. Hier sei noch hinzugefügt, daß man im weiteren Verlauf der Selbstbeobachtung bemerkt, wie das positive Nachbild in das negative umschlägt, wie danach wieder das positive auftauchen kann usw. Es findet also ein *phasisches Abklingen der Nachbilder* statt. Besonders bekannt ist das farbige Abklingen der Sonnenbilder. Blickt man kurze Zeit in die Sonne und danach gegen den Himmel, so sieht man ein farbiges Nachbild, welches

von Grünblau in Blau, dann in Violett, in Farblos und Rotgelb umzuschlagen pflegt. In charakteristischer Weise macht sich das farbige Abklingen bemerkbar, wenn man ein helles Objekt, z. B. einen mattweißen, gelblich beleuchteten Kartonstreifen mit mäßiger Geschwindigkeit vor einem dunklen Hintergrund entlangführt; die zeitlich aufeinanderfolgenden Phasen ordnen sich dann räumlich nebeneinander. Man sieht das gelbliche Licht des Kartons durch das positive, sog. primäre Nachbild verbreitert, dann folgt ein dunkles Intervall, dann das sekundäre oder *PURKINJESche Nachbild*, mit unscharfen Rändern und in einem zum Gelb komplementären bläulichen Licht, darauf abermals ein dunkles Intervall und schließlich noch eine farblose tertiäre Phase. Eine befriedigende Erklärung für diese verschiedenen Phänomene fehlt.

Wenden wir uns nun der Erscheinung der sogenannten **Adaptation** zu (*AUBERT*)! Wenn man nach längerem Aufenthalt im Tageslicht in einen nur durch Dämmerlicht erleuchteten Raum tritt, so erkennt man die Gegenstände in seinem Innern zunächst nicht, so wie wenn der Raum völlig verdunkelt wäre. Im Verlauf weniger Minuten heben sich aber die Gegenstände mehr und mehr von ihrem Hintergrund ab und werden immer besser unterscheidbar. Diese Anpassung des Auges heißt **Dunkeladaptation**. Genaue Messungen der Reizschwelle haben gezeigt (*PIPER*), daß die Anpassung anfänglich langsam, zwischen 10 und 30—40 Minuten rasch und dann wieder langsamer fortschreitet, bis sie erst nach länger als einer Stunde ihren Höhepunkt erreicht hat; die Lichtempfindlichkeit ist dann 1400—8000mal größer als im Hellen. Begibt man sich umgekehrt nach längerem Aufenthalt in einem dunklen Raum ins Helle, so wird man zunächst geblendet und vermag die Gegenstände nur schlecht zu erkennen; aber die Empfindlichkeit des Auges sinkt rasch, und — im Gegensatz zur Dunkeladaptation — ist schon binnen weniger Minuten die Adaptation ans Tageslicht, die **Helladaptation**, vollendet.

Die Adaptation ist neben dem Simultankontrakt die wichtigste Einrichtung unseres Auges, um die großen Schwankungen in der Beleuchtung der Sehdinge einigermaßen auszugleichen. Ohne sie würden wir z. B. beim Hereinbrechen der Dämmerung hilflos sein und überall anstoßen, wie es in der Tat in den Fällen pathologisch geringer Adaptationsfähigkeit, welche als *Hemeralopie* bezeichnet wird, zu beobachten ist. Zur Erklärung der Adaptation können wir an die Erfahrungen über den *Sehpurpur* (siehe S. 452) anknüpfen. Wir fanden, daß der Sehpurpur im Hellen ausgebleicht und im Dunkeln wieder regeneriert wird; es liegt also nahe, dabei an eine Beziehung zur Adaptation zu denken. Das Gefühl der Blendung bei einem dunkeladaptierten Auge, welches plötzlich dem Licht exponiert wird, könnte auf dem Übermaß der Zersetzung des angehäuften Sehpurpurs beruhen, die Dunkeladaptation ließe sich als eine Sensibilisierung der Netzhaut durch den sich ansammelnden Farbstoff auffassen. Zugunsten dieser Hypothese kann man eine ganze Reihe von Argumenten anführen.

Erstens ergibt sich, daß die Dunkeladaptation im Zentrum der Netzhaut mindestens viel geringfügiger ist als in der Peripherie (*PARNAUD, v. KRIES*); dem entspricht, daß in der Fovea centralis der Sehpurpur fehlt oder wenigstens fast fehlt (siehe S. 453). Zweitens fanden wir, daß die Helligkeitsverteilung im Spektrum beim Sehen in der Dämmerung, also beim Sehen mit dunkeladaptiertem Auge anders ist

als bei hellem Licht; das Maximum der Helligkeit ist in der Dämmerung von Gelb nach Gelbgrün verschoben (S. 461); dem entspricht, daß der Sehpurpur ebenfalls vom Gelbgrün am raschesten ausgebleicht wird, und daß überhaupt die Kurve der „Bleichungswerte“ derjenigen der „Dämmerungswerte“, d. h. den relativen Helligkeiten in der Dämmerung parallel läuft (W. TRENDELENBURG). Faßt man den Sehpurpur als Sensibilisator für die Sehelemente auf, dann wird ferner die folgende Erscheinung verständlich: befestigt man auf einem schwarzen Tuch mehrere weiße Papiermarken, beleuchtet sie so, daß sie vom dunkeladaptierten Auge eben deutlich gesehen werden, und fixiert man eine nach der anderen, so macht man die merkwürdige Beobachtung, daß immer diejenige Marke, welche man gerade ins Auge faßt, verschwindet, um alsbald wieder aufzutauchen, wenn man von ihr fortblickt (v. KRIES). In der Dämmerung existiert also im Auge ein *zentrales Skotom* (siehe S. 451). Dies beruht darauf, daß beim Fixieren die Marke in der Fovea centralis zur Abbildung gelangt, diese aber mangels des Sehpurpurs bei schwacher Beleuchtung nicht anspricht.

Da der Sehpurpur speziell die Stäbchenaußenglieder umgibt und die purpurfreie Fovea centralis nur Zapfen enthält (siehe S. 453), so ist auch die Anschauung ausgesprochen worden, daß die Netzhaut funktionell zweigeteilt sei, daß *die Stäbchen einen Dämmerungsapparat, die Zapfen einen Helligkeitsapparat darstellen*. Schon vor langer Zeit begründete M. SCHULTZE (1866) die als **Duplizitätstheorie** bezeichnete Lehre durch den histologischen Nachweis, daß die Netzhaut mancher Nachttiere (Igel, Fledermaus, Maulwurf, Eule) keine Zapfen, die Netzhaut ausgesprochener Tagtiere (Eidechse, Schlangen) dagegen keine Stäbchen enthält. Für die zwifache Funktion führte er ferner die physiologische Beobachtung, welche uns noch (siehe S. 471) beschäftigen wird, an, daß das zapfenreiche Netzhautzentrum durch den Farbensinn ausgezeichnet ist, welcher der stäbchenreichen Netzhautperipherie mehr oder weniger mangelt. PARINAUD (1884) und v. KRIES (1894) fügten dann den Hinweis hinzu, daß auch im Dämmerlicht, wenn dank der Gegenwart des Sehpurpurs die Stäbchen allein ansprechen, die Sehdinge völlig farblos erscheinen, und daß auch bezüglich der Sehschärfe (S. 474) ein Gegensatz zwischen Netzhautperipherie und Netzhautzentrum bestehe.

Gegen die ansprechende Lehre sind aber auch Einwände zu erheben. So sind die Schildkröten trotz anscheinenden Mangels von Stäbchen exquisite Nachttiere, und die Hühner, deren Netzhaut nur Zapfen enthält, zeigen Dunkeladaptation (C. HESS). Ferner entbehrt auch die stäbchenlose Fovea centralis des Menschen nicht völlig der Adaptationsfähigkeit (DITTLER), und ein wenn auch schmales farbloses Intervall (S. 462), also ein Zustand schwächster Lichterregung, in welchem nur Helligkeiten, dagegen keine Farben empfunden werden, wird auch für die Fovea angegeben (HERING).

Die Erwähnung der Tatsache, daß der Farbensinn des Auges in der Dämmerung und beim peripheren Sehen mehr oder weniger versagt, führt uns auch zu einer Erörterung der verschiedenen Formen von **Farbenblindheit**, und das um so mehr, weil die Deutung dieser merkwürdigen Erscheinung von jeher eine besonders große Rolle in den Diskussionen über die Theorien des Farbensehens spielt.

Die bekannteste Form der Farbenblindheit ist die sog. *Rotgrünblindheit*, auch *Daltonismus* genannt, weil der Chemiker DALTON im

Jahre 1794 die erste präzise Beschreibung derselben lieferte. Die Rotgrünblindheit ist ziemlich verbreitet; 3,5—4% der Männer sind von ihr betroffen. Auffallenderweise kommt sie viel seltener, nur etwa zu 0,4%, bei den Frauen vor. Die Anomalie tritt häufig familiär und erblich auf, dabei wird sie unter Übersprungung des weiblichen Geschlechts nur auf die männlichen Individuen übertragen. Die Farbenblindheit bleibt oft bis in späte Jahre unbemerkt; bei Kindern wird sie häufig beim Beerenpflücken entdeckt, wenn rote Beeren im grünen Laub schlecht, d. h. wesentlich an ihrer Form, nicht an ihrer Farbe erkannt werden.

Die genaue Analyse der Farbenblindheit erfordert ein sachgemäßes Vorgehen; denn auch der Rotgrünblinde bezeichnet die Gegenstände vielfach in der richtigen Farbe, nicht bloß weil er von ihrer Farbe reden hört, sondern auch, weil er sie auch nach ihrer Helligkeit beurteilt. Zur Prüfung des Farbensinns wird u. a. die *HOLMGRENsche Wollprobe* angewendet: man legt dem Prüfling eine große Zahl verschiedenfarbiger Wollproben vor und fordert ihn auf, etwa zu einem herausgegriffenen Grün alle farbverwandten Proben dazu zu legen. Der Rotgrünblinde wird dann außer reinem Grün etwa die gelbgrünen, aber auch die grauen und rotbraunen Proben wählen, dagegen blaugrüne beiseite lassen, welche der Normale ohne weiteres dazulegen würde. Viel verwendet

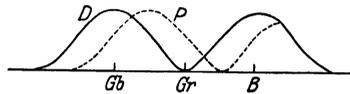


Abb. 196. Helligkeits- und Farbenverteilung im Spektrum des Protanopen (P) und des Deuteranopen (D).

werden zur Prüfung auch gedruckte *Farbentafeln*, welche aus kleinen grauen und farbigen Flächen verschiedener Helligkeit zusammengestellt sind (NAGELS Farbentafeln, pseudoisochromatische Tafeln von STILLING). Der Prüfung des Farbensinns kommt eine große praktische Bedeutung zu, da die Unterscheidung roter und grüner Signale beim Eisenbahn- und Schiffsverkehr sowie beim Militärdienst erforderlich ist.

Die Analyse ergibt nun, daß sich der Rotgrünblinde so verhält, als wenn das Spektrum zur Hälfte aus Gelb und zur anderen Hälfte aus Blau verschiedener Helligkeit bestände, und als ob da, wo Gelb und Blau zusammenstoßen, in der Gegend des Grün, eine „neutrale Stelle“ von grauem Aussehen gelegen wäre. Daß der Rotgrünblinde in der Tat so sieht, beweist ein von HIPPEL beobachteter Fall, bei dem der Patient auf dem einen Auge farhentüchtig, auf dem anderen farbenblind war. Das Maximum der Helligkeit im Spektrum liegt zwischen 570 und 600 μ , also da, wo der Farhentüchtige ebenfalls das Maximum der Helligkeit, Gelb, sieht; da von dieser Stelle aus die Helligkeit nach beiden Seiten hin abnimmt, so muß es Punkte zu beiden Seiten des Maximums geben, welche für den Normalen rot und grün aussehen, dagegen von dem Anormalen im gleichen Farbenton und mit gleicher Helligkeit gesehen werden; so kommt die *Verwechslung von Rot und Grün* zustande.

Die Rotgrünblindheit tritt in zweierlei Form auf, als *Protanopie* (Rotblindheit) und als *Deuteranopie* (Grünblindheit). Bei der Protanopie besteht eine besondere Unterwertigkeit des Rot, das Spektrum ist daher am langwelligen Ende verkürzt, die neutrale Stelle liegt im Blaugrün; bei der Deuteranopie reicht die Gelbvalenz des Spektrums bis ans rote

Ende, die neutrale Stelle liegt im Grün. Dies Verhalten der Protanopen und der Deuteranopen ist in der Abb. 196 schematisch dargestellt. Doch gibt es zwischen den beiden Anomalien zahlreiche Übergänge (v. HESS).

Eine sehr seltene Art der Farbenblindheit ist die *Gelbblaublindheit*. Bei ihr wird nur Rot und Grün unterschieden. Auch diese Farbenblindheit kommt in verschiedenen Modifikationen vor. Bei einer derselben finden sich im Spektrum zwei neutrale Stellen, die eine im Gelb, die andere im Blau; zwischen ihnen wird Grün empfunden, außerhalb am langwelligen Ende Rot.

Diesen interessanten Sehstörungen wird natürlich am ersten die HERINGSche Lehre von den Gegenfarben gerecht; sachgemäß wird man die Rotgrünblindheit auf einen Ausfall der Rotgrünsubstanz, die Gelbblaublindheit auf einen Ausfall der Gelbblausubstanz zurückführen. Von der Existenz der Protanopie und der Deuteranopie vermag die

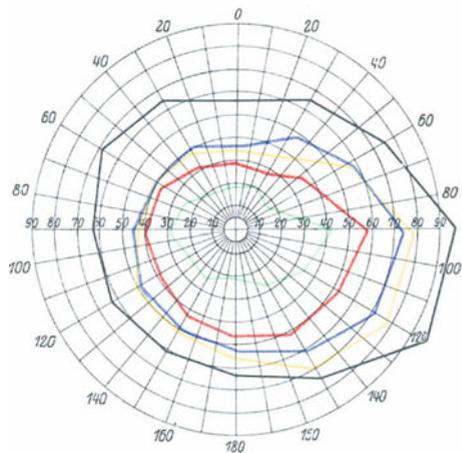
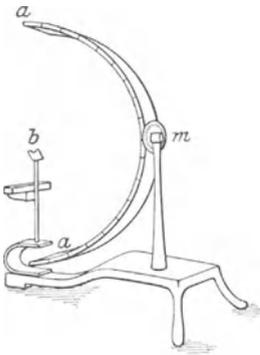


Abb. 197. Perimeter nach FOERSTER.

Abb. 198. Perimetrische Gesichtsfeldaufnahme für das rechte Auge.

HERINGSche Theorie aber keine Rechenschaft zu geben. HELMHOLTZ nahm zur Erklärung der Farbenblindheit den Funktionsausfall bei einer der drei für das Farbsehen substituierten Komponenten an; die Ausdrücke Rot- und Grünblindheit, Protanopie und Deuteranopie gehen auf diese Annahme zurück. Aber es ist klar, daß bei dieser Deutung ganz unverständlich bleibt, wie das notorisch vorhandene Gelbsehen des Rotgrünblinden zustande kommen soll.

Zu den seltenen Störungen des Farbensinns gehört schließlich auch die **totale Farbenblindheit**. Bei ihr wird an Stelle des farbigen Spektrums nur ein farbloser Streifen mit verschiedener Helligkeitsverteilung gesehen, der Anblick der Außenwelt ist vergleichbar dem einer Photographie oder auch einer Landschaft im Dämmerlicht des Mondes. Diese Schilderung bedeutet schon eine Fragestellung für die Erklärung der totalen Farbenblindheit, nämlich die Frage, ob die totale Farbenblindheit dem normalen Sehen bei schwacher Beleuchtung vergleichbar ist, ob sie also vom Standpunkt der Duplizitätstheorie aus als die Folge eines ausschließlichen Funktionierens des Stäbchenapparates aufgefaßt werden kann. Für eine bestimmte Kategorie von Fällen trifft dies nun zweifellos

zu. Denn erstens hat so, wie beim Dämmerungssehen, auch das farblose Spektrum dieser Totalfarbenblinden sein Helligkeitsmaximum nicht im Gelb, sondern im Gelbgrün; die roten Lichter haben einen verminderten Reizwert, so daß das PURKINJESCHE Phänomen (siehe S. 461) zur Geltung kommt; im Gegensatz zum Farbentüchtigten erscheint also Blau heller als Rot. Zweitens besteht bei dem Totalfarbenblinden eine ausgesprochene Lichtscheu, weil er als Stäbchenseher auf den im Licht rasch ausbleichenden Sehpurpur angewiesen ist. Drittens ist öfter ein zentrales Skotom (siehe S. 469) nachzuweisen; damit im Zusammenhang steht das Symptom des Nystagmus, ein fortwährendes kleinschlägiges Hin- und Herschwanke des Auges, offenbar darauf beruhend, daß, wenn der Patient einen Gegenstand zu fixieren sucht und ihn dabei auf seiner Fovea centralis zur Abbildung bringt, er ihm im selben Moment undeutlich wird. Viertens ist auch die Sehschärfe herabgesetzt.

Diesen ziemlich gut erklärlichen Fällen von totaler Farbenblindheit stehen solche gegenüber, in denen das zentrale Skotom fehlt und die Helligkeitsverteilung im Spektrum eher mit der beim Normalen, jedenfalls nicht mit der des Dämmerungssehens übereinstimmt.

Die totale Farbenblindheit tritt familiär auf.

Ein gewisses Maß von Farbenblindheit kommt, wie schon einmal (siehe S. 469) gesagt wurde, schließlich auch jedem normalen Auge in der Peripherie seiner Netzhaut zu. Nur beim „direkten Sehen“, d. h. beim Sehen mit dem Netzhautzentrum ist die volle Farbentüchtigkeit festzustellen; beim „indirekten Sehen“ dagegen macht sich schon in geringem Abstand von der Fovea centralis eine **Abnahme des Farbensinns** bemerkbar, welche sich mit steigender Exzentrizität bis zur totalen Farbenblindheit steigert. Man kann dies exakt mit einem *Perimeter* nachweisen (Abb. 197). Dieses besteht aus einem mit Gradteilung versehenen Halbkreis (aa), dessen Mitte (m) um eine horizontale Achse gedreht werden kann, so daß er dabei eine Kugelfläche beschreibt. Das zu beobachtende Auge befindet sich im Mittelpunkt dieser Kugel (bei b) und fixiert andauernd die mit einer Marke versehene Mitte des Halbkreises. Der Beobachter verschiebt nun entlang dem Halbkreis auf dessen Innenseite farbige Marken, welche von dem zu beobachtenden Auge nur indirekt gesehen werden können, so lange vom Rand gegen die Mitte des Halbkreises, bis die Farbe eben erkannt wird, und verzeichnet den Grad, bei welchem dies möglich ist. Führt man diese Bestimmung bei den verschiedensten Drehungen des Perimeterbogens aus und trägt sämtliche Beobachtungen in ein Gradnetz ein, welches eine Projektion der kugelförmigen Netzhaut in die Ebene repräsentiert, so erhält man eine Karte, wie Abb. 198 (siehe auch S. 479).

Daraus ist zu ersehen, daß der äußere Rand des „*Gesichtsfeldes*“ total farbenblind ist; vom Auge werden dort nur farblose Helligkeiten unterschieden. Dann folgt eine Zone, welche rotgrünblind ist, innerhalb deren gelb und blau unterschieden werden und auch Farben, wie Violett, Blaugrün, Gelbgrün und Orange nur blau oder gelb erscheinen. Noch weiter einwärts, in der unmittelbaren Nachbarschaft der Fovea centralis, ist der Farbensinn „normal“.

Die Lage der Zonen ist keine fixierte, sondern hängt von besonderen Versuchsbedingungen ab; je größer die Marke, je intensiver ihr Licht, je geringer die Verhüllung der gezeigten Farben ist, um so weiter rücken die Grenzen in die Peripherie. Damit hängt es auch zusammen, daß

für gewöhnlich, so wie auch in der Abbildung, der Grünsinn einen anscheinend kleineren Bezirk einnimmt, als der Rotsinn; das Grün der Marken ist gewöhnlich weniger gesättigt als das Rot.

Man kann also sagen, daß *in der Peripherie des Gesichtsfeldes nur ein Weißschwarzsinn vorhanden ist; weiter einwärts kommt dazu ein Gelbblausinn und noch weiter einwärts ein Rotgrünsinn*. Mit dieser Ausdrucksweise ordnet man bereits die Beobachtungen unter die Prinzipien der HERINGSchen Theorie. Der Rotgrünsinn erweist sich dabei wiederum (siehe dazu S. 461 und S. 469) als der schwächste. Die YOUNG-HELMHOLTZsche Theorie vermag die Erscheinung nicht zu erklären.

Bemerkenswert ist, daß die totale Farbenblindheit der peripheren Zone aber etwas anderes ist als die totale Farbenblindheit, welche vorher als Anomalie beschrieben wurde. Bei der letzteren liegt, gerade so wie beim Dämmerungssehen, das Helligkeitsmaximum im Gelbgrün, und da die Helligkeitswerte des Spektrums für das totalfarbenblinde Auge mit den Bleichungswerten des Sehpurpurs übereinstimmen, so konnte angenommen werden, daß das Sehen des Totalfarbenblinden und das Sehen in der Dämmerung auf der Funktion der sehpurpurhaltigen Stäbchen beruht (siehe S. 469). Demgegenüber stimmt die Helligkeitsverteilung für die farbenblinde Netzhautperipherie mit der für das farbentüchtige Zentrum überein, das Helligkeitsmaximum liegt beide Male im Gelb. Vielleicht ist daraus der Schluß zu ziehen, daß die periphere Farbenblindheit nicht auf der alleinigen Funktion der Stäbchen, sondern auf einer Farbenblindheit der Zapfen beruht.

30. Kapitel.

Die räumlichen Gesichtswahrnehmungen.

Die Sehschärfe 474. Das Augenmaß 476. Geometrisch-optische Täuschungen 477. Das verkehrte Netzhautbild 478. Das Gesichtsfeld 479. Die Augenbewegungen 480. Die identische Sehrichtung 482. Die identischen Netzhautpunkte und das binokulare Einfachsehen 483. Der Horopter 484. Wettstreit der Sehfelder 485. Monokulare Tiefenwahrnehmung 486. Binokulare Tiefenwahrnehmung 487. Das Stereoskop 490. Die Wahrnehmung von Bewegungen 492.

Wenn wir im vorhergehenden Kapitel die Helligkeits- und Farbeempfindungen für sich erörtert haben, so haben wir von etwas gesprochen, was in Wirklichkeit für sich gar nicht existiert; denn alle Helligkeiten oder Farbigkeiten sehen wir zugleich in bestimmter Ausdehnung und in bestimmter Form, wir sehen sie ferner an einem bestimmten Ort, in bestimmter Richtung und in einem bestimmten Abstand; jeder Helligkeit oder Farbigkeit haftet also etwas Räumliches an. Diese Komplexe nennen wir **Gesichtswahrnehmungen**.

Zu den einfachsten Leistungen des Raumsinnes unseres Auges gehört die Unterscheidung des Ortes zweier verschiedener leuchtender Objekte; man spricht von einer um so größeren **Sehschärfe**, je feiner dieses Unterscheidungsvermögen ist. Ihr Maß ist der reziproke Wert des kleinsten Abstandes, in welchem zwei in bestimmter Entfernung vom Auge befindliche leuchtende Punkte oder leuchtende Linien gelegen sein dürfen, um eben getrennt aufgefaßt zu werden; allgemeiner, nämlich unabhängig von der jeweiligen Entfernung vom Auge bemißt man die Sehschärfe durch den kleinsten *Schwinkel*; das ist der kleinste Winkel, welchen die von dem leuchtenden Objekt ausgehenden Richtungsstrahlen miteinander einschließen.

Die Sehschärfe ist am größten in der Fovea centralis, also an derjenigen Stelle der Netzhaut, welche wir beim „direkten Sehen“, beim Fixieren eines Punktes benutzen. Zwei leuchtende Punkte können beim direkten Sehen noch deutlich, durch einen dunklen Zwischenraum voneinander getrennt, wahrgenommen werden, wenn ihr Schwinkel 50'' beträgt; das bedeutet auf der Netzhaut einen Abstand von ungefähr 4 μ . Wenn man die Annahme macht, daß zur Unterscheidung in dem genannten Sinn mindestens drei verschiedene Sehelemente notwendig sind, nämlich zwei, welche vom Licht gereizt werden, und ein dazwischen liegendes, welches ungereizt bleibt, so würden wir zu schließen haben,

daß die Breite eines Sehelements etwa 3—4 μ beträgt. Dies ist aber ungefähr die Breite eines Zapfens.

Eine erheblich größere Sehschärfe findet man, wenn man versucht, die kleinste seitliche Verschiebung der beiden Hälften einer Geraden gegeneinander wahrzunehmen. Alsdann findet man als Grenze

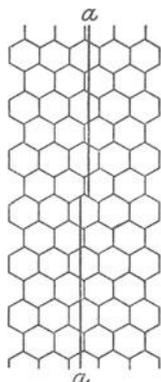


Abb. 199. Zur Theorie der Unterschiedsempfindlichkeit für seitliche Verschiebung einer Geraden nach HERING.

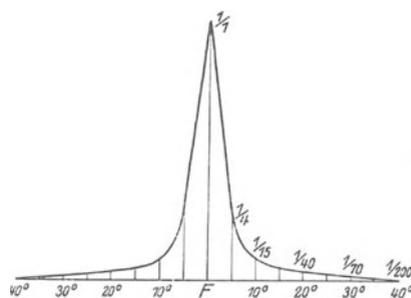


Abb. 200. Die Größe der Sehschärfe bei direktem und indirektem Sehen.

des Unterscheidungsvermögens einen Gesichtswinkel von nur 10''. Die Abb. 199 erläutert dies Vermögen. Die beiden Hälften der auf der Netzhaut abgebildeten Geraden aa sind auf einen Untergrund von Sechsecken aufgetragen, welcher das Mosaik der Zapfen repräsentiert. Man sieht, daß bei einem weit geringeren Abstand als einer Zapfenbreite die beiden Bildhälften der Geraden auf verschiedene Zapfenreihen zu liegen kommen.

Die Sehschärfe nimmt von der Fovea centralis peripherwärts sehr rasch ab; man bemerkt

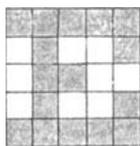
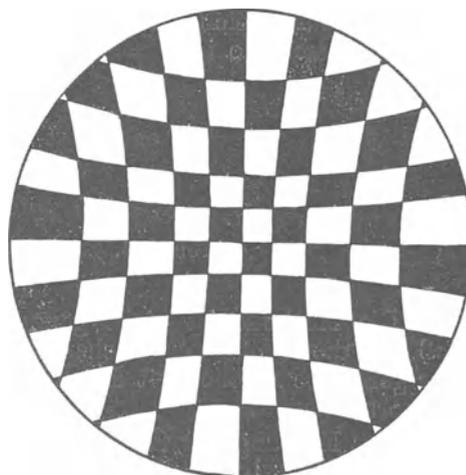


Abb. 201. Der Buchstabe E in einer SNELLENSCHEN Sehprobe.

Abb. 202. HELMHOLTZ'SCHE Schachbrettfigur.

ja leicht, wie schwer bei peripherem, „indirektem“ Sehen Einzelheiten an den Objekten erkannt werden. Den Grad der Abnahme erläutert die Abb. 200; darin bedeutet die in F errichtete Ordinate die Sehschärfe der Fovea, sie ist gleich $\frac{1}{1}$ gesetzt. Die Abnahme der Sehschärfe nach der Peripherie wird von manchen mit der Verminde-

rung der Zahl der Zapfen gegen die Ora serrata hin in Zusammenhang gebracht. Doch spielen wohl auch ganz andere Momente dabei eine Rolle. Die Aufmerksamkeit ist nämlich von Natur den foveal gesehene Objekten und ihrer Umgebung zugewandt; übt man sich nun darin, auf die Bilder exzentrischer Netzhautstellen zu achten, so steigt die periphere Sehschärfe mehr und mehr; sie erreicht freilich bei weitem nicht die Sehschärfe bei direktem Sehen.

Die Verteilung der Sehschärfe, die hier besprochen wurde, ist die Sehschärfe des helladaptierten Auges; bei Dunkeladaptation ist sie total anders, nämlich foveal gerade am geringsten, peripher aber auch nur niedrig und überall ungefähr gleich. Die Erklärung dafür gibt die Duplizitätstheorie (siehe S. 469); die Sehschärfe des helladaptierten Auges kann man danach als „Zapfensehschärfe“, die des dunkeladaptierten als „Stäbchensehschärfe“ ansehen.

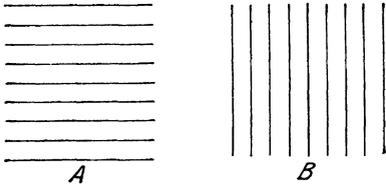


Abb. 203. Täuschung über die Länge einer Strecke durch deren Unterteilung.

Praktisch wird die Sehschärfe gewöhnlich mit den aus Buchstaben oder Zahlen bestehenden SNELLENschen Sehproben gemessen. Diese, wie z. B. das E in Abb. 201, sollen von einem Normalsichtigen gerade noch

gelesen werden können, wenn jedem der kleinen Quadrate ein Gesichtsbuchstaben würde dann also unwinkel von 1' entspricht; das Bild der gefäher 5×5 Zapfen bedecken. Wird der Buchstabe dem Auge in solcher Größe vorgewiesen, daß sein Sehinkel bei 60 m Abstand 5' beträgt und wird er wirklich in dieser Entfernung eben erkannt, so ist die Sehschärfe (Visus) gleich 1 ($V = \frac{60}{60}$); wird er dagegen erst in 30 m Entfernung gelesen, so ist $V = \frac{30}{60} = \frac{1}{2}$ usw.

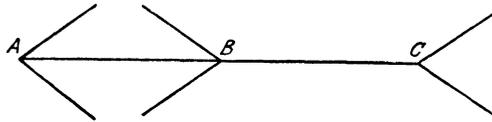


Abb. 204. MÜLLER-LYERSche Figur.

Die Methode ist nicht ganz einwandfrei, denn es kommt nicht bloß auf die Größe der Buchstaben an, sondern auch auf die größere oder geringere Ähnlichkeit der Buchstaben untereinander, auf den Sinn für Formen u. a.

Der Messung der Sehschärfe vergleichbar ist die Bestimmung des **Augenmaßes**, d. h. der Fähigkeit, zu taxieren, ob eine Linie gerade oder krumm ist, ob vertikal oder schräg, ob gleich lang oder länger, als eine andere.

Das *Augenmaß für Geradheit* kann man z. B. so messen, daß man gleich hohe Ausschnitte aus Kreislinien von verschiedenem Radius vorzeigt und feststellt, ob die Krümmung wahrgenommen wird oder nicht. Man findet, daß die Krümmung eben bemerkbar wird, wenn die Bogenhöhe größer als etwa 1,5' ist (GUILLERY). HELMHOLTZ nahm an, daß man zur Beurteilung den Blick die Linie entlang wandern läßt; ist die Linie

gerade, so müssen sich die Nachbilder der einzelnen Streckenabschnitte im Zentrum der Netzhaut vollkommen decken. Der Eindruck der Geradheit kann aber auch bei ruhendem Auge und bei Instantanbeleuchtung gewonnen werden, wenn auch der Schwellenwert der Krümmung unter diesen Umständen meistens größer gefunden wird.

Interessant ist, daß durchaus nicht unter allen Umständen nur gerade Linien als gerade empfunden werden. Zwar wird eine Gerade, welche durch den Fixationspunkt geht und sich in einem Netzhautmeridian abbildet, stets auch als gerade empfunden; dagegen erscheinen Gerade, welche seitwärts vom Fixationspunkt gelegen sind, gekrümmt mit einer Konkavität gegen den Fixierpunkt. Man muß daher einer Linie, welche auf einer peripheren Partie der Netzhaut abgebildet wird, eine Konvexkrümmung gegen den Fixierpunkt geben, damit sie gerade erscheint, und um so mehr, je exzentrischer sie gesehen wird. Man betrachte z. B. die Abb. 202 in siebenfacher Vergrößerung aus einer Entfernung von etwa 20 cm mit einem Auge, so wird man ein Schachbrett mit regulären statt mit verzerrten Quadraten sehen (HELMHOLTZ). Die Erscheinung beruht offenbar darauf,

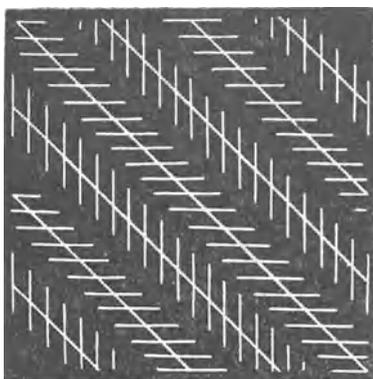


Abb. 205. ZÖLLNERSche Figur.

daß uns unser Gesichtsfeld nicht als eine Ebene erscheint, sondern daß wir die Dinge vor uns wie an einer konkaven, annähernd kugelförmigen Fläche angeheftet sehen.

Auch *das Augenmaß für Längenunterschiede* ist bei Augenbewegung größer als bei Augenruhe. FECHNER fand, daß man einen Längenzuwachs von $\frac{1}{60}$ — $\frac{1}{100}$ noch bemerkt. Haben die verglichenen Strecken gleiche Richtung, so ist der Wert der Unterschiedschwelle kleiner, als wenn die Richtung verschieden ist.

Die Abweichungen der *subjektiven Horizontalen* von der objektiven sind außerordentlich klein; dagegen weicht die *subjektive Vertikale* regelmäßig am oberen Ende etwa um 1° nach außen ab; die objektive Vertikale erscheint also (bei senkrechter Haltung des Kopfes) oben nach einwärts geneigt, auch beim Sehen mit einem Auge.

Die Beurteilung der Geradheit, der Größe und der Richtung wird sehr häufig durch eine Anzahl von Neben Umständen beeinflusst, wie leicht aus zahlreichen **geometrisch-optischen Täuschungen** zu erkennen ist. Wird z. B. eine Strecke unterteilt, so erscheint sie größer als eine gleich lange Strecke, welche ungeteilt ist. Daher ist in der Abb. 203 der Eindruck zwingend, daß das rechte Quadrat breiter als hoch ist, das linke höher als breit. Die Erklärung dafür wird u. a. in einer Urteilstäuschung gefunden, welche durch das Hingleiten des Blickes und sein Verweilen auf den Unterteilungspunkten hervorgerufen wird. Bekannt ist auch die Streckentäuschung in der sog. MÜLLER-LYERSchen Figur (Abb. 204); die seitlichen Anhängsel an die horizontale Gerade bewirken, daß

ihre beiden Hälften AB und BC lange nicht gleich groß erscheinen. Auch hier wird zur Erklärung eine Urteilstauschung geltend gemacht, welche dadurch zustande komme, daß der Blick sich durch die Anhängsel verleiten lasse, an der rechten Streckenhälfte über die Enden hinauszufahren, während er an den Enden der linken Hälfte dadurch eher Halt mache. Eine andere Erklärung (EINTHOVEN) geht von der physikalisch-optischen Erscheinung aus, daß, wenn die Enden der Streckenhälften mit ihren Anhängseln nicht scharf, sondern in Zerstreuungskreisen abgebildet werden, ihr optischer Schwerpunkt an der rechten Streckenhälfte auswärts, an der linken einwärts verlagert wird; fixiert man nun abwechselnd die Mitten der beiden Streckenhälften, so werden ihre Enden indirekt, also unscharf gesehen.

Eine andere Gruppe von geometrisch-optischen Täuschungen illustriert den Satz, daß spitze Winkel im allgemeinen überschätzt, stumpfe unterschätzt werden. Ein Beispiel ist die ZÖLLNERSche Figur (siehe Abb. 205), in welcher durch die spitzen und stumpfen Winkel eine Täuschung über die Richtung der Parallelen erzwungen wird. Eine entsprechende Täuschung über die Geradheit bewirkt die Figur von HERING (Abb. 206).

Zu den elementaren Leistungen des Raumsinns unseres Auges gehört die im vorhergehenden bereits vorausgesetzte Fähigkeit, *die Hauptrichtungen als solche zu erkennen*. Die Frage, wie wir eigentlich

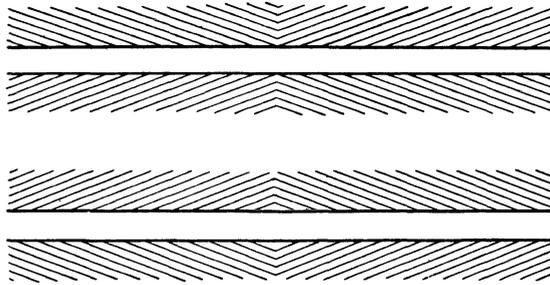


Abb. 206. HERINGSche Figur.

dazu kommen, manche Objekte als oben, andere als unten zu bezeichnen, wurde eindringlicher, seitdem man wußte, daß *das Auge die Außendinge in einem verkehrten Bild auf die Netzhaut projiziert*, so daß oben und unten vertauscht sind. Man empfand es als Problem, daß man trotz der Umkehrung die Dinge aufrecht sehe, und suchte nach Lösungen. Aber es handelt sich hier nur um ein Scheinproblem. Denn wir empfinden ja nicht unsere Netzhaut, die Seele sitzt nicht sozusagen hinter dem Auge und betrachtet das verkehrte Bild, sondern wir empfinden die Sehdinge und sprechen von bestimmten Dingen als oben, von anderen als unten befindlich. Man denke sich einen Blinden, dessen Raum vornehmlich ein Tastraum ist; auch er erwirbt die Begriffe oben und unten, indem z. B. bestimmte Dinge, welche durch Heben des Arms zu ergreifen sind, oben befindlich genannt werden. Wird dieser Blinde sehend, so wird er dieselben Dinge, wenn er sie beim Ergreifen mit dem erhobenen Arm zugleich sieht, als oben bezeichnen, gleichgültig, an welchem Ort sie sich auf der Netzhaut abbilden. Würden wir von Geburt an nicht ein verkehrtes, sondern ein aufrechtes Netzhautbild haben, so würden wir die Dinge räumlich gerade so und nicht anders empfinden, als jetzt. Einigermaßen ist dies durch ein interessantes Experiment von STRATTON bewiesen; dieser hielt sein eines Auge geschlossen und brachte vor das andere ein Linsensystem, welches die Außenwelt auf den Kopf stellte;

in der Weise verbrachte er mehr als acht Tage. Anfangs waren die Eindrücke, welche er durch das Gesicht zusammen mit dem Gefühl und den anderen Sinnen erhielt, völlig verwirrend. Aber schon am vierten Tage sah er die Landschaft aufrecht, hatte dabei jedoch zugleich das Gefühl, als stünde sein Körper verkehrt. Überhaupt fiel es ihm schwer, die optischen Eindrücke mit den Empfindungen, welche von den eigenen Gliedern ausgehen, in Harmonie zu bringen, rechts und links wurden sowohl im Gefühl als auch im Handeln lange verwechselt. Gegen Ende des Versuchs wurden Arme und Beine wirklich da gefühlt, wo sie gesehen wurden; nur wenn sie nicht gesehen, nur gefühlt wurden, so wurden sie meist auch dann noch in der alten Weise lokalisiert. Nur graduell verschieden hiervon ist es, wenn es einem zur Gewohnheit wird, allerlei Handlungen vor dem Spiegel auszuführen, wobei ja ebenfalls

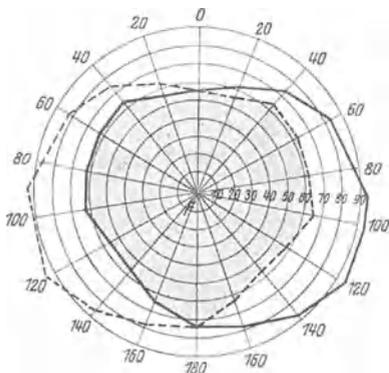


Abb. 207. Das binokulare Gesichtsfeld. Die ausgezogene Linie begrenzt das Gesichtsfeld für das rechte, die gestrichelte das Gesichtsfeld für das linke Auge.

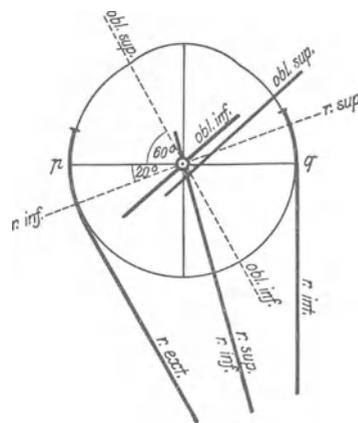


Abb. 208. Zugrichtungen und Drehachsen der Augenmuskeln (nach LANDOIS). Die Zugrichtungen sind durch ausgezogene, die Drehachsen durch punktierte Linien dargestellt.

neue Beziehungen zwischen Gesichtswahrnehmungen und den Wahrnehmungen der eigenen Glieder und ihrer Bewegungen hergestellt werden.

Die Fläche, an welcher wir sämtliche mit dem ruhenden Auge zu erfassenden Dinge zu sehen glauben, heißt das **Gesichtsfeld**; es weist bestimmte Grenzen auf, welche im wesentlichen durch die tiefe Lagerung des Augapfels und die Prominenz seiner Umgebung, daneben auch durch die beschränkte Sehfähigkeit der Netzhautperipherie gesteckt sind. Die Ausmessung des Gesichtsfeldes geschieht mit dem *Perimeter* und wurde schon früher (S. 472) beschrieben. Man bezeichnet dabei seine Grenzen durch die Größe der Winkel, welche die von den einzelnen Punkten der Grenzlinie aus gezogenen Richtungsstrahlen mit der „*Gesichtslinie*“, der Verbindungslinie zwischen dem Fixierpunkt und der Fovea centralis, bilden. In dieser Weise bestimmt, dehnt sich das Gesichtsfeld für farblose Objekte nach Abb. 198 (S. 471) temporalwärts bis etwa 100° , nasalwärts bis 60° , nach oben ebenfalls bis 60° und nach unten bis etwa 65° aus. Doch variieren diese Grenzen individuell, besonders je nach der Formation der Augenbrauenbogen und der Nase.

Die Gesichtsfelder der beiden Augen überdecken sich zum Teil, d. h. wir vermögen bestimmte, beiden Gesichtsfeldern gemeinsame Punkte auf beiden Netzhäuten zugleich zur Abbildung zu bringen (siehe Abb. 207); insbesondere kann bei geeigneter Konvergenz der Gesichtslinien ein und derselbe Punkt, der *binokulare Blickpunkt (Fixierpunkt)* fixiert, also foveal abgebildet werden. Die Bedeutung davon für die Erfassung der räumlichen Tiefendimension wird uns nachher beschäftigen.

Mit der partiellen Überdeckung der beiden Gesichtsfelder hängt die früher (S. 395) erörterte partielle Kreuzung der Sehnervenfasern zusammen. Diese bewirkt beim Menschen, daß alle Lichteindrücke, welche von der linken Seite her zustande kommen, auf die rechte Großhirnhemisphäre, und daß alle Eindrücke von rechts her auf die linke Hemisphäre übertragen werden. Die beiden Gesichtsfelder sind nun aber keineswegs bei allen Säugetieren zum Teil übereinander gelagert; beim Pferd mit seinen seitlich gestellten Augen sind sie z. B. ganz getrennt. In solchen Fällen ist die Kreuzung der Sehnervenfasern nicht eine partielle, sondern eine totale, so daß auch dann wieder sämtliche Eindrücke von links her nach rechts, sämtliche Eindrücke von rechts nach links hinüberprojiziert werden. Diese Verschiedenheit in der Lagebeziehung der Gesichtsfelder zueinander hat wohl die Bedeutung, daß je nach den Lebensbedingungen der Tiere einmal ein gewisses Bedürfnis nach Wahrnehmung des Raumes mit seiner Tiefe, ein anderes Mal nach panoramischer Orientierung vorhanden ist.

Das Feld, in welchem die Sehdinge erscheinen, wird durch die Augenbewegungen beträchtlich zum sog. **Blickfeld** erweitert. Das Blickfeld jedes Auges wächst durch die Bewegungen nach oben und unten etwa um je 45° über das Gesichtsfeld hinaus, nach lateral und medial um je 50° . Eine noch größere Ausdehnung der Sehfläche kann durch Bewegungen des Kopfes und weiterhin des Rumpfes und des ganzen Körpers gewonnen werden.

Die Augenbewegungen geschehen durch drei Paare von Muskeln, welche den Augapfel ähnlich auf dem Fettpolster der Augenhöhle bewegen, wie sich der Kopf des Femur auf der Pfanne seines Kugelgelenks bewegt. Die Drehung in solch einem Kugelgelenk kann an und für sich um zahllose Achsen erfolgen, aber praktisch wird sie durch die antagonistischen Augenmuskeln und durch den N. opticus gehemmt. Der Drehpunkt des Auges liegt beim Emmetropen 13,5 mm hinter dem Hornhautscheitel, das ist 1,3 mm hinter dem Mittelpunkt des Auges (DONDERS).

Die Wirkung der drei Paare von Augenmuskeln ergibt sich aus der Beziehung ihres Ursprungs und Ansatzes zueinander und zum Drehpunkt des Auges. Die Gerade, welche Ursprung und Ansatz (beim M. obliquus superior Trochlea und Ansatz) verbindet, gibt die Zugrichtung an; die Zugebene ist die Ebene, welche die Zugrichtung und den Drehpunkt einschließt; die Drehachse ist dann die Senkrechte, welche die Zugebene im Drehpunkt schneidet. Je zwei im Antagonistenverhältnis stehende Muskeln haben eine gemeinsame Drehachse.

Zugrichtungen und Drehachsen der drei Augenmuskelpaare sind in den Horizontalschnitt durch das linke Auge eingetragen, welcher in Abb. 208 dargestellt ist. Daraus ist ersichtlich, daß, wenn man von der *Primärstellung* der Augen ausgeht, d. h. von derjenigen Stellung, in welcher bei aufrechter gerader Kopfhaltung die beiden Sehachsen parallel zueinander in sagittaler Richtung verlaufen, bei der Kontraktion von Rectus lateralis (externus) oder medialis (internus) der Hornhautscheitel eine Horizontale beschreibt, das Auge also um die Vertikalachse eine reine Seitwärtswendung ausführt. Die Drehachsen für Rectus inferior und superior

und für die Obliqui liegen beide in der Horizontalebene des Auges, aber in verschiedener und entgegengesetzter Neigung zur Transversalachse (pq). Die Folge davon ist, daß bei der Kontraktion von Rectus superior oder inferior der Hornhautscheitel nicht einfach senkrecht gehoben oder gesenkt, sondern zugleich etwas nach innen bewegt wird, daß bei der Kontraktion des Obliquus superior der Scheitel nach unten und außen, bei der des Obliquus inferior nach oben und außen bewegt wird (RUETE, A. FICK). Abb. 209 stellt diese Bewegungen des Scheitels für das rechte Auge von vorn betrachtet dar, und zwar für eine Achsendrehung um 50° .

Hieraus folgt, daß bei der reinen *Auswärts- oder Einwärtswendung* eines Auges von der Primärstellung aus nur ein Muskel, der Rectus lateralis oder der Rectus medialis, in Aktion zu treten braucht, daß für die *vertikale Erhebung* des Blickes Rectus superior und Obliquus inferior, für die *vertikale Senkung* Rectus inferior und Obliquus superior in bestimmtem gegenseitigen Verhältnis sich betätigen müssen. Jede *Schrägstellung* der Sehachse jedoch kann von der Primärstellung aus nur durch die Kontraktion dreier Muskeln erreicht werden.

Nehmen wir nun an, das Auge halte irgend eine Stellung außerhalb der Primärstellung fest, so wäre es an sich denkbar, daß das Auge dabei eine beliebige der zahllosen durch Rotation um die Sehachse zu erreichenden Lagen einnahme, so daß sich z. B. eine fixierte Gerade in einem beliebigen Meridian der Netzhaut abbilden könnte. Alsdann würde unsere Orientierung über die Lage dieser Linie zur Voraussetzung haben, daß wir sowohl die Stellung der Sehachsen als auch die Lage der Netzhautmeridiane perzipierten. In Wirklichkeit ist jedoch *jeder Lage der Sehachse eine einzige bestimmte Stellung des Auges zugeordnet* (DONDERSSCHES GEsETZ); zu jeder Blicklage gehört nur eine bestimmte Netzhautlage.

Dies läßt sich am besten mit Hilfe von Nachbildern beweisen (RUETE, HELMHOLTZ). Man stelle sich gegenüber einer hellen Wand auf und fixiere einige Zeit zwei kreuzweise davor ausgespannte schwarze Bänder bei Primärstellung des Auges. Wendet man den Blick dann auf eine bestimmte Stelle der Wand, so sieht man dort das Nachbild des Bandkreuzes und kann sich davon überzeugen, daß es stets gleich orientiert ist, auf welchem Wege man auch immer den Blick auf die Stelle der Wand hat wandern lassen. Auf diese Weise findet man aber auch, daß der vertikale und der horizontale Netzhautmeridian nur bei Rechts- und Links- und bei Aufwärts- und Abwärtsblicken, von der Primärstellung aus ihre Lage beibehalten, daß dagegen bei Einnahme einer Schrägstellung stets eine ganz bestimmte Neigung der Meridiane, also eine bestimmte „Raddrehung“ des Auges um die Sehachse stattfindet.

Die Einstellung der Sehachse in eine bestimmte Richtung legt aber nicht bloß die ganze Lage des einen Augapfels, sondern zugleich auch die des anderen fest. Denn die *Muskulaturen der beiden Augen sind so fest miteinander assoziiert, daß eines nicht unabhängig vom anderen bewegt werden kann*, daß die beiden Augen vielmehr wie ein Organ, wie ein „Doppelauge“ gehandhabt werden (HERING). Dieser Assoziationsmechanismus funktioniert selbst dann weiter, wenn das eine Auge geschlossen oder gar erblindet ist. Er bewirkt vor allem, daß die beiden Sehachsen stets auf einen gemeinsamen Punkt, den binokularen Blickpunkt

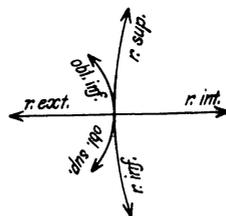


Abb. 209. Bewegungen des rechten Hornhautscheitels bei Kontraktion der einzelnen Augenmuskeln, von vorn betrachtet (nach HERING).

oder Fixierpunkt, gerichtet sind. Dafür ist im allgemeinen eine bestimmte Konvergenzbewegung durch entsprechend abgestufte Innervation der Recti mediales vonnöten. Nur bei Betrachtung unendlich entfernter Punkte laufen die Sehachsen parallel. Eine Divergenz kommt nicht vor.

Der genannte binokulare Muskelapparat ist zu dem Zweck der Assoziation der Muskeln unter die unmittelbare Herrschaft eines Zentrums in der Vierhügelregion gestellt, welches früher (S. 367) bereits erwähnt wurde. Von dort aus findet auch die Assoziation der äußeren Augenmuskeln mit dem Ciliarmuskel und dem M. sphincter iridis jedes Auges statt und erfüllt für das Sehen in der Nähe die ebenfalls bereits (S. 440) genannte Aufgabe.

Wie ein einheitliches Organ funktioniert das „Doppelauge“ aber am auffallendsten, wenn wir nicht seine motorischen, sondern seine sensorischen Funktionen betrachten. Obgleich nämlich wegen der Gemeinschaftlichkeit eines Teils der beiden Gesichtsfelder (Abb. 207) zahlreiche

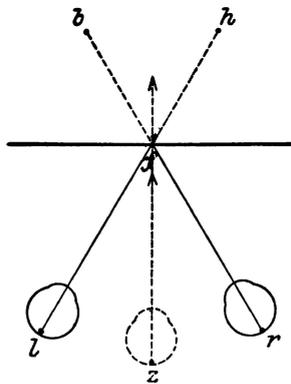


Abb. 210. Nachweis der identischen Sehrichtung (nach HERING).

Punkte in beiden Augen zugleich zur Abbildung kommen, werden sie doch nicht zweifach gesehen, sondern man sieht sie einfach und an einem bestimmten Ort; dieser entspricht aber weder der Sehrichtung des einen, noch auch der des anderen Auges. Man kann dies durch folgenden einfachen Versuch beweisen (HERING): Man schließe das rechte Auge und fixiere mit dem linken durch ein Fenster hindurch einen fernen und etwas nach rechts gelegenen Gegenstand, z. B. ein Haus (siehe Abb. 210 h) und mache auf das Fenster mit Tinte einen schwarzen Fleck (f) so daß der Fleck die Mitte des Hauses verdeckt. Dann öffne man das rechte und schließe das linke Auge, ohne die Kopfstellung zu ändern. Fixiert man jetzt den Fleck mit dem rechten Auge, so sieht man, daß er irgend einen nach links hin gelegenen Gegenstand, z. B.

einen Baum (b), teilweise verdeckt. Öffnet man darauf beide Augen und fixiert den Fleck, so sieht man hintereinander in einer Linie, in **identischer Sehrichtung** (HERING) Haus und Baum, bald diesen, bald jenes deutlicher, obwohl die beiden in Wirklichkeit sich ganz wo anders befinden. Man sieht also so, als ob an Stelle der zwei Augen ein „Zyklopernauge“ (z) in der Gegend der Nasenwurzel säße und Fleck, Baum und Haus betrachtete. Liegt der Fleck in der Medianebene des Kopfes, so wie in Abb. 210, so fällt auch die identische Sehrichtung oder, wie man auch sagt, die *Richtung der binokularen Blicklinie* in die Medianebene; weicht dagegen der Fleck nach links oder rechts ab, so ist auch die identische Sehrichtung der Augen nach links oder rechts verschoben.

Nun wäre es aber verkehrt anzunehmen, daß Punkte, welche dem binokularen Gesichtsfeld angehören, unter allen Umständen einfach gesehen werden. Im Gegenteil, man kann sich durch einen sehr einfachen Versuch davon überzeugen, daß das nicht der Fall ist; man braucht nur durch einen seitlichen Druck auf das Auge die gegenseitige Lage der beiden Augen ein wenig zu verschieben, dann wird man sofort Doppelbilder gewahr. Es müssen also bestimmte **Bedingungen für das binokulare**

Einfachsehen erfüllt sein, und diese sind kurz so formuliert: *die gesehenen Objekte müssen sich auf korrespondierenden oder identischen Netzhautpunkten abbilden.* Diese Netzhautpunkte findet man (angenähert), wenn man die beiden Netzhäute so aufeinander legt, daß die horizontalen und die vertikalen Netzhautmeridiane, also auch die Foveae centrales einander decken; würde man jetzt durch die beiden Netzhäute an beliebiger Stelle mit einer Nadel hindurchstechen, so würde man korrespondierende oder identische Netzhautpunkte treffen. Wegen dieser Lagerung bezeichnet man die identischen Punkte auch als *Deckpunkte* (HERING). Wie das Schema Abb. 211 erkennen läßt, liegen also die Deckpunkte in jeder Netzhaut von den Foveae aus in gleicher Richtung und in gleichem Abstand.

Um uns von der Bedeutung der so definierten Punktpaare für das binokulare Einfachsehen zu überzeugen, werden wir uns zunächst nach der Lage der Raumpunkte zu fragen haben, von denen aus das Licht auf Deckpunkte fällt.

Solche Raumpunkte sind in erster Linie alle Fixierpunkte, also die Punkte, auf welche die Sehachsen durch geeignete Konvergenzstellung der Augen unwillkürlich gerichtet werden, wenn sich unsere Aufmerksamkeit auf sie lenkt. Sobald wir daher durch rasches

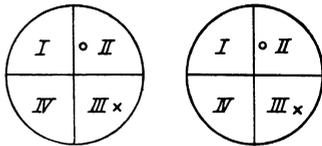


Abb. 211. Lage der Deckpunkte in den beiden Netzhäuten zueinander. Die gleich bezifferten Quadranten enthalten zusammengehörige Deckpunkte; durch die kleinen Kreise und Kreuze sind Deckpunktpaare gezeichnet.

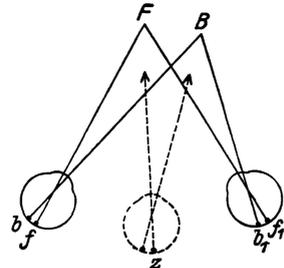


Abb. 212. Abbildung auf identischen Punkten.

Vorsetzen eines Prismas vor das eine Auge den einen der beiden vom Fixierpunkt ausgehenden Richtungsstrahlen ablenken, so daß er nicht mehr in die Fovea fällt, sehen wir den fixierten Punkt doppelt.

Identische Netzhautpunkte werden ferner getroffen, wenn Licht von einem Punkt etwas rechts oder links (oder auch etwas oberhalb oder unterhalb) von dem fixierten Punkt ausgeht, wie etwa die Abb. 212 zeigt; so sind die von B aus vom Licht getroffenen Netzhautpunkte b und b₁ Deckpunkte, weil die Strecken b f und b₁ f₁ gleich groß und gleich gerichtet sind; zF' und zB sind dann die identischen Sehrichtungen für das Doppelauge z.

Anders, wenn wir einen Punkt beachten, welcher vor oder hinter dem Fixierpunkt gelegen ist! Man stelle z. B. vor sich drei Stäbe in der Medianebene hintereinander auf und fixiere den mittleren Stab B (Abb. 213), dann erreichen weder die von dem vorderen A, noch die von dem hinteren C ausgehenden Richtungsstrahlen korrespondierende Punkte; A und C werden infolgedessen doppelt gesehen, und zwar liegen die Doppelbilder für das Doppelauge z scheinbar in α und α_1 , und in γ_1 und γ . Schließt man das rechte Auge, so verschwindet das linke Doppel-

bild von A, α , und das rechte Doppelbild von C, γ ; umgekehrt, wenn man das linke Auge schließt. *Ein vor dem Fixierpunkt gelegener Punkt wird also in gekreuzten, ein hinter dem Fixierpunkt gelegener Punkt in gleichseitigen Doppelbildern gesehen.* Die nichtidentischen Punkte heißen auch *disparate Punkte* (a a_1 und c c_1); sie sind je nachdem „binasal“ oder „bitemporal“ gelegen.

Nach diesen Erfahrungen an einigen Beispielen wird man die Frage ganz allgemein zu beantworten suchen, wo die Objektpunkte zu finden sind, welche Deckpunkte erregen und deshalb einfach gesehen werden. Die Antwort lautet: im **Horopter** (JOHANNES MÜLLER), d. h. einer „Sehgrenze“, in welcher sich bei der jeweiligen Augenstellung die von je zwei Deckpunkten ausgehenden Richtungsstrahlen schneiden. Eine allgemeine Darstellung der Lehre vom Horopter kann hier wegen ihrer Schwierigkeit nicht gegeben werden. Die Lage des Horopters soll nur für zwei Sonderfälle nachgewiesen werden:

1. Die Sehachsen seien bei aufrechter Kopfhaltung in konvergenter und symmetrischer Richtung auf einen nahen Punkt F (Abb. 214) eingestellt, so daß f und f_1 die

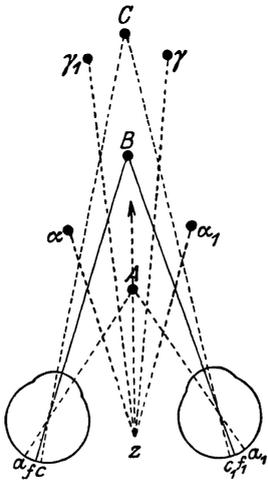


Abb. 213. Abbildung auf disparaten Netzhautpunkten.

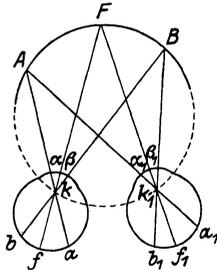


Abb. 214. Horopterkreis.

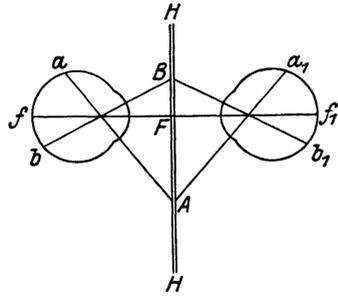


Abb. 215. Vertikalhoropter (nach HERMANN).

beiden Foveae repräsentieren. a und a_1 , so wie b und b_1 seien identische Netzhautpunkte, ihre durch die Knotenpunkte k und k_1 gezogenen Richtungsstrahlen schneiden sich in A und B . A , B und F müssen dann Punkte des zu der eingenommenen Konvergenzstellung gehörigen Horopters sein. Dieser Horopter ist nun offenbar eine Kreislinie, welche die Punkte $AFBk_1k$ einschließt (JOHANNES MÜLLER). Denn als Kreis ist die Linie dadurch definiert, daß die Winkel α und α_1 (sowie β und β_1), welche nach Konstruktion gleich groß sind, auch als Peripheriewinkel über dem gleichen Bogen $A F$ (bzw. $B F$) gleich sind.

Der Horopter bei der konvergenten symmetrischen Richtung der Sehachsen besteht aber außer dem Horopterkreis noch aus einer Vertikalen, welche in dem symmetrisch gelegenen Fixierpunkt F auf der Ebene des Horopterkreises errichtet wird. Dies ist leicht aus der Abb. 215 zu ersehen: Die Bogen $a f b$ und $a_1 f_1 b_1$ bedeuten darin die durch die Foveae gehenden vertikalen Netzhautmeridiane; in der Linie $H H$ denke man sich das Papier gekniff, so daß die Sehachsen f und f_1 F konvergieren. $H H$ ist dann offenbar ein Horopter, da die von

einem beliebigen seiner Punkte, z. B. von A oder B ausgehenden Richtungsstrahlen auf den vertikalen Meridianen gleiche Bogen ($a f = a_1 f_1$, $b f = b_1 f_1$) abschneiden.

2. Wenn F als Punkt des Horopterkreises in Abb. 214 weiter und weiter hinausrückt, wenn also die Konvergenz der Sehachsen mehr und mehr abnimmt, so verringert sich auch die Krümmung des Horopterkreises mehr und mehr, um schließlich, wenn die Sehachsen parallel laufen, in eine zu ihnen senkrechte unendlich ferne horizontale Linie überzugehen. Daraus folgt, daß *für alle Stellungen, in denen die Sehachsen parallel und geradeaus gerichtet sind*, der Horopter durch eine unendlich ferne und senkrecht zu den Sehachsen stehende Ebene dargestellt wird.

Da wir nun vorwiegend mit konvergenten Sehachsen sehen, so folgt aus der Horopterdarstellung, daß die meisten Gegenstände, weil sie außerhalb des Horopters liegen, auf disparaten Netzhautstellen abgebildet werden, also doppelt gesehen werden müssen. Aber *von den Doppelbildern merken wir für gewöhnlich nichts*. Dies hat mehrere Gründe. Erstens richten wir unsere Aufmerksamkeit unwillkürlich auf den fixierten, also in den korrespondierenden Foveae abgebildeten Gegenstand. Zweitens entgehen die extrafovealen Gegenstände um so leichter der Beachtung, weil sie wegen der exzentrisch geringen Sehschärfe nur

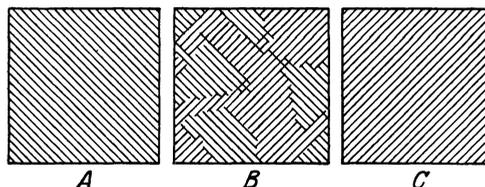


Abb. 216. Wettstreit der Sehfelder.

undeutlich gesehen werden. Drittens akkommodieren wir unwillkürlich auf die Ebene des fixierten Gegenstandes, so daß die vor oder hinter ihm nicht im Horopter gelegenen Objekte, welche sich auf disparaten Netzhautstellen abbilden, nur in Zerstreuungskreisen erscheinen. Ferner kommt es, wenn auf zwei Deckpunkten zwei verschiedene Gegenstände sich abbilden, zu einem eigentümlichen Phänomen, welches als **Wettstreit der Sehfelder** bezeichnet wird; nämlich die beiden Gegenstände werden nicht gleichzeitig in ihrer gemeinsamen Sehrichtung gesehen, sondern bald herrscht der eine, bald der andere im Bewußtsein vor. Betrachtet man z. B. durch zwei zylindrische Röhren bei Parallelstellung der Sehachsen zwei Flächen mit Linien von verschiedener Richtung (siehe Abb. 216 A und C) (nach HERING), so scheidet in dem binokularen Gesichtsfeld bald die eine, bald die andere Richtung, bald sieht man auch ein Feld, in welchem in fortwährendem Wechsel die Liniensysteme an verschiedenen Stellen einander durchbrechen (B).

Hält sich die Disparation der gereizten Netzhautstellen innerhalb enger Grenzen, so kommt es überhaupt nicht zum binokularen Doppelsehen, sondern an deren Stelle tritt etwas Neues auf, eine *binokulare Tiefenwahrnehmung*. Wir kommen damit auf eine der wichtigsten Funktionen des Doppelauges, auf seine Bedeutung für die Erfassung des dreidimensionalen Raums.

Um die Bedeutung dieser Funktion abschätzen zu können, fragen wir uns zunächst, ob es nicht auch eine **Tiefenwahrnehmung bei monokularer Betrachtung** gibt. Diese Frage ist unzweifelhaft zu bejahen; denn auch wenn wir ein Auge schließen, ist der Eindruck des vor uns Liegenden zwingend ein körperlicher und nicht nur ein flächenhafter entsprechend der Flächenhaftigkeit der Netzhautbilder. Dafür ist eine ganze Anzahl von Faktoren maßgebend. Ein großer Teil derselben beruht auf den persönlichen Erfahrungen über den wechselnden Eindruck, welchen körperliche Sehdinge auf unser Auge machen. Von solchen *empirischen Faktoren* sind zu nennen:

1. *die Größe des Netzhautbildes*: je ferner ein Gegenstand ist, um so kleiner ist sein Netzhautbild. Kennen wir also die wirkliche Größe des Gegenstandes, so können wir aus der Größe seines Bildes auf seine Entfernung schließen. Daher kommen bei Gegenständen unbekannter Größe Vertaxierungen ihrer Entfernung vor, so, wenn wir die Glaskörpertrübungen für fliegende Mücken erklären, oder wenn das Kind, dem die genügenden Erfahrungen noch fehlen, nach dem Mond greift oder eine ferne Kuh für einen Hund erklärt. Der Maler erzielt bei seiner flächenhaften Darstellung körperlicher Gegenstände eine kräftige Tiefen-

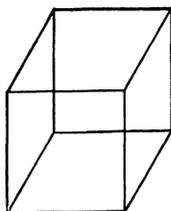


Abb. 217.

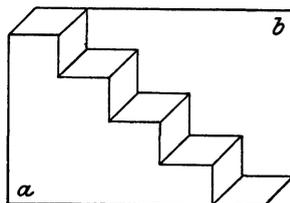


Abb. 218. SCHROEDERSche Treppe.

wirkung, wenn er durch entsprechende Abstufungen in der Größe der gemalten Dinge den Eindruck eines Vorder-, eines Mittel- und eines Hintergrundes betont.

2. *die Schattenbildung bei den Körpern*, durch welche auch ferne Objekte ein Relief bekommen. Deshalb bevorzugt der Maler bekanntlich Morgen- und Abendbeleuchtungen in der Landschaft, weil die langen Schatten die Gegenstände besonders kräftig modellieren und körperlich erscheinen lassen.

3. *der Einfluß der Luftperspektive*: ferne Gegenstände erscheinen weniger deutlich als nahe, nicht bloß deshalb, weil unsere Sehschärfe nicht ausreicht, um die sichtbaren Teile in alle Einzelheiten aufzulösen, sondern auch, weil die Luft nicht vollkommen durchsichtig ist, vielmehr einen Teil des Lichtes absorbiert, und weil die Luftströmungen durch Strahlenbrechung die Bilder verzerren. Hinzu kommt, daß die Luft als trübes Medium die Farben verändert; GOETHE'S Urphänomen der Chromatik, dem gemäß trübe Medien in der Aufsicht bläulich, in der Durchsicht rötlichgelb aussehen, läßt die dunkle Ferne mit einem blauen Dunst, die helle Ferne mit rötlichem Gelb verhüllt erscheinen.

4. *die perspektivischen Verkürzungen*: an diese sind wir so gewöhnt, daß die flächenhafte Darstellung eines Körpers in perspektivischer Verkürzung dermaßen zwingend körperhaft wirken kann, daß es kaum möglich ist, den Flächeneindruck zu gewinnen, z. B. wenn man einen Würfel so, wie in der Abb. 217 zeichnet. Besonders die Wiedergabe

der Verschiebungen und Überschneidungen in einer Architektur ruft, etwa in einem Panorama oder als Theaterdekoration, den lebhaftesten körperlichen Eindruck hervor. Daß freilich dieser Eindruck der Perspektive nicht völlig eindeutig zu sein braucht, lehrt das Beispiel der sogenannten SCHROEDERSchen Treppe (siehe Abb. 218), die wir bald von oben, bald von der Unterseite zu betrachten glauben, je nachdem uns die Fläche a oder b vorn erscheint. Auch der Eindruck des Würfels Abb. 217 wechselt, so daß z. B. die rechte untere Ecke bald einer Vorder-, bald einer Hinterfläche anzugehören scheint.

5. Nahe verwandt mit der perspektivischen Verkürzung ist die scheinbare *gegenseitige Verschiebung der Teile* eines Körpers, wenn wir uns an ihm vorbeibewegen. Mit jedem Schritt sieht ein naher Körper durch diese Verschiebung anders aus, und die Veränderung ist um so größer, je näher er sich befindet.

Bei der Ausnützung der genannten empirischen Faktoren für die monokulare Erfassung der Tiefendimension verhält sich das Auge rein passiv. Es könnte für den gleichen Zweck mit der *Akkommodation* auch aktiv eingreifen. Ein Körper ist ja u. a. dadurch charakterisiert, daß er nicht gleichzeitig in allen seinen Ebenen scharf gesehen werden kann; das kann aber sukzessive durch die Tätigkeit des Akkommodationsmuskels bewirkt werden. Wir vermöchten mit Hilfe dieser Akkommodation ein Tiefenkriterium dann zu gewinnen, wenn wir etwa den jeweiligen Grad der Kontraktion des Ciliarmuskels vermöge der darin enthaltenen sensiblen Nervenfasern empfinden. Diese Art Ausnützung der Akkommodation kommt aber wahrscheinlich nicht in Betracht. Wenn man nämlich durch eine Röhre mit kreisrunder Öffnung den scharfen Rand eines schwarzen Schirmes, der vor einem hellen Hintergrund in sagittaler Richtung mit gleichförmiger Geschwindigkeit verschoben wird, mit einem Auge betrachtet, so bemerkt man von der Annäherung oder Entfernung nichts — es sei denn, daß die Verschiebung in abrupter Weise vorgenommen wird (HILLEBRAND).

Wird der Akkommodationsmuskel durch Atropin gelähmt, so kommt es zu einer eigentümlichen optischen Täuschung, zu sogenannter *Mikropie*; bei Einstellung des Auges auf die Nähe muß nämlich jetzt eine viel größere Anstrengung aufgebracht werden, als sonst, und da sonst bei einer starken Anspannung des M. ciliaris ein scharf gesehenes Objekt ein großes Netzhautbild erzeugt, so wird jetzt der Eindruck erweckt, als ob die bekannten Sehdinge abnorm klein, eventuell auch daß sie abnorm fern gelegen wären. Umgekehrt verursacht Eserinisierung durch Krampf des Akkommodationsmuskels (siehe S. 437) *Makropie*, also eine scheinbare Vergrößerung der Objekte.

Wenn nach all dem auch beim Sehen mit einem Auge sehr wohl die Tiefendimension erfaßt werden kann, so ist die **binokulare Tiefenwahrnehmung** doch der monokularen überlegen, weil, wie schon (S. 485) gesagt wurde, das Binokularsehen durch den Einfluß der Abbildung auf disparaten Netzhautstellen noch ein besonderes Tiefenmoment hinzufügt. Man kann sich nämlich leicht davon überzeugen, daß auch dann noch, wenn der Einfluß der monokular wirkenden empirischen Faktoren und der Akkommodation ausgeschaltet ist, eine feine Tiefenschätzung möglich ist, vorausgesetzt, daß beide Augen gebraucht werden. Man fixiere durch eine weite Pappröhre binokular eine Glasperle, welche durch einen Kokonfaden vor einer gleichmäßig hellen Fläche aufgehängt

ist; läßt der Untersuchende jetzt eine kleine Kugel etwas vor oder hinter der Perle durchs Gesichtsfeld fallen, so wird mit außerordentlicher Präzision die richtige Angabe gemacht (*HERINGScher Fallversuch*). Diese große *Tiefensehschärfe* schwindet aber alsbald, wenn ein Auge geschlossen wird; man sieht dann die fallende Kugel nicht vor oder hinter, sondern seitwärts von der Perle.

Einfacher läßt sich der günstige Einfluß des Binokularsehens so demonstrieren, daß man erst mit einem, dann mit zwei Augen eine Nadel einzufädeln oder einen Stab durch einen aufgehängten Ring hindurchzustecken versucht.

Die Ursache ist in jedem Fall Abbildung auf disparaten Netzhautstellen. Für den *HERINGSchen* Fallversuch illustriert das die Abb. 213 (S. 484), aus welcher auch zu entnehmen ist, daß der Eindruck größerer

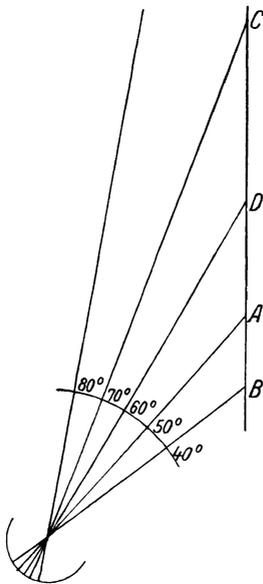


Abb. 219.

Nähe durch gekreuzte Doppelbilder, der Eindruck größerer Ferne durch gleichsinnige Doppelbilder hervorgerufen wird, oder anders ausgedrückt: daß, wenn die Bildpunkte weiter auseinander rücken, als dem normalen Abstand zweier Deckpunkte entspricht, also bei *bitemporaler Disparation* das Urteil nahe, im anderen Fall, bei *binasaler Disparation*, das Urteil fern gefällt wird. Diese Tiefenschätzung ist aber allein an *Querdisparation* gebunden, d. h. die disparaten Punkte liegen zwar auf korrespondierenden Querschnitten der Netzhaut, aber auf disparaten Längsschnitten. Der Tiefeneindruck ist dann um so größer, je größer die Querdisparation. Längsdisparation erzeugt keine Tiefenlokalisierung, sondern nur — wenn sie groß genug ist — höhendistante Doppelbilder. Man überzeugt sich davon leicht, wenn man mehrere Fäden horizontal ausspannt und sie aus etwa 1 m Entfernung betrachtet; man vermag kein Urteil über ihre relative Entfernung abzugeben. Ganz anders, wenn man die Fäden vertikal spannt; befinden sich z. B. drei Fäden in einem gegen-

seitigen Abstand von 3 cm und betrachtet man sie aus einer Entfernung von 2 m, so wird ein Vor- oder Rückwärtsschieben des mittleren um nur 1,5 mm bereits erkannt (*BOURDON*). Das entspricht ungefähr einer Querdisparation von nur 5". Die Tiefensehschärfe übertrifft also die gewöhnliche monokulare Sehschärfe (siehe S. 474).

Der für die Tiefenschätzung so überaus wichtige Faktor der Querdisparation versagt aber rasch, wenn man von kleinen auf große Objektdistanzen übergeht. Dies lehrt in einfacher Weise die Abb. 219: Habe das linke Auge z. B. A fixiert, so muß ein Punkt um die Strecke AB aus der Ebene von A augenwärts rücken, damit er sich auf dem 10° weiter temporalwärts gelegenen Netzhautmeridian des Auges a abbildet. Ist dagegen C fixiert, so muß der näher gelegene Punkt, der wiederum 10° temporalwärts abgebildet werden soll, um die viel größere Strecke CD von C aus entfernt gelegen sein. Für die Leistungen des Binokularapparates liegen die Verhältnisse zahlenmäßig so, daß, während, wie gesagt, bei 2 m Abstand noch ein Tiefenunterschied von 1,5 mm wahr-

genommen wird, der Unterschied bei 20 m schon auf 15 cm, bei 200 m auf 14 m und bei 2000 m auf 862 m steigt. Diese rasche Abnahme der Tiefensehschärfe hängt mit dem relativ geringen Abstand unserer beiden Augen zusammen. Wir werden nachher (S. 490) ein Instrument kennen lernen, welches den Augenabstand scheinbar vergrößert und uns dadurch befähigt, auch noch am Horizont gelegene Objekte, deren Relief für gewöhnlich völlig verflacht ist, körperlich wahrzunehmen.

Die Bedingungen für die Erregung von querdysparaten Netzhautstellen durch einen und denselben leuchtenden Punkt sind nun bei allen dreidimensionalen Objekten erfüllt, und insofern ist das Körperlichsehen von dem binokularen Apparat abhängig. Man betrachte z. B. in Abb. 220 A und B, so sei A die perspektivische Darstellung einer Pyramide, welche mitten vor dem Beschauer liegt, welche ihm ihre abgestumpfte Spitze zukehrt und allein mit dem linken Auge angesehen wird; B stellt dann das Bild dar, welches dieselbe Pyramide dem rechten Auge gewährt. Werden nun die vier Ecken der Pyramidengrundfläche bei binokularer Be-

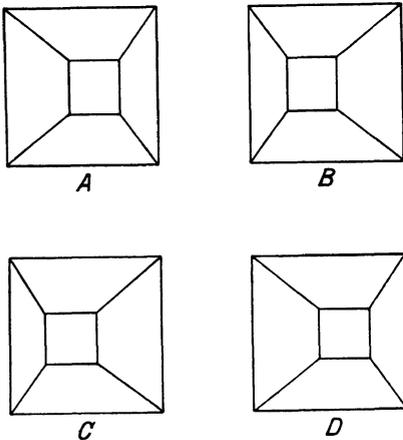


Abb. 220. Perspektivische Darstellungen einer abgestumpften Pyramide.

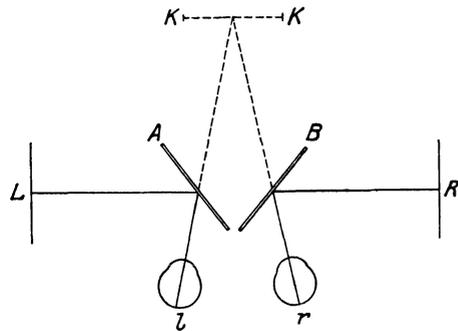


Abb. 221. WHEATSTONESCHES Spiegelstereoskop.

trachtung auf vier Deckpunktpaaren abgebildet, so müssen die vier Ecken der abgestumpften Spitze auf querdysparate Punkte fallen; infolgedessen erscheint der Eindruck der Tiefe. Es ist aber *ein Charakteristikum aller Körper*, daß sie, wenn sie sich nicht in zu großem Abstand vom Auge befinden, *dem rechten Auge ein anderes Aussehen darbieten, als dem linken*; eine Abbildung nur auf korrespondierenden Punkten ist also unmöglich. Die dysparaten Stellen sind dabei querdysparate, weil auch die Netzhäute in der Querrichtung nebeneinander stehen.

Man betrachte auch die Abbildungen C und D; sie stellen eine Hohlpyramide dar, deren Grundfläche dem Beschauer zugekehrt ist, einmal, wie sie dem linken Auge (C) und einmal, wie sie dem rechten Auge (D) erscheinen kann. Die Bilder C und D weichen nur darin von den Bildern A und B ab, daß die abgestumpfte Spitze dem rechten und linken Auge beide Male in entgegengesetzter Richtung perspektivisch verschoben erscheint; die Richtung der Querdysparation ist also entgegengesetzt. Infolgedessen hat auch die Tiefenlokalisation ein verschiedenes Vorzeichen; einmal erscheint die kleine Fläche dem Beschauer zugekehrt (A und B), das andere Mal (C und D) abgekehrt.

Daß das körperliche Sehen wirklich in der Hauptsache auf dieser Abbildung mit Querdissipation beruht, beweist das körperliche Sehen mit dem **Stereoskop**. Dessen Prinzip ist, daß zwei flächenhafte Bilder eines körperlichen Gegenstandes, welche ebensoviel voneinander abweichen, wie die beiden Netzhautbilder, welche der Körper im rechten und im linken Auge erzeugt, den beiden Augen gleichzeitig dargeboten werden.

Die ältere Konstruktion des WHEATSTONEschen *Spiegelstereoskops* (siehe Abb. 221) enthält zwei in einem Winkel zueinander gestellte Planspiegel A und B; diesen gegenüber befinden sich die perspektivischen Bilder eines Körpers, das Bild L für das linke, das Bild R für das rechte Auge. Die Neigung der Spiegel wird so gewählt, daß die Augen des Beschauers die Bilder mit konvergenten Sehachsen, so wie es dem Sehen in die Nähe entspricht, betrachten. Dadurch werden die beiden Bilder im Doppelauge zur Deckung gebracht, und der Beschauer glaubt, hinter den Spiegeln in K K den dargestellten Körper plastisch zu sehen.

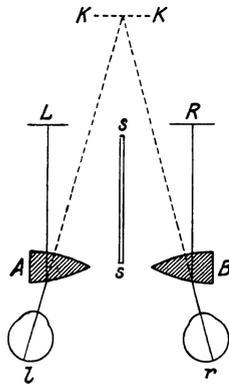


Abb. 222. BREWSTERSches Prismenstereoskop.

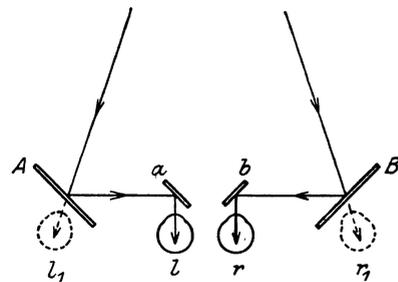


Abb. 223. Telestereoskop.

Das BREWSTERSche *Prismenstereoskop* (siehe Abb. 222) enthält an Stelle der Spiegel zwei Konvexprismen A und B, ihnen gegenüber die perspektivischen Bilder L und R. Die von diesen ausgehenden Strahlen werden durch die Prismen divergent gemacht, die Augen l und r betrachten dementsprechend die Bilder mit konvergenten Sehachsen, sie bringen sie in K K zur Deckung. Der Schirm s verhindert, daß Strahlen vom rechten Bild ins linke Auge gelangen und umgekehrt. Die Konvexität der Prismen ermöglicht es, schon bei einem Akkommodationsgrad, welcher der Konvergenz auf K K entspricht, die näher als K K an dem Auge befindlichen Bilder scharf zu sehen.

Sind nun die Bilder, welche dem Auge im Stereoskop geboten werden, identisch, so kommt natürlich kein körperlicher Eindruck zustande. Sind dagegen einzelne der Punkte ein wenig in Querrichtung gegeneinander verschoben, so springen sie nach vorn oder nach hinten aus der Ebene heraus, und um so mehr, je größer die Verschiebung.

Daher kann man ein Stereoskop auch dazu verwenden, um rasch zu erkennen, ob zwei Zeichnungen in allen Einzelheiten übereinstimmen oder nicht; z. B. bei einer Banknotenfälschung springen die von der echten Note abweichenden Stellen stereoskopisch betrachtet heraus (DOVE).

Die Erhöhung der Tiefenwirkung durch größere Querdissipation wird praktisch ausgenutzt im **Telestereoskop** (HELMHOLTZ), welches es möglich macht,

auch fern am Horizont gelegene Gegenstände, deren Netzhautbilder nur verschwindende Unterschiede aufweisen, plastisch zu sehen. Der HELMHOLTZsche Apparat ist nach Art eines Spiegelstereoskops gebaut (siehe Abb. 223): A, B, a und b sind Spiegel oder total reflektierende Prismen, welche Strahlen, die von fern gelegenen Objekten ausgehen, in die Augen l und r leiten. Diese sehen also die Gegenstände so, als ob sie sich nicht in ihrem normalen Abstand befänden, sondern als ob ihre Pupillendistanz auf den Abstand $l_1 r_1$ vergrößert wäre. Das Relief wird auf diese Weise stark erhöht, und bei Kombination der Spiegel oder Prismen mit Linsen erscheinen die ferneren Gegenstände nah und plastisch. Das gleiche Konstruktionsprinzip liegt dem ZEISS-Feldstecher zugrunde.

Weichen die beiden im Stereoskop dargebotenen Bilder sehr voneinander ab, so stellt sich *Wettstreit der Sehfelder* (siehe S. 485) ein. Dieser ist besonders auffallend, wenn die beiden Bilder sich durch ihre Farbe unterscheiden. Doch kann es dabei durch „binokulare Farbmischung“ auch zu einem einheitlichen Eindruck kommen. Bilder, welche an korrespondierenden Stellen verschiedenen helle Flächen enthalten, sehen im Stereoskop glänzend aus. Dieser sogenannte **stereoskopische Glanz** beruht darauf, daß durch die beiden Stereoskopbilder die gleiche Wirkung hervorgerufen wird, wie sie auch sonst ein glänzender Körper erzeugt. Nämlich das Glänzen entsteht dadurch, daß das Licht an verschiedenen Flächen nach verschiedenen Orten reflektiert wird, so daß ein und dieselbe Fläche den beiden Augen, weil sie verschiedene Lagen im Raum einnehmen, verschieden hell erscheint, und daß im Wettstreit bald der helle, bald der dunkle Eindruck siegt. Der stereoskopische Eindruck zweier Bilder, wie in Abb. 224, ist etwa der eines Kristalls aus glänzendem Graphit.

Die grundsätzliche Gleichheit von stereoskopischem Sehen und dem Sehen von Körpern wird anschaulich auch durch die *Umkehrung des Reliefs* und durch



Abb. 224. Stereoskopischer Glanz.

das sog. *pseudoskopische Sehen* bewiesen. Wenn man Zeichnungen, wie Abb. 220 A und B (Seite 48^l), im Stereoskop in geeignetem Abstand nebeneinander legt, so erhält man den Eindruck einer abgestumpften Pyramide im Hochrelief; vertauscht man die beiden Bilder, so daß sie eine Lage wie in Abb. 220 C und D zueinander einnehmen, so erscheint dieselbe Pyramide im Tiefrelief. Auf katoptrischem Wege erreicht man die Umkehrung der Stereoskopbilder mit dem sog. **Pseudoskop**, dessen Konstruktion die Abb. 225 ohne weiteres klar macht; Vollkörper erscheinen dadurch betrachtet als Hohlkörper, Hohlkörper als Vollkörper. Derartige Versuche zeigen unter Umständen, wie sehr das binokulare Tiefenmotiv den früher angeführten monokularen Tiefenmotiven überlegen ist. Denn in dem Konflikt dieser mit dem Einfluß der Querdisparation werden gelegentlich zwangsmäßig ganz unmögliche optische Situationen vorgetäuscht; man sieht z. B. eine frei auf einem Platz stehende Säule hinter den umgebenden Häusern.

Auch bei Betrachtung *ohne Stereoskop* gelingt es unter Umständen, an Stelle der zwei einzelnen Stereoskopbilder *einen körperlichen Eindruck zu gewinnen*. Man muß zu dem Zweck die Sehachsen entweder möglichst parallel auf die beiden Bilder richten, also sozusagen auf einen Punkt hinter der Ebene der Bilder blicken, oder man muß sie stark konvergieren lassen, wie wenn man einen Punkt vor der Bildebene ins Auge faßte. Im ersten Fall (siehe Abb. 226) sieht man durch Verschmelzung der Stereoskopbilder einen Körper K in größerer Entfernung und daneben die beiden flächenhaften perspektivischen Bilder gekreuzt (Ar und Bl); im zweiten Fall (Abb. 227) scheint der Körper vor der Bildebene in der Luft zu schweben (K), und die flächenhaften Bilder (Al und Br) liegen zu beiden Seiten ungekreuzt. Die Schwierigkeit der Versuche liegt darin, daß man es fertig bringen muß, Akkommodation und Konvergenz bis zu einem gewissen Grad unabhängig voneinander zu betätigen und sich von den Doppelbildern nicht stören zu lassen.

Wenn nach dem Gesagten als die erste und wichtigste Grundlage für die Tiefenwahrnehmung mit dem Doppelauge die Querdisparation der Netzhautbilder angesehen werden muß, so kommt als ein Hilfsmittel doch jedenfalls auch noch der Einfluß der **Konvergenzstellung der Sehachsen** hinzu. Je näher den Augen ein Gegenstand liegt, auf den sich die Aufmerksamkeit richtet, um so stärker müssen die *M. recti mediales* angespannt werden. Daß diese Einstellung für die Lokalisation der Tiefe von Bedeutung ist, dafür lassen sich mannigfache Versuche anführen.

Man setze z. B. vor die Augen Prismen mit nasalwärts gerichteter brechender Kante, dann muß den Augen zur Fixierung eines in bestimmtem Abstand befindlichen Gegenstandes eine stärkere Konvergenz erteilt werden, als ohne die Prismen. Die Folge davon ist *Mikropie*, man sieht den Gegenstand kleiner, weil die Netzhautbilder im Verhältnis zu dem Aufwand von Konvergenz zu klein sind; außerdem sieht man ihn für gewöhnlich genähert. Da die Akkommodation bei diesem Versuch unverändert bleibt, so kann es auf sie bei der Vertaxierung von Größe und Distanz nicht ankommen. In ähnlicher Weise kann man Mikropie durch alleinige Steigerung der Konvergenz auch erzwingen, wenn man im WHEAT-

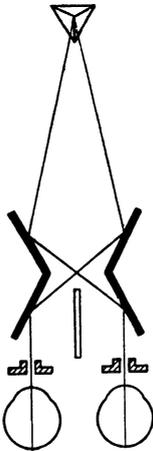


Abb. 225. Pseudoskop nach J. R. EWALD.

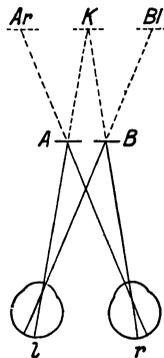


Abb. 226. Stereoskopieren ohne Stereoskop.

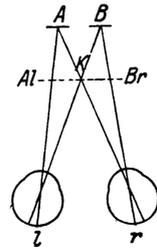


Abb. 227. Stereoskopieren ohne Stereoskop.

STONESCHEN Spiegelstereoskop (siehe S. 489) die beiden Bilder näher gegen die Frontalebene des Beschauers heranrückt, so daß die von den Bildern ausgehenden Strahlen mit kleinerem Einfallswinkel auf die Spiegel fallen. Besonders einfach läßt sich die Bedeutung der Konvergenz mit dem *Tapetenphänomen* von H. MEYER demonstrieren: Blickt man auf eine regelmäßig gefelderte Fläche, z. B. auf eine Tapete, ein Rohrgeflecht, einen Fliesentfußboden oder dergleichen, und läßt dabei die Sehachsen so konvergieren, daß sie sich vor der Fläche schneiden, so kann man es erreichen, daß die Doppelbilder des Musters gerade zur Deckung kommen; alsdann erscheint das Muster sofort kleiner und zugleich näher gerückt.

Es ist bisher nicht klargestellt, in welcher Weise die Änderungen der Konvergenz für die Beurteilung von Größe und Tiefe psychisch verwertet werden. Die nächstliegende Deutung, daß wir ein Gefühl für das Maß der Anspannung der Konvergenzmuskeln besitzen, ist wahrscheinlich unrichtig.

Während die bisherigen Betrachtungen über die räumlichen Gesichtswahrnehmungen vom ruhenden Netzhautbild in seinen Beziehungen zur Außenwelt ausgingen, wollen wir uns nun zum Schluß den *Verschiebungen der Netzhautbilder* und ihrem Einfluß auf die **Wahrnehmung von Bewegungen** zuwenden.

Verschiebungen der Netzhautbilder werden im allgemeinen auf zweierlei Weise erzeugt, erstens durch Bewegung des Objekts bei ruhendem Auge und zweitens durch Bewegung des Auges bei ruhendem Objekt, also allgemein gesagt dadurch, daß das räumliche Verhältnis von Sehdingen und Sehorgan sich ändert. Genau die gleiche Verschiebung des Netzhautbildes kann also ebensowohl auf einer bestimmten Außenbewegung, wie auf einer bestimmten Stellungsänderung der Augen beruhen; beides wird aber von uns sehr wohl unterschieden und in bezug auf den Raum ganz verschieden ausgelegt. Wenn ich den Punkt F fixiere, so daß er sich in der Fovea *f* abbildet (siehe Abb. 228), so liegt das Netzhautbild von A in *a*, und ich sehe A in einer gewissen Höhe über F liegen. Wandert jetzt das Netzhautbild von *a* nach *b*, während das Auge stille steht, so habe ich eine Bewegungsempfindung, ich sehe A nach B sinken. Wende ich dagegen den Blick von F nach B, so ändert sich die Höhe von A gar nicht, obwohl sich auch diesmal wieder der Bogen zwischen der Fovea und dem Netzhautbild von A verkleinert. Die Augenmuskelninnervation kann also die Wirkung der Bildverschiebung kompensieren. Der Netzhautpunkt *a* hat demnach — und dasselbe gilt für alle Netzhautpunkte — *keinen unwandelbaren, sondern einen wechselnden Raumwert, der Raumwert hängt noch mit ab von der Einstellung des Auges.*

Wir wollen diese Verhältnisse nun im einzelnen betrachten und zuerst das Einfachere, die Erzeugung einer *Bewegungswahrnehmung bei ruhendem Auge durch Verschiebung des Netzhautbildes* untersuchen. Es ist leicht festzustellen, daß nicht jede Bildverschiebung wahrgenommen wird, sondern daß sich deren Geschwindigkeit innerhalb einer oberen und einer unteren Grenze halten muß; wir sehen ein vorbeisausendes

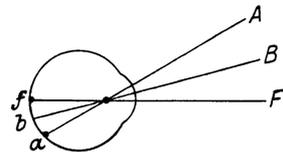


Abb. 228.

Geschoß ebensowenig, wie wir den Stundenzeiger einer Uhr sich bewegen sehen. Die untere Grenze der Perzeption einer rotierenden Bewegung wird nach AUBERT erreicht, wenn die Winkelgeschwindigkeit 1—2' pro Sekunde beträgt, vorausgesetzt, daß daneben noch andere ruhende Objekte im Gesichtsfeld zu sehen sind, mit welchen das bewegte Objekt verglichen werden kann; andernfalls liegt die Schwelle höher. Der Wert von 1—2 Winkelminuten gilt aber nur für das direkte Sehen, das indirekte Sehen erfordert größere Geschwindigkeiten; schon bei 9° Exzentrizität beträgt der Schwellenwert 13—18' und steigt weiter peripherwärts noch mehr.

Von Bedeutung ist, daß die Sehschärfe, also die Unterschiedsempfindlichkeit für örtlich verschiedene Simultanreize (siehe dazu S. 531) nach der Netzhautperipherie hin rascher sinkt, als die uns hier interessierende Sehschärfe für Bewegungen. Die Sehschärfe im gewöhnlichen Sinn messen wir durch die Größe des Schwinkels, welchen die von zwei eben unterschiedenen Lichtpunkten ausgehenden Strahlen miteinander einschließen (siehe S. 474); wenn wir ebenso die *Sehschärfe für Bewegungen* durch den Schwinkel ausdrücken, welchen ein mit übermerklicher Geschwindigkeit bewegter leuchtender Punkt beschreiben muß, damit seine Bewegung erkannt wird, so findet man, daß beide Sehschärfen beim direkten Sehen ungefähr gleich groß sind; 20° außerhalb der Fovea findet man dagegen 270' als Schwellenwert für die gewöhnliche Sehschärfe, aber nur 75' für die Bewegungsehschärfe (EXNER). Die letztere ist also peripher relativ viermal so groß als die erstere. Dies ist die Ursache für die häufig zu beobachtende und biologisch sehr wichtige Erscheinung, daß ein ruhendes, nur indirekt gesehenes Objekt oft unbeachtet bleibt, während es mit Leichtigkeit die Aufmerksamkeit auf sich zieht, sobald es sich bewegt.

Verschiebt sich ein Objekt gegen ein zweites, so unterliegen wir unter Umständen der merkwürdigen Täuschung, daß *das bewegte Objekt für ruhend, das ruhende für bewegt angesehen wird*. Steht man z. B. auf einer Brücke und sieht auf den unter ihr fließenden Fluß hinab, so scheint sich plötzlich die Brücke stromaufwärts zu bewegen, während das Wasser selbst in Ruhe verharrt. Oder sitzt man in der Eisenbahn und beobachtet durch das Fenster einen auf einem anderen Geleise stehenden Zug, welcher sich mit einem Mal in Bewegung setzt, so scheint der eigene Zug abzufahren, während der benachbarte anscheinend stehen bleibt. MACH erzählt von seinem Kind, das beim Betrachten der dicht fallenden Schneeflocken vom Fenster aus meinte, das ganze Haus steige in die Höhe. In diesen und ähnlichen Fällen kann man meist verallgemeinernd sagen, daß *bei relativen Bewegungen gewöhnlich das kleinere Objekt als bewegt angenommen wird*.

Eine *Bewegungswahrnehmung* kommt ferner zustande, wenn das *Netzhautbild zwar ruht, aber das Auge sich bewegt*. Dies ist dann der Fall, wenn ein bewegter Gegenstand die Aufmerksamkeit auf sich zieht und das Auge reizt, ihm mit dem Blick zu folgen. Alsdann ersetzt die Augenbewegung vom psychischen Standpunkt aus, d. h. bei der räumlichen Wertung, die Bildverschiebung auf der Netzhaut; die Drehung der dauernd auf den Fixierpunkt gerichteten Blicklinie um einen bestimmten Winkel nach links bedeutet dieselbe Bewegungswahrnehmung, wie die Verschiebung des Netzhautbildes im ruhenden Auge um den gleichen Winkel nach rechts. Wenn dagegen die Blicklinie von einem Punkt der ruhenden Außenwelt auf einen anderen, etwas weiter links gelegenen gewendet wird, dann wandert zu gleicher Zeit auch das Netzhautbild um denselben Winkel nach links; die räumlichen Wertungen der Augenbewegung und der Bildverschiebung heben alsdann einander auf, die Außenwelt wird als ruhend aufgefaßt (siehe S. 493).

Die Bewegungswahrnehmungen hängen also von bestimmten konstanten Beziehungen zwischen den Verschiebungen der Netzhautbilder und den durch die optischen Eindrücke ausgelösten Augenbewegungen ab. Dies offenbart sich besonders deutlich, wenn irgendwie diese Beziehungen gelöst werden und dadurch Bewegungstäuschungen zustande kommen. wie etwa folgende Beispiele lehren:

1. Übt man einen seitlichen Druck auf ein Auge aus, so wird durch die Verschiebung der Netzhaut sofort die Vorstellung einer der Druckrichtung entgegengesetzten Bewegung der Außendinge hervorgerufen.

2. Unwillkürliche, nicht durch die Sehdinge ausgelöste Augenbewegungen und damit Netzhautverschiebungen erzeugen ebenfalls Scheinbewegung, so wenn reflektorisch oder durch intrazentrale Reizung ein Nystagmus auftritt. Hierher gehört wohl auch das sogenannte „Sternschwanken“, d. h. das Sehen kleiner Ausschläge, in welchen die Fixsterne bei längerer Betrachtung infolge von unwillkürlichen Bewegungen des Auges hin und her zu tanzen scheinen, ähnlich wie die Teilchen bei der Brownschen Molekularbewegung.

3. Wenn ein Muskel, z. B. der *M. rectus lateralis* des rechten Auges plötzlich gelähmt wird, so scheint sich, wenn der Patient das linke Auge zuhält, das Gesichtsfeld nach rechts zu drehen, der Patient leidet an starkem „*Gesichtsschwindel*“. Die Ursache ist folgende: Sobald der Patient den Blick nach rechts wendet, fällt die Verschiebung des Netzhautbildes kleiner aus, als sie nach der Größe des Impulses, welcher dem

N. abducens erteilt wird, ausfallen sollte; der Patient hat daher denselben Eindruck, als wenn sich beim Rechtsblicken gleichzeitig die Gegenstände im Gesichtsfeld nach rechts verschieben. Wird der Patient aufgefordert, rasch nach einem Punkt zu greifen, den er allein mit dem gelähmten Auge fixiert, so lokalisiert er zu weit nach rechts und greift infolgedessen an dem Punkt vorbei, ungefähr an eine Stelle, die er mit dem verdeckten linken Auge fixieren würde (v. GRAEFE). Ähnlich kommt folgende Täuschung zustande: man richte den Blick auf einen am äußersten Rand des rechten Gesichtsfeldes liegenden Punkt und suche ihn dauernd zu fixieren, so wird der Punkt bald anfangen scheinbar nach rechts auszuweichen, weil die angespannten Muskeln anfangen zu ermüden, so daß die Wendung der Augen nicht mehr völlig dem Innervationsaufwand entspricht.

4. Erzeugt man auf der Netzhaut ein Nachbild, so wandert dieses mit jeder Änderung der Blickrichtung, weil eine Bewegungswahrnehmung immer dann zustandekommt, wenn trotz Augenbewegung das Netzhautbild an seinem Ort bleibt. Aus dem gleichen Grunde erscheinen Glaskörpertrübungen als „fliegende Mücken“ (siehe S. 445), welche sich mit dem Blick bewegen. Dagegen bleibt ein Nachbild bei lebhaftem Nystagmus vollkommen ruhig stehen, weil die nystagmischen Bewegungen unwillkürlich zustandekommen.

In welchem Zusammenhang die Bewegungen der Augen mit der Wahrnehmung der Bewegungen stehen, darüber sind die Ansichten geteilt; die zuletzt erwähnten Beobachtungen legen die Annahme einer Empfindung der Innervationsstärke nahe. —

Schließen wir hiermit die Erörterungen über die räumlichen Gesichtswahrnehmungen, so läßt sich aus der gesamten Darstellung erkennen, daß unsere Auffassung von der Existenz eines dreidimensionalen Raums mit den Einrichtungen unseres Sehorgans innig zusammenhängt. Das Auge ist freilich nicht das einzige Raumsinnesorgan. Das lehrt schon die Orientiertheit der Blinden. Neben den Augen kommen vor allem die Haut und das Labyrinth für die Erfassung des Räumlichen in Betracht. Auch daß der Begriff des dreidimensionalen Raums durch die Komposition zahlreicher Elemente zustande kommt, lehren die hier gegebenen immerhin knappen Hinweise auf das Zustandekommen der Raumwahrnehmung. Eine ausführlichere Darstellung würde zeigen, daß das Raumproblem eine der interessantesten, aber auch der schwierigsten Aufgaben der Sinnesphysiologie und der Psychologie ist, deren Bewältigung seit Jahrzehnten angestrebt wird und die Forscher in zwei große Lager geteilt hat, das der Nativisten und das der Empiristen; die *Nativisten* vertreten den Standpunkt, daß den Sinnesindrücken unmittelbar Raumwerte anhaften, daß also von Geburt an und vor aller Erfahrung die Sehdinge flächenhaft geordnet oder als den Raum erfüllend aufgefaßt werden. Die *Empiristen* lehren demgegenüber, daß ursprünglich nur die Empfindungsqualitäten existieren, daß erst auf Grund vielfältiger Sinnesindrücke unter der Mitwirkung von Erinnerungen und unbewußten Schlüssen die Raumauffassung sich bilde, daß der Raum also ein Produkt der Erfahrung sei. Wir haben in diesem Abschnitt gesehen, daß wenigstens in der Tiefenwahrnehmung unzweifelhaft empirische Faktoren enthalten sind. Im übrigen kann jedoch hier das Für und Wider der beiden Standpunkte unmöglich genügend abgewogen werden.

31. Kapitel.

Der Gehörsinn.

Klänge, Geräusche und Töne 496. Die Ohrmuschel; Perzeption der Schallrichtung 499. Die Knochenleitung des Schalls 500. Das Trommelfell 500. Die Gehörknöchelchen 501. Die Binnenmuskeln des Ohrs 501. Die Tuba Eustachii 502. Das innere Ohr 503. Die Resonatorentheorie von HELMHOLTZ 504. Die Schallbildertheorie von EWALD 509.

Ähnlich wie das Auge, so vermittelt uns auch das Ohr eine große Zahl verschiedener Empfindungen, *Schallempfindungen* oder *Gehörsempfindungen*, deren Ursache wir an bestimmte Orte in dem uns umgebenden Raum lokalisieren; so bezeichnen wir Tiere und Menschen, Instrumente und mancherlei Phänomene der anorganischen Natur als *Schallquellen*. Während nun die Gesichtseindrücke, sobald wir die an ihnen haftenden Raumkomponenten ignorieren, den Charakter einer einfachsten psychischen Erscheinung besitzen, die durch noch so aufmerksame Beobachtung nicht in etwas noch Einfacheres zerlegt werden kann, liegen die Verhältnisse bei den Gehörseindrücken meistens anders. Ein Weiß von bestimmter Leuchtkraft, von dessen Form und von dessen Abstand und Richtung im Verhältnis zu meinem Körper ich absehe, läßt sich in keiner Weise als etwas Komplexes auffassen; dagegen sind die meisten Schalle in eine Summe von einfachen Empfindungen aufzulösen.

Die Schalle sind nach HELMHOLTZ in zwei große Gruppen einzuteilen, in die **Klänge** und in die **Geräusche**, deren Grenzen allerdings verwischt sind. Beispiele für Klänge sind die Gehörseindrücke, welche von den meisten musikalischen Instrumenten produziert werden; Geräusche sind dagegen das Rasseln eines Wagens, das Aufklatschen der Regentropfen, der Knall einer Pistole. Vornehmlich bei den Klängen gelingt durch aufmerksames Lauschen die analytische Zerlegung in mehrere einfache akustische Bestandteile, in **Töne**; aus dem Klang der Kirchenglocken hört man sie von tiefen Brummtönen bis zu höchsten singenden Tönen mit Leichtigkeit heraus; beim „Ton“ eines Klaviers, der in Wirklichkeit ebenfalls ein Klang ist, fällt die Zerlegung dagegen schwerer. Fast alle musikalischen Instrumente liefern Klänge und nicht Einzeltöne, und unter den *Teiltönen* oder *Partialtönen* des Klangs unterscheidet man den *Grundton*, welcher gewöhnlich prävaliert, von den *Obertönen*, welche gewöhnlich mehr zurücktreten. Ein Instrument, das einen einfachen Ton erzeugt, ist eine Stimmgabel einige Zeit nach dem Anschlagen, wenn sie allmählich ausklingt.

Während die Klänge längere Zeit in gleichmäßiger Stärke fortbestehen können, sind die Geräusche im allgemeinen durch Unbeständigkeit, durch kurze Dauer oder durch Diskontinuität, und durch Wechsel in der Stärke des Schalleindrucks gekennzeichnet. Der akustische Bestandteil des Geräusches hat dabei öfter deutlich Klang- oder Toncharakter. Man denke an das Sausen des Windes, das Kreischen der Säge, an Klirr- und Zischgeräusche, in denen hohe Töne darinstecken im Verhältnis zu brummenden, gurgelnden und rollenden Geräuschen, die durch tiefe Töne ausgezeichnet sind. Ein Geräusch entsteht auch, wenn man eine größere Zahl nebeneinander gelegener Klaviertasten zugleich niederdrückt; danach gehört auch zu dem Charakter des Geräusches, daß die Teiltöne, welche in ihm enthalten sind, nicht miteinander harmonisieren, während sie im Klang gewöhnlich in ganz bestimmten und zwar harmonischen Abstufungen vorkommen. So ergibt sich also, daß der Gehörsinn letzten Endes *Tonempfindungen* vermittelt.

Diese sind nun außer durch die Dauer und die Stärke auch durch ihre *Höhe* unterschieden. Ähnlich wie wir die Lichter leicht in eine uns natürlich erscheinende Ordnung bringen, wenn wir die einzelnen

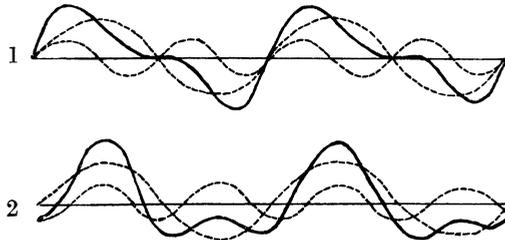


Abb. 229. Zwei Klangkurven des gleichen Klanges.
Die Klänge 1 und 2 bestehen aus denselben Partialtönen, aber die letzteren sind in 1 phasengleich, in 2 phasendifferent.

Farben so wie im Spektrum nebeneinander stellen, oder besser — d. h. unter Berücksichtigung der purpurnen Lichter — wenn wir sie zum Farbenkreis ordnen (siehe S. 455), so ordnen wir die Töne in eine *Tonskala*, welche etwa mit dem tiefsten beginnend einsinnig verläuft und mit den höchsten Tönen endet.

Was entspricht nun diesen psycho-akustischen Elementarbestandteilen, den Tönen, und was den Komplexen der Klänge und Geräusche im Gebiet des Physikalischen? Bekanntlich entstehen *Töne*, wenn die Luft periodisch erschüttert wird, indem irgendwelche vibrierende Körper durch Stoß die Luft abwechselnd verdichten und verdünnen; *die dabei auftretenden Longitudinalwellen der Luft haben die Form einer Sinuskurve. Der Tonhöhe entspricht die Schwingungsfrequenz, der Tonstärke die Schwingungsamplitude.*

Zwei Schwingungen von gleicher Amplitude, aber verschiedener Frequenz werden jedoch nicht gleich stark gehört, sondern der höhere ist im allgemeinen auch der lautere; ein Sopran übertönt z. B. unter Umständen das ganze Orchester. Der physikalische Grund ist der, daß die lebendige Kraft der Schwingungen nicht proportional der Amplitude a wächst, sondern proportional $(an)^2$, wenn n die Schwingungszahl bedeutet.

Ein *Klang* entsteht, wenn die Luft in komplizierterer Weise periodisch erschüttert wird. So wie der Klang für das Ohr eine Summe von Partialtönen ist, so ist *die Klangkurve die Resultante einer Summe von*

Tonkurven. Wie durch das Ohr, so läßt sich ein Klang auch auf rein mathematischem Wege in seine Teiltöne zerlegen, indem man durch Analyse nach FOURIER die Klangkurve auf einzelne übereinander gelagerte Sinuskurven zurückführt. In der Abb. 229, 1 und 2 stellen die beiden gestrichelten Kurven zwei Töne dar, deren Schwingungen sich wie 1:2, wie Grundton und Oktave zueinander verhalten. Addiert oder subtrahiert man die zusammengehörigen positiven und negativen Ordinatenwerte, so findet man die Punkte der aus der Superposition der Sinusschwingungen resultierenden Klangkurve, welche in der Abbildung ausgezogen gezeichnet ist. Jede beliebige Klangkurve läßt sich als die Resultante einer größeren oder geringeren Zahl von Sinusschwingungen darstellen. Zum Beweis dessen konstruiere man irgend eine Klangkurve, schneide sie in Blech aus und ziehe sie hinter einem schmalen Spalt entlang, durch welchen Luft hindurchgeblasen wird; die Luft wird alsdann in einer der Kurvenform entsprechenden Weise erschüttert, und man wird die einzelnen Partialtöne, aus welchen der Klang zusammengesetzt worden ist, heraushören. Auch bei Klängen kann man von einer Höhe sprechen; zwei Klänge erscheinen gleich hoch, wenn ihr Grundton gleiche Höhe hat. Sie klingen dann aber (abgesehen von Stärkeunterschieden) trotzdem nicht gleich, wenn ihre Obertöne verschieden sind. Diese bestimmen die *Klangfarbe* oder das *Timbre*.

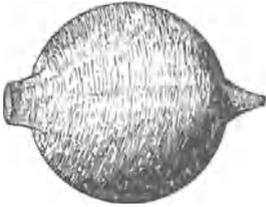


Abb. 230. Resonator
nach HELMHOLTZ.

Gibt man z. B. den „Ton“ a auf dem Klavier und auf der Geige an, so erklingt jedes Instrument in charakteristisch verschiedener Weise.

Ein dritter Weg (neben dem der Selbstbeobachtung und dem der Berechnung), um einen Klang zu analysieren, ist die Zerlegung auf experimentell - physikalischem Wege mit Hilfe von *Resonatoren*.

Als solche dienen zweckmäßig Hohlkörper von mannigfacher Gestalt, meist in Trichter- oder Kugelform verschiedener Größe und mit zwei Öffnungen versehen, an deren eine das Ohr gebracht wird (Abb. 230). Ertönt ein Klang, so gerät unter Umständen die Luft im Resonator in Mitschwingung, nämlich dann, wenn sein sog. *Eigentön* erregt wird; denn jede mehr oder weniger abgeschlossene Luftmasse hat die Fähigkeit, am stärksten in einer bestimmten Frequenz zu schwingen. Hat man also einen ganzen Satz verschiedener Resonatoren und ertönt ein Klang, so kann man die Partialtöne des Klanges herausfinden, indem man einen Resonator nach dem anderen ans Ohr hält und achtgibt, mit welchen derselben man Töne heraushören kann, mit welchen nicht. Auch die Saiten eines Klaviers sind Resonatoren; singt man z. B. in ein Klavier bei aufgehobener Dämpfung hinein, so hört man den Klang der Stimme wieder herauskommen, weil alle diejenigen Saiten, welche mit irgendwelchen Partialtönen des Stimmklanges in Resonanz stehen, in Mitschwingung geraten und deshalb tönen.

Die Tatsache, daß man mit Hilfe von Resonatoren auf physikalischem Wege einen Klang analysieren kann, hat HELMHOLTZ (1877) auf den Gedanken gebracht, daß sich auch im Innern des Ohrs ein Resonatorensatz befindet, welcher uns dazu befähigt, die Partialtöne eines Klanges herauszuhören.

Der Wahrnehmung von *Geräuschen* entsprechen unregelmäßige, nicht periodische Erschütterungen der Luft. Entsprechend der Feststellung, daß auch in den Geräuschen Klänge oder Töne darinstecken, kann der Lufterschütterung wohl eine vorübergehende oder wenig hervortretende Periodizität anhaften, das Gesetzlose ist aber das Dominierende.

Verkürzt man einen Ton mehr und mehr, so daß schließlich nur noch zwei Schwingungen und weniger ans Ohr gelangen, so wird die Tonempfindung unbestimmt, eine halbe Schwingung erzeugt nur mehr den Eindruck eines kurzen explosiven Geräusches (ABRAHAM und SCHAEFER).

Wenden wir uns nach dieser Gegenüberstellung der akustischen Empfindungen und der physikalisch-akustischen Reize der **Physiologie des Hörens** zu, indem wir, ähnlich wie bei der Erörterung der physiologischen Optik, die Frage aufwerfen: in welcher Weise vermittelt das Sinnesorgan zwischen dem Physischen und dem Psychischen? Das für die Schallschwingungen empfindliche Sinnesepithel liegt tief im Innern des Kopfes verborgen; dorthin werden erst indirekt die Schwingungen durch einen kompliziert gebauten physikalischen Apparat übertragen, welcher dem der Netzhaut vorgeschalteten dioptrischen Apparat des Auges an die Seite gestellt werden kann.

Die Schallwellen werden zunächst von dem äußeren Ohr aufgefangen. Die **Ohrmuschel** ist eine Art Schalltrichter; sie ist aber zum Hören nicht notwendig, wie etwa die Tatsache beweist, daß gut hörende Tiere, wie die Vögel oder die Frösche, sie entbehren. Beim Menschen ist sie ein reduziertes Organ; die Muskeln, welche zu ihrer Bewegung vorhanden sind, sind rudimentär und meistens völlig funktionsuntüchtig, während vergleichsweise die Ohrmuschel des Pferdes von 17 Muskeln bewegt und jeweils reflektorisch in die Richtung des Schalls eingestellt wird. Die Stellung der Ohrmuscheln bedingt es, daß leicht unterschieden werden kann, ob ein Schall von vorn oder von hinten kommt; bindet man die Ohrmuscheln am Kopf fest oder steckt man in den äußeren Gehörgang nach außen ragende Röhren, so geht dies Unterscheidungsvermögen verloren. Hält man die Hand seitwärts vor die Ohrmuscheln, so wird ein von vorn kommender Schall nach hinten lokalisiert. Ob ein Schall von rechts oder von links kommt, kann man daran bemerken, daß je nachdem das rechte oder das linke Ohr stärker erregt wird.

Aber auch die Richtung, in der eine Schallquelle seitlich gelegen ist, wird ziemlich genau perzipiert, und diese Fähigkeit hat mit der Ohrmuschel nur sehr wenig zu tun, sondern beruht auf der *Eigentümlichkeit des Ohrs, kleine Zeitdifferenzen räumlich auszudeuten*. Liegt eine Schallquelle rein seitlich, rechts oder links, so werden die beiden Ohren, wenn es sich um einen Knall handelt, mit einer Zeitdifferenz gleich Ohrabstand: Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalls = ca. $6 \cdot 10^{-4}$ " getroffen. Liegt die Schallquelle schräg, so ist die Zeitdifferenz kleiner als $6 \cdot 10^{-4}$ ", und daß deren Perzeption die Schräglokalisierung auslöst, wird dadurch bewiesen, daß, wenn man von einer in der Medianebene gelegenen Schallquelle aus beiden Ohren durch verschieden lange, seitlich in sie hineingesteckte Rohre den Schall mit einer Zeitdifferenz zuleitet, deren Wert geringer ist als $6 \cdot 10^{-4}$ ", der Schall in der Tat aus schräger Richtung zu kommen scheint. Läßt man dagegen die Zeitdifferenz von $6 \cdot 10^{-4}$ " auf etwa $12 \cdot 10^{-4}$ " anwachsen, dann hört man statt eines Schalles zwei; es ist also ein „Schalldoppelbild“ entstanden. Diese Verhältnisse erinnern an die Raumerfassung seitens des Auges (S. 488); bleibt die Querdisparation der Abbildungen auf den beiden Netzhäuten unterhalb einer gewissen Grenze, so weckt die zwifache Erregung ein Urteil über die Tiefendimension des Sehobjektes; wird die Grenze der Querdisparation überschritten, dann entstehen Doppelbilder. — Der Schwellenwert der Richtungs-

lokalisation ist von der Medianebene aus gerechnet gleich 3° , entsprechend einer Zeitdifferenz von $3 \cdot 10^{-5}$ "; ob der Schall dann von vorn oder von hinten kommt, darüber entscheidet man wohl mit Hilfe der Ohrmuschel. Ist der Schallreiz nicht knallartig, sondern stationär, so tritt an die Stelle der räumlichen Ausdeutung einer Zeitdifferenz wohl die einer Phasendifferenz der Schwingungen (v. HORNBOSTEL, HECHT).

Die Ohrmuschel leitet den Schall wie in ein Sprachrohr in den äußeren Gehörgang und damit zum Trommelfell und zum inneren Ohr. Aber die Schallwellen der Luft können auch direkt durch die Schädelknochen dem Endorgan zugeführt werden. Die Möglichkeit der **Knochenleitung** läßt sich sehr leicht nachweisen; verstopft man die äußeren Gehörgänge und setzt den Fuß einer schwingenden Stimmgabel auf den Schädel oder auf die Zähne, so hört man den Stimmgabelton sehr deutlich. Normalerweise ist aber die Luftleitung der Knochenleitung überlegen; denn wenn man die auf den Knochen aufgesetzte Stimmgabel abklingen läßt, bis man sie nicht mehr hört, und hält sie nun vors Ohr, so ertönt sie von neuem (*RINNEscher Versuch*). Setzt man die Stimmgabel auf die Mitte des Scheitels, so hört man ihren Ton scheinbar im Kopf oder in beiden Ohren. Ist die Hörfähigkeit des einen Ohrs etwa durch Erkrankung des Hörnerven auf einer Seite, z. B. auf der rechten, herabgesetzt, so hört man den Schall nach links verlagert. Gerade umgekehrt, wenn auf der rechten Seite ein Hindernis in der Schallleitung besteht, wenn man z. B. den rechten äußeren Gehörgang mit dem Finger verstopft, oder wenn rechts eine Mittelohreiterung besteht; dann wird der Schall der Stimmgabel nach rechts verlagert (*WEBERscher Versuch*). Dies beruht darauf, daß normalerweise die durch die Schädelknochen zugeleiteten Schwingungen zum Teil über die Trommelfelle durch die äußeren Gehörgänge nach außen abfließen, und daß diese Ableitung nun einseitig aufgehoben wird.

Das **Trommelfell** (siehe Abb. 231 und 233) hat die Form eines schräg gestellten sehr flachen Trichters; seine Mitte, der Nabel, ist durch das dort eingewachsene Ende des langen Hammerfortsatzes nach der Paukenhöhle zu einwärts gezogen. Wie andere Membranen, so wird man auch das Trommelfell als einen Resonator auffassen; es sollte dementsprechend nur bei einer ganz bestimmten Schwingungsfrequenz in Mitschwingung geraten. In der Tat hören die meisten Menschen auch einige hohe Töne in der viergestrichenen Oktave überlaut, was auf einem Eigentone des Trommelfells beruhen dürfte (*HELMHOLTZ*). Im übrigen bedingt es aber wohl der ziemlich unregelmäßige Bau und die ungleichmäßige Spannung der Trichtermembran, daß sie auf alle möglichen Schwingungen anspricht, daß das Trommelfell also sozusagen zahlreiche Eigentöne hat. Tatsächlich können wir ja einige tausend Töne voneinander unterscheiden. Hinzu kommt die Belastung mit dem Gehörknöchelchensystem, welche die Abstimmung des Trommelfells auf einen bestimmten Eigentone unwirksam macht, indem sie die Schwingungen dämpft. Letzteres ist auch für das Hören rasch aufeinander folgender Töne von großem Vorteil; denn ohne Dämpfung würden die Töne einer Tonskala ineinander verschwimmen.

Die **Gehörknöchelchen**, *Hammer*, *Amboß* und *Steigbügel* (siehe Abb. 231) bilden einen kompliziert gestalteten Steg zur Übertragung der Trommelfellschwingungen auf das Labyrinth. Sie schwingen als Ganzes um eine Achse, welche auf der Abbildung angedeutet ist; sie ist

von vorn nach hinten gerichtet und wird von dem nach vorn gerichteten kurzen Hammerfortsatz einerseits, von dem nach hinten gerichteten kurzen Amboßfortsatz andererseits gebildet. Die Gehörknöchelchen stellen also eine Art Winkelhebel dar (siehe Abb. 233). Wird durch eine anlangende Luftverdichtung das Trommelfell einwärts gedrückt, so daß auch der lange Hammerfortsatz nach einwärts mitgenommen wird, so muß auch der lange Amboßfortsatz und damit die Platte des Steigbügels sich einwärts bewegen. Da aber der lange Hammerfortsatz etwa $1\frac{1}{2}$ mal so lang ist, als der lange Amboßfortsatz, so wird durch die Gehörknöchelchen die Schwingungsamplitude, welche im Trommelfell vorhanden ist, entsprechend reduziert; dafür werden die Schwingungen

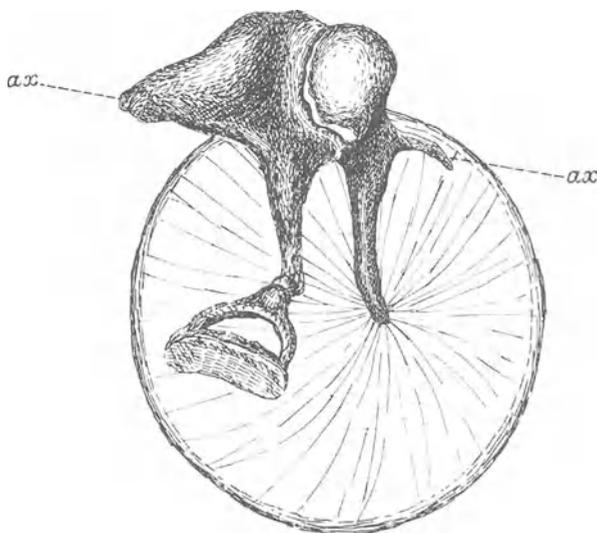


Abb. 231. Hammer, Amboß und Steigbügel der linken Seite mit dem Trommelfell, von medial.

ax, ax Drehachse der Gehörknöchelchen.

der Steigbügelplatte aber um so kräftiger gemacht (HELMHOLTZ). Das ist von Vorteil, da zur Erregung von Schwingungen im Labyrinthwasser zwar nur kleine Exkursionen, aber relativ große Drucke notwendig sind. Die Amplitude der Steigbügelplatte beträgt etwa 0,07 mm (POLITZER).

An dem Gehörknöchelchenapparat greifen die zwei **Binnenmuskeln des Ohrs** an, der *M. tensor tympani* und der *M. stapedius*. Der *M. tensor tympani* (siehe Abb. 232) entspringt am Dach der knorpeligen Tuba Eustachii und verläuft in einer knöchernen Rinne in Richtung zur Paukenhöhle aufwärts; seine Sehne biegt am vorderen Rand dieser Rinne rechtwinklig um und heftet sich von oben her an der Basis des langen Hammerfortsatzes an. Der *M. stapedius* füllt die Höhle der *Eminentia pyramidalis*, seine daraus herausragende Sehne inseriert von hinten her an dem Hals des Steigbügels.

Die Abbildung läßt erkennen, daß der *M. tensor tympani* zweifellos, entsprechend seinem Namen, das Trommelfell spannen kann. Der *M. sta-*

pedius wirkt vielleicht antagonistisch (siehe Seite 371). Beide Muskel sind als *Schutzapparat für das innere Ohr* aufzufassen. Auf starke Schallreize hin kontrahieren sie sich beide zu gleicher Zeit reflektorisch, zuckend bei kurzem Schall, tetanisch bei langem (HENSEN, KREIDL und KATO). Dadurch dämpfen sie die Schwingungen der Gehörknöchelchen. Schaltet man die beiden Muskeln aus, so wird das Labyrinth durch überlaute Töne leichter geschädigt als sonst. Subjektiv macht sich ihre Bedeutung als Regulatoren der Schwingungsamplitude in der Hyperakusis geltend, die bei Fazialislähmung infolge des Ausfalls des M. stapedius beobachtet wird (s. S. 371). Die Schallhöhle hat keinen Einfluß; die Muskeln können deshalb wohl auch nicht, wie man öfter behauptet hat, die Bedeutung von Akkommodationsmuskeln haben.

Zum sogenannten Mittelohr gehört außer dem Trommelfell und den Gehörknöchelchen auch die **Tuba Eustachii**. Sie stellt eine Kommunikation zwischen Paukenhöhle und Rachenraum dar, welche durch Aneinanderlegen der Schleimhautflächen für

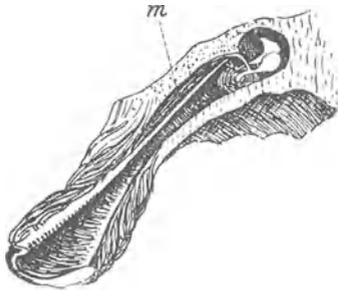


Abb. 232. Die *Tuba Eustachii* eröffnet.

m der M. tensor tympani, oberhalb des Isthmus tubae entspringend, dessen Sehne am Griff des Hammers inseriert
(nach URBANTSCHITSCH).

gewöhnlich verschlossen ist, aber bei jeder Schluckbewegung durch Kontraktion des M. petrostaphylinus sich öffnet (POLITZER). Dies ist von Wichtigkeit; denn wenn die Tube etwa bei einem Katarrh durch Schwellung der Tubenwände dauernd geschlossen ist, so staut sich erstens das Sekret der Paukenhöhlenschleimhaut, und zweitens wird die eingeschlossene Luft allmählich resorbiert; dadurch entsteht ein luftverdünnter Raum, das Trommelfell wird einwärts gesogen, schmerzhaft gespannt und unempfindlich für Schallschwingungen, und es kommt zu unangenehmem Ohrensausen. Wäre umgekehrt die Tube dauernd offen, so würden Schallwellen,

welche durch den äußeren Gehörgang und zugleich durch den Mund ins Ohr eindringen, zur Interferenz kommen und sich stören; ferner würde die eigene Stimme unangenehm dröhnen (*Autophonie*), wie man beim Gähnen bemerken kann, wenn man zu gleicher Zeit spricht, da dabei ähnlich wie beim Schlucken die Tube geöffnet wird.

Mit jedem Schluck wird also der Luft in der Paukenhöhle Gelegenheit gegeben, sich mit der Rachenluft ins Gleichgewicht zu setzen. Das hat unter Umständen eine große praktische Bedeutung. Wenn man z. B. mit dem Luftballon rasch in die Höhe steigt, so bekommt man durch Ausbuchtung des Trommelfells infolge des Drucküberschusses in der Paukenhöhle heftige Ohrenscherzen, wenn man nicht durch fortwährendes Schlucken die Druckdifferenz beseitigt. Entsprechend haben sich manche geübte Flieger gewöhnt, bei Ausführung eines Sturzfluges ununterbrochen rasch hintereinander zu schlucken, um die störende Einbuchtung ihres Trommelfells zu verhindern. In ähnlicher Lage befinden sich die Caissonarbeiter beim Ein- und Ausschleusen (siehe S. 91).

Kehren wir nun zu der Übertragung der Schwingungen auf das **innere Ohr** zurück (siehe dazu Abb. 233)! Da die Steigbügelplatte mit

der *Membran des ovalen Fensters* (f. o.) fest verwachsen ist, so muß diese mit der Steigbügelplatte in gleicher Phase schwingen. Hinter der Membran des ovalen Fensters befindet sich das Labyrinthwasser. Da dasselbe praktisch inkompressibel ist, so können die Schwingungen der Membran nur zustandekommen, wenn das Wasser irgendwohin ausweichen kann; das ist aber durch einen zweiten membranösen Verschuß des Labyrinths möglich, durch die *Membran des runden Fensters* (f. r.), welche sich jedesmal in Richtung der Paukenhöhle vorbuchtet, wenn die Membran des ovalen Fensters sich einbuchtet, und umgekehrt. So kann also das Labyrinthwasser in toto durch die Schallschwingungen erschüttert werden.

Das *Labyrinth* besteht nun bekanntlich, wie schon der Name ausdrücken soll, aus einem sehr komplizierten System kommunizierender

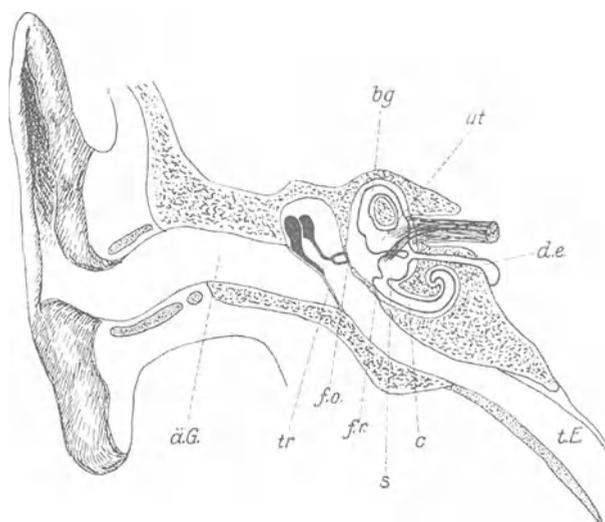


Abb. 233. Schema des Gehörorgans (nach NAGEL).
 ä.G. äußerer Gehörgang, tr Trommelfell, f.o. ovales Fenster, f.r. rundes Fenster,
 s sacculus, ut utriculus, c cochlea, d.e. ductus endolymphaticus, bg. Bogengang,
 t.E. tuba Eustachii.

Räume. In der harten Substanz des Felsenbeins ist eine Höhlung ausgespart, welche mit Flüssigkeit, der sogenannten *Perilymphe*, gefüllt ist. In dieser hängt an der knöchernen Wandung ein Sack von der Form der Abb. 234, dessen Wände im allgemeinen den knöchernen Wandungen parallel laufen und von ihnen durch eine schmale Schicht Perilymphe getrennt sind; der Sack selbst ist ebenfalls mit Flüssigkeit, *Endolympe*, gefüllt. Die wichtigsten Abschnitte des Sackes sind der *Sacculus* (s. in Abb. 233), der *Utriculus* (ut), die *Schnecke* (c) und die *Bogengänge* oder *halbzirkelförmigen Kanäle* (bg).

Wird nun die Perilymphe vom ovalen Fenster her erschüttert, so müssen sich die Schwingungen auch den zarten Wänden des häutigen Labyrinths mitteilen, und da in diesem die Fasern des N. acusticus an bestimmten Sinnesepithelien endigen, so ist anzunehmen, daß die Erregung auf mechanische Weise zustandekommt, ebenso wie ein motori-

scher Nerv durch rhythmisches Beklopfen mechanisch gereizt werden kann.

Nun ist von HELMHOLTZ die spezielle Annahme gemacht worden, daß von den verschiedenen Abschnitten dieses vielteiligen Sinnesapparates allein der Schnecke Hörfunktion zukomme, teils auf Grund ihres anatomischen Baus, welcher es nahe legt, die Schnecke als einen Satz von Resonatoren aufzufassen, mit Hilfe deren die Klänge in ihre Teiltöne zerlegt werden können, teils mit Rücksicht auf die Erfahrungen der Klinik über den Zusammenhang von Hörstörungen mit Erkrankungen der Schnecke. An und für sich ist solch eine Annahme wenig einleuchtend; denn nicht bloß bei der Knochenleitung werden unbedingt die Schwingungen sämtlichen Labyrinthabschnitten zugeleitet, sondern auch bei Zuleitung auf dem gewöhnlichen Wege gerät überall, z. B. auch

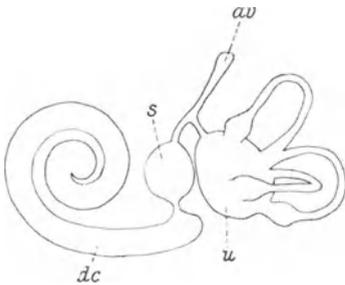


Abb. 234. Häutiges Labyrinth (nach MERKEL).
d.c. Ductus cochlearis, s. Sacculus, u. Utriculus, av. Aquaeductus vestibuli.

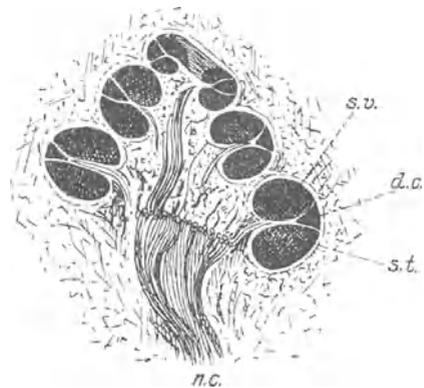


Abb. 235. Längsschnitt durch die Schnecke.
n.c. Nervus cochlearis. d.c. Ductus cochlearis. s.v. Scala vestibuli. s.t. Scala tympani.

in den halbzirkelförmigen Kanälen, das Labyrinthwasser nachweislich in Bewegung (HENSEN). Dennoch trifft die Annahme vielleicht das Richtige; jedenfalls kommt zweifelsohne dem Sacculus, dem Utriculus und den Bogengängen neben einer etwaigen Hörfunktion noch eine ganz andere und wichtige Sinnesfunktion zu, da sie der Perzeption der Lage und der Bewegung dienen (siehe Kapitel 35). Diese Funktion ist sogar die ursprünglichere, phylogenetisch ältere.

Die Resonatoretheorie des Hörens gründete HELMHOLTZ zunächst, wie gesagt, auf den anatomischen Bau. Die häutige Schnecke bildet einen Spiralgang von $2\frac{1}{2}$ Windungen, den *Ductus cochlearis*, welcher in dem Schema der Abb. 233 aufgewickelt und in eine Ebene gelegt gezeichnet ist. Wie dieser häutige Kanal in Wirklichkeit in die entsprechende Knochenkapsel des Felsenbeins eingehängt ist, zeigt die Abb. 235. Einen Querschnitt durch einen einzelnen Schneckengang bei stärkerer Vergrößerung gibt die Abb. 236 wieder. Der Ductus cochlearis hat danach etwa dreieckigen Querschnitt; die untere und die eine Seitenwand sind membranös, die andere, äußere Seitenwand stößt an Knochen an. Die untere Wand bildet die *Basilarmembran* (m. b.);

auf ihr erheben sich, eines neben das andere auf dem Spiralgang gestellt, die *Cortischen Organe*, die Träger der Sinnesepithelien, der sogenannten *Hörzellen* (i. H. und ä. H.), an welche die Endigungen des N. cochlearis (n. c.), der einen Hauptportion des N. acusticus, von der Schneckenachse her herantreten. Der Ductus cochlearis (d. c.) ist mit Endolymphe gefüllt, die beiden angrenzenden über und unter ihm gelegenen Räume, die *Scala vestibuli* (s. v.) und die *Scala tympani* (s. t.), welche an der Schneckenspitze miteinander kommunizieren, mit Perilymphe. Schall- schwingungen, welche von der Membran des ovalen Fensters der Perilymphe mitgeteilt werden, können die Basilar- membran in Mitschwingung

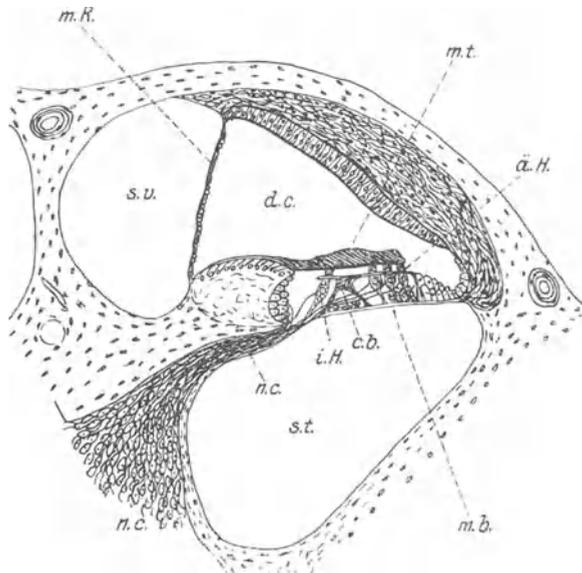


Abb. 236. Querschnitt durch einen einzelnen Schneckengang. d.c. Ductus cochlearis, durch die REISSNER'SCHE Membran (m.R.) von der Scala vestibuli (s.v.), durch die Basilar- membran (m.b.) von der Scala tympani (s.t.) getrennt. C.b. ein CORTISCHER Bogen, axialwärts davon eine innere Hörzelle (i.H.), peripherwärts 3 äußere Hörzellen (ä.H.). Die Haare der Hörzellen stoßen gegen die Membrana tectoria (m.t.). n.c. Nervus cochlearis.

versetzen; die Erregung der Akustikusfasern kommt dann vielleicht so zustande, daß die feinen Haare der Hörzellen vibrierend gegen die über ihnen schwebende *Membrana tectoria* (m. t.) anschlagen, und daß dadurch die Hörzellen gereizt werden (HELMHOLTZ, HENSEN).

Nach HELMHOLTZ' Annahme repräsentiert nun die Basilar- membran den Resonatorensatz. Sie besteht aus zahlreichen elastischen querspannten Saiten, welche in eine Grundsubstanz eingebettet sind. Die Membran ist an der Schneckenbasis schmal, an der Schneckenspitze breit; nach HENSEN bemißt sich ihre Breite an der Basis zu 0,04 mm, an der Spitze zu 0,495 mm, also über 10mal so viel; die Länge beträgt 33,5 mm. Die Saiten sind also oben und unten verschieden lang. Man kann sie deshalb mit den verschiedenen langen, auch verschieden gespannten Saiten in einem Klavier vergleichen. Als Resonatoren würden sie bei der Analyse eines Kluges dann so zu funktionieren haben, daß auf

je einen von dessen Partialtönen immer nur ein schmaler Querstreifen der Basilarmembran, dessen Eigenton getroffen ist, mit Schwingungen anspricht; die zugehörige in Schwingungen versetzte Nervenfasern würde dann die Empfindung einer ganz bestimmten Tonhöhe wachrufen.

Es fragt sich, was zugunsten dieser Hypothese angeführt werden kann. Prüfen wir zuerst, ob die *Zahl der Resonatoren*, welche in der Basilarmembran enthalten sind, ungefähr mit der großen Zahl von Tönen übereinstimmt, welche das Ohr zu unterscheiden vermag. Die Zahl der quergespannten Saiten wird zu 13—24 000 angegeben. Die Zahl der „inneren Hörzellen“ (siehe Abb. 236), welche axialwärts von den Cortischen Bögen in einer Reihe längs der Basilarmembran stehen, beträgt etwa 3500, an „äußeren Hörzellen“, welche in 3—4facher Reihe stehen, sind 3—4mal so viele vorhanden (RETZIUS, HENSEN). Danach könnten jedenfalls einige tausend Tonstufen wahrgenommen werden. Dies stimmt nun mit den Untersuchungen über die *akustische Unterschiedsempfindlichkeit* gut überein.

Wie beim Sehorgan, so ist nämlich auch beim Gehörorgan die Empfindlichkeit auf ein bestimmtes Intervall von Schwingungsfrequenzen beschränkt, d. h. es gibt vom Standpunkt des Gehörorgans *tiefste und höchste Töne*. Die untere Grenze des Hörens liegt bei etwa 15—19 Schwingungen pro Sekunde, die obere bei etwa 20 000. Beide Grenzen sind fließend, die obere besonders in Abhängigkeit vom Alter; die Empfindlichkeit für hohe Töne nimmt nämlich mit dem Alter regelmäßig ab, alte Leute können daher z. B. die hohen zirpenden Töne der Grille häufig nicht hören. Die obere Grenze von 20 000 Schwingungen gilt für das Kindesalter; mit ca. 35 Jahren ist die obere Hörgrenze auf etwa 15 000 gesunken, mit 50 Jahren auf etwa 13 000 (ZWAARDEMAKER, GILDEMEISTER). Die Empfindlichkeit sinkt mit steigender Frequenz gewöhnlich sehr rasch; dis⁷ wird z. B. noch in 3 m Entfernung gehört, eine Erhöhung um $\frac{1}{4}$ Ton verlagert die Schwelle schon in den Abstand von 1 cm. Das Intervall, welches wir mit dem Ohr umfassen können, beträgt nach den angegebenen Grenzen etwa 11 Oktaven. Das ist im Vergleich mit dem Auge sehr viel; denn dessen Empfindlichkeit reicht nur von etwa 400 bis 800 Billionen Schwingungen pro Sekunde (siehe S. 457), umfaßt also nur 1 Oktave.

Die Unterschiedsempfindlichkeit des Ohrs ist nun innerhalb der verschiedenen Oktaven verschieden groß. Man mißt sie so, daß man, von einem bestimmten Ton angefangen, die Zahl der Schwingungen gerade nur um soviel vergrößert, daß eine eben merkliche Veränderung in der Höhe des Tons wahrgenommen wird. Man findet dann, daß in dem mittleren Frequenzgebiet von 100—1000 Schwingungen dafür schon ein Zuwachs von im Mittel 0,4 Schwingungen pro Sekunde zureicht, dagegen beträgt oberhalb 4000 Schwingungen der mittlere Zuwachs etwa 100 Schwingungen. Mißt man in dieser Weise das ganze Tongebiet durch, so findet man, daß etwa 4000 *Tonstufen voneinander unterschieden werden können*. Da nach den anatomischen Untersuchungen, wie wir sahen, einige tausend Resonatoren vorhanden sind, so ist in dieser Hinsicht also den Anforderungen der Resonanztheorie Genüge getan.

Als ein zweites Argument für die Resonatoretheorie kann die Existenz der *Tonlücken* und der *Toninseln* angeführt werden, d. h. die Erscheinung, daß in krankhaften Fällen ein kleinerer oder größerer

Tonbereich in der Empfindung ausfällt, wie wenn einzelne Resonatoren zerstört wären, oder daß aus dem großen Tongebiet nur einige inselförmige Reste stehen bleiben, wie wenn die meisten Resonatoren weggefallen wären (BEZOLD). Im speziellen ist *Baßtaubheit*, d. h. eine Unempfindlichkeit für tiefe Töne, im Zusammenhang mit Erkrankung der Schnecken spitze, also desjenigen Abschnitts, in dem die Basilarmembran ihre größte Breite hat, konstatiert worden (BAGINSKY). Dagegen scheint umgekehrt eine absichtliche experimentelle Verletzung der Schneckenbasis nicht Diskanttaubheit hervorzurufen, sondern ebenfalls und im Widerspruch mit der Theorie Baßtaubheit (I. R. EWALD); wir werden darauf später (S. 509) zurückkommen.

Auch die merkwürdigen Fälle von sog. *Diplacosis binauralis dysharmonica*, bei welcher eine Schwingung die Empfindung zweier gegeneinander verstimmt Töne verursacht (*Stumpf*), kann im Sinne der Resonatoretheorie so gedeutet werden, daß die Resonatoren der einen Seite durch Änderung ihrer Spannung verstimmt sind, so daß ein Nervenendorgan auf eine andere Frequenz anspricht, als es normalerweise ansprechen würde.

In naher Beziehung zu den eben erörterten Erscheinungen stehen die Beobachtungen über *Hörstörungen durch Ermüdung für einzelne Töne*. WITTMACK, YOSHI, HOESSLI u. a. haben den Versuch gemacht, durch lang anhaltende oder sehr starke Reizung von Tieren mit einem bestimmten Ton bestimmte Resonatoren der Basilarmembran zu überreizen und als Folge davon zu krankhafter Degeneration zu bringen. In der Tat ließen sich pathologische Veränderungen in der Schnecke und nur in der Schnecke nachweisen; ob aber deren verschiedene Lage in Abhängigkeit von der Höhe des Reiztones zugunsten oder zuungunsten der HELMHOLTZschen Lehre auszulegen ist, blieb strittig.

Ein besonderes Argument ist die *Einflußlosigkeit der Phasenverschiebung*. In der Abb. 229 (Seite 497) sind zwei Klangkurven dargestellt, welche beide durch Superposition zweier Sinusschwingungen von der gleichen Periode und der gleichen Amplitude entstanden sind; ihre Form ist nur deshalb verschieden, weil das Phasenverhältnis der beiden Sinusschwingungen ein verschiedenes ist. Falls nun, entsprechend der Resonatoretheorie, das Ohr einen Klang allein dadurch auffaßt, daß es ihn in seine Partialtöne zerlegt, ihn also nicht als Ganzes perzipiert, muß akustisch eine Phasenverschiebung ganz irrelevant sein. In der Tat ist namentlich durch HERMANN am Phonographen gezeigt worden, daß die Klangfarbe von dem Phasenverhältnis völlig unabhängig ist.

Dagegen scheint in einem anderen Fall gerade umgekehrt das Ohr die Schwingungsform eines Klanges als Ganzes wahrzunehmen und nicht die Zerlegung in die Einzelschwingungen auszuführen. Wenn nämlich gleichzeitig zwei Töne angegeben werden, deren Schwingungszahlen nur um wenige Schwingungen voneinander verschieden sind, so hört man bekanntlich *Schwebungen*, d. h. periodische Verstärkungen und Abschwächungen des Klanges, deren Zahl gleich der Differenz der Schwingungszahlen der beiden Töne ist. Da auch die zugehörige Klangkurve ein periodisches Ansteigen und Absinken der Amplitude darbietet, so scheint hier also der Klang als solcher auf das Endorgan zu wirken. Aber man kann, um dem Konflikt mit der Resonatoretheorie auszuweichen, mit HELMHOLTZ die Annahme machen, daß ein bestimmter Ton zwar eine bestimmte Saite der Basilarmembran zu maximalen Schwingungen erregt, daß aber auch die benachbarten Resonatoren mehr oder weniger mitschwingen, wobei die zugehörigen Nervenfasern freilich wegen der Geringfügigkeit der Erregung nicht mit ansprechen würden. Ertönen nun zwei Töne von fast gleicher Periode, dann werden

sie auch einen zwischen ihnen liegenden Resonator gemeinsam erregen, und dieser muß dann natürlich auch objektiv entsprechend der Schwebungskurve schwingen. Daß diese Erklärung richtig ist, dafür kann man anführen, daß man unter Umständen nicht bloß die beiden nahe verwandten Partialtöne hört, sondern außerdem auch noch einen „Mittelton“, welcher dem zwischenliegenden Resonator entspricht; dieser schwebt dann, während die beiden Partialtöne in gleichmäßiger Stärke erklingen.

Auch die Hörbarkeit der sog. *Kombinationstöne* hat der Resonatorentheorie Schwierigkeiten bereitet. Werden zwei Töne angegeben, deren Differenz der Schwingungszahlen eine gewisse Größe überschreitet, so hört man den *SORGEschen* oder *TARTINI'schen Differenzton*, dessen Höhe der Differenz der Schwingungszahlen entspricht, ferner den *Summationston*, dessen Höhe gleich der Summe der beiden Schwingungszahlen ist, und unter Umständen noch einige weitere Töne. Da die Kombinationstöne früher als rein subjektiv angesehen wurden, so ließen sie sich natürlich nicht auf Grund der Resonatorentheorie erklären; seitdem ist aber nachgewiesen, daß sie zum Teil objektiv in den Schallquellen entstehen,

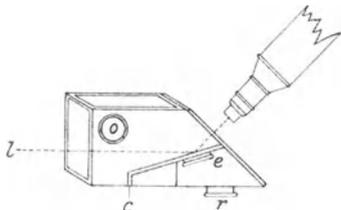


Abb. 237. Camera acustica nach EWALD.

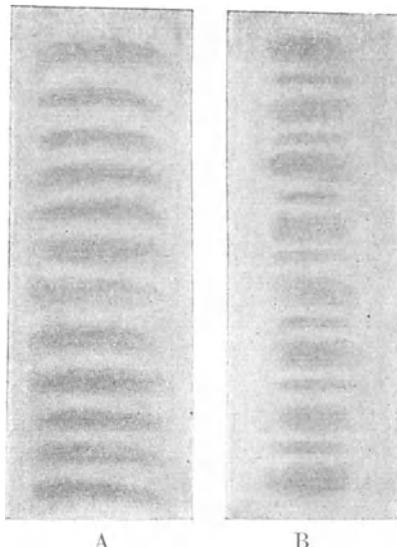


Abb. 238. Schallbild eines einfachen Tons (A) und eines Grundtons mit seiner Oktave (B) nach EWALD.

zum Teil wohl auch durch komplizierte Schwingungen des Trommelfells gebildet werden, da sie auch sonst an Telephonmembranen und an Membranen von ähnlicher Form wie das Trommelfell nachgewiesen sind.

Läßt sich so also eine größere Zahl von Beobachtungen für die HELMHOLTZ'sche Theorie ins Feld führen, so sind doch auch von vornherein starke Bedenken gegen sie geltend gemacht worden. Vor allem ist in Frage gezogen, ob es bei einer Membran von der winzigen Dimension der Basilmembran wahrscheinlich ist, daß sie auf einen bestimmten Ton mit isolierten Schwingungen einer einzelnen ihrer quergespannten Saiten oder eines schmalen Streifens antworten kann, zumal da die Saiten nicht wie bei einem Klavier unabhängig voneinander aufgespannt, sondern zu einer Membran verbunden sind; ferner ist zu bezweifeln, ob die kurzen Saiten, welche an der größten Breite der Basilmembran weniger als $\frac{1}{2}$ mm lang sind, als Resonatoren für die tiefsten hörbaren Töne angesehen werden können, da sonst für die tiefsten Töne bei unseren Instrumenten (A^1 beim Flügel = 27,5, C^1 bei der Orgel = 16,5, E beim Kontrabaß = 41,25 Schwingungen) Resonatoren von ganz anderer Dimension in Gang gesetzt werden.

Deshalb ist immer wieder versucht worden, die HELMHOLTZsche Theorie zu modifizieren. Neuerdings ist ihr mit großem Erfolg eine andere Theorie an die Seite gestellt, die **Schallbildertheorie** von I. R. EWALD, welche mindestens den Vorzug großer Anschaulichkeit auf Grund von Modellversuchen besitzt. EWALD spannte feinste Gummimembranen in einen kleinen Rahmen, hängte sie in Wasser und leitete diesem nach Analogie der Perilymphe Schwingungen zu. Die Anordnung ist aus Abb. 237 ersichtlich.

Ein Kasten, die *Camera acustica*, ist durch eine Wand c in zwei Abschnitte geteilt; in dieser Wand ist die Schallmembran bei e angebracht, sie wird von l her schräg beleuchtet und mit einem Mikroskop betrachtet. o ist eine mit einer Membran verschlossene Öffnung, durch welche dem Wasser der Kammer die Schwingungen zugeleitet werden, o repräsentiert also das ovale Fenster; eine zweite Membran r entspricht dann der Membran des runden Fensters. Wie weit EWALD sein Modell den natürlichen Verhältnissen angepaßt hat, lehren die Werte für die Dimensionen einer seiner Membranen, nämlich 0,55 mm Breite und 8,5 mm Länge (vergleiche S. 505).

Wenn man der *Camera acustica* nun Schallwellen zuleitet, so sieht man nicht an einer Stelle einen einzelnen Querstreifen in Schwingungen geraten, sondern die ganze Membran wird durch stehende Wellen in in regelmäßigen Abständen aufeinander folgende Schwingungsknoten und Schwingungsbäuche aufgeteilt, so daß man *Schallbilder*, wie in Abb. 238 zu sehen bekommt. Knoten und Bäuche stehen um so enger nebeneinander, je höher der zugeleitete Ton ist. Beim tiefsten Ton, den EWALD erhielt ($C^1 = 16$), lag nur ein Schwingungsbauch auf der Länge der Membran, bei $C^8 = 32\ 000$ betragen die Abstände von Bauch zu Bauch etwa $\frac{1}{100}$ mm.

Falls nun auch die Basilmembran in dieser Weise anspricht, so hätten wir uns demnach vorzustellen, daß der Empfindung eines bestimmten Tons die Erregung einer bestimmten Serie von Nervenfasern entspricht, der Empfindung eines anderen Tons die Erregung einer anderen Serie, in welcher aber zum Teil dieselben Nervenfasern enthalten sein können wie beim ersten Ton.

Auch vom Standpunkt dieser Theorie sind die vorher beschriebenen Beobachtungen verständlich, zum Teil sogar noch besser verständlich. So hat EWALD öfter zufällig Schallmembranen in die Hand bekommen, welche infolge irgendwelcher Unregelmäßigkeiten im Bau auf einzelne Töne nicht ansprachen oder nur auf bestimmte beschränkte Tongebiete reagierten, also das Phänomen der *Tonlücken* und der *Toninseln* sichtbar darboten. Die Erfahrung, daß oft bei Verletzung der Schneckenspitze Baßtaubheit, aber bei Verletzung der Schneckenbasis nicht Diskanttaubheit, sondern im Gegenteil auch häufig Baßtaubheit auftritt (siehe S. 507), stellt sogar eine notwendige Konsequenz der EWALDschen Theorie dar; denn jede Verkürzung der Basilmembran, von welchem Ende auch immer, muß die untere Hörgrenze der Membran heraufsetzen. Auch die bisher noch nicht erwähnte Beobachtung, daß ein Ton, welcher allmählich abklingt, höher zu werden scheint, fand eine unerwartete Aufklärung, da beim Abklingen der stehenden Schwingungen auf der Schallmembran die Knoten nach EWALD etwas näher aneinander rücken.

Schließlich gibt es jedoch auch Beobachtungen, welche mit keiner der genannten Theorien, die von der Grundannahme einer alleinigen

Hörfunktion der Schnecke ausgehen, in Übereinstimmung zu bringen sind. So hat LUCÆ über Fälle von völligem Verlust der beiden Schnecken beim Menschen berichtet, in denen die Hörfunktion nicht erloschen war, und KALISCHER exstirpierte bei Hunden auf der einen Seite das ganze Labyrinth, auf der anderen Seite die Schnecke, so daß nur Sacculus, Utriculus und Bogengangapparat der einen Seite übrig blieben, und fand ebenfalls gewisse Hörreaktionen erhalten. Auch beim Meerschweinchen konnte sich RICHARD davon überzeugen, daß nach doppelseitiger Zerstörung der Schnecke Schallreaktionen übrig bleiben, und daß erst nach Totalexstirpation beider Labyrinthe die Reaktionen völlig verschwinden.

Man muß also schließen, daß *auch der Vorhofbogengangapparat neben seiner Funktion im Dienst der Statik und Dynamik des Körpers irgend ein Hören vermittelt.* (Weiteres darüber siehe S. 541.)

32. Kapitel.

Stimme und Sprache.

Der Kehlkopf als Pfeife 511. Die Stimmgebung 512. Der Stimmumfang 513. Die Vokale 514. Die Konsonanten 516.

Im Anschluß an die Physiologie des Gehörs soll zunächst die Funktion desjenigen Organs erörtert werden, welches durch seine Erzeugung von Klängen und Geräuschen eine Bedeutung hat, hinter welcher die Bedeutung aller übrigen musikalischen Instrumente für den Menschen weit zurücktritt. Denn dadurch, daß wir mit den Klängen und Geräuschen, welche das *Stimmorgan* produziert, bestimmte psychische Komplexe assoziieren und diese von Mensch zu Mensch mit übertragen, wird der geistige Zusammenhalt der Menschen gewährleistet.

Der Kehlkopf mit seinem Ansatzrohr der Rachen-, Mund- und Nasenhöhle ist als ein Blasinstrument anzusehen, welches der Kategorie der Pfeifen angehört. Im speziellen ist der Kehlkopf eine *zweilippige membranöse Zungenpfeife*, d. h. er enthält zwei schwingungsfähige Membranen, die *Stimmbänder*, welche in dem „Windrohr“ nach Art der Lippen einander gegenüberstehen und die spaltförmige *Stimmritze* zwischen sich lassen. Indem die Expirationsmuskeln die Luft aus dem „Windkasten“ der Lungen durch diesen Spalt hindurchtreiben, werden die Stimmbänder gespannt und die Stimmritze etwas erweitert, dann schnellen die Stimmbänder wieder zurück, verschließen mehr oder weniger die Stimmritze, darauf wird diese durch die andrängende Luft von neuem erweitert, und so fort. So kommt es zu regelmäßigen Schwingungen der Stimmbänder, und von ihnen aus wird die im Ansatzrohr befindliche Luft in periodische Erschütterungen versetzt. Was wir als Stimmklang hören, sind weniger die Schwingungen der Stimmbänder selbst, als die Schwingungen dieses Luftraumes. Die Höhe des Stimmklangs hängt von der variablen Länge, Dicke und Spannung der Stimmbänder ab; auch die Stärke des Anblasens ist von Bedeutung, da auch von ihr die Spannung mit abhängig ist. Die Form des Ansatzrohrs bedingt die Klangfarbe (siehe später S. 513).

Der Kehlkopf ist aber keine gewöhnliche Zungenpfeife; denn bei dieser schwingen die Zungen in der Richtung des Luftstroms, so wie es etwa das Schema der Abb. 239 in den gestrichelten Pfeilen andeutet. Dagegen schwingen die Ränder der Stimmbänder mehr in der Richtung der ausgezogenen Pfeile, also quer zur Richtung des Luftstroms. EWALD hat dies durch Konstruktion der sogenannten *Polsterpfeifen*

nachgeahmt, von denen ein Modell in der Abb. 240 dargestellt ist. Die Zungen sind auf federnden Polstern angebracht, so daß sie sich senkrecht zum Luftstrom bewegen müssen. Diese Pfeifen können in beiden Richtungen, von oben und von unten her, angeblasen werden; auch das entspricht den Verhältnissen beim Kehlkopf, insofern als man ja ausnahmsweise auch inspiratorisch phoniert.

Die Bewegungen der Stimmbänder sind mit dem **Kehlkopfspiegel** zu beobachten, welchen der spanische Gesangslehrer GARCIA (1854) angab (siehe Abb. 241). Der Kehlkopfspiegel (s), ein kleiner kreisrunder

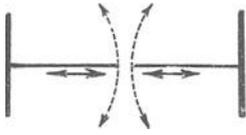


Abb. 239.

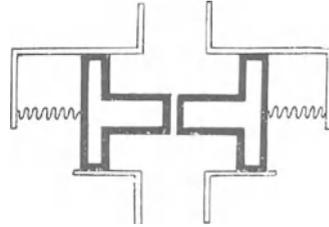


Abb. 240. Polsterpfeife nach EWALD.

Spiegel, wird von einem Stiel getragen, welcher um 45° gegen den Spiegel geneigt ist. Man legt die Spiegelplatte mit ihrem Rücken gegen die

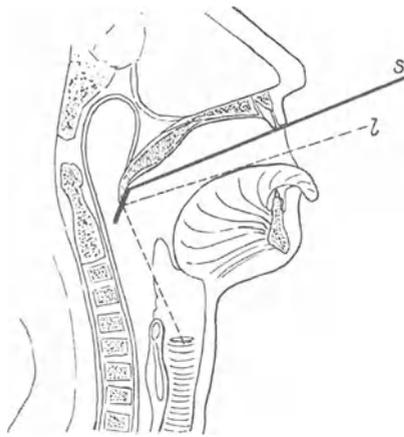


Abb. 241. Schematische Darstellung der Anwendung des Kehlkopfspiegels.

hintere Rachenwand oder gegen das Zäpfchen, wirft mit Hilfe eines zentrisch durchbohrten an der eigenen Stirn befestigten Konkavspiegels Licht (l) auf den Spiegel, so daß es auf den Kehlkopfeingang reflektiert wird, und läßt die vom Kehlkopf und vom Kehlkopfspiegel reflektierten Lichtstrahlen durch das Loch im Stirnspiegel in das eigene Auge gelangen. Das so erhaltene „laryngoskopische“ Bild des Kehlkopfeingangs bei ruhiger Atmung ist in Abb. 242 dargestellt, daneben das Bild bei Stimmgebung (Abb. 243).

Die **Stimmgebung** geschieht durch die kombinierte Wirkung der verschiedenen Kehlkopfmuskeln, welche die Stimmbänder einander nähern und in verschiedenem Maß in Spannung versetzen. Man unterscheidet im wesentlichen zwei Arten der Stimmgebung, die *Bruststimme* und die *Kopf- oder Falsettstimme*. Bei der *Bruststimme* sind die Stimmbänder einander so genähert, daß ihre Innenränder sich fast berühren; die Stimmritze ist also ganz lang und eng. Infolgedessen gerät auch die Luft unterhalb des Kehlkopfs, im Thorax, bei der Stimmgebung in lebhaftere Mitschwingungen, welche man mit der dem Thorax aufgelegten Hand fühlen kann (sogenannter *Stimmfremitus* oder *Fremitus pectoralis*). Seltener benutzt man die *Kopf- oder Falsettstimme*; die Stimmbänder sind dabei stark gespannt, aber so geformt, daß nur ihre innersten Ränder schwingen; zugleich ist die Stimmritze in ihren vorderen zwei Dritteln ein wenig geöffnet. Infolgedessen entweicht die Luft leicht aus dem

Brustraum; sie gerät um so mehr oberhalb des Kehlkopfs, „im Kopf“, d. h. im Rachen in Resonanzschwingungen; wegen des damit verbundenen eigentümlichen Gefühls spricht man von Kopfstimme. Die Kopfstimme ist anstrengender als die Bruststimme, weil durch die Öffnung der Stimmritze der Luftvorrat sich leicht erschöpft. — Bei der *Flüsterstimme* steht die Stimmritze im ganzen ziemlich weit offen, die an ihren Rändern vorbeistreichende Luft erzeugt nur ein leises hauchendes Geräusch.

Der **Stimmumfang** beträgt im allgemeinen 1—2 Oktaven, nur geübte Sänger umfassen 3 Oktaven und mehr. Nach JOHANNES MÜLLER rechnet man für den

Baß	$E-f^1 = 80-341$ Schwingungen	
Tenor	$c-c^2 = 128-512$	„
Alt	$f-f^2 = 170-683$	„
Sopran	$c^1-c^3 = 256-1024$	„

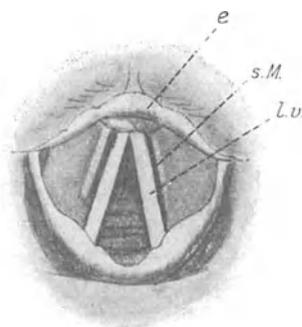


Abb. 242. Kehlkopfeneingang bei ruhiger Atmung.
e Epiglottis. l.v. Ligamentum vocale.
s.M. Sinus Morgagnii.

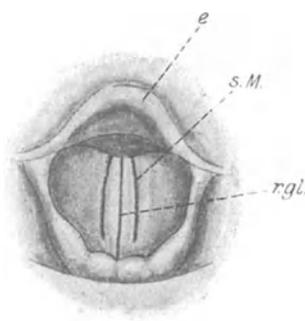


Abb. 243. Kehlkopfeneingang bei Stimmgebung.
e Epiglottis. s.M. Sinus Morgagnii.
r.gl. Rima glottidis.

Das wesentlich Entscheidende für die verschiedene Lage der Stimmregister ist die Kehlkopfgröße, d. h. die Länge der Stimmbänder. Kinder und Frauen haben einen kleineren Kehlkopf als Männer; daher liegt die Stimme bei den ersteren höher. Die männliche Stimme entsteht bekanntlich erst zur Zeit der Pubertät; dadurch, daß der Kehlkopf stärker wächst, stellt sich die Stimme auf ein tieferes Register um, sie „mutiert“. Die *höchsten Töne* erzeugt man dadurch, daß man den Kehlkopf möglichst stark anbläst, weil dann die Stimmbänder außer durch Muskelwirkung auch noch durch den Anblasedruck gespannt werden; umgekehrt kann man die *tiefsten Töne* nur pianissimo hervorbringen.

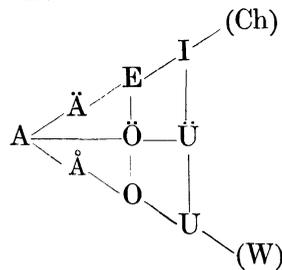
Das **Ansatzrohr** über dem Kehlkopf dient, wie schon gesagt wurde, dazu, der Stimme die Klangfarbe zu geben. Es stellt einen Resonator von komplizierter Form dar, welcher entsprechend seinen Eigentönen bestimmte von den im Kehlkopfklang enthaltenen Obertönen verstärkt; auf die Höhe der Stimme hat das Ansatzrohr dagegen keinen Einfluß. Das Ansatzrohr ist so individuell geformt, daß die Klangfarbe der Stimme fast ebensoviel persönliches Gepräge hat, wie etwa das Antlitz eines Menschen.

Das Ansatzrohr besteht hauptsächlich aus dem Mundraum und aus dem Nasenraum. Es kann durch die Bewegungen der Zunge, des weichen Gaumens und der Gaumenbögen in aller erdenklichen Weise

umgestaltet werden, Mund- und Nasenraum können dabei ebensowohl in breite Kommunikation miteinander gebracht wie auch gegeneinander abgeschlossen werden. Dadurch ist unter anderem die Möglichkeit für die Bildung der zahlreichen verschiedenen Laute gegeben, aus denen sich die Sprache zusammensetzt. Diese große Bedeutung des Ansatzrohrs wird einleuchtend durch die Möglichkeit der Flüstersprache demonstriert, bei welcher der Kehlkopf unbeteiligt ist und nur die Eigentöne des Ansatzrohrs angeblasen und Geräusche in ihm erzeugt werden. Dagegen tritt beim Gesang die Bedeutung der verschiedenen Formung des Ansatzrohrs gegenüber dem tönenden Kehlkopf in den Hintergrund.

Die Laute, welche mit Hilfe von Kehlkopf und Ansatzrohr erzeugt zur Bildung der **Sprache** verwendet werden, kann man in *stimmhafte* oder *phonische* und in *stimmlose* oder *aphonische Laute* einteilen.

Zu den phonischen Lauten gehören vor allen Dingen die **Vokale**, deren es eine große Zahl gibt. Man kann sie etwa vom Vokal A nach folgendem Schema ableiten:



Die Vokale entstehen dadurch, daß, während man den Kehlkopf anbläst, das Ansatzrohr in eine ganz bestimmte Form gebracht wird.

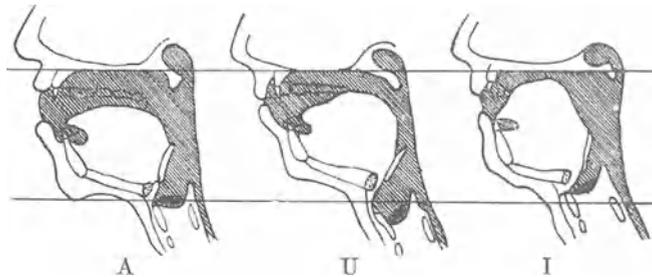


Abb. 244. Mund- und Rachenform bei Angabe der Vokale A, U und I.

Beim Vokal A hat die Mundhöhle die Form eines nach vorn offenen Trichters; die Zunge liegt platt auf dem Boden der Mundhöhle, der Mund ist weit geöffnet. Das Gaumensegel steht zugleich ziemlich tief, der Kehlkopf ist etwas gehoben (siehe Abb. 244 A). Beim Übergang von A über O zum U wird die Mundöffnung mehr und mehr vorgeschoben und verengt, die Zunge etwas zurückgezogen, vorn tief gehalten, dagegen hinten gewölbt, das Gaumensegel steht ziemlich hoch und verschließt mehr oder weniger den Nasenraum; der Kehlkopf ist gesenkt (siehe Abb. 244 U). Beim Übergang von A über E nach I wird dagegen die Zungenspitze nach vorn gehoben, der vordere Zungenrücken dem harten Gaumen angenähert, so daß die Mundhöhle einen schmalen Spalt bildet, der Zungenrund dagegen etwas gesenkt und die Zunge von vorn nach hinten zusammengezogen, so daß hinten im Rachen der sogenannte Kehlkopf-

raum entsteht. Das Gaumensegel ist wiederum hoch gestellt, der Kehlkopf kräftig emporgehoben (siehe Abb. 244 I).

Man kann die Vokale aber auch in der Weise aussprechen, daß man das Gaumensegel tief stellt, so daß Nasen- und Rachenraum miteinander kommunizieren; wenigstens gelingt das beim A, O und einigermaßen beim E. Die Vokale tönen alsdann durch Resonanz der Nasenhöhle in einer eigentümlichen sogenannten *nasalen Klangfarbe*.

Verengert man bei der Aussprache des I die Spalte der Mundhöhle, beim Aussprechen des U die vordere Mundöffnung mehr und mehr, so mischen sich dem Klang reibende Geräusche bei, und es entstehen dadurch die tönenden Konsonanten Ch und W.

Daß *die Vokale in der Tat bloß von der Form des Ansatzrohrs abhängen* und mit dem Kehlkopf an sich nichts zu tun haben, dafür kann man verschiedene Beweise anführen: Erstens kann man einen Vokal, z. B. ein A, ebensogut auf einen hohen wie auf einen tiefen Ton singen; der im Kehlkopf erzeugte Klang ist also ganz verschieden, der Vokal bleibt der gleiche. Zweitens kann man die Vokale auch flüstern, sie also stimmlos angeben. Drittens kann man Geräusche erzeugen, welche den einzelnen geflüsterten Vokalen ähnlich sind, wenn man der Mundhöhle eine solche Form gibt, wie sie beim Angeben eines Vokals gewöhnlich eingenommen wird, und dann die Mundhöhlenwandung mit dem Finger perkutiert.

Die Vokale sind also ihrem Wesen nach Klänge, welche durch das Anblasen der Mundhöhle vom Kehlkopf aus erzeugt werden. Nach der Lehre von HELMHOLTZ kommen sie im speziellen dadurch zustande, daß aus dem obertonreichen Klang, welcher im Kehlkopf entsteht, durch die Mundhöhle einer oder mehrere Töne durch Resonanz verstärkt werden. Die Schwingungszahlen dieser die Vokale charakterisierenden Obertöne müßten dann, wie das auch sonst bei den Obertönen eines Klanges der Fall ist, einfache Multipla der Frequenz der Grundschwingung sein, d. h. die für den Vokal charakteristischen Obertöne müßten zum Grundton harmonisch sein. Damit scheint jedoch die Analyse der Klangkurven der Vokale in Widerspruch zu stehen. Man erhält solche *Vokal-kurven*, indem man die durch die Stimme erregten Schwingungen einer möglichst leichten Membran mit Hilfe eines möglichst leichten Hebels aufzeichnet; am besten verwendet man als Hebel einen an der Membran reflektierten Lichtstrahl, welcher auf eine photographische Platte schreibt (HENSEN, PIPPING, HERMANN u. a.). HERMANN fand bei der Analyse solcher Kurven, daß zwar jeder Vokal durch einen oder mehrere Töne von bestimmter Höhe gekennzeichnet ist, daß aber diese von ihm als *Formanten* bezeichneten Töne entgegen der HELMHOLTZschen Vokaltheorie auch unharmonisch zum Grundton sein können. HERMANN hat deshalb die Ansicht vertreten, daß die Formanten des Vokals nicht im Kehlkopfklang präformiert sind, sondern daß sie erst in der Mundhöhle durch deren Anblasen entstehen, etwa wie eine Flasche einen bestimmten Ton gibt, wenn man über ihre Öffnung bläst. Ob diese Ansicht das Richtige trifft, ist noch strittig. Die folgende Tabelle (siehe S. 516) enthält den Formant für den Vokal A, wenn dieser in ganz verschiedener Stimmhöhe, d. h. mit ganz verschiedener Höhe des Grundtons im Kehlkopfklang gesungen wird (HERMANN).

Der Vokal A enthält hiernach also einen mit der Stimmhöhe nur sehr wenig schwankenden Ton. Daß es auf diese absolute Höhe eines Partialtons im Vokalklang ankommt, dafür kann man auch folgenden

Versuch von HERMANN anführen: wenn man auf die Walze eines Phonographen einen Vokal schreiben läßt, so muß man, um ihn nachträglich zu reproduzieren, die Walze mit der gleichen Geschwindigkeit rotieren lassen, wie bei der Aufnahme; andernfalls tönt der Vokal nicht mehr rein, sondern mehr oder weniger verändert heraus.

Stimmhöhe	Formant
G = 98	> fis ² = 756
A = 110	> f ² = 717
H = 123,5	> f ² = 708
c = 130,8	f ² = 698
d = 146,8	> f ² = 710
e = 164,8	< g ² = 781
fis = 185	< fis ² = 725
g = 196	> f ² = 714

Außer den Vokalen gehören zu den phonischen Lauten die sogenannten phonischen **Konsonanten**. Unter den Konsonanten versteht man bekanntlich im Gegensatz zu den Vokalklängen Laute mit Geräuschcharakter. Der letztere ist sehr verschieden stark ausgesprochen. In den *phonischen Konsonanten* ist das Geräusch von dem Klang der Stimme begleitet; manche der phonischen Konsonanten, nämlich die sogenannten *Halbvokale* oder *Liquidae*, haben sogar fast Vokalcharakter. Zu ihnen gehören erstens *m*, *n* und *ng*, die sogenannten Resonanten, bei deren Bildung der Mund verschlossen wird, so daß die Luft durch die Nase entweicht und der Kehlkopfklang deren Luft in Mitschwingung versetzt; beim *m* wird der Mund an den Lippen, beim *n* an der Zunge und bei *ng* am Zungengrund verschlossen. Ferner gehören zu den phonischen Konsonanten die *l*- und *r*-Laute. Beim *l* entweicht die Luft durch den Mund, während die Zungenspitze und die Zungenränder gegen den Alveolarrand des Oberkiefers oberhalb der Zähne gelegt sind. Die *r*-Laute werden ihres intermittierenden Charakters wegen als Zitterlaute bezeichnet; bei ihrer Bildung wird die Mundhöhle nicht dauernd, sondern periodisch verschlossen, beim labialen *r* an den Lippen, beim lingualen *r* an der gegen den Alveolarrand angelegten Zungenspitze, beim uvularen oder hinteren Gaumen-*r* zwischen Zungenrücken und weichem Gaumen, beim laryngealen *r* an der Glottis.

Die übrigen Konsonanten werden in *Explosiv-* oder *Verschlußlaute* und in *Reibungslaute* unterschieden. Beide können sowohl phonisch, also mit einem Kehlkopfklang kombiniert, als auch aphonisch, stumm angegeben werden. Phonische Explosivlaute sind *b*, *d*, das italienische *g(v)* und *g*, bei denen die Luft nach plötzlicher Sprengung eines Verschlusses an den Lippen, dem vorderen oder hinteren Gaumen tönend entweicht. Phonische Reibungslaute sind *w*, *s* (weiches), *j* der Franzosen und *ʃ*, sie sind Reibungsgeräusche mit Klangbeimischung und entstehen beim Entweichen der Luft an verengten Stellen des Mundes, nämlich wiederum an den Lippen, zwischen Zungenspitze und Alveolarrand und zwischen Zungenspitze und hinterem harten Gaumen. Werden die Verschluß- und Reibungslaute tonlos erzeugt, so entstehen die Konsonanten *p*, *t*, *k* und *f*, *ss*, *sch* und *ch*. Als sogenannter *Hauchlaut* entsteht an der geöffneten Stimmritze das *h*.

33. Kapitel.

Geschmacks- und Geruchssinn.

Niedere und höhere Sinne 517. Die Geschmacksqualitäten und die Geschmacksorgane 518. Die Geschmacksreize 519. Die Geruchsqualitäten und die Geruchsorgane 520. Die Geruchsreize 521.

Mit der Physiologie des Geschmacks- und des Geruchssinns beginnen wir die Darstellung der sogenannten *niederen Sinne*, zu welchen außer den genannten auch die Hautsinne und die Lage- und Bewegungssinne gerechnet werden. Der Grund für die herabsetzende Bezeichnung „*niedere Sinne*“ ist nicht die Armut an Empfindungsqualitäten, welche sie vermitteln, — denn das Geruchsorgan beispielsweise steht darin kaum hinter den höheren Sinnesorganen zurück —, ebensowenig ist es eine geringere Empfindlichkeit. Sondern die Ursache ist die größere Entbehrlichkeit, wenigstens für den kultivierten Menschen. Denn alle namhaften Errungenschaften der Kultur, Künste und Wissenschaften, werden uns fast ausschließlich durch Auge und Ohr vermittelt. Die Wissenschaft, welche aus den Sondererscheinungen allgemeine Sätze herleitet und deshalb die Bildung von Begriffen zur Voraussetzung hat, bedarf der Sprache und noch mehr der Schrift zu dauerhafter Fixierung dieser Begriffe. Eine Vermittlung von Begriffen durch Geruchs- und Geschmacksorgan ist kaum denkbar, und die taktile Übertragung nach Art der Blindenschrift ist der optischen Übertragung der Begriffe zweifellos unterlegen. Auch die Künste, Malerei und Skulptur, Musik und Dichtkunst, sind von Auge und Ohr abhängig. In allgemeinsten Auffassung beruhen sie auf der Wahrnehmung räumlich und zeitlich geordneter Komplexe von Empfindungen. Den Raum erfassen wir vornehmlich mit Auge und Haut; aber die Eindrücke räumlicher Kunstwerke, welche die Haut etwa dem Blinden übermittelt, sind ästhetisch doch nur minderwertig, die Freude daran nicht echt, viel mehr anempfunden. In der Musik und Dichtkunst aber kommt es auf die Reproduktion von Empfindungskomplexen in der Zeit an, und dem Ohr, das uns die Gehörsempfindungen nur mangelhaft in räumlicher Ordnung, vielmehr zeitlich gegliedert vermittelt, können die anderen „*Zeitsinne*“, wie Geschmacks- und Geruchssinn, nach ihrer ganzen Organisations- und Funktionsweise in der Fähigkeit, bestimmte Empfindungskomplexe zu reproduzieren, uns etwa sozusagen eine Geschmacks- und Geruchssymphonie vorzuführen, kaum an die Seite gestellt werden. So hat

denn also allein vom Standpunkt des Kulturmenschen die Bezeichnung als niedere und höhere Sinne ihre Bedeutung.

Der *Geschmacks-* und der *Geruchssinn* unterrichten uns nun im speziellen über die chemischen Unterschiede in unserer Umgebung, und zwar wesentlich im Interesse der vegetativen Funktionen. Deshalb stehen sie sozusagen als Wächter am Eingang des Intestinal- und des Respirationstrakts. Sie sorgen für die Nahrungsaufnahme, indem sie den Appetit anreizen und die Verdauung erregen, sie schützen durch Auslösen von Abwehrreflexen, wie Speien, Würgen, Erbrechen, vor schädlichen Substanzen. Die von ihnen abhängigen Empfindungen sind besonders deutlich mit dem Gefühl der Lust oder der Unlust assoziiert. —

Der *Geschmackssinn* verursacht uns im Gegensatz zum Gesicht- und Gehörsinn nur eine eng begrenzte Zahl von Empfindungsqualitäten, nämlich aus dem Komplex von Empfindungen, welche schmackhafte Stoffe erzeugen, vermögen wir mit Sicherheit nur vier **Grundqualitäten** herauszulösen, *salzig, sauer, süß* und *bitter*: das „Spektrum des Geschmacks“ besteht also nur aus vier getrennten Linien (OEHFWALL). Die vier verschiedenen Empfindungen können aber einem und demselben Stoff anhaften, dessen Geschmack wir dann ähnlich analysieren, wie wir mit dem Ohr einen Klang in seine Partialtöne zerlegen. Manche sprechen auch vom *Laugenhaften* und vom *Metallischen* als von elementaren Geschmacksempfindungen; das Laugenhafte ist aber wohl nichts weiter als eine Summe verschiedenartiger Empfindungen, wie brennend, glatt, bitter, süß, denen auch noch eine eigentümliche Geruchsempfindung beigemischt ist, und im Metallischen steckt wohl eine saure Komponente, ferner die Empfindungen des Zusammenziehenden und des Glatten.

Die Geschmacksempfindungen entstehen, wenn gewisse lösliche und diffusible, also relativ niedrig molekulare Stoffe an bestimmte Orte der Mundhöhle, an die **Schmeckorte**, gelangen. Der Hauptschmeckort ist die Zungenschleimhaut, aber nicht im ganzen, sondern die Schmeckfähigkeit ist auf die Spitze, die Ränder und den Grund der Zunge beschränkt; ihre Mitte und ihre Unterfläche lösen keine Geschmacksempfindungen aus. Außer mit der Zunge kann man auch mit dem harten Gaumen, dem Pharynx, den Tonsillen, der Uvula und der Epiglottis schmecken; die Schleimhaut der Lippen und der Wangen sowie das Zahnfleisch sind dagegen geschmacksunempfindlich.

Die verschiedenen Qualitäten salzig, sauer, süß und bitter werden nicht von allen Schmeckorten aus gleich gut erregt; auf der Zunge ist für süß die Spitze am empfindlichsten, für sauer die Ränder, für bitter der Grund. Daher vermag man den Geschmack einer Speise zu analysieren, indem man sie im Mund umherschleibt, indem man sie langsam verschluckt oder sie einschlürft. Die Tatsache der verschiedenen Verteilung legt die Vermutung nahe, daß *jede der vier Grundqualitäten von eigenen Sinnesorganen oder Sinnessubstanzen abhängig ist*. Dies wird besonders durch die Untersuchungen von OEHFWALL bestätigt. Er stellte fest, daß auf der Vorderzunge allein von den Papillae fungiformes Geschmacksempfindungen ausgelöst werden können; nämlich nur wenn man diese mit einem feinen, mit einer schmeckenden Lösung getränkten Pinsel betupft, kommen Geschmacksempfindungen zustande, nicht dagegen, wenn man dazwischen liegende Stellen berührt. Für den Pinsel waren 125 Papillen zugänglich, von diesen waren 98 schmeckfähig, aber in verschiedener Art und Weise, nämlich es schmeckten:

91 Weinsäure	67 Zucker u. Weinsäure	12 Weinsäure allein
79 Zucker	64 Zucker u. Chinin	3 Zucker allein
71 Chinin	60 Zucker, Chinin u. Weinsäure	0 Chinin allein.

Es sind also offenbar *auf manchen Papillen* „Bitter-, Süß- und Sauerorgane“ vereinigt, bei anderen kommen nur zwei, auf wieder anderen nur die eine oder die andere Sorte vor (KIESOW, GOLDSCHIEDER).

Man kann noch einen anderen Versuch dafür anführen, daß die einzelnen Qualitäten von einzelnen Sinnessubstanzen abhängen. Bestreicht man die Zunge mit einer 2%igen Kokainlösung, so verschwindet zeitweilig die Fähigkeit, bitter zu schmecken; noch auffallender sind die Folgen der Vergiftung mit Gymnemasäure, einer in *Gymnema silvestre* enthaltenen Säure; sie vernichtet zeitweilig nicht bloß den Bitter-, sondern auch den Süßgeschmack, während sauer und salzig erhalten bleiben; infolgedessen wirkt Zucker wie Sand, Chinin wie Kreide.

Die eigentlichen *Geschmacksorgane* sind bekanntlich die Schmeckzellen in den sogenannten Geschmacksknospen, welche auf der Zunge an den *Papillae fungiformes* und den *Papillae circumvallatae* zu finden sind. An ihnen endigen die **Geschmacksnervenfasern**. Deren Herkunft ist nicht leicht festzustellen, da die Zunge nicht bloß mit Geschmacksnerven, sondern auch mit motorischen, sensiblen und sekretorischen Fasern versorgt wird. Geschmacksfasern sind zweifellos enthalten im *Lingualis* des dritten *Trigeminusastes*, in der *Chorda* des *Fazialis*, im *Glossopharyngeus* und für die *Epiglottis* im *Laryngeus superior* des *Vagus*. Dafür sprechen die verschiedenen experimentellen und klinischen Beobachtungen über *Geschmackslähmung* oder *Ageusie*.

Durchschneidet man den Stamm des *Glossopharyngeus*, so ist die Folge eine sogenannte *hintere Geschmackslähmung*, d. h. das hintere Zungendrittel und der Rachen büßen ihre Schmeckfähigkeit ein, und da besonders der Bittergeschmack hinten lokalisiert ist, so wird z. B. charakteristischerweise bei hinterer Geschmackslähmung eine Chininlösung anstandslos verschluckt. *Glossopharyngeusfasern* gelangen auch indirekt auf dem Weg des *Plexus tympanicus* und des dritten *Trigeminus* zur Zunge, wie man aus den Geschmacksstörungen zu schließen hat, die nach Radikaloperation des Mittelohrs zur Beobachtung kommen. Die *Glossopharyngeusdurchschneidung* verursacht auch Degeneration der Geschmackszellen in den *Papillae circumvallatae*.

Durchschneidung des *Lingualis* hat *vordere Geschmackslähmung* zur Folge, d. h. Verlust der Schmeckfähigkeit in den vorderen zwei Dritteln der Zunge. Die Fasern stammen zum Teil aus der *Chorda tympani*; daher bewirkt die elektrische Reizung dieses Nerven innerhalb der Paukenhöhle bei einem Trommelfelldefekt, wie schon bei anderer Gelegenheit (siehe Kapitel 27) erörtert wurde, deutliche, meist saure oder metallische Geschmacksempfindung. Die schmeckenden *Lingualisfasern* gehören aber zum Teil von Anfang an zum *Trigeminus*; dafür spricht die öfter beobachtete Geschmackslähmung infolge einer intrakraniellen *Trigeminusdurchschneidung*, wie sie zur Beseitigung unerträglicher *Gesichtsneuralgien* vorgenommen wird (F. KRAUSE).

Was nun die **Geschmacksreize** anlangt, so müssen die Stoffe, die sie ausüben, wie gesagt, die Eigenschaft der Wasserlöslichkeit und der Diffusibilität besitzen; dann können sie durch die die Geschmacksknospen zudeckende Schicht von Speichel bis zu den Schmeckzellen vordringen. Aber wie erregen sie die Sinneszellen, und warum erzeugen manche

Süßgeschmack, andere Bittergeschmack und wieder andere sauren Geschmack? Könnten wir diese Frage beantworten, so wäre zugleich eine Theorie der Geschmackssinnesfunktion gegeben; eine solche fehlt aber bisher. Die nächstliegende Voraussetzung zur Aufstellung solch einer Theorie ist natürlich die Annahme, daß allen Süßstoffen eine bestimmte physikalische oder chemische Eigenschaft gemeinsam ist, ebenso allen Bitter-, Sauer- und Salzigstoffen. Eigenschaften der Art sind aber bis jetzt nicht oder kaum ausfindig zu machen gewesen. Denn z. B. süß schmecken manche Zucker, Saccharin, Chloroformdampf, essigsäures Blei oder Bleizucker, Leimsüß oder Glykokoll, Berylliumsalze, verdünnte Laugen, genug Stoffe, welche den allerverschiedensten Klassen von chemischen Verbindungen angehören; andererseits schmecken manche Stereoisomere, die sich durch nichts als durch ihre optische Aktivität voneinander unterscheiden, verschieden, das *d*-Asparagin z. B. süß, das *l*-Asparagin „fade“. Ähnlich steht es mit den Bitterstoffen, denen z. B. viele Alkaloide, Ätherdampf, Magnesiumsulfat oder Bittersalz, Harnstoff, zahlreiche Glykoside und die Peptone angehören. Den salzigen Stoffen ist wenigstens die eine Eigenschaft gemeinsam, daß sie Elektrolyte sind; aber es gibt zahlreiche Elektrolyte, die keine Spur salzig schmecken. Einzig und allein vom Sauergeschmack kann man sagen, daß er chemisch oder physiko-chemisch einheitlich bedingt ist, nämlich nur Säuren, d. h. Verbindungen, welche H-Ionen abdissoziieren, schmecken sauer, so daß man wohl behaupten kann, daß *der Sauergeschmack allein den H-Ionen zukommt*.

Von Interesse für eine künftige Theorie der Geschmackssinnesfunktion sind die Wirkungen der gleichzeitigen Erregung mit mehreren Geschmacksreizen, ähnlich wie die Erfolge der Farbmischung wesentlich zur Aufstellung der Theorien des Farbensehens angeregt haben. Wenn man verschiedene Schmeckstoffe mischt, so kommt erstens sogenannte *Kompensation* vor, d. h. die Einzelgeschmäcke heben einander mehr oder weniger auf. Der Schwellenwert für Bitter wird zum Beispiel unter bestimmten Versuchsbedingungen in einer Chininlösung bei einem Gehalt von 0,004% erreicht, in Gegenwart von Kochsalz steigt die Schwelle dagegen auf 0,01%, in Gegenwart von Salzsäure auf 0,026%; oder die bei 0,25% gelegene Kochsalzschwelle wird durch Salzsäure oder durch Chinin auf 1,7% heraufgerückt (HEYMANS). Die Kompensation kann unter Umständen bis zu völliger Aufhebung gehen, aber so, daß das Resultat nicht gleich null, sondern etwas Neues, ein *Mischgeschmack* ist; so kann man Konzentrationen von Kochsalz und Zucker auffinden, bei denen die Lösung weder salzig noch süß schmeckt, sondern „fade“ (KIESOW). Ferner beobachtet man *Kontrasterscheinungen*, welche dem Neben- oder dem Nachkontrast der physiologischen Optik vergleichbar sind; die Süße einer Zuckerlösung wird z. B. durch Beimischung von etwas Kochsalz gesteigert, destilliertes Wasser schmeckt nach Ausspülen des Mundes mit Kaliumchlorat oder mit verdünnter Schwefelsäure deutlich süß (NAGEL, MOSSO). —

Wenden wir uns nun dem Geruchssinn zu, so stellen wir fest, daß er wieder ähnlich, wie der Gesichts- und der Gehörssinn, durch die außerordentlich große Zahl verschiedener **Empfindungsqualitäten** ausgezeichnet ist, welche er in uns erregt. Versucht man aber, diese ähnlich wie die Gesichts- oder Gehörsempfindungen zu ordnen, so stößt man auf viel größere Schwierigkeiten; es ergibt sich durchaus nicht von selbst eine unbestreitbare Kontinuität wie die Tonskala oder der Farbkreis. Eine

Einteilung der Gerüche ist indessen oft versucht worden. LINNÉ und nach ihm ZWAARDEMAKER haben folgende Reihe von ineinander übergehenden Gruppen aufgestellt:

ätherische, aromatische, balsamische, moschusartige, lauchartige, brenzliche, bocksartige, widerliche und ekelhafte Gerüche, aber die Abstufung erscheint recht willkürlich. HENNING hebt folgende sechs Grundgerüche heraus:

würzig, blumig, fruchtig, harzig, brenzlich, faulig.

Diese sollen aber kein lineares Kontinuum bilden, vergleichbar etwa der Reihe der Töne oder der Schwarzweißreihe, sondern von jedem Grundgeruch käme man durch Übergangsgerüche zu einem jeden der anderen Grundgerüche.

Danach lassen sich also etwa vom Würzigen Übergänge zum Harzigen finden, wobei das Würzige mehr und mehr ab-, das Harzige mehr und mehr zunimmt. Die Totalität der Geruchsempfindungen könnte daher statt durch eine Linie durch einen sechseckigen „Geruchskörper“ verbildlicht werden, dessen sechs Ecken die sechs Grundgerüche einnehmen, so wie an den Ecken des „Farbenkörpers“ (s. S. 455) die sechs HÉRINGSchen Gegenfarben stehen. Dem Geruchskörper wird von HENNING aus Gründen, die hier nicht näher erörtert werden sollen, die Form eines Prismas erteilt. — In anderer Hinsicht wird aber die Vergleichbarkeit mit dem Gebiet der Lichtempfindungen vermißt; denn durch Mischung von Würzigem und Harzigem entsteht z. B. nicht ein neuer einheitlicher Mischgeruch, wie durch Mischung von Grün und Violett Blau entstehen kann; vielmehr bleiben die Komponenten auch bei der Vermischung erhalten.

Die Auslösung der Geruchsempfindungen kommt dadurch zustande, daß gewisse verdampfbare Substanzen mit der Atemluft in die Nase eindringen. Aber nur die alleroberste Partie der Nasenschleimhaut dicht unterhalb der Lamina cribrosa des Siebbeins bildet die **Regio olfactoria**, nur dort finden sich die mit den Endigungen des N. olfactorius verbundenen Riechzellen. Der von ihnen eingenommene Bezirk umfaßt einen Teil der obersten Muschel und die gegenüberliegende Partie der Nasenscheidewand, Flächen etwa von der Größe eines Fünfpfennigstücks; die gesamte Regio olfactoria ist etwa 5 qcm groß.

Dorthin können die Riechstoffe nun auf zwei Wegen gelangen, nämlich erstens bei der Inspiration durch die Nasenlöcher. Dabei erreicht der Luftstrom aber nicht direkt die Regio olfactoria. Das lehren Versuche an Leichen (PAULSEN), denen man von der Luftröhre aus ammoniakhaltige Luft durch die Nase saugte, nachdem in diese Stückchen von rotem Lackmuspapier eingelegt waren; die riechenden Stoffe müssen erst von dem unteren und mittleren Nasengang aus nach aufwärts diffundieren. Durch „Schnüffeln“, d. h. durch kurze mehrfache Inspirationsstöße kann man allerdings Luftwirbel erzeugen, welche den Transport des Riechstoffs an die Regio olfactoria beschleunigen. Zweitens können die Riechstoffe auch expiratorisch wahrgenommen werden, indem sie von den Choanen aus vordringen; dies kommt namentlich beim Essen in Betracht, wenn nach dem Schlucken der Nasenrachenverschluß durch das Gaumensegel geöffnet wird und nun die mit Speiseteilchen erfüllte Luft des Rachens in die Nase eintritt.

Es ist bisher ohne weiteres von Riechstoffen gesprochen worden; jedoch hat man öfter an der Materialität der Geruchsreize gezweifelt und an die Übertragung von Schwingungen von bestimmten Substanzen aus geglaubt, weil manche der gerucherregenden Stoffe selbst in Jahren keinen Gewichtsverlust durch Verdampfung erkennen lassen. Aber das beweist nur, daß selbst das relativ unvollkommene Geruchsorgan des Menschen enorm

empfindlich ist. Daß wirklich die riechenden Teilchen in der Luft transportiert werden, das lehren die „Duftwolken“, die vom Winde weithin fortgetragen werden, das zeigt die Wirksamkeit fester Verschlüsse, und das beweist das Vorhandensein eines bestimmten Dampfdruckes, wenn man eine stark riechende Substanz, wie etwa Kampfer, in das Vakuum eines Barometers hineinbringt. Endlich gibt es auch meßbare Minimaldosen, in denen die Riechstoffe erst wirksam werden. Man bestimmt sie so, daß man z. B. in einen großen Behälter so viel von einer riechenden Flüssigkeit eintropft, bis die in ihm enthaltene Luft eben danach riecht (VALENTIN). Auf die Weise wurden folgende *Schwellenwerte* in $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

gefunden (ZWAARDEMAKER):

Aceton . . .	$0,4 \cdot 10^{-8}$	Merkaptan . . .	$4,4 \cdot 10^{-14}$
Kampfer . . .	$1,6 \cdot 10^{-11}$	Äthylbisulfid . . .	$3,0 \cdot 10^{-13}$
Nitrobenzol . . .	$4,1 \cdot 10^{-11}$	Valeriansäure . . .	$2,1 \cdot 10^{-12}$
Ionon . . .	$1,0 \cdot 10^{-13}$	Pyridin	$4,0 \cdot 10^{-11}$
		Skatol	$4,0 \cdot 10^{-12}$

Doch sind die riechbaren Mengen zweifellos noch viel geringer bei „osmatischen Tieren“, in deren Leben der Geruchssinn eine weit größere Rolle spielt als beim Menschen, z. B. beim Hund, welcher einer Spur folgt, oder bei Schmetterlingen, deren Männchen von einem mitten in der Stadt befindlichen Weibchen angelockt werden (STANDFUSS, FABRE).

Stellen wir uns nun wiederum die Frage, *in welcher Weise das Sinnesorgan zwischen Reiz und Empfindung vermittelt!* Entspricht jedem der zahlreichen verschiedenen Reize und jeder der zahlreichen verschiedenen Empfindungen eine besondere Sinnessubstanz oder eine besondere Sorte von Riechzellen, so wie wir es für den Geschmackssinn annehmen konnten? Oder läßt sich die große Zahl der Qualitäten etwa wie beim

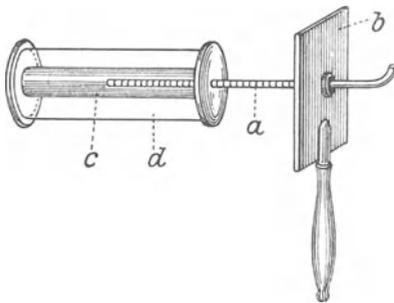


Abb. 245. Olfaktometer von ZWAARDEMAKER.

Sehorgan auf die kombinierte Wirkung einiger weniger Sinnessubstanzen zurückführen? Diese Fragen sind heute noch ungelöst. Zugunsten der ersten Annahme läßt sich mancherlei anführen, nämlich erstens die partiellen *Anosmien* und *Hyposmien*. Es kommt z. B. vor, daß jemand durch einen starken Katarrh einen Teil seines Riechvermögens einbüßt, so daß er z. B. für Pyridin zwar noch sehr empfindlich ist, aber Merkaptan, das für gewöhnlich eine erheblich größere Riechkraft hat als Pyridin, gar nicht wahrnimmt. Zum quantitativen Nachweis solcher Einbußen benutzt man das *Olfaktometer* von ZWAARDEMAKER (siehe Abb. 245). Dieses besteht aus einem graduierten Glasrohr a, welches durch einen Schirm b hindurchgesteckt und an seinem Ende aufwärts gebogen ist, so daß es in ein Nasenloch hineingeschoben werden kann. Über das andere Ende des Glasrohrs ist ein Zylinder c aus poröser Substanz gestülpt und kann leicht auf a hin- und hergeschoben werden. Die poröse Substanz wird mit einem flüssigen Riechstoff getränkt, das Abdunsten desselben in die umgebende Luft ist durch einen Glasmantel d verhindert. Je

weiter man nun den porösen Zylinder über die Glasröhre stülpt, um so kleiner ist die mit Riechstoff behaftete Fläche, an welcher die inspirierte Luft vorbeistreicht; man sucht diejenige Stellung auf, bei welcher eben ein Geruch wahrgenommen wird. In dieser Weise lassen sich partielle Hyposmien quantitativ bestimmen.

Ferner kann man für die Existenz besonderer auf bestimmte Gerüche abgestimmter Endorgane die *isolierte Ermüdbarkeit* für einzelne Gerüche anführen, ferner die *isolierte Ausschaltung durch Gifte*. So erzeugt die Gymnemasäure nicht bloß Ageusie (siehe S. 519), sondern auch Anosmie; diese schwindet dann charakteristischerweise so, daß nicht auf einmal alle Gerüche in allmählich ansteigendem Maß wiederkehren, sondern erst erscheinen die brenzlichen Gerüche, dann die lauchartigen und weiterhin die ätherischen, aromatischen und balsamischen Gerüche (ROLLETT). Die supponierten Sinnessubstanzen wären also in ähnlicher Weise verschieden resistent, wie etwa die Sehsubstanzen von HERING (siehe S. 473).

Andere Erfahrungen sprechen mehr für die zweite Annahme, daß, etwa nach Art der in EWALD'S Schallbildertheorie oder in den Farbentheorien vertretenen Anschauung, die Erregungen der einzelnen Endorgane in mannigfachen Kombinationen zu verschiedenen Einheiten verschmolzen werden, denen dann jeweils besondere Empfindungen entsprechen (F. B. HOFMANN). So läßt sich z. B. die Erfahrung deuten, daß infolge eines Katarrhs ein Geruch sich verändern kann, daß sonst einander nur ähnliche Gerüche zum Verwechseln gleich werden, und daß durch gleichzeitige Darbietung mehrerer Geruchsstoffe ganz neue einheitliche Gerüche entstehen, wie z. B. aus Vanillin und Schwefelammonium. —

Schon einleitend wurde bemerkt, daß Geruchs- und Geschmackssinn beide am Eingang des Intestinal- und des Respirationstrakts lokalisiert sind. Machen wir uns abschließend klar, daß diese anatomische Zusammenstellung der Ausdruck einer gemeinsamen *Funktion für die vegetativen Zwecke des Körpers* ist! Was wir als den Geschmack oder den Geruch einer Speise bezeichnen, ist selten ein bloßer Geschmack oder ein bloßer Geruch, sondern häufiger ein Komplex von Empfindungen, welcher eine Einheit repräsentiert, für deren Analyse zunächst kein biologisches Erfordernis vorliegt. Aber die aufmerksame Beobachtung lehrt, daß z. B. der Geschmack einer Speise sich häufig aus mehreren Einzelgeschmacks, aus verschiedenen Gerüchen, aus Wärme- oder Kälteempfindungen und aus einem eigenartigen Komplex von Tastempfindungen zusammensetzt. Wir sprechen vom „beißenden“ Geschmack der Zwiebel und finden bei der Analyse nicht bloß einen Geschmack, sondern dazu einen Geruch und eine dem „Beißen“ entsprechende Schmerzempfindung; im Geschmack einer sauren Speise steckt oft als Komponente die Empfindung des Zusammenziehenden, d. h. einer Kontraktion in der Submucosa, kombiniert mit der Ausflockung des Muzins auf der Schleimhaut. Ekelhafte Gerüche sind solche, welche von der Sensation der Würgebewegung begleitet sind, und so fort. Und wie wenig wir gewohnt sind, alle solche Komplexe sorgfältig in ihre Einzelbestandteile aufzulösen, beweisen etwa manche Beobachtungen über völlige Änderungen des Geschmacks, wenn man die Nase zuhält, oder auch die Klagen über die Beeinträchtigung des Geschmacks durch das Tragen eines künstlichen Gebisses, obwohl durch dieses einzig und allein die Tast- und die Temperaturempfindungen des harten Gaumens verändert, d. h. teilweise ausgeschaltet werden.

34. Kapitel.

Temperatur-, Druck- und Schmerzsin.

Der Wärme- und Kältesinn 525. Die Wärme- und Kälteorgane 526. Der Drucksinn 528. Die Drucksinnesorgane 529. Die Simultan- und die Sukzessivschwellen des Drucksinns 531. Der Schmerzsin; die Schmerzhaftigkeit der inneren Organe 532. Der Schmerzsin der Haut 534.

Zu den niederen Sinnen werden neben Geschmacks- und Geruchssinn gewöhnlich auch Druck-, Wärme-, Kälte- und Schmerzsin gezählt, also diejenigen Sinne, welche, wenn auch keineswegs ausschließlich, so doch vornehmlich an die Haut gebunden sind und deshalb oft auch als *Hautsinne* zusammengefaßt werden. Aber wir haben uns im vorigen Kapitel klar gemacht, daß die Bewertung des Auges als höheres Sinnesorgan ganz wesentlich mit seinen Leistungen für die Erfassung des Räumlichen zusammenhängt, welche namentlich die Festlegung der Begriffe durch die Schrift ermöglicht, und gerade in dieser Hinsicht sind die Hautsinne auch dem Geschmacks- und dem Geruchssinn weit überlegen und dem Gesichtssinn verwandt. Zwar erfolgt die räumliche Orientierung durch die Haut nur durch unmittelbare Berührung der Außendinge; denn die Haut gehört nicht zu den „Telerezeptoren“, wie der Gesichtssinn, welcher auch weit ab von unserem Körper gelegene Dinge wahrnimmt; wir erfassen mit dem Hautsinne auch nicht große Gebiete des Raumes auf einmal, wie wir mit dem Gesichtssinn alles das zugleich wahrnehmen, was sich im Gesichtsfeld vorfindet; sondern der Hautsinne macht uns im Augenblick nur mit einem kleinen Teil der Außenwelt bekannt und belehrt uns erst durch sukzessives Berühren über einen größeren Raumumfang. Aber das Beispiel zahlreicher Blinder, welche ihr wichtigstes Raumsinnesorgan eingebüßt haben, vor allem das Beispiel derjenigen, welche fast von Geburt an gleichzeitig taub und blind wurden, wie Laura Bridgman oder Helen Keller, welche sich allein mit ihrem Hautsinne nicht bloß sprachliche und schriftliche Verständigungsmöglichkeiten erwarben, sondern sich sogar Mathematik, verschiedene Sprachen und Naturwissenschaften zu eigen machten, belehren uns darüber, daß unter besonderen Umständen die Erlebnisse der Hautsinne an kultureller Bedeutung an diejenigen des Gesichtssinns und des Gehörssinns heranreichen können, so daß auf die Weise das Begreifen und das begriffliche Denken wirklich auf dem Wege zustandekommt, den die Worte „Begreifen“ und „Begriff“ eigentlich zum Ausdruck bringen.

Druck-, Wärme- und Kältesinn und besonders deutlich der Schmerzsinne sind, wie bereits gesagt wurde, nicht allein an die Haut gebunden, sondern auch — mehr oder weniger — an die inneren Organe. Sie werden öfter auch einheitlich als der *Gefühlssinn* zusammengefaßt, teils wegen der gemeinsamen Lokalisation auf der Haut, teils, weil der Schmerz sozusagen ein einigendes Band zwischen ihnen darstellt; denn intensive Druck-, Wärme- und Kältereize gipfeln in gleicher Weise in Schmerzempfindungen. Aber wir werden alsbald zahlreiche Erfahrungen kennen lernen, welche dafür sprechen, daß jeder der Sinne etwas Besonderes ist; die Abtrennung des Schmerzsinnes speziell kann unter anderem damit begründet werden, daß bei nicht zu tiefer Narkose, gewissen Rückenmarkserkrankungen oder Nervenschädigungen die Druckempfindungen erhalten bleiben, dagegen die Schmerzempfindungen verloren gehen (*Analgesie*), so daß z. B. ein Schnitt in die Haut nur als Druck, nicht als Schmerz empfunden wird, oder damit, daß bei einem transplantierten Hautstück die Rückkehr des „Gefühls“ nicht alle Hautempfindungen zu gleicher Zeit betrifft, sondern daß erst die Druck-, dann die Schmerz- und dann die Temperaturempfindungen sich wieder einzustellen pflegen. So läßt es sich also begründen, wenn wir im folgenden die einzelnen Hautsinne für sich betrachten.

Der **Wärmesinn** löst die eine Qualität der Wärmeempfindung, der **Kältesinn** die eine Qualität der Kälteempfindung aus; nur durch ihre Intensität können sich also Wärmen und Kälten voneinander unterscheiden. Die Wärme- und die Kälteempfindungen sind zusammen mit den Schmerzempfindungen darin von den bisher erörterten Empfindungen verschieden, daß wir ihre Ursache nicht ohne weiteres in Dingen der Außenwelt erblicken, wie wir ein Licht, einen Geruch oder einen Druck objektivieren, sondern daß wir sie ebenso sehr auf innere Vorgänge in unserem eigenen Körper beziehen; daher sagen wir wohl „mir ist heiß“, aber nicht „mir ist laut“ oder „mir ist hell“. In dieser Hinsicht sind Wärme, Kälte und Schmerz den sog. „Gemeingefühlen“ verwandt, welche allein von Zuständen unserer Organe hervorgerufen werden, wie das Sattsein, der Durst, der Hunger, das Erstickungsgefühl, die Übelkeit und dergleichen. Die Ursache ist, daß der Wärme- und Kältesinn außer durch Temperaturänderungen in der Umgebung auch durch die Temperaturänderungen in der Haut selber infolge wechselnder Durchblutung erregt wird. Die Temperatursinnesorgane messen also nicht die Umgebungstemperatur, sondern die Temperatur der Haut.

Die Wärme- und Kälteempfindungen werden außer von der Haut auch von der Schleimhaut von Mund, Nase, Speiseröhre, Kehlkopf und After, vielleicht auch vom Magen ausgelöst.

Die genauere Untersuchung lehrte, daß der Temperatursinn nicht gleichmäßig über die Haut verteilt, sondern daß er auf kleine punktförmige Bezirke beschränkt ist, derart, daß man *Wärme- und Kältepunkte* nebeneinander unterscheiden kann (BLIX, GOLDSCHIEDER). Betastet man die Haut ganz leicht und flüchtig mit hohlen Metallzylindern mit abgestumpfter Spitze, welche mit Eiswasser oder mit Wasser von 45° gefüllt sind, so fühlt man, daß nur an bestimmten Stellen eine deutliche Wärme-, an anderen eine deutliche Kälteempfindung erregt wird. Markiert man die aufgefundenen Punkte mit fest haftender Farbe, so kann man konstatieren, daß sie unverrückbar in der Haut festliegen

(siehe Abb. 246). Die Kältepunkte überwiegen an den meisten Hautstellen weitaus über die Wärmepunkte; man findet nach den Zählungen von SOMMER im Mittel auf 1 qcm 6—23 Kälte- und nur 0—3 Wärmepunkte; die Gesamtzahl der Kältepunkte beträgt etwa 250 000, die der Wärmepunkte 30 000.

Die Existenz der BLIXschen Punkte läßt natürlich auf besondere **Kälte- und Wärmesinnesorgane** schließen. Dies folgt auch aus anderen Beobachtungen. Vor allem hat BLIX gezeigt, daß *die Temperaturpunkte auch auf inadäquate Reize ansprechen* und mit ihrer spezifischen Empfindung antworten, so wenn man sie elektrisch oder durch Druck (z. B. mit einer Bleistiftspitze) reizt. Merkwürdigerweise reagieren die Kältepunkte auch auf Wärme; wenn man auf einen Kältepunkt eine warme Fläche von etwa 40° aufsetzt, so empfängt man eine deutliche sogenannte *paradoxe Kälteempfindung* (v. FREY, THUNBERG). Weniger leicht glückt es, eine *paradoxe Wärmeempfindung* festzustellen; es gelingt nur dann, wenn der Kältesinn einigermäßen zurücktritt. So beobachtete sie STRÜMPPELL in Fällen von pathologischer Kälteanästhesie, in denen er mit Eisstückchen bei den Patienten deutliche Wärmeempfindung aus-

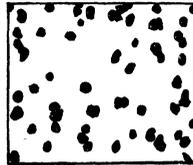


Abb. 246. Sinnespunkte der Haut an der Dorsalfläche der linken Handwurzel (nach BLIX).

Druckpunkte schwarz, Kältepunkte blau, Wärmepunkte rot.

lösen konnte, oder man findet sie, wenn man kältepunktfreie Hautstellen, z. B. am Unterarm, aufsucht und diese mit Kälte reizt (RUBIN).

Durch inadäquate Reizung kommt auch die *Empfindung des Heißen* zustande, welche von der Wärmeempfindung deutlich verschieden ist. Schon die Selbstbeobachtung lehrt, daß heiß einen Komplex von Wärme und Kälte darstellt (ALRUTZ, THUNBERG); bei der Einwirkung starker Wärme auf eine größere Hautfläche ist man in der Tat, besonders im ersten Moment, zweifelhaft, ob man mehr Wärme oder mehr Kälte verspürt. Für die Komplexnatur des Heißen spricht auch, daß an Orten, welchen die Kältepunkte fehlen, ein heißer Gegenstand nur Wärme, allenfalls noch Schmerz hervorruft, dagegen keine Hitzeempfindung, daß aber umgekehrt, wo die Wärmepunkte mangeln, ein starker Wärmereiz allein Kälteempfindung erzeugt.

Die Tatsache, daß die paradoxe Kälteempfindung leicht, die paradoxe Wärmeempfindung dagegen nur unter besonderen Umständen auszulösen ist, findet eine Erklärung in der Annahme, daß *die Kälteorgane oberflächlicher gelegen sind als die Wärmeorgane*; während daher ein Kälteorgan isoliert durch den inadäquaten Wärmereiz erregt werden kann, werden bei der Einzelerregung eines Wärmeorgans mit Kälte gewöhnlich zugleich mehrere der höher gelegenen Kälteorgane mit ansprechen. Diese Annahme über die Verteilung wird auch durch folgende weitere Beobachtung gestützt: erstens ist es charakteristisch, daß die Kälteempfindung auf den Temperatureiz hin sofort in ihrer ganzen

Intensität auftritt, während die Wärmeempfindung sich erst allmählich zu ihrer vollen Stärke entwickelt; dieser Unterschied fällt aber bei elektrischer Reizung fort (v. FREY). Ferner: wenn man die Haut mit einer erwärmten Silberlamelle in Berührung bringt, welche wegen ihrer geringen Wärmekapazität die Temperatur bloß in den oberflächlichen Schichten steigert, so erhält man eine reine Kälteempfindung (THUNBERG). Drittens zeigt sich, daß zahlreiche Gifte, wie Kokain, Phenol, Eisessig u. a. auf die Haut getupft die Kälteempfindlichkeit früher aufheben als die Wärmeempfindlichkeit (v. FREY).

Diese Beobachtungen bilden einen Wegweiser für die Auffindung der Temperaturorgane. In der Haut sind nämlich eine große Zahl verschiedener Sinnesapparate vereinigt, wie die MEISSNERSCHEN Tastkörperchen, die VATER-PACINISCHEN Körperchen, die KRAUSESCHEN und die RUFFINISCHEN Endkolben, die freien Nervenendigungen u. a. Davon dienen die MEISSNERSCHEN Tastkörperchen, wie wir noch sehen werden, wahrscheinlich dem Drucksinn, während für die Temperatursinne die KRAUSESCHEN und die RUFFINISCHEN Endkolben beansprucht werden. v. FREY hat nämlich darauf hingewiesen, daß die Conjunctiva bulbi und der Rand der Cornea der Druck- und der Wärmeempfindlichkeit entbehren, dagegen Kälteempfindungen vermitteln; an dieser Stelle finden sich aber reichlich die KRAUSESCHEN Endkolben. Für die RUFFINISCHEN Organe als Organe des Wärmesinns wird besonders ihre tiefere Lage in der Kutis geltend gemacht.

Werfen wir schließlich nach der Erörterung der Temperaturempfindungen, der Temperatureize und der Temperaturorgane, wie in den analogen Fällen bei den anderen Sinnen, auch hier die Frage auf, wie die Sinnesorgane zwischen Empfindung und Reiz vermitteln, wie die **Erregung der Temperaturorgane** zustande kommt. Die Frage ist viel schwieriger zu beantworten, als es im ersten Moment scheint. Die Haut funktioniert nicht wie ein Thermometer, welches bei Überschreitung einer bestimmten Nullpunkttemperatur Wärme, bei Unterschreitung derselben Kälte anzeigt. Das lehrt schon die Tatsache, daß wir z. B. für gewöhnlich das unbedeckte Gesicht, die bedeckte Körperhaut und die Schleimhaut der Mundhöhle als gleich temperiert, und zwar „auf Null eingestellt“ empfinden, obwohl ihre Temperatur ganz verschieden ist. Aber nicht bloß verschiedene Stellen der Haut, sondern auch eine und dieselbe Stelle kann zu verschiedenen Zeiten ganz verschieden warm sein und doch die gleiche Empfindung auslösen. Steigt man z. B. in ein warmes Bad, so erscheint das Wasser im ersten Moment warm im Vergleich zu der bis dahin bestehenden Temperaturindifferenz, aber nach einiger Zeit ist der Zustand der Indifferenz von neuem erreicht, in welchem weder warm noch kalt empfunden wird, obwohl die Haut notorisch wärmer geworden ist. Besonders deutlich zeigt das folgender Versuch von E. H. WEBER: man tauche die linke Hand auf kurze Zeit in Wasser von etwa 10°, die rechte in Wasser von etwa 40°, darauf bringe man beide Hände zugleich in Wasser von 25—30°; dann wird dies Wasser der linken Hand anfänglich warm, der rechten anfänglich kühl vorkommen.

Die Haut kann sich also verschiedenen Temperaturen adaptieren, so daß sie als indifferent empfunden werden; diese *Adaptationsfähigkeit* geht bei den Fingern z. B. so weit, daß eventuell ebensowohl noch 11°, wie auch 39° als indifferent, weder warm noch kalt empfunden werden; am Handrücken liegt die *Indifferenzbreite* etwa zwischen 23° und 33° (THUNBERG).

Die *Stärke der Temperaturempfindung* hängt bei gleichem Temperatureiz von einer Reihe von Umständen ab. Erstens ist der Ort der

Reizung entscheidend; die Augenlider, die Wangen, die Seiten des Rumpfes sind durch große, die behaarte Kopfhaut und die Fußsohlen durch geringe Empfindlichkeit ausgezeichnet. Füllt man z. B. zwei dünnwandige Gläser mit Wasser von 25° und 35°, so fühlt man den Temperaturunterschied durch das Glas sehr leicht mit dem Augenlid oder der Wange, während man ihn schon mit den Fingerspitzen nicht mehr erkennt. Zweitens ist, die Temperaturempfindung um so intensiver, je größer die gereizte Fläche ist; Wasser von 37° erscheint der ganzen Hand wärmer, als Wasser von 40° dem einzelnen Finger (E. H. WEBER). Drittens kommt es auf die Geschwindigkeit der Temperaturänderung an; daher erscheint ein Stück Metall von Zimmertemperatur kühler, als ein Stück Holz von der gleichen Temperatur, weil das erstere entsprechend seinem größeren Wärmeleitungsvermögen der Haut rascher Wärme entzieht als letzteres; und ebenso erscheint ein dickes Stück Metall wegen seiner größeren Wärmekapazität kühler als ein dünnes.

Nach all dem liegt der von WEBER gezogene Schluß nahe, daß Wärmeempfindung beim Steigen, Kälteempfindung beim Sinken der Hauttemperatur zustande kommt, und daß Indifferenz herrscht, wenn die Temperatur konstant ist; es käme also in ähnlicher Weise auf die Änderung der Temperatur an, wie in DU BOIS-REYMONDS Erregungsgesetz für den Nerven auf die Änderung der Stromdichte (siehe S. 329). Wärmeempfindung könnte danach z. B. ebensowohl auf Wärmezufuß von einem berührten Gegenstand her beruhen, wie auf einer irgendwie erregten stärkeren Blutzufuhr zur Haut von dem warmen Körperinnern.

Mit dieser Annahme wird man jedoch nicht allen Beobachtungen gerecht. Drückt man z. B. ein kaltes Metallstück etwa 30'' gegen die Stirn und entfernt es darauf, so hat man noch einige Zeit nachher, etwa 20'' lang, eine deutliche Kältenachempfindung, obwohl die Temperatur in der gereizten Stelle nicht fällt, sondern steigt (E. H. WEBER). Man könnte eine Erklärung dafür darin suchen, daß man eine Nachwirkung der Erregung der Kälteorgane annimmt, ähnlich wie man die Nachbilder auf eine Persistenz der Netzhauterregung zurückführt. Aber diese Erklärung ist nicht richtig; denn kühlt man etwa den Unterarm längere Zeit in Wasser von 15°, sperrt darauf durch Umschnürung des Oberarms die Blutzufuhr und hebt nun den Arm aus dem Wasser heraus, so entsteht zunächst in der adaptierten Haut gar keine Temperaturempfindung; löst man aber dann nach etwa 5 Minuten die Umschnürung, so kommt mit dem Einströmen des Blutes eine ausgesprochene Kälteempfindung zustande. — EBBECKE schließt aus dieser und aus anderen Beobachtungen, daß das Maßgebliche für das Zustandekommen der Temperaturempfindungen ein Temperaturgefälle innerhalb der Sinnesorgane ist; doch kann diese Ansicht hier nicht näher begründet werden.

Auch der Drucksinn löst wohl, wie der Wärme- und der Kältesinn, nur eine Qualität von Empfindungen aus; allerdings läßt es sich nicht mit Bestimmtheit behaupten, denn manche unterscheiden die *Druckempfindungen* von den *Berührungsempfindungen*. Wenn man nämlich einen Druck auf die Haut von null an steigert, so scheint sich der Charakter der Empfindung, nicht bloß ihre Intensität zu ändern; zu der bloßen anfänglichen Berührungsempfindung scheint sich eine besondere Druckempfindung hinzuzugesellen. Wir werden später darauf zurückkommen.

Druck spürt man auf der Haut, in Mund und Rachen, am Naseneingang, an der Analschleimhaut, an Muskeln, Sehnen und Faszien; man bezieht den Druck auf ein drückendes Agens, objektiviert also erfahrungsgemäß die Empfindung.

Die genaue Untersuchung hat auch hier wieder gelehrt, daß der Sinn nicht diffus verbreitet, sondern in Sinnespunkten, sog. *Druck-* oder *Tastpunkten*, diskret auf der Haut verteilt ist, so daß mehr oder weniger druckempfindungsfreie Zonen die einzelnen Punkte voneinander

trennen (BLIX). Die Druckpunkte findet man am leichtesten mit sog. *Reizhaaren* (v. FREY), Haaren, welche an Stäbchen senkrecht zu deren Richtung angekittet sind (Abb. 247). Man vermag damit einen Druck auszuüben, welcher um so größer ist, je stärker und je kürzer das Haar.

Man kann diesen Druck auf folgende Weise messen: man bestimmt dasjenige in eine Wagschale gelegte Gewicht, welches man durch Aufstemmen des Haares auf die andere Wagschale eben noch heben kann, und dividiert dies Gewicht durch den im Mikroskop festgestellten Querschnitt des Haares. Man kann so einen ganzen Satz von Reizhaaren mit verschiedenem Reizwert herstellen, der der Empfindlichkeit der einzelnen Hautpartien angepaßt ist.

Bei dieser punktförmigen oder kleinstflächigen Reizung der Haut ergibt sich, daß auf der *unbehaarten Haut* im Mittel 100 Druckpunkte auf 1 qcm kommen; auf der Volarseite des Handgelenks findet man 12—41, am Daumenballen 111—135 pro qcm (v. FREY, KIESOW). Auf der *behaarten Haut*, welche weitaus den größten Teil, etwa 95% der Körperbedeckung ausmacht, gehört im allgemeinen zu jedem Haar auch ein Druckpunkt, welcher meist an bestimmter Stelle gelegen ist, nämlich auf derjenigen Seite neben dem Haarschaft, wo dieser in schräger Richtung aus der Haut in stumpfem Winkel heraustritt, d. h. also senkrecht über dem Haarbalg. Im Mittel kann man rechnen, daß auf der Haut auf 25 Druckpunkte 13 Kältepunkte und 1,5 Wärmepunkte kommen (siehe Abb. 246).



Abb. 247. Reizhaar nach v. FREY.

Jeder Druckpunkt ist mit einem *Lokalzeichen* behaftet (LOTZE), d. h. die von ihm ausgehende Empfindung wird auf eine bestimmte Stelle der Haut bezogen, so daß man nachträglich angeben kann, welche Hautstelle gereizt wurde. Die Schärfe der Lokalisation ist aber verschieden groß, bei den Druckpunkten der behaarten Haut im allgemeinen geringer, als bei denen der unbehaarten Haut. Das Lokalzeichen ist im übrigen keine Sondereigenschaft der Druckpunkte, sondern kommt auch den Temperaturpunkten, den Punkten der Netzhaut und einigermassen auch den Schmeckorten zu.

Ähnlich wie die Wärme- und Kältepunkte, so sind auch die Druckpunkte inadäquater Reizung zugänglich; wenigstens sprechen die Druckpunkte außer auf Druck auch auf einen elektrischen Reiz an.

Die nächste Frage ist nun, was die **Drucksinnesorgane** sind, deren Projektion die Druckpunkte repräsentieren. Geht man von dem Druckpunkt neben einem Haar senkrecht in die Tiefe, so stößt man in der Cutis auf einen *Nervenkranz*, welcher den Haarschaft umgibt (BONNET). Seine Anwesenheit macht die Sinnesfunktion der Haare in ausgezeichneter Weise verständlich. Man spürt ja jedes leise Streichen über die Haare hinweg; dabei werden die Hebelbewegungen an dem langen, aus der Epidermis herausragenden Haar auf den kurzen Hebelarm des in die Cutis eingepflanzten Haarschaftes übertragen und bewirken kräftige Zerrungen an dem Nervenkranz. Dies ist offenbar die eigentliche Funktion der Nervenkränze, weniger die Perzeption des Druckes, welcher von dem neben dem Haar gelegenen Druckpunkt aus ausgeübt wird. An der unbehaarten Haut, d. h. an den eigentlichen Tastflächen, wie vor allem den Handtellern, sind es nach v. FREY die *MEISSNERschen Tastkörperchen*, welche als Drucksinnesorgane zu gelten haben; denn sie allein

kommen in genügend großer, der Zahl der Druckpunkte entsprechender Menge vor.

Vorher war auch von der Unterscheidung von *Berührungs- und Druckempfindungen* die Rede. Namentlich klinische Beobachtungen werden für diese Unterscheidung angeführt; denn es kommen Fälle vor, in denen bloß die oberflächlichen Berührungen perzipiert, dagegen starke Drucke nicht als etwas Besonderes empfunden werden, wie auch umgekehrt in anderen Fällen bloß die starken Drucke und nicht die flüchtigen Berührungen wahrgenommen werden (STRÜMPPELL). Man kann auch die Berührungsempfindlichkeit für sich allein durch Durchschneidung von Hautnerven zum Verschwinden bringen. Danach ist anzunehmen, daß die Druckempfindung, mindestens zum Teil, durch Druck auf die in der Tiefe gelegenen Muskeln, Sehnen oder Faszien ausgelöst wird. Als Sinnesorgane werden vielfach die VATER-PACINISCHEN *Körperchen* angesehen, welche sich besonders in diesen Organen vorfinden.

Die kleinstflächige Reizung der Haut mit den Reizhaaren, wie sie zur Entdeckung der Druckpunkte notwendig ist, ist eine ungewöhnliche Art der Druckerzeugung. Im allgemeinen werden Druckempfindungen durch Berührung mit größeren Flächen verursacht. Stellt man nun die Schwellenwerte des Druckes bei verschiedener Flächengröße fest, so stößt man auf Beobachtungen, welche zu einer Vorstellung über die **Natur der Erregung des Drucksinnes** führen. Druckempfindung kommt nämlich nicht einfach dann zustande, wenn an einer Stelle ein bestimmter Druck überschritten wird. Sondern es zeigt sich, daß bei einer Reizfläche von etwa 0,5 qmm der aufzuwendende Druck ein Minimum hat, daß also die Druckschwelle sowohl bei der Verkleinerung, wie bei der Vergrößerung dieser Angriffsfläche steigt (v. FREY, KIESOW). Daß eine großflächige Reizung weniger wirksam ist, lehrt besonders deutlich der sog. *MEISSNERSCHE Versuch*: taucht man den Arm in körperwarmes Quecksilber, so spürt die Hand trotz des beträchtlichen auf ihrer Haut lastenden hydrostatischen Druckes nichts; nur in dem ringförmigen Bezirk, wo der Arm aus dem Quecksilber austaucht, kommt eine ringförmige Druckempfindung zustande. Dieser Erscheinung hat v. FREY folgende Deutung gegeben: *Druckempfindung entsteht dann, wenn die Drucksinnesorgane in ein Druckgefälle zu liegen kommen; dafür ist eine Deformation der Haut die Voraussetzung*. Beim MEISSNERSCHEN Versuch kann nur dort, wo die Haut aus dem Quecksilber herausragt, eine Deformation durch Verdrängung von Gewebsflüssigkeit zustandekommen, im übrigen verhält sich der Arm als inkompressibel. Wie größtflächige Drucke, so sind aber auch die kleinstflächigen wenig oder gar nicht wirksam, weil bei punktförmiger Ausübung des Druckes die Deformation der Haut nicht über die Epidermis hinaus in die Cutis hineinreicht, in welcher die Tastkörperchen liegen.

Dieselbe v. FREYSche Deutung erklärt auch gut die *Drucknachempfindungen*, wie man sie z. B. erhält, wenn man eine Münze gegen die Stirnhaut preßt und sie dann abhebt; der Druck verursacht eben eine nachhaltige Deformation durch Verschiebung von Gewebswasser.

Auch die *Geschwindigkeit*, mit welcher der Druck auf die Haut ausgeübt wird, ist für die Erregung von Bedeutung; je größer die Deformationsgeschwindigkeit ist, um so niedriger liegt der Schwellenwert des Druckes.

Man könnte nun vielleicht erwarten, daß, wenn die Haut mit einer größeren Fläche gedrückt wird, man jeden einzelnen Druckpunkt für sich fühlen sollte, während man doch in Wirklichkeit die Fläche als ein Kontinuum wahrnimmt. Diese Feststellung führt zu der Frage, *was geschieht, wenn zwei nahe benachbarte Hautstellen zu gleicher Zeit*

gedrückt werden. Es zeigt sich, daß durchaus nicht bei jedem beliebigen Abstand zwei Reize zwei Empfindungen geben, sondern daß unterhalb einer bestimmten Distanz, welche je nach der Hautstelle verschieden groß ist, die zwei Empfindungen zu einer verschmelzen. E. H. WEBER fand (1834) beim gleichzeitigen Aufsetzen zweier Zirkelspitzen folgende Schwellenwerte:

Zungenspitze	1 mm	Handrücken	31,6 mm
Fingerkuppe	2 „	Kniescheibe	36,1 „
Lippenrot	4,5 „	Vorderarm, Unterschenkel	40,6 „
Nasenspitze	6,8 „	Brustbein	45,1 „
Metakarpus d. Daumens .	9 „	Oberarm	60 „
Wange	11,3 „	Mittlerer Nacken	67,7 „
Vord. Jochbeingegend . .	15,8 „	Mittlerer Rücken	67,7 „

Den Bezirk, innerhalb dessen die von den zwei Zirkelspitzen ausgelösten Erregungen zu einer einzigen Empfindung verschmelzen, bezeichnete WEBER als einen *Empfindungskreis*. Die angegebenen Werte werden wohl auch *Raumschwellen* oder *Simultanschwellen* genannt.

Die Tabelle lehrt, daß der „Ortssinn“ der Haut, d. h. die Unterschiedsempfindlichkeit für die örtlich verschiedenen Reize außerordentlich variiert. An der Zungenspitze erfolgt die Verschmelzung der zwei Reize erst diesseits 1 mm, auf dem Rücken schon diesseits 6,8 cm. Es fragt sich, wie man die Erscheinung erklären soll. VIERORDT hat darauf aufmerksam gemacht, daß im allgemeinen *die Raumschwelle eine Funktion der Beweglichkeit* der gereizten Stelle ist; je mehr eine Hautstelle bewegt wird und dadurch Gelegenheit erhält, mit den Objekten der Umgebung in Berührung zu kommen, um so kleiner sind ihre Empfindungskreise. Ferner zeigt sich, daß durch *Übung* die Empfindungskreise kleiner werden, und daß die Übung an einer Stelle die Empfindungskreise an einer symmetrischen Körperstelle mit verkleinert. Dagegen werden die Schwellenwerte durch körperliche und geistige *Ermüdung* vergrößert (GRIESBACH). Diese verschiedenen Beobachtungen lehren schon, daß für die Größe der Empfindungskreise offenbar nicht, so wie es WEBER ursprünglich annahm, die Verbreitung der Hautnerven verantwortlich ist, daß nicht ein Empfindungskreis der Ausbreitung einer die Druckempfindung vermittelnden Nervenfasern entspricht. Gegen solch eine anatomische Deutung spräche auch, daß die Dichte der Druckpunkte keineswegs im umgekehrten Verhältnis zu der Größe der Empfindungskreise steht. Vielmehr kommt es offenbar auf kompliziertere zentralnervöse bzw. psychische Momente an. Vielleicht ist der verschiedene Ortssinn der Haut mit der verschiedenen Sehschärfe der einzelnen Netzhautpartien vergleichbar; diejenige Stelle der Netzhaut, welche wir am meisten zum Sehen gebrauchen, die Fovea centralis, hat auch die größte Sehschärfe, d. h. mit ihr vermögen wir zwei leuchtende Punkte in geringerer Distanz voneinander zu unterscheiden, als mit irgend einer anderen Stelle.

Von der Größe der Empfindungskreise hängt auch unser Urteil über den Abstand zweier gedrückter Punkte, also sozusagen unser taktiles Augenmaß ab. Setzt man z. B. zwei Zirkelspitzen vor dem Ohr auf und führt sie in der Richtung zum Mundwinkel, also in der Richtung nach kleineren Empfindungskreisen, so scheinen sie auseinanderzuweichen.

Ganz anders ist die Unterschiedsempfindlichkeit der Haut, wenn wir nicht simultan, sondern kurz nacheinander (am besten in einem

Intervall von 1") die zwei Druckreize ausüben und die kleinste Distanz aufsuchen, bei welcher die beiden Reize eben als örtlich verschieden aufgefaßt werden. Es zeigt sich nämlich, daß die so gefundenen **Sukzessivschwellen** (v. FREY) viel kleiner sind als die Simultanschwellen, und daß im allgemeinen *die Sukzessivschwelle gleich dem Abstand zweier Druckpunkte* ist. Bei der Minimaldistanz, in welcher zwei Hautpunkte voneinander unterschieden werden, kann man aber nur aussagen, daß eben zwei verschiedene Punkte gereizt wurden; will man auch über die Richtung des einen im Verhältnis zum anderen aussagen, so muß die Distanz ungefähr verdoppelt werden; die **Richtungsschwellen** sind also größer als die einfachen Sukzessivschwellen (v. FREY und METZNER).

Aus all dem folgt — wie schon in der Einleitung zu diesem Kapitel bemerkt wurde —, daß der Drucksinn zahlreiche Elemente zum Aufbau unserer Raumvorstellung beiträgt, darin allein dem Auge vergleichbar. Wir fanden, daß er den Eindruck der Örtlichkeit, der Distanz zweier Reize, der bestimmten Richtung und des Flächenhaften vermittelt. Erheblichere Beiträge liefert er noch in Kombination mit anderen Sinnen, welche namentlich durch Bewegungen unseres Körpers betätigt werden; dadurch werden „Bewegungsempfindungen“, „Widerstandsempfindungen“, „Schwereempfindungen“ u. a. wachgerufen, welche die Vorstellungen des Großen und Kleinen, des Bewegten und Ruhenden, des Harten und Weichen, des Schweren und Leichten, des Spitzigen und Stumpfen und dergleichen mitbedingen. Auf einen Teil dieser Sinnesleistungen werden wir noch im folgenden Kapitel zu sprechen kommen; von einer erschöpfenden Analyse des Tastraums kann aber hier nicht annähernd die Rede sein, ebensowenig wie früher die Analyse des optischen Raums über ihre Anfänge hinausgehen konnte.

Wenden wir uns nun dem **Schmerzsin** zu! Er beansprucht in mancher Hinsicht unser besonderes Interesse. Denn wir haben es erstens mit einem Sinn zu tun, welcher in unserm Körper besonders weit verbreitet ist; nicht bloß die Haut kann uns Schmerzen bereiten, sondern auch zahlreiche andere Organe. Zweitens ist der Schmerz so wie keine andere Empfindung mit dem intensiven Gefühl der Unlust, des Unangenehmen assoziiert; zwar gibt es auch manche widerwärtige Gerüche und Geschmacksstoffe, welche durch die gleiche Gefühlsbetonung ausgezeichnet sind, es gibt gewisse Tonkombinationen, Disharmonien, welche Unlust erregen, aber das starke Unlustgefühl gehört fast zu jeder Art von Schmerz dazu. Und darin liegt das wesentlichste Moment für die große biologische Bedeutung des Schmerzes; denn die Reaktionen der Tiere bestehen, vom psychologischen Standpunkt aus betrachtet, im allgemeinen darin, Lust zu suchen und Unlust zu meiden, vom physiologischen Standpunkt aus darin, zerstörenden Reizen — und das sind fast immer die Schmerz verursachenden Reize — aus dem Wege zu gehen, und auch für den Arzt ist es eine der Hauptaufgaben, seine Mitmenschen, die von Schmerzen geplagt werden, von diesen zu befreien.

Sehen wir nun genauer zu, was alles uns schmerzen kann. Krankhafte Zustände lehren, daß außer der Haut auch Magen, Darm und Peritoneum, Leber, Niere und Genitalorgane, die Meningen, Knochenhöhlen, Muskeln, Gefäße, Auge und Ohr und andere Organe lebhaft, gelegentlich fast unerträgliche Schmerzen bereiten können. In höchst merkwürdigem Gegensatz zu diesen Erfahrungen stehen die Angaben vieler

Chirurgen, die namentlich seit Beginn der Ära der Lokalanästhesie sich gehäuft haben, daß die Operationen an inneren Organen sich ohne jede Schmerzäußerung von seiten der Patienten vornehmen lassen. Auch das Tierexperiment unterstreicht anscheinend diesen Widerspruch; denn wenn man z. B. bei einem Kaninchen die Schmerzempfindbarkeit sogar noch durch Strychninisierung derart steigert, daß schon eine leichte Berührung der Haut allgemeine Krämpfe auslöst, so bleibt doch das Tier vollkommen ruhig, wenn man die freigelegten Eingeweide, wie Magen, Darm, Leber oder Lunge, berührt, schneidet oder sticht (KREIDL und SANO).

Danach kann man auf die Vermutung kommen, daß die Krankhaftigkeit der Organe den Unterschied in ihrer Reaktion bedingt, und darin liegt wohl auch, wenigstens teilweise, der Schlüssel zum Verständnis der verschiedenen Beobachtungen. Nämlich in der Krankheit wirken auf die Organe meistens Reize, welche mit Berührungs- oder Schnittreizen nicht vergleichbar sind, wie z. B. chemische Reize, Reize durch mangelhafte Durchblutung, durch Quetschung oder Zermalmung. In der Tat kann man bei Fröschen und Kaninchen durch Essigsäure von Herz, Magen und Darm aus Reaktionsbewegungen hervorrufen (KREIDL und SANO), während beispielsweise die Unempfindlichkeit des Herzens gegen Schnitte oft konstatiert wurde. Auch durch Quetschen des Darms zwischen den Fingern oder durch Dehnen ließen sich Schmerzäußerungen bewirken, während andere Organe, wie die Nieren oder die Milz, dabei nicht schmerzhaft schienen. Die Versorgung mit sensiblen Nervenfasern geschieht vor allem vom N. splanchnicus aus (s. dazu S. 415); denn wenn man diesen zuvor durchschneidet oder beim Menschen ihn durch Einstich einer Kanüle neben der Wirbelsäule unterhalb der 12. Rippe und Injektion von Novokain anästhesiert (KAPPIS), so schwindet die Schmerzhaftigkeit und bleibt nur in den unteren Darmabschnitten, in der Flexur und im Rektum erhalten, welche nicht vom N. splanchnicus versorgt werden. Auch von der Lunge aus sind durch Kneifen mit einer Pinzette, durch Brennen oder Betupfen mit Essigsäure beim Frosch Reaktionen auszulösen; sie erfolgen nicht, wenn man zuvor die N. vagi durchschneidet (A. NEUMANN).

Zum Teil beruht der Gegensatz zwischen den Angaben der Chirurgen und den landläufigen Erfahrungen über die Schmerzhaftigkeit der inneren Organe aber wohl noch auf etwas anderem (LENNANDER): während nämlich das Peritoneum viscerale ebenso wie die Pleura pulmonalis gegen Stich, Schnitt oder elektrische Schläge unempfindlich sind, sind das Peritoneum parietale und die Pleura costalis in der gewöhnlichen Weise, so etwa wie die Haut, schmerzhaft. Der Unterschied hängt jedenfalls damit zusammen, daß die ersteren von sympathischen und parasympathischen, die letzteren von zerebrospinalen Nervenfasern versorgt werden. LENNANDER hält nun dafür, daß die Schmerzen der inneren Organe häufig nur scheinbar von diesen selbst ausgehen, daß vielmehr durch krampfartige Dauerkontraktionen, durch Zerrung bei Bestehen von Verwachsungen, durch infektiöse Stoffe, welche von den Organen abgegeben werden, und ähnliches die zerebrospinalen Fasern gereizt werden. Wie weit dies im allgemeinen in Betracht kommt, ist schwer zu sagen; die Hauptsache ist wohl die nachweislich vorhandene, nur eben an bestimmte adäquate Reize gebundene direkte Schmerzhaftigkeit der Organe.

Am genauesten untersucht ist der **Schmerzsin** der Haut. Er vermittelt Empfindungen, welche anscheinend nicht bloß intensiv, sondern auch qualitativ verschieden sind. THUNBERG unterscheidet vor allem den *stechenden* und den *dumpfen Schmerz*. Ersterer wird etwa durch Schneiden, durch Stechen oder Kneifen der Haut mit dem Fingernagel ausgelöst, letzterer dann, wenn man eine größere Hautfalte aufhebt und diese zwischen den Fingern quetscht. Der dumpfe Schmerz wird mehr auf die Tiefe, der stechende auf die Oberfläche bezogen.

Die *Reize*, welche den Schmerz in der Haut auslösen, sind überaus mannigfaltig; Druck, Wärme, Kälte, elektrische Ströme und Chemikalien sind oberhalb einer gewissen Reizgröße gleich wirksam.

Daraus folgt jedoch nicht, daß Schmerz nichts weiter ist als gesteigerter Druck oder gesteigerte Kälte oder gesteigerte Wärme; vielmehr ist er eine *Empfindung sui generis, welche an besondere Sinnesorgane gebunden ist*. Darauf verweist eine ganze Reihe von Beobachtungen, welche zum Teil schon früher (siehe S. 525) angeführt wurden. Erstens kann die Schmerzhaftigkeit für sich fehlen, während die anderen Hautsinne erhalten sind; man spricht dann von *Analgesie*. Die Analgesie beobachtet man z. B. bei nicht zu tiefer Narkose; man fühlt dann eventuell die Durchtrennung der Haut mit einem Messer, aber nur als Druck, nicht als schmerzhaft. Analgesie ist ferner ein Symptom der seltenen Syringomyelie, dieser mit Höhlenbildung im Rückenmark einhergehenden Erkrankung, bei welcher die Berührungsempfindlichkeit intakt bleiben kann (siehe S. 363). Analgesie zeichnet auch bestimmte Stellen der normalen Wangenschleimhaut aus (KIESOW).

Zweitens wird die Besonderheit des Schmerzsinns durch die einfache Beobachtung bewiesen, daß, wenn man die Haut möglichst kleinflächig, also z. B. mit einer Nadelspitze reizt, primär, d. h. ohne Voraufgehen irgendwelcher anderer, insbesondere Druckempfindungen Schmerz auftritt. Charakteristisch ist dabei, daß der Empfindung ein auffallend langes Latenzstadium vorausgeht. Mit davon hängt es ab, daß der Schmerz bei Steigerung der Reizintensität aus dem Druck, der Wärme oder der Kälte direkt hervorzugehen scheint. Denn wenn man statt mit einer so kleinen Fläche, wie einer Nadelspitze, deren Reizwert zur Erregung des Drucksinnes sehr gering ist (siehe S. 530), mit einer etwas größeren Fläche die Haut in steigendem Maße drückt, so kommt zu der anfänglichen Druckempfindung nachträglich, eben entsprechend der größeren Latenzzeit, die Schmerzempfindung hinzu. Dabei ist weiter von Bedeutung, daß, wenn die Haut mit einer einige Quadratmillimeter großen Fläche gedrückt wird, der Schwellenwert für die Schmerzempfindung etwa tausendmal so hoch liegt, als der für die Druckempfindung (v. FREY).

Drittens sind die Wärme- und Kältepunkte, wenn man in sie hineinsticht, analgetisch. Dagegen gibt es nach v. FREY eigene *Schmerzpunkte*, welche sich von den übrigen Sinnespunkten der Haut sondern lassen. Sie sind allerdings schwer nachzuweisen, weil sie sehr dicht stehen; sie werden darum von manchen bestritten.

Die Feststellung, daß der Schmerzsin ein Sinn für sich ist, stellt uns nun wiederum vor die Aufgabe, einem der vielen verschiedenartigen Hautsinnesorgane die Schmerzfunktion zu vindizieren. v. FREY vertritt die Ansicht, daß *wahrscheinlich in den freien Nervenendigungen der Haut*

Schmerzsinneseorgane zu erblicken sind. Diese liegen nämlich oberflächlicher als irgend ein anderes Hautsinnesorgan, im Stratum germinativum der Epidermis; für eine besonders oberflächliche Lage der Schmerzorgane sprechen aber mehrere physiologische Gründe: die kleinstflächigen Drucke, welche man mit einer Nadel ausübt, und welche primär Schmerz erzeugen, erstrecken ihre Wirkung nicht über die Epidermis hinaus, erzeugen daher keine Druckempfindung; chemische Reizung, z. B. die Ätzung mit einer Säure, erzeugt primär Schmerzempfindung, und lähmt man die Hautsinne von der Oberfläche aus mit Kokain, mit Phenol oder auch durch Kälte, so wird zuerst der Schmerz ausgeschaltet (v. FREY). In die gleiche Richtung deutet der Hinweis von v. FREY, daß die Mitte der Kornea, welche nur Schmerzempfindlich ist, auch nur freie Nervenendigungen als einzige Sinnesorgane enthält.

35. Kapitel.

Lage- und Bewegungssinne.

Die Perzeption der Lage und Bewegung einzelner Körperteile 536. Die Perzeption der Lage und Bewegung des ganzen Körpers 538. Drehschwindel und galvanischer Schwindel 540. Die Erhaltung des Gleichgewichts durch die Massenverteilung im Körper 542. Labyrinthexstirpationen zum Nachweis des statischen Sinns 543. Die Bogengangsfunktion 546. Die Statozystenfunktion 549.

In diesem letzten Kapitel der Sinnesphysiologie handelt es sich um die Funktion von Organen, welche weniger von der Beschaffenheit der Außenwelt Kenntnis geben als von Zuständen unseres eigenen Körpers; wir können also von propriozeptiven Erregungen (siehe S. 347) sprechen, welche sie vermitteln, und sie dem Schmerzsinne, dem Kälte- und dem Wärmesinne an die Seite stellen, welche ja ebenfalls zum Teil auf innerliche Veränderungen hin ansprechen. Eigenartig ist, daß manche dieser Sinnesorgane nur höchst undeutliche Empfindungen verursachen, ja teilweise sogar gar keine, so daß wir dann ihre Bedeutung nur an den motorischen Effekten ihrer Erregung erkennen können.

Als Organe des Lage- und Bewegungssinns werden die Organe bezeichnet, weil sie *die Lage des Körpers im Raum, seine Haltung, seine passiven und aktiven Bewegungen, sowie die Bewegungen seiner einzelnen Teile gegeneinander* perzipieren. Schon die flüchtige Analyse der dabei ausgelösten Empfindungen lehrt, daß meist mehrere Sinnesorgane zugleich in Aktion treten.

Beginnen wir mit der **Perzeption der Lage und Bewegung einzelner Körperteile**, insbesondere der Gliedmaßen! Wie man sich jederzeit überzeugen kann, bedarf es nicht erst des Hinsehens, um zu wissen, welche Haltung etwa Arme und Beine oder auch die einzelnen Finger einnehmen. Schwieriger ist es schon, die Stellung der Zunge zu beurteilen, wenigstens solange sie nirgends die Wandung der Mundhöhle berührt, und noch weit unvollkommener sind wir über die Lage des weichen Gaumens oder gar des Kehlkopfes unterrichtet, die wir für gewöhnlich sogar überhaupt nicht empfinden. Verharren die Gliedmaßen längere Zeit in vollkommener Ruhe, so fällt auch bei ihnen die Orientierung schwer; jede Bewegung verdeutlicht sofort das Bild, das wir uns von ihrer Haltung machen.

Daß für diese Leistungen besondere, in den einzelnen Körperteilen gelegene Sinnesorgane verantwortlich zu machen sind, zeigen die seltenen klinischen Fälle, in denen bei Erhaltensein der Motilität ausschließlich die Sensibilität aufgehoben ist. So beschrieb STRÜMPPELL einen Patienten,

welcher infolge eines Stichs in das Halsmark, offenbar in dessen rechte dorsale Partie, die gesamte Empfindlichkeit des rechten Armes eingebüßt hatte; der Patient wußte, wenn er nicht hinsah, nichts von diesem Arm; wenn er ihn aber unter Führung der Augen in eine bestimmte Haltung, sagen wir in eine Streckstellung im Ellbogen und in den Fingergelenken gebracht hatte und alsdann die Augen schloß, so verlor sich die Streckstellung allmählich, ohne daß es dem Patienten zu Bewußtsein kam. Auch auf experimentellem Wege ist die Bedeutung der Sensibilität für die Einnahme einer bestimmten Haltung und für die Ausführung von Bewegungen nachgewiesen; so ist hier an die früher beschriebenen Folgen der Durchschneidung der hinteren Wurzeln zu erinnern, welche in Tonusverlust, schweren Koordinationsstörungen und Ataxie zum Ausdruck kommen (siehe S. 349 und 364), und welche als Folgen eines Mangels der sensiblen Kontrolle der Muskeltätigkeit aufgefaßt wurden.

Als Organ des Lage- und Bewegungssinns für die einzelnen Körperteile ist in erster Linie die Haut anzusehen. Bei Einnahme starker Beuge- und Streckstellungen spürt man ja unmittelbar den Druck auf der Beuge-, den Zug auf der Streckseite, es ist also der Drucksinn der Haut, welcher dann in Aktion tritt. Auch die Reibung der sich verschiebenden Kleider läßt die Bewegungen durch die Haut perzipieren. Doch da die Lage- und Bewegungsempfindungen für gewöhnlich nur undeutlich sind, sich insbesondere auch schlecht lokalisieren lassen, so bedarf es entschiedenerer Beweise für die Bedeutung des Hautsinns. v. FREY und O. B. MEYER haben den kleinsten Winkel aufgesucht, über den hinaus eine passive Drehung im Ellbogengelenk vorgenommen werden muß, damit die Drehrichtung eben erkannt wird; sie fanden den Schwellenwert bei etwa 1°. Dieser Schwellenwert wird nun um das Mehrfache seines Normalwertes erhöht, wenn die Haut unterhalb oder auch in der Umgebung des Gelenks mit Wechselströmen gereizt und dadurch in ihren Angaben gestört wird, oder wenn man an denselben Partien die Haut mit Kokain anästhesiert. Bei Kokainisierung der Haut des ganzen Unterarms konstatierte v. FREY an sich selber, daß er unfähig war, ohne Kontrolle der Augen die Gabel in den Mund zu führen oder eine Schüssel wagerecht zu halten, und der Finger, der das Auge berühren sollte, geriet weit daneben. Andererseits werden freilich auch Fälle von Hautanästhesie, z. B. bei Syringomyelie, beschrieben, in denen die Koordination der Bewegungen wenig an Präzision eingebüßt hatte.

Dies deutet schon darauf hin, daß außer der Hautempfindlichkeit zur Beurteilung der Lage und der Bewegung auch die „*Tiefensensibilität*“ verwertet wird. Von einer solchen können wir auf Grund unserer früheren Erfahrungen über die tiefen Reflexe sprechen (siehe S. 343). Die *Sehnenreflexe* werden ja durch plötzliche Spannung der Sehnen, die *Periostreflexe* durch Beklopfen des Periosts ausgelöst, und daß die *Muskeln*, indem sie sich anspannen, die eigenen in ihnen enthaltenen sensiblen Endorgane erregen, beweist etwa SHERRINGTONS Experiment der Antagonistenhemmung durch bloßen Druck auf den „*Agonisten*“ (siehe S. 347).

Von GOLDSCHIEDER ist für die Beurteilung von Bewegungen die *Gelenksensibilität* ganz in den Vordergrund gerückt worden, wesentlich wegen der Vergrößerung der Beurteilung bei Elektrisierung der Gelenke. Aber wie die Kokainversuche von v. FREY lehren, kommt es weniger auf die Gelenke als auf die Haut in deren Umgebung an. Zudem haben

STRÜMPPELL und v. FREY an geeigneten chirurgischen Fällen festgestellt, daß auch dann, wenn durch Resektion die Gelenkenden vollständig entfernt sind, die passiven Bewegungen mit der gleichen Feinheit abgeschätzt werden können, wie unter normalen Verhältnissen, solange die Haut über dem Gelenk ihre volle Empfindlichkeit besitzt, und zwar zu einem Zeitpunkt nach der Operation, wo von einer Wiederherstellung der Gelenksensibilität durch Auswachsen von Nervenfasern noch nicht die Rede sein kann. Gegen die Bedeutung eines Gelenksinnes kann man auch geltend machen, daß selbst bei den Gehbewegungen, die in Knie- und Hüftgelenk sehr große Schwankungen in der Belastung der Gelenkflächen hervorrufen, keinerlei von den Gelenken ausgehende Sensationen festzustellen sind.

Wie weit nun aber Perzeptionen von seiten der Sehnen, Faszien und Muskeln bei der Beurteilung der Lage und Bewegung wirklich mitspielen, ist nicht leicht abzuschätzen. Bei extremen Beuge- und Streckstellungen, etwa im Hüft- oder Kniegelenk oder in den Fingern, sind die entsprechenden Zerrungen in den Gelenkbändern und Faszien wohl zu spüren; für eine Beteiligung unter gewöhnlichen Bedingungen kann man aber eigentlich nur die Sehnenreflexe anführen. Ebenso spürt man nur stärkere Muskelanspannungen deutlich in den Muskeln. Aber auch der sog. *Kraftsinn* (E. H. WEBER), d. h. die Fähigkeit, die Belastung eines Gliedes mit einem Gewicht eben wahrzunehmen, beruht wohl im wesentlichen auf einer Empfindlichkeit der Muskeln. v. FREY hat den Kraftsinn neuerdings so geprüft, daß er den ganzen Arm in eine eng anschließende steife Hülse einschloß und auf diese an der einen oder anderen Stelle Gewichte auflegte, die wegen der Größe der Unterstützungsfläche nicht als Druck auf die Haut wirken konnten (siehe S. 530); wenn unter diesen Verhältnissen beim Abheben des Armes von der Unterlage ein gewisser Belastungszuwachs erkannt wird, so kann das eigentlich nur mit Hilfe der Muskelsensibilität geschehen, da von einer Gelenksensibilität aus den vorher angeführten Gründen abgesehen werden kann. Auch die vollkommene Beurteilung von Gewichtsunterschieden, die (nach SAUERBRUCH) Amputierte mit Hilfe ihrer isolierten, an der Prothese angreifenden Muskelstümpfe zustande bringen, spricht für die Wirksamkeit des Muskelkraftsinns; hier kommt die Gelenksensibilität natürlich gar nicht in Frage. Ob im allgemeinen für die Taxierung von Lage und Bewegung aber viel auf die Muskeln ankommt, ist unsicher; z. B. werden die Bewegungen der Finger, deren Muskulatur im Unterarm gelegen ist, durchaus nicht in diesem, sondern in der Hand gespürt.

Nach all dem ist es also doch wohl der Drucksinn der Haut, welcher bei der Beurteilung der Lage und der Bewegung der Gliedmaßen die Hauptrolle spielt.

Wenden wir uns nun der **Perzeption der Lage und der Bewegung des ganzen Körpers** zu! Auch hierfür wird man — abgesehen von den Augen — in allererster Linie den Drucksinn der Haut in Anspruch nehmen. Denn mag man stehen oder irgendwie liegen, so werden jedenfalls bestimmte Stellen der Haut von der Unterlage gedrückt und bringen diesen Druck zum Bewußtsein. Insbesondere unterrichten uns beim Stehen die Fußsohlen schon über geringfügige Schwankungen des Körpers. Dies lehrt das Verhalten von Patienten mit Sensibilitätsstörungen, welche bei geschlossenen Augen leicht umstürzen, weil sie den Druck auf die

Sohle nicht genau genug wahrnehmen. Auch der Flieger, welcher sich in den Nebel verirrt hat, kann alle Orientierung über seine Lage im Raum verlieren, weil die Haut seines Gesäßes lange nicht so fein auf Druckschwankungen reagiert wie die Sohlenhaut, welche von früh auf in der Beurteilung der Beziehungen des Körpers zu seiner Unterlage geübt worden ist. Immerhin gibt es auch unabhängig von den Augen und von der Haut noch einen besonderen *Sinn für die Lage des Körpers*, wie besonders aus dem Verhalten unter Wasser folgt. Denn auch unter dieser Bedingung, wo auf keiner Stelle der Haut ein stärkerer Druck lastet, besitzt der Normalsinnige doch eine bestimmte Vorstellung über oben und unten; wenn er z. B. durch einen Sprung tief unter Wasser geraten ist, so wird er doch stets durch einige Schwimmstöße die Oberfläche wieder gewinnen. Sein Orientierungsmittel könnte dabei auf der verschiedenen Verteilung der spezifischen Gewichte in seinem Körper beruhen, insofern als z. B. die schweren Beine nach unten sinken. Daß aber noch *ein besonderes im Kopf gelegenes Sinnesorgan* zur Mitwirkung gelangt, darauf verweist die Beobachtung von JAMES, daß Taubstumme oft, in etwa 60% der Fälle, unter Wasser vollkommen desorientiert sind und deshalb Gefahr laufen zu ertrinken. Mit ihrer Taubheit hat dies, wie wir sehen werden, nichts zu tun, sondern mit der Zerstörung von besonderen Abschnitten ihres Labyrinths.

Nicht nur die Lage, sondern auch die *passive Bewegung des ganzen Körpers* wird zu einem guten Teil mit Hilfe der Haut an den Unterstützungsflächen des Körpers aufgefaßt. Aber nicht die gleichförmige Geschwindigkeit wird perzipiert, sondern die positive oder negative Beschleunigung (MACH). Sitzt man z. B. im fahrenden Eisenbahnzug, so kann man bei geschlossenen Augen zweifeln, ob man fährt, und wenn man es weiß, so ist man doch oft über die Richtung vollkommen im unklaren. Sobald aber der stehende Zug sich in Bewegung setzt, spürt man die Richtung, weil infolge der Trägheit der Körper die Bewegung nicht gleich mitmacht, so daß sich der Druck auf die Haut an den Unterstützungsflächen ändert. Eine negative Beschleunigung löst öfter, z. B. im Fahrstuhl, die Täuschung einer Bewegung im entgegengesetzten Sinne aus.

Was für die Progressivbewegung gilt, das gilt in entsprechender Weise auch für die *Drehbewegung*. Bei dieser beobachtet man aber außerdem eine eigentümliche Täuschung auch bei konstanter Winkelgeschwindigkeit, nämlich die Vertikale erscheint nicht mehr vertikal, sondern an ihrer Stelle eine Schräge, welche die Resultante von Schwerkraft und Zentrifugalkraft darstellt (MACH). Bekannt ist in dieser Hinsicht, daß beim Durchfahren einer Kurve im Eisenbahnwagen Kirchtürme oder Telegraphenstangen schief zu stehen scheinen. Die Erscheinung beruht auf einer reflektorischen Raddrehung der Augen. KREIDL hat nun gefunden, daß diese eigentümliche Störung bei einer größeren Zahl von Taubstummen fehlt. Wir werden also abermals auf den Zusammenhang der Labyrinthfunktion mit der Orientierung über die Lage im Raum hingewiesen und erfahren zugleich, daß diese Orientierung zum Teil durch Vermittlung der Augen vor sich geht.

Die passive (oder auch aktive) Drehbewegung erzeugt noch eine andere Täuschung; nämlich wenn die Drehung plötzlich unterbrochen wird, so hat man bei geschlossenen Augen noch einige Zeit die Nachempfindung einer Drehung im entgegengesetzten Sinn; hält man die Augen offen, so scheinen die Gegenstände der Umgebung sich im gleichen

Sinn, wie bei der Drehung, zu bewegen. Auch dieser **Drehschwindel** wird durch das Labyrinth ausgelöst; dafür spricht die Feststellung von JAMES, daß von 519 Taubstummen 186 durch Rotation nicht schwindelig zu machen waren, während von 200 Gesunden sich nur 1 schwindelfrei zeigte. Noch eine andere Beobachtung lehrt, daß der Drehschwindel im Kopf entsteht. Sitzt man in gewöhnlicher Haltung auf einem Drehstuhl, so erfolgt die nachträgliche Scheindrehung um eine vertikale Achse; hält man dagegen den Kopf während der Rotation stark nach vorn oder hinten geneigt, so hat man hinterher ungefähr das Gefühl, als drehe man sich wie in einer „russischen“ Schaukel um eine horizontale Achse (PURKINJE).

Ferner hat MÉNIÈRE ein nach ihm benanntes Symptomenbild kennen gelehrt, dessen Eigenart in der Kombination von plötzlichen schweren Schwindelanfällen mit Taubheit und Augenverdrehung besteht; pathologisch-anatomisch findet man dabei häufig Blutungen im inneren Ohr.

Endlich kann man Schwindel auch dadurch hervorrufen, daß man durch den Kopf einen konstanten elektrischen Strom hindurchschickt, indem man die Elektroden auf die Processus mastoidei aufsetzt; bei der Schließung des Stroms läuft man alsdann Gefahr, nach der Seite der Kathode, bei Öffnung nach der Seite der Anode umzusinken. Bei stärkeren Strömen führt man unwillkürlich und rasch kompensierende Bewegungen nach der Gegenseite aus. Man bezeichnet die Erscheinung als **galvanischen Schwindel**; er fehlt bei denselben Taubstummen, die auch keinen Drehschwindel zeigen.

In allen diesen Fällen beruht der Schwindel, wie überhaupt stets, auf der Disharmonie in den gleichzeitigen Angaben mehrerer Sinnesorgane. Wenn z. B. ein großer Spiegel, vor dem man steht, unvermutet bewegt wird, so kann ein „*Gesichtsschwindel*“ erregt werden dadurch, daß den Augen eine Bewegung des Körpers vorgetäuscht wird, während die Fußsohlen die Angaben des festen Stehens machen. Oder man kann von heftigem Gesichtsschwindel ergriffen werden, wenn bei einer bekannten Jahrmarktsvorführung die Wände eines Zimmers, in dem man steht, plötzlich um eine Horizontalachse rotiert werden. In analoger Weise beruht der *Labyrinthschwindel* auf der Diskrepanz zwischen den Labyrinth- und anderen Lageempfindungen.

Es verweisen also zahlreiche Beobachtungen auf das *Vorhandensein eines besonderen, der Erhaltung des Körpergleichgewichts dienenden „sechsten“ Sinnes, eines statischen Sinnes, welcher anatomisch irgendwie mit dem Gehörorgan vergesellschaftet ist.* Im Gegensatz zu diesem letzteren, aber auch im Gegensatz zu den meisten Sinnesorganen sind an das statische Labyrinth bei seiner Funktion nur höchst undeutliche, wenn überhaupt irgendwelche Sinnesempfindungen geknüpft.

Nun haben wir mit HELMHOLTZ als Gehörorgan die Schnecke angesehen, allerdings auch die Frage aufgeworfen, *ob den übrigen Labyrinthteilen, also dem Vorhofbogengangapparat, nicht vielleicht auch akustische Funktion zukommt* (siehe S. 510). Wir müssen auf diese Frage jetzt noch einmal zurückkommen, nachdem wir Anhaltspunkte dafür gewonnen haben und noch weitere gewinnen werden, daß das Labyrinth auch noch eine nichtakustische Funktion versieht.

Vom psychologischen Standpunkt ist es ja wenig einleuchtend, daß ein und derselbe Sinnesapparat zwei so verschiedene Empfindungen, wie Schallempfindungen und Empfindungen der Lage und der Bewegung vermitteln soll. Vom physikalischen Standpunkt aus ist die Schwierigkeit geringer; denn sowohl der Reiz, welcher durch eine Lageveränderung ausgeübt wird, als auch der Schallreiz verursacht mechanische Erschütterungen. Anatomisch kann man aber auch die Auffassung vertreten, daß im Labyrinth zwei Apparate nur äußerlich miteinander verbunden sind, die vom N. cochlearis innervierte Schnecke und der vom N. vestibularis innervierte Vorhofbogengangapparat; Cochlearis und Vestibularis wurzeln aber im Gehirn an verschiedenen Stellen.

Die Entscheidung darüber, ob außer der Schnecke auch die übrigen Labyrinthteile eine akustische Funktion haben, ist, wie wir früher (S. 510) sahen, auf operativem Wege und durch klinische Beobachtung gesucht worden, und es zeigte

sich, daß auch nach Zerstörung der beiden Schnecken Reaktionen auf Schallreize bestehen bleiben. Aber die Natur selber hat ebenfalls schneckenlose Labyrinth tausendfach hergestellt. Denn die Schnecke ist ein phylogenetisch junges Organ. Fische und Amphibien sind, wie die Abb. 248 zeigt, noch allein im Besitz eines Vestibularapparates; erst von den Amphibien ab entwickelt sich aus der sog. Basalpapille und aus der Lagena die Schnecke. Bei zahlreichen Wirbellosen bestehen noch primitivere Verhältnisse; denn sie besitzen vom Labyrinth nur Teile, welche dem Sacculus oder dem Utriculus entsprechen.

Wie steht es nun mit dem Gehör dieser Tiere? Sollte es sich entscheiden lassen, daß es vorhanden ist, dann könnte man per analogiam schließen, daß der Vestibularapparat auch bei den Säugetieren nicht bloß statische Funktion hat.

Man hat namentlich über das Hörvermögen der Fische zahlreiche Experimente angestellt, ohne jedoch zu einer absolut sicheren Entscheidung zu gelangen. Wenn Fische anscheinend auf Glockenzeichen hin sich in Teichen an bestimmten Futterstellen sammeln, so ist es nicht der Schall, der sie anlockt — denn dieser wird an der Wasseroberfläche reflektiert und dringt gar nicht ins Wasser ein —, sondern es sind die Erschütterungen des Bodens durch die Tritte des Teichhüters, welche von den Fischen perzeptiert werden, oder es sind optische Reize (KREIDL). Erzeugt man aber durch Klangstäbe oder Membranen den Schall im Wasser selbst, so sind die Ergebnisse der Reizung um so undeutlicher, je vollkommener im Experiment alle größeren Massenverschiebungen vermieden und allein die akustischen Schwingungen zur Wirkung gebracht werden (KREIDL, ZENNECK, KÖRNER). Es ist danach also höchst zweifelhaft, ob die Fische hören. Man kann aber auch die Frage aufwerfen, ob der Besitz eines Gehörorgans für sie überhaupt einen Zweck hat, da es doch unter Wasser nichts zu hören gibt, da insbesondere die

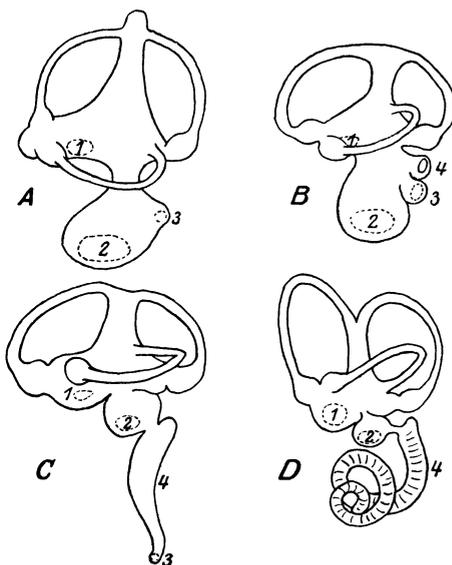


Abb. 248. Schema des linken Labyrinths vom Knochenfisch (A), Frosch (B), Krokodil (C) und Säuger (D) nach HESSE.

1 Macula utriculi, 2 Macula sacculi, 3 Macula lagenae, 4 Basalpapille.

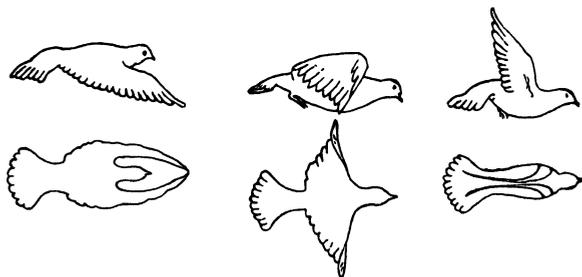


Abb. 249. Flügelstellungen der Taube beim Flug (nach MAREY).

Fische stumm sind. HENSEN hat zwar auf die Beobachtungen mancher Zoologen hingewiesen, nach denen sich, namentlich zur Laichzeit, Herden gewisser Fische im Flußbett sammeln und mächtige Geräusche anscheinend durch ihre Muskelkontraktionen produzieren, welche man durch die Wände des Schiffes wahrnimmt, aber es ist keineswegs ausgemacht, daß diesen auch fühlbaren Erschütterungen des Wassers irgend eine akustische Bedeutung zum Zweck einer Mitteilung an die Artgenossen zukommt. Das stärkste Argument zugunsten des Hörvermögens

der Fische bildet ein Versuch von PIPER: der Kopf eines Hechtes wurde halbiert, das Gehirn entfernt und an den Vestibularapparat und den N. acusticus Elektroden angelegt, welche mit einem Saitengalvanometer in Verbindung standen; so oft jetzt dem Wasser Schallschwingungen zugeführt wurden, trat ein Aktionsstrom im Nerven auf, während mechanische Erschütterungen des Wassers, selbst direkte Berührungen des Labyrinths wirkungslos blieben.

Nach all dem kann man dem Vestibularapparat die Reaktionsfähigkeit für Schallreize wohl nicht absprechen. Sicher dient er aber auch der Regulierung des Körpergleichgewichts, und diese Funktion soll nun genauer analysiert werden.

Die **Erhaltung des Körpergleichgewichts** erfordert freilich nicht durchaus einen regulierenden Sinnesapparat, und es wäre verkehrt, in jedem Falle solcher Erhaltung, selbst beim Fliegen und Schwimmen, wo der orientierende Druck auf die Fußsohlen (siehe S. 538) fortfällt, nach einem statischen Sinn zu suchen. Denn wenn z. B. die Vögel beim Fliegen

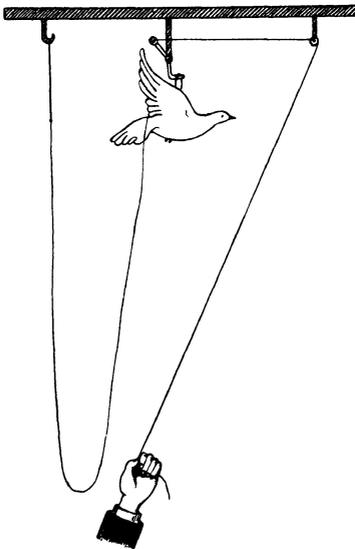


Abb. 250. Fallapparat zur Analyse des Flugs (nach BETHÉ).

sich in der Luft nicht überschlagen, so liegt das vielfach nur daran, daß während des größten Teils des Flügelschlags durch die **bloße Verteilung der Körpermassen** das Gleichgewicht rein mechanisch erhalten ist, falls nur die Flügelbewegungen in der normalen Koordination ausgeführt werden. BETHÉ hat einer toten Taube mit Hilfe einer Art Drahtkorsett die verschiedenen Stellungen gegeben, welche sie nach den photographischen Aufnahmen von MAREY in den verschiedenen Phasen der Flugbewegung einnimmt; die Abb. 249 gibt die zwei extremen und eine mittlere Stellung von der Seite und von oben betrachtet wieder. Wenn man dann die Taube mit Hilfe eines Fallapparates, wie ihn Abb. 250 darstellt, in den verschiedenen Flügelstellungen fallen läßt, so findet man, daß nur bei der tiefsten Flügelstellung die Neigung besteht, in eine Lage mit dem Rücken nach unten umzukippen. In diesem labilen Gleichgewicht befindet sich die Taube aber nur einen Moment. In ähnlicher Weise erhalten

nach BETHÉ'S Untersuchungen zahlreiche Wassertiere auf rein mechanische Weise ihre normale Orientierung im Raum. So schwimmen manche Wasserkäfer nur deswegen mit dem Rücken nach oben, weil sie einen Luftvorrat unter den Flügeldecken tragen, während andere, z. B. die Wasserwanze Notonecta, auf dem Rücken schwimmen, weil ihre Atemluft vorzugsweise auf die Bauchseite verteilt ist.

Andererseits gibt es aber auch Tiere, welche sich dauernd im labilen Gleichgewicht befinden und, um dieses aufrecht zu erhalten, fortwährend Balancierbewegungen ausführen müssen. Dazu gehören z. B. alle mit einer Schwimmblase versehenen Knochenfische; daher sinkt entsprechend der Verteilung der Massen in ihrem Körper im Tode, wo diese Regulationsbewegungen fortfallen, der spezifisch schwere Rücken bekanntlich nach unten und der spezifisch leichtere Bauch kehrt sich nach oben. Bei diesen und ähnlich beschaffenen Tierformen existiert nun auch ein eigener **statischer Sinn zur Erhaltung des Körpergleichgewichts**.

Wenn man bei Fischen z. B. beim Flußbarsch, das Labyrinth doppelseitig exstirpiert (BETHE), so schwimmt das Tier entweder unter heftigen Wälzbewegungen um seine Längsachse oder im stabilen Gleichgewicht mit dem Rücken nach unten. Sobald es aber den Boden des Aquariums berührt, kehrt es in die Bauchlage um und schwimmt, mit dem Bauch den Boden streifend, in normaler Haltung. Offenbar wird es jetzt durch den Drucksinn seiner Haut über seine bis dahin verkehrte Lage orientiert. Hinzu kommt aber noch die Orientierung durch die Augen. Denn wenn man die Corneae schwärzt, dann schwimmt der labyrinthlose Fisch im freien Wasser ruhig ohne die Wälzbewegungen in Rückenlage. Die Wälzbewegungen beruhen nämlich zum Teil auf einer Inkoordination in den balancierenden Bewegungen; die Tiere bemerken mit den Augen, daß sie beim Schwimmen in die Rückenlage umkippen, und indem sie ihre Situation zu korrigieren suchen, überschlagen sie sich infolge der Inkoordination abermals, und das wiederholt sich immer wieder. Daß die Bewegungsstörungen aber noch einen anderen Grund haben, bemerkt man, sobald man einen normalen und einen gleichgroßen labyrinthlosen Fisch in die Hand nimmt; die Bewegungen des operierten sind im Vergleich mit denen des normalen kraftlos.

Nach einseitiger Entfernung des Vestibularapparates krümmen sich die Tiere nach der Operationsseite hin und führen in der gleichen Richtung Reitbahnbewegungen (siehe S. 374 u. 409) aus. Dies beruht im wesentlichen auf dem Überwiegen in der Kraft der Gegenseite; deren Brustflosse rudert kräftiger, auch ihr Kiemendeckel wird stärker gehoben.

Ganz analog ist das Verhalten der Frösche. Im Wasser befinden sich diese im stabilen Gleichgewicht, wenn der Bauch abwärts gerichtet ist, wie man an toten oder chloroformierten Fröschen erkennen kann. Exstirpiert man nun auf beiden Seiten das Labyrinth, so verharren die Tiere eine Zeitlang im labilen Gleichgewicht, wenn man sie auf den Rücken legt, was normale Tiere niemals tun; sie schwimmen wohl auch eine Strecke weit auf dem Rücken, bis sie in die Bauchlage umkippen. Beim Sprung überschlagen sie sich öfter, die Abwehrbewegungen sind schwächlich. Neigt man die Unterlage eines normalen Frosches, so daß der Kopf gegenüber dem Rumpf entweder gehoben oder gesenkt wird, so führt das Tier eine kompensierende Bewegung aus, die darauf hinzielt, die Stellung des Kopfes im Raum möglichst festzuhalten; so wird beim Heben des Kopfes die Wirbelsäule zu einem „Katzenbuckel“ gekrümmt, umgekehrt macht das Tier beim Senken ein „hohles Kreuz“. Den gleichen Sinn hat der sog. *Kompaßreflex*: wenn man den Frosch auf der Mitte einer Drehscheibe langsam rotiert, so krümmt er die Wirbelsäule der Drehrichtung entgegen; beim Anhalten der Drehscheibe folgt eine Nachbewegung in der entgegengesetzten Richtung. Alle diese kompensierenden Bewegungen fehlen dem labyrinthlosen Tier.



Abb. 251. Linksseitig labyrinthektomierter Frosch.

Exstirpiert man nur ein Labyrinth, so biegt der Frosch, genau so wie der Fisch, seinen Rumpf nach der Operationsseite; zugleich wird auf dieser Seite das Vorderbein adduziert, auf der Gegenseite abduziert, der Kopf wird auf der Operationsseite geneigt (EWALD), so daß die charakteristische in der Abb. 251 wiedergegebene Haltung herauskommt.

Bei den Vögeln (Tauben) erzeugt die doppelseitige Labyrinthexstirpation anfänglich schwerste Störungen (FLOURENS); namentlich wird der Kopf stark hin- und hergeworfen, das Tier vermag sich infolgedessen nicht auf den Beinen zu halten. Nach einiger Zeit gewinnt es aber wieder die normale Haltung, und nun macht sich die Labyrinthlosigkeit vor allem in einer starken Schädigung des Flugvermögens geltend. Die Tiere flattern nur mehr ungeschickt und kraftlos; streben sie zum Boden, so schlagen sie oft heftig auf. Ihre Abwehrbewegungen sind schwächlich; streift man über den Kopf eine Kappe, um die optischen Korrekturen auszuschalten, so sinkt der Kopf alsbald kraftlos hintenüber. Wie der normale Frosch, so führt auch die normale Taube bei passiver Änderung ihrer Körperlage kompensierende Bewegungen mit dem Kopf aus, nicht bloß im Hellen, sondern auch im Dunkeln. Dazu kommen kompensierende Rollungen der Augen um ihre optische Achse. Diese Reflexe fehlen nach Wegnahme der Labyrinth.

Nach einseitiger Labyrinthexstirpation sinkt der Kopf auf der Operationsseite herab und wird besonders anfallsweise stark verdreht.

Weniger auffallend als bei den Fischen und Vögeln sind die Folgen der Entfernung des Vestibularapparates bei den Säugetieren, weil hier außer dem Gesicht auch der Drucksinn der Haut unter allen Umständen regulierend eingreift. Nur unmittelbar nach der Operation sind die Tiere, ähnlich wie die Taube, hilflos durch Schläffheit ihrer Muskulatur und durch das heftige Hin- und Herschwanken des Kopfes, welcher dabei oft anhaltend gegen den Fußboden gehämmert wird. Diese Erscheinungen schwinden aber allmählich, und es bleibt im wesentlichen ein unsicherer, etwas torkelnder Gang und unter Umständen ein Mangel an Tonus, der sich z. B. beim Hund darin äußert, daß er beim Herunterspringen von einem Tisch krachend auf den Boden schlägt, oder daß er Schwierigkeiten hat, Knochen zwischen den Kiefern zu zermalmen. Auch bei labyrinthdefekten taubstummen Menschen fällt der wackelige Gang auf, und es besteht oft ein Unvermögen, auf einem Bein zu stehen oder auf einem Schwebbaum zu balancieren (KREIDL).

Die Bedeutung der Labyrinth für den Körpertonus ist aber nicht etwa damit zu umschreiben, daß man für jedes Labyrinth einen tonisierenden Einfluß auf die gesamte Muskulatur der gleichen Seite annimmt; vielmehr bedingt jede Kopfstellung eine andere, aber bestimmte gesetzmäßige Verteilung des Tonus auf die Rumpf- und Extremitätenmuskulatur, so daß *der Einfluß der Labyrinth eine ausschlaggebende Bedeutung für die Haltung des ganzen Körpers hat*. Dieser Einfluß ist aber nur zum Teil ein direkter; die Labyrinth wirken zunächst nur auf den Tonus der Halsmuskeln und in schwächerem Maß auf die Rumpfmuskeln; die Stellung des Halses bedingt dann aber ihrerseits sekundär und reflektorisch durch Vermittlung der hinteren Zervikalwurzeln auch den Tonus in den Gliedmaßen. MAGNUS und DE KLEIJN haben dies so nachgewiesen, daß sie einerseits an Tieren, denen die hinteren Zervikalwurzeln durchschnitten waren, die reinen *Labyrinthreflexe* studierten, d. h. die Tonusänderungen, welche dann durch irgendwelche Verlagerungen des

Kopfes zu erzeugen sind, und daß sie andererseits an Tieren, denen die Labyrinth exstirpiert waren, die reinen *Halsreflexe* untersuchten, also die Einflüsse von Verdrehungen des Kopfes gegen die Wirbelsäule auf die Stellung der Gliedmaßen. Von dieser Superposition der Stellungsreflexe war schon früher (S. 368) die Rede, und der Einfluß der Halsreflexe auf die Extremitätenhaltung bei labyrinthdefekten Menschen wurde durch die Abb. 127 (Seite 369) illustriert.

Hieraus folgt, daß, wenn man eine einseitige Labyrinthexstirpation mit der Durchschneidung der hinteren Zervikalwurzeln kombiniert, die Folgen nicht schwerer sind als bei der bloßen Labyrinthwegnahme, sondern im Gegenteil leichter (MAGNUS und STORM VAN LEEUWEN). Nämlich nach Labyrinthwegnahme mit Ausschaltung der Halsreflexe wird nur der Kopf durch die Halsmuskeln und in geringem Grad auch der Rumpf nach der Operationsseite hin verdreht; bei Intaktheit der Halsreflexe schließt sich dagegen sekundär noch ein Strecktonus in den Extremitäten der Gegenseite, ein Beugertonus in denen der Gleichseite an. Erst die Folge davon ist die Tendenz der einseitig labyrinthexstirpierten Tiere, nach der Operationsseite hin umzufallen oder anfänglich sogar Wälzbewegungen nach dieser Seite hin auszuführen. In späteren Stadien bleibt davon eine Tendenz übrig, sich in Kreisbahnen nach der Operationsseite hin zu bewegen.

Die gleiche Bedeutung hat die Kopfstellung für den Körpertonus auch bei dem Frosch (DE KLEIJN), also wohl allgemein bei den Wirbeltieren.

Wie bei den Vögeln, so werden bei den Säugetieren vom Labyrinth aus auch *Augenbewegungen* ausgelöst, welche Änderungen in der Stellung des Kopfes nach Möglichkeit kompensieren. Neigt man z. B. den Kopf vorn- oder hintenüber, so werden die Augen entsprechend gehoben oder gesenkt, so daß der Horizont fixiert bleibt. Neigt man den Kopf nach rechts oder nach links, so antworten die Augen mit Gegenrollungen um ihre optische Achse. Bei den Kaninchen mit ihren seitlich gestellten Augen kann man die Ausgiebigkeit dieser Rollung leicht demonstrieren, wenn man auf die mit Kokain anästhesierte Hornhaut einen kleinen Zeiger aus angefeuchtetem Papier legt und nun das Tier um die Frontalachse neigt.

Wird ein Tier oder ein Mensch mit mäßiger Geschwindigkeit um die Vertikalachse rotiert, so bleiben die Augen, um die Bewegung zu kompensieren, mehr und mehr hinter der Drehung zurück, um dann ruckweise in die Ausgangsrichtung nach geradeaus zurückzukehren; solange die Rotation fortfährt, wiederholt sich diese Hin- und Herbewegung, welche als *Drehnystagmus* oder auch als *Augennystagmus* bezeichnet wird. In ähnlicher Weise wandern die Blicklinien vieler Menschen, wenn sie aus dem Fenster eines fahrenden Zuges hinaussehen, man spricht von *Eisenbahnnystagmus*. Während dieser letztere aber von dem Fixieren der wandernden Sehdinge abhängig ist, erfolgt der Drehnystagmus auch im Dunkeln oder bei geschlossenen Augen, selbst bei Blinden. Bei manchen Tieren, z. B. bei den Tauben, gesellt sich beim Rotieren zu dem Augennystagmus noch ein *Kopfnystagmus*, d. h. ein Hin- und Herpendeln des Kopfes in der Horizontalebene. *Alle diese Reaktionen des Auges verschwinden nach Labyrinthexstirpation.*

Nach diesen Darlegungen kommen wir also zu dem Ergebnis, daß der gesamte Vestibularapparat die Funktion hat, durch die reflek-

torische Tonisierung bestimmter Muskelgruppen und durch die reflektorische Auslösung koordinierter Tonusänderungen bei Änderung der Lage der Labyrinth im Raum die Erhaltung des Körpergleichgewichts zu gewährleisten. Wir haben es also teils mit Lagereflexen zu tun, bei denen die jeweils vorhandene Stellung des Körpers zu dauernder Tonisierung bestimmter Muskelgruppen führt, und teils mit Bewegungsreflexen, bei denen eine Stellungsänderung eine Änderung in der Verteilung der Muskelspannungen bewirkt. Das Zentrum dieser Reflexfunktionen hat nach den Feststellungen von DE KLEIJN und MAGNUS (s. S. 411) seinen Sitz im Hirnstamm.

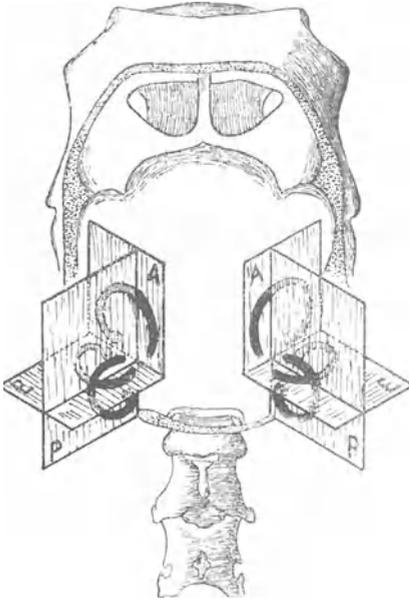


Abb. 252. Schema der Bogengänge der Taube (nach EWALD).
Man sieht von hinten in den geöffneten Schädel hinein. In der Ebene A liegt der *Canalis anterior*, in der Ebene E der *Canalis externus*, in der Ebene P der *Canalis posterior*.

Fragen wir nun nach der Bedeutung der einzelnen Teile des Vestibularapparates, *Utriculus*, *Sacculus* und *Bogengänge*!

Die Physiologie der **Bogengänge** oder der *halbzirkelförmigen Kanäle* be-

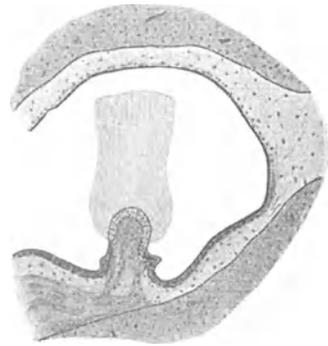


Abb. 253. Die *Crista acustica* mit der *Cupula terminalis* in der Ampulle eines Meerschweinchens (nach WITTMACK).

ginnt schon im Jahre 1828 mit Versuchen von FLOURENS über die Wirkung der Durchschneidung und Reizung einzelner Bogengänge bei Tauben und Säugetieren. Die drei Bogengänge jeder Seite stehen bekanntlich in drei Ebenen angenähert senkrecht zueinander, bei der Taube etwa so, wie es die Abb. 252 nach EWALD darstellt; die rechten und linken Bogengänge sind also paarweise einander zugeordnet, so daß die beiden äußeren horizontalen (E) und je ein vorderer vertikaler (A) und ein hinterer vertikaler (P) Bogengang zusammengehören. Durchschneidet man allein einen der beiden horizontalen Bogengänge bei einer Taube, so macht diese mit dem Kopf in der Horizontalebene pendelnde Bewegungen, welche sich nach einiger Zeit wieder verlieren; durchschneidet man dann den zweiten horizontalen Gang, so setzt das Pendeln in verstärktem Maß ein und steigert sich bei Erregung des Tiers anfallsweise zu so schwerem Schütteln, daß das Tier das Gleichgewicht

verliert und umstürzt; zugleich beobachtet man nystagmische Bewegungen der Augen. Durchschneidet man ein Paar zusammengehöriger vertikaler Kanäle, so erfolgt das Pendeln in der entsprechenden Ebene. GOLTZ dehnte (1878) die Versuche von FLOURENS auch auf die Fische und Frösche aus und entdeckte dabei die vorher beschriebenen Zwangstellungen und Zwangsbewegungen nach teilweiser oder vollständiger Entfernung der Labyrinth und erklärte daraufhin zum ersten Male den Vestibularapparat als ein Sinnesorgan für das Gleichgewicht des Kopfes und dadurch des ganzen Körpers. MACH und BREUER sowie CRUMBROWN stellten sodann eine *Theorie der Bogengangsfunktionen* auf, welche zu neuen wichtigen Experimenten Anlaß gab.

Nach dieser Theorie dienen die Bogengänge der *Wahrnehmung von passiven Drehungen des Kopfes und der reflektorischen Kompensation solcher Drehungen*, und zwar auf folgende Art und Weise: wird eine Drehung in der Ebene eines der Bogengangspaare ausgeführt, so verschiebt sich innerhalb der häutigen Kanäle infolge der Trägheit die Endolymphe gegen die umschließende Wand, so wie etwa Wasser in einer Schüssel sich relativ zu dieser verschiebt, wenn man sie dreht. Infolgedessen übt die Endolymphe einen Stoß gegen die *Crista acustica* aus, den Hügel von Sinnesepithelien, welcher in die Ampulle eines jeden Bogengangs hineinragt (siehe Abb. 253). Diese Crista trägt einen Büschel von Haaren, welche durch eine gelatinöse Masse zusammengehalten sind; der Büschel wird als *Cupula terminalis* bezeichnet. Durch den Endolymphestoß wird die Cupula verbogen, und die Durchbiegung bewirkt eine Erregung der Sinnesepithelien. Erfolgt die Drehung des Kopfes in der Ebene der horizontalen Kanäle, so werden allein diese erregt; erfolgt sie in der Ebene eines der Paare vertikaler Kanäle, so reagieren nur deren Cupulae, und bei Drehung in beliebigen anderen Ebenen werden mehrere Kanalpaare mit den entsprechenden Kraftkomponenten in Aktion versetzt. Man kann sich nun vorstellen, daß den verschiedenen Erregungen verschiedene Empfindungen zugeordnet sind, und ferner liegt die Annahme nahe, daß von den verschiedenen Bogengängen aus reflektorisch verschiedene Muskelgruppen erregt werden, so daß bei einer beliebigen passiven Drehung des Körpers oder auch nur des Kopfes kompensierende Bewegungen ausgelöst werden, welche die Lageänderung zu annullieren suchen.

Diese Theorie erklärt zunächst die bei der Rotation auftretenden Erscheinungen. Wir erfuhren (S. 539), daß nach MACH nicht die Drehung mit konstanter Geschwindigkeit perzipiert wird, sondern nur die positiven und negativen Beschleunigungen, und zwar tritt bei plötzlichem Anhalten einer Rotation die Empfindung einer Drehung in entgegengesetzter Richtung auf. Dies beruht offenbar darauf, daß nach dem anfänglichen Endolymphestoß gegen die Cupula beim Andrehen deren Haare sich wieder aufrichten und während der konstanten Drehung aufgerichtet stehen, weil die Endolymphe alsbald die gleiche Geschwindigkeit wie die Wand des häutigen Kanals erlangt; wird dann aber die Rotation plötzlich beendet, so wird abermals infolge der Trägheit eine Verschiebung der Endolymphe gegen die Wand zustande kommen, diesmal aber in der entgegengesetzten Richtung, so daß auch die Cupula in der entgegengesetzten Richtung verbogen wird. Nimmt man mit BREUER an, daß die Cupula infolge von mangelhafter Elastizität sich nicht momentan wieder aufrichtet, sondern nur allmählich, dann werden

einem auch die Erscheinungen des Drehschwindels verständlich, d. h. die lang anhaltende Nachempfindung einer Drehung in entgegengesetzter Richtung, ferner auch der von PURKINJE entdeckte Einfluß der Kopfhaltung auf die Richtung, in welcher die nachträgliche Scheindrehung vor sich geht (siehe S. 540).

Diese Auffassung von der Funktion der Bogengänge wird vortrefflich durch ein Experiment von EWALD gestützt: er legte den rechten horizontalen Bogengang bei einer Taube frei, eröffnete die knöchernen Wand und verschloß darauf das Lumen des Kanals nach Art der Zahnärzte mit einer Plombe; etwas weiter rechts, nach der Ampulle zu (siehe Abb. 252), machte er eine zweite Öffnung in den knöchernen Kanal und befestigte darüber an der Schädelwand einen kleinen pneumatischen Hammer, welcher durch einen Schlauch mit einem Gummiballon in Verbindung stand, so daß bei einem Druck auf den Ballon der Hammer gegen den häutigen Kanal vorgetrieben wurde und eine gegen die Ampulle gerichtete Endolymphbewegung hervorrufen mußte; eine entgegengesetzte Welle entstand dann beim Nachlassen des Drucks auf den Ballon. Es zeigte sich nun, daß bei jedem Vortreiben des Hammers die Taube eine ausgiebige Bewegung des Kopfes und der Augen nach links genau in der Ebene des horizontalen Kanals ausführte; beim Zurücktreiben des Hammers erfolgte die gleiche Bewegung nach rechts. Ebenso ließen sich von den vertikalen Kanälen aus die entsprechenden Bewegungen auslösen. Es ist also in der Tat der Endolymphstoß, welcher gemäß der MACH-BREUERSCHEN Theorie die Kompensationsbewegungen erzeugt; auch eine passive Drehung des Kopfes rechts herum, welche eine kompensierende Drehung nach links auslöst, muß eine Endolymphströmung ampullenwärts hervorrufen.

Auch der sog. *kalorische Nystagmus* ist vielleicht als ein Beweis für die Betätigung der Bogengänge durch Endolymphströmung zu betrachten. SCHMIDKAM und HENSEN beobachteten (1868), daß beim Einfüllen von kaltem Wasser in den äußeren Gehörgang häufig Schwindel und Übelkeit eintreten, während Wasser von Körpertemperatur indifferent ist. BAGINSKY fand unter den gleichen Bedingungen bei Kaninchen Gleichgewichtsstörungen und Nystagmus. BÁRÁNY untersuchte diese Reaktion genauer und schlug sie dazu vor, um beim Menschen einseitige Erkrankungen des Vestibularapparates zu diagnostizieren. Spritzt man jemandem in das rechte Ohr Wasser von etwa 20° ein, so entsteht nach BÁRÁNY ein horizontaler und rotatorischer Nystagmus nach links mit Schwindelgefühl; heißes Wasser von etwa 40° löst die entgegengesetzte Bewegung aus. BÁRÁNY erklärt dies mit der Annahme, daß durch die Einspritzung die laterale Wand des Felsenbeins abgekühlt oder erwärmt wird, und daß dadurch Temperaturströmungen in der Endolymph, namentlich in dem exponiert gelegenen vorderen vertikalen Bogengang hervorgerufen werden, die den rotatorischen Nystagmus im einen oder anderen Sinn auslösen. Zum Beweis führt er an, daß dieselbe Einspritzung von kaltem Wasser, welche für gewöhnlich horizontalen und rotatorischen Nystagmus nach links auslöst, bei Nachvornebeugen des Kopfes um 180° Nystagmus nach rechts bewirkt. Mit diesen Erscheinungen mögen manche Todesfälle beim Baden zusammenhängen, wenn plötzlich kaltes Wasser durch den äußeren Gehörgang oder gar durch einen Trommelfelldefekt in die Paukenhöhle eindringt und einen heftigen Schwindel erzeugt.

Die Bogengänge reagieren aber nicht bloß auf Drehung, sondern auch auf *gradlinige Beschleunigung des Körpers*. Wenn man z. B. die Unterlage, auf der ein Kaninchen oder Meerschweinchen in natürlicher Lage sitzt, plötzlich in vertikaler Richtung abwärts bewegt, so werden die Beine gestreckt; hört die Bewegung plötzlich auf, so werden die Beine gebeugt. Gerade das Gegenteil geschieht, wenn die vertikale Bewegung aufwärts gerichtet wird. Der Reflex ist von MAGNUS und DE KLEIJN als Liftreaktion bezeichnet worden. Diese und andere Reaktionen auf Progressivbewegung hat man öfter als Reflexe aufgefaßt, die durch die „Gehörsäckchen“ Sacculus und Utriculus vermittelt werden. Aber auch diese durch das Labyrinth vermittelten Bewegungsreflexe hängen nach MAGNUS und DE KLEIJN von den Bogengängen ab. Wenn man nämlich Meerschweinchen einige Minuten lang scharf zentrifugiert, so werden dadurch oft die Statolithen in den Gehörsäckchen (s. S. 550) losgerissen; trotzdem bleiben dann nicht

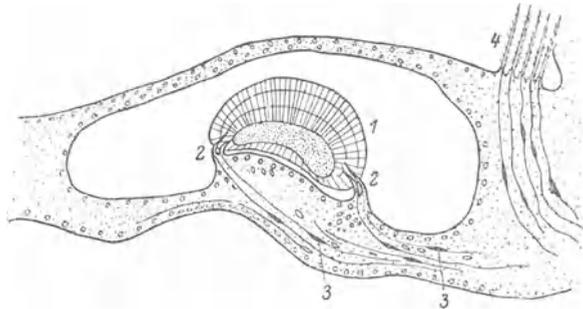


Abb. 254. Statozyste von Mysis (nach BETHÉ).

1 Statolith, auf den Sinneshaare 2 ruhend. 3 Sinneszellen. 4 Sinneshaare auf der Körperoberfläche.

bloß die Reaktionen auf Drehung, sondern auch die Reaktionen auf Progressivbewegung erhalten.

So dient also das System der halbzirkelförmigen Kanäle der Regulierung der Körperhaltung, sobald durch passive Lageänderungen in irgend einer Ebene die Gefahr eines Gleichgewichtsverlustes heraufbeschworen wird. Solche Lageänderungen können natürlich auch im Gefolge der lokomotorischen Bewegungen irgendwie zustandekommen; die Regulierung muß dann um so exakter ins Spiel treten, je komplizierter und je flinker die Muskeln agieren. Man findet daher bei den elegantesten Fliegern und Schwimmern auch den vollkommensten Bogengangssystem; dementsprechend beobachtete EWALD, daß die Durchschneidung eines Bogengangspaares genügt, um den vollendeten Flug der Schwalbe stark zu stören, während dieselbe Operation für den Sperling und die Taube und vollends für das Huhn viel harmloser ist.

Wenden wir uns nun zur Physiologie des *Sacculus* und *Utriculus*, die auch gemeinsam wegen ihrer statischen Funktion als **Statozysten** bezeichnet werden. Diese sind mit Endolymphe gefüllte Säckchen, deren Wand an einer Stelle durch eine Anhäufung von Sinnesepithelien zu einer *Macula acustica* verdickt ist; die Sinnesepithelien tragen kurze Haare, auf deren Enden eine gallertige Masse ruht, in welche zahlreiche Kriställchen, die *Otokonien* oder *Statokonien*, eingelagert sind. Über

die Bedeutung der Statozysten als statisches Organ orientiert man sich besonders leicht an Wirbellosen, deren ganzes „Labyrinth“ nur aus einer Statozyste besteht; diese enthält oft an Stelle der Statokonienmasse einen massiven, meist aus kohlensaurem Kalk oder aus Fluorkalzium bestehenden *Statolithen*, welcher durch stark federnde Sinnesborsten gehalten ist (siehe Abb. 254).

Bei vielen dieser Tiere gelingt die Entfernung des Statolithen, die „Entstaturung“, außerordentlich leicht. Die Folge davon ist dann, daß die Tiere eine abnorme Lage, in die sie geraten, nicht mehr korrigieren, ähnlich wie das früher als Folge der totalen Labyrinthexstirpation bei den Wirbeltieren geschildert worden ist. Beim Flußkrebis befinden sich die Statozysten z. B. an der Basis der vorderen Antennen. Befestigt

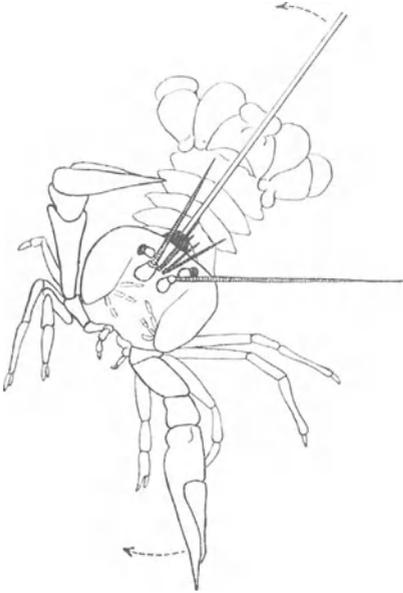


Abb. 255. Kompensationsbewegungen bei Schiefhaltung eines normalen Krebses (nach KÜHN).

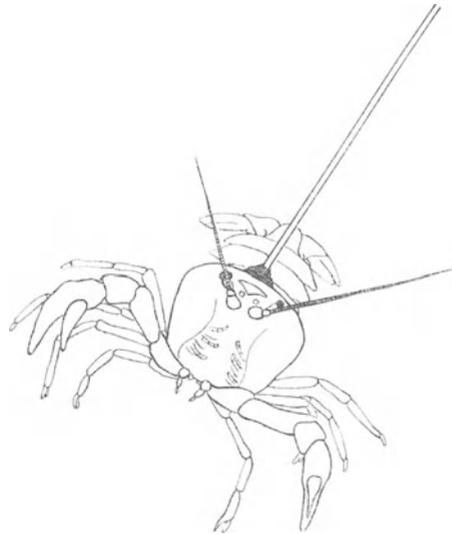


Abb. 256. Stellung eines entstaturierten Krebses bei Schiefhaltung (nach KÜHN).

man den Krebs an einem Stab und hält ihn daran schräg ins Wasser, so reagiert er, solange er nicht entstaturiert ist, auf die Schiefhaltung mit einer dauernden Kompensationsstellung der gestielten Augen und mit lebhaften Ruderbewegungen der Beine auf der tiefliegenden Seite in Richtung des punktierten Pfeils in Abb. 255, während die Beine der hochliegenden Seite ziemlich ruhig und angezogen gehalten werden (KÜHN). Die Ruderbewegungen haben offenbar den Sinn, die Dorsoventralachse wieder senkrecht zu stellen. Ganz anders, wenn das Tier entstaturiert ist (siehe Abb. 256)! Die Haltung ist dann bei Schrägstellung in jeder Hinsicht dieselbe, wie bei der normalen Lage des Tiers; es werden keinerlei kompensierende Bewegungen ausgeführt. *Die Statozysten sind also Organe für die Perception der Lage.*

Davon kann man sich öfter auch ohne operativen Eingriff überzeugen. Bei vielen Krebsen sind die Statozysten offen, und die Tiere

stecken sich von Zeit zu Zeit kleine Steinchen als Statolithen ins „Ohr“; bei der Häutung werfen sie mit der Auskleidung der Statozysten auch die Steinchen mit ab. Verhindert man sie nun dadurch, daß man sie in ein Bassin mit reinem Wasser setzt, sich neue Statolithen einzuführen, so verhalten sie sich wie entstatet; Hummerlarven z. B., welche sonst im labilen Gleichgewicht balancieren, schwimmen alsdann mit dem Bauch nach oben und werden in bewegtem Wasser haltlos umhergeworfen.

Die Anatomie der Statozysten legt eine Hypothese über den *Mechanismus ihrer Wirkung* nahe (BREUER): der Statolith drückt seinem größeren spezifischen Gewicht entsprechend andauernd auf die Sinneshaare und Sinnesepithelien der Macula acustica oder zieht an ihnen. Diese andauernde Wirkung verursacht die Empfindung der regelrechten Lage im Verhältnis zur Vertikalen. Ändert sich nun die Lage, so sucht der Statolith der Schwerkraft zu folgen und zerrt darum auf der einen (höher gelegenen) Seite an dem Epithel, an welchem er durch die Haare oder federnden Borsten befestigt ist, auf der anderen (tiefer gelegenen) Seite übt er auf dieses einen vermehrten Druck aus, und auf diese geänderte Beanspruchung antwortet das Epithel mit der Auslösung einer Korrektionsbewegung.

Die Richtigkeit dieser Vorstellung wird durch ein ausgezeichnetes Experiment von KREIDL bewiesen: einer Garnele (Palaemon) wurde nach der Häutung zur Bildung neuer Statolithen Eisenfeilstaub geboten. Infolgedessen wurde der Krebs empfindlich gegen einen Elektromagneten; näherte man diesen von der Seite, so drehte sich der Krebs so, daß er seinen Rücken vom Magneten fortkehrte, er führte genau dieselben Bewegungen aus, wie wenn sein Rücken passiv zum Magneten hingedreht würde und er sich dagegen wehrte. Und dies ist wohl zu verstehen; denn der Eisenstaub verlagerte sich in der Statozyste offenbar von der tiefsten Stelle nach der Seite in die Resultante von Schwerkraft und magnetischer Kraft, also gerade so, als ob das Tier die genannte passive Drehung seines Rückens erlebt hätte.

In ähnlich künstlicher Weise kann man die Statolithen auch durch die Kombination von Schwerkraft und Zentrifugalkraft ablenken und auf die Weise an sich überflüssige Einstellungsänderungen auslösen. So haben wir vorher (S. 539) erfahren, daß der Mensch eine Drehbewegung wie in einem Karussell mit einer reflektorischen Raddrehung seiner Augen beantwortet, der zufolge eine Linie vertikal erscheint, welche in Wirklichkeit mit ihrem oberen Ende nach der Rotationsachse geneigt ist und mit der Resultante aus Schwerkraft und Zentrifugalkraft zusammenfällt. Dieser Versuch verweist uns darauf, die kompensatorischen Drehungen und Rollungen der Augen, welche jeder Änderung der Körper- bzw. der Kopflage folgen (siehe S. 545), auf die Funktion der Statozysten zurückzuführen; die dabei neu eingenommene Augenstellung wird so lange beibehalten, als der Kopf in der veränderten Lage verharret. Auch darin dokumentiert sich, daß die Statozysten Organe zur Perzeption der Lage sind, wie die Bogengänge der Perzeption der Bewegung dienen, indem sie auf Winkel- oder Progressivbeschleunigungen ansprechen. Nach MAGNUS und DE KLEIJN werden die Maculae beim Kaninchen dann am stärksten erregt, wenn der Statolith senkrecht in ihnen hängt.

Sachverzeichnis.

- Abdominaltypus der Atmung 106.
Abduzens, Funktionen 371.
Aberration, chromatische 441. — sphärische 442.
Abnutzungsquote 194.
Absorption der Gase 91.
Abwehrfermente 76.
Accelerans des Herzens 136.
Acetaldehyd 168, 178.
Acetessigsäure 168.
Aceton 168.
Acetonkörper 168. — bei Pankreasdiabetes 272.
Achillessehnenreflex 243.
Acholie 47.
Achroodextrin 16.
Adäquater Reiz 421.
Adaptation, Hell- und Dunkelad. 468. — Lokaladapt. 467. — an verschiedene Temperaturen 527.
Addison'sche Krankheit 256, 260.
Additionsfarben 458.
Adenin 180.
Adiadochokinesie 410.
Adrenalin, chemische Eigenschaften 257. — Fiebererzeugung durch dass. 227. — Gesamtheit der physiologischen Wirkungen 257. — Glykosurie 259. — optische Aktivität und Wirkung 42 — als Sympathikusreizmittel 136, 257, 415. — Wirkung auf die Blutgefäße 148, 152, 257, auf die Bronchen 118, auf das Herz 136, 258, auf den Muskeltonus 315, auf die Pupille 258, 415, 441, auf den Uterus 258.
Adrenalinglykosurie 259.
Adynamie bei Addison'scher Krankheit 256, 260.
Aerotonometer 101.
Aetherschwefelsäuren 59. — im Harn 236.
Ageusie 519.
Agglutination 74. — der roten Blutkörperchen 86.
Aggregatzustand der lebenden Substanz 7.
Agnosie 399, 402.
Agraphie 400.
Akkommodation des Auges 433. — Bedeutung für die Tiefenwahrnehmung 487.
Akkommodationsbreite 438.
Akkommodationsgebiet 438.
Akkommodationskraft 438.
Akromegalie 268.
Aktionsströme 305. — des Herzens 133. — und Muskeltonus 311. — des Nerven 332. — im Tetanus 308. — Theorie 333.
Akzelerans des Herzens 136.
Akzessorische Nährstoffe 183.
Alanin 40.
Albino 446.
Albumine 71.
Albuminoide 170.
Albumosen, Artspezifität 169. — Bildung im Darm 41, im Magen 28. — Resorption im Magen 38.
Alexie 397, 401.
Alimentäre Glykosurie 177.
Alles- oder Nichts-Gesetz beim Herzen 127, beim Muskel 299.
Allocheirie 395.
Allorhythmie 124.
Alloxanthin 236.
Altersweitsichtigkeit 439.
Alveolarluft, Zusammensetzung 100.
Ametropie 440.
Aminosäuren 29. — Abbau im Dickdarm 258. — als Bausteine des Eiweißes (Tabelle) 40. — im Blut 68. — Einteilung 39. — Ernährung mit dens. 169. — als Glykogenbildner 177. — im Harn 173. — im intermediären Stoffwechsel 173. — Neubildung im Tierkörper 172. — optische Aktivität 40, 41. — Überführung in Eiweiß 169.
Ammoniak als Eiweißspaltprodukt 172, 174. — als Eiweißsparmittel 172. — im Harn 237. — Verwendung zur Aminosäuresynthese 172, zur Harnsäuresynthese 181, zur Harnstoffsynthese 174.
Amnesie 401.
Amusie, sensorische 398.
Amylum 43.
Anämie 90, 252.
Analgesie 363, 525, 534. — bei Syringomyelie 363, 534.
Anaphylaxie 74.
Anelektrotonus 335.
Anezephalus, Reflexe 348, 367, 383.
Animalische Funktionen 12, 295.
Anorganische Salze, im Blutplasma, ihre Bedeutung 76. — der Milch, Bedeutung 251. — als Nahrungsstoffe 15, 212.
Anosmie 522.
Anschauungsbilder, subjektive 262.
Anspannungszeit des Herzens 135.
Antagonisten, Hemmung derselben 347. — reziproke Innervation 389.
Antigen 74.
Antikinase 73.
Antikörper 6, 74.
Antineuritin 186.

- Antipepton 41, 51.
 Antiperistaltik im Dickdarm 61. — im Dünndarm 53.
 Antiskorbutin 186.
 Antithrombin 73.
 Antitoxin 74.
 Aphasie, amnestische 401. — motorische 385, 400. — sensorische 400.
 Apnoe 113. — foetale 114. — durch Vagusreizung 118.
 Apnoea spuria 118. — vera 118.
 Apoplexie 362.
 Appetitsaft 31.
 Apraxie 399, 402.
 Arbeit der Muskeln 309, 315. — Einfluß auf die Atmung 115, das Herz 138, den Stoffwechsel 200, 208, 210. — statische 202.
 Arginase 175.
 Arginin 39. — Umwandlung in Harnstoff 175, in Kreatin 175.
 Arterien, Blutdruck in den 145. — Blutgeschwindigkeit 160. — Puls 156.
 Arterienpuls 156.
 Artspezifität der Eiweißkörper 73, 169. — der Fette 165.
 Asphyxie 116. — und Herztempo 138.
 Assimilation 15, 163. — und Dissimilation in der Netzhaut 462. — des Eiweißes 74, 169. — der Kohlehydrate 176.
 Assimilationsgrenze für Zucker 177. — Einfluß der Schilddrüse 263, 267, der Hypophyse 270.
 Assoziation als Funktion des Großhirns 380.
 Astereognosis 402.
 Asthenie bei Kleinhirnerkrankung 409.
 Asthenopie 440.
 Asthma 110, Behandlung mit Adrenalin 118, 258.
 Astigmatismus, irregulärer 444. — regulärer 443.
 Ataxie 349. — bei Rindenerden 393, 395. — bei Rückenmarkserkrankungen 364. — durch Sensibilitätsausfall 349, 537. — zerebellare 409.
 Atelektase 109.
 Atembewegungen 104. — Automatie 113. — Innervation 110.
 Atemluft 109.
 Atemmuskeln 105. — auxiliäre 106. — Innervation 110.
 Atemreize 114.
 Atemzentrum 111, 369. — Automatie 113. — spinaler Sitz 112.
 Athyrosis 262.
 Atmung, abdominale 106. — äußere 104. — Cheyne-Stokessche 116. — Einfluß auf den Blutdruck 155, auf die Herzfrequenz 138. — Einfluß der Kohlensäure 113, 114. — Einfluß des Lichtes 233, der Nahrung 115, des Sauerstoffs 113, 114. — Frequenz 109. — der Gewebe 102, 179. — und Herzfüllung 159. — innere 98. — Innervation 110, 116. — Koferment der 179, 314. — kostale 105. — beförderte Luftmengen 108. — Mechanik 104. — der Muskeln 314. — in Preßsäften 179. — als sekretorischer Vorgang 102. — Selbststeuerung 117. — Wärmeabgabe durch sie 221, 224. — zellfreie 179. — Zusammensetzung der Alveolarluft 100, der Einatemungs- und Ausatemungsluft 99.
 Atmungskörper 179. — des Muskels 314.
 Atrioventrikulärer Rhythmus 124, 136.
 Atrioventrikulärknoten des Herzens 122.
 Atropin, Mikropie durch 487. — als parasymphathisches Gift 415. — Wirkung auf die Bronchen 118, auf den Ciliarmuskel 436, 437, auf das Herz 136, auf die Schweißdrüsen 247, auf die Speicheldrüsen 22, auf den Sphincter iridis 441.
 Augen 426 ff. — Adaptation 468. — Akkommodation 433. — blinder Fleck 449. — dioptrischer Apparat 426. — Donderssches Stellungsgesetz 481. — Kardinalpunkte 428. — Krümmungsradien 430. — Netzhautveränderungen durch das Licht 452. — optische Konstanten 429, 431. — Primärstellung 480. — Purkinjesche Aderfigur 451. — reduziertes 429. — Sehpurpur 452. — Strahlengang 427. — Trübungen in den brechenden Medien 445. — Unvollkommenheiten im dioptrischen Apparat 441.
 Augenbewegungen 480. — Abhängigkeit von der Vierhügelregion 482. — bei Labrynthreizung 545.
 Augenleuchten 447.
 Augenmaß 476. — Täuschungen im A. 477.
 Augenmuskeln, Wirkung 480.
 Augennystagmus 545.
 Augenspiegel 447.
 Ausnützung der Nahrungsmittel 57, 58, (Tabelle) 204.
 Austreibungszeit des Herzens 135.
 Auswählendes Lösungsvermögen 64, 88.
 Autochromverfahren von Lumière 458.
 Autodigestion 173.
 Autointoxikationen 60, 267.
 Autolyse 173.
 Automatie, Begriff 36. — des Atemzentrums 113. — des Dünndarms 54. — des Herzens 123. — des Magens 36. — des Ureters 243.
 Autonomes Nervensystem 412.
 Autophonie 502.
 Auxotonische Muskelzuckung 301.
 Avitaminosen 186.
 Azetylcholin 55.
 Azidose 98, 168.
 Bahnung und Lernfähigkeit 381. — im Rückenmark 346.
 Bakterien, ihre Bekämpfung durch Leukozyten 84. — im Dünn- und Dickdarm 58, 60. — Wirkung im Magen 33.
 Balken, physiologische Bedeutung 404.
 Basedowsche Krankheit 267.
 Bastardierung 287.
 Bataillonscher Stich 288.
 Bathmotrope Wirkungen aufs Herz 136.
 Bathybius Haeckelii 7.
 Bauchdeckenreflex 342.
 Bauchspeichel s. Pankreas-saft.
 Befruchtung, ihre Bedeutung 287. — Physiologie 285.
 Befruchtungsmembran, Bildung ders. 286.
 Bekleidung als Wärmeschutz 222, 223.
 Bell-Magendiesches Gesetz 357.
 Benzoesäure 236.
 Beriberi-Krankheit 184.

- Berührungsempfindungen 363, 528, 530.
 Beseeltheit der Lebewesen 9, 380, 382, 420.
 Beugereflex, gekreuzter 353.
 Bewegungsempfindungen durch das Auge 492, durch die Haut vermittelt 532.
 Bewegungssinne für die Bewegung einzelner Körperteile 536, des ganzen Körpers 538.
 Bilirubin 46.
 Biliverdin 46.
 Binokulares Sehen 482ff.
 Bioelektrische Ströme 303, 333. — Theorie 333.
 Biokolloide 7, 215.
 Biologische Reaktionen 76, 89, 169.
 Biuretreaktion der Eiweißkörper 28. — des Harnstoffs 235.
 Blase 243, Tonusänderungen 258, 270. — Vertretung im Großhirn 388.
 Blickfeld 480.
 Blickpunkt, binokularer 480.
 Blickzentrum, präzentrales und okzipitales 389.
 Blinder Fleck im Auge 449.
 Blut 69ff. — Aminosäuren darin 68. — Antikörper 74. — defibriniertes 69. — diffusibles und indiffusibles Alkali 97. — Gase dess. s. Blutgase. — Gefrierpunkt 78. — Gefrierpunktserniedrigung nach Nierenexstirpation 233. — Gesamtmenge 89, 98. — Geschwindigkeit 160. — innere Reibung 142, 153, Einfluß auf den Blutdruck 142. — Menge, Einfluß auf den Blutdruck 156. — Nachweis durch die Häminkristalle 89, Präzipitinreaktion 75. — osmotischer Druck 77, nach Nierenexstirpation 233. — Plasma 69. — Reaktion 79, Einfluß der Nahrung 115. — Traubenzuckergehalt 68, 176. — Umlaufzeit 162. — Verteilung im Körper 149. — Viskosität 142, 153. — Wasserstoffionen 79. — Zusammensetzung 69.
 Blutarmut 90.
 Blutdruck, Änderungen 152. — arterieller 145, 152. — Depressorreflex 137, 154. — Einfluß der Blutmenge 158, der Elastizität der Gefäße 144, der Gefäßverzweigung 142, der Gefäßweite 142, des Herztempos 154, der inneren Reibung des Blutes 142, 153. — und Harnbildung 240. — und Hypophyse 270. — und kapillarer 146. — und Lymphbildung 232. — maximaler 146. — Messung 145. — und Nebenniere 257. — respiratorische Schwankungen 155. — und Schilddrüse 266. — systolischer 146. — Ursache dess. 141. — in den Venen 143, 147, 159. — Verteilung im Gefäßsystem 143.
 Bluterkrankheit 70, 73.
 Blutgase, absorbierte Menge 93. — Analyse 92. — Austausch mit den Geweben 102. — Bestimmung nach Barcroft 93. — Bindung im Blut 98. — Einfluß auf die Atmung 113, auf den Herzschlag 138. — Spannungen 100, 102.
 Blutgefäße, Elastizität 144, 157. — Innervation 147. — periodische Tonuschwankungen 116, 156. — Reaktionen ausgeschnittener 148. — reflektorische Beeinflussung 149. — Strömung in dens. 141. — Tonus 148. — Verzweigung 142. — Widerstände darin 141.
 Blutgerinnung 69. — Einfluß der Kohlensäure 72.
 Blutgeschwindigkeit 143, 160.
 Blutkörperchen, rote, Abbau durch Leber und Milz 275. — Agglutination 86. — Bildung in Thymus und Milz 275. — Form 85. — Gesamtvolumen 86. — Hämolysen 87, 215. — Salzgehalt 214. — Schatten 49, 87. — Sedimentierung 86. — Stroma 49, 87, 183. — Volumen 86. — Zahl 62, 82, 85, 90.
 Blutkörperchen, weiße 81, s. Leukozyten.
 Blutkreislauf 119.
 Blutkuchen 69.
 Blutmenge, Bestimmung 89, 98.
 Blutplättchen, Mitwirkung bei der Gerinnung 71. — Zahl 85.
 Blutplasma 69.
 Blutreize 35.
 Blutschatten 49, 87.
 Blutserum 69.
 Blutsverwandtschaft, Nachweis 75.
 Blutzucker 68, 176.
 Bogengänge 503, 546.
 Brechreflex 35.
 Brechzentrum 35. — in der Medulla oblongata 366.
 Brenztraubensäure beim Kohlehydratabbau 178. — Verwendung für Aminosäuresynthese 172.
 Brondegeestisches Phänomen 348.
 Brown-Séquardsche Halbsseitenläsion 363.
 Brückescher Versuch des Augenleuchtens 447.
 Brustdrüse, Entwicklung 278. — als sekundärer Sexualcharakter 276. — Tätigkeit 248, 253. — Transplantation 278.
 Bruststimme 512.
 Bulbärparalyse 26, 367.
 Bulbokapnin 310.
 Butter 249. — Vitamingehalt 185.
 Buttermilch 249.
 Caissonarbeiter 91, 502.
 Camera acustica 509.
 Cellobiose 43.
 Cellulose 43.
 Centrum anospinale 62, 357.
 Centrum ciliospinale 356.
 Centrum genito-spinale 284, 357.
 Centrum vesico-spinale 244, 357.
 Chemotaxis der Leukozyten 83. — bei Spermatozoen 282.
 Cheyne-Stokessches Atmen 116, 156.
 Chlorophyll, Verwandtschaft mit dem Hämoglobin 48.
 Cholagoga 50.
 Cholsäure 46.
 Choleinsäure 47.
 Cholesterin im Blut 76. — in der Galle 46. — Herkunft in der Galle 49. — im Hauttalg 248. — als Lipoid 182. — in der Milch 249. — im Sperma 281.
 Choletelin 46.
 Cholin 182. — als Erreger der Darmperistaltik 54. — als parasymphathisches Gift 415.
 Cholsäure 46.
 Chorda tympani, Reizung in der Paukenhöhle 422, 423. — Wirkung auf die Speicheldrüsen 21, 148.

- Chromaffine Substanz 256.
 Chronotrope Wirkungen aufs Herz 136.
 Chylus 65, 67, 231.
 Chymosin im Magensaft 29.
 Chymus 29.
 Coma diabeticum 272.
 Cornealreflex 341, 342.
 Corpus luteum, Beziehung zur Menstruation 279, 284. — als endokrine Drüse 279.
 Cowpersche Drüsen 283.
 Crusta phlogistica 86.
 Cytolyse und Entwicklungserregung 286.
 Cytosin 182.
- Dämmerungssehen 469.
 Daltonismus 469.
 Darmbewegungen des Dickdarms 61. — Innervation 61. — des Dünndarms, Automatie 54. — Einfluß der Nahrung 53. — Innervation 53. — Pendelbewegungen 52. — peristaltische Bewegungen 53.
 Darmentleerung 61.
 Darmfäulnis 58.
 Darmgase 58. — Bedeutung für die Expiration 108.
 Darmlänge 59.
 Darmsaft, Gewinnung 51. — Zusammensetzung 51.
 Darmzotten als Resorptionsorgane 65, 234.
 Darwinismus 8.
 Deckpunkte 482.
 Decubitus als trophische Störung 373.
 Defäkation 61.
 Degeneration, aufsteigende und absteigende 360. — fettige 167. — und Nutzzeit 330. — primäre, sekundäre und tertiäre 358.
 Dekarboxylierung 56, 162.
 Depressorreflex 137, 153, 333.
 Desaminase 174.
 Desaminierung 174. — im Dickdarm 236.
 Deuteranopie 470.
 Dextrin 16.
 Diabetes mellitus durch Adrenalin 259. — und Acetonkörper 168. — durch Pankreasexstirpation 259, 271. — Theorie 273. — durch Zuckerstich 178, 259.
 Diamylose 16.
 Diapedese der Leukozyten 84.
 Diastase in der Leber 178. — des Pankreas 42. — des Speichels 16. — Wirkung im Magen 36.
 Dickdarm als Ausscheidungsorgan 234. — bakterielle Vorgänge 58. — Resorption 56.
 Differenzton 508.
 Diffusion 63. — bei der Lymphbildung 232. — bei der Resorption 66.
 Digitalis 155.
 Dikrote Erhebung des Pulses 157, 158.
 Dimethylguanidin 262.
 Dioptrie 439.
 Dioptrik des Auges 426.
 Diplacis binauralis dysharmonica 507.
 Disparation, binasale und bitemporale 484, 488. — quere 488.
 Dissimilation 164. — und Assimilation in der Netzhaut 462.
 Dissoziation des Herzschlags 124, 136.
 Diurese 241.
 Donderssches Gesetz für die Stellung der Augen 481.
 Doppelauge 481.
 Doppelsinniges Leistungsvermögen des Muskels 299, des Nerven 325.
 Doppeltsehen, Bedingungen 484.
 Drehnystagmus 545.
 Drehschwindel 540, 548.
 Dreikomponentenlehre 462.
 Dromotrope Wirkungen aufs Herz 136.
 Druck, intrakardialer 134. — negativer im Thorax 127, Bedeutung für die Blutbewegung 159. — osmotischer s. osmotischer Druck. — systolischer 146.
 Druckphosphor 422.
 Drucksinn 528.
 Drüsen, endokrine 255. — mit innerer Sekretion 255.
 Drüsensekretion 20.
 Drüsenströme 333.
 Dünndarmverdauung 39.
 Dunkeladaptation 468.
 Duodenalreflexe 34.
 Duplizitätstheorie für die Netzhautfunktion 469.
 Dynamisches Gleichgewicht 5.
 Dyspnoe 113. — Einfluß auf den Herzschlag 138.
 Dystrophia adiposogenitalis 268.
 Dystrophie, alimentäre 184.
- Ecksche Fistel 170.
 Edestin 40. — Nährwert 172.
 Ei, menschliches 284. — parthenogenetische Entwicklung 215, 286, 288. — Reifung 285.
 Eieralbumin 40. — Resorption 68. — Verdaulichkeit 42.
 Eierstöcke als endokrine Drüsen 279.
 Eigenrau der Netzhaut 467.
 Eisen, Ausscheidung durch den Dickdarm 234. — im Blut 90. — in der Milch 252. — Retention durch die Milz 275. — als Sauerstoffüberträger 179.
 Eisenbahnystagmus 545.
 Eiterkörperchen 84.
 Eiweiß, Abbau 173. — Ansatz 200. — artfremdes 73. — Artpezifität 73, 169. — Ausnützung bei der Verdauung (Tabelle) 57, 205. — Bedarf 171, 203, bei körperlicher Arbeit 210, des Erwachsenen 207. — biologische Reaktionen 76, 169. — physiologischer Brennwert 194. — chemische Konstitution 39. — Ernährung mit total abgebautem 169. — Fäulnis im Dickdarm 58, 60. — Glukosamingehalt 177. — Hungerminimum 194, 200. — lebendes 3. — Minimum des Bedarfs 199. — Nährwert 170. — Organspezifität 170. — osmot. Druck 76, 77, 232, 240. — pflanzliches; Zusammensetzung 40. — quantitative Zusammensetzung aus den Aminosäuren (Tabelle) 40. — Reaktionen 28. — Resorption im Darm 68. — spezifisch-dynamische Wirkung 197. — Stickstoffbestimmung 188. — Stoffwechsel 169. — Synthese im Tierkörper 169. — Umbau des Moleküls 171. — Umwandlung in Fett 167. — Umwandlung in Kohlehydrat 177. — Verbrauch im Hunger 194. — Verdauung im Magen 28. — Verdauung durch Pankreassaft 41.
 Eiweißmast 200.
 Eiweißminimum 172, 199, 207.
 Eiweißsparung 171, 172, 199.
 Ejakulation 284.

- Elastin als Gerüstsubstanz 41. — Verdaulichkeit 29. — quantitative Zusammensetzung 40.
- Elektrisches Organ der Fische 325, 331.
- Elektrische Reizung 329. — Theorie 331.
- Elektrizität, tierische 303, 333.
- Elektrode, differente und indifferente 337, virtuelle 337.
- Elektrokardiogramm 133.
- Elektrotonus 334.
- Elektrovagogramm 118, 332.
- Embolie 70.
- Emmetropie 440.
- Empfindungen als einfachste psychische Elemente 419. — Qualitäten und Modalitäten 420.
- Empfindungskreise der Haut 531.
- Emphysem der Lungen 108.
- Empirismus in der Raumfassung 495.
- Emulsin 17.
- Emulsion der Fette 44, 67. — in der Milch 248.
- Endokrine Drüsen 255.
- Energiewechsel bei Arbeit 200. — Messung 191. — bei Ruhe 195.
- Entartungsreaktion 337.
- Enterokinase 43, 51.
- Enthirnungsstarre 311, 368.
- Entoptische Erscheinungen 445.
- Entwicklungsstörung bei unbefruchteten Eiern 286.
- Enzyme 17, s. Fermente.
- Eosinophile Leukozyten 82.
- Epithelkörper 261.
- Erbrechen 35. — Abhängigkeit von der Medulla oblongata 366.
- Erektion 283.
- Erepsin 51.
- Ergograph 302.
- Ergotoxin, Wirkung auf die Gefäße 148, 150. — auf das Herz 136. — auf den Piquediabetes 259. — als Sympathikusgift 415.
- Ermüdung, Einfluß auf die Blutverteilung 152. — Einfluß auf den Stoffwechsel 202. — Messung mit dem Ergographen 302. — des Muskels 301. — des Nerven 338. — im Tetanus 309.
- Ermüdungsstoffe 302.
- Ernährung 186.
- Erregung, direkte und indirekte 296. — Einschleichen ders. 329. — Fortpflanzungsgeschwindigkeit im Muskel 299, im Nerven 327. — mit dem Induktionsstrom 331. — mit dem konstanten Strom 329, 331, 334. — künstliche 297. — Theorie der elektrischen E. 331.
- Erregungsgesetz von du Bois-Reymond 329.
- Erstickung 116, 138, 152.
- Erythrodextrin 16.
- Eserin, Makropie durch E. 487. — Wirkung auf den Ciliarmuskel 437, auf den Sphincter iridis 441.
- Essigsäure, Bildung im Stoffwechsel 179.
- Euglobulin 73.
- Eupnoe 113.
- Exkret 49, 238.
- Exophthalmus 267 — vom Centrum ciliospinale aus 356.
- Expiration, Kräfte für ihr Zustandekommen 106.
- Expirationsluft, Zusammensetzung 99.
- Extraktivstoffe des Fleisches 30.
- Extrastole 127, 134.
- Fäzes, ihre Formung 49. — Stickstoffgehalt 188. — Zusammensetzung 56, 206, Abhängigkeit von der Nahrung 57.
- Fagopyrismus 230.
- Falsettstimme 512.
- Farben, Additionsf. 458. — farbloses Intervall 462, 469. — farbloses Spektrum 462. — Gegenfarben 455, 462. — Grundf. von Helmholtz 460. — Komplementärf. 459. — Kontrastfarben 464. — Körperf. 461. — Mischung 457, binokulare 491. — Prinzipalfarben 455. — spezifische Helligkeit 456, 461. — Subtraktionsfarben 461. — tonfreie und getönte oder bunte 455. — Urfarben 455. — verhüllte oder ungesättigte 455.
- Farbenblindheit 469. — in der Netzhautperipherie 473. — totale 471.
- Farbendreieck 459.
- Farbenkörper 456.
- Farbenkontrast 464, 467.
- Farbenkreis 455.
- Farbenmischung 557. — binokulare 491.
- Farbensinn, Störungen 469ff. — durch Großhirnverletzungen 397.
- Farbenviereck 455.
- Farbige Schatten 464.
- Fazialis, Funktionen 371.
- Feminierung 277.
- Fermente, autolytische 173. — Begriff und Wirkung 16. — Eigenschaften ders. 17. — geformte und ungeformte 17. — intrazelluläre 18, 42, 170. — als Katalysatoren 18. — peptolytische 51. — proteolytische 41, 76, 84, 173. — Spezifität ihrer Wirkungen 18. — stereochemische Spezifität der Wirkung 42. — Synthesen durch dies. 67, 170.
- Fernpunkt des Auges 438.
- Ferrosalze als Oxygenasen 179.
- Festflüssiger Aggregatzustand 7.
- Fett, Abbau 167. — Ablagerung in der Leber 167. — Acetonkörperbildung daraus 168. — Artspezifität 165. — aus Eiweiß 167. — als Eiweißsparmittel 172, 200. — Emulgierung 44. — aus Kohlehydrat 165. — Konstitution 44. — aus Lipoiden 167. — Resorption im Darm 67. — Schmelzpunkt 164. — Stoffwechsel 164. — Transport 167. — Umwandlung in Kohlehydrat 177. — Verdauung im Magen 31, 34. — Verdauung durch Pankreassaft 43. — als Wärmeschutz 222, 223.
- Fettige Degeneration 167.
- Fettlösliches Vitamin 185.
- Fettsäuren, in Fäzes 58. — Löslichkeit 44. — Lösung durch die Galle 47. — der natürlichen Fette 43. — β -Oxydation 168.
- Fettsucht, hypophysäre 268.
- Fibrilläre Zuckungen der Muskeln 79, 329.
- Fibrin 71, 73.
- Fibrin ferment 71.
- Fibrinogen, Umwandlung in Fibrin 71. — n. Sedimentierungsgeschwindigkeit 86.
- Fibroin 41.
- Fieber durch Wärmestich 226.

- Fixierpunkt 480.
 Fleisch, seine Bedeutung als Nahrungsmittel 208. — Einfluß seines Genusses auf die Atmung 115. — Puri gehalt 182. — Schädlichkeit 59. — Verdauung 29, 41, 57.
 Fleischbrühe als Nahrungsmittel 31. — Puringehalt 182.
 Fleischextrakt und Magensekretion 30. — Puringehalt 182.
 Fleischmilchsäure 312.
 Flimmerepithel in den Atemwegen 109.
 Flokontrast 464.
 Formanten der Vokale 515.
 Fortpflanzung 281. — als Lebenskriterium 8.
 Fovea centralis, Bedeutung fürs Fixieren 480. — Helligkeits- und Farbenempfindlichkeit 469. — Sehschärfe 474. — Vertretung im Großhirn 396.
 Fremitus pectoralis 512.
 Freßzellen 83, 234.
 Freusbergsches Phänomen 353.
 Fruchtzucker, Umwandlung in Glykogen 176.
 Fruktose 43. — Umwandlung in Glykogen 176.
 Fundusdrüsen 32.

 Gärungen 16. — im Darm 58, 60. — Koferment ders. 179.
 Galaktose 43. — als Glykogenbildner 176.
 Galle, ihre Absonderung 49. — Zusammensetzung 46.
 Gallenfarbstoffe 46. — Entstehung 48. — Mitwirkung der Milz bei der Bildung 275. — Nachweis 46.
 Gallensäuren 46. — Bedeutung für die Fettverdauung 47. — als Cholagoga 50. — Pettenkofersche Reaktion 46. — Wirkung auf die Darmfermente 48.
 Gallensteine 47.
 Gallische Schädellehre 384.
 Ganglienzellen, Bedeutung 351. — trophische Funktion 351, 358.
 Gasabsorption 91.
 Gasanalyse 91.
 Gassekretion 102.
 Gasspannung 91. — in der Alveolarluft 100. — im Blut 101. — in den Geweben 103.
 Gastrin 32.
 Gaswechsel in den Alveolen 100. — in den Geweben 103. — in den Lungen 99. — des Muskels 312. — des Nerven 339. — respiratorischer, seine Messung 189.
 Gedächtnis als Funktion des Großhirns 381.
 Gefäßnerven 147. — reflektorische Beeinflussung 149.
 Gefäßreflexe 149.
 Gefäßtonus 148, 152, 160.
 Gefäßzentra in der Medulla oblongata 148, 370. — im Rückenmark 357.
 Gefrierpunktserniedrigung des Blutes 78. — des Harns 238. — der Milch 250.
 Gefühlssinn 525.
 Gegenfarben 455, 462.
 Gehen, Analyse 322. — als Reflexvorgang 353. — Stoffwechsel dabei 201, 323.
 Gehirn, Lokalisationslehre 384. — Physiologie des Großhirns 378 ff. — Stoffwechsel 204. — vergleichende Anatomie 377.
 Gehirnnerven, Funktionen 370.
 Gehörknöchelchen 500.
 Gehörorgan, Gehörknöchelchen 500. — Labyrinth 503. — Ohrmuschel 499. — Trommelfell 500. — Tuba Eustachii 502.
 Gehörsempfindungen, Einteilung 496. — nach Exstirpationen am Labyrinth 510. — höchste und tiefste Töne 506. — durch Knochenleitung 500. — Kombinationstöne 508. — Schwebungen 507. — Zustandekommen nach der Resonanztheorie 504, nach der Schallbildertheorie 509.
 Gehörsinn 496. — der Fische 541.
 Geistige Arbeit, Stoffwechsel 204.
 Gelbblaublindheit 471.
 Gelbsucht 47.
 Gelenksensibilität 537.
 Gemeingefühle 525.
 Gemeinschaftsbewegungen 393.
 Gepaarte Schwefelsäuren 59, 236.
 Geräusche 496, 498.
 Geruch, Lokalisation im Großhirn 398.
 Geruchsinn 520.
 Geruchskörper 521.
 Gerüstsubstanzen, pflanzliche 41. — tierische 39, 40.
 Geschlechtsfunktionen 281. — und Hypophyse 268. — und Keimdrüsen 275. — und Schilddrüse 263. — und Thymus 273.
 Geschmack, Einfluß auf die Speichelsekretion 23. — elektrischer 423. — Lokalisation im Großhirn 398. — Qualitäten 518.
 Geschmacksnerven 519.
 Geschmackssinn 518.
 Gesetz von der Erhaltung der Energie 5, 194. — der konstanten Wärmesummen 191, 193. — von den spezifischen Sinnesenergien 422.
 Gesichtsfeld, Bestimmung dess. 472. — binokulares 480. — Grenzen 479.
 Gesichtslinie 479.
 Gesichtsschwindel 494, 540.
 Gesichtswinkel 474.
 Gicht 182.
 Gigantismus 268.
 Gleichgewicht, dynamisches 5. — Erhaltung durch das Labyrinth 542. — des Körpers, Abhängigkeit vom Kleinhirn 411. — Abhängigkeit vom Rückenmark 364. — mechanische Erhaltung dess. 542. — stationäres 4.
 Gleitspeichel 20.
 Gletscherbrand 230.
 Gliadin 40. — Nährwert 172, 186.
 Globin 40, 88.
 Globuline 71, 97.
 Glossopharyngeus, Funktionen 371. — Geschmacksfasern 23, 519. — sekretorische Fasern 21.
 Glukosamin 41. — in Eiweißkörpern 177.
 Glykämie 76.
 Glykocholsäure 46.
 Glykodesoxycholsäure 46.
 Glykogen 43. — Bildung aus Eiweiß 177, aus Kohlehydrat 176. — Reaktion 176. — Verhalten im Muskel 312, 314. — bei Pankreasexstirpation 271.
 Glykokoll, Ausscheidung 174. — als Bestandteil von Eiweißkörpern 39.
 Glykoproteide 41.
 Glykosurie, durch Adrenalin 259. — alimentäre 177. — bei Akromegalie 268. — bei Diabetes 177. — nach Pankreasexstirpation 271. — durch Schilddrüsensubstanz 267.

- Glyzerin, Bildung aus Fett 44. — als Glykogenbildner 178. — aus Kohlehydrat 166.
- Glyzerinaldehyd 166, 178.
- Glyzin 40.
- Gmelinsche Reaktion 46.
- Goltz'scher Klopffversuch 137, 347.
- Großhirn 375. — Ausfallserscheinungen 391. — Balkenfunktion 404. — Charakteränderungen durch Verletzungen 403. — Hörsphäre 397. — als „Sitz“ der Intelligenz 403. — Lokalisation der Funktionen 384. — Lokalisation der Motilität 385. — Lokalisation der Sensibilität 393. — Primärzentra 399. — psychische Funktionen 380ff. — psychomotorische Zentra 385. — psychosensorische Zentra 393. — Restitutionserscheinungen nach Exstirpation 391. — Riechsphäre 398. — Schmecksphäre 398. — Schockerscheinungen 379. — Sehsphäre 395. — Sekundärzentra 399. — Sprachzentra 399. — Tiere ohne Gr. 378 ff. — vergleichende Physiologie 377. — Wandern der Zentra 391.
- Grubengas 58, 60.
- Grundfarben von Helmholtz 460.
- Grundton 496.
- Grundumsatz 195.
- Guanidin 262.
- Guanin 180.
- Günzburger'sches Reagens 32.
- Gymnemasäure 423, 519, 523.
- Haare, als Sinnesorgane 529. — Wachstum 171, 269, 276. — als Wärmeschutz 222.
- Hämatin 41, 88.
- Hämatoidin 48.
- Hämatokrit 86.
- Hämatoporphyrin 89. — Bildung 48. — als photodynamischer Farbstoff 229. — im Harn 237.
- Häminkristalle 89.
- Hämochromogen 88.
- Hämodynamik 140.
- Hämoglobin 40, 88. — Abbau durch Milz und Leber 48, 275. — Kristalle 88. — Prozentgehalt 89, Einfluß der Höhe 90. — quantitative Bestimmung 89. — Spaltprodukte 88. — Verbindungen mit Gasen 93. — Verdauung im Darm 42. — Zusammensetzung 40.
- Hämolyse 87, 88. — Einfluß der Milz 275. — durch Salze 215.
- Hämolsin 75.
- Hämometer 89.
- Hämophilie 70, 73.
- Hämopyrrol 48, 89.
- Halbseitenläsion von Brown-Séguard 363.
- Halbdurchlässige Membranen 64.
- Halbzirkelförmige Kanäle 503, 546.
- Halsreflexe, Bedeutung für die Körperhaltung 545. — tonische 369.
- Haptogenmembran 44.
- Harn, Bildung 238. — Entleerung 243. — Gefrierpunkt 238. — Menge 238. — Purine 181. — Reaktion 237. — Sedimente 235, 237. — spezifisches Gewicht 238. — Zusammensetzung 235.
- Harnblase 243. — Tonusänderungen 258, 270. — Vertretung im Großhirn 388.
- Harnindikan 236, 246.
- Harnpurine 181, 236.
- Harnsäure, Entstehen aus Purinen 181. — im Harn 235. — im Schweiß 246. — synthetische Bildung 181.
- Harnstoff, Abspaltung aus Arginin 175. — als Eiweißsperrmittel 172. — Gärung 238. — im Harn 235. — als Maß des Eiweißstoffwechsels 175, 188. — im Schweiß 246. — synthetische Bildung 174.
- Haut, Ausscheidungen 246. — Durchlässigkeit für Wasser 248. — Lichteinwirkungen 229. — segmentale Innervation 355. — als Sinnesorgan 420, 524.
- Hautreflexe 343. — Lokalisation der Zentra 356.
- Hautsinne 524. — Bedeutung für die Perzeption von Lage und Bewegung 537. — Drucksinn 528. — Ortssinn 539. — Schmerzsinne 532. — Wärme- und Kältesinn 525.
- Hauttalg 247.
- Hefepreßsaft 18. — Atmung 179.
- Helladaptation 468.
- Helligkeitskontrast 464, 467.
- Hemeralopie 468.
- Hemichromatopsie 397.
- Hemianopsie 396. — homonyme laterale 396.
- Hemiplegie 362.
- Hemizellulose 43.
- Hemmung, antagonistische 347, 389. — der Reflexe 347. — zerebrale 348.
- Heringscher Fallversuch 488.
- Heringsche Theorie der Gegenfarben 462.
- Herz 119 ff. — Aktionsströme 133. — Anatomie 121. — Anspannungszeit 135. — Arbeitsleistung 162. — Aschoff-Tawarascher Knoten 122. — Auskultation 132. — Austreibungszeit 135. — Automatie 123. — chronotrope, dromotrope, inotrope und bathmotrope Wirkungen auf dasselbe 136. — intrakardialer Druck 134. — Elektrokardiogramm 133. — Extrasystole 127, 134. — Füllung von den Venen aus 159. — Ganglien 122, Bedeutung 125. — Giftwirkungen auf dass. 136. — His'sches Bündel 122. — Innervation 135. — Kalorienproduktion 162. — Klappentätigkeit 131. — Kompensatorische Pause 128. — Kontraktionsgröße 154. — künstliche Durchströmung 123. — myogene Theorie 125. — neurogene Theorie 125. — Purkinjische Fäden 122. — Refraktärstadium 127. — Reizbarkeit 127. — Reizleitungssystem 122. — Sauerstoffverbrauch 313. — Schlagvolumen 154, 161. — Sinusknoten 122. — Spitzenstoß 129. — Tawarascher Knoten 122. — Tetanisierbarkeit 128. — Theorie seiner Tätigkeit 125. — Tonogramm 134. — Triebwerk 121. — Verschlusszeit 135. — Wogen 128.
- Herzarbeit 162.
- Herzblock 124, 136.
- Herzgifte 136.
- Herzhemmungszentrum in der Medulla oblongata 369.
- Herzklappen 131. — Schluß und Öffnung 135.
- Herzpause 121, 135.
- Herzschlag, Allorhythmie 124. — Depressorreflex 137. — Dissoziation 124, 136. — Einfluß des Hirndrucks 138. —

- Goltz'scher Klopffersuch 137. — beim Fötus 138. — Latenzzeit 127. — nervöse Einflüsse 135. — Tempo 136, Einfluß auf den Blutdruck 154. — Wirkung der Dyspnoe 138. — Wirkung von Herzgiften 136. — zeitliche Verhältnisse 127, 135.
- Herztöne 131. — graphische Registrierung 132.
- Heteroxanthin 236.
- Hexosen 43.
- Hexosediphosphorsäure im Muskel 313.
- Hippursäure 236. — Synthese im Tierkörper 174.
- Hirnanhang oder Hypophyse 268.
- Hirnstamm als leitendes Organ 374. — Reflexfunktionen 365.
- Hirudin 73.
- Hissches Bündel 122.
- Histamin 30, 59. — u. Blutdruck 152. — vasodilatierende Wirkung 149, 150.
- Histidin 40, 59.
- Hitzschlag 223.
- Hoden als endokrine Drüsen 275. — Leydig'sche Zwischenzellen 279. — Sterilisation durch Röntgenstrahlen 279.
- Höheneinfluß auf den Eiweißabbau 173. — auf den Eiweißansatz 200.
- Höhenklima 90, 173, 200.
- Hören, Lokalisation im Großhirn 397.
- Hörsphäre 397.
- Homöomiotische Tiere 78.
- Homöotherme Tiere 219.
- Hormone 254ff. — Einfluß auf das Wachstum 293.
- Hormondrüsen 255ff.
- Hornhaut, Astigmatismus 442. — Krümmungsradien 431, 432.
- Horopter 484.
- Humoralphysiologie 255.
- Hunger, Gewichtsverlust der einzelnen Organe 195. — Stoffwechsel 194.
- Hungerbewegungen des Magens 35.
- Hungergefühl 35.
- Hungerminimum des Eiweißverbrauchs 194, 199.
- Husten 110. — in Abhängigkeit von der Medulla oblongata 367.
- Hydroa aestiva 230.
- Hydrobilirubin 49.
- Hyperakusis 371.
- Hyperglykämie alimentäre 176. — bei Diabetes 271.
- Hypermetropie 440.
- Hyperopie 440. — senile 439.
- Hyperpituitarismus 269.
- Hyperpnoe 113.
- Hyperthyreoidismus 267.
- Hypinose 73.
- Hypoglossus, Funktionen 370.
- Hypophyse 268.
- Hypophysin 271.
- Hypotonie, zerebellare 409.
- Hypoxanthin 180. — in den Muskeln 182.
- Identische Netzhautpunkte 483.
- Identische Schrichtung 482.
- Idiomuskulärer Wulst 301.
- Ikterus 47. — pleiochromer 48.
- Ileus 53.
- Imidazolyläthylamin 59.
- Inadäquate Reize 421.
- Incontinentia alvi 62, 357. — urinae 244, 357.
- Indifferente Elektrode 337.
- Indikan 236, 246.
- Indol 58.
- Indoxylschwefelsäure 236.
- Induktion von Lichtempfindungen 465.
- Induktionsströme, Verlauf 331.
- Infundibulum 227.
- Inkrete 255.
- Innervationsempfindungen 495.
- Inosit 312.
- Inotrope Wirkungen aufs Herz 136.
- Inspiration, Muskeln für die 105.
- Inspirationsluft, Zusammensetzung 99.
- Insuffizienzkrankheiten 186.
- Intenzionszittern 409.
- Intervall, farbloses 462, 469.
- Intrazelluläre Fermente 18, 42, 170.
- Inulase 75.
- Inulin 43.
- Involution, senile der Sexualorgane 285.
- Invertase, im Blut 75. — im Darmsaft 51.
- Ionenwirkungen, physiologische 215.
- Irreziproke Leitung im Rückenmark 345.
- Isodynamie 195.
- Isometrische Kontraktion 316.
- Isotonie 64.
- Isotonische Kontraktion 298.
- Jodothyryn 266.
- Jodthyreoglobulin 266.
- Kachexia strumipriva 261.
- Kadaverin 59.
- Kältesinn 525.
- Käse, Bildung 250.
- Kakke-Krankheit 184.
- Kalksalze, allgemein-physiologische Bedeutung 128, 213, 216. — Ausscheidung durch den Dickdarm 234. — Bedeutung für die Blutgerinnung 71, für die Erregung vom Nerven aus 128, für die Milchgerinnung 29. — der Milch 249. — Wirkung aufs Herz 128, 213.
- Kalorienbedarf und Alter 196. — bei Arbeit 200. — bei geistiger Arbeit 204. — im Hunger 195. — und Körpergröße 195. — bei Ruhe 197.
- Kalorienwert der Nahrungsmittel 198. — der Nahrungsstoffe 194.
- Kalorimeter 193.
- Kalorischer Nystagmus 548.
- Kampf ums Dasein 8.
- Kapillardruck 144, 146.
- Kapillaren, Blutdruck 144, 146. — Blutgeschwindigkeit 160. — Lumenänderung 147, 149. — Puls 161.
- Kapillarpuls 161.
- Kapillartonometer 147.
- Karbaminsaures Ammonium 174.
- Kardia 27.
- Kardinalpunkte des Auges 428.
- Kardiophonogramm 133.
- Kasein 249. — Einfluß auf das Wachstum 292. — Nährwert 171. — als Phosphorprotein 41. — quantitative Zusammensetzung 40. — Umwandlung im Darm 43, im Magen 29.
- Kastration, Folgen ders. 275, 276.
- Katalysatoren 18.
- Katalektrotonus 335.
- Kauen, Bedeutung für die Ausnutzung der Nahrung 206. — Zentrum in der Medulla oblongata 366.

- Kefyr 60, 250.
 Kehlkopf als Stimmorgan 511. — Wachstum 275.
 Kehlkopfspiegel 512.
 Keimdrüsen 275, 281, 284. — als Drüsen mit innerer Sekretion 275. — Empfindlichkeit gegen Röntgenstrahlen 279. — Transplantation 276. — Verfütterung 278.
 Keimzellen 281.
 Keratin, als Gerüstsubstanz 41. — quantitative Zusammensetzung 40. — Verdaulichkeit 29. — Verfütterung des K. und Wachstum der Haare 171.
 Keratomalazie 185.
 Keratoskop 444.
 Kernsubstanzen, Verdauung und Stoffwechsel 180.
 Kettenreflexe 352.
 Kinderlähmung 392.
 Kinematograph 458.
 Kjeldahl-Verfahren der Stickstoffbestimmung 188.
 Klänge 496, 497.
 Klangfarbe 498.
 Kleider als Wärmeschutz 222, 223.
 Kleinhirn 408. — Exstirpation 409. — Rindenreizung 410.
 Klimakterium 285.
 Klopfversuch von Goltz 137, 347.
 Kniephänomen 343.
 Knochenwachstum und Schilddrüse 263, 267. — und Hypophyse 268. — und Thymus 266, 276. — und Keimdrüsen 276, 278.
 Knotenpunkt des Auges 428.
 Kochsalz, Bedürfnis danach 214. — Giftigkeit 216.
 Kochsalzlösung, physiologische 79.
 Körperfarben 461.
 Körperfühlsphäre im Großhirn 393.
 Körpergewicht in verschiedenen Altern 289.
 Körperlänge in verschiedenen Altern 289.
 Körpertemperatur 218.
 Koferment der Atmung 179, 314. — der Gärung 179.
 Koffein 182.
 Kohlehydrate, Abbau 178. — antiketoplastische Eigenschaften 168. — Assimilation 176. — aus Eiweiß 177. — als Eiweißsparer 172, 199. — aus Fett 177. — Gärung im Dickdarm 58. — bei der Muskelkontraktion 313. — Resorption im Darm 68. — Stoffwechsel 175, bei Diabetes 259, 263, 267, 270, 271. — Umwandlung in Fett 165. — chemische Zusammensetzung 43.
 Kohlenoxydvergiftung 98.
 Kohlensäure als Atemreiz 114, 115. — Bildung in den Geweben 103. — als Blutpuffer 80. — Bindung im Blut 97. — Einfluß auf den Herzschlag 138, auf die Sauerstoffspannung im Blut 97, 102, 103. — als Hormon 28). — vasodilatierende Wirkung 150.
 Kokain zur Stillung des Hungers 35. — Wirkung auf die Haut 527, 537, auf die Pupille 441.
 Kollagen 29. — Verdauung durch Pankreassaft 42.
 Kollapsluft 109.
 Kolloide, allgemeine Bedeutung 7. — Bedeutung für die Zellen 215. — Begriff 64. — Beziehungen zu den Salzen 215.
 Kolostrum 252.
 Kombinationstöne 508.
 Kompaßreflex 342, 543.
 Kompensation von Geschmücken 520.
 Kompensatorische Pause beim Herzen 127.
 Komplementärfarben 459.
 Komplementärluft 109.
 Konsonanten 516.
 Kontaktwirkungen 18.
 Kontraktionswelle 299.
 Kontraktur beim ermüdeten Muskel 301. — beim Tetanus 309.
 Kontrast beim Geschmack 520. — beim Sehen 464.
 Konvergenz und Akkommodation 440. — beim Binokularsehen 482, 492.
 Konzentrationsarbeit 67, 102.
 Koordination 320, 341, 348, 410. — der Extremitätenbewegungen 349.
 Kopfnystagmus 545.
 Kopfstimme 512.
 Koprosterin 49.
 Kornealreflex 341, 342.
 Korrelation, chemische 280.
 Korrespondierende Netzhautpunkte 482.
 Kostaltypus der Atmung 106.
 Kostmaß nach Voit 207.
 Kraftsinn 538.
 Krampfadern 160.
 Kratzreflex beim Hund 352.
 Kreatin und Eiweißabbau 175. — in der Milch 250. — und Muskeltonus 314.
 Kreatinin, Bildung beim Muskeltonus 175, 314. — und Eiweißabbau 175. — im Harn 235. — in der Milch 250. — im Schweiß 246.
 Kresol 58, 236.
 Kretinismus 260, 263. — Ursachen 264.
 Kreuzungspunkt der Richtungsstrahlen 427.
 Kriterien des Lebens 3.
 Kropf 260.
 Kryptorchismus 279.
 Kurare 338.
 Kurzsichtigkeit 440.
 Kymographion 145, 151.
 Labferment, im Magensaft 29. — Natur seiner Wirkung 249. — im Pankreassaft 43.
 Labyrinth, Beziehung zum Kleinhirn 411. — Einfluß auf die Körperhaltung 368. — Folgen der Exstirpation 543 ff. — als Gehörorgan 503. — als Gleichgewichtsorgan 542. — als statisches Organ 539 ff.
 Labyrinthschwindel 540.
 Labyrinthonus 368, 544. — Vermittlung durch Rückenmark 361.
 Lähmung, periphere und radikuläre 356.
 Lävulose, Umwandlung in Glykogen 176.
 Lagesinne 536. — für die Lage einzelner Körperteile 536, des ganzen Körpers 538.
 Lagophthalmus 371.
 Laktalbumin 250. — Einfluß auf das Wachstum 292.
 Laktase 43. — des Darmsafts 51. — Auftreten im Darm 43, 75.
 Laktazidogen 313.
 Laktoglobulin 250.
 Laktose 43, 51, 250.
 Langerhanssche Inseln 273.
 Lanocerin 248.
 Lanolin 248. — Resorbierbarkeit 67.
 Laryngoskopie 512.
 Latenzzeit des Herzens 127. — des Muskels 298.
 Lebenserscheinungen 1.
 Lebenskraft 2.
 Lebensknoten 111.

- Leber als Glykogen depot 176. — als Ort der Gallenbildung 46ff., der Harnstoffbildung 174. — Mitwirkung beim Abbau der Blutkörperchen 274.
 Leberdiastase 178.
 Lebertran 185.
 Legumin 40.
 Leichenstarre 318.
 Leichenwachs 167.
 Leim 29. — als Eiweißersatz 170, 186. — Verdauung im Magen 28, durch Pankreassaft 42.
 Leistungszuwachs des Energieverbrauchs 195.
 Leukämie 83, 234.
 Leukopenie 83.
 Leukozyten als Eiterkörperchen 84. — verschiedene Formen 81, 84. — physiologische Bedeutung 83. — Zählung 82.
 Leukozytose 83.
 Leydig'sche Zellen 279.
 Lezithin, synthetische Bildung 183. — in der Galle 49. — in der Milch 249. — als Nahrungstoff 182. — im Sperma 281.
 Licht, physiologische Wirkungen 229.
 Lichtempfindungen, Beziehungen zu den Lichtreizen 456. — farblose und farbige 454. — Helligkeit 456. — Induktion 465. — Schwarzempfindung 460. — Simultankontrast 464. — Sukzessivkontrast 466. — Übersicht 454.
 Lichttod 229.
 Lidreflex 367.
 Lidspalte, Erweiterung durch Adrenalin 258, bei Basedow'scher Krankheit 267, vom Centrum ciliospinale aus 357. — Verengerung bei Kretinismus und Athyreosis 263, bei Verletzung des Centrum ciliospinale 357.
 Liftreaktion 549.
 Limulus-Herz 126.
 Linkshändigkeit 403.
 Linse, Bau 431. — Brechkraft in verschiedenen Altern 439. — Regeneration 280. — Verhalten bei der Akkommodation 433.
 Linsenschlottern 435.
 Lipämie 76.
 Lipase, im Blut 75. — in den Geweben 167. — im Magensaft 30. — im Pankreassaft 43.
 Höber, Physiologie. 3. Aufl.
 Lipoide, Bedeutung für die Zellpermeabilität 87, 183. — Eigenschaften und Herkunft 49. — Einfluß auf die Resorptionsgeschwindigkeit 66. — als Lösungsmittel für Gase 92. — als Nahrungstoffe 182.
 Little'sche Krankheit 349.
 Logorrhoe 401.
 Lokaladaptation 467.
 Lokalisation im Großhirn 384. — im Kleinhirn 409.
 Lokalzeichen 529.
 Lokomotion, als Reflexvorgang 353.
 Luftembolie 107, 159. — Luftperspektive 486.
 Lungen, Bewegungen 104. — Elastizität 104, 106. — Emphysem 108. — Schwimmprobe 109. — Vitalkapazität 109.
 Lungenalveolen, Gasgehalt 100. — Gasaustausch 101.
 Lungenblähung 108.
 Lungenzug, Bedeutung für die Expiration 106, für die Füllung des Herzens 107, 159.
 Lymphe, Bildung 232. — Giftigkeit 234. — Menge 232. — Strömungsgeschwindigkeit 234. — Zusammensetzung 231.
 Lymphagoga 234.
 Lymphdrüsen 234.
 Lymphgefäße 234.
 Lymphherzen 234.
 Lymphozyten 81. — in der Lymphe 234.
 Lysin 40. — Bedeutung für das Wachstum 180, 292. — Umwandlung im Dickdarm 59.
 Macula lutea, Vertretung im Großhirn 396.
 Magen 27. — Entbehrlichkeit 38. — Entleerung 38. — Resorption des Inhalts 38. — Schichtung des Inhalts 37.
 Magenbewegungen 33. — im Hunger 35. — Innervation 36.
 Magendrüsen 32.
 Magensaft, Absonderung 30. — Durchmischung mit dem Mageninhalt 35. — verdauende Wirkung 27. — Zusammensetzung 27.
 Magermilch 249.
 Makropie 487.
 Maltase 43. — des Darmsafts 51.
 Maltose 16, 43. — Bildung durch Speichelwirkung 43.
 Mamillarreflex 342.
 Manègebewegungen durch Verletzung des Hirnstamms 372. — bei Verletzung des Kleinhirns 409, des Labyrinth 543.
 Mannose, Geschmack 42.
 Marey'sche Trommel 35.
 Mariottescher Fleck 449.
 Maskulierung 277.
 Massenwirkungsgesetz 95.
 Mastzellen 82.
 Medulla oblongata 366. — Atemzentrum 111. — automatische Funktionen 369. — als Gefäßzentrum 148, 152. — Reflexfunktionen 366. — Schluckzentrum 26, 366. — Vaguszentrum 136, 138.
 Meduse, rhythmische Tätigkeit der 126.
 Meißner'scher Versuch 530.
 Melanodermie bei Addison'scher Krankheit 256.
 Membrandiffusion 63.
 Membranen, halbdurchlässige 64.
 Menstruation 284. — Einfluß des Ovariums 279, 284. — und Tetanie 261.
 Meridianasymmetrie der Hornhaut 443.
 Meteorismus bei Athyreosis 262.
 Methämoglobin 98.
 Methan 58, 60.
 Mikropie 487, 492.
 Mikrostruktur 2.
 Mikrotonometer 101.
 Milch, Absonderung 253, Einfluß der Ovarien 278. — des Nervensystems 253. — Aschenzusammensetzung 214, 251. — Einwirkung des Speichels 20. — Fett 165. — Gefrierpunkt 250. — Gerinnung 249, Ähnlichkeit mit der Blutgerinnung 71, 249. — als Nahrungsmittel 251. — Purine 182, 250, 252. — Salze 214, 250. — Sekretion 253, Einfluß der Hypophyse 270. — spezifisches Gewicht 250. — Verdauung im Magen 29. — Vitamine 184, 185, 250. — Zusammensetzung 248, quantitative 250, und Wachstum 214, 251.
 Milchsäure, beim Kohlehydratabbau 178. — Nachweis im Mageninhalt 33. — im Muskel 312, 313, 318. — als Ursache der Milchge-

- rinnung 29, 250. — Verwendung zur Aminosäuresynthese 172. — Wirkung auf die Blutgefäße 150.
- Milchzucker 43. — in der Milch 250. — Spaltung im Darm 43, durch Darmsaft 51, durch Pankreassaft 43. — Vergärung zu Milchsäure 43.
- Millons Reagens 28.
- Milz 274.
- Minimalluft 109.
- Miosis 441. — bei Verletzung des Centrum ciliospinale 356.
- Mittelton 508.
- Möller-Barlowsche Krankheit 184.
- Molke 249.
- Molkenweiß 249.
- Momentreize 329.
- Mouches volantes 445, 486, 495.
- Mückensehen 445, 486, 495.
- Murexidprobe 235.
- Muskarin als parasympathisches Gift 415. — Wirkung aufs Herz 136.
- Muskelarbeit und Eiweißansatz 200. — und Eiweißbedarf 200. — und Nahrungsbedarf 202. — Übungseinfluß 202. — und Wärmeproduktion 220. — Wirkungsgrad 202.
- Muskelkraft 300. — absolute 301. — Einfluß der Keimdrüsen 276, 279. — bei Ermüdung 302. — im Tetanus 308.
- Muskeln, Aktionsströme 305. — Alles- oder Nichts-gesetz 299. — Arbeit und Wärmebildung 315. — Atmung 179. — auxotonische Zuckung 301. — chemische Zusammensetzung 312. — Degeneration und Nutzzeit 330, 373. — doppelsinniges Leistungsvermögen 299. — Durchblutung 149. — Elektrotonus 336. — Ermüdung 301, ergographische Messung derselben 302. — künstliche Erregung 296. — Extraktivstoffe 312. — fibrilläre Zuckungen 79, 329. — Flimmern 329. — Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erregung 299. — glatte 296, 298, 299, Stoffwechsel 314, Tetanus 308. — Glykogengehalt 176. — Hubhöhe 299, und Wärmebildung 316. — Hypoxanthin 182. — idiomuskulärer Wulst 301. — isometrische Zuckung 316. — isotonische Zuckung 298. — Kontraktur 301, 309. — Laktazidogen 313. — Latenzzeit 298. — Muskelton 131, 309. — negative Schwankung 305. — Refraktärstadium 128. — rote und weiße 298. — Ruhestrome 303. — Sarkoplasma 311. — Schwannscher Versuch 300. — sekundäre Zuckung 307. — Starverkürzung 318. — Stoffwechsel 178, 200, 312. — Tetanus 307. — Theorien der Kontraktion 318. — Tonus 309, vom Kleinhirn aus 411. — Totenstarre 318. — Tragerekord 311. — Wärmebildung 315. — Wirkungsgrad 202, 317. — Ansprechen auf Zeitreize 330. — Zuckung ohne Metalle 304.
- Muskelströme 303.
- Muskelton des Herzens 131, 309. — im Tetanus 309. — im Tonus 311.
- Muskeltonus 309. — Bedeutung für die Wärmeregulation 225. — vom Kleinhirn aus 364, 411. — und Kreatininbildung 175, 314. — vom Labyrinth aus 362. — Stoffwechsel 310, 314.
- Muskelzuckung bei Ermüdung 301. — isometrische 316. — isotonische 298. — Latenzzeit 298. — maximale 299. — Superposition 308. — Verkürzungsgröße 308. — wellenförmiger Verlauf 299. — zeitlicher Verlauf 298.
- Muzin des Dickdarms 56. — der Galle 46. — als Glykoproteid 41. — des Speichels, Reaktion 15.
- Mydriasis 441. — durch Adrenalin 258, 260. — vom Centrum ciliospinale aus 356. — bei Hyperthyreoidismus 267. — durch Okulomotoriuslähmung 372. — und Pankreasdiabetes 260, 273.
- Myelogenese 359.
- Myogen 312.
- Myopie 440.
- Myosin 312.
- Myxödem 260.
- Nachbild 458, 466. — negatives und positives 467. — phasisches Abklingen 467. — Purkinjesches 468.
- Nachkontrast 466.
- Nährwert der einzelnen Nahrungsmittel 205.
- Nahpunkt des Auges 438.
- Nahrungsmittel, Ausnützung (Tabelle) 205. — Definition 13. — Verbrennungswärme 191, (Tabelle) 192. — Zusammensetzung (Tabelle) 14.
- Nahrungsstoffe, Definition 13. — akzessorische 186.
- Narkose, mikroskopisches Bild ders. 332, 335. — des Rückenmarks 346.
- Nativismus in der Raumfassung 495.
- Natriumionen, physiologische Bedeutung 78, 213.
- Nebenkontrast 464.
- Nebennieren 255.
- Nebenschilddrüsen 260.
- Negativer Druck im Thorax 107. — Bedeutung für die Blutströmung 155, 159.
- Negative Schwankung des Muskelstroms 305.
- Negativitätswelle 305.
- Nerven, Aktionsströme 326, 332. — allgemeine Physiologie 324. — Degeneration 358, und Nutzzeit 330. — doppelsinniges Leistungsvermögen 325. — effektorische 325. — elektrische Reizung 329. — Elektrotonus 334. — Entartungsreaktion 337.
- Ermüdbarkeit 338. — Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erregung 327. — histologische Änderungen bei der Erregung 332. — histologischer Bau 326. — isolierte Leitung 325, 327. — Refraktärstadium 127. — rezeptorische 324. — Stoffwechsel 339. — trophische Funktionen 372. — Wärmebildung 339.
- Netzhaut, Adaptation 468. — Deckpunkte 483. — dispartate Punkte 484, 488. — Duplizitätstheorie 469. — Eigengrau der 467. — Ermüdung 467. — Farbenblindheit 469 ff. — identische oder korrespondierende Punkte 483. — Kontraktion der Zapfennenglieder 454. — lichtempfindliche Schicht 449. — Optogramme 453. — Sehpurpur 452. — Stäbchen-

- und Zapfenfunktion 469, 473. — Stäbchen- und Zapfenschicht als lichtempfindliche Schicht 452, 469, 473. — Struktur 45¹⁾. — Trägheit 458. — verkehrtes Bild 478. — Wanderung des Pigments 453.
- Netzmagen 60.
- Neurofibrillen als leitendes Element 326. — Verhalten zu den Ganglienzellen 351.
- Neurokeratin, Veränderung bei der Erregung 332.
- Neuropil 351.
- Nieren, Bau 239. — Diurese 241. — osmotische Arbeit 238. — Sauerstoffverbrauch 239, 241. — Sekretion 238.
- Nieren 110. — in Abhängigkeit von der Medulla oblongata 367.
- Nikotin Wirkung auf das vegetative Nervensystem 244, 412.
- Nuklease 180. — des Darmsafts 51.
- Nuklein 180.
- Nukleinsäure 180.
- Nukleoproteide, Verdauung im Darm 42, 51. — Zusammensetzung 41, 180.
- Nukleoside 180.
- Nutzzeit 230.
- Nystagmus, von den Augen aus 545. — bei totaler Farbenblindheit 472. — bei Verletzung des Hirnstamms 374. — kalorischer 548. — bei Kleinhirnerkrankung 409. — von den Labyrinthen aus 545.
- Nystensche Regel 318.
- Oberflächensensibilität 363.
- Ödem 131.
- Ohr, 499. — Binnenmuskeln 501. — Gehörknöchelchen 500. — inneres 502, als Gehörorgan 504, 510, 541, als Gleichgewichtsorgan 539 ff. — Ohrmuschel 499. — Trommelfell 500. — Tuba Eustachii 502.
- Okulomotorius, Funktionen 371, 437, 441, 482.
- Olfaktometer 522.
- Onkograph 151.
- Oozytin 287.
- Ophthalmometer 430.
- Ophthalmoskopie 447.
- Optikuskreuzung 395, 480.
- Optische Täuschungen bei geometrischen Figuren 477, 486. — über Bewegungen 494, 495.
- Optogramm 453.
- Optometer zur Bestimmung des Nahpunktes 438.
- Organeigenes Eiweiß 170.
- Organische Form 7.
- Organotherapie 265.
- Ornithin 175.
- Ortssinn der Haut 531.
- Osmoregulation 77.
- Osmometer 64.
- Osmose 64.
- Osmotische Arbeit 67. — der Nieren 238.
- Osmotischer Druck, Einfluß des Stoffwechsels 233, auf das Wachstum 293. — Messung durch Kryoskopie 78. — direkte Messung 64.
- Osmotische Eigenschaften der Blutkörperchen 86. — der Zellen 77.
- Otozysten als statische Organe 549.
- Otokonien 549.
- Ovarien als endokrine Drüsen 276.
- Ovulation 284.
- Oxalsäure im Harn 237.
- Oxydation, im Organismus, Theorie 179.
- β -Oxybuttersäure 168.
- Oxygenase 179.
- Oxyhämoglobin, Dissoziation 95. — Spektrum 94.
- Pankreas 39. — Erregung durch Nerven 45, durch Sekretin 45. — Exstirpation und Diabetes 259, 271. — als Hormondrüse 271. — und Körpertemperatur 228, 271.
- Pankreasdiastase 43.
- Pankreaslipase 43.
- Pankreassaft, Anpassung der Zusammensetzung an die Nahrung 45. — Gewinnung 39. — Wirkung auf Eiweiß 41. — Zusammensetzung 43.
- Pansen 60.
- Pansenbakterien, Eiweißbildung in ihnen 172.
- Parabiose 272. — bei Gravidität 278.
- Paraganglien 256.
- Parakasein 29, 43, 249.
- Paraphasie 400.
- Parasympathisches Nervensystem 414.
- Paraxanthin 236.
- Parenterale Injektion 73, 198.
- Parthenogenese, künstliche 286, 288.
- Parthenogenetische Entwicklung durch Salze 215.
- Patellarreflex 343.
- Pellagra 230.
- Pentosane 43. — Verhalten im Dickdarm 58.
- Pentosen 43.
- Pepsin, verdauende Wirkung 28.
- Peptide 28, 40. — Verdauung durch Pankreassaft 41.
- Peptolytisches Ferment 51.
- Peptone, Artspezifität 169. — Bildung im Magen 28, 41. — als Cholagoga 50. — Einfluß auf die Blutgerinnung 73. — Resorption im Magen 38.
- Perimeter 472, 479.
- Periostreflexe 343.
- Peristaltische Bewegungen des Darms 52. — des Magens 33.
- Permeabilität der Zellen 87, 88, 213.
- Persönliche Zeit 327, 406.
- Perspiratio insensibilis 221, 248.
- Pettenkofersche Reaktion 46.
- Pflanzenkost 57, 200, 205, 209.
- Pflügersches Zuckungsgesetz 335.
- Phagozytose 83, 234.
- Phenol 58, 236.
- Phonation, Zentrum in der Medulla oblongata 366. — Beziehung zur Vierhügelregion 374.
- Phosphen 422.
- Phosphorproteide 41.
- Photodynamische Farbstoffe 229.
- Phrenologie 384.
- Phylogenie 8.
- Physiologische Kochsalzlösung 79.
- Physostigmin als Gegen Gift gegen Kurare 338. — als parasymphathisches Gift 415. — Wirkung auf den Ciliarmuskel 437, auf den Sphincter iridis 441.
- Piezometer 141.
- Pigmentwanderung in der Haut 230. — in der Netzhaut 453.
- Pilokarpin als parasymphathisches Gift 415. — Wirkung

- auf den Ciliarmuskel 437,
auf den Sphincter iridis 441,
auf die Schweißdrüsen 247.
Figüre 259. — abhängig von
der Medulla oblongata 370.
Pituglandol 270.
Pituitrin 270.
Plantarreflex 343.
Plasmahaut, Ionendurch-
lässigkeit 334. — Perme-
abilität für Salze 77, 87, 88.
Plazentareißer im Blut 76.
Plethysmograph 151. —
der Schädel als 204, 405.
Pneumothorax 106, 117.
Poikilomotische Tiere 78.
Poikilotherme Tiere 219.
Poiseuillesches Gesetz
142.
Polares Versagen 336.
Polsterpfeifen 511.
Polyneuritis gallinarum
184.
Polyopia monophthalmi-
ca 444.
Polypeptide 40.
Postganglionäre Nerven-
fasern 414.
Präganglionäre Nerven-
fasern 414.
Präzipitin 75.
Presbyopie 439.
Primärstellung der Augen
480.
Primärzentra im Großhirn
399.
Prinzip der gemeinsamen
Strecke 352.
Prinzipalfarben 455.
Prolin 40.
Propriozeptive Reize 347,
536.
Prostata 283.
Protanopie 470.
Proteide 40.
Protein s. Eiweiß.
Proteolytische Fermente
41. — der Leukozyten 84. —
im Blut 76. — in den Orga-
nen 173.
Protoplasma 3. — Kon-
sistenz und Salzgehalt 215.
Protrusio bulbi 258, 267,
357.
Pseudoglobulin 73.
Pseudoskop 491.
Psychische Funktionen
des Gehirns 380 ff., 416. —
ihre Untersuchung bei Hun-
den 24. — der Lebewesen 9.
Psychogalvanischer Re-
flex 333.
Psychomotorische Zent-
tra 385.
Psychosensorische Zentra
393.
- Ptosis 372.
Ptyalin des Speichels 16. —
Wirkung im Magen 36.
Pubertät und Wachstum
290.
Pubertätsdrüse 279.
Puffersubstanzen 80.
Puls 156. — Fortpflanzungs-
geschwindigkeit 158. —
Frequenz 139. — Registrie-
rung 157.
Pulsschreiber 157.
Pulsus celer 159.
Pulsus tardus 159.
Pupille, Abhängigkeit vom
Rückenmark 356, von der
Vierhügelregion 367. — Er-
weiterung bei Hyperthy-
reoidismus 267, durch Adre-
nalin 258, 267. — reflektori-
sche Erweiterung 356, Ver-
engung 342. — Ursache
ihrer Schwärze 446. — Ver-
engung bei Belichtung und
bei Akkommodation 440. —
Verhalten bei Rindenblind-
heit 395.
Pupillenreaktion 342, 440.
— konsensuelle 368.
Purine in der Milch 250, 252.
— in der Nahrung 180, 186.
— Stoffwechsel 181. —
synthetische Bildung 181,
182.
Purkinje-Sansonsche
Bildchen 43). — Verhal-
ten bei der Akkommodation
434.
Purkinjesche Aderfigur
451.
Purkinjesche Fäden des
Herzens 122.
Purkinjesches Nachbild
468.
Purkinjesches Phänomen
461. — bei totaler Farben-
blindheit 472.
Pylorusdrüsen 32.
Pylorusreflexe 34.
Pyramidenbahnen 361. —
Durchschneidung und De-
generation 362.
Pyrimidine 180, 182.
- Quadrantenanopsie 396.
Quakreflex 348.
Quark 250.
Querdisparation 488.
Quotient, respiratorischer
165, 176, 190. — beim
Diabetes 179.
- Rahm 249.
Randkontrast 465.
- Raumauffassung auf op-
tischem Weg 493. — durch
die Haut 532.
Raumschwellen der Haut
531.
Reaktionsregulatoren 80.
Reaktionszeit 405. — mus-
kuläre und sensorielle Re-
aktion 4 6.
Reflexbogen 343.
Reflexe 340. — Antagoni-
stenhemmung 347. — be-
dingte 24, 31. — Begriff des
23, 340. — direkter Streck-
353. — beim Frosch 341. —
ohne Ganglienzellen 351. —
gekreuzter Beuge- 353. —
gekreuzter Streck- 353. —
Hemmung ders. 347. —
Lokalisation der Reflex-
zentra 356. — der Medulla
oblongata 366. — beim
Menschen 342. — Prinzip
der gemeinsamen Strecke
352. — psycho-galvanischer
333. — Reflexumkehr 354.
— Rückschlagsbewegung
354. — tonische 348. —
Uexküllsche Regel 354. —
unbedingte 24.
Reflexhemmung 347.
Reflextonus 348, 368.
Reflexumkehr 354.
Reflexzeit 344.
Reflexzentrum 343.
Refraktärstadium des Her-
zens 127. — bei Muskeln
und Nerven 127.
Regeneration 6. — der Lin-
se von Triton 280.
Regio hypothalamica als
Sympathikuszentrum 227,
270, 416.
Reitbahnbewegungen
durch Verletzung des Hirn-
stamms 372. — bei Ver-
letzung des Kleinhirns 409.
— nach Labyrinthstir-
pation 543.
Reize, adäquate und in-
adäquate 421. — direkte
und indirekte 296. — maxi-
male und übermaximale
299. — Nutzzeit 330. —
propriozeptive 347. — ver-
schiedene Formen 297.
Reizhaar 529.
Reizleitungssystem des
Herzens 122 ff.
Reizschwelle 299, 420.
Reserveluft 109.
Residualluft 107, 109.
Resonatoren 498.
Resonatoretheorie des
Hörens 504.

- Resorption, Bedingungen dafür 44. — Geschwindigkeit 66. — der Fette 67. — der Kohlehydrate und Eiweißkörper 68. — im Magen 38. — physikalisch-chemische Kräfte 65.
- Respirationskalorimeter 193.
- Respirationsluft 109.
- Respiratorischer Quotient, Bedeutung 165, 190. — beim Diabetes 179. — bei Zufuhr von Kohlehydrat 176. — bei Kohlehydratmast 165.
- Reststickstoff 76.
- Reziproke Innervation der Antagonisten 389.
- Rheotaxis bei Spermatozoen 282.
- Rhodopsin 452.
- Richtungsschwelle für Druckreize 532.
- Riesenwuchs 268.
- Rindenblindheit 395.
- Rindenepilepsie 385, 399.
- Rindentaubheit 397.
- Rindenzentra im Großhirn 385ff. — im Kleinhirn 410. — Wandern ders. 391.
- Ringersche Lösung 51, 79, 128, 213.
- Rinnescher Versuch 500.
- Rizinprobe 28.
- Rohrzucker 43. — Abwehr im Blut 75. — Spaltung durch Darmsaft 51.
- Rombergsches Phänomen 350.
- Rotgrünblindheit 469.
- Rückenmark 340. — aufsteigende und absteigende Bahnen 361. — Bahnung 346. — Durchschneidungen 362. — Erregbarkeit 345. — Halbseitenläsion 363. — Hemmung 347. — irzeiproke Leitung 344. — als Leitungsorgan 357. — als Reflexorgan 341. — Aussendung rhythmischer Impulse 345. — Sauerstoffbedürfnis 345. — seelische Fähigkeiten 383. — segmentale Gliederung 355. — Stoffwechsel 214, 345. — Summation der Erregungen 346. — Tonus 348.
- Rückschlagsbewegung 354.
- Ruhestrom des Muskels 303. — Theorie 333.
- Sacharose 43, s. Rohrzucker.
- Saitengalvanometer 133.
- Salkowskische Reaktion 47.
- Salze des Blutserums 77. — der Milch, Bedeutung 214, 251. — als Nahrungsstoffe 14, 212. — osmotische Wirkung 213. — physiologische Bedeutung 78, 212.
- Salzfrosch 103.
- Salzsäure, antibakterielle Wirkung im Magen 33, 38. — als Erreger des Pankreas 45. — des Magens 27. — Bildung im Magen 32. — Nachweis im Magensaft 32.
- Samenblasen 283.
- Samenfäden, physiologische Eigenschaften 282. — ihre Rolle bei der Befruchtung 285ff.
- Santonin, Gelbsehen 423.
- Sarkoplasma, Bedeutung 311.
- Sauerstoff, Bedarf der Gewebe 111, 345. — Bindung im Blut 93. — Einfluß auf die Atmung 113, 114, des Mangels auf den Eiweißstoffwechsel 173. — Verbrauch bei der Eientwicklung 287, in den Geweben 103.
- Schallbildtheorie des Hörens 509.
- Schallrichtung 499.
- Schaltungsphänomen 354.
- Scheinerscher Versuch 438.
- Scheinfütterung 30, 44.
- Schilddrüse 260, 262. — Beziehung zum Sympathikus 267. — sekretorische Nerven 267. — Symptome der Athyreosis 267. der Überfunktion 267. — Transplantation 265. — und Wärmeregulation 228.
- Schlaf 406.
- Schlagvolumen des Herzens 154. — Bestimmung 161.
- Schleimstoff des Speichels 15.
- Schlucken 26.
- Schluckzentrum 26, 366.
- Schmerz, Empfindlichkeit der Eingeweide 415, 533. — Leitung im Rückenmark 363.
- Schmerzsinne 532.
- Schmierspeichel 20.
- Schock, des Zentralnervensystems 112. — beim Rückenmark 342. — beim Gehirn 391.
- Schriftblindheit 401.
- Schroedersche Treppe 486.
- Schwangerschaftsreaktion 76, 86.
- Schwannscher Versuch am Muskel 300.
- Schwarzempfindung 460.
- Schweiß, Menge 223, 246. — als Mittel der Wärmeregulation 220, 223. — Stickstoffgehalt 188. — Zusammensetzung 246.
- Schweißdrüsen, Innervation 247. — Rückenmarkszentra 357. — Verteilung 247.
- Schwefelsäuren, gepaarte 59.
- Schwerpunkt des Körpers 320.
- Schwimmbase, Gasgehalt 102.
- Schwindel, Drehschwindel 540, 548. — galvanischer 540. — Gesichtsschwindel 494, 540. — bei Kleinhirnerkrankungen 410. — Labyrinth- 540.
- Sechster Sinn 421, 540.
- Sedimentierung der Blutkörperchen 86.
- Sedimentum lateritium 235.
- Seeigeleier, Atmung 179, 287. — parthenogenetische Entwicklung 213, 286.
- Seele 9, 38^o, 383, 402.
- Seelenblindheit 396.
- Seelentaubheit 397.
- Segmentale Innervation 355.
- Sehen, von Bewegungen 492. — binokulares 482. — binokulare Tiefenwahrnehmung 487. — der eigenen Blutkörperchen im Auge 452. — in der Dämmerung 469. — direktes und indirektes 472. — Doppeltsehen, Bedingungen 484. — Farbenblindheit 469. — Farbsehen 462. — ohne Großhirn 378ff. — identische Sehrichtung 482. — körperliches 485ff. — Lokalisation im Großhirn 395. — monokulares und binokulares Gesichtsfeld 479. — Nachbild 458. — der eigenen Netzhautgefäße 451. — pseudoskopisches 491. — Simultanertrast 464. — stereoskopisches 490, ohne Stereoskop 492. — Sukzessivkontrast 466.
- Sehfeld, Bestimmung dess. 472. — binokulares 479.

- Sehnenreflexe 343. — Lokalisation der Zentra 356.
 Sehnervenkreuzung 396. — Bedeutung 48).
 Sehproben von Snellen 475.
 Sehpurpur 452. — Bedeutung für das Dämmerungsehen 468.
 Sehschärfe, Begriff und Messung 474. — für Bewegungen 493. — bei totaler Farbenblindheit 472. — für die Tiefendimension 488.
 Sehwinkel 474.
 Seifenbildung im Darm 44.
 Sekretin des Magens 32, des Pankreas 45, 280. — als Chologogum 50.
 Sekretion, Begriff 102. — des Darmsafts 51. — von Gasen 102. — der Galle 49. — des Harns 238. — des Hauttals 247. — innere 255ff. — des Magensafts 32. — der Milch 253. — des Pankreassafts 45. — des Schweißes 246. — des Speichels 19.
 Sekretorische Nerven 21.
 Sekundärer Tetanus vom Nerven aus 332.
 Sekundäre Zuckung 307.
 Sekundärzentra im Großhirn 399.
 Selbstregulationen 5.
 Selbststeuerung der Atmung 117.
 Selbstverdauung 173.
 Semipermeable Membranen, Begriff 64.
 Sensibilisierung f. Licht 229.
 Sensibilité récurrente 358.
 Sensomobilität 349, 537.
 Serumalbumin 73.
 Serumglobulin 40, 73.
 Serumkrankheit 73.
 Sexualfunktionen 281. — und Hypophyse 268. — und Schilddrüse 263. — und Thymus 273.
 Simultankontrast 464.
 Simultanschwelle für Druckreize 531.
 Sinnesenergie, spezifische 422.
 Sinnesorgane, allgemeine Bedeutung 418. — höhere und niedere 517.
 Sinnestäuschungen 422, 476.
 Sinusknoten des Herzens 122.
 Skatol 58, 236.
 Skorbut 184. — infantiler 184.
 Skotom 396, 451. — zentrales 469, 472.
 Snellensche Sehproben 475.
 Sonnenbrand 230.
 Spasmophilie 261.
 Speckhaut 86.
 Speichel, Gewinnung 19. — mechanische 20. — verdauende Wirkung 16. — Zusammensetzung 15.
 Speicheldiastase 16. — Wirkung im Magen 36.
 Speichelsekretion 19. — und Blutversorgung 150. — Einfluß der Nerven 21. — histologische Veränderungen 22. — psychische Einflüsse 24. — reflektorische 23. — Sekretionsreize 20. — Zentrum in der Medulla oblongata 23, 366.
 Spektrum, farbloses 462.
 Spermatozoen, ihre Rolle bei der Befruchtung 287ff. — physiologische Eigenschaften 282. — Puringehalt 182.
 Spermin 281, 283.
 Spezifisch-dynamische Wirkung der Eiweißkörper 197.
 Spezifische Disposition 421.
 Spezifische Sinnesenergien 422.
 Sphygmograph 157.
 Sphygmomanometer 145.
 Spinales Tier 341.
 Spirometer 108.
 Spitzenstoß des Herzens 129.
 Splenektomie 274.
 Sprache 511. — Abhängigkeit vom Großhirn 399.
 Sprachzentra 399.
 Stäbchensehschärfe 476.
 Stärke, pflanzliche 43. — tierische 43, 176. — Verdauung durch Speichel 15.
 Stanniusscher Versuch am Herzen 123.
 Statischer Sinn 542.
 Statokorien 549.
 Statolithen 550.
 Statozysten 549.
 Steapsin 43.
 Stehen, Feststellung der einzelnen Skeletteile dabei 320. — Schwankungen beim St. 322. — Standfestigkeit 321. — Stoffwechsel 201, 322. — Unterstützungsfläche 320.
 Stehreflexe 368.
 Stellreflexe 382.
 Stenopäisches Sehen 441.
 Stensonscher Versuch 345.
 Stereoagnosie 402.
 Stereoskop 490.
 Stereoskopischer Glanz 491.
 Stiefhieber 226.
 Stickstoffgleichgewicht 189, 198.
 Stickstoffwechsel, Messung 188, 198.
 Stimme 511. — Brust- und Kopfstimme 512. — Flüstern 513. — Umfang ders. 513.
 Stimmfremitus 512.
 Stoffwechsel 163. — bei körperlicher Arbeit 200, bei geistiger Arbeit 204. — Begriff 3. — Bilanzaufstellung 188. — Einfluß auf die Gefäßweite 150. — Einfluß der Keimdrüsen 276, 279. — der Eiweißkörper 169. — der Fette 164. — im Hunger 194. — der Kohlehydrate 175. — Methoden der Untersuchung 188. — des Muskels 312. — der Nerven 339. — beim Stehen und Gehen 201, 322. — des Zentralnervensystems 204.
 Strabismus bei Abduzens- und Okulomotoriuslähmung 371.
 Streckreflex, direkter 353. — gekreuzter 353.
 Stroboskop 458.
 Stroma der Zellen 49, 87.
 Stromuhr 160.
 Struma 260.
 Strychnin 345.
 Subtraktionsfarben 461.
 Sukzessivkontrast 466.
 Sukzessivschwelle für Druckreize 532.
 Sulcus gastricus 38.
 Summation der Erregungen im Rückenmark 346.
 Summationston 508.
 Suppe, Bedeutung für die Verdauung 30.
 Suprarenin s. Adrenalin.
 Sympathikus 414. — und der Ausdruck der Gemütsbewegungen 416. — Einfluß auf die Darmbewegungen 54, 61. — als Gefäßnerv 148. — Beziehung zur Großhirnrinde 388. — Einfluß auf das Herz 136. — Wirkung auf die Magenbewegungen 35. — und Nebennieren 256. — und Schilddrüse 267. — als Schmerznerve 415, 533. — Innervation der Schweißdrüsen 227, 247. — Wirkung auf die Speicheldrüsen 22. —

- Bedeutung für die Wärmeregulation 227. — Zentrum in der Regio hypothalamica 227, 270, 416. — und Zuckerstich 259.
- Sympathisches Nervensystem 414.
- Synthese von Aminosäuren 172. — von Eiweiß 169. — durch Fermente 67, 169. — von Glykogen 176. — von Harnstoff 174. — im Organismus 4.
- Syringomyelie 363, 534.
- Tabes dorsalis 350, 563.
- Talbotscher Satz 458.
- Talgdrüsen 247.
- Tapetenphänomen 492.
- Tapetum lucidum, Bedeutung 446.
- Tastsinn 528.
- Taubheit, durch Rindenverletzung 397.
- Taubstumme, Störungen des Gleichgewichts bei dens. 539.
- Taurin 46.
- Taurodesoxycholsäure 46.
- Taurocholsäure 46.
- Taylorisierung 202, 302.
- Teichmannsche Kristalle 89.
- Telerezeptoren 524.
- Telestereoskop 490.
- Temperatur des Körpers 218.
- Temperatursinn 525, Bahnen im Rückenmark 364.
- Tetanie 261.
- Tetanus beim Herzen 128. — des Muskels 307. — Ermüdung dabei 309. — sekundärer vom Nerven aus 332.
- Tetrahydronaphthylamin 227, 315, 415.
- Theobromin 182.
- Theophyllin 182.
- Thermanästhesie 363.
- Thermoregulation 219.
- Thiry-Vollasche Fistel 51.
- Thrombin 71.
- Thrombogen 72.
- Thrombokinasen 72.
- Thrombopenie 85, 275.
- Thrombose 70.
- Thrombozyten, Abhängigkeit von der Milz 275. — Mitwirkung bei der Blutgerinnung 71. — Zahl 85.
- Thymin 182.
- Thymusdrüse 273. — und Körpertemperatur 228.
- Thyreoglobulin 266.
- Thyroxin 267.
- Tiefenreflexe 343.
- Tiefensehschärfe 488, 489.
- Tiefensensibilität 363. — und Lagesinn 537.
- Tiefenwahrnehmung, Bedeutung der Akkommodation 487, des Konvergenzgeföhls 492. — binokulare 485, 487. — monokulare 485.
- Tierische Elektrizität 303, 333. — Theorie 333.
- Tierpsychologie 381, 420.
- Timbre 498.
- Tod, Eintritt dess. 111.
- Töne 496, 497, 506.
- Toninseln 506, 509.
- Tonlücken 506, 509.
- Tonograph 134.
- Tontaubheit durch Großhirnverletzung 398.
- Tonus, vom Labyrinth aus 368, 543 ff. — der Muskeln 309, vom Kleinhirn aus 364, 411, Stoffwechsel 310, 314. — reflektorischer 348, 368.
- Totenstarre 318.
- Tractus rubrospinalis 361. — Funktion 362.
- Tractus spinocerebellares 361. — Funktion 364, 411.
- Tractus vestibulospinalis 361. — Funktion 362, 411.
- Tränensekretion, Abhängigkeit von der Medulla oblongata 367.
- Tragerekord der Muskeln 311.
- Transfusion v. Blut 75.
- Transplantation 256.
- Traube-Heringsche Wellen 155.
- Traubenzucker, Assimilationsgrenze 177. — Bildung aus Eiweiß 177, aus Glykogen 176. — im Blut 66, 176, 271. — im Harn 177, 259, 267, 271. — im Muskel 312, 313.
- Traubesche Zelle 87.
- Treppe bei der Zuckung des Muskels 301.
- Trigeminus, Funktionen 371. — intrakranielle Durchschneidung 372.
- Tripelphosphat 238.
- Trommelfell 500.
- Trophische Funktionen der Ganglienzellen 351, 358. — der Nerven 372.
- Trypsin, Bildung aus Trypsinogen 43. — Wirkung auf Eiweiß 41.
- Trypsinogen 43.
- Tryptophan, Bildung im Dünndarm 41. — Umwandlung im Dickdarm 58. — Unentbehrlichkeit 171, 292.
- Tryptophanreaktion 41.
- Tuba Eustachii 502.
- Turgor der Organe 233.
- Tyramin 59, 267.
- Tyrosin 38. — Umwandlung im Dickdarm 58. — Unentbehrlichkeit 171, 292.
- Überempfindlichkeit 74.
- Überernährung, Einfluß auf das Wachstum 293.
- Überlebende Organe 111.
- Übersichtigkeit 440.
- Uexküllsche Regel 354.
- Ultraviolette Licht, physiologische Wirkung 230.
- Umklammerungsreflex 341, 347. — und Keimdrüsenhormone 278.
- Unterernährung, Einfluß auf das Wachstum 291. — partielle 171, 291.
- Unterschiedsempfindlichkeit für Druckreize 124. für örtlich verschiedene Druckreize 531, Lichtreize 469, 493. — für das Sehen von Bewegungen 493. — für Tonhöhen 506.
- Uracil 182.
- Urämie 76.
- Urate 235.
- Ureter 243.
- Urfarben 455.
- Urikämie 76, 182.
- Urobilin 49, 56, 237.
- Urochrom 237.
- Uroerythrin 237.
- Uterus, Einfluß von Adrenalin 258, der Hypophyse 270.
- Vagus, Aktionsströme 118, 332. — Einfluß auf die Atmung 116, auf den Blutdruck 154, auf die Darmbewegungen 55, 61, auf den Gasgehalt der Schwimmblase 102, auf das Herz 135. — Funktionen 370. — als motorischer und sensibler Nerv des Magens 36, 416. — als Schmerznerve 533. — als sekretor. Nerv für den Magen 32. — Zentrum in der Medulla oblongata 136, 369.
- Vagusdyspnoe 117.
- Vaguspneumonie 370, 372.

- Vagustonus 136, 369.
 Vasoconstrictoren 147. —
 Zentrum 148, 152, 357,
 370.
 Vasodilatoren 147. —
 Verlauf durch die hinteren
 Wurzeln 358.
 Vegetabilien, Ausnützung
 57, 205. — Zusammenset-
 zung 14.
 Vegetarische Ernährung
 182, 210.
 Vegetative Funktionen 12,
 13, 295.
 Vegetatives Nerven-
 system 412.
 Venen, Bewegung des Blutes
 in ihnen 159. — Blutdruck
 143, 147, 159. — Blutge-
 schwindigkeit 160. — Puls
 159.
 Venenklappen 160.
 Venenpuls 159.
 Verbrennung im Organis-
 mus, Ort der V. 103. —
 Theorie 179.
 Verbrennungswärme der
 Nahrungsstoffe, Tabelle
 192. — von Nahrungs-
 mitteln, Tabelle 192.
 Verdauung des Bindegewe-
 bes 28. — Chemie und Me-
 chanik 15. — im Dünndarm
 39. — im Magen 28, 37. —
 in der Mundhöhle 15. — der
 Nukleoproteide 42, 51, 180.
 — durch Pankreassaft 41.
 — Zweck 15.
 Verdauungsarbeit 197.
 Verdünnungsspeichel 21.
 Verhüllungsdreieck 455.
 Verkürzungsrückstand
 beim ermüdeten Muskel
 301, 309.
 Verlängertes Mark s. Me-
 dulla oblongata.
 Verschlucken 110.
 Verschlusszeit des Her-
 zens 135.
 Vestibular-Apparat als
 Gehörorgan 310, 540. — als
 statisches Organ 539, 543.
 Vierhügelregion Funk-
 tionen 367, 372, 482.
 Viskosimeter 153.
 Vitalismus 2, 10, 17.
 Vitalkapazität der Lun-
 gen 109.
 Vitamine 183, 292.
 Vividiffusion 68, 170.
 Vokale 514.
- Wachstum 288. — Einflüsse
 der Ernährung 185, 214,
 251, 291. — Einfluß der
 Hormone 293, der Hypo-
 physe 268, des Nerven-
 systems 373, der Schild-
 drüse 263, 266, der Thymus-
 drüse 266, 274. — als Lebens-
 kriterium 8. — Maße des W.
 289. — durch osmotische
 Kräfte 293.
 Wachstumsgeschwindig-
 keit 289. — und Milch-
 zusammensetzung 214, 251.
 Wachstumstrieb 291.
 Wälzbewegungen durch
 Verletzung des Hirnstamms
 372. — nach Labyrinth-
 exstirpation 543.
 Wärme, Abgabe durch Lei-
 tung, Strahlung und Ver-
 dunstung 220. — Bildung
 im Muskel 315, 318. —
 Größe der Produktion 195 ff.
 — Messung der Produktion
 192.
 Wärmedyspnoe 224.
 Wärmeregulation, chemi-
 sche 224. — physikalische
 221. — Zentrum im Gehirn
 226.
 Wärmesinn 525.
 Wärmestich 226.
 Wärmezentrum 226.
 Wahrnehmungen, Begriff
 419.
 Wanderzellen 83.
 Warmblüter 219.
 Wasser, Bedeutung 15. —
 Gehalt des Körpers an W.
 290.
 Wasserstoffionen, als
 Atemreiz 115. — im Blut
 79, Abhängigkeit von der
 Nahrung 115. — Bedeutung
 für die elektr. Erregung
 331.
 Webersches Gesetz 424.
 Weberscher Versuch 500.
 Wehentätigkeit, Einfluß
 von Adrenalin 258. — und
 Hypophyse 270.
 Weitsichtigkeit 439, 440.
 Wertigkeitsregel der Kol-
 loidchemie 215.
 Wettstreit der Sehfelder
 485, 491.
 Wiederkäufer, Verdauung
 60.
 Willkürversuch von du
 Bois-Reymond 333.
- Winterschläfer, Körper-
 temperatur 228, 266.
 Wirkungsgrad der Muskel-
 tätigkeit 202, 316.
 Wortblindheit 397.
 Worttaubheit 398, 401.
 Wurzelinnervation von
 Haut und Muskeln 355.
 Wurzelzone 355.
- Xanthin 180.
 Xerophthalmie 185.
 Xylose 43.
- Yoghurt 60.
- Zahnstein 16.
 Zapfensehschärfe 476.
 Zein, Einfluß auf das Wachs-
 tum 292.
 Zeitreise 329.
 Zellobiose 43.
 Zellstroma 49.
 Zellulose 42. — Einfluß auf
 die Ausnützung 205. — Gä-
 rung im Dickdarm 58.
 Zentralnervensystem
 340 ff. — Stoffwechsel 204.
 Zentrierung 427. — mangel-
 hafte im Auge 444.
 Zerstreuungskreis 433.
 Ziliarmuskel 434.
 Zootrop 458.
 Zuckerausscheidung im
 Harn s. Glykosurie.
 Zuckerkrankheit 168, 177,
 259, 272, 370. — Aceton-
 körper dabei 168, 272.
 Zuckerstich 259, 370.
 Zuckerzentrum 178, 370.
 Zuckungsgesetz von Pflü-
 ger 335, beim Menschen
 336.
 Zündsaff 31.
 Zwangsbewegungen durch
 Verletzung des Hirnstamms
 372, des Kleinhirns 409,
 des Labyrinths 543 ff.
 Zyklopenauge von Hering
 482.
 Zymase 18.
 Zystein 39, 40. — als Vor-
 stufe des Taurins 46.
 Zystin 173. — Einfluß auf
 das Wachstum 292. — auf
 das W. der Haare 171. —
 Unentbehrlichkeit 171.
 Zystinurie 173.
 Zytolysin 75.

Vorlesungen über Physiologie. Von Professor Dr. M. von Frey, Vorstand des physiologischen Instituts der Universität Würzburg. Mit 142 Textabbildungen. Dritte, neubearbeitete Auflage. 1920. GZ. 10; gebunden GZ. 13.1

Physiologisches Praktikum. Chemische, physikalisch-chemische, physikalische und physiologische Methoden. Von Prof. Dr. Emil Abderhalden, Geh. Medizinal-Rat, Direktor des physiologischen Instituts der Universität Halle a. S. Dritte, neubearbeitete und vermehrte Auflage. Mit 310 Textabbildungen. 1922. GZ. 11

Praktische Übungen in der Physiologie. Eine Anleitung für Studierende. Von Dr. L. Asher, o. Professor der Physiologie, Direktor des physiologischen Instituts der Universität Bern. Mit 21 Textfiguren. 1916. GZ. 6

Allgemeine Physiologie. Eine systematische Darstellung der Grundlagen sowie der allgemeinen Ergebnisse und Probleme der Lehre vom tierischen und pflanzlichen Leben. Von A. v. Tschermak. In zwei Bänden. Erster Band: **Grundlagen der allgemeinen Physiologie.** I. Teil: Allgemeine Charakteristik des Lebens, physikalische und chemische Beschaffenheit der lebenden Substanz. Mit 12 Textabbildungen. 1916. GZ. 10
II. Teil: Morphologische Eigenschaften der lebenden Substanz und Zellularphysiologie. Mit etwa 110 Textabbildungen. In Vorbereitung

Klinische Chemie. Von Prof. Dr. med. L. Lichtwitz, ärztlicher Direktor am städtischen Krankenhaus zu Altona. Zweite, verbesserte Auflage. Mit etwa 13 Textfiguren. In Vorbereitung

Biochemie. Ein Lehrbuch für Mediziner, Zoologen und Botaniker. Von Dr. F. Röhmnn, a. o. Professor an der Universität und Vorsteher der chemischen Abteilung des physiologischen Instituts zu Breslau. Mit 43 Textfiguren und 1 Tafel. 1908. Gebunden GZ. 20

Kurzes Lehrbuch der physiologischen Chemie. Von Dr. Paul Hári, a. o. Professor der physiologischen und pathologischen Chemie an der Universität Budapest. Zweite, verbesserte Auflage. Mit 6 Textabbildungen. 1922. Gebunden GZ. 11

Lehrbuch der physiologischen Chemie. Unter Mitwirkung von Prof. S. G. Hedin in Upsala, Prof. J. E. Johansson in Stockholm und Prof. T. Thunberg in Lund herausgegeben von Olof Hammarsten, ehem. Professor der medizinischen und physiologischen Chemie an der Universität Upsala. Neunte, völlig umgearbeitete Auflage. Mit einer Spektraltafel. 1922. In einem Band. GZ. 20; gebunden GZ. 26

Die physikalisch-chemischen Grundlagen der Biologie.

Mit einer Einführung in die Grundbegriffe der höheren Mathematik. Von Dr. phil. **E. Eichwald**, ehemaliger Assistent, und Dr. [phil. **A. Fodor**, erster Assistent am physiologischen Institut der Universität Halle a. S. Mit 119 Textabbildungen und 2 Tafeln. 1919. GZ. 24; gebunden GZ. 27

P_H-Tabellen, enthaltend ausgerechnet die Wasserstoffexponentwerte, die sich aus gemessenen Millivoltzahlen bei bestimmten Temperaturen ergeben. Gültig für die gesättigte Kalomel-Elektrode. Von Dr. **Arvo Jylppö**. Zweite, unveränderte Auflage. Erscheint Ende Herbst 1922

Der Gebrauch von Farbenindikatoren. Ihre Anwendung in der Neutralisationsanalyse und bei der colorimetrischen Bestimmung der Wasserstoffionenkonzentration. Von Dr. **J. M. Kolthoff**, Konservator [am Pharmazeutischen Laboratorium der Reichs-Universität Utrecht. Mit 7 Textabbildungen und einer Tafel. 1921. GZ. 4,5

Praktikum der physikalischen Chemie, insbesondere der Kolloidchemie für Mediziner und Biologen. Von Professor Dr. med. **Leonor Michaelis**. Zweite, verbesserte Auflage. Mit 40 Textabbildungen. 1922. GZ. 5

Einführung in die physikalische Chemie für Biochemiker, Mediziner, Pharmazeuten und Naturwissenschaftler. Von Dr. **Walther Dietrich**. Zweite, verbesserte Auflage. Erscheint Ende 1922

Einfaches pharmakologisches Praktikum für Mediziner. Von **R. Magnus**, Professor der Pharmakologie in Utrecht. Mit 14 Abbildungen. 1921. Mit Schreibpapier durchschossen GZ. 2,6

Die Wirkungen von Gift- und Arzneistoffen. Vorlesungen für Chemiker und Pharmazeuten. Von Prof. Dr. med. **Ernst Frey**. Mit 9 Textabbildungen. 1921. GZ. 4,9; gebunden GZ. 6,2

Grundzüge der pharmazeutischen und medizinischen Chemie. Für Studierende der Pharmazie und Medizin bearbeitet. Von Geheimen Regierungsrat Professor Dr. **Hermann Thoms**, Direktor des pharmazeutischen Instituts der Universität Berlin. Siebente, verbesserte und erweiterte Auflage der „Schule der Pharmazie, Chemischer Teil“. Mit 108 Textabbildungen. 1921. GZ. 10

Einführung in die Mathematik für Biologen und Chemiker. Von Dr. **Leonor Michaelis**, a. o. Professor an der Universität Berlin. Zweite, erweiterte und verbesserte Auflage. Mit 117 Textabbildungen. 1922. GZ. 9

Mikroskopie und Chemie am Krankenbett. Begründet von Hermann Lenhartz, fortgesetzt und umgearbeitet von Professor Dr. Erich Meyer, Direktor der medizinischen Klinik in Göttingen. Zehnte, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 196 Abbildungen im Text und einer Tafel. 1922.
Gebunden GZ. 12

Leitfaden der Mikroparasitologie und Serologie. Mit besonderer Berücksichtigung der in den bakteriologischen Kursen gelehrteten Untersuchungsmethoden. Ein Hilfsbuch für Studierende, praktische und beamtete Ärzte. Von Prof. Dr. E. Gotschlich, Direktor des hygienischen Instituts der Universität Gießen, und Prof. Dr. W. Schürmann, Privatdozent der Hygiene und Abteilungsvorstand am hygienischen Institut der Universität Halle a. S. Mit 213 meist farbigen Abbildungen. 1920.
GZ. 9.4; gebunden GZ. 11

Repetitorium der Hygiene und Bakteriologie in Frage und Antwort. Von Prof. Dr. W. Schürmann, Universität Gießen. Vierte, verbesserte und vermehrte Auflage. 9.—15. Tausend. 1922. GZ. 4.5

Mikrobiologisches Praktikum. Von Prof. Dr. Alfred Koch, Direktor des landwirtschaftlich-bakteriologischen Institutes der Universität Göttingen. Mit 4 Textabbildungen. 1922. GZ. 3.6

Leitfaden der medizinisch-klinischen Propädeutik. Von Dr. F. Külbs, Professor an der Universität Köln. Dritte, erweiterte Auflage. Mit 87 Textabbildungen. 1922. GZ. 3.5

Vorlesungen über klinische Propädeutik. Von Prof. Dr. Ernst Magnus-Alsleben, Vorstand der medizinischen Poliklinik an der Universität Würzburg. Dritte, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 14 zum Teil farbigen Abbildungen. Erscheint Ende Herbst 1922

Einführung in die Kinderheilkunde. Ein Lehrbuch für Studierende und Ärzte. Von Professor Dr. B. Salge, o. ö. Professor der Kinderheilkunde, z. Zt. in Marburg a. d. Lahn. Vierte, erweiterte Auflage. Mit 15 Textabbildungen. 1920. Gebunden GZ. 8.25

Der geburtshilfliche Phantomkurs in Frage und Antwort. Von Prof. Dr. B. Krönig, Geh. Hofrat, Direktor der Universitäts-Frauenklinik in Freiburg i. Br. Zweite, unveränderte Auflage. 1920. GZ. 0.9

Einführung in die gynäkologische Diagnostik. Von Prof. Dr. Wilhelm Weibel, Wien. Zweite, neu bearbeitete Auflage. Mit 144 Textabbildungen. 1921. GZ. 5

Grundriß der Augenheilkunde für Studierende. Von Prof. Dr. F. Schieck, Geh. Med.-Rat, Direktor der Univ.-Augenklinik in Halle a. S. Dritte, verbesserte und vermehrte Auflage. Mit 125 zum Teil farbigen Textabbildungen. 1922. Gebunden GZ. 5.5

Die konstitutionelle Disposition zu inneren Krankheiten.

Von Dr. **Julius Bauer**, Privatdozent für innere Medizin an der Wiener Universität. Zweite, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 63 Textabbildungen. 1921. GZ. 20

Vorlesungen über allgemeine Konstitutions- und Vererbungslehre.

Für Studierende und Ärzte. Von Dr. **Julius Bauer**, Privatdozent für innere Medizin an der Wiener Universität. Mit 47 Textabbildungen. 1921. GZ. 5

Lehrbuch der Differentialdiagnose innerer Krankheiten.

Von Geh. Med.-Rat Professor Dr. **M. Matthes**, Direktor der medizinischen Universitätsklinik in Königsberg i. Pr. Vierte, verbesserte Auflage. Mit etwa 110 Textabbildungen. In Vorbereitung

Die innere Sekretion.

Eine Einführung für Studierende und Ärzte. Von Dr. **Arthur Weil**, ehem. Privatdozent der Physiologie an der Universität Halle, Arzt am Institut für Sexualwissenschaft Berlin. Zweite, verbesserte Auflage. Mit 45 Textfiguren. 1922. GZ. 4.5; gebunden GZ. 7

Diagnostik der chirurgischen Nierenerkrankungen.

Praktisches Handbuch zum Gebrauch für Chirurgen und Urologen, Ärzte und Studierende. Von Professor Dr. **Wilhelm Baetzner**, Privatdozent, Assistent der Chirurgischen Universitätsklinik in Berlin. Mit 263 größtenteils farbigen Textabbildungen. 1921. GZ. 30; gebunden GZ. 35

Die Knochenbrüche und ihre Behandlung.

Ein Lehrbuch für Studierende und Ärzte von Dr. med. **Hermann Matti**, Privatdozent für Chirurgie an der Universität und Chirurg am Jennerspital in Bern.

Erster Band: **Die allgemeine Lehre von den Knochenbrüchen und ihrer Behandlung.** Mit 420 Textabbildungen. 1918. GZ. 10; gebunden GZ. 13

Zweiter Band: **Die spezielle Lehre von den Knochenbrüchen und ihrer Behandlung einschließlich komplizierender Verletzungen des Gehirns und Rückenmarks.** Mit 1050 Abbildungen im Text und auf 4 Tafeln. 1922. GZ. 40; gebunden GZ. 44

Der chirurgische Operationssaal.

Ratgeber für die Vorbereitung chirurgischer Operationen und das Instrumentieren für Schwestern, Ärzte und Studierende. Von **Franziska Berthold**, Viktoriaschwester, Operationsschwester an der chirurgischen Universitätsklinik Berlin. Mit einem Geleitwort von Geh. Medizinalrat Professor Dr. **August Bier**. Zweite, verbesserte Auflage. Mit 314 Textabbildungen. 1922. GZ. 4

Anatomie des Menschen.

Ein Lehrbuch für Studierende und Ärzte. Von **Hermann Braus**, o. ö. Professor an der Universität, Direktor der Anatomie Heidelberg. In drei Bänden.

Erster Band: **Bewegungsapparat.** Mit 400 zum großen Teil farbigen Abbildungen. 1921. Gebunden GZ. 16

Zweiter Band: **Eingeweide.** Mit etwa 300 zum Teil farbigen Textabbildungen. Erscheint Ende 1922.

Dritter (Schluß-)Band erscheint Anfang 1923.

Lehrbuch der Psychiatrie.

Von Dr. **E. Bleuler**, o. Prof. der Psychiatrie an der Universität Zürich. Dritte Auflage. Mit 51 Textabbildungen. 1920. GZ. 9; gebunden GZ. 11
