

Henning Kaufmann

Rhythmische Phänomene
der Erdoberfläche



Mit 15 Abbildungen

Verlag von Friedr. Vieweg & Sohn, Akt.-Ges.
Braunschweig 1929

Alle Rechte vorbehalten

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1929

ISBN 978-3-663-04079-8 ISBN 978-3-663-05525-9 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-663-05525-9

Vorwort

„Ein entschiedenes Aperçü ist wie
eine inokulierte Krankheit anzusehen:
man wird sie nicht los, bis sie durch-
gekämpft ist.“
Goethe.

Das vorliegende Werk wendet sich ebenso an den Geographen und Geologen wie an den Physiker und Hydrotechniker. Darüber hinaus wendet es sich an all die Kreise der Gebildeten, die einer philosophisch vertieften Behandlung naturwissenschaftlicher Probleme Interesse entgegenbringen. Die Keimzelle des Werkes waren zwei Referate, die der Verfasser als Schüler von Geheimrat Prof. Dr. *Philippson* im Geographischen Institut der Universität Bonn 1921/22 gehalten hat über: „die Theorie der Flußmäander“ und über „die Reibung als gestaltender Faktor“. Die Grundanschauungen des Werkes lagen bereits damals in groben Umrissen fest, sie wurden in der Folgezeit nur schärfer und differenzierter herausgearbeitet und ihr Anwendungsbereich erweitert. Wegen starker beruflicher Inanspruchnahme des Verfassers und sonstiger innerer und äußerer Hemmnisse zog sich die Fertigstellung des Werkes ungewöhnlich lange hin. Auch in der vorliegenden Form bleibt es noch ein „Versuch“. Der Zweck des „Versuches“ ist erfüllt, wenn er zu weiterer Forschung anregt, wenn er die morphologischen Probleme aus ihrer unfruchtbaren Isolierung und ihrer resignierten Stagnation herausreißt und wieder in frischen Fluß bringt, wenn er einer künftigen, mit den Methoden der physikalischen Chemie arbeitenden „allgemeinen physikalischen Morphologie“ die Wege weist. Um überhaupt zu einem Abschluß zu kommen, mußte die seit 1924 erschienene Literatur noch fast ganz unberücksichtigt bleiben, wenn sie auch vom Verfasser zum Teil bereits bibliographisch erfaßt wurde. Wegen Raumersparnis wird von dem Kapitel „Kausalproblem“ nur die Zusammenfassung gebracht. — Zur ersten Orientierung über den Inhalt des Vorliegenden dienen neben der vorangestellten „Einleitung“ die „Zusammenfassungen“ am Schlusse der einzelnen Kapitel, bsd. im „Kritischen Teil“. Eine stilistische Eigentümlichkeit sind wohl die zahlreich in den Text eingestreuten wörtlich angeführten

Autorenstellen. Es hätte nicht sehr viel Mühe gekostet, diese Stellen durch entsprechende eigene Formulierungen zu ersetzen, jedenfalls hätte dies den Eindruck der Selbständigkeit in vorteilhafter Weise erhöht. Wir gaben jedoch einer verhältnismäßigen äußeren Unselbständigkeit der Form bei innerer Selbständigkeit der Gedankenführung den Vorzug, da die ständige Beziehung auf die verschiedensten, voneinander unabhängigen, Gewährsmänner die vorgetragenen Anschauungen ihres subjektiven Charakters und ihrer gelegentlich befremdenden Neuartigkeit entkleidet und die objektive Auswertung der Beobachtungstat-sachen besser verbürgt. Wo im Text Autorenstellen ganz oder teilweise im Sperrdruck erscheinen, was sich bei der gewählten Zitier- und Gliederungsmethode nicht immer vermeiden ließ, stammt die Sperrung stets von mir. Da sie nirgends den Sinn berührt, durfte davon abgesehen werden, sie in jedem Falle als solche zu kennzeichnen.

Elberfeld, Weihnachten 1928.

Dr. Henning Kaufmann.

Druckfehlerberichtigung.

Seite 31, Zeile 3 von unten lies: dynamische; Seite 85, Zeile 10 von oben lies: Atmosphäre; Seite 86, Zeile 8 von oben lies: tiefen Querprofil; Seite 90, Zeile 12 von unten lies: frühen Stadien; Seite 95, Zeile 10 von oben lies: zurückgezogen; Seite 100, Zeile 22 von oben lies: abends, hauptsächlich . . .; Seite 107, Zeile 14 von oben lies: Materials; Seite 117, Zeile 11 von unten lies: sind die Ringe; Seite 119, Zeile 1 von oben lies: beim Struktur-boden beteiligt; Seite 129, Zeile 6 von unten lies: (Psammologie) als; Seite 160, Zeile 12 von oben lies: des erreurs; S. 185, Zeile 17 von unten lies: alle Aus-sicht; S. 198, Zeile 15 von unten lies: Im Gegensatz zur; Seite 210, Zeile 15 von unten lies: *Scott Russell*; Seite 227, Zeile 3 von unten lies: haftete; Seite 229, Zeile 19 von oben lies: der engen; Seite 263, Zeile 3 von oben lies: langgestreckten; Seite 310, Zeile 4 von unten lies: untereinander; Seite 313, Zeile 11 von oben lies: die Strandwälle.

An verschiedenen Stellen des Buches lies: wave statt wawe!

Inhaltsübersicht

	Seite
Einleitung	1
A. Darstellender Teil.	
I. Rippelmarken und Dünen	6
II. Schienenriffeln	33
III. Wasserwellen	39
IV. Strandspitzen	58
V. Das Flußnetz	65
VI. Die einzelne Flußader	73
VII. Der Fließvorgang	79
VIII. Gerade Flußläufe mit Geschiebebewegung und mäandrierende Flußläufe	85
IX. Büßerschnee	98
X. Strukturboden und Texturboden	113
B. Kritischer Teil.	
XI. Stoff und Form in der Morphologie	129
XII. Mechanisierung und Geometrisierung	140
XIII. „Entwicklung“?	167
XIV. „Selbstverstärkung“?	180
XV. Mäandertheorien	206
XVI. Rhythmus und Periodizität	225
XVII. Selektion	240
XVIII. Selbstdifferenzierung	248
XIX. Zur Physik der rhythmischen Phänomene	263
XX. Der Formenschatz der geophysischen Phänomene mit Selbstdifferenzierung	278
XXI. Die kausal-analytische Methode	314
XXII. Das Kausalproblem	318
Literaturnachweise	325
Personenregister	341
Sachregister	345

Einleitung.

Vorliegende Arbeit stellt es sich zur Aufgabe, die allen morphologischen Phänomenen gemeinsamen Grundprobleme zu erörtern und namentlich mit Hilfe physikalischer und naturphilosophischer Methoden und Blickrichtungen eine weitere Klärung dieser Grundprobleme herbeizuführen. Als der theoretischen Klärung besonders bedürftig erscheinen gewisse Kleinformen der Erdoberfläche, die wir unter dem Begriff der 'rhythmischen Phänomene' zusammenfassen. Die von uns gewagte 'synoptische' und vergleichende Behandlung dieser Phänomene ist nicht nur in methodisch-heuristischer Hinsicht zweckmäßig, sondern ist auch objektiv gerechtfertigt durch die Übereinstimmung des sich in ihnen allen abspielenden physikalischen Geschehens. Es läßt sich zeigen, daß alle diese Oberflächenformen das Ergebnis von Vorgängen sind, die sich bei zwei in Relativbewegung zueinander befindlichen Medien an ihrer gemeinsamen Berührungsfläche abspielen. Hieraus folgt, daß die Theorie jedes einzelnen Phänomens aufgebaut werden muß auf den Anschauungen der Physik über die Natur der Reibungsvorgänge.

Bei diesem Vorgehen stößt man jedoch sogleich auf große Schwierigkeiten, denn es stellt sich heraus, daß die Reibung zwischen körnigen oder flüssigen Medien physikalisch sehr wenig untersucht bzw. geklärt ist und daß namentlich die bei unseren Phänomenen besonders augenfälligen formalen und materiellen Umlagerungen in der Grenzschicht bisher kaum eine theoretische Beachtung gefunden haben. Der bisher nur den organischen Naturwissenschaften geläufige Gedanke der 'Selbstdifferenzierung' wird von uns nunmehr auf sog. 'physikalische Systeme' angewandt. Wir waren also bei unseren Untersuchungen vor die Aufgabe gestellt, auf dem Wege der vorsichtigen, aber konsequent durchgreifenden Analyse eines verhältnismäßig reichhaltigen Beobachtungsmaterials zu physikalischen Erkenntnissen vorzudringen, gleichgültig, ob diese Erkenntnisse uns von dem augenblicklichen Stande der Physik bestätigt wurden oder nicht. Es galt unter Auswertung der in allen naturwissenschaftlichen Teilgebieten mannigfach verstreuten Literatur die bisherigen theoretischen Lösungsversuche zusammenzu-

stellen, sie nachzuprüfen und weiterzuführen, in der Hoffnung, daß durch die Einkreisung des gesamten Fragekomplexes von den verschiedensten Seiten her dieser, wenn nicht 'erjagt' und 'erlegt', so doch 'gestellt' wird wie das Wild rings von Treibern und Hunden. Den letzten Schritt wird nach wie vor der Physiker tun müssen. Auf dem Gebiete der sog. 'Geophysik' hat er schon die Erdoberfläche als den großartigen Experimentiertisch der Natur verwerten gelernt. Was liegt näher, als nunmehr auch an die morphologischen Phänomene mit denselben physikalischen Methoden heranzutreten, mit der Aussicht auf neue Ergebnisse, die mit Hilfe des üblichen Kleinexperimentes nur schwer oder gar nicht zu erlangen sind! Dieser künftigen 'physikalischen Morphologie' sollen unsere Ausführungen die Wege ebnen.

Unsere Darlegungen bauen sich (aus objektiven oder subjektiven Gründen) oft nur auf spärlichem Materiale auf; sie sind oft mehr der programmatische Versuch einer neuen Betrachtungsweise als die abschließende Zusammenfassung der bisherigen Forschung. Es ist deshalb auch nicht möglich, die Ergebnisse der Arbeit hier in lehrbuchartiger Verkürzung und Vereinfachung vorwegzunehmen. Auch die Abgrenzung des Gültigkeitsbereiches unserer neuen Betrachtungsweise kann erst gelegentlich der Einzelbesprechungen vorgenommen werden. Um in das Wesentliche unserer Gedankengänge einzuführen, beschränken wir uns deshalb darauf, es in der Form einiger Leitsätze zu bringen, deren antithetische Zuspitzung das Neue sogleich hervortreten läßt.

a) Zwang oder Freiheit?

Formen können einem Medium aufgezwungen werden, wobei sich dieses relativ passiv verhält. Die Gesamtformung ist dann einfach die Summe der lokalen Teilformungen. Unterschiede der Form sind hier der getreue Abdruck von entsprechenden Unterschieden der Einwirkung. ('Abhängige Differenzierung'.) Der Gesamtvorgang kann hier aufgefaßt werden als ein Mosaik von Einzelvorgängen von rein geometrischer Verteilung und Nachbarschaft. Der Vorgang und die resultierende Form können als erklärt gelten, wenn sie sich auf lokale Faktoren zurückführen lassen. Die Verteilung und Anordnung über größere Bereiche hin kann als gleichgültig gelten.

Anders ist es, wenn das Medium, das die Einwirkung erfährt, innerhalb eines größeren Bereiches ein in sich dynamisch zusammenhängendes physikalisches System bildet. Es ist eine Eigentümlichkeit dieser physikalischen Systeme oder „physischen Gestalten“ (*Wolfgang Köhler*), daß sie auf Einwirkungen von außen stets in einer freien, eigengesetzlichen Weise reagieren. Es sind Ge-

bilde von spezifischer Einheit nach innen und relativer Unabhängigkeit nach außen. Nur die Gesamtbedingung wird von außen gegeben, die Ausbreitung des Gestaltmaterials in örtliche 'Momente' und der ganze Verlauf des gestalteten Gesamtprozesses dagegen regelt sich nach einer autonomen Gesetzmäßigkeit. Das Geschehen in ausgedehnten physikalischen Systemen wird nicht bis ins Einzelne von außen geleitet, sondern es ordnet sich selbst, es bildet ohne alle besonderen Einzelvorrichtungen in sich eine strenge systembedingte Raumordnung aus. Die 'Momente' einer solchen Struktur tragen sich in der spezifischen Gruppierung, das physische Material ist nicht nur 'verteilt'.

Ist diese Eigenstruktur oder freie Raumordnung in sich differenziert, so ist auch diese Differenzierung von örtlichen Faktoren weitgehend unabhängig, sie ist ebenfalls 'spontan', d. h. systembedingt, sie läßt sich deshalb als 'Selbstdifferenzierung' bezeichnen. Ein solches 'freies' und 'gestaltmäßiges' Geschehen nennen wir 'rhythmisch', besonders wenn es, wie gesagt, in sich gesetzmäßig differenziert ist. Unsere Fassung des Begriffes 'Rhythmus' ist also kausal-dynamisch, nicht deskriptiv-formal; er ist nicht, wie üblich, lediglich ein Sammelname für regelmäßige Wiederholungen jeglicher Art in Raum und Zeit. Da die einzelnen 'Momente' des Rhythmus sich gegenseitig im Ganzen tragen, sich nicht einfach linear aneinanderreihen, ist er seinem Charakter nach mehr räumlich-simultan als zeitlich-sukzessiv.

Die bisherigen morphologischen Theorien wissen nichts von der Möglichkeit 'freier Gestaltungen', sie rechnen nur mit 'gezwungenen Formungen'. Unsere Aufgabe sehen wir deshalb in einer Befreiung der 'Gestalt' aus der Zwangsjacke der lokal-kausalen 'Formung'. Dem Physiker ist bereits die Unterscheidung in 'freie' und 'erzwungene' Schwingungen geläufig. Der Geograph unterscheidet bereits zwischen den „gezwungenen“ Dünen, „die sich an ein sichtbares Hindernis anschließen und in ihrer Gestalt und Größe von dem Hindernis abhängen“, und den „freien“ Dünen, „die kein sichtbares Hindernis als Ursache unmittelbar erkennen lassen“. (*Philippson* II, 2. 1924. p. 272 f.) Auch hat man bereits die Notwendigkeit einer Sonderung der durch differenzierende äußere Faktoren „aufgezwungenen“ Mäander von den unabhängig von äußeren Hindernissen gebildeten „freien“ Mäandern erkannt. Der mit kolloidchemischen Methoden arbeitende Biologe unterscheidet zwischen „äußeren Rhythmen“ und „inneren Rhythmen“. Jene kommen durch rhythmische Beeinflussungen seitens der Außenwelt zustande, diese entwickeln sich ohne rhythmische Beeinflussungen von außen. Die Gelatineversuche von *E. Küster* (Über rhythmische Strukturen im Pflanzenreich. Die Naturwissenschaften 2. 1914. p. 73 ff.) zeigen uns, „in welcher Weise ein

anfangs homogenes Medium rhythmische Differenzierungen annehmen kann, ohne daß die Außenwelt diesen Rhythmus durch rhythmischen Wechsel irgendwelcher Bedingungen induzierte“. Die Mitwirkung der Außenwelt beschränkt sich vielmehr auf die Herbeiführung der günstigen Bedingungskonstellation.

b) Zufall oder Gesetz?

Der Fortschritt der Naturwissenschaften besteht in der zunehmenden Erschließung des kosmischen Teiles der Wirklichkeit. Gelingt uns der Nachweis, daß die auf dem Wege der Selbstdifferenzierung eines physikalischen Systems entstandene Formenmannigfaltigkeit einer einfachen physikalischen Gesetzmäßigkeit gehorcht, so haben wir diese Bereiche dem 'Zufall' abgerungen. Die Verteilung und Anordnung der Formen, die Regelmäßigkeit des Formenmusters erscheint dann nicht mehr als das Werk 'zufälliger' Störungen oder unwesentlicher Anfangsdifferenzen, die 'kleinen Hindernisse' haben dann aufgehört, in der morphologischen Theorienbildung als die entscheidende 'Anfangsursache' zu fungieren. Es ist dann nicht mehr nötig, das verschwommene 'Entwicklungsprinzip' oder das 'Selbstverstärkungsprinzip' zu Hilfe zu nehmen, um das Anwachsen dieser Anfangsdifferenzen zu den resultierenden Volldifferenzen verständlich zu machen, beides Prinzipien, die lediglich aussagen, daß etwas Kleines im Laufe der Zeit anwächst, und die nichts aussagen über das Maß und die Form dieses Anwachsens und die dieses als 'lokal bedingt', d. h. als 'zufällig' bestehen lassen. Vielmehr berechtigt uns die gewonnene Einsicht in das Wesen der physikalischen Systeme dazu, hier an die Stelle der vielen lokalen oder örtlich beschränkten Ursachen, deren Auswirkung einzeln zu verfolgen wäre, jeweils eine einzige systemhafte oder ausgedehnte Ursache treten zu lassen.

c) Kausalität oder Finalität?

Daraus, daß sich der 'lokalen' Ursache die 'systemhafte' Ursache zur Seite stellen läßt, geht schon hervor, daß es verschiedene Formen der 'Kausalität' gibt, die ihren objektiven Grund in den empirischen Verhältnissen finden. Auch in anderer Hinsicht gilt es, die willkürliche mechanistische Verengung des Kausalbegriffes zu vermeiden. Der mechanische 'Vorgangstypus' der Bewegung von starren Körpern und der Bewegungsübertragung durch Druck und Stoß darf nicht zum Urbilde alles kausalen Geschehens erhoben werden. Er versagt namentlich in den Fällen, wo die 'Wirkung' nicht einfach aus der 'Ursache' abzuleiten ist, sondern einen relativ eigengesetzlichen Verlauf nimmt. Diese Fälle werden adäquater dargestellt durch die Unterscheidung einer

'äußeren Ursache' und einer 'inneren Ursache', d. h. von gleichgewichtsstörenden äußeren Einwirkungen einerseits und von gleichgewichtsschaffenden, eigengesetzlichen Beantwortungen dieser Einwirkungen andererseits. Insofern sich also die kausale Betrachtungsweise vorzugsweise rückwärtsblickend den mechanischen Bedingtheiten, also den 'äußeren Ursachen' zuwendet, bedarf sie als Ergänzung der finalen Betrachtungsweise, die sich vorwärtsschauend den 'inneren Ursachen' zuwendet, also den Vorgängen, die die erfolgte Änderung des Gleichgewichtszustandes wieder rückgängig zu machen suchen. Während also das Kausalprinzip den bedingenden Ursachen nachgeht, sucht das Finalprinzip die Richtung und den Enderfolg des Geschehens festzustellen. Die Richtung jedes Geschehens zeigt einen Fortschritt zu stabilen Zuständen. Das Prinzip der „Tendenz zur Stabilität“ ist somit das allgemeinste Geschehensgesetz schlechthin. Es zeigt uns alles Geschehen als ein Gerichtetes. (*J. Petzoldt.*) Die Aufgabe der kausalen Analyse unserer Phänomene ist also eine doppelte: sie hat einerseits die äußeren kausalen Bedingtheiten, die 'Ursachen' im engeren Sinne, festzustellen, andererseits die Richtung des Geschehensablaufs mit Hilfe von Stabilitätsbetrachtungen zu ermitteln. 'Innere' und deutlich 'gerichtete' Geschehensabläufe sind namentlich die Elastizitätsbewegungen und die Reibungsbewegungen. Elastizität läßt sich (nach *Weyrauch*) definieren als das Streben (sic!) der Körper, gewisse durch äußere Kräfte hervorgerufene Deformationen rückgängig zu machen, oder auch die Fähigkeit (sic!) zur Wiederherstellung der ursprünglichen Gruppierung der Teile nach Entfernung der äußeren Kräfte. Entsprechend ist 'Reibung' der äußere oder innere Gleitwiderstand der Materie gegen relative Verschiebungen ihrer Teilchen, ein 'gerichteter' Widerstand, der nicht nur in Bewegungsverzögerungen, sondern zugleich noch in formalen und strukturellen Umlagerungen zum Ausdruck kommt. Wir sehen also, daß die Feststellung einer 'Tendenz' der Materie sehr wohl im Bereiche der üblichen physikalischen Anschauungen liegt, wenigstens soweit durch sie die Richtung des Geschehens auf gewisse stabile Zustände hin angegeben werden soll. —

A. Darstellender Teil.

I.

Rippelmarken und Dünen.

Der Stand der Forschung.

Jeder, der sich irgendwie mit Wellenphänomenen beschäftigt, wird bald die Erfahrung machen, daß er sich da auf ein sehr merkwürdiges Gelände begeben hat: Der feste Boden seiner Alltagserfahrungen entweicht ihm unter den Füßen, Ursache und Wirkung tanzen einen wilden Reigen, die Phänomene entgleiten seinen Händen, wo immer er sie zu fassen sucht. Selbst die Lichter der Wissenschaft, sonst untrügliche Wegweiser, flackern hier in eigentümlichem, irrem Zwielficht. Wenn wir irgend hoffen dürfen, aus dieser „Zaubersphäre“, in die wir uns jetzt wagen wollen, klaren Kopfes wieder herauszukommen, so kann dies nur geschehen, indem wir uns in ständiger Fühlungnahme mit der Beobachtung behutsam tastend vorwärtsbewegen.

Nachdem bereits ein Jahrhundert eifriger mathematischer Arbeit und scharfsinniger theoretischer Auseinandersetzungen über die Natur der Welle verflossen war, kam 1920 der Physiker *F. M. Exner* („Zur Physik der Dünen“) auf den doch eigentlich sehr naheliegenden Gedanken, Windwellen auf Sand experimentell zu erzeugen und jene merkwürdigen Gebilde, über deren physikalische Bewertung ernstliche Zweifel eigentlich kaum bestanden, nun einmal wirklich zu beobachten. Die Verwunderung war nicht gering. Was sich da bildete, stand zu der Theorie in solchem Widerspruch, daß *Exner* gestehen mußte (p. 942): „Wir haben es hier mit einer meines Wissens bisher unbekanntem Wellenart zu tun, die sich auch auf dem Meere findet“, und (p. 933): „Eine dynamische Theorie der Entstehung solcher Schwingungen aus den vorhandenen Kräften ist mir nicht gelungen.“

Den im vorliegenden entwickelten Anschauungen kommen am nächsten die geistvollen Studien des Botanikers *M. C. de Candolle* (1883). Er charakterisiert das Rippelphänomen bereits treffend als einen Vorgang, der sich an der Trennungsfläche zweier Medien abspielt; er führt das Problem zurück auf die Bildung von „Reibungswellen“ und ist überzeugt: „Ein vertieftes Studium dieser

viskosen, durch die Reibung von Flüssigkeiten hervorgerufenen Wellen würde, glaube ich, fruchtbar in wichtigen Ergebnissen für die Hydrodynamik sein.“ Sogar die *Küstersche* Theorie der „Zonenbildung in kolloidalen Medien“ (1913) in ihrer Anwendung auf pflanzliche und tierische Organismen wird von ihm ahnend vorweggenommen und mit den Reibungswellen in Zusammenhang gebracht. Das Phänomen der Wolkenrippeln wird bereits angeführt als Hinweis auf die universale Wirksamkeit jener physikalischen Gesetzmäßigkeit. Die Anregungen *Candolles* haben in der Wissenschaft, wie es scheint, nur wenig Wiederhall gefunden. Es wäre sonst nicht möglich gewesen, daß *Otto Baschin* seit 1899, anknüpfend an *Helmholtz'sche* Gedankengänge, seine Theorie der „wellenförmigen Oberflächenformen“ immer wieder einer wenig kritischen Leserschaft als neue Entdeckung darbieten konnte. Gemessen an den *Candolleschen* Studien bedeutet seine Theorie einen Rückfall in überwundene Denkweisen, keinen Fortschritt.

Candolle stellte seine Versuche in der Hauptsache an einem schaukelnden, mit Wasser gefüllten Glaskasten an, dessen Boden mit einer Sandschicht gleichmäßig bedeckt war. Auf die Übereinstimmung dieser Rippeln mit den unter Wind entstandenen weist er schon hin. Diese Schaukelversuche wurden später durch *Hahmann* (1912) ergänzt nach der Seite der durch beständige, gleichmäßige Strömung (horizontales Rotieren einer sandbedeckten Scheibe in Wasser) erzeugten „unsymmetrischen“ Wellenfurchen. Die Gesetze sind bei beiden Arten dieselben. Bei seinen sonstigen Versuchen operierte *Candolle* außerdem mit einer großen Anzahl pulverisierter oder viskoser Stoffe, wie Karbonaten, Glassplittern, Schwefel, Eisen, Sirup, Teer, Blut.

Die erste Entstehung der Rippeln.

Eine anschauliche Beschreibung der Rippeln im ersten Stadium der Entwicklung liefert *G. H. Darwin* (1884): „When a small quantity of sand is sprinkled [in a glass trough] and the rocking [das Schaukeln] begins, the sand dances backwards and forwards on the bottom, the grains rolling as they go.“ „Very shortly the sand begins to aggregate into irregular little flocculent masses, the appearance being something like that of curdling milk.“ Ganz entsprechend beobachtete *V. Cornish* (1897) bei seinen Versuchen mit Rippeln unter Wind zunächst eine Art „Maserung“, ein „gesprenkeltes (mottled) Aussehen, das der Bildung regelmäßiger Rippeln vorangeht“, und vergleicht damit „das netzartige Muster, das in dem Augenblick entsteht, wenn eine leichte Brise die Oberfläche des Wassers bestreicht, bevor die Rippeln Zeit gehabt haben, sich auszubreiten, und die kleinen wolligen Wolkenballen, wie Rauchpaffe, die sich oft so schnell über den Himmel hin

bilden und sogleich zu parallelen Streifen verschmelzen“. Nach *Candolle* (p. 254f.) ist das frühe Stadium der Rippelbildung gekennzeichnet durch „eine große Anzahl kleiner, netzartig verästelter Rippeln“, deren Maschen sich deutlich senkrecht zur Bewegungsrichtung erstrecken. Erst eine gewisse Reihe von Oszillationen liefern die endgültigen Rippeln. (Vgl. die schönen Fig. 1 u. 2 auf Taf. VII bei *Candolle*!) Die trotz aller Verzweigungen strenge Parallelität der Rippen ist dann noch ausgeprägter.

Die Selbstregeneration des Systems.

Die Rippeln, wie rhythmische Gebilde überhaupt, besitzen die Fähigkeit der Selbstregeneration verletzter Teile in einer Weise, wie wir sie sonst nur bei biologischen Individuen oder bei Kristallen, besonders flüssigen, anzutreffen gewohnt sind. (Vgl. *E. Korschelt*, „Regeneration“, i. Handwb. d. Nat. 8.1913, p.160f.) Wenn man (mit *Candolle*) eine auf dem ebenen und horizontalen Boden des Gefäßes gebildete Rippel teilweise mit einem Pinsel zerstört, ohne die Schwankungen der Flüssigkeit zu unterbrechen, so sieht man den zerstörten Teil der Rippel sich bald mittelst Verlängerung des unversehrt gebliebenen Teiles neu bilden. Auch die eigenartigen Verschmelzungsvorgänge benachbarter Rippeln finden auf jenen Gebieten ihre Entsprechungen.

Die Entwicklung des Formenmusters.

Die Zunahme an Regelmäßigkeit in der Seitenerstreckung der Rippelkämme geht schneller vor sich als die Zunahme der Wellenlänge. „I have known ridges increase from 2 inches to 20 feet laterally, whilst the simultaneous growth of wave-length was from 1 inch to 3 inches.“ (*Cornish* 1897 p.282.) — Es wäre jedoch völlig verfehlt, wenn wir die uns in der Natur entgegentretenden Rippelmarkenmuster je nach der erreichten „Regelmäßigkeit“ (d.h. der Annäherung an die geometrisch „regelmäßigste“ Form paralleler Linien) unter sich zu einer „Entwicklungsreihe“ (*Davis*) verbinden wollten. Die (rasch abgeschlossene) „Entwicklung“ der Rippeln kann sehr wohl in ein Nebeneinander gemäß der Bedingungskonstellation verschiedenartiger stationärer Zustände ausmünden. Bald waren, wie *J. Walther* (?1912 p.270) beobachtete, die sich gabelnden Sandrippen langgestreckt, bald in kurze Stücke zerlegt. Zogen sich hier noch die Furchen als längliche Rinnen hin, fand er sie anderswo durch kleine, kurze Mulden ersetzt, die dazwischen stehenden Sandrippen vereinigten sich zu einem Netzwerk sich kreuzender Sandzüge. Bei einem „fiederförmigen“ Typus wichen immer von einem Hauptstamm eine Anzahl Rippenäste nach einer Seite ab. — Bei den Großformen

der Dünen findet man die gleiche Mannigfaltigkeit der Muster, von den netzartigen Verzweigungen bis zu der regelmäßigen Sukzession langgestreckter Wälle, von denen z. B. *Sven Hedin* aus den Wüsten Innerasiens berichtet.

Der Einfluß von Hindernissen.

Welche Rolle den Anfangshindernissen bei der Riffelbildung zuffällt, ist eine delikate und zugleich theoretisch entscheidende Detailfrage, die eingehende Behandlung erheischt. Würden wirklich, wie man vielfach annimmt, größere Körner der Sandoberfläche den Anstoß zur Rippelung geben, so müßte die Rippelung um so stärker sein, je größer die Unterschiede in der Korngröße wären. Das Gegenteil ist der Fall. Je homogener und ebener die Sandfläche, um so günstiger liegen die Verhältnisse. „A considerable disproportion in the size of grains, instead of producing rippling, has exactly the opposite effect.“ (*H. King* 1916.) Einzelne über die Fläche verstreute Hindernisse zeigen sich ohne jeden Einfluß; es geht keinerlei Wirkung von ihnen aus. Klar geht dies aus einer Schilderung *W. S. Barclays* (Sand Dunes in the Peruvian Desert. Geogr. Journ. 49. 1917. p. 55) hervor: „The dunes advance over pebbles and stones without disturbing their position. I noticed immediately behind several large dunes scattered stones that obviously had not shifted from their bed, just as pebbles may lie secure on the seashore in the swell of the breakers. Generally speaking, the smoother the surface of the Pampa and the higher the wind, the larger and more perfect becomes the dune.“

Obwohl die Riffelbildung also in keiner Weise an das Vorhandensein von Anfangshindernissen gebunden ist, ist es doch erlaubt, minimalen, ein gewisses Maß nicht überschreitenden anfänglichen Unregelmäßigkeiten bei der ersten Herausbildung der rhythmischen Differenzierung eine beschleunigende (formkatalysatorische) Wirkung zuzuschreiben. Einen derartigen Einfluß bestätigen die Beobachtungen *Bertololys* (1900 p.84f.) an fluviatilen Rippeln: „Sobald man den Sand am Boden mit einem Brette geebnet hatte, konnte man ganz deutlich bemerken, daß gröbere Sandkörner, welche ohne jede Anordnung (!) umherlagen, den Ansatzkern für ganz minimale Sandablagerungen bildeten, die bald stromabwärts wanderten und schließlich zusammenwachsen. Wenn der Boden ganz eben war, dauerte es einige Zeit, bis sich diese ganz kleinen Sandablagerungen zu bilden begannen. Sobald sie aber eine gewisse Größe erreicht hatten, nahmen sie sehr rasch zu, bis sie schließlich ganze Kräuselungsmarken bildeten. Blieben aber nach der Zerstörung der ursprünglichen Kräuselungen noch einige Unebenheiten übrig, die von jenen

herrührten, so ging der Bildungsprozeß der Sandfurchen bedeutend rascher vonstatten . . . Es ist unbedingt erforderlich, daß das Hindernis, welches den Ansatzkern für die Kräuselungsmarken bilden soll, sehr klein ist.“ Zwischen der einzelnen Rippel und bestimmten Raumpunkten der 'bedingenden Topographie' besteht also keine lokal-kausale Beziehung. Entscheidend für die Lage der einzelnen Rippel ist nur ihr räumliches Verhältnis zum Gesamtnetzwerk, in das sie eingeordnet ist. *F. A. Forel* (1883. p. 53f.) fand bei seinen Versuchen, daß die absolute Lage der einzelnen Kämme bzw. Furchen bei Wiederholung eines Versuches unter den gleichen Bedingungen stets wechselte!

Beharrungsvermögen der ausgebildeten Form.

Einmal entstandene (Strand-) Rippeln haben nach *Forel* (a. a. O.) eine gewisse Stabilität (Beständigkeit). Geringe Verschiebungen der Bedingungskonstellation sind auf sie dann ohne Einfluß. (*G. H. Darwin* 1883 p.36.) Dies erklärt ihre anscheinende Unabhängigkeit von der Wellenrichtung und eine gelegentliche Disharmonie der Rippelweite zur herrschenden Wellenstärke.

Die Richtung der Rippelkämme.

Die Längserstreckung der Rippelkämme verläuft normalerweise senkrecht zur Bewegungsrichtung des Windes bzw. Wassers. Doch kommt dieser Eigenschaft für die Theorie rhythmischer Gebilde keine große Bedeutung zu, wie sich aus folgenden Versuchen und Überlegungen ergibt.

Ein quer zur Länge des Beckens gelegter Bleidraht (von 3 mm Durchmesser) diente nach *Forel* (1883) beim Einsetzen der Riffelbildung zunächst einer ersten Riffel als Achse, die übrigen Riffeln richteten sich dann parallel hierzu aus. Wurde der Bleidraht schräg gelegt, so nahmen im selben Sinne und im selben Betrage alle Rippeln diese schräge Lage an. Eine in den Sand gezogene Rille führte zum selben Ergebnis. So verlaufen auch in der Natur die Strandrippeln in der Regel parallel zur Quaimauer. Richtung und Lage der Rippeln kann also unmittelbar bestimmt sein durch Lage und Richtung etwaiger minimaler Hindernisse von geeigneter Form. Diese Abhängigkeit steht nicht im Widerspruch zu unserer Theorie, denn entscheidend sind ja nicht die räumlichen Beziehungen zur 'bedingenden Topographie' ('physischen Form'), sondern die Aufwölbung und Wellung, die Herausbildung einer Gestaltstruktur als solche. (Die Schlüsse, die *Forel* aus den Versuchen zieht, sind wenig überzeugend.) Die Richtung scheint in der Tat überhaupt durch

äußere Faktoren mitbestimmt zu werden, deren Auftreten und Wirksamkeit sich freilich nach einer gewissen Gesetzmäßigkeit regelt. Die Hauptrolle fällt wohl schwachen elastischen Stoßwellen zu, die sich selbst bei sorgfältiger Versuchsanordnung nicht ganz vermeiden lassen, die in der Natur aber um so wirksamer den Gestaltungsprozeß begleiten, und die naturgemäß stets senkrecht zur Richtung des Geschehens bzw. zu Hindernissen verlaufen. Auch die Regelmäßigkeit der seitlichen Erstreckung der Rippelkämme kann in dieser Weise, etwa durch vorgezogene Furchen, eine Verstärkung erfahren. (*Darwin* 1884 p.24.) Doch ist dabei zu bemerken, daß die Furchen selbst nachher spurlos verschwunden sind und daß auch ihr gegenseitiger Abstand keinerlei Wirkung hinterlassen hat. Sie fungieren eben lediglich als 'Katalysatoren' im eigentlichsten Sinne. „A few oscillations of the trough soon efface all signs of the artificial origin and the ripple crests were absolutely indistinguishable, except by perfect regularity, from those produced naturally.“ (Vgl. den Gedanken der „Resonanz“ der Wellen bei *Solger*.) — Der richtunggebende Einfluß von Anfangshindernissen kann durch anders verlaufende Stoßwellen wieder aufgehoben werden. Ließ *Forel* (1883 p.69) in seinen Versuchen das Wasser fortwährend stark schaukeln, so zerlegten sich die schrägen Rippeln bald treppenförmig und bildeten sich neu zu einem System von senkrecht zur Schaukelrichtung verlaufenden Rippeln, jedoch nur dann, wenn das Schwanken stark genug war, um den Sand fast völlig umzukrempeln (*bouleverser*). — Auch die Richtung der Dünenketten der Wüstengebiete läßt nicht immer einen bindenden Schluß auf die Richtung des herrschenden Windes zu. Langgestreckte Hindernisse, wie Uadis, Erosionsränder, Bergketten wirkten hier vielfach richtunggebend. (*Sokolow* 1894 p.177f.; Lit.) Namentlich bei den Küsten- und Flußdünen ordnen sich die Kämme in der Regel unabhängig von dem herrschenden Winde parallel zur Austrittsstelle des flugfähigen Materials an. Ist die Windrichtung über einem Dünenystem nicht einheitlich, so verlaufen die Kämme senkrecht zur Hauptwindrichtung bzw. zur Resultante der verschiedenen Richtungen. Nur wo zwei voneinander stark abweichende Windrichtungen ebenso scharf markierte Häufigkeitsmaxima aufweisen, bilden sich zwei sich kreuzende Systeme aus bzw. lösen diese Systeme zeitlich einander ab. (Vgl. *Ivar Högbom* 1923.p.132f.) Die Tendenz der 'Inlanddünen', sich an den Rändern eines Dünenfeldes parallel zum Rande des Feldes (und zur Windrichtung) einzustellen und so eine Kurve zu bilden, die der einer Hufeisendüne ähnlich ist, erklärt sich nach *Ivar Högbom* (p.137,182ff.) aus dem verzögernden Einfluß durch Feuchtigkeit usw., der von den Nachbargebieten auf den Rand des Dünenfeldes übergreift.

Wachstums- und Verschmelzungserscheinungen.

Über die Art des Anwachsens der Rippeln, des Verschmelzens kleinerer Rippeln zu größeren, geben die Autoren selten klare Auskunft. Kleinere Rippeln bewegen sich schneller fort, holen größere ein und gehen in ihnen auf, werden von ihnen gleichsam verschluckt; oft geschieht dies plötzlich und ruckweise, gewisse Rippeln erlöschen, und ihre Nachbarn greifen über auf das verlassene Feld. — Der Vorgang des Wachstums der Reibungswellen auf Wasser verläuft ganz entsprechend. Nach *Cornish* (1910 p.103) ist auch hier das Wachstum der größeren Wellen begleitet „by the failure and partial obliteration of the shorter waves which were there before“. Das von *Helmholtz* gewählte Bild einer „Interferenz“ von Wellen ähnlicher Länge ist also wenig treffend. Interessante Beobachtungen machte *Oettli* (1917) an Schneebarchanen: „Es hatte den Anschein, als ob der Zuwachs von zertrümmerten, zu Beginn des Treibens in viel größerer Zahl vorhandenen kleinen und kleinsten Wällen entstammte. Diese zeigten nämlich zwar die gleichen hin- und herschreitenden Bewegungen wie die größeren Wälle. Wurde aber ihre Spitze einmal zu weit abgenagt, so war es um sie geschehen; sie wurden ganz weggeblasen, und kein ähnliches Gebilde entstand an ihrer Stelle.“

Die Rippeln als Reibungsphänomen.

Maßgebend für die Bildung der Rippeln bei gegebenen Entstehungsbedingungen ist allein die relative Geschwindigkeit der beiden Medien an ihrer gemeinsamen Berührungsfläche, also in den Schaukelversuchen die Bodengeschwindigkeit des bewegten Wassers. Menge und Tiefe des Wassers sind (wenigstens für die experimentellen Verhältnisse) ohne Einfluß. Die Wellenfurchen verdanken ihre Entstehung lediglich der Reibung des Wassers an der Oberfläche der benetzten Substanz. Den Beweis liefert die Unabhängigkeit des entstehenden Rippelmusters von der Form des Gefäßes, von der Art der Bewegungen in weiterer Entfernung von der Reibungsfläche (vgl. die Oszillationsversuche *Candolles* mit randgefüllter und geschlossener Flasche), andererseits die Abhängigkeit der Rippelweite von der Viskosität des unterlagernden Mediums. Die Rippeln sind also nicht einfache „Abdrücke“, „Spuren“, „Indikatoren“ von Bewegungen, die über ihnen vorüberziehen. Das unterlagernde Medium ist an ihrer Bildung ebenso entscheidend beteiligt wie das obere. Das Geschehen entwickelt sich lediglich von der Reibungsfläche aus.

Der Einfluß von Schwingungen im auflagernden Medium.

So entsprechen bei den durch Oszillation des auflagernden Mediums entstandenen Rippeln die Rippen und Furchen nicht den Wellenknoten und -bäuchen der stehenden Schwingungen des Wassers, sondern jedem Wellenbauch entspricht ein System von mehreren Rippeln¹⁾; diese stehen zu jenen in keiner unmittelbaren räumlichen Abhängigkeitsbeziehung. Eine solche liegt z. B. vor bei den *Chladni*-schen Klangfiguren. Hier sind es im wesentlichen die Eigenschwingungen der Platte, die zu sichtbarem Ausdruck kommen. Der aufgestreute Sand wird von den bewegten Teilen fortgeschleudert und sammelt sich in den Knotenlinien an. (Handwbt.d.Nat.8.p.1046) Erzeugt man in einer geschlossenen Pfeife starke hohe Töne, so können die zahlreichen Knoten und Bäuche, in die sich die Pfeife teilt, sichtbar gemacht werden durch Korkpulver, Bärlappsamen und dergl., der sich an den Bewegungsknoten anhäuft. Man erhält dann die sog. *Kundt*-schen Staubfiguren. Die zunächst gleichmäßig verteilten Staubkörner treten hier zusammen zu einer regelmäßigen Sukzession dünenartiger Gebilde, die man gemäß ihrer Entstehung als 'Schwingungsdünen' bezeichnen kann. Doch sind diese ihrerseits die 'Transportkörper' für ein ebenso regelmäßiges System fortschreitender schmaler Runzelungen, die gemäß den Entstehungsbedingungen als echte 'Reibungsrippeln' anzusehen sind. Beide Vorgänge greifen also hier in eigenartiger Weise ineinander. Neben dem Fortschreiten bedingt hier die Dynamik der schwingenden Luft auch ein ruckweises lamellenartiges Emporstreben der Rippelkämme. Ein negatives Kriterium für die theoretische Scheidung in Schwingungsdünen und Reibungsrippeln ist der Umstand, daß bei entsprechender gleichförmiger Luftströmung jene verschwinden, diese dagegen bleiben. Hieraus ergibt sich auch die Unbrauchbarkeit dieser Staubfiguren zur theoretischen Aufhellung des Verhältnisses zwischen Reibungsrippel und Reibungsdüne. Die Reibungsdüne ist eine unter den gleichen Bedingungen wie die Reibungsrippel entstandene Form höherer Größenordnung. Die in der Natur vorkommenden Gebilde sind im wesentlichen diese beider letzteren, mag die Reibung nun gleichmäßigen oder oszillierenden Charakter haben. So sind die durch progressive Oszillation der Brandungswellen entstandenen Strandrippeln nur Reibungsformen, nicht „Wellenspuren“, als welche man sie früher ansah. Denn es fehlt hier u. a. ganz die vertikale Komponente, die zusammen mit der horizontalen eine

¹⁾ H. W. Ahlmann (1914 p. 17) fand für den Abstand der Flußrippeln $\frac{1}{15}$ bis $\frac{1}{20}$ der oberflächlichen Wellenlänge.

Schwingung ergibt. Verantwortlich z. B. für die Strandrippeln der Brandungszone sind lediglich alternierende Relativbewegungen parallel zur Grenzfläche, denn die vertikale Achse der Orbitalellipsen reduziert sich nach der Tiefe zu auf ein Minimum (Vgl. *Bertololy* 1900 p.62ff.). *Hunt* (1904.p.410ff.) unterscheidet diese unter oszillierender Strömung gebildeten symmetrischen „ripple-marks“ von den unter gleichmäßiger Strömung gebildeten „current-marks“. (Zur Lit. üb. symm. u. unsymm. Rippeln unter Gezeitenströmungen vgl. *D.W. Johnson* 1916.p.811ff.) *Hahmann* (1912) schildert ihre Bildungsweise: „Eine ankommende Welle schob das Wasser mehrere Meter über die flache Küste vor und wirbelte dabei Sand auf. Beim Zurückfließen des Sandes bildete sich dann eine ganze Reihe Dünen, und zwar gleichzeitig (!). Die folgende Welle zerstörte die gebildeten Dünen wieder ... Bei Ebbe bemerkte ich ganz flache Wellenfurchen von symmetrischen Bau in Abständen von 20 bis 30 cm. Diese waren unzweifelhaft bei Flut durch die Wellentätigkeit, also durch oszillierendes Wasser entstanden.“

Es sei nun versucht, durch eine eingehendere Betrachtung der Dynamik der Rippeln die Eigenart dieser Gebilde schärfer zu erfassen.

1. Der Abstand der Rippeln wächst proportional der relativen Geschwindigkeit an der Grenzfläche. (Vgl. *Hahmann* 1912 p.33.)

2. Der Abstand der Rippeln nimmt zu mit zunehmender Korngröße. (Vgl. *Forel* 1883 p.50ff. Über das abweichende Verhalten der Windrippeln im Experiment vgl. *Hahmann* p.16,26,39ff. Die Komprimierbarkeit der Luft scheint hierbei eine Rolle zu spielen.) Ebenso nimmt die Höhe der Rippeln (und Dünen) zu mit der Korngröße. *Sokolow* (1894.p.109f.) bringt Beispiele von „Dünen von sehr geringer Höhe aus äußerst feinem Sande“ und von „Dünen von gewaltiger Höhe aus grobem Sande“.

3. Das Verhältnis von Länge und Höhe bleibt konstant während des Anwachsens der Rippeln. Nach *Cornish* (1914) beträgt dies für Windrippeln auf Sand durchschnittlich 18,6. *Cornish* beobachtete das gleiche Verhältnis an den 120 mal größeren Sandwellen des Nilufers. Bei seinen Versuchen im Gebläsewerk (1897 p.280) ergab sich durchweg eine Luvböschung von annähernd 4° und eine Leeböschung, die dem Maximalböschungswinkel des betr. Sandes entsprach. Windrippeln auf trockenem Schnee haben größere Länge und geringere Höhe, bewegen sich außerdem bedeutend schneller als Sandrippeln. (Verhältnis nach *Cornish* etwa 1:6.) Eine raschere und stärkere Veränderung der Gestalt unserer Gebilde tritt erst bei ihrer Vernichtung, d. h. Abtragung durch das auflagernde Medium ein.

Und zwar ändert sich die Höhe am schnellsten, langsamer die anderen Maße. (Für die Barchane s. *Sokolow* 1894 p.263.) Denn die Höhe ist gleichsam ein Gradmesser für die dank unserer (gravitationswidrigen) 'Tendenz' in ihr aufgespeicherte potentielle Energie, die bei Wegfall dieser 'Tendenz' ebenfalls vernichtet wird. Wie wir noch sehen werden, ist auch bei den Reibungswellen auf Wasser die Wellenhöhe „von allen Wellenmaßen dasjenige, welches sich am schnellsten vermindert und abfällt, sobald die Brise aufgehört hat“ (*Pâris*, zit. *Krümmel* II.1911.p.66).

4. „Nimmt man ein Gemisch von Sand verschiedener Korngröße, so zeigt sich, daß die größeren darin vorhandenen Sandkörner den Abstand bestimmen.“ (*Forel; Hahmann.*) Dies gilt jedoch nicht mehr für Grenzfälle. *King* (1916.p.198), der einige gröbere Körner auf die Oberfläche feinen Dünensandes streute, sah „eine Serie von größeren Rippeln ganz unabhängig von den kleineren sich entwickeln“. Die größeren Rippeln bewegten sich dabei viel langsamer als die kleineren. — *Forel* (1883 Fig.6—8) erhielt mit stark gemischtem Sand bei starkem Schaukeln große Rippeln, die bei Milderung der Schwankungen von sekundären Rippeln aus feinerem Sande und geringerer Breite überlagert wurden. — Entscheidend ist die Tatsache, daß sich die Partikeln von gleicher Korngröße unter sich zu einem physikalischen Systeme verbinden und daß dieses System seine eigene Gesetzmäßigkeit unbeeinflusst von sonstigen örtlichen Vergesellschaftungen entwickelt. Als natürliches Ergebnis der 'Aufbereitung' der Sandmassen durch den Wind ist die mechanische (im Gegensatz zur chemischen und mineralogischen!) Zusammensetzung des Dünensandes in beschränkten Bereichen von auffallender Einförmigkeit (*Udden* 1898 p.9—26; *Free* 1911 p.68f.), eine Erscheinung, die die systemhaften Gestaltwirkungen besonders erleichtert.

5. Der Abstand der Rippeln nimmt mit der Erhöhung der Temperatur beträchtlich zu. (Nach *Hahmann* z. B. bei Temperaturerhöhung von 8° auf 32° eine Vergrößerung des Abstandes von 26 auf 29 mm.) Dies erklärt sich aus der Abnahme des Reibungskoeffizienten (Zähigkeit) mit steigender Temperatur. (Über den Einfluß der Temperatur auf die Höhe der Wasserwellen s. *Halbfaß* 1923 p.144.)

6. Dichte und spezifisches Gewicht sind für den Bildungsprozeß der Rippeln ohne Einfluß. Denn der Abstand der Rippeln nimmt bei Temperaturen unter 4° weiterhin ab. Bedeutende Änderungen der Dichte (Versuche mit Salzlösungen) sind im Vergleich zu selbst geringen Konzentrationsänderungen und daraus

sich ergebenden Änderungen des Reibungskoeffizienten nur von geringem Einfluß. Versuche mit einer Mischung von Sand und Eisenfeilspänen von annähernd gleicher Korngröße ergeben dasselbe Resultat wie mit Quarzsand allein. (*Hahmann* 1912 p.22f.) Der Abstand der Rippeln wird also hauptsächlich von der inneren Reibung bestimmt. Die Größe des Reibungskoeffizienten (der Grad der Zähigkeit) ist für Entstehung und Abstand der Rippeln ausschlaggebend.

7. Die Wanderungsgeschwindigkeit ist das unberechenbarste von allen Wellenmaßen. Die Stärke der Sandzufuhr und andere Faktoren scheinen hier eine wesentliche Rolle zu spielen. Allgemein läßt sich sagen, daß die Wanderungsgeschwindigkeit von den kleineren und instabilen zu den größeren und stabilen Gebilden hin relativ abnimmt. Im übrigen bestätigen die Beobachtungen durchaus nicht immer ein regelmäßiges Vorwärtsrücken der Dünenkämme. Ebenso wenig hat sich nach den neueren Untersuchungen auch die schematisch-deduktive Annahme eines planmäßigen Vorrückens der sog. Sandriffe auf den Strand zu (*K. Andree* II.1920.p.78f.) oder die eines allgemeinen Talabwanderns der Flußwindungen bestätigt.

8. Der Elektrizitätsgehalt des Windes ist nach *Cornish* (1908; ferner 1914 p.73) von merkbarem Einfluß auf den Sandtransport und die Entwicklung der Rippeln und Dünen.

Grenzbedingungen.

1. Notwendigkeit des funktionellen Zusammenhanges.

Cornish (1897 p.280) machte bei seinen Experimenten mit Rippeln unter Wind die Feststellung, daß die Rippelbildung unterblieb, wenn aus einem Sandgemisch alle feineren Substanzen sorgfältig durch Aussiebung entfernt waren. Selbst starkes Blasen, „wobei die Körner beim Dahinrollen ratterten und hüpfen“, blieb ohne Erfolg. Wurde jedoch etwas feiner Quarzsand beigemischt, so traten die Rippeln wieder auf. Wenn *Cornish* (vgl. dagegen *King* 1916) den Sand als „Halbflüssigkeit“ auffaßt, so zielt dies eben auf diesen funktionellen Zusammenhang des Geschehens in der Grenzschicht des Sandes. Aus demselben Gesichtspunkte erklärt sich die Anwendung des Begriffes der 'Zähigkeit' (Viskosität) auf die Sandbewegung, angesichts der Beweglichkeit der Teilchen und der hohen inneren Reibung. (Vgl. *G. H. Darwin* 1884 p.37.) — *H. W. Ahlmanns* (1914 p.31) Beschreibung der Transportmechanik des Geschiebes entnehmen wir ein dem obigen entsprechendes Beispiel: „Der Bach floß erst über Moränenboden, wo alles feine Material wegerodiert und der Boden gleichsam mit mittelgroßen Steinen

geplastert war. Die kleine hier vorkommende Sandquantität wurde kontinuierlich (!) einen langen Weg entlanggeführt. An einer Stelle berührte das Wasser aber einen Sandrücken, der die Sandlast sehr vermehrte, was zur Folge hatte, daß sofort 'Transportdeltas' entstanden, obschon sowohl die Form des Bodens wie die Strömungsgeschwindigkeit dieselbe war.“

Andererseits darf die innere Reibung der Teilchen nicht durch eine zu feste Verkittung aufgehoben werden. So kann an die Stelle der 'Lockerheit' des Sandes bei Rippelmarken und Dünen durch starke Beimengungen feinsandiger und staubartiger, bsd. toniger Bestandteile, bei Windrippeln auch durch Feuchtigkeit, eine Unverschiebbarkeit treten, die die Bildung jener Formen verhindert. (*Solger* 1910 p.18; *Sokolow* 1894 p.59; *Philippson* II,2.1924.p.272: „Feuchter Sand bildet nur ebene Flächen.“) Die relative Unangreifbarkeit der Oberfläche des Sandes ist hier nicht zuletzt bedingt durch ihre Geschlossenheit, die es dem angreifenden Medium nicht erlaubt, in die Grenzzone des Sandes einzudringen. Dies führt uns zu einer weiteren wichtigen Feststellung:

Der funktionelle Zusammenhang in dem nicht-flüssigen bzw. gasförmigen Medium wird durch Mischung mit dem anderen Medium in der Grenzzone erhöht. „Damit die Flüssigkeit mit einer gegebenen pulverisierten Masse Furchen hervorbringe, muß diese mit der Flüssigkeit eine Mischung bilden, die eine gewisse Viskosität besitzt, was voraussetzt, daß zwischen ihnen Adhäsion besteht.“ (*Candolle* 1883 p.250 Anm.) Nach *H. Engels* (*Zs.f.Bauwesen* 1912) nimmt die „Räumungskraft“ des fließenden Wassers zu mit der Zunahme des Porengehaltes der Sohlenschicht. Die Versuche *F. M. Exners* (*Wiener Sitzungsber.* 1920.p.931f.) scheinen die formkatalysatorische Funktion dieses Mischungsprozesses in der Grenzzone zu bestätigen. „Auf der anfangs glatten Sandfläche entstanden in etwa 1 Stunde (!) bei Windstärken von 4 bis 5 m/sec. sehr deutliche Sandwellen, und zwar stets, so oft der Versuch auch gemacht wurde. Noch rascher ging dies, wenn ich vorne beim Austritt des Luftstromes aus dem Ventilator, also am Anfange des Kanals, durch einen feinen Trichter einen Sandstrahl in den Luftstrom einfließen ließ; es entstand dann ein Sandsturm, der bei Wind von 5 m/sec. die Bildung von ganz deutlichen Sandwellen in 20 Minuten (!) zur Folge hatte.“ (Vgl. *King* 1916 p.204f. über die Bewegung der untersten sandbeladenen Luftschicht.) Entsprechend scheint die Bildung von Reibungswellen auf Wasser durch Nebel begünstigt zu werden. (S. a. unten über die „Zähigkeitsdifferenz“ zwischen den beiden Medien!)

2. Obere und untere Geschwindigkeitsgrenze.

Cornish (1897) fand, daß keine Dünenbildung stattfindet, 1. wenn der Wind so stark ist, daß er die größeren Körner emporhebt, und 2. wenn er zu schwach ist, um die kleinen zu bewegen. Nach den Beobachtungen von *Brémontier*, *Hagen*, *Wessely*, *Jordan*, *Kónschin* und *Sokolow* (zit. ders., 1894. p. 109 u. 180) können Dünen durch sehr starke Winde, namentlich aber durch starke Stürme, sichtlich erniedrigt oder vollkommen abgetragen werden. Andererseits kann die Korngröße des Sandes so bedeutend sein, daß der Wind das Material nicht mehr fortzuschaffen vermag. (Über die Relativität dieser Grenze vgl. *Free* 1911 p. 44.) In beiden Fällen kommt es nicht zu der erforderlichen Form der inneren Reibung. In der Randzone des überfluteten Flachstrandes ist die 'Schleppkraft' des Wassers so gering, daß sie zur Riffelbildung nicht mehr ausreicht. Die Grenzlinie der Riffelbildung läuft dann meerwärts von der höchsten Wasserufergrenze und parallel zu dieser. (*S. K. Banerji* 1923.) — Erreicht bei den fluviatilen Bildungen die Strömung eine solche Stärke, daß das (bis dahin gerollte und geschobene) Geschiebe schwebend transportiert werden kann, so verflachen und verkleinern sich die Bänke. *Partiot* (1871) erwähnt auch, daß eine ganze Bank auf diese Weise sich auflösen und verschwinden kann.

Die Grenzbedingungen für einen bestimmten rhythmischen Typus liegen jedoch innerhalb dieser absoluten Grenzen! Der eine rhythmische Typus verschwindet oft nur, um einem anderen Platz zu machen, und zwar geschieht dies immer dann, wenn eine für den bestimmten Typus charakteristische 'kritische Grenze' über- bzw. unterschritten wird. Kurz vor Erreichung der oberen Grenze ($2\frac{1}{2}$ feet/sec.) „beginnen die Rippeln sehr unbestimmt im Umriß zu werden“, und bald darauf „werden sie alle weggefegt und eine gänzlich abweichende Form der Bewegung setzt ein“ (*Owens* i. Diskussion zu *King* 1916 p. 208). Eine solche Aufeinanderfolge zweier Stadien beschreibt *G. C. Gilbert* (1914. — Ref. i. Zs. Ges. f. Erdk. 1922 p. 243): Bei geringer Wassergeschwindigkeit lagert sich das Geröll am Boden in der Form von Dünen mit sanfter Luv- und steiler Leeseite ab, die sich langsam stromab bewegen. Bei Steigerung der Wassergeschwindigkeit tritt vorübergehend ein glatter Zustand des von Geröll bedeckten Trogbodens ein, der dann in Wellenformen mit ziemlich gleichmäßig steiler Luv- und Leeseite übergeht. Diese bereits von *Cornish* (1899; 1914) in der Natur beobachtete Form bewegt sich durch Materialentnahme an der Lee- und Ablagerung an der Luvseite stromauf

(Antidünen). — Um unsere theoretischen Ausführungen nicht unnötig zu komplizieren, beschränken wir uns im vorliegenden auf die bei langsamer Strömung sich bildenden Rippelmarken und Dünen, die einer theoretischen Behandlung relativ zugänglicher sind als etwa die in der Windrichtung verlaufenden Muster der 'Strichdünen' (vgl. Kap. „Formenschatz“) oder die mit netzartigen Verästelungen auftretenden Gebilde, oder auch die Hohlformen, Erosionsformen, 'Verzögerungsformen' und 'Zerstörungsformen', wie 'Dschardangs', Windfurchen, Parabeldünen, Hufeisendünen ('Fuljes'; vgl. *Cornish* 1914.p.45ff.), Garmadas (vgl. *Cholnoky* 1902), u. a. m.

3. Die Zähigkeitsdifferenz zwischen den beiden Medien.

Der Rhythmus tritt weder bei zu großer Gleichheit der inneren Reibung auf beiden Seiten noch bei zu großer Verschiedenheit auf. Bei Versuchen *Candolles* (1883 p.250) mit Wasser einerseits, Quecksilber, Zimtessenz oder Terpentin andererseits, bildeten sich trotz der starken Abweichung im spezifischen Gewicht keine Rippeln, da die beiden Medien annähernd gleich geringe innere Reibung hatten und die Differentialbewegungen in den beiden Grenzzonen so übereinstimmen; die Diskontinuität an der Trennungsfläche war zu gering. „Mais le phénomène peut avoir lieu, si l'on intercale entre eux une poudre insoluble formant avec l'eau un mélange doué de quelque viscosité.“ Andererseits entstanden auch bei zu großer Verschiedenheit, z. B. bei einer Kombination der erwähnten Pulvermassen mit Olivenöl (statt mit Wasser) keine Rippeln, selbst nicht dann, wenn man statt ihrer Teer oder Sirup nahm. Die Pulvermassen ballten sich zu den verschiedensten Formen zusammen, ohne jede Richtung. — Das Phänomen der Wellenglättung durch Öl dürfte auf diese zu große Zähigkeitsdifferenz zurückzuführen sein. Daß die dünne Ölhaut nicht, einer verbreiteten Ansicht entsprechend, kraft einer ihr innewohnenden Energie diese erstaunliche Arbeit leisten kann, dürfte wohl einleuchten. Nicht das Öl glättet, sondern der Wind. —

Für die Größe der (äußeren) 'Reibungskraft' ist entscheidend, ob ein Zusammenhaften der beiden Medien an der Berührungsfläche stattfindet. Bei gewissen Kombinationen, wie z. B. Luft—Öl, ist sie bei niedrigen Geschwindigkeiten sehr gering: Die beiden Medien gleiten aneinander ab, es kommt nicht zu scherenden Verzerrungen in der Grenzzone. Die Reibungskraft nimmt in diesem Falle mit der Geschwindigkeit zu. Dagegen zeichnen sich andere Kombinationen von Medien, wie z. B. Luft—Wasser, dadurch aus, daß bei geringer relativer Geschwindigkeit

bzw. bei der Geschwindigkeit Null die Reibungskraft an der Berührungsfäche hohe Werte annimmt.

Der Bewegungsmechanismus als Massenbewegung.

Als 'Massenbewegung' vollzieht sich die Relativbewegung der beiden Medien aneinander vorbei durchaus gleichförmig und zusammenhängend; sie gehorcht einer zwar eigenartigen, aber doch einfachen und durchsichtigen Gesetzmäßigkeit. Die Verhältnisse liegen hier so wie bei den Massenbewegungen der Gase: Erst wenn wir unseren Blick auf die Individualbewegungen der einzelnen Teilchen richten, bekommt die Bewegung einen ungeordneten, unterbrochenen, sprunghaften und periodischen Charakter; Unregelmäßigkeiten, die jedoch die strenge Geordnetheit und Gleichförmigkeit der Massenbewegung in keiner Weise beeinflussen. „This intermittent character of the movement of soil particles by the wind applies, of course, only to individual particles and not to the mass, and does not mean that the air intermittently loses its load. When one particle is dropped another is picked up, and the total load may remain practically constant, though the individual particles are changing. (*Free* 1911 p.47f.) Jeder Versuch, die wellenförmige Differenzierung auf bestimmte Individualbewegungen zurückzuführen, ist deshalb von vornherein verfehlt. In diese Kategorie fallen auch die Versuche, die Wirbel im Lee zur 'Ursache' des ganzen Verlaufes zu stempeln oder ihnen doch eine für das Weiterwachsen der 'Urrippel' entscheidende Bedeutung beizulegen. Nichts berechtigt uns jedoch, aus dem genannten Bewegungsmechanismus ein beliebiges Maschinenteil herauszugreifen. In Wirklichkeit ist der Leewirbel nur eine harmlose Begleiterscheinung des Gesamtprozesses, ein Lückenbüßer zwischen den beiden ineinandergreifenden Wellenkurven; er erfüllt die ihm vom Gesamtsystem zugewiesene Aufgabe ohne irgendwelches Verlangen nach unabhängiger und zielbewußter Betätigung. Bei normaler, ungestörter Entwicklung zeigt die Leeseite den natürlichen Böschungswinkel losen Sandes (*Cornish; Free* 1911 p.60ff. mit Lit.; Leewirbel: *ibid.*p.66), sie ist also gleichsam nur Schutthalde und ist an ihrem Fuß scharf gegen die Horizontale abgegrenzt (*Bertololy* 1900 p.87). Nur der sanft geschwungene Fuß der Luvseite wird vom Wirbel beständig nachpoliert und reingefegt.

Tätig, verursachend, formbildend ist auf dem Dünenfelde nur die dünne Schicht bewegten Sandes, die wie ein wellig gebogenes Transportband über die Dünenkörper hinweggleitet und die ganz aus sich heraus eine stabile Bewegungsstruktur ausbildet. Dieses kontinuierliche Band erscheint nur insofern periodisch unterbrochen, als ihm jeweils jenseits der Leekanten die Unterlage entzogen wird, so daß das Material durch

seine Schwere passiv die Böschung hinabstürzt. Vielfach setzt jedoch ein Teil des Materials seine Bewegungsrichtung fort: „Nicht aller Sand wandert an dem Steilhang gegen den Binnenhof der Wanderdüne hinter, sondern ein Teil zerflattert an der Oberkante der Düne, fliegt weiter zur Ergänzung einer bereits weiter vorangeschrittenen Wanderdüne, gelangt in Sandwehen oder wird aus der Wüste herausgebracht.“ (E. Kaiser 1923.) Auch aus einer Betrachtung der vorkommenden Dünenquerprofile ergibt sich die weitgehende Kontinuität des Transportbandes und die auffallend geringe formgebende Wirksamkeit des Leewirbels. Besonders bei den Barchanen verläuft der Übergang vom Luvhang über den Kamm zum Leehang in sanft geschwungener Kurve, die sich jenseits des Kammes noch eine Strecke weit in flacher Neigung bis zu der scharfen Kante des steilen Leehanges erstreckt, welche letzterer also erst dort eigentlich beginnt. Noch weniger Raum bleibt dem Wirbel zu seiner Entfaltung in den Fällen, wo die Stromlinien der Windbewegung jenseits der Leekante so divergieren, daß ein Teil noch dem (hier sanfter geneigten) Leehange hinab folgt, das Sandtransportband also kaum eine Unterbrechung erfährt. (Vgl. Ivar Högbom 1923 p.125 u.128.)

Ein wesentlich anderes Bild des Wirbels bekommen wir allerdings, wenn bei veränderten äußeren Bedingungen die Erhöhungen der Rippen nicht mehr den Systembedingungen genügen und so Hindernischarakter annehmen. Im Lee von Hindernissen pflegt der Wirbel allerdings sehr wirksam zu sein und stellt dann in der Tat einen aktiv formenden Faktor dar. Der senkrechte Absturz im obersten Teile der Leeböschung, den man zuweilen beobachtet, wird auf das Konto eines solchen Wirbels zu setzen sein (vgl. Bertololy 1900 p.86f.), ebenso die Erscheinung, daß infolge der starken Wirbelwirkung Körner an dem Rippelkamme eine Zeitlang haften bleiben.

Über das Stromlinienbild in der Grenzschicht des auflagernden Mediums, das mit dem unterlagernden ineinandergreift, sowie über seinen Konnex mit dem Wirbel herrscht trotz der Versuche G. H. Darwins (1884) mit den die Wasserbewegung sichtbar machenden Tintenbäumen noch wenig Klarheit.

Die mechanische Struktur der Rippeln.

Die Verteilung der gröberen und feineren Körner auf den Rippeln, wie sie sich vielfach im Verlaufe ihres Wachstums herausbildet, folgt einer auf den ersten Blick nicht ganz durchsichtigen Gesetzmäßigkeit. An zwei extremen Fällen sei dies erläutert.

1. Bei ruhiger, langsamer Strömung erleiden alle Körner auf der Luvseite in der Hauptsache nur eine rollende Vorwärtsbewegung, selbst die feineren Körner werden nicht emporgewirbelt oder suspendiert. (*Cornish* 1914 p.269.) „Da nun alle kleineren Sandkörner infolge der sich ihnen entgegenstellenden Hindernisse langsamer wandern bzw. ihre Bewegung auf der Luvseite unterbrechen, weist diese vorzugsweise feineren Sand auf, auf der Leeseite dagegen sammeln sich die größeren Sandkörner an, da sie, sobald sie auf der Luvseite auftauchen, im Nu vom Fuße derselben bis zur Leeseite gelangen, wo ihre Ablagerung erfolgt.“ (*Bertololy* 1900 p. 98.) Die Größe des 'relativen Widerstandes', nicht die Schwere der einzelnen Körner, ist also für ihren Transport maßgebend. Bei den in ruhiger Strömung entstandenen Flußrippeln, wie auch bei den von gleichmäßigem Wellenschlage auf Sandstrand gebildeten symmetrischen Rippelmarken finden wir deshalb eine Verteilung des Materials in der Weise, „daß der gröbere Sand unten liegt, der feinere Sand und Schlamm obenauf.“ (*Hahmann* 1912 p.28.) „The troughs were covered with coarse-grained material. The broad, nearly flat crests had a very smooth surface of close-lying, fine-grained, clean yellow sand . . .“ (*Cornish* 1914 p.269.)

2. Die Strömung ist so stark, daß der feinere Sand suspendiert wird. Die schwereren Gerölle wandern dann langsamer als die kleineren, denen es nicht möglich ist, auf den Kämmen festen Fuß zu fassen. Das gröbere Material bildet dann die Kämme, und das feinere Material sammelt sich im Lee ('Leesande'). *Cornish* (1914 p.88) beobachtete diesen Fall im künstlichen Sandgebläse: „The large grains quickly collected on the ridges in transverse barriers, whilst the rapid accumulation of haze [Sandnebel] in the room attested the fact that the finer particles were being thrown in suspension.“ *J.Walther* (²1912 p.270) berichtet von Rippelmarken auf gepanzerten Sandfeldern, die sich durch ihre großen Dimensionen auszeichnen (Höhe im Lee 20 cm u. mehr). „Ihre Luvseite ist durch größeren Sand gepanzert und meist von dunkelgelber Farbe, die kurz abfallende Leeseite besteht aus feinkörnigerem, hellgelbem lockerem Sand. Die Zwischenräume zwischen den Rippen habe ich bis 3 m breit gesehen.“ — Die Entfernung des feineren Materials von der Luvseite kann auch bedingt sein durch eine Verminderung der Sandzufuhr. „When the supply of sand from the windward is scanty or fails altogether, the ripples grow to larger dimensions and the sand grains upon the crests are coarser.“ Dieser grobe Sand sammelt sich schließlich in einer Schicht, die den oberen Teil der Rippeln bedeckt und vollständig schützt. Diese Rippeln können dann weiterwachsen durch Vertiefung der zwischenliegenden Gräben. (Sog. 'Erosionsrippeln'. *Cornish* 1914 p.83ff.)

Der geringe 'relative Widerstand', d. h. die geringen Angriffspunkte, die die unter sich vereinigten (!) gröberen Sandkörner in solchen Fällen der Strömung bieten, soll dann ihre Ansammlung und ihre Standfestigkeit auf den Kämmen erklären. Diese Erklärung ist jedoch unzureichend für weniger extreme Fälle, bei denen der ganze Geschehensverlauf doch unzweideutig dahin zu charakterisieren ist, daß aus einer anfänglichen Mischung das gröbere Material nach und nach an die Oberfläche wandert, von der Mischung gleichsam ausgeschieden wird und auf diese Weise eine immer fester werdende Schutzdecke über dem feineren Material ausbildet. Eine solche durch Umlagerung an Ort und Stelle entstandene Schutzdecke ist begrifflich streng zu scheiden von einer solchen, die sich lediglich aus dem groben Material zusammensetzt, das der Angriffskraft des Windes standgehalten hat, während die feineren Körner ausgeblasen und fortgeweht worden sind. (Zu letzterer vgl. *Free* 1911 p.31ff., p.35.) Der Fall der Sonderung des Sandes und Geschiebes nach der Korngröße über größere Strecken hin bleibt also hier außer Betracht. Auch in Flußläufen pflegt ja an Stellen stärkerer Strömung der feinere Sand ausgewaschen, an Stellen schwächerer Strömung der gröbere Sand von feinerem überlagert zu sein. — Soweit eine Schutzdecke vom echten Typus sich gleichmäßig über glatte Flächen breitet, wie besonders in Wüsten und polaren Regionen, hat man sie auch schon längst richtig in obigem Sinne gedeutet, jedoch weniger ihre Mitwirkung bei dem Bildungs- und Bewegungsvorgang der Rippeln und Dünen beachtet. Der Vorgang der Schutzdeckenbildung, des 'Auswachsens' von Steinen, der Anreicherung des gröberen Materials an der Oberfläche läßt sich offenbar auf dieselbe Grundtendenz zurückführen, die auch für die Rippel- und Dünenbildung selbst bestimmend ist: die Tendenz zum Minimum der aufzuwendenden inneren Reibung, oder anders gefaßt: die Tendenz zum größtmöglichen Widerstand gegen scherende Deformationen. Der stabile Zustand ist erreicht, wenn die Differentialbewegungen durch eine entsprechende Verteilung der Körner auf ein Minimum reduziert sind. Wir werden sehen, wie diese Tendenz bei starker und schwacher Strömung in entgegengesetzter Weise zum Ausdruck kommt. — Die Anerkennung einer solchen Tendenz scheint gleichbedeutend zu sein mit der Übernahme des biologisch-teleologischen Prinzips des 'Selbstschutzes' gegen äußere Einwirkungen, auf anorganische Vorgänge. Wir halten dieses Übel nicht für gar so schlimm, solange man sich der biologischen Gedankengänge lediglich zur besseren Veranschaulichung bedient und die Bildersprache den physikalischen Sachverhalt nicht verdunkelt.

Nach *Owens* (1912 u. ö.) lagert sich das suspendierte Material so,

daß es den größtmöglichen Widerstand zu seiner Fortbewegung durch das Wasser bietet. Und schon *Sokolow* (1894 p.14) stellte fest: „Körner auf der Oberfläche des lockeren Sandes, der Einwirkung des Windes ausgesetzt, nehmen nach Verlauf einiger Zeit die Lage an, in welcher sie dieser Einwirkung den größten Widerstand zu leisten vermögen oder sich ihr am meisten entziehen. Ein durch starke, aber kurze Windstöße in schwingende Bewegung geratenes Korn, das durch andauernde Wirkung von gleicher Stärke endlich verrückt wurde, bewegt sich dann auch bei verminderter Windstärke fort. Dafür spricht auch der Umstand, daß, wenn die Richtung des Windes verändert, er z. B. künstlich zurückgeworfen wird, er auf die Körner eine viel stärkere Wirkung ausübt als der direkte.“ — Da nun diese feste Lagerung auf der Luvseite und den Kämmen unserer Gebilde besonders stark ausgebildet ist, ist auch hierdurch ihr Stabilitätscharakter erwiesen. Rippeln und Dünen sind also Transportkörper, die die Fortbewegung des Sandes durch den Wind vermindern. — Ein Vergleich mit der (unter gleichen Bedingungen stehenden) Wanderungsgeschwindigkeit der Transportkörper ergibt ebenfalls eine Abnahme der Sandverlagerung von der niederen zur höheren Stabilitätsform: Kleine sichelförmige Dünen bewegen sich rascher als große, diese ebenfalls noch bedeutend rascher als die großen, fast unbeweglichen Kettendünen der Wüstengebiete. (Vgl. *Sokolow* 1894 p.180ff., eingehend p.263, Lit.; p.270,274; s.a. *Free* 1911 p.58 f., p.64.) Doch können hierbei auch noch andere Faktoren eine Rolle spielen.

Die Ausbildung einer besonders dichten und fest zusammengepreßten Packung der Körnchen auf den Rippelmarken ist auch auf akustischem Wege nachzuweisen, und zwar sowohl für das durch Wasser wie das durch Wind angeordnete Material. Wird diese dichte Lagerung besonders auf frisch getrocknetem Sande von Rippeln gewaltsam (etwa durch den Fuß des Strandwanderers) zerstört, so vernimmt man ein eigenartiges Tönen. Denn die einzelnen Sandteilchen auf den Rippeln haben sich zu einem so festen Verbände zusammengeschlossen, daß bei Beanspruchung jeweils ein ganzer Sandkomplex in Schwingungen gerät bzw. zerstört wird. (*P. Dahms* 1910; zit. *Andree* II.1920. p.94ff.)

Die kinetische Energie wird also hier, entsprechend dem allgemeinen Entropiesatz, in eine niedrigere Energieform (Druck!) umgesetzt. Bläst der Wind über eine Sandfläche, so trägt der Anfangszustand den Charakter der Instabilität: lebhaftes scherendes Differentialbewegungen in den beiderseitigen Grenzzonen, hohes Sandtreiben über, Durchdringung mit Luftteilchen unter der noch unscharfen, horizon-

talen und durchlaufenden Grenzfläche. Im ausgebildeten Dünensystem dagegen liegt die sandführende Luftschicht dem Luvhange der Dünen dicht und flach auf, die oberste Sandschicht ist auffallend stark verfestigt. Nach *Sokolow* (1894 p.78f.) läßt der Fuß des Wanderers auf der Luvseite der Dünen nur eine kaum nennenswerte Spur von 1 bis 2 cm Tiefe zurück, während man in den Leehang bis über die Knie einsinken kann.

Größenklassen.

Miniaturrippeln bildeten sich bei den Schaukelversuchen dann, wenn im Augenblick der Bildung die Amplitude klein war, die alternierenden Bewegungen also rasch aufeinander folgten. Wie hier der Zeitfaktor, so ist in anderen Fällen der Raumfaktor für die absoluten Ausmaße der entsprechenden rhythmischen Gebilde maßgebend. Bei Weiträumigkeit der bedingenden Topographie entwickeln sich von vorneherein Gebilde von größeren Ausmaßen; man denke nur an die unter Gezeitenströmungen entwickelten *Riesenrippeln*, und andererseits an die *Liesegang*schen Streifen von mikroskopischer Feinheit in organischen Substraten. Die Kristallisationsvorgänge, die ja in der Wissenschaft eine ungleich stärkere Beachtung gefunden haben, liefern uns Analogien. Die gestaltende Kraft ist ja auch hier die Oberflächenspannung, nur modifiziert durch die molekulare Richtkraft. Schon *Goethe* beobachtete, daß in geräumigen Gefäßen unter sonst gleichen Bedingungen erheblich größere Kristallindividuen entstehen als in kleinen Gefäßen. — Kleinräumigkeit der Verhältnisse setzt dem Wachstum auch der rhythmischen Gebilde bestimmte Grenzen. *F. M. Exner* (Wiener Sitzgsber. 1920 p.943) wirft dieses Problem auf. „Ob nicht dort (d. h. im Freien) die Luftschwingungen nach oben durch Temperaturschichtungen und Windsprünge begrenzt werden und dadurch die Wellenlängen häufig auf ein bestimmtes Maß beschränkt bleiben können, läßt sich heute nicht beurteilen. Doch möchte ich meinen, daß die ganz großen Wüstendünen von 50 und mehr Meter Höhe und mehreren hundert Meter Länge eine sehr gleichmäßige Luftströmung bis in recht beträchtliche Höhen zur Voraussetzung haben.“ — Die Wellen wachsen also durch Übergreifen der Oszillation in höhere Schichten. „Es ist dann nicht nötig, auf die Interferenz oder auf das raschere Erlöschen kürzerer Wellen zu greifen, um das Wachstum der beobachteten Wellen zu erklären, wie dies bei den Wasserwellen mehrfach geschehen ist.“

Das Anwachsen zu Gebilden höherer Ordnung geschieht nicht, wie vielfach angenommen wird, kontinuierlich, sondern sprunghaft in der oben bereits geschilderten Weise. In den Fällen, wo Beobachtungen das Vorhandensein eines 'missing link' doch zu ergeben

scheinen, handelt es sich durchweg um ein unzulässiges Vergleichen absoluter Dimensionen von Gebilden, die unter völlig ungleichen Bedingungen, an verschiedenem Orte und zu verschiedener Zeit beobachtet waren. (Vgl. z. B. *Sven Hedin* i. *Pet. Mitt.* 1900. Erg.-H. 131; *Cornish* i. *Geogr. Journ.* 1907: „In the case of transverse dunes in deep deserts there appears to be actual continuity between ripple and dune, the latter being [on this supposition] old ripples.“) Tatsächlich findet das Wachstum der Rippeln eine von den allgemeinen Systembedingungen festgesetzte Grenze. (*King* 1916 p. 191:) „So far as I have seen, the ordinary rippling on a dune never develops much beyond 4 inches in average length, though sometimes for two or three weeks at a time in the Libyan desert the wind will blow steadily from a northerly direction — sometimes with great force.“ In einer bestimmten Phase entsteht die Düne als Gebilde höherer Ordnung ebenso spontan wie vorher die Rippel.

Besteht so für die kausal-analytische Betrachtung weitgehendste Übereinstimmung zwischen den Klein- und Großformen, so lehrt uns doch ihre Morphologie wichtige Unterschiede. Die Form der Rippelmarken ist, dank der leichten Beweglichkeit dieser Gebilde, immer von dem Winde bestimmt, der augenblicklich weht, bzw. bei Windstille von dem Winde, der zuletzt blies; sie vergehen so schnell wie sie entstanden sind, ihre Formen sind immer rein und jugendlich. Dies gilt in geringerem Maße noch für die kleineren Barchane. (*Frøe* 1911 p. 64.) In das Antlitz der Düne (d. h. hier der Reibungsdüne, insbes. der echten Wüstendüne) sind dagegen oft die Spuren längst verwehter und wechselnder Winde eingegraben, zu völliger Vernichtung und völliger Neuschöpfung kommt es nur selten, die Gestalt der Dünen ist deshalb selten eindeutig. (Vgl. *Solger* 1910 p. 171f.)

Der Barchanotypus.

Im Gegensatz zur Düne, deren Form durch das Querprofil eindeutig bestimmt ist, ist der Barchan ein dreidimensionales Gebilde, der Grundriß ist hier von derselben Bedeutung wie das Profil. Übergangsformen zwischen den beiden Typen sind gelegentlich zu beobachten, und man hat daraus — wie denn bei vielen Forschern das Denken sich nur in den ausgefahrenen Geleisen genetischer Gedankengänge zu bewegen vermag — die Annahme hergeleitet, daß sich ein Typus aus einem anderen, als 'Urtypus' hingestellten, genetisch 'entwickelte'. Die physiologische Betrachtungsweise ergibt dagegen, daß es lediglich von den — erkennbaren — Umständen und Bedingungen abhängt, welche der beiden Formen (bzw. welche Übergangsform) sich im einzelnen Fall herausbildet. Die Übergangsformen beschreibt

Cornish (1914 p.51) als „ridges with crests consisting of peaks separated by saddles“. Sie führen hinüber zu dem Typus der verwachsenen Barchane, bei denen der Fels schon an einigen Stellen bloßgelegt ist. *J. Walther* (1912 p.264) beschreibt solche aus Russisch-Turkestan: „Am Rand des [vordringenden] Sandgebietes herrschen die Einzelbarchane vor. Je mehr man aber in die innere Region der Sandwüste eindringt, desto zahlreicher werden die reihenförmig verschmolzenen Dünenkämme. Zwei, sechs, zehn Bogendünen haben sich seitlich aneinandergelegt, und nur bei ganz schräger Beleuchtung erkennt man an dem wellenförmig gebuchteten Dünenkamm die Form der einzelnen Barchane wieder.“

Die Angaben der Beobachter stimmen darin überein, daß der Dünentyp von dem Barchantyp abgelöst wird, wenn die Sanddecke nur geringe Dicke hat, oder von Sand verschiedener Beschaffenheit und Konsistenz unterlagert ist, oder gar der nackte Fels von vornherein zwischen verstreuten Sandflecken zutage tritt. Der Tendenz zur Zusammenballung, zur Bildung von rhythmisch verteilten Schutzformen wird in solchen Fällen durch langgestreckte Dünenrücken nicht mehr genügt. Dünen, zwischen denen der nackte Fels zutage tritt, stellen schon einen extremen Fall dar. So kommt es dann von vornherein zu einem 'Gerinnen' der Sanddecke zu einzelnen 'Flecken', die allmählich zu runden 'Hügeln' anwachsen. Diese Hügel nehmen dann die Bewegungsform des 'Barchans' an.

Die Unstetigkeitsfläche kann mannigfacher Natur sein. Oft wird sie nur durch den höheren Verfestigungsgrad des unterlagernden Sandes geschaffen sein. *J. Walther* (²1912 p.274) gibt weitere Fälle an: „Die Sandtennen mit ihrer ebenen Oberfläche zeigen uns eine horizontale Schichtenfuge an. Oft aber schaut auch zwischen den hohen Dünen die ebene Unterlage des Sandes hervor. Hier ist eine alte gepanzerte Sandtenne, dort eine gelbe Tonablagerung oder gar eine glatte Salzplatte, auf deren Oberkante die Wanderdünen dahinschreiten. Der Tonboden zwischen den Bogendünen der Taklamakan besteht nach *Hedin* aus einer völlig ebenen, in gleicher Höhe liegenden Staubmasse, in der die Kamele 40 cm tief einsanken.“

Den Barchanen scheint so die merkwürdige Fähigkeit innezuwohnen, allen Sand aus der Nachbarschaft an sich zu ziehen. „It is not an uncommon thing to see an isolated dune standing in the middle of a sandless plain with no ripples or dunes to be seen anywhere near it.“ (*King* 1916 p.207.) Man hat den Eindruck, als müßte jeden Augenblick der erste starke Wind die Körner wieder über die Wüste zerstreuen! — Vorbedingung für diese gesetzmäßige Zusammenziehung über größere Flächen hin ist jedoch der ungestörte Systemcharakter dieser

Flächen. *Sokolow* (1894 p.172,259f.u.264f.) hebt hervor, daß er Sicheldünen immer nur auf vollkommen glatten und kahlen Sandflächen antraf, während die teilweise mit Gras und Gebüsch bewachsenen oder größere Unebenheiten zeigenden Flächen nur Dünen von mannigfaltigem und unregelmäßigem Grundriß aufwiesen. Zur regelmäßigen Ausbildung der Barchane trägt ihre räumliche Isoliertheit bei.

„Besonders schöne Barchane sind auf dem Eise von Seen zu beobachten.“ (*H. v. Staff* 1906 p.49.) *Ötli* (1917) schildert ihre Bildungsweise: „Bei strenger Kälte war anfangs des Monats auf die feste Eisdecke trockener, staubförmiger Schnee gefallen. Zwei Tage darauf erhob sich ein heftiger Ostwind, der in die etwa zentimeterdicke Schneedecke mehr oder weniger regelmäßig verteilte Gassen fegte und schließlich nur noch zahllose in der Windrichtung bis 10 m lange, quer dazu bis 2 m breite und bis 30 cm hohe Schneewälle liegen ließ“, die späterhin Barchanform annahmen. — Das auf der Schneefläche dahinrutschende Schneepulver verdichtete sich zu Faden, Schlieren, Bächen und Strömen. — Entsprechende Beobachtungen teilt *Cornish* (1914 p.52ff.) mit: Es senkte sich eine Sandschauer nieder, „die einen 20 oder 30 Fuß hohen Nebel über der Sandbank bildete. Der frisch abgelagerte Sand sammelte sich in Flecken, und ich sah, daß sie begannen, sich so zu gestalten, als wollten sie Barchanform annehmen ... Das Profil war zuerst symmetrisch mit einer sanften Böschung vorne und hinten, aber nach einiger Zeit begann sich der Leehang zu steilen“. Ganz zuletzt traten die Hörner hervor. — Diese verschiedenen Stadien kann man auch in räumlicher Folge nacheinander antreffen, wenn man ein Barchangebiet vom 'Startrande' des Sandes her in der Richtung der Sandwanderung durchreist. (*Barclay* 1917.)

Eine wirklich 'kausale' Begründung der Bewegungsform des Barchans steht noch aus. Die bisherigen Versuche sind durchaus unbefriedigend. Beobachtung und Theorie lehren, daß wir dem Sande hier eine Tendenz zur Konzentration in runde Hügel zuschreiben dürfen. Nicht nur im unvollendeten Entwicklungsstadium, wie obige Zitate zeigen, auch sonst „ist die Sichelform des Barchangrundrisses in vielen Fällen mehr eine Schildform“. (*Cholnoky* 1902.) Die Barchanform als solche ist erst eine sekundäre Anpassung an die Wirkungsweise des wehenden Sandes, ein Zugeständnis, das die Kuppelgestalt dem Mechanismus ihrer Fortbewegung macht. Deshalb finden wir bei den weniger widerstandsfähigen Schneebarchanen diese schwächlichen Körper mit den langen vorgestreckten Hörnern, bei den Sandbarchanen zuweilen feiste, an kriechende Schildkröten erinnernde Exemplare.

Die Barchane verhalten sich in vieler Hinsicht wie lebende Wesen, welche Eigenschaft sie mit den anderen rhythmischen Phänomenen teilen. Man empfängt den Eindruck, schon im „Lückengebiet“ des Organischen und Anorganischen zu sein. — Höchst sonderbar mutet uns die Fähigkeit der Sandmassen an, sich bei einem Windüberfall wie auf stillschweigende Verabredung zu sammeln und hinter der burgartigen, unter Umständen noch durch Schutzpanzerung verstärkten Verschanzung des Barchans Schutz zu suchen. — Unheimlich geradezu wirkt die zielbewußte Unbekümmertheit ihrer Fortbewegung ähnlich der der Tanks im Kriege. Hindernisse, die ihnen in den Weg kommen, werden von ihnen gleichsam mit Haut und Haaren verschluckt und wieder ausgeschieden. Die Barchanform bewegt sich wie ein körperloser Schemen ungehindert durch sie hindurch. (Vgl. *J. Walther* 1912, p. 186.) *Barclay* (1917 p. 54) vergleicht das Verhalten der Barchane bei der Überwindung größerer Hindernisse mit der Taktik eines marschierenden Truppenkörpers: „If the barrier is negotiable they adapt themselves to cross it, the dune projecting itself into the easiest passes and elongating up to the limit of its sand-mass. Once the obstacle is crossed, the vanguard (Vorhut) of the dune marks time ('tritt auf der Stelle') until the rear (Nachhut) catches up ('aufschließt'), forms once more into a half-moon-shape and proceeds on its way.“

Die Herauslösung von kleinen Barchanen aus dem Steilhang von größeren, mehr oder weniger festliegenden Wanderdünen oder Sandanhäufungen hat Ähnlichkeit mit einem Geburtsakt. *E. Kaiser* (1923) nennt dies das „Kalben“ der Dünen. „Zunächst bilden sich einzelne Steilabstürze, die im Fortschreiten höher und höher werden, dann die charakteristischen Sicheln vorschieben, bis sich beim Vorschreiten der Sandmassen eine einzelne Wanderdüne mit hufeisenförmigem Grundriss löst und in ihrer Form weiter, aber nach Zusammensetzung und Lagerung des Sandes sich stets ändernd, über den Untergrund fort-schreitet, unbekümmert um Höhenunterschiede im Gelände.“ Liegen mehrere große Wanderdünen hintereinander, so wandern die neugeborenen Dünen „mit großer Geschwindigkeit bis zu der nächsten größeren, feststehenden Wanderdüne, mit der sie verschmelzen, ihre Masse vermehrend. Am jenseitigen Steilhang aber lösen sich neue kleine Wanderdünen heraus . . .“

Geradezu gruselig wirkt die Art, wie ein Barchan, dem man künstlich die Lebensader unterbunden hat, mit allen Anzeichen eines tödlich Verwundeten zusammensinkt und kläglich verendet, ohne auch nur die geringste materielle Spur zu hinterlassen. Um eine bedrohte Eisenbahnlinie in Peru vor den wandernden Barchanen zu schützen, zieht (*Barclay* a. a. O. p. 55) eine Schar Männer aus, „with long-handled

spades and a wheelbarrow and collect loose pebbles and grit from the surface of the Pampa. This they proceed to scatter in a thin layer over the back of the unfortunate dune. The pebbles arrest the action of the ripples and so interfere with the even circulation of the sand particles, which is apparently as essential to the progress of the dune as the circulation of blood to a human being. Very soon the dune assumes a lopsided (eingefallen) shape, sagging where the débris has been cast upon it and offering, instead of a well-rounded back, a breach (Bresche, Gasse) to the action of the wind. The process of desintegration is fairly rapid, and at the end nothing is left on the Pampa except the original wheelbarrow loads of grit and pebbles which sufficed to exorcise the monster.“ — Die Wellenglättung durch Öl hat Ähnlichkeit mit diesem Vorgange.

Die materielle Struktur der Rippeln und anderer Reibungswellen. Zusammenfassung.

Aus den einleitend erwähnten Versuchen *Candoll's* ging bereits hervor, daß die Rippel- und Dünenbildung nicht an ein bestimmtes Material gebunden ist. Wir sahen ferner, daß die materielle Struktur (d. i. die chemische und mineralogische Zusammensetzung) sogar ohne jeden Einfluß auf den Bildungsprozeß der Rippeln und Dünen ist und daß allein die mechanische Struktur (d. i. die Korngröße) von Wichtigkeit ist. Wir stellten zugleich fest, daß an den einzelnen Stellen des Vorkommens diese von auffallender Gleichförmigkeit, jene von beliebiger Heterogenität zu sein pflegt. Unsere Theorie lieferte uns eine befriedigende Erklärung dieser auffallenden Erscheinung: Wir lernten die Rippeln und Dünen auffassen als 'Reibungswellen', verursacht durch die innere Reibung in der Reibungsgrenzschicht. Der Reibungskoeffizient ist aber lediglich von unstofflichen Faktoren, wie Korngröße, Temperatur usw. abhängig. Wir sahen schließlich, daß innerhalb der dünnen Reibungsgrenzschicht die Einzelbewegungen in der Weise verlaufen, daß eine Anordnung daraus resultiert, durch die die inneren Reibungsbewegungen auf ein Minimum reduziert werden. Und zwar sind diese Verlagerungen nicht als Wirkung einmaliger Impulse, sondern als Summationseffekt minimaler Verschiebungen aufzufassen. Die bedeutenden morphologischen Auswirkungen dieser Tendenz sind erst dadurch möglich, daß die dünne Reibungsgrenzschicht zwischen zwei mehr oder weniger deformierbare Medien gebettet ist. Wir haben also hier den Fall der Selbstumbildung der 'Gestalt' mittelst der Um-

bildung der 'bedingenden Form', einen Fall, den auch die *Koehlersche* Gestalttheorie (1920 p.252f.) vorsieht: „Denkt man sich die Bedingungen derart gewählt, daß die [sog.] Form nicht absolut fest ist, sondern der Einwirkung allmählich bis zu einem gewissen Grade nachgeben kann, so wird diese Umbildung der [sog.] Form zugleich eine Selbstverwandlung der Struktur bedeuten, die sich ja gemäß der [sog.] Form lagern und also mit dieser ändern muß. Wenn es aber die Kräfte der Gestalt sind, die hierbei Arbeit leisten, z. B. Reibung oder elastischen Widerstand überwinden, so ist es auch die Gestalt, welcher die erforderliche Energie entstammt. Beginnt der Vorgang mit einem stationären (quasistationären) Zustand, in welchem die Struktur (für die ursprüngliche Form) den kleinsten möglichen Energieinhalt hatte, so muß deshalb die Verschiebung der Form und damit die Selbstumbildung der Gestalt in einer Richtung erfolgen, welche noch weiter herabgesetzter Strukturenergie entspricht.“

Nicht der Wind (bzw. das fließende Wasser), sondern die Reibungsgrenzschicht des Sandes selbst zwingt dem Sandfelde Wellenform auf. Das gleiche gilt für die Reibungswellen auf Wasserflächen. Immerhin darf hier ein wichtiger Unterschied nicht außer acht gelassen werden. Die in Druck umgesetzte Reibungsenergie der Grenzschicht wirkt auf das unterlagernde Wasser anders als auf den unterlagernden Sand: Die 'bedingende' Sandform wird durch den Druck nur oberflächlich verfestigt bzw. verschoben, die tieferen Lagen bleiben unbeweglich; die 'bedingende' Wasserform dagegen gibt dem von der Grenzschicht her eindringenden Druck 'plastisch' nach, die tieferen Lagen werden in die oberflächlichen Prozesse mit hineingezogen. Unter der 'Gestalt' der dünnen Reibungsgrenzschicht bildet sich so hier sekundär ein System mit-schwingender Wellen aus. Der Druck wird also hier sogleich wieder in Bewegung umgesetzt, und zwar in eine solche mit rückläufiger Komponente (Orbitalbewegung). Da bei dieser Bewegungsart die jeweils benachbarten Wasserteilchen ihre Lage zueinander nur sehr wenig verschieben, so bedeutet dieses (der Sandbewegung fehlende) Mitschwingen eine weitere Verminderung der scherenden Differentialbewegungen in der Reibungsgrenzzone, also eine weitere Herabsetzung der Strukturenergie. Für die alte Streitfrage: Sind Rippeln und Dünen als den Wasserwellen analoge 'Sandwellen' aufzufassen?, findet so unsere Theorie eine vermittelnde Lösung. Sehen wir von der erwähnten Verschiedenheit ab, so ist die dynamische und formhafte Übereinstimmung der Reibungswellen auf Sand und der auf Wasser immerhin eine verblüffende, und ist jedenfalls mehr als ein

„poetischer Vergleich“ (letzteres *Ivar Högbom* 1923). Gute Beobachter sahen sich schon von je zu einem Vergleiche der beiden Gebilde gedrängt. So: *J. Beete Jukes* 3.Aufl. 1872; *de Candolle* 1883; *G. Rolland* 1882; *V. Cornish* 1897 u. ö.; *Sven Hedin* 1905 u. ö.) Dasselbe gilt für den Vergleich der unter Wind und der unter Wasser gebildeten Reibungswellen auf Sand. (Vgl. z. B. *Free* 1911 p.47f.; *Lippke* i.Zs.f. Gewässerkr. 10.1911.p.263.) Da nicht die stoffliche (chemische und mineralogische) Zusammensetzung des Sandes, sondern nur seine Korngröße von Einfluß ist, finden wir als Material neben Rippeln und Dünen aus Quarzsand auch gelegentlich solche aus Tonkügelchen (*G. N. Coffey* 1909; *H. King* 1916 p.190), aus Gipskörnern (Lit. bei *Free* 1911 p.68!; ferner *Adams* i.Bull.US.Geol.Surv. Nr.223 p.104; *D. T. McDougal* i.Geogr.Journ.Febr.1912), aus Granatsand (*K. Keilhack* 1915), aus den Kalksteinsanden von Korallenküsten (*Sokolow* 1894 p.133f., 190; Lit.), Rippeln auf Salzschieben von grobkristallinischem Gefüge (*J. Walther* 1912 p.242), Dünen aus Eiskörnern (*Nansen*, zit. *Kayser* 1921.I.), schließlich die bekannten Schneedünen. „Äolische Akkumulationen von Schnee müssen unter den gleichen Gesichtspunkten betrachtet werden wie Akkumulationen von Sand; die Schneeflächen der nördlichen und der südlichen Halbkugel, d. h. die Polargegenden und die Gebiete Rußlands, Sibiriens, Kanadas und der Vereinigten Staaten Nordamerikas bilden im Winter vollständige Analoga zu den Sandflächen der Wüsten und Steppen.“ (*Tschirwinsky* 1907/08.) Die parallelen Wälle der sibirischen Schneedünen sind als Sastrugi bekannt. Bei trockenem, pulvrig-zerreibbarem Schnee zeigt die Oberfläche keine Rippung, wohl aber bei körnigem Schneesand. Bei kompaktem Schnee bilden sich nach luvwärts gerichtete ‘Erosionsrippeln’. (*V. Cornish* 1914 p.95ff., 108ff.) Im Vergleich zu den Sanddünen sind die Schneedünen flacher, wachsen schneller und bewegen sich bedeutend rascher fort. Die Schneebarchane sind sehr flach und schmal. — Bei den ‘Wolkenrippeln’ bewegt sich ein gasförmiges Medium gegen ein anderes mit fein zerteilter Flüssigkeit in Suspension. — Daß Rippelbildungen auch auf relativ fester Unterlage, z. B. auf Holz und Eisen möglich sind, wird uns das nächste Kapitel zeigen. Bemerkenswert ist, daß auch hier die scherende Beanspruchung der Oberfläche in der Grenzzone eine in etwa körnige Struktur erzeugt und daß die inneren Reibungsbewegungen dann zu den bekannten gestaltmäßigen Umlagerungen führen. —

II.

Schienenriffeln.

Obschon es sich bei den Schienenriffeln nicht eigentlich um ein geographisches Phänomen handelt, so ist doch seine Behandlung in diesem Zusammenhange durchaus gerechtfertigt. Der Wert einer vergleichenden Betrachtung, einer 'wechselseitigen Erhellung' innerhalb der naturwissenschaftlichen Disziplinen wird sich hier besonders deutlich erweisen. Einerseits wird es möglich sein, auf Grund der in technischen Fachzeitschriften mannigfach verstreuten, noch nicht zusammenfassend ausgewerteten Literatur eine theoretische Klärung dieses Phänomens herbeizuführen und seine Identität mit den geomorphologischen Erscheinungen zu zeigen, anderseits wird der theoretische Scharfsinn und die gewissenhafte Beobachtung, die vielseitigen Experimente und Messungen auch der theoretischen Erfassung der übrigen Erscheinungen zugute kommen, zumal da hier die Bedingungen für makro- und mikroskopische Beobachtung besonders günstig liegen. —

Die Riffelbildung auf Straßenbahnschienen, für das unkundige Auge nur bei geeigneter natürlicher (Mondschein!) oder künstlicher (vgl. *Wattmann* 1918 Fig.5!) Beleuchtung zu erkennen bzw. an dem „fürchterlich rasselnden Geräusch des Wagens“ zu spüren, bietet noch immer theoretische Schwierigkeiten. „Sie kommt, — man weiß nicht woher und weshalb, sie verschwindet, man weiß nicht warum! Manche Bahn leidet an ihr wie an einer chronischen Krankheit jahrelang, andere Bahnen bleiben von ihr verschont, bis sie dann plötzlich unverhofft an einer Stelle auftritt und sich rapide verbreitet (!). Man steht vor einem Rätsel. Die Riffelbildung ist die Pest im Straßenbahngeleis, deren Bazillus man bisher vergebens gesucht hat und gegen den ein Serum zu finden noch nicht gelungen ist.“ „Es gibt keine Hypothese, die nicht bereits bezüglich ihrer Ursachen aufgestellt wäre.“ (*Wattmann* 1918 p.106 u. 108.)

1. Morphologie der Riffeln.

Die Riffeln auf Straßenbahnschienen¹⁾ sind „gewöhnlich nur wenige Zentimeter lang und zumeist kaum den Bruchteil eines Millimeter tief“ (*Wattmann* p.106). Länge und Tiefe innerhalb eines

¹⁾ Auf Eisenbahnschienen oder auf gewöhnlichen Holzschienen zeigen sich entsprechende Erscheinungen. Vgl. z. B. E. A. Ziffer 1913 und Schwarz 1920.

Systems zeigen keine mathematische Regelmäßigkeit, sondern schwanken innerhalb gewisser Grenzen (cf. *Goerens* 1917 Abb.10: Riffeldiagramm). — „Die mittlere Wellenlänge der Riffeln scheint nach einer Reihe von Beobachtungen mit der mittleren Fahrtgeschwindigkeit zuzunehmen.“ (*Wichert* 1921; vgl. die Beob. v. *K. Sieber* 1911.)

„Eine wichtige Beobachtungstatsache ist das Vorhandensein einer unteren und oberen Geschwindigkeitsgrenze für Riffelbildung“ (*Wichert*). (Erstere bei den verschiedenen Bahnen bei 12 bis 15 km/st., letztere bei 15—28 km/st.)

„Riffelbildung tritt besonders stark auf solchen Strecken auf, wo gleichartige Fahrzeuge mit gleicher Geschwindigkeit verkehren, tritt dagegen zurück, wo verschiedene Fahrzeuge über das Geleis rollen oder die Geschwindigkeit der Züge stark voneinander abweicht.“ (*Schwarz* 1920.) „Offenbar wird im letzteren Fall die Riffelbildung, die etwa der eine Wagen oder Zug hervorruft, von dem anderen wieder beseitigt.“ (cf. *Märtens* 1919.)

Einen interessanten Beitrag zur Frage des formkatalysatorischen Einflusses vorhandener 'Keime' auf den Eintritt der rhythmischen Selbstdifferenzierung bei hoher Labilität des Systems bringt *Schwarz* (1920): Von zwei Bahnstrecken zeigte die eine Riffelbildung, die andere keine, obwohl keinerlei Ursachen für das verschiedene Verhalten der beiden Strecken zu ermitteln war“, also völlige Gleichheit der äußeren Bedingungen vorlag. Es gelang nun, durch Auswech'selung eines Geleisstückes die riffelfreie Strecke vollständig zu infizieren. Daß es sich nicht etwa nur um die mechanische Übertragung und Fortpflanzung elastischer Stoßwirkungen handelt, zeigt eine andere Bemerkung von *Schwarz*: „Es kommt häufig vor, daß nach einem Schienenstoß (!) zwei- bis dreimal (!) eine deutliche Abnutzung der Schienen nach Art der Riffelbildung vorhanden ist, dann aber aufhört.“ Man wird unwillkürlich an die kläglichen, nach 2 bis 3 Zuckungen ersterbenden „Mäander“ erinnert, die *F. M. Exner* in seinen Versuchen auch bei stärkster Prallwirkung erhielt. Rein mechanische Stöße klingen rasch ab und haben keine fortzeugende Kraft.

Struktur: Man findet die Riffelbildung definiert als „wellenförmigen Verschleiß der Fahrschienen“. Wie bei den übrigen Gleitphänomenen kommt es auch bei dem anscheinend ganz starren Schienenmaterial zu den von der Theorie geforderten Differentialbewegungen, zu „oberflächlichen Verzerrungen des Gefüges in der Fahrtrichtung“. Gleichzeitig mit der Herausbildung einer solchen 'Druckschichtung' geht auch die rhythmische Differenzierung vor sich. „Die Untersuchungen *Puppes* (zit. *Kayser* 1916 p.6) ließen erkennen, wie unter Bildung von Berg und

Tal auf der Fahrfläche eine Faserzerreißung und eine Verschiebung des Oberflächenmaterials unter Überschreitung der Elastizitätsgrenze stattfand.“ Eine Beanspruchung über die Fließgrenze ohne rhythmische Differenzierung wird in den Fällen vorliegen, wo die von der Theorie angenommenen Grenzbedingungen überschritten sind, ähnlich der Wasseroberfläche, die durch sehr schwachen, wie durch sehr starken Wind in gleichmäßige Strömung versetzt wird, — oder aber bei ungleichmäßiger Beanspruchung u. dergl. Nach den mikroskopischen Untersuchungen von Prof. *Oberhoffer*-Aachen (zit. *Wichert* 1921) weisen die Wellenberge eine deutliche Längsschichtung auf, während die Wellentäler dieselbe kristallinische Beschaffenheit haben wie neue Schienen. „Bei riffelfreien, dem Betrieb entnommenen Schienen zeigt sich tatsächlich diese Schichtung der ganzen Länge nach.“ Ganz entsprechend tritt die von *Goerens* (1917) beobachtete „Materialverzerrung senkrecht zur Schienenachse in der Richtung zur Rille hin“ auch bei nichtriffeligen Schienen auf. — Mit diesen „kalt erfolgten Umlagerungen des Schienenstoffes“ vergleicht *Märtens* (1919 p.121) die ganz analogen Vorgänge beim Warmpressen. Man hat dementsprechend auch versucht, zur Vermeidung der Riffelbildung die Laufflächen so hart und zähe zu machen, daß kein Überschreiten der Fließgrenze eintritt. (*Märtens* 1919. *White d'Alte Sellon* 1914.)

Die Tiefe, bis zu der das Material in Mitleidenschaft gezogen wird, ist verschieden und beträgt an der Kopfkante etwa 0,5 mm (*Goerens* 1917). Die ursprüngliche Korn-, Netz- oder Zeilenstruktur geht über in eine typische Fluidalstruktur. (Vgl. ebenda Abb.24: Kopfquerschnitt, 800 \times vergr.) Die mikroskopischen Untersuchungen zeigen, daß die Verzerrungen sich fast nur auf die Riffelberge beschränken, die Riffeltäler dagegen nahezu frei von ihnen sind. „Die harten, den Riffelbergen entsprechenden Stellen erweisen sich als linsenförmige Schichten bis 3 mm Stärke“ (*F. Märtens* 1913). „Kugeldruck und Zerreißproben ergaben im Berge erheblich höhere Festigkeit als im Tale.“ (Ders. 1919.)²⁾ Diese Ergebnisse sind um so bemerkenswerter, als die tatsächliche Abnutzung im Riffeltal größer ist als auf dem Riffelberg. *Goerens* (1917 p.999) gelangt so zu der Vermutung, „daß im Tal zwar geringerer Druck, aber stärkere Ab-

²⁾ Die Wellenscheitel besitzen nach *White d'Alte Sellon* (1914) das Aussehen von geglättetem oder kalt gewalztem Stahl und sind verhältnismäßig hart und widerstandsfähig gegen Säure. Die Wellentäler sind stumpf, zeigen eine seitliche Verdrängung, sehen angefressen aus und sind nur wenig härter als der Stahlkörper, sie stellen nur eine eingestößene bzw. eingedrückte Oberfläche dar: eine Folge der vertikalen, durch die Räder bedingten Belastung.

nutzung, also Schleifen und Gleiten des Rades auf der Schiene, auf dem Riffelberg dagegen hoher Druck, aber geringere Abnutzung, d. h. Abrollen stattfindet“. Auch *Sieber* (1917; Ders. 1907 u. 1908; Ders. 1910) gelangt durch Anstrich der Schienenfahrflächen mit farbiger Masse zu der Feststellung, „daß bei ausgeprägter Riffelbildung die Räder von Riffel zu Riffel hüpfen, also dynamische Druckänderungen in ausgedehntestem Maße vorhanden sind“. Eine interessante Parallelerscheinung bringt *Silbereisen* (1920 p.116): Die beiden Schienen eines Stumpfgeleises „waren von der Löschrube her mit einer ziemlich dicken Schicht feinsten Asche bedeckt. Diese Aschenschicht, eine wegen ihrer Feinheit sehr bildsame Decke, zeigte deutlich Riffelbildung mit etwa 20 cm Wellenlänge“. „Im auffallenden Sonnenlicht zeigten die Berge eine helle, seidige Färbung, die Täler eine dunkle.“ (Vgl. *Märtens* 1920.)

2. Theorie der Riffeln.

Trotz der theoretischen Ratlosigkeit im allgemeinen war die rhythmische Natur des Phänomens doch schon hier und da erkannt worden; es bedurfte zu dieser Erkenntnis jedenfalls nicht erst der Intuition eines *Otto Baschin* (Die Naturw.6.1918.p.521f.), der auf Grund einer zufälligen Lesefrucht auch diese Erscheinung in seine unklaren Verallgemeinerungen hineinbezog. *Sieber* (1917) begründet nach dem Vorgange „anderer Fachleute“ „das Entstehen der Riffeln dynamisch, etwa wie das Entstehen der Wellen auf dem Wasser, auf Getreidefeldern, auf den Arbeitsflächen bei rasch laufenden Werkzeugmaschinen, auf trockenem Sand durch Wind, auf dem sandigen Grund strömender Gewässer usw.“ (Ebenso *Märtens* 1919: Hinweis auf Kräuselwellen.)

Die Theorie der „Primär- oder Urriffelung“ findet heute nur noch wenige Anhänger. Nach ihr soll die Schiene den Keim zur Riffelbildung schon in sich tragen, etwa infolge Ungleichmäßigkeiten beim Walzverfahren. Diese sollen dann während des Betriebes gleichsam herausmodelliert werden. Man hat sogar allen Ernstes eine Konventionalstrafe bzw. -prämie dem Walzwerk gegenüber in Vorschlag gebracht (vgl. *Stahl & Eisen* 1913 p.1531). In der Tat wies *Petersen* (zit. *Kayser* 1916 p.6) Wellenerscheinungen auf neuen, unbefahrenen Schienen, auf gegossenen Schienen, Radkränzen u. ä. nach. Nun entwickeln sich aber die „Betriebsriffeln“, wie sich herausgestellt hat, ganz unabhängig von etwa vorhandenen „Urriffeln“ (vgl. *v. Dormus* 1916 p.258). Somit ist „die Ursache der Riffelbildung nicht in dem Gefügebau des Schienenstoffes, son-

dern in bestimmten mechanischen Vorgängen während der Abnutzung des Stoffes“ begründet. (*Märtens* 1913.) — „Die Tatsache des Wanderns der Riffeln spricht ganz entschieden dagegen, daß sich eine Riffelung schon vorgebildet im Material befindet. Der gleiche Schluß ist aus dem Umstand zu ziehen, daß Riffelbildung vielfach erst nach längerer Benutzung der Schienen beobachtet wurde, und ferner daraus, daß abgehobelte Riffeln auf anderen Stellen später wieder auftauchten und nicht an der gleichen Stelle, wo sie früher beobachtet wurden.“ (*Wattmann*, nach Referat i. Stahl & Eisen 1913 p.1529ff.) Vgl. die entsprechenden Beobachtungen an Sandrippeln und Strandspitzen!

Das Mosaik von Einzelbeobachtungen läßt sich nun dahin ordnen, daß an allen Stellen, wo es zur Riffelbildung kommt, die rollende Reibung durch die gleitende Reibung abgelöst ist, d. h. es ist durchweg die von unserer Theorie geforderte entscheidende Vorbedingung gegeben: Scherende Differentialbewegungen als Folge des gleichmäßigen Aneinandervorbeigleitens zweier Medien, ausgehend von der Gleitfläche. Diese gleitende Reibung braucht nun, wie man sich ausdrücklich klarmachen muß, durchaus nicht in gleichförmig-progressivem Sinne entsprechend der Bewegungsrichtung des Fahrzeuges, sondern kann ebensogut in der Form periodischen Hin- und Hergleitens von minimalen Ausmaßen erfolgen. Ausschlaggend bleibt immer, daß überhaupt gleitende Reibung stattfindet. Es soll nun im folgenden gezeigt werden, auf wie mannigfache Weise es zu gleitender Reibung kommen kann.

1. *v. Dormus* (1916) sieht in dem Bremsen der Fahrzeuge die primäre Ursache der Riffelbildung und stellt fest, daß die Betriebsriffelung bei den Hauptbahnen (wo die Verhältnisse einfacher liegen) an die Bremsstrecken gebunden sei. *Kayser* (1916 p.11) nennt die Bremsstrecken der Berliner Hoch- und Untergrundbahn. Nach *Wichert* (1921) tritt Riffelung auf in den „Anfahrstrecken, Bremsstrecken, Krümmungen und auf gerader Strecke überall da, wo die Fahrzeuge seitlich anlaufen“. — Der Ort der gleitenden Reibung ist nicht auf den Schienenkopf beschränkt, sondern es bilden sich auch an der Seite des Fahrkopfes innerhalb der Rille Riffeln, die mit den Kopfriffeln in Lage und Abmessungen genau übereinstimmen. (*Kaysar* 1916 p.10f). Auch hier bewährt sich die Gleittheorie.

2. Auflaufen des Spurkranzes. In manchen Fällen trat Riffelbildung erst ein, wenn „die Fahrflächen der Schienenköpfe soweit verschlissen waren, daß sie von den Rädern nicht mehr auf

einer schmalen Lauffläche, sondern mehr in der ganzen Kopfbreite berührt wurden“. (*Kayser* 1916; ebenso *Goerens* 1917.)

3. Schwingungen (Achsen-, Rad-, Schienen-, Stoßschwingungen) sind zwar nicht, wie man behauptet hat, 'Ursache' der Riffelbildung, doch kommt ihnen insofern Bedeutung zu, als ihr Auftreten indirekt gleitende Reibung zwischen Rad und Schiene zur Folge haben kann.

So kommt es bei ungleich hochliegenden Schienen infolge der dadurch hervorgerufenen Belastungs- und Reibungsunterschiede zu Achsverdrehungen. „Die Folge dieser Achsverdrehungen ist, daß das entlastete, höherliegende Rad Gleitbewegungen auf dem Schienenkopf ausführt unter Verdrehung der Radachse, durch deren Elastizität das Rad immer wieder in seine Lage zurückschwingt.“ Ähnlich liegen die Verhältnisse im Bogengeleis, wo das äußere Rad neben der drehenden eine gleitende Bewegung ausführen muß (*Kayser* 1916). Die Verteilung der Riffeln bestätigt diese Überlegungen.

Starke Schwingungen entstehen ferner unter den Schlägen der Räder an den Stoßverbindungen. — „Besonders auf schwerem, wenig nachgiebigem Oberbaue mit harter Bettung wird schütterndes Fahren bewirkt, das sich mit steigender Geschwindigkeit verstärkt und Fahrzeuge und Schienen in Schwingungen versetzt, die unstetige Beanspruchungen der Schienen zur Folge haben; das gleichmäßige Rollen der Räder hört auf, sie werden teilweise gleiten, stellenweise hüpfen.“ (*F. Märten*s 1919; auch *Sieber* 1917 empfiehlt elastische Bettung.) *Zell* (1913) empfiehlt zur Dämpfung der Schwingungen die Herstellung von „mit Schlitzten durchsetzten, in sich federnden Schienen“, die „den Schienenkopf möglichst leicht federnd, den Schienenfuß möglichst steif und tragfähig“ machen.

Das leicht verkannte Verhältnis zwischen Schwingung und Riffel wird noch deutlicher, wenn wir das *Candollesche* Rippelmarkenexperiment zum Vergleich heranziehen: Die in dem geschaukelten Bassin sich herausbildenden „stehenden Wellen“ entsprechen unseren „Schwingungen“; ihre Mitwirkung beschränkt sich auch dort auf ein Hin- und Herbewegen der Bodenschicht des Wassers; die Knotenpunkte der Wellen stehen zu der Wellenform der Rippeln in keiner räumlich-kausalen Beziehung. Der oszillatorische Charakter des Gleitprozesses ist hier wie dort ohne wesentlichen Einfluß.

Gebilde höherer Rangordnung.

„Neben der Riffelbildung kommt auch wellenförmige Abnutzung der Schienen vor. Diese hat Wellenlängen von etwa 40 bis 90 cm. Ob die Wellenlänge der entscheidende Unterschied zwischen

Riffelbildung und wellenförmiger Abnutzung ist, ist fraglich. Daß aber die wellenförmige Abnutzung nicht dasselbe wie Riffelbildung ist, geht daraus hervor, daß oft beide Abnutzungen an derselben Stelle vorkommen. [Zuweilen auch gesondert: Riffeln in den Geraden und Wellen in den Bogen.] Allerdings sind dann beide in der Regel nur schwach.“ (A. Schwarz 1920.)

Sogar eine Tendenz zum Mäandrieren scheint man den Schienen zuschreiben zu dürfen. *Kayser* (1916 p.11) weist in einer Anmerkung hin auf den „zu Schlingerbewegungen der Wagen führenden abwechselnden Seitenverschleiß der Schienen, bei der in Abständen von 3 bis 6 m einmal die rechte, dann die linke Schiene usw. vom Wagenrad seitlich ausgefräst wird (und in den so entstehenden Bögen Riffeln auf den Schienenköpfen auftreten)“.

III.

Wasserwellen.

Wir sind in den vorigen Kapiteln ausgegangen von der Einwirkung des Windes bzw. des fließenden Wassers auf flach gelagerte körnige Aggregate. Im folgenden werden wir die Einwirkung des Windes auf eine Wasserfläche ins Auge fassen. Die 'Reibungswellen', die wir bisher schon in festen und gasförmigen Medien feststellen konnten, werden wir nun auch in einem flüssigen Medium antreffen. Die flüssige Natur des Mediums bedingt jedoch gewisse Abweichungen, auf die wir bereits hingewiesen haben: Das flüssige Medium überträgt durch sein plastisches Nachgeben die Vorgänge an der Oberfläche auf die tieferen Schichten, und die Vorgänge im Bereiche der Windsee auf die in der Windrichtung liegenden Nachbargebiete. Dieser Umstand ist es denn auch, der von jeher zu einer Verwechslung dieser echten 'Reibungswellen' mit den bekannten 'Gravitationswellen' geführt hat. Die Verwechslung geht so weit, daß man vielfach von der Existenz solcher 'Reibungswellen' noch gar nichts weiß oder nichts wissen will. Forschungsgeschichtlich erklärt sich dieser auffallende Tatbestand aus der vorwiegend deduktiven Behandlung des Problems, das bisher zu ausschließlich in den Händen der mathematischen Physik lag. „Obwohl die Wellen zu den alltäglichsten Naturerscheinungen gehören, so steht doch der Fülle theoretischer Arbeiten nur eine geringe Zahl praktischer Beobachtungen und Versuche gegenüber“, erklärt *Thorade* (Ann.Hydr.48.1920.p.275). Da-

zu kommt nun noch, daß die Versuche, die angestellt wurden, mit Voraussetzungen operieren, die den normalen Verhältnissen in der freien Natur nicht entsprechen. Die Übereinstimmung der künstlich erzeugten mit den 'windgetriebenen Wellen' der freien Natur darf deshalb von vornherein in Zweifel gezogen werden. *Krümml* (II.1911.p.12) diskutiert die seit den klassischen Wellenversuchen der Gebrüder *Weber* (1825) angestellten Experimente und macht dabei die nachdenkliche Bemerkung: „Lediglich durch Erzeugung von Windwellen im kleinen auf der Oberfläche des Wasserbeckens ist keiner der vorliegenden Versuche angestellt.“ — Wir werden uns deshalb bei unserer Darstellung vorwiegend auf das (großräumige) Beobachtungsmaterial stützen, dessen wissenschaftliche Verwertung wohl von seiten der physikalischen Geographie am wenigsten vernachlässigt wurde.

Die landläufige Auffassung sieht in den natürlichen Wellen auf freien Wasserflächen das summative Zusammentreffen von Gravitationswellen, die sich von irgendwelchen lokalen 'Störungsstellen' aus in Richtung der Windbewegung selbständig in regelmäßig geformten undulatorischen Schwingungen fortpflanzen. Es wird also angenommen, daß die Einwirkung des Windes auf das Wasser stets in der Weise stattfindet, daß dieser an gewissen örtlich begrenzten Stellen und mit mehr oder weniger vertikaler Komponente auf die Wasserfläche stößt ('Stoßwellen!'), sie herabdrückt, und daß dann die Wasserfläche diese örtliche Störung ihrer Gleichgewichtslage mit der Verbreitung des Energiegefälles über ein größeres Gebiet, in der Form fortschreitender und sich im Fortschreiten verflachender Wellenzüge, beantwortet. Da die Gravitationswellen physikalisch bereits genügend bekannt und analysiert sind, so könnten die windgetriebenen Wellen auf freien Wasserflächen hiermit im Prinzip als 'erklärt' gelten, wenn nicht die Grundvoraussetzung, von der diese Theorie ausgeht, zu den stärksten Bedenken Anlaß gäbe. Die Beobachtung zeigt, daß Wellensysteme in vollkommenster und regelmäßigster Ausbildung auch dann entstehen, wenn der Wind ganz gleichförmig und horizontal über die Wasserfläche weht, wenn also von nennenswerten lokalen 'Störungszentren' überhaupt nicht die Rede sein kann. Und dies dürfte das Normale sein. Die Windstöße werden nur in Ausnahmefällen so spitz und in solcher örtlichen Beschränkung auf das Wasser auftreten, daß diese Stellen daraufhin als 'Störungsstellen' oder 'Erregungsstellen' im Sinne der Theorie gelten könnten. Die Einwirkung des Windes auf die Wasserfläche innerhalb eines mehr oder weniger ausgedehnten Bereiches kann unbedenklich als praktisch gleichförmig angesehen werden. Die windgetriebenen Wellen auf freien Wasserflächen können also nicht reine Gravitations-

wellen im Sinne der Theorie sein. Denn gerade diese Theorie schließt ja die logische Folgerung in sich, daß bei Abwesenheit von 'Störungen' der glatte, ebene Wasserspiegel erhalten bleibt. Die Schwächen dieser Theorie hat bereits *Krümmel* (II.1911.p.56) klar erkannt. Er wirft die Frage auf: „Wie kann eine kontinuierlich wirkende Kraft, wie der Wind, überhaupt auf einer vorher ruhenden Flüssigkeitsoberfläche eine rhythmisch schwingende Bewegung zur Folge haben? Warum besteht seine Einwirkung nicht einfach in einem horizontalen Fortschieben der oberflächlichen Teilchen in gleicher Richtung, wie er selbst sie innehält, also in Gestalt einer Triftströmung? Wie ist es möglich, daß eine horizontal wirkende Kraft so erhebliche vertikale Ortsveränderungen hervorrufen kann, wie die Wasserteilchen in den vorher beschriebenen Orbitalbahnen der Welle sie zeigen?“

Antwort auf diese Fragen gibt unsere Theorie der „Reibungswellen“. Reibungswellen entstehen, als Stabilitätsform, wenn sich zwei Medien gleichförmig aneinander vorbeibewegen, und zwar innerhalb bestimmter Grenzbedingungen dann, wenn die Reibungskraft an der Berührungsfäche verhältnismäßig groß ist. Diese Voraussetzungen sind hier erfüllt. Hat die Windstärke eine gewisse Größe erreicht, so bedeckt sich das ganze 'Feld', innerhalb dessen diese Bedingungen herrschen, spontan und gleichzeitig mit einem System von Reibungswellen. Das 'Feld' ist aufzufassen als eine einheitliche und in sich dynamisch zusammenhängende „physische Gestalt“ (*Wolfg. Köhler*), innerhalb deren die Grenzschicht des Wassers, mit Hilfe der Selbstdifferenzierung, einer stabilen Lagerung zustrebt. Überschreitet die Größe der Relativbewegung eine obere Grenze, wird also der reibende Kontakt zwischen den beiden Medien zerrissen, so nimmt die Grenzfläche wieder einen einförmigen und gestreckten Verlauf. *Krümmel* (II p.75) spricht die Vermutung aus, „daß bei den orkanmäßig größten Windstärken die Wellenkämme instabil gemacht, weggerissen und zuletzt so die Meeresoberfläche wieder eingeebnet wird“. Die echten Reibungswellen haben mit den Gravitationswellen nur den Namen („Wellen“) gemeinsam. Die mit der rhythmisch schwingenden Bewegung verbundenen erheblichen vertikalen Ortsveränderungen werden bei den Reibungswellen nicht von außen induziert, sondern bilden sich erst im Verlaufe des Vorganges selbst, von der Reibungsfäche ausgehend. Während das System der Gravitationswellen sich von der lokalen Erregungsstelle aus durch Fortpflanzung sukzessiv bildet, entsteht das System der Reibungswellen simultan in rhythmischer Verteilung über den Bereich des in sich einheitlichen 'Sturmfeldes' hin. Die Bewegung der Wasserteilchen empfängt hier ihre Energie an jeder einzelnen Stelle immer wieder aufs neue von dem zugehörigen Abschnitte der Reibungsfäche

her; die Reibungsgrenzschicht gebiert fortgesetzt neue Wellen-Luvflächen aus ihrem Schoße heraus und hält sie dem Winde entgegen; das Wellenprofil ist nicht undulatorisch, sondern dünenartig, die einzelnen Wellenkörper schreiten nicht über längere Strecken als Individuen fort, sondern verschwinden bald wieder, verschmelzen mit anderen, neue entstehen an ihrer Stelle in fortgesetztem, nur vom Systemganzen aus geregelten und verständlichen Wechsel. Und trotz dieser formalen „Unregelmäßigkeit“ des Wellenverlaufs im einzelnen beobachten wir doch den strengen dynamischen Zusammenschluß der Einzelwellen zu einem in sich gesetzmäßig differenzierten System. „Sobald die Brise erst im Gange und der Seegang regelmäßig geworden ist, zeigt sich die Geschwindigkeit von einer Welle zur anderen nur sehr wenig verschieden (!). In der Tat kann man nur selten auf hoher See beobachten, daß eine Welle eine andere überholt, was doch alle Augenblicke der Fall sein müßte, wenn ein auch noch so geringfügiger Unterschied in ihrer Geschwindigkeit vorhanden wäre . . . Sobald der Seegang sich nur voll entfalten kann, erzeugt dieselbe Brise fast immer auch eine und dieselbe Wellengeschwindigkeit.“ (*Páris*, zit. *Krümmel* II.p.67.) Die Entwicklung der Wellen vollzieht sich also im Sinne des von unserer Theorie geforderten einheitlich-rhythmischen Wellensystems.

Die physikalische Einheit, von der die theoretische Betrachtung auszugehen hat, ist also nicht die einzelne Welle, sondern der mehr oder weniger fest umrissene Meeresteil, der einer einheitlichen Windwirkung ausgesetzt ist. Die 'W i n d s e e' ('Sturmsee', 'Sturmfeld') ist das logisch und physikalisch Primäre, nicht die von einer lokalen 'Störungsstelle' erzeugte 'Urwelle', deren geselliges Auftreten angeblich die Wellenbewegung eines bestimmten Bezirkes in summativer Zusammensetzung hervorruft. Denn der allgemeine Vorgang, unter dem das Wachstum der Wellen zustande kommt, ist „der einfache Zustand eines konstanten und über dem ganzen betr. Meeresteil gleichzeitig wehenden Windes“ (*Graf v. Larisch-Moennich*).

Die Analyse der Wellenarten einer (unendlich groß angenommenen) Meeresfläche ergibt hiernach hinsichtlich ihrer räumlichen Ausbreitung folgendes typische Bild:

1. Das System von echten 'Reibungswellen' innerhalb eines räumlich begrenzten Sturmfeldes.
2. Die verstärkende Überlagerung dieses Systems durch die gravitationale Fortpflanzung der in den Reibungswellen aufgespeicherten lebendigen Kraft des Windes in Richtung der Windbewegung. Dieser Vorgang bedingt eine beständige Zunahme der Wellengröße von der Luv- zur Leeseite des Sturmfeldes hin.

3. Die selbsttätige Fortpflanzung des Energievorrates der Wellen über die Grenzen des Sturmfeldes hinaus, in der Form einer mit bestimmter Richtung aus dem Sturmfeld (dem Ursprungsgebiete) hinaus-eilenden sog. Dünung. Die Fortsetzung der 'windgetriebenen Wellen' bilden so (in räumlichem sowie zeitlichem Sinne) die 'wind-freien Wellen'.¹⁾

Wir gehen nun dazu über, das im vorstehenden summarisch Vorgetragene im einzelnen zu belegen.

a) Gravitationswellen.

Die Gravitationswellen sind Transversalwellen. Sie sind nicht bedingt durch elastische Kräfte, sondern durch die Schwerkraft, die nach jeder plötzlichen 'Störung' der Gleichgewichtslage den normalen, ebenen Wasserspiegel wiederherzustellen sucht. Die Höhe dieser Wellen ist am Entstehungsort jeweils am größten bei einem Minimum an Länge, wobei die Undulationen dann in ihrem weiteren Verlaufe immer flachere und langgestrecktere Formen annehmen bis zu ihrem völligen Erlöschen. „Ein ins Wasser geworfener Stein erzeugt kreisförmige, auseinanderlaufende, konzentrische Wellenringe, von denen die äußersten je die größten Talbreiten aufweisen, die mehrere Male größer sind als die der zuerst an der Störungsstelle entstandenen Wellen.“ (*Krümmel* II p.65.) „Erregen wir an der freien Oberfläche einer wirbellosen Flüssigkeit irgendeine Störung, so bleibt die Energie dieser Störung nicht ganz an der Erregungsstelle, wie es z. B. bei einer Welle, welche der Wind in einem Kornfeld erzeugt (*O. Reynolds*, *Scient. Papers* I, 198), der Fall ist; sie geht auch nicht, wie bei einer Schallerregung in der Luft, oder wie bei einer elektrischen Erregung im Äther, ganz in die benachbarten Flüssigkeitselemente über. Es besteht vielmehr zwischen den einzelnen Flüssigkeitsteilchen ein Zusammenhang, der sich weder mit einer ganz losen, noch mit einer ganz festen gegenseitigen Bindung vergleichen läßt; der Energiestrom durch irgendeine in der Flüssigkeit ruhende Fläche ist nicht gleich der Energiedichte der Wellen auf dieser Fläche multipliziert mit der Wellengeschwindigkeit; sondern während ein Teil der Erregung durch die Fläche hindurchtritt und im dahinterliegenden Raum weiterwirkt, bleibt ein anderer Teil in davorliegenden Raum zurück. Es ergibt sich also das Bild einer Welle, die immer eine andere nach sich zieht; ein einmaliger Impuls wird zu einem peri-

¹⁾ Wir vermeiden mit Absicht die üblichen Bezeichnungen „gezwungen“ und „frei“, da wir sie (vgl. die Einleitung dieses Buches!) bereits in anderem Sinne verwenden.

odischen Vorgang. Diese Erscheinung ist uns ganz vertraut im Falle der Ringwellen, die entstehen, wenn ein Stein ins Wasser geworfen wird.“ (*L. Hopf* 1910 p.48.) Der Unterschied von Einzelgeschwindigkeit und Gruppengeschwindigkeit der Wellen wird hiernach verständlich. „In deep water a group of trochoidal waves travelling freely under the action of gravity advances at half the speed of the individual waves. If we follow the motion of the first wave of the group, we shall find that it dies out, and the wave behind it has now taken the lead. If, on the other hand, we watch the last wave of the group, we shall find that another one has appeared behind it.“ (*V. Cornish* 1910 p.94; vgl. *O. Reynolds* i. *Nature* XVI.1877.p.343; *O. Krümmel* II p.95f.; v. *Larisch-Moennich* 1925 p.146.)

Sehen wir von einer gewissen Driftströmung der oberen Wasserschichten in der Windrichtung ab, so ist (wie auch bei den Reibungswellen) als 'fortschreitend' aufzufassen nur der Schwingungszustand, die sog. Phase; die einzelnen Wasserteilchen schwingen nur hin und her. Eine 'Übertragung' von Wasser von der einen Stelle nach der anderen (wie bei der sog. Translationswelle, vgl. *Krümmel* II p.23) findet nicht statt. „The wave preserves its individuality, its recognizable, though not unchanging form, its energy, partly active, partly in reserve, whilst its material substance is constantly rejected and renewed.“ (*Cornish* 1910 p.7.) Besonders deutlich zeigt sich der rein 'formale' Charakter der Gravitationswellen bei der Interferenz oder bei der Kreuzung zweier Wellensysteme. Jede einzelne Welle setzt dann, unbekümmert um die begegnenden bzw. überholenden, ihren Weg fort. „The appearance was that, again and again, a great round-topped billow formed, which did not travel, but (a furrow appearing along its summit) quickly became double-crested, the two crests then travelling away in opposite directions.“ (*Cornish* 1910 p.102.)

b) Reibungswellen.

Ein Luftstrom wehe gleichmäßig über eine glatte Wasserfläche. Die untersten Windschichten werden dann durch den ständigen Kontakt mit der Wasserfläche zunächst gleichmäßig verzögert, die obersten Wasserschichten ebenso gleichmäßig von der Luftströmung mitgezogen. In den Grenzonen der beiden Medien kommt es also zu scherenden Differentialbewegungen in Schichten parallel zur horizontalen Berührungsfläche. Die Wasser- bzw. Luftteilchen wechseln bei dieser Bewegungsart dauernd ihre Nachbarschaft, die innere Reibung erreicht so im Verlaufe dieses Vorganges immer größere Beträge. Von einer 'kritischen Grenze' ab setzt jedoch unvermittelt ein neuer Ele-

mentarvorgang ein, in dessen Folge die innere Reibung wieder ein Minimum, die äußere entsprechend ein Maximum erreicht: Die Grenzschicht des Wassers differenziert sich spontan zu einem System von Reibungswellen. — Fassen wir das Ende dieses Geschehensablaufs ins Auge, so finden wir an Stelle der scherenden Differentialbewegungen ein rhythmisch wogendes Stampfen sich verlängernder und verkürzender, sich verbreiternder und verschmälernder Wasserfäden, gemeinsam zu einer sog. Orbitalbewegung verknüpft, in einer Intensität, die mit der Entfernung von der Reibungsfläche stetig abnimmt. In der sog. 'ausgewachsenen See', mit einer der Windgeschwindigkeit angenäherten Wellengeschwindigkeit, zeigen die Wellen keine schäumenden Köpfe mehr und brechen nicht mehr vor dem Winde über, das Wellenprofil ist sanft gerundet. Bei dieser neuen Bewegungsart bleiben die Wasserteilchen immer von ihren alten Nachbarpartikeln umgeben, die Wasserteilchen, die in der Ruhelage sich nebeneinander befinden, bleiben auch im Bereiche einer Wellenbewegung stets in Berührung miteinander. Die Geringfügigkeit der (inneren) Reibung, welche diese Art der Bewegung begleitet, zeigt nach *Krümmel* (II p.3) auch die Erfahrungstatsache, „daß auf einigermaßen tiefem Wasser auch nach dem Aufhören des Sturmes die Wellenbewegung noch einige Zeit, im offenen Meer über 24 Stunden hindurch, sich erhält und nur sehr langsam zur Ruhe gelangt“.

Auf die Frage, wie eigentlich die allmähliche Zunahme der Wellendimensionen bis zur Erreichung der voll ausgebildeten großen Wogen des Meeres zustande kommt, gibt die Fachliteratur nur eine unbestimmte Antwort. 'Gravitationswellen' sind ihrer Natur nach nur Ausgleichsbewegungen zu gegebenen Anfangsstörungen, sie werden sich also nur im Sinne zunehmender Verflachung, nicht aber im Sinne zunehmender Erhöhung weiterentwickeln können. Ob die Vergrößerung der Wellen in der Weise zustande kommt, daß durch die Interferenz von Wellen ähnlicher Länge neue größere „Kombinationswellen“, besonders „Differenzwellen“, entstehen (vgl. *v. Larisch-Moennich* 1925 p.8f.), erscheint als sehr fraglich und müßte zunächst einmal beobachtungsmäßig nachgewiesen werden. Nach unserer Theorie der Reibungswellen bietet jedoch die allmähliche Herausbildung der Wellen aus der glatten, ebenen Wasserfläche, angefangen von den kleinen Kräuselungen bis hinauf zu den großen Wellen des ausgebildeten Seeganges keine prinzipiellen Schwierigkeiten. Dieses allmähliche Anwachsen der Wellendimensionen geschieht nicht kontinuierlich, sondern auf dem Wege der wiederholten spontanen Neubildung höherer Wellenkategorien, die sich einander überlagern bzw. einander ablösen. Und zwar sind „alle diese Wellenbil-

dungen im wesentlichen nach demselben Muster gebaut, nur die Dimensionen sind vergrößert“ (*Krümmel* II p.57).

Was zunächst die elementaren Kräuselungen anbetriift, so treten sie auf einer glatten Wasseroberfläche erst auf, wenn die Geschwindigkeit des Windes ein bestimmtes Maß überschritten hat. (*Krümmel* II p.60; s. a. *Cornish* 1910 p.103ff.) „Die Fältelung stellt sich stets in ganz unmeßbarer Zeit augenblicklich über der angehauchten Fläche ein und verschwindet ebenso schnell wieder beim Vorübergang des Hauches.“ Die Wellenlänge dieser Kräuselungen beträgt etwa 2 bis 3 cm, die Wellenhöhe nur wenige Millimeter; „die Kämme sind ausnahmslos schwach gebogen, und da sie oft nur das Doppelte oder Dreifache, unter Umständen auch das Fünf-, ja Zehnfache der Talbreiten (λ) erlangen, erscheint die Wasserfläche von unregelmäßig rhombischen Kräuselungen überzogen. Neben diesen elementaren Wellen treten als nächst größere solche von 6, 9 oder 12 cm Abstand auf; es folgt als dritte Kategorie eine solche mit 18—25, auch 30 cm Talbreite, und zuletzt beherrschen Windseen das Bild, indem sie je nach der Windstärke von 80 oder 100 cm auf mehrere oder viele Meter ansteigen; auch hierbei sind die Kammlängen zumeist drei- bis fünffach, selten mehrmal länger als die Talbreiten.“ (*Krümmel* II p.56f.; vgl. p.32 Fig. 9.)

Das sich so ergebende Bild erinnert an das der Sanddüensysteme: hohe Wälle, deren Rücken mit kleinen Rippeln bedeckt sind. Doch tritt bei den Wasserwellen, als Ergebnis der sich in der Windrichtung fortplanzenden Wellenenergie, noch eine übergeordnete dritte Kategorie hinzu. „At each position there is finally a definite length of wave which is the dominant wave for that locality for the actual force of wind — i. e., the class of wave which so dominates the eye, that any shorter wave there appears as a mere ripple upon its surface and any longer wave is only to be detected by the presence of a sort of heaving motion (!) which runs through the whole system of the dominant waves.“ (*Cornish* 1910 p.103.) Zu dieser langperiodischen Welle bemerkt *Cornish* weiterhin: „On small sheets of water, or near the windward shore at sea, this swell is insignificant, but as the length of fetch of the wind increases it becomes an important part of the whole disturbance.“ Diese wichtige Feststellung von *Cornish* wird neuerdings von Graf v. *Larisch-Moennich* (1925 p.113) bestätigt: „Ich habe selbst wiederholt bei langandauernden schweren Stürmen beobachtet, daß die Hauptwellen von Zeit zu Zeit gewisse Verstärkungen zu erleiden scheinen, wobei es für das aufmerksame Auge so aussieht, als ob gleichzeitig mit der Hauptwelle eine in ihren äußeren Grenzen nicht so genau abzusetzende Bewegung von größerem Ausmaß im Wasser vorhanden

ist.“ — „Irgendeine physikalische Grenze, die in den Wellen selbst läge, ist dem Wachstum der Wellen nicht gesetzt.“ „Unter außerordentlichen, vielleicht nur in langen Zwischenräumen einmal vorkommenden Umständen, können darum auch die Bedingungen für das Zustandekommen höherer Wellen gegeben sein.“ „Die Grenze liegt nur in den Windverhältnissen der irdischen Meere begründet, bei denen ein gewisses Maß und eine bestimmte Dauer der Einwirkung gewöhnlich nicht überschritten werden.“ (*v. Larisch* p.144.)

Die regelmäßigste Ausbildung zeigen auf dem Meere die untersten und die obersten Größenklassen der Wellensysteme, also einerseits die wenige Fuß langen und nicht mehr als ein Fuß hohen Wellen, anderseits die großen Ozeanwellen. „The regularity of the first is not affected by long-period veering of the wind, for they die out completely in the interval and fresh sets are formed. The regularity of the second is not visibly affected by short-period veering, being to massive. Waves of intermediate size are affected by both kinds of veering and several crossing sets are formed.“ (*Cornish* 1910 p.134.)

Da unsere 'Reibungswellen' nicht die passiven Ausläufer gegebener Anfangsstörungen sind, sondern ihre kausale Rechtfertigung erst dadurch erhalten, daß sie final einer sog. Stabilitätsform zustreben, so werden wir uns zu fragen haben, wieweit schon bei dem Wachstumsvorgange der Wellen die Richtung auf eine zu erreichende 'Stabilität' erkennbar ist. Nach *Cornish* (1910 p.103) ist das Wachstum größerer Wellen an irgendeiner Stelle begleitet vom Ausbleiben und teilweisen Erlöschen der kürzeren Wellen, welche vordem vorhanden waren. Graf *v. Larisch-Moennich* (p.12f.) beobachtete, daß „bei weiterem Fortschreiten die schwächeren und unregelmäßigen Formen immer mehr abnehmen, daß die großen Formen immer einheitlicher werden. Es tritt eine wachsende Angleichung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit an die Windgeschwindigkeit ein. Je rascher die Schwingungen der Wassermasse sich vollziehen, desto weniger wird ein Luftstrom von konstanter Geschwindigkeit es vermögen, den Wasserteilchen neue Impulse in Gestalt kleinerer Wellen zuzuführen, er wird vielmehr nur die großen, im Haupttakt fortschreitenden Schwingungen verstärken ... Theoretisch muß zum Schluß das Stadium der stationären Wogen erreicht werden, das sind Wogen, die ihre von der jeweiligen Windstärke abhängigen Maximaldimensionen erreicht haben und sich nun in unveränderter Form und mit konstanter Geschwindigkeit fortpflanzen.“ Den best ausgebildeten Seegang treffen wir im sog. Südlichen Weltmeer an. „Durch die den Breitenkreisen parallel gerichteten Bahnen der Depressionen und die geringen Änderungen der Windrichtung wird ein nur aus einer Rich-

tung laufender, wunderbar einheitlicher Seegang erzeugt.“ „Alle zusammengesetzten Formen geringerer Größe sind verschwunden, denn die gesamte Wellenmasse ist in einer gewaltigen einheitlichen Schwingung begriffen.“ „Die Wellen schließen sich zu weit ausgedehnten gleichmäßigen Kämmen zusammen, die in breit ausladender mächtiger Front fortschreiten.“ „Gegenüber dem Nordatlantischen Ozean sind daselbst die Wellenlängen verdoppelt, und die Ausdehnung der Kammlinie kann das Drei- und Vierfache betragen.“ (*v. Larisch* p.140 u.144.)

Besonders beachtenswert ist hier die Feststellung, daß auch die Grundrißgestaltung des Wellenfeldes auf dem Wege der Vereinheitlichung, Streckung und zunehmenden Ausdehnung der Kammlinien einer erhöhten Stabilität zustrebt. Doch wird das von der *Helmholtz*schen Theorie geforderte regelmäßige sog. Wellblechmuster bei der Windsee nie erreicht. „Nur wohl ausgeprägte Dünungen (!) bei voller Windstille pflegen in unabsehbarer langer geradliniger Front ausgerichtete rundliche Wellenkämme zu entfalten, die dann, den Himmel reflektierend, die Meeresoberfläche parallel gestreift, wie liniert, erscheinen lassen . . . Dieses Bild, eines der großartigsten, das der Seereisende treffen kann, ist leider sehr selten.“ (*Krümmel* II p.46.) Vielmehr wird die Grundrißgestaltung der Windsee stets eine gewisse Übereinstimmung mit dem sog. *Kreppmuster* beibehalten, das in den frühen Stadien der Wellenentwicklung besonders ausgeprägt ist. Und gerade diese frühen Stadien beanspruchen das stärkste theoretische Interesse. „Oft sind die 'Kammlängen' der Windseen nur gleich der 'Talbreite', wobei die Nachbarwellen keineswegs die geradlinige Fortsetzung liefern, vielmehr eine unregelmäßig staffelförmige Ordnung vorherrscht.“ „Die Beobachtung zeigt, daß zwar alle diese vom Wind vorwärtsbewegten Wogen von geringer Kammlänge einander parallel sind, dabei aber der einzelne Wellenkamm nur auf eine kurze Strecke hin ausgeprägt bleibt, um bald wieder zu verschwinden oder mit anderen Wellen zusammenzuzufießen, so daß er sein Dasein als Individuum verliert (!); dafür treten immer neue Wellen auf, aber nur, um rasch demselben Schicksal zu verfallen.“ (*Krümmel* II p.46 u.84.)

Auch das bei dem ausgebildeten Seegang (Südliches Weltmeer!) zu beobachtende einheitliche Zusammenschwingen der Wellen als sich fortpflanzende trochoidische Undulationen, so wie es die *Helmholtz*sche Theorie (vgl. hierzu Kap. XII,f: „Abformung“!) ohne weiteres ansetzt, scheint in den frühen Stadien der Wellenentwicklung durchaus nicht die Regel zu sein; es ist gewissermaßen ein Endergebnis, zu dem eine lange Entwicklungsreihe hinführt. (Ist jedoch die Windstärke von vornherein sehr hoch, so zeigen die Wellen auch schon bei geringen Dimensionen in dieser Hinsicht eine

auffallende Regelmäßigkeit. Vgl. *v. Larisch* p.34.) In der Tat hat es den Anschein, als würden zunächst isolierte selbständige Wellenkörper gleichzeitig (simultan), doch relativ unabhängig voneinander, nur geregelt vom Systemganzen, aus dem Schoße der Wasserfläche herausdifferenziert, so wie dies bei der Entwicklung der Sanddünen der Fall ist. Bei diesen sind es ja auch in erster Linie die Oberflächenschichten der Luvhänge, die im Rahmen des Systemganzen, doch jede getrennt für sich, eine 'stabile' Lagerung annehmen. *Páris* (cit. *Krümmel* II p.67) fand gerade die Wellenlänge als sehr variabel, während die Wellenhöhen mit der jeweiligen Stärke der Windbewegung, und deshalb auch unter sich, genau übereinzustimmen pflegen. Die Wellenlänge wechselt nach ihm zuweilen vom einfachen bis zum zweifachen bei zwei unmittelbar aufeinanderfolgenden Wellen. „Es kommt in der Natur häufig vor“, so berichtet Graf *v. Larisch-Moennich* (p.114f.), „daß zwischen zwei oder mehreren größeren Sturmwellen das Wasser nur kleinere, unregelmäßige Erhebungen zeigt, so daß kein Zusammenhang zwischen den Hauptwellen im Sinne einer einheitlichen Welle besteht und jeder dieser Wellenberge ein gesondertes Dasein zu führen scheint.“ In einem von ihm beobachteten Falle „liefen neben den Wellen zweiter Ordnung die Hauptwellenzüge mit ziemlich gleicher Höhe, aber in auffallend unregelmäßiger Reihenfolge hintereinander her . . ., so daß offenbar kein einheitlicher Zusammenhang zwischen ihnen bestand“. Der Vordergrund dieser Wellen war lang und eben und hatte mit dem charakteristischen Profil eines zwischen zwei Wellenkämmen normal verlaufenden Wellentales keine Ähnlichkeit. — Es handelt sich bei diesen Erscheinungen wohl um die extreme Ausprägung einer normalen Eigenschaft der natürlichen Wellen. — Auch das Wellenprofil weicht selbst bei den einfachen, nicht durch irgendwelche Interferenzen beeinflussten Windwellen meist sehr erheblich von der theoretisch geforderten Trochoidenkurve ab. „Lediglich das Profil der freien, jeder Windwirkung entzogenen Dünung, bei der die ganze Wassermasse in gleichmäßigen Schwingungen begriffen ist, stimmt ziemlich genau mit der Trochoide überein.“ (*v. Larisch* p.15 u.18) Bei den Windwellen ist die Wellenkurve in Berg und Tal nicht gleich; das Tal ist breiter als der Berg, und der Wellenscheitel spitzt sich ein wenig zu. Graf *v. Larisch-Moennich* fand bei den einfachen, nicht durch Interferenzen veranlaßten Sturmwellen stets beide Wellenböschungen unter der Trochoide liegen. Zugleich schien die ganze, über dem Mittelniveau liegende Wellenmasse eine gewisse Verschiebung nach vorne zu erleiden. Wie beim Profil der Sanddünen, so ist auch bei den windgetriebenen Wasserwellen der vordere, vom Winde abge-

wandte, Teil der Wellenkurve meist kürzer als der rückwärtige, und die vordere Böschung steiler als die hintere. (p.18.) Auch nimmt, wie bei den Sanddünen, die Höhe vom tiefsten Punkt des Tales bis zum Wellenscheitel nicht gleichmäßig zu. Der mittlere Böschungswinkel der Wellenberge wird im allgemeinen umso steiler, je heftiger der Wind weht. Nach den Messungen *Schotts* (zit. *Supan* 1916 p.297) schwankt er zwischen etwa 6° bei mäßigem Winde und 11° bei Sturm. Bei plötzlich und stark einsetzendem Sturme werden die Kammteile der Welle zusammengedrängt, und das Profil spitzt sich zu. In diesem Stadium wächst die Höhe der Wellen schneller als die Länge, die Wellen erscheinen dadurch verhältnismäßig kurz und steil; die Neigung, Brecher zu bilden, ist dann besonders stark. (v. *Larisch* p.34, vgl. p.37.) Doch scheint die Steilheit des Böschungswinkels mit der Dauer der Windwirkung wieder abzunehmen. *Pâris* (zit. *Krümmel* II p.67) beobachtete, daß oft die See am Beginne eines Sturmes hohler lief als an seinem Ende, während dabei die Windstärke konstant blieb. — Der höchste Punkt des vorüberziehenden Wellenberges ist oft schwer zu bestimmen. Vor allem bei hohem Seegang besteht er nicht aus einer Spitze oder scharf markierten Kante, sondern aus einer verbreiterten Fläche. (v. *Larisch* p.20.) Die Orbitalbewegung der Wasserteilchen ist nach alledem also weder rein kreisförmig noch symmetrisch.

Das Anwachsen der windgetriebenen Wellen zeigt, wie schon z. T. ausgeführt wurde, die typischen Merkmale des sog. 'dynamischen Verlaufs' zu einer Stabilitätsform hin, die dann beibehalten wird. Die Wellenentwicklung steuert gleichsam zielbewußt (final) auf das der jeweiligen Windstärke entsprechende Endstadium zu. „Die Erfahrung scheint darauf hinzuweisen, daß die Wellenhöhen mit der Zeitdauer der Windwirkung nicht einfach wachsen, sondern anfangs rasch, später immer langsamer, bis sie für jede gegebene Windgeschwindigkeit ein Maximum erlangen, das auch bei fortgesetzter Andauer derselben Windstärke nicht überschritten wird.“ (*Krümmel* II p.73.) Das Wachstum der Wellen geht also nicht anhaltend „immer weiter“, sondern es findet nach erreichter 'Stabilität' im Stadium der 'ausgewachsenen See' sein natürliches Ende. Läßt die Windstärke nach oder nimmt sie zu, so ist es in erster Linie die Wellenhöhe, welche sich ändert. Denn bei den Reibungswellen ist die Wellenhöhe ein Gradmesser für die zwischen den beiden Medien stattfindende Reibung. (Über die Abhängigkeit der Wellendimensionen vom jeweiligen Energievorrat der Wellen siehe v. *Larisch* p.56.) Die Anpassung an neue Windgeschwindigkeiten erfolgt ziemlich schnell. „A sudden increase of wind can restore the height of waves at the rate of 1 or 2 feet per minute.“

(*Cornish* 1910 p.130.) Die Wellenhöhe ist auch „von allen Wellenmaßen dasjenige, welches sich am schnellsten vermindert und abfällt, sobald die Brise aufgehört hat.“ (*Pâris*, zit. *Krümmel* II p.66).

Im Stadium der sog. ausgewachsenen See hört die unmittelbare Kraftübertragung des Windes auf die Wasserteilchen auf. Diese theoretisch höchst bedeutsame Feststellung verdanken wir Graf *v. Larisch-Moennich* (p.56 u.58ff.). „Die Abgabe der lebendigen Kraft des Windes an die Wasserteilchen findet ihre Grenze, wenn der Wind den größtmöglichen Anteil seiner Eigengeschwindigkeit auf das Wasser übertragen hat.“ Durch Auswertung von Beobachtungsdaten kommt *v. Larisch-Moennich* zu dem Ergebnis, „daß der Wind bei voller Entfaltung des Seeganges ungefähr den vierten Teil seiner Eigengeschwindigkeit dem Wasser mitteilen kann, was demnach als äußerste Grenze der Kraftübertragung gelten darf, über welche hinaus eine weitere Energiezufuhr an die Wasserteilchen nicht eintritt“. Die typischen Wellen im Herzen des Nordostpassates liefern den besten Beweis. Sie haben „bei Windstärke 5—6 (= 9—11 m) eine durchschnittliche Höhe von 2 m bei einer durchschnittlichen Länge von 30—35 m. Solche Wellen haben eine Orbitalgeschwindigkeit von rund 2,5 m/sec., also ein Viertel der Windgeschwindigkeit“. „Trotz der zu gewissen Jahreszeiten oft wochenlang ununterbrochenen Windwirkung überschreiten die Wellen nicht eine der jeweiligen Passatstärke entsprechende typische Größe.“ Hieraus folgt, daß, ebenso wie die Höhe, auch die Länge und die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen im Bereiche des Sturmfeldes bei konstantem Winde nicht dauernd weiter zunehmen (so noch *Krümmel* II p.82!), sondern daß auch sie bald einen der Windstärke entsprechenden maximalen Grenzwert erreichen, der auch bei fortgesetzter Andauer der betreffenden Windstärke nicht überschritten wird. Wellenlänge und Wellengeschwindigkeit hängen bekanntlich eng voneinander ab, so daß die eine Größe durch die andere bedingt wird. (*v. Larisch* p.52,54,p.60ff.)

Bei der Untersuchung der Beziehungen zwischen der Windstärke einerseits und der Wellenlänge und Wellengeschwindigkeit andererseits dürfen natürlich nur solche Fälle betrachtet werden, bei denen ein den jeweiligen Windverhältnissen entsprechend ausgebildeter Seegang vorliegt. So darf z. B. die Wellengeschwindigkeit nicht, wie es gern geschieht, mit einer errechneten fiktiven mittleren Windgeschwindigkeit verglichen werden. „Bei den großen Schwankungen der Windstärke in den Stürmen . . . wird der Seegang selbstredend eine Geschwindigkeit erreichen können, die größer ist als die geringen und mittleren Windgeschwindigkeiten in diesen Schwankungen, wodurch natürlich auch die

Abgabe der lebendigen Kraft beeinflußt wird.“ „Man darf daher in einem bestimmten Stadium der Wellenentwicklung ihre Fortpflanzungsgeschwindigkeit nur mit der höchsten gerade herrschenden Windgeschwindigkeit vergleichen, und diese wird dann stets größer sein als die Geschwindigkeit der Wellen.“ (v. *Larisch* p.62u.64.) Auch *V. Cornish* und *G. Schott* fanden in den von ihnen untersuchten Fällen den Wind stets schneller als die Wellen. Da sich Fortpflanzungsgeschwindigkeit und Länge der Sturmwellen gegenseitig bedingen, so entspricht also einer bestimmten Windgeschwindigkeit auch eine bestimmte maximale Wellenlänge.

Für unsere Theorie der Reibungswellen dürfen wir aus dem Vorstehenden eine interessante Folgerung ziehen: Die Energieübertragung zwischen Wind und Wasser war zu Anfang lebhaft. Die hierdurch hervorgerufenen scherenden Differentialbewegungen führten zu einem 'instabilen' Zustande. Da nun bei voll ausgebildetem Seegange eine Energieübertragung auf das Wasser nicht mehr stattfindet, ist die Grenzschicht des Wassers auch keinen scherenden Differentialbewegungen mehr ausgesetzt, der instabile Bewegungszustand hat einem stabilen Platz gemacht. Daß bei der Orbitalbewegung das einzelne Wasserteilchen ständig von den gleichen Nachbarteilchen umgeben bleibt und daß mit dieser Bewegungsform nur sehr geringe Energieverluste verbunden sind, wurde bereits ausgeführt.

c) Die Fortpflanzung der Energie in den Wellen.

Es ist zu unterscheiden zwischen der unmittelbaren Kraftübertragung des Windes auf die Wasserteilchen und der selbsttätigen Fortpflanzung des Energievorrates der Wellen. Ersteres ist der primäre, letzteres der sekundäre Vorgang. Der Wind verursacht zuerst und in gewissem Sinne überhaupt nur die Orbitalbewegung innerhalb der einzelnen Welle (v. *Larisch* p.58). Die Kraftübertragung des Windes auf die Wasserteilchen kommt primär nur in einer Steigerung der Orbitalbewegung zum Ausdruck. Die Orbitalgeschwindigkeit, d. h. also die Geschwindigkeit, mit der die Wasserteilchen ihre kreisende Bewegung ausführen, wächst mit zunehmender Wellenhöhe. — Die sekundäre, selbsttätige Fortpflanzung des Energievorrates der Welle geht schon vor sich, während der Wind noch weht; beim Nachlassen des Windes tritt sie uns als 'Dünung' entgegen. „Die Wellen verstärken sich gewissermaßen

gegenseitig, indem die in ihnen aufgespeicherte lebendige Kraft des Windes fortschreitend (!) immer größere Wassermassen in immer ausgiebigere Schwingungen versetzt.“ (*v. Larisch* p.29.) Der Energievorrat der Welle ist also „nicht nur abhängig von Stärke und Dauer der Windrichtung, sondern auch vom Seeraum oder der Ausdehnung der vom Winde bestrichenen Meeresfläche, denn die Welle pflanzt sich mit der angesammelten und beständig wachsenden Energie fort.“ (*v. Larisch* p.9.) „Therefore at a considerable distance from the windward shore the state attained by the sea during a storm does not depend only upon what the wind does there, but also upon the transmission by gravity, independently of the wind, of the longer-period components of the irregular waves which the storm has created to windward.“ (*Cornish* 1910 p.104.)

Wie wir bereits in Kap. I ausführten, reagiert also bei den Reibungswellen auf Wasser das Wasserlager plastisch auf die von der dünnen Reibungs-Grenzschicht ausgehenden Einwirkungen, und es bildet sich so unter dieser über das ganze 'Feld' ausgebreiteten Decke sekundär ein System mitschwingender Wellen aus. An den Rändern des Feldes treten diese dann als 'tote' Wellenkörper unmittelbar an die Oberfläche und treiben als schwache Dünung mit flach-runden und völlig glatten Kämmen weiter. Auf Binnenseeflächen, auf denen ein gleichmäßig wehender Wind scharf abgegrenzte Reibungswellenfelder erzeugt, läßt sich diese Erscheinung besonders gut verfolgen. (Siehe auch Abschnitt d!)

Auf den weiten Flächen des Weltmeeres dürfen wir den sog. 'Seeraum' als unendlich groß ansetzen; maßgebend für die Entwicklung der Wellen wird hier die Länge der wirksamen Windbahn. (*v. Larisch* p.29 u. 36f.) Je nachdem, ob wir uns am Anfange oder am Ende einer solchen 'Windbahn' befinden, werden wir die Wellen in einem unentwickelten oder in einem fortgeschrittenen Stadium antreffen. „Begibt man sich“, so berichtet *Krümmel* (II p.56f.), „an die Seite der Wasserfläche, wo der Wind vom Lande auf das Wasser übertritt, so bemerkt man daselbst meist dicht unter Land noch spiegelglattes Wasser und in einigem Abstände vom Strande erst jene kleinen Kräuselwellen, die oben erwähnt sind. Fährt man im Boote vor dem Winde her über die Wasserfläche, so sieht man die Wellen an Größe zunehmen; am gegenüberliegenden Ufer sind sie am größten. Ferner kann man feststellen, daß gleichzeitig die (im Grundriß) schwach gebogene Form der Wellenkämme mehr und mehr geradlinig zu werden strebt und die Länge dieser Kämme um so bedeutender wird, je näher man dem unter dem Winde gelegenen Ufer kommt.“ Die Erreichung maxi-

maler Wellengrößen wird also jeweils wesentlich mit abhängen von der Länge der wirksamen Windbahn. Eine unzureichende Länge der Windbahn wird der vollen Entwicklung der Wellen eine Grenze setzen, ohne Rücksicht auf Dauer und Stärke der Windwirkung. (Vgl. *v. Larisch* p.36—38.) — Fassen wir weniger die in der Windrichtung zunehmende Größe der Wellen als die in der Windrichtung zunehmende Regelmäßigkeit des Wellengrundrisses ins Auge, so müssen wir uns allerdings fragen, ob diese räumliche Aufeinanderfolge der Ausbildungsstadien nicht eine typische Erscheinung jeder sich entwickelnden flächenhaften Selbstdifferenzierung ist, die auch dann eintritt, wenn eine gravitationale Energieübertragung im eigentlichen Sinne nicht stattfindet. Ein Vergleich mit den Verhältnissen bei Dünen, Rippelmarken, *Liesegangschen* Ringen usw. scheint diese Überlegung zu stützen. (Vgl. Kap. XX, Schluß!)

d) Windsee und Dünung.

Die Dünung ist, wie wir schon darlegten, als Resultat der gesamten bisherigen Windimpulse auch bei Sturmsee stets in irgendeiner Form vorhanden, nur ist ihr Dasein nicht immer als solches ohne weiteres zu erkennen. „Ihre Wirksamkeit besteht darin, die in den Wellen angesammelte lebendige Kraft selbsttätig fortzupflanzen.“ Die Entwicklung der Dünungswellen aus den Windwellen heraus geschieht in der Weise, daß nur die längeren Komponenten der Windwellen zur Fortpflanzung gelangen. Die kleineren, unregelmäßigen Oberflächenwellen verschwinden, weil ihre geringere lebendige Kraft schnell aufgebraucht wird. „Auch die größeren, sekundären Wellen werden immer weniger bemerkbar, weil sie in zunehmender Weise gegenüber den schneller laufenden Hauptwellen zurückbleiben, so daß schließlich nur diese allein sich fortpflanzen.“ „Durch die Wirkung der Schwere nimmt die Höhe der sich selbst überlassenen Wellen verhältnismäßig rasch ab. Die Wellenscheitel werden flacher und breiter, das ganze Profil wird abgerundeter und der reinen Trochoide ähnlicher. Außerdem nehmen die Wellenlängen bis zu einem bestimmten Grenzwert zu, so daß die Wellenkurve immer gestreckter erscheint.“ (*v. Larisch* p.42 u. 11f.)

Die Meereswellen zerfallen nach diesem Gesichtspunkte in zwei große Kategorien: 1. in die der unmittelbaren Windwirkung ausgesetzten 'windgetriebenen Wellen' (sog. Windwellen oder gezwungene Wellen) und 2. die der unmittelbaren Windwirkung entzogenen 'windfreien Wellen' (sog. Dünung oder freie Wellen). — Flaut nach einem Sturme der Wind ab, so daß die Wellen sich selbst

überlassen sind oder doch offensichtlich zu der nun herrschenden geringen Windstärke in keiner Beziehung stehen, so geht das 'Sturmfeld' in ein 'Dünungsfeld' über. Die Größe der Dünung ist dann bestimmt durch die Dimensionen der vorausgegangenen Sturmwellen und ihre Dauer durch die weiter windwärts auf ihrer Bahn noch vorhandene angesammelte Energie. „Die Dünung kann als die Vorbotin eines herannahenden Sturmes eintreffen, wenn die Fortpflanzung des ganzen Luftwirbels langsamer ist als die Geschwindigkeit des von ihm erzeugten Seeganges.“ Endlich „werden die Dünungen in Gegenden beobachtet, in denen überhaupt kein Sturm geweht hat.“ (v. *Larisch* p.42f., 11f., 108ff.)

Die Wellenzüge der Dünung eilen, mit einer bestimmten Richtung ausgestattet, aus dem Sturmfelde hinaus. (*Krümmel* II p.90.) „Je näher wir eine Dünung an ihrem Ursprungsort antreffen, desto mehr gleicht ihre Form den gezwungenen Wellen, aus denen sie hervorgegangen ist. Je größer die von ihr zurückgelegte Entfernung wird, desto gleichmäßiger und langgestreckter wird die Bewegung.“ (v. *Larisch* p.43.)

Die weite Meeresräume durchwandernden Dünungen zeigen in der Regel Wellenlängen und Geschwindigkeiten, welche die der Sturmwellen der Ursprungsgebiete anscheinend wesentlich übertreffen. *Krümmel* (II p.94) betrachtet diese Zunahme als erwiesen und nimmt eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung dafür an. *Cornish* (1910, vgl. v. *Larisch* p.110ff.) wendet ein, daß die windfreien Wellen einer neuen Energiezufuhr ermangeln und daß deshalb auch keine Steigerung der Kraft in ihnen eintreten könne. Er vertritt vielmehr die Ansicht, daß diese längeren und schnelleren Wellen, die wir nachher in der Dünung antreffen, schon während des Sturmes als übergeordnete Wellen vorhanden sind, daß sie aber von der Sturmsee verdeckt, nicht deutlich als solche zu erkennen sind. Er sucht diese Ansicht durch den Nachweis zu stützen, daß selbst die größte von ihm beobachtete Geschwindigkeit der Dünung immer noch geringer ist als die höchste Windgeschwindigkeit, die den Beobachtungen zufolge im entsprechenden Zeitpunkt über dem kritischen Ursprungsgebiete des Seeganges herrscht hat. Diese Dünungen verdanken also ihre Entstehung kurzfristigen Windstößen (squalls and gusts), heftigen Böen usw. „There was a heavy sea and a moderate gale. At 4 p.m. a violent squall of wind, with rain, occurred, lasting about 4 minutes, which was accompanied by very big waves, and succeeded by comparatively calm water.“ (*Cornish* 1910 p.128; s.a.p.113ff.) — Die eigentlichen, das Wogenbild der Sturmsee beherrschenden 'Sturmwellen' gelangen nur während des Sturmes in

unregelmäßiger Folge als Sturzwellen (breakers) an die — nicht zu entlegene — Küste; im allgemeinen aber verflachen sie sich sehr rasch und werden unsichtbar. Für die verhältnismäßig langen und langperiodischen Dünungswellen gilt dagegen: Beim Auftreffen auf den Schelf „they are shut up or telescoped to a much greater extent than the slower ones, and they undergo in the process a correspondingly greater increase in height“ (p.96). Die Zeitintervalle ihrer Ankunft sind jedoch unverändert, so daß die ursprüngliche Länge berechnet werden kann. Nach *v. Larisch-Moennich* (p.114ff.) führt jedoch die rechnerische Ermittlung hier zu keinen gesicherten Ergebnissen, da mit der Möglichkeit gerechnet werden muß, daß zwischen den einzelnen Wellenzügen kein einheitlicher Zusammenhang besteht. Denn diese Wellenzüge können z. B. erst dadurch in Nachbarschaft zueinander gekommen sein, daß die zwischen ihnen liegenden niedrigeren Kämme unterwegs erloschen sind. Mehrere ursprünglich getrennte Wellenlängen würden so in eine neue Wellenlänge von größerer Länge zusammengefallen sein. Die Dünungswellen, die schließlich die Küste erreichen, wären hiernach als isoliert fortschreitende Gebilde zu beurteilen, deren Abstände in keiner trochoidischen Beziehung mehr zu den übrigen Wellenkomponenten stehen. —

Windsee und Dünung können einander in mannigfacher Weise räumlich überlagern. „Wenn eine rasch laufende Dünung von rückwärts in ein langsam fortschreitendes Sturmfeld mit eigenem Seegang hineinläuft, wird die Dünung sofort zur Verstärkung des Seegangs beitragen. Die kürzeren Sturmwellen werden sowohl die Berge wie die Täler der Dünung bedecken und je nach der Größe der Sturmsee wird die Dünung als solche undeutlich werden; dafür tritt eine je nach Zusammenfallen der verschiedenen Bewegungen periodische Steigerung der Wellen ein.“ Entwickeln sich die Sturmwellen rasch genug, so tritt bald eine gewisse Verschmelzung beider Bewegungen ein; es entwickelt sich dann ein sehr hoher einheitlicher Seegang. (*v. Larisch* p.146.) „Ein anderer Fall tritt ein, wenn über einem fortschreitenden Dünungsfeld ein Sturm erst entsteht.“ Ist die kreisende Bewegung der Wasserteilchen noch lebhaft, so werden die Dünungswellen unter seiner Einwirkung bald wieder alle Eigenschaften der Sturmwellen annehmen. Hat dagegen die Dünung, die vom Sturm getroffen wird, schon das flachere und langgestrecktere Profil der freien Wellen angenommen, „dann wird der Sturm auf der Oberfläche der langen Dünungswellen ein ganz selbständiges System neuer Wellen erzeugen.“ (p.147.)

e) Modifikationen der Reibung zwischen Wind und Wasserfläche.

Die Reibungswellen auf Wasser zeigen nach ihrer Entstehung, ihrer Form und ihrem ganzen Verhalten, wie gesagt, eine augenfällige Übereinstimmung mit den in den vorigen Kapiteln beschriebenen Reibungswellen auf körnigen Aggregaten. Daß wir es bei den windgetriebenen Wellen auf Wasserflächen tatsächlich mit 'Reibungswellen' zu tun haben, zeigt uns schließlich die überraschend nachweisbare Abhängigkeit des Auftretens dieser Wellen von der Stärke und der Art der zwischen den beiden Medien stattfindenden Reibung.

So haben atmosphärische Niederschläge (Hagel, Graupel, starke Regenfälle) eine wellen glättende Wirkung (*Krümmel* II p.97ff.; *Halbfass* 1923 p.146), da sie den Unterschied der beiden Medien Luft und Wasser zu sehr vermindern und die Reibungsfläche verwischen. Die Partikeln der sog. „nassen Luft“ „gleiten an der Wasserfläche leichter ab (!), sie können daran nicht so gut anhaften (!) ... , wie dies bei trockener Luft der Fall ist“. (*v. Larisch* p.36.) „Die nasse Luft kann daher auch weniger von ihrer lebendigen Kraft an das Wasser übertragen. ... Die Oberfläche der großen Wellen erscheint dann glatter, die kapillaren Kräuselungen können ganz unterdrückt sein. Der ganze Seegang zeigt etwas rundere, abgeflachtere Formen, die Neigung, Brecher zu bilden, ist im allgemeinen geringer. Diese Erscheinungen sind auch bei schwerer See und höchster Windstärke zu beobachten.“ Erstreckt sich dieser Zustand der „nassen Luft“ weit genug nach Luv hin, so sind die ganzen Wellendimensionen „geringer, als sie, ceteris paribus, bei trockener Luft wären“. — Umgekehrt ist einer der Gründe für die wellen glättende Wirkung des Öles der zu große Zähigkeitsunterschied zwischen Luft und Öl. Die Luft vermag in der Grenzschicht des Öls keine scherenden Differentialbewegungen hervorzurufen; ein Anlaß zur Entstehung von Reibungswellen ist also nicht gegeben. Nur dort, wo ein reibender Kontakt zwischen der Luft und der ruhenden Flüssigkeit stattfindet, haben wir Reibungswellen zu erwarten. Wie schon *Aristoteles* und *Benj. Franklin* treffend bemerkten (vgl. dagegen *Krümmel* II p.102), gleitet der Wind von der geölten Fläche gewissermaßen ab und streicht, entsprechend seiner horizontalen Wirkungsrichtung, die vorhandenen Wellenkämme glatt. Umgekehrt scheint bei Nebel der reibende Kontakt zwischen Luft und Wasser und mit ihm die Wellenbildung gefördert zu werden. Doch kann nach *v. Larisch-Moennich* (p. 85f.) diese Beobachtung auch auf op-

tischer Täuschung beruhen oder auf der zufälligen lokalen Eigenschaft der vorherrschenden stärksten Winde, zugleich Nebelbringer zu sein.

Der reibende Kontakt zwischen Luft und Wasser kann auch behindert werden durch störende Fremdkörper, die dem Wasser reichlich beigemischt sind, wie Schlamm, Eis, Tang, Seegras und andere feste Gegenstände. (*Krümmel* II p.97ff.) So dämpfen die beim Gefrieren des Seewassers zuerst in Masse auftretenden Eisnadeln alsbald den Seegang. „Die zu gewissen Tageszeiten während der Fahrt über Bord geworfenen Abfälle aller Art beschwichtigen die kleine Kräuselung und die Neigung der Wellen zum Überbrechen, mag es sich um Hobelspäne oder Sägespreu handeln, oder um Küchenabfälle oder um Schlacken aus der Maschine oder Ruß aus den Schornsteinen.“ — Nach *v. Larisch-Moennich* (p.34) haben ausgebreitete Schaumflächen, die von größeren Brechern erzeugt wurden, die Eigenschaft, das Profil der nachfolgenden Wellenzüge zu verflachen und ihr Überbrechen zu verhindern. Die seifige Konsistenz des Schaumes rührt von den im Meerwasser gelösten Stoffen her.

Nach unserer Theorie muß sich die wellenlättende Wirkung des Öls um so stärker bemerkbar machen, je geringer der reibende Kontakt zwischen Luft und Öl ist. Dieser wird um so geringer sein, je zäher das Öl selbst ist. In der Tat zeigt nach *Krümmel* (II p.99ff.) Erfahrung und Experiment, daß mit den zähflüssigeren tierischen Ölen eine bessere Wirkung erzielt wird als mit den mineralischen; namentlich zeigt das dünnflüssige Petroleum nur eine sehr schwache wellenstillende Wirkung. Der absolute Wert ϵ der inneren Reibung ist bei letzterem nur wenig größer als der des Wassers, bei Rapsöl dagegen steigt er schon auf das 70—100fache. Dem entsprechen die Dämpfungszeiten: „Eine Woge von 1m Länge erfordert in Wasser $3\frac{1}{2}$ Stunden, in Rapsöl nur $1\frac{3}{4}$ Minuten, um durch innere Reibung zu erlöschen.“

IV.

Strandspitzen.

Die hier gegebene Darstellung der Strandspitzen (beach cusps) folgt ganz der grundlegenden und vorbildlichen Untersuchung von *Douglas W. Johnson* (1910), die, soweit ich sehe, bisher in der Literatur überhaupt keine Beachtung gefunden hat. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind für die Theorie der rhythmischen Phänomene von außerordentlichem Werte.

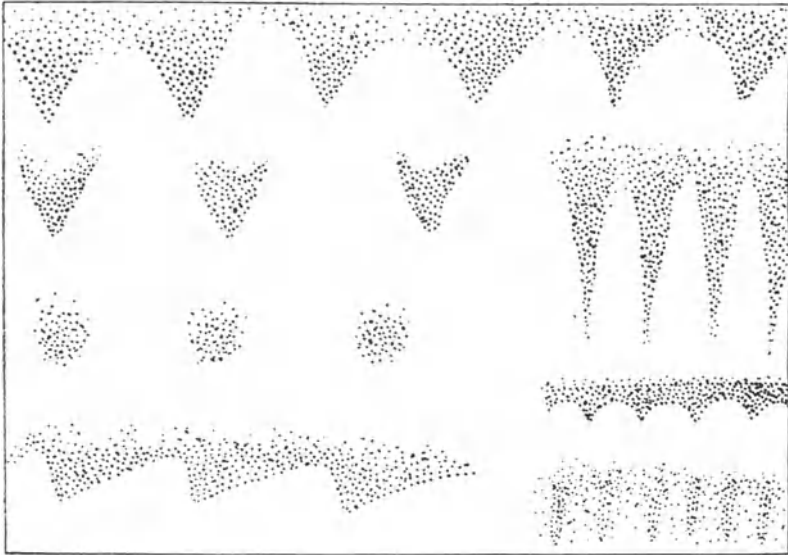
1. Versuch: „A sandy beach was constructed along one side of a tank 5 feet square and the water in the tank raised until it rested against the beach slope. To make that slope as smooth and gentle as possible, large waves were washed over the beach until it appeared to the eye as a perfectly uniform, gentle slope of sand. On the opposite side of the tank was arranged the wave-producing apparatus. . . With this . . . it was possible to propel on the beach a series of parallel, straight waves, varying in size and periodicity, as the experimenter desired.“ Das Ergebnis der Einwirkung der parallelen Wellen auf die glatte Sandböschung war nicht ein ebenso gleichmäßiger und geradliniger Strandwall, sondern ein System wohlausgebildeter Strandspitzen, das dem in der Natur angetroffenen vollkommen ähnlich sah! Ein überraschendes Ergebnis, von der Logik in keiner Weise gefordert, für das physikalische Denken eine Paradoxie, und kaum nach dem üblichen Schema mit Hilfe „minimaler Unregelmäßigkeiten“ und ihrer „Selbststeigerung“ wegzuerklären!

2. Äußere Form: Die Strandspitzen haben die Form gleichschenkliger Dreiecke. „The triangle may be short and blunt, or may be so greatly elongated that the two equal sides extend far down the beach and finally unite to form an acute point (apex). These same sides may be relatively straight, but are more often concave, sometimes convex, outward . . . Every gradation can be found from well developed triangular accumulations of sand or gravel to widely spaced heaps of cobblestones of no definite shape. The cusps may constitute the serrate seaward side of a prominent beach ridge or may occur as isolated gravel hillocks separated by fairly uniform spaces of smooth sandy beach. They may be sharply differentiated from the rest of the beach or may occur as gentle undulations of the same material of the beach proper, and so be scarcely discernible as independent features. Indeed, the variations in beach cusps are so great that their form is often not as sure a guide to their detection as is their systematic recurrence at fairly uniform intervals¹⁾. A cusp may rise from an inch or less to several feet above the general level of the beach. Many are relatively low and flat, others high and steep-sided. Sometimes

¹⁾ „In any given series the spaces vary within certain limits, but seldom fall below or rise above those limits unless the associated cusps have a noticeably abnormal feature. No theory of origin is tenable which does not recognize and account for the significant degree of regularity indicated by these figures.“ (p.610.) „Irregular and compound cusps are most characteristic of the early stages of development.“

the highest part is comparatively near the apex; at other times the highest part is far back, and from it a long, sloping ridge trails forward toward the water.“ (Vgl. Fig. 1)

Material: „In building the cusps the waves make use of everything, from the finest sand to the coarsest cobblestones. There is no necessary relation between the size of the cusp and the size of the material of which it is composed . . . The largest examples are more often built of coarse gravel or cobblestones, while small ones may be composed of either fine sand or coarse gravel. The very smallest



„Variations in the Form of Beach Cusps.“
(D. W. Johnson 1910 Figure 3.)

cusps (a few inches in length) consist of fine material only, since the smallest waves which build them can not transport coarse gravel or cobblestones. Where both coarse and fine materials occur on a beach, the cusps are built of the coarse material. Gravel cusps on a sandy beach are of common occurrence, but I have not observed sand cusps on a gravel beach.“

Größe: „The smallest cusps which have come under my observation have been those artificially produced in the laboratory. These have varied from an inch to several inches in length, measured from

apex to base. Some almost as small are to be found along the shores of sheltered ponds ... Those found along the seashore may reach a length of 30 feet or more. (It should be noted, however, that the length measured from apex to base is less significant than the distance between cusps, measured from apex to apex.)

Abstand (spacing): „On the shores of small ponds, bays, etc., where only small waves are developed, the spacing varies from less than a foot to two feet or more. On sea beaches the cusps built by small waves may be less than 10 feet apart, while those built by large storm waves may be 100 feet apart. ... The length of the intercusp spaces varies with the size of the waves.“²⁾

„If closely spaced cusps formed by small waves are attacked by larger waves, there ensues a rearrangement by which the cusps become larger and farther apart. This rearrangement may be gradual, and may be accompanied by the combining of some cusps and the slow obliteration of others; or if the new waves are very large, there may be a rapid obliteration of the earlier series of cusps, followed by the slow formation of a new series adjusted to the size of the later waves.“

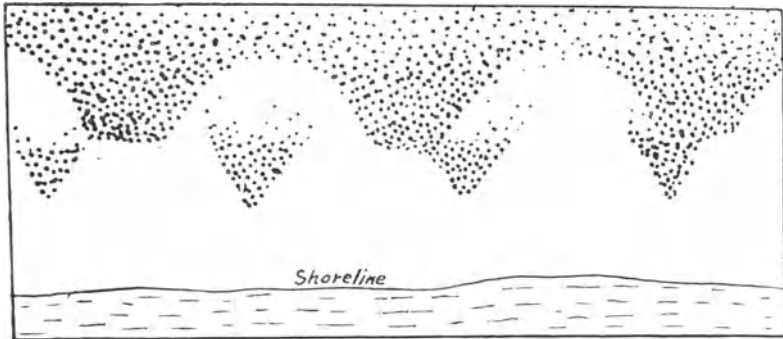
„One set of cusps seems to have little influence on the position of its successors ... Instead of the beginning of the cusp formation dating back indefinitely, there appears to be a new and quite independent beginning with every marked change in the size of waves.“

„An interesting variation in form is found where old cusps terminate abruptly in little 'cliffs' instead of in sharp points. It is plain that after the old cusps had been formed they were cliffed by waves under changed conditions and their apices cut away. From this eroded material later series of cusps may form, unrelated in position to the original series.“ (Vgl. Fig.!) Die Lage der einzelnen Spitzen steht also zur 'bedingenden Topographie' in keiner räumlich-kausalen Abhängigkeitsbeziehung, sie ist gänzlich beziehungslos zu bestimmten Raumpunkten der Strandfläche, bestimmend ist allein die

²⁾ „On both natural and artificial beaches more or less distinct ridges are sometimes broken through before any distinct cusps have been formed. This led me to entertain the hypothesis, that direct wave attack on a fairly uniform ridge would develop breaches in the ridge at intervals proportional to the size of the waves.“ (p.617.) Als Analogon läßt sich vielleicht auf die Windgräbenbildung bei Dünenwällen hinweisen. Vgl. auch die regelmäßigen Abstände vulkanischer Eruptionszentren; nach der Vermutung J. Friedländers (1918) ist ihr Abstand eine Funktion der Krustendicke.

räumliche Beziehung zu den benachbarten Spitzen, die relative Lage innerhalb des Systemganzen. Die den 'physikalischen Systemen' eigentümliche autonome Regelung ihrer Teiglieder (*Wolff. Köhler*) tritt hier deutlich in die Erscheinung. Schön geht dies auch aus folgenden Versuchen hervor:

„Opposite the cusps, but farther up the beach, pegs were driven to mark the position of the cusps. After their obliteration they formed again . . ., with the same size and spacing as before, but, as shown by the pegs, in totally new positions. The law controlling the relation of spacing to wave size was operative, but the cusps which were there a few moments before did not determine the position of their successors.“



„Partially eroded older Cusps and respaced later Series.“
(D. W. Johnson 1910 Figure 4.)

„If a series of parallel trenches be excavated in the artificial beach at right angles to the shoreline, the intercusp spaces and the cusps will not correspond with the trenches and intervening ridges which have been made to guide wave action. In fact, waves of a given size insist on forming cusps at appropriate intervals, and while their action may be influenced within certain limits by natural or artificial trenches on the beach, they refuse to be controlled by such depressions unless these are themselves appropriately spaced.“

Geht aus diesen Versuchen und Beobachtungen die völlige Unabhängigkeit und Beziehungslosigkeit der Spitzen zu Unregelmäßigkeiten irgendwelcher Art deutlich hervor, so läßt sich andererseits eine ge-

wisse 'formkatalysatorische' Wirkung minimaler 'Anfangshindernisse' beim ersten Einsetzen der rhythmischen Differenzierung nicht bestreiten. Ihre Rolle läßt sich der von 'Kondensationskernen' oder 'Keimen' bei Fällungen vergleichen. *Johnson* schildert den Vorgang sehr anschaulich: „In the laboratory experiments difficulty was often experienced in getting the cusps started. The artificial beach was very smooth, of fairly uniform sand grains. It appeared that the difficulty was due to the regularity of the beach, on account of which the initiation of channels was delayed. In order to facilitate the process a series of closely spaced creases down the beach was made, after which the cusps began to form more rapidly. As already shown, the artificial creases did not control the number or position of the cusps and their intervening spaces.“

Theorie: „Beach cusps are clearly the product of on- and off-shore movements of the water“...; „a fairly regular advance and retreat of the water is essential to their development.“ — Daß dieses abwechselnde Hin- und Zurückgleiten des Wassers über der ansteigenden Strandfläche seinerseits auf ankommende Wellen zurückgeht, ist dabei von sekundärer Bedeutung. „The periodicity of the waves does not appear to be a significant factor in beach cusp formation.“ Die von unserer Theorie geforderten Voraussetzungen für rhythmische Differenzierung sind gegeben: Infolgedes Übereinanderhingleitens der Medien Wasser und Sand kommt es in der Grenzzone zu starken scherenden Differentialbewegungen, die in der Richtung des 'Auskeilens' der Wasserschichten über dem Strande an Intensität zunehmen. Der Geschehensablauf vollzieht sich auch hier in Richtung auf ein Minimum der inneren Reibung. Das Übereinander von gleichmäßig flacher Wasserschicht und gleichmäßig flachem Sandstrand verwandelt sich in ein rhythmisches Nebeneinander der beiden Medien. „The coarse material is constantly pushed into the cusp areas, the channels swept relatively clean.“

Die wesentlichsten Bedingungen für eine ungestörte Ausbildung der rhythmischen Differenzierung dürften hier sonach bestehen 1. in dem gleichzeitigen Einsetzen und gleichmäßigen Verlauf des jedesmaligen Gleitvorganges über das ganze System hin, 2. in der gleichmäßigen Wiederholung dieses Geschehens. Die Beobachtungen *Johnsons* bestätigen dies. „On the basis of numerous observations on all kinds of beaches and of extended experimentation, it may be confidently stated that the best conditions for cusp formation exist, when a single series of waves advances parallel with the

beach ... On the other hand, the progressive destruction of cusps by oblique waves has been repeatedly observed ... Intersecting waves ... have been seen in a number of cases, but no cusps have been observed to develop under the action of such waves."

Die Bemühungen *Johnsons* um eine theoretische Aufhellung des Phänomens (er verweist z. B. auf die 'Wanderwellen' der Flüsse) hätten ohne Zweifel zu einem befriedigenden Ergebnis geführt, würde das theoretische Gebäude der Physik nicht gerade hier die bewußte Lücke aufweisen. „I have questioned a number of engineers and physicists in regard to the matter, but could learn nothing favorable to the assumption.“ Es ist tragisch zu sehen, wie *Johnson* in theoretischer Resignation doch wieder zu den „initial irregular depressions“, den immer vorhandenen „numerous inequalities“ und dem Prinzip des Wachstums durch Auslese seine Zuflucht nimmt. —

Zusammenfassung.

Es wäre zu wünschen, daß die Untersuchungen *Johnsons* aufgenommen und physikalisch weiter ausgebaut würden, da sie für die allgemeine Theorie der rhythmischen Phänomene von hervorragender Bedeutung sind. Zunächst ist der Systemcharakter des differenzierten Feldes hier besonders augenfällig. Denn die Differenzierungsglieder sind hier 'nebeneinander' angeordnet, während sie bei den Rippelmarken und den Reibungswellen auf Wasser 'nacheinander' angeordnet sind. Der Systemcharakter ist in beiden Fällen derselbe; es besteht jedoch eine tiefgewurzelte, objektiv nicht zu rechtfertigende Neigung, jedes 'Nacheinander' als zeitliche Aufeinanderfolge, als 'sukzessive' Progression aufzufassen, während man beim 'Nebeneinander' die Möglichkeit eines 'simultanen' Aufeinanderwirkens bestehen läßt. Das resultierende überaus regelmäßige Formenmuster weist sich deutlich aus als das Ergebnis eines 'gestalteten Gesamtprozesses', nicht als die bloße Summe unabhängig voneinander verlaufender Partialprozesse. Die Unabhängigkeit des Formenmusters von Anfangshindernissen läßt sich genau verfolgen. Dank der Einfachheit und Ungestörtheit der Bedingungskonstellation sowie der bequemen Anwendbarkeit der Differentialdiagnose läßt sich der Anteil der einzelnen Faktoren genau ermitteln.

Für eine Feststellung, wieweit die rhythmisch-gestaltenden Kräfte etwa auch bei der Küstenbildung im großen wirksam sind, ist bei dem derzeitigen Stande der Forschung noch nicht viel zu erhoffen. Die Großformen sind gewöhnlich zu komplexer Natur, als daß sie einer kausal-analytischen Behandlung ohne weiteres zugänglich wären, und

so werden sie wohl noch lange die unbestrittene Domäne einer mechanistischen, nur auf lokal-kausale Abhängigkeiten eingestellten Denkweise bleiben. Die Kleinformen finden als belanglose 'Kuriositäten' nur geringe Beachtung. Ihre theoretische Unaufgeklärtheit erweckt auch leicht ein gewisses Unbehagen, man übersieht sie dann geflissentlich. So wird *Johnson* (a.a.O.p.600) schon Recht haben, wenn er sagt: „Beach cusps are of common occurrence along most shores, but are of no great significance to the geologist or geographer.“ Auch an Flachufern von Flüssen und eingreifenden Meeresteilen, die einem regelmäßigen Wellenschlag ausgesetzt sind, kommt es zuweilen zur Bildung von Strandspitzen.

V.

Das Flußnetz.

Die Entstehung der Flußnetze, so wie sie uns auf der Erdoberfläche entgegentreten, ist mit Hilfe morphologischer und geologischer Geländestudien allein nur schwer zu ermitteln. Die Zahl der jeweils beteiligten Faktoren ist so groß, daß der spezifische Anteil des einzelnen Faktors sich kaum feststellen läßt. Nur selten liegen die Verhältnisse so einfach, daß der Abfluß sich auf einer gleichmäßig geneigten Tafel von gleichförmiger Gesteinsbeschaffenheit vollzieht. Und gerade diese Fälle sind die theoretisch wertvollsten, da sich bei ihnen erweisen muß, ob es zur Konzentrierung des abfließenden Niederschlags in dendritische Abflurrinnen wirklich der entscheidenden Mitwirkung irgendwelcher 'Unregelmäßigkeiten' bedarf. Diesen einfachsten Fällen ist deshalb in vorliegender Arbeit unser Interesse ausschließlich zugewandt. Eine 'physikalische Morphologie' setzt sich zur Aufgabe nur die Ermittlung elementarer Gesetzmäßigkeiten; sie wird also nur die einfachsten Fälle konkordanten Abflusses ins Auge fassen; die Erklärung der verschiedenen Fälle von Formenverzerrung und Diskordanz bleibt der mehr historisch eingestellten 'geographischen Morphologie' überlassen. (Vgl. *Philippson* II, 2. 1924. p. 164 ff. u. 186 f.) Immerhin wird die 'physikalische Morphologie' neben dem parallelen Wasserabfluß von geneigten Tafeln auch noch einige einfache formale Varianten, wie z. B. den radial-divergierenden Abfluß auf kegelförmigen Abdachungen (*Philippson* II, 2. 1924. p. 168) oder den radial-konvergierenden Abfluß auf amphitheatralischen Abdachungen experimentell und theoretisch behandeln können.

Da die psychologischen Widerstände gegen die Annahme einer freien 'Selbstdifferenzierung' der abfließenden Wassermassen sehr groß sind, die 'genetische' Theorienbildung außerdem sogar hypothetische 'minimale Hindernisse' für ausreichend hält, um mit ihrer Hilfe die Entstehung der einzelnen Flußrinnen lokal-kausal zu begründen, so kann eine unzweideutige und überzeugende Antwort nur vom Experiment erwartet werden. Nur hier lassen sich hinreichend einfache und störungsfreie Anfangsbedingungen schaffen, nur hier läßt sich der Anteil der einzelnen Faktoren durch Differentialdiagnose ermitteln, nur hier vollzieht sich der Entstehungsvorgang vor unseren Augen. Dieser naheliegende Weg wurde, soweit ich sehe, bisher nur in einer wenig bekannten Studie von *Th. A. Jaggar* (1908) beschritten. Sie zeigte, daß die Ausbildung des Flußnetzes umso vollkommener ist, je ebenflächiger und störungsfreier die benetzte und berieselte Abflußfläche zu Beginn des Vorganges ist. Diese und andere Umstände liefern also den Beweis, daß die Entstehung eines Flußnetzes durch freie 'Selbstdifferenzierung' sehr wohl möglich ist, daß die einzelne Rinne nicht lokal-kausal, sondern system-kausal bedingt ist, und daß das System sich nicht etwa 'sukzessiv' vom Hauptflusse aus (*Davis*), sondern 'simultan' in allen seinen Teilen ausbildet. Es sei jedoch nochmals hervorgehoben, daß hiermit nur ein bisher zu wenig beachteter physikalischer Vorgang festgestellt ist, daß sein Anteil an den Großformen der Natur dagegen ein weiteres Problem darstellt, das nicht generell, sondern nur von Fall zu Fall gelöst werden kann. Wir dürfen jedoch vermuten, daß die Gültigkeit des Vorganges sich nicht nur auf ganz gleichförmige Anfangsbedingungen, wie wir sie im Experiment ansetzen, beschränkt, sondern daß er auch hineinreicht in die Fälle, wo bereits das Relief der Oberfläche oder die Gesteinsstruktur und -textur den Flußrinnen die Wege weist.

Der Vorgang des Wasserabflusses auf geneigten Flächen vollzieht sich in der Natur gewöhnlich auf zwei einander entsprechenden Wegen:

1. durch oberflächliches Abfließen; die entstehende Reliefbildung ist in diesem Falle bedingt durch das Übereinanderhingeleiten zweier Medien.

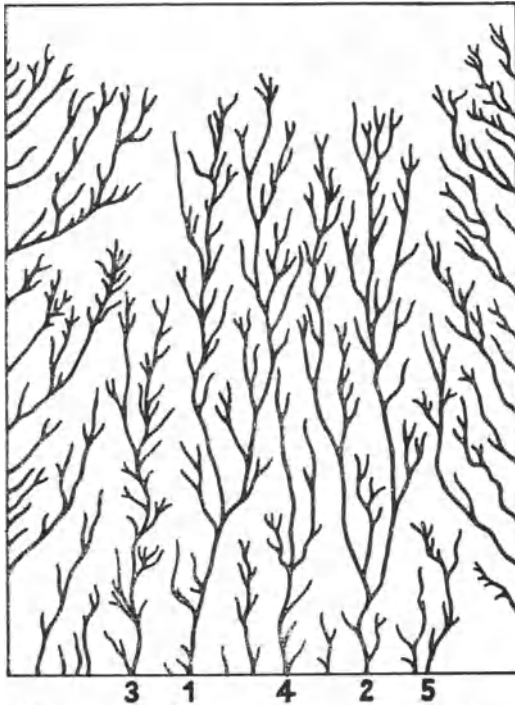
2. auf dem Wege unterirdischer Sickerströmung, der Ausbildung von Untergrund-Entwässerungsbereichen. Im Schutt der Berghänge bewegen sich Wassermassen langsam als 'Gehängestrom', in den Niederungen als 'Auestrom'. In solchen Fällen haben wir es mit einer Diffusion von Wasser in den Oberflächenschichten zu tun. Besonders auf undurchlässigen Schichten bilden sich derartige Entwässe-

run gssysteme aus. Unmittelbar reliefbildend tritt sie als 'Grundwasserfurchung' in die Erscheinung.

Um über die erste Anlage der Ursprungsmulden ('initial catchment basins') und das erste Verhalten von wasserführenden Schichten Klarheit zu gewinnen, stellte *Th. A. Jaggar* (1908) folgende Versuche an:

a) Bespritzung mit feinem Zerstäuber.

Eine geneigte Fläche wurde mit Pochschlamm von einer Stampfmühle völlig gleichmäßig überdeckt. Nach 2 Stunden (auf maschinellem



„Slime model. First stage. Sprayed with atomizers“

(*Th. A. Jaggar* 1908 p. 294, Fig. 2.)

Wege erfolgte) Bestäubung hatte sich das vorstehend abgebildete Muster herausgebildet. Einsickerung fand dabei nicht statt; „the eroding waters were all supplied from the surface“. — Also trotz

der völligen Einfachheit und Homogenität der Anfangsbedingungen, trotz der völlig gleichmäßigen Benetzung aller einzelnen Punkte der Oberfläche während des ganzen Verlaufs, ging der Wasserabfluß nicht gleichmäßig vonstatten, sondern als Folge des Gleitens bildete sich, ausgehend von der Berührungsfläche der beiden Medien, durch rhythmische Selbstdifferenzierung spontan ein System von 'Flußsystemen' heraus. Das System macht durchaus den Eindruck streng-rhythmischer Gesetzmäßigkeit, die Lage jeder einzelnen Ader ist eindeutig bestimmt durch ihre Beziehung zu den benachbarten Adern, sie bildet einen notwendigen, organischen Bestandteil des ganzen Systems, die Tilgung oder Verlegung einer einzigen Ader würde sogleich das rhythmische Gesamtbild empfindlich stören. Die Nebenflüsse verlaufen annähernd parallel untereinander und bilden einen spitzen Winkel zum Hauptfluß. Das Gesamtsystem weist den Teilsystemen ihre „Einflußsphären“ zu, läßt sie sich gegenseitig „ausrichten“. Die „Bereiche“ eines jeden Laufes „are not topographical elevations in any sense; they are the boundaries of what might be called the 'sphere of influence' of any stream“. Die Grenzen des Systems, also hier die Seitenkanten, „may be considered to have propagated across the plate the rhythmic arrangement observed. Shadowing 3 and 5, they left space for 1 and 2; 4, however, in the middle, was overshadowed by unequal competition with its two rivals.“¹⁾

b) Sickerversuche.

Jaggar ließ von einem Wassergraben, am oberen Ende einer geeigneten homogenen Sandschicht aus, durch die letztere hindurch Wasser sickern (p. 287). „Das absickernde Wasser sammelte sich in zwei Hauptrillen, die von dem Augenblicke ihrer Entstehung an mäandrierten und nie irgendeine Neigung zeigten, Nebenflüsse zu entwickeln.“ Stellte man jedoch abwechselnde Lagen von Marmorstaub, Ton und Sand her, so schnitten die Hauptrillen nach und nach wasserführende Schichten an, wobei die daraufhin einsetzenden Bewegungen zur Unterminierung der auflagernden Schichten an rhythmisch verteilten Stellen und so zur Bildung von Seitenadern führten.

¹⁾ Die Versuche sind ein getreues Abbild der natürlichen Verhältnisse: Die Flüsse eines einzelnen „Systems“ divergieren symmetrisch „nach Art eines nach oben sich allseitig verästelnden Baumes. Das Stromsystem wird also nach der Mündung zu in der Regel schmaler, und hier schieben sich zwischen benachbarten Systemen kleinere selbständige ein“. (Philippson II, 2. 1924. p. 85.)

c) Rieselversuche.

Das schönste Muster mit baumförmiger Verästelung erhielt *Jaggar*, als er eine mit flüssigem Modellierton bedeckte Fläche unter 45° aufrichtete. „The greater part of the clay ran off . . . A portion, however, clung to the glass, settled, and its water tended to separate and run down the slope in drops, making clear spaces along the streams and leaving the divides opaque.“ — Schöne Rieselfiguren, die nur nie beachtet werden, entstehen unter geeigneten Bedingungen z. B. an den Wänden von Glasgefäßen, wenn der Rückstand Honig, Buttermilch, (verdickter) Kaffeesatz oder dergl. war. Die Flüssigkeit sondert sich dann aus den festen Bestandteilen heraus und bildet dabei dendritische oder rillenartige Muster.

Bei dem *Jaggarschen* Versuche setzte die außerordentlich zarte Verästelung etwa 2 inches vom oberen Rande ein. Die rhythmische Differenzierung braucht also zu ihrer Herausbildung auch hier einen gewissen 'Startraum' (Anlaufveld). In der Natur strömt das Regenwasser gleichfalls zunächst eine Strecke weit schichtweise und laminar, wie man am Aussehen der Farbbänder, bei schlammführendem Wasser am Aussehen der Oberfläche erkennen kann. Erst wenn sich das Regenwasser in Rinnen oder Furchen zu größeren Tiefen vereint, hört das Gleiten auf. (*Schoklitsch* 1920 p.903.) So findet oberhalb der Region der Zerschluchtung eines Abhanges durch die Abspülungsfäden (rills) nur Transport, nicht aber Einschneiden statt. (*N. M. Fenneman* 1908.)

Der formbestimmende Einfluß der Untergrundentwässerung auf den Rhythmus der Oberflächenentwässerung, der sich z. B. in den über das Gebiet verteilten Quellen plötzlich und stark äußert, darf nicht zu hoch veranschlagt werden. Die Untersuchungen von *O. Lehmann* (Über Fluß- und Bachursprünge. Mitt.Geogr.Ges.Wien 1918) ergaben eine weitgehende Unabhängigkeit der Quellen vom Flußsystem. „Sie können nämlich entweder an einer Stelle den Quellbach verstärken, wo er auch in den trockensten Jahren schon von oben her Wasser führt, oder sie liegen gerade in einem Tälchen, dessen Bach als Hauptquellbach nicht in Betracht kommt.“ „Die meisten Flüsse der Rückengebirge des gemäßigt-feuchten Klimas entstehen aus mehreren gleichwertigen Quelladern. Diese wiederum gehen, auch wenn ein Hauptquellbach ausgeschieden werden kann, in fast allen Fällen aus zeitweise trockenen Ursprungsgräben hervor, deren oberste Wasserführung in regenarmen Zeiten talabwärts wandert“ (p. 142). Ein Fluß 'entspringt' also in der Regel nicht irgendwo, sondern er 'entspinnt sich' in mehreren 'Gerinnen'. (Vgl. *Jasmund* 1911 p.147; *G. Götzinger* in *Pet.Mitt.*1920 p.25f.) „In

der Regel verästelt sich der Fluß aufwärts in eine große Zahl von gleichwertigen Rinnsalen, die sich nach oben allmählich verlieren. Es ist daher besser, im allgemeinen vom Flußursprung zu sprechen.“ (*Philippson* II, 2. 1924 p. 83.) Die Seltenheit und Unbeständigkeit fester Quellen gilt besonders für Gebiete mit schuttreicher und ziemlich wasserdichter Bodendecke.

Nach dem von *Philippson* (II, 2. 1924. p. 127 ff.) entwickelten 'Gesetz des Endgefälles' ist der Form des Wasserabflusses an jeder einzelnen Stelle eine entsprechende Steilheit des Geländes gesetzmäßig zugeordnet. Die Gesamtheit der lokalen 'Terminanten' ergibt dann bestimmte Reliefformen. Die horizontale Differenzierung verbindet sich so mit einer vertikalen Differenzierung des Geländes. Die geneigte Fläche des Ursprungsgebietes löst sich auf in eine Reihe steiler 'Ursprungstrichter' oder runderlicher, flachgeneigter 'Ursprungsmulden'. (*Philippson* II, 2. 1924. p. 152 ff.) Sie bilden nicht nur den 'Talschluß' größerer Flüsse und Bäche, sondern finden sich sehr oft, zu mehreren reihenweise nebeneinander, an steilen Talflanken als Anfänge kleiner Nebentäler. (Vgl. *Philippson* a. a. O. Fig. 129.) „An der Wasserscheide selbst ist kein in Rinnen fließendes Wasser vorhanden, daher auch keine Tiefenerosion.“ Es herrscht hier das Endgefälle der Flächenabspülung. Die sich anschließende, von Flächenabspülung noch stark unterstützte, Zone der kleinen unbeständigen Wasseradern hat bereits ein weniger steiles Endgefälle. Da die Wasseradern bündelweise zu einem tief gelegenen Punkte konvergieren, ergeben die Terminanten jedes Bündels zusammen eine Trichter- oder Muldenform. — Die Tiefe des Konvergenzpunktes richtet sich nach der Energie der von hier an abwärts stattfindenden rückschreitenden 'Tiefenerosion'. Für diese Zone der größeren und dauernden Bach- und Flußadern ist dann eine gestreckte und scharf furchenartige Zerschneidung des Geländes charakteristisch. Das Gefälle nimmt, nach dem Gesetze der Terminante, unterhalb des Konvergenzpunktes weiterhin stetig ab. — Die unter dem Namen 'Dellen' bekannten, sehr flachen Mulden und Tälchen der Ursprungsgebiete gehorchen den gleichen Gesetzen. (*Philippson* a. a. O.; s. a. Kap. „Formenschatz“!)

Die Versuche *Jaggars* beruhen auf der Überzeugung, „that the extraordinary similarity of the rill pattern to the mapped pattern of rivers is due to government in both cases by similar laws“. „River, creek, brook, rill, spring and underground water cooperate in an orderly system of land sculpturing related to structure.“ — Der rhythmische Gestaltcharakter des Flußsystems ist von *Jaggar* bereits richtig erkannt, auch die Unmöglichkeit

einer befriedigenden Erklärung des Vorganges mit Hilfe der bekannten mechanischen Gesetze. „Like the many processes of mottling, rippling, wave-motion, and bilateral, concentric, and radial symmetry in nature, the development of digitate drainage is a simple group of rhythms in its ideal form, but probably never occurs simply in natural examples.“ — Der Begriff des ‘Rhythmus’ ist in der geographischen Literatur auch sonst vereinzelt anzutreffen, z. B. bei *de Martonne* (zit. *Sölch* 1914 p. 183): „Die Bildung des anfänglichen Flußnetzes ist unabhängig von den Einzelheiten der Dislokationen in der Tiefe, sie gehorcht nur ihrem allgemeinen Rhythmus.“

Grenzbedingungen.

Auch für das Auftreten des Flußnetz-Rhythmus ist eine untere und obere Geschwindigkeitsgrenze maßgebend. Je näher der Grenzzone, um so mehr gehen die Verästelungsformen verloren und machen gestreckten, parallelen Rillen (oder auch anderen Bewegungsformen) Platz. Bei sehr steiler Neigung der Abdachung bildet sich ein System paralleler Rinnen aus, die kaum miteinander verschmelzen. Zu ihnen gehören die Regenrisse, Rillen, Racheln, Runsen, die Barrancos auf Aschenkegeln, die parallelen Schmelzrinnen auf Gletscherzungen. Auf weniger geneigten Flächen kommt es sehr bald zur Vereinigung benachbarter und zur Herausbildung einzelner besonders tiefer Furchen, also zur Ausbildung von Flußsystemen. Den parallelen Rinnen an steilen Hängen entspricht das Parallellaufen bei sehr schwacher Neigung, also im Mündungsgebiet der Flachlandsflüsse, bzw. die sog. ‘Verschleppung’ der Einmündungsstelle von Nebenflüssen, eine Erscheinung, die ihre Begründung nicht nur in einer (doch sehr merkwürdigen!) Passivität des Flusses dem Geschiebe gegenüber, als in einem Absterben des Flußnetz-Rhythmus findet. Die Tendenz zur Vereinigung der Rinnen vermag auch hier gegen den Einfluß der Hauptgefällsrichtung nicht aufzukommen. Bei weiterer Senkung des Neigungswinkels geht auch die rinnenhafte Form des Abflusses verloren. „Sind durch die lineare Erosion“, sagt *E. Obst* (1913 p. 181), „die Talflächen so weit zurückgetreten und so flach gebösch, daß das aufprallende Regenwasser nicht mehr genügendes Gefälle vorfindet, um tiefe Wasserrisse zu erzeugen, so fließt das Regenwasser nicht mehr linear, sondern flächenhaft ab.“ (Zum vorstehenden vgl. Kap. ‘Formenschatz’: ‘Übergänge’!)

Die Geschwindigkeit des Abflußvorganges hängt neben der Steilheit des Gehänges auch von der Intensität des Regenfalles ab.

Heftige Regengüsse haben Flächenspülung, gleichmäßigen Abtrag zur Folge, schwächere Regenfälle „vermögen die . . . Hänge mit Tausenden von tiefen Rillen und Runsen zu überziehen“. (*E. Obst* II. 1923. p. 24.)

Überhaupt spielen klimatische Faktoren für die Form, in der sich der Abflußvorgang vollzieht, eine wesentliche Rolle. „Für die Wirksamkeit der Abspülung ist nicht so sehr die jährliche Regenmenge als ihre jahreszeitliche Verteilung und Regendichte maßgebend, so daß unter verschiedenen klimatischen Bedingungen im selben Gestein verschiedene Formen herrschend werden. Während im Flysch der Nordalpen Kriech- und Rutschvorgänge herrschen, entstehen im gleichen Gestein der Mittelmeergebiete stets neue, vielverzweigte Regenrisse, die sog. *Racheln*.“ (*Machatschek* III. 1919. p. 31.) „Jugendliche Zerschneidung in tonigen Gesteinen, die durch Benetzung weich werden, bei Besonnung rasch trocken und undurchlässig sind, führt zu außerordentlich feiner, fiederförmiger Anlage des Gewässernetzes, wie sie für die sog. 'Bad Lands' bezeichnend ist.“ (*Davis-Braun*, 2. Aufl. 1917. p. 127f.) „In einem gleichmäßig feuchten Klima mit geschlossener Pflanzendecke kommt es nur wenig zur Bildung von Regenrissen und Runsen . . ., die Hänge [der V-Täler] treten uns geschlossen und glatt, nur durch einzelne Tälchen zerschnitten, entgegen . . . In trockenen Gegenden mit periodischem Regen und lockerer Pflanzendecke sind die Hänge bis ins einzelne hinein von Schluchten und Runsen durchsetzt und reich modelliert.“ (*Hettner* 1921 p. 78.)

Belgrand (La Seine, études hydrologiques, Paris 1873) wies bereits auf die Bedeutung der Durchlässigkeit des Bodens für die engmaschige Ausbildung des Flußnetzes hin. Nach ihm kommt bei den undurchlässigen Graniten des zentralen Morvan bereits auf 39 qkm ein Wasserlauf, bei den ganz durchlässigen Sanden von Fontainebleau und den klüftigen Kalken der Beauce erst auf 2319 qkm. Neben dem Grundgebirge zeigt vor allem toniger Boden im Gegensatz etwa zu Buntsandsteingebieten größte Taldichte und weitgehendste Gliederung in kleine und kleinste Riesel. (Vgl. *Schmitthenner*, Diss. 1913 p. 60; *Passarge* III. 1920. p. 318.) Zuweilen findet man solche Gegensätze hart nebeneinander. Zeigt z. B. das sächsische Erzgebirge ein reich verästeltes Gewässernetz, bei dem sich die einzelnen Zweige dicht aneinanderdrängen, so zeigt die Sächsische Schweiz ein weitmaschiges Netz, das sich aus breit ausgreifenden Flußlinien zusammensetzt. (*Gravelius* 1914 p. 15; s. a. *Philippon* II, 2 1924. p. 94f., Lit.) Undurchlässiger Boden begünstigt insofern die Flußdichte, als er alles Wasser an der Oberfläche abrieseln läßt, während durchlässiger Boden das Wasser verschluckt. (*Philippon* II, 2. 1924. p. 36, p. 52: Einteilung der Gesteine nach ihrer Durchlässigkeit.)

Der Einfluß der eigentlich petrographischen Beschaffenheit des Bodens auf die Intensität der Zerfurchung ist noch wenig untersucht. Bei tonigen Gesteinen wird ihre 'Bindigkeit' die scharfe und genaue Ausprägung der rhythmischen Differenzierung begünstigen.

W. Panzer (1923. p. 156) macht darauf aufmerksam, „daß die erste Anlage von Tälern auf einer Urlandoberfläche nur in den seltensten Fällen in festem, anstehendem Gestein vor sich gehen wird, sondern vielmehr in einer mehr oder weniger mächtigen Verwitterungsdecke oder eben trocken gewordenem Meeressande und Schlick oder vulkanischer Asche beginnt, so daß die Zerklüftung des festen Untergrundes zunächst überhaupt gar keinen Einfluß auf die Talentwicklung gewinnen kann“. Vielmehr ist diese zunächst rein durch die Abdachung und die Beschaffenheit der Deckschicht bestimmt. So können also auch z. B. durchlässige Gesteine „infolge von Vererbung — sozusagen —“ dicht zerschnitten sein (*Passarge* III. 1920. p. 518).

Für *Davis* ist die Dichte und Verzweigung des Talnetzes ein sicheres Merkmal für einen fortgeschrittenen Entwicklungszustand, für das „Reifestadium“. Richtig daran ist, daß die Flußdichte infolge des Einschneidens und dadurch erzeugter Unebenheit etwas größer werden kann. (*Philippson* II, 2. 1924. p. 168.) Neue Nebenflüsse können sich zwischen die älteren einschieben. (Die Flußdichte als Funktion der Zeit!) Es ist übrigens weniger die Dichte der Wasserläufe selbst, als die Dichte der Talverzweigung, die dank dem Vordringen der 'rück-schreitenden Erosion' im Laufe der Entwicklung zunimmt. (*Philippson* a. a. O. p. 186 Anm.)

Dichte der Unebenheit (Intensität des Rhythmus; Tal-dichte) und Grad der Unebenheit (Schärfe des Reliefs) sind nicht notwendig miteinander verbunden. Beide zusammen ergeben die „Reliefenergie“ (vgl. *N. Krebs*, Eine Karte der Reliefenergie Süddeutschlands, *Pet. Mitt.* 1922. p. 49—53) eines Gebietes. Auch bei einem lebhaften Talgewirr können die Hänge schroff und steil, oder aber abgeflacht und gerundet sein, d. h. es kann ein „Steilrelief“, ein „Mittelrelief“ oder ein „Flachrelief“ (*W. Penck*) vorliegen. —

VI.

Die einzelne Flußader.

Aus den Ausführungen des vorigen Kapitels ergibt sich ohne weiteres, daß die Vorgänge in einer einzelnen Flußader, und ihre reliefbildende Wirksamkeit, nur verstanden werden können, wenn man sie

zunächst einmal als Glied eines gestalteten Gesamtgeschehens betrachtet hat. Gewisse Vorstellungen scheiden dann von vornherein aus, z. B. die Vorstellung, als würde bei diesem Vorgange eine formlose Masse von Wasserteilchen rein passiv von der Schwerkraft abwärts bewegt, und als beschränke sie sich darauf, die tiefsten Stellen bereits bestehender 'Urmulden' ebenso passiv auszufüllen und diese höchstens an der ihr zugewiesenen Stelle noch weiter zu vertiefen. Man werfe nur einen Blick auf die *Jaggarschen* Miniatursysteme oder auf die Meßtischblätter geologisch einheitlicher und störungsfreier Gebiete, um sich von der Unhaltbarkeit dieser Auffassung zu überzeugen. Der an das synoptische Erfassen großräumiger Reliefs gewöhnte Morphologe wird die Nachteile einer ans Einzelne gehefteten Betrachtungsweise am leichtesten vermeiden.

a) Querprofil.

Daß zum Zustandekommen und zur Aufrechterhaltung der Konzentration des Wassers im Flußschlauch eine besondere physikalische Kraft nötig ist, ist noch kaum jemandem aufgefallen. Die Wirksamkeit dieser Kraft läßt sich am Querprofil des Flusses ablesen. Würde nur die Schwerkraft wirken, so wäre der Fluß gar nicht imstande, seine Wassermassen im Flußschlauch zusammenzuhalten, das an den Uferwänden abbröckelnde Material würde die tiefere Flußmitte bald ausgefüllt haben, das Wasser würde sich bald seeartig über das ganze Gebiet verbreiten.

Das „natürliche Normalprofil“ eines Gewässers, welches sich durch plastische Stoffe hin seinen Weg gebahnt hat, ist nach *R. Siedek* (1902) bedingt durch „eine gewisse Erosionskraft“ des ersteren, durch jene nämlich, „die eine Selbstreinigung des Flußbettes bei einem bestimmten Wasserstand zu bewerkstelligen imstande ist“. Diese „Selbstreinigung“ läßt sich als das Bestreben deuten, Fremdkörper in der Weise auszustoßen, bzw. das Ufer- und Bettmaterial in der Weise fortzuschieben, daß dadurch die innere Reibung verringert, auf ein Minimum reduziert wird.

Dieses Bestreben des Flusses hat zu kämpfen mit der Nivellierungstendenz des Bettmaterials. Das vom Flusse erstrebte 'stabile' Querprofil kommt am leichtesten zustande bei standfestem Material der Wandungen und geringer Geschiebeführung, also z. B. bei den eng gerundeten Schmelzwasserrinnen auf Gletschern oder den scharf markierten Wasserrinnen der Badlandlandschaft. Sind diese günstigen Voraussetzungen nicht gegeben, so wirkt sich das Konzentrierungsbestreben des fließenden Wassers nur unvollkommen aus, das 'stabile' Querprofil wird dann nicht erreicht. Das 'eigentliche Bett' ist

dann zu breit, es ist nur sehr wenig unter das Hochflutbett vertieft, und seine Grenzen gegen dieses sind unscharf. Diesen 'instabilen' Zustand zeigen z. B. die periodischen Flüsse und Fiumare. „Die ungeheuren, oft mehrere Kilometer Breite einnehmenden, ganz flachen Schotterflächen dieser Flüsse, meist ganz trocken oder nur von dünnen Wasseradern durchzogen, mit unbestimmten, häufig sich verlegenden Ufern, sind ein Charakterzug im Landschaftsbild halbtrockener Gebiete. Nach heftigem Regen füllt sich aber das Ganze mit tobenden Wassermassen.“ (*Philippson* II,2.1924.p.77f.)

Der hier eingeführte Begriff des 'stabilen' Querprofils ist keine willkürliche und belanglose Unterscheidung, sondern ist der Ausdruck für etwas sehr Reales, nämlich für eine ganz bestimmte Abflußform, auf deren Erreichung das Wasser tatsächlich hinarbeitet. Der Fluß sucht sich an jeder Stelle seines Laufes die seinem Fließzustande entsprechende Bettbreite zu schaffen. Steht ihm zu viel Raum zur Verfügung, so sucht er sein Bett selbsttätig durch Ablagerung auf die richtige Mindestbreite zu bringen. Versuche, die *H. Engels* (I.1921.p.340) im Flußbaulaboratorium anstellte, ergaben: „Wenn bei zu großem Gefälle das Wasser so tief gefallen ist, daß die Breite des Abflußquerschnittes in bezug auf die Wassermenge zu groß geworden ist, dann laufen bei dieser Wanderung auch ohne das Hinzutreten von geschiebeführenden Nebenflüssen Geschiebebänke auf, die in Form von schrägen Zungen abwechselnd von einem zum anderen Ufer überschlagen.“ Die Gestaltung des Querprofils ist nicht das Werk zufälliger äußerer Umstände, sie unterliegt auch nur in geringem Maße der regelnden Willkür des Menschen. Die Flußregulierung kann nichts tun, als dem Flusse bei der Erreichung des 'stabilen' Abflusses behilflich sein. Wohl ist es ein leichtes, bei Verwilderung oder Verzweigung eines Flußlaufes in mehrere Adern einen einheitlichen Flußschlauch zu schaffen und durch Befestigung der Ufer und Verbauung der Nebenarme regulierend einzuwirken. Umso schwerer ist es dagegen, durch weitere Anwendung des Mittels der Breiten-einschränkung an Fahrtiefe zu gewinnen. „Einen verwilderten Fluß auf die doppelte Fahrtiefe zu bringen, ist viel leichter, als einen geregelten Fluß um wenige Zentimeter zu vertiefen.“ (*H. Engels* I.1921.p.381.) Denn mit der durch das vermehrte Arbeitsvermögen bedingten Senkung der Sohle tritt zugleich eine durchgehende Senkung des Wasserspiegels ein, „so daß der Gewinn an Tiefe nur der Unterschied zwischen diesen beiden Senkungen ist, der sogar unter Umständen gleich Null werden kann“. Der Fluß sucht sich also in jeder Weise der Aufzwingung eines unnatürlichen Querprofils zu entziehen.

In den übermäßig breiten Profilen bilden sich bei hohem Wasser am Ufer ruhende Flächen aus, wo oft in großer Ausdehnung fast gar keine Strömung herrscht. (*Jasmund* 1911.) Die Wassermassen seitwärts des natürlichen Fließkörpers stellen für diesen nur tote Begrenzungen dar; jenseits des Fließkörpers findet eine schroffe Geschwindigkeitsabnahme statt. Deshalb sind auch die Vorländer am höchsten in der Nähe der Ufer, landeinwärts zeigt das Gelände meist ein sanftes Gefälle bis zu den Hochufern hin, an denen sich eine breite Talsenkung hinzuziehen pflegt. (*Jasmund* 1911 p.201.) Die Fähigkeit der akkumulierenden Flüsse, ihren Lauf mit Dämmen einzufassen, beruht auf dieser abrupten Geschwindigkeitsabnahme. Diese natürlichen Dämme fallen steil zum Fluß, sehr sanft nach außen ab. „Bei geringer Überschwemmung ragen diese Dämme oft über dem Wasser auf, während die abseitigen Flächen unter Wasser stehen ...“ (*Philippson* II,2.1924.p.114f.) Der von *Behrmann* (Mitt. dt.Schutzgeb. Erg.-H.12.1917.p.56) beschriebene Sepik ist in dieser Hinsicht lehrreich: „Der Fluß selbst hat kein eigentliches Ufer, sondern fließt als Wasser nur innerhalb von Wasser“ (Sumpfland!). „Sobald der Fluß infolge seiner Sedimente sich beiderseits einen Damm aufgeschüttet hat, hat er sich seine Hohlform geschaffen ...“ Doch auch wo die Vegetation von beiden Seiten den Fluß einengt und „erobernd vordringt“, wird der Flußschlauch nicht lediglich passiv durch die „zufällige Grenze“ (*Behrmann*) der Vegetation bestimmt sein. — Überhaupt zeigen sich Flüsse, die durch Sumpfland fließen, von diesem auffallend unabhängig, auch hinsichtlich der Wasserführung. (*Sypan* 1916 p.512.)

Die Seitenabströmung bei Hochwasser ist deshalb auch nur eine nivellierende Ausfüllung der überschwemmten Nachbargelände mit Wassermassen bis zur Höhe des gemeinsamen Wasserspiegels. Dies beweist schon der Umstand, daß gewöhnlich nur die obersten Schichten des Wasserlaufes an dieser Bewegung teilnehmen. (Vgl. *Jasmund* 1911 p.199ff.) „Anders liegt die Sache bei Deichbrüchen oder in solchen Fällen, wo ein wesentlicher Teil der Wassermassen sich plötzlich in geschlossenem Strome seitwärts wendet. Dann bildet sich eine allmählich ansteigende Fläche, auf welcher auch die tieferen Schichten des Stromes aufwärts steigen.“

Die hier angedeuteten gesetzmäßigen Beziehungen zwischen Fließkörper und Begrenzung bei fließenden Gewässern vermögen vielleicht Licht zu werfen auf die Bettgestaltung des fließenden Eises, insbesondere auf die Ausbildung des an den Rändern immer auffallend scharf und unvermittelt einsetzenden 'Taltrog'es'. *A. Penck* bezeichnet den Trog als den Ort des Maximums der erodierenden Kräfte des Eises in seinem Stromstrich, äußert aber doch verschiedene Be-

denken. Wir dürfen vielleicht annehmen, daß der Gletscher ein zu breites Tal zunächst passiv ausfüllte, der eigentliche Fließvorgang und infolgedessen auch die Eintiefung in die Sohle sich jedoch innerhalb einer bestimmten selbstgeschaffenen engeren Begrenzung vollzog. Die Eispartien über der Trogschulter würden dann den 'toten' Uferstreifen und Winkeln mit geringer Strömungsgeschwindigkeit bei Flüssen entsprechen. Dies würde dann erklären, weshalb „das Eis auf den Trogschultern und der Trogplatte nur flächenhaft abschleifend gewirkt hat und dann an den Trogrändern und dem Trogschluß ganz unvermittelt in die Tiefe zu arbeiten begann“ (*Supan* 1916). Die Verbreitung der Trogform spricht für die Annahme präexistierender breiter Talprofile. Die von *Supan* (1916 p.574) herangezogenen Beispiele rezenter Trogbildung lassen sich ebenfalls anführen. Auch *Philippson* (II,2.1924.p.249ff.) drängte, wie ich nachträglich sehe, sich der Vergleich mit fluviatilen Formen auf. Er erwägt folgende (zweite) Möglichkeit: Die Schulter entspricht dem Hochflutbett der Flüsse, das ja auch mit einer Kante gegen das eigentliche Bett absetzt. Bei einem schnellen Anschwellen oder bei einem stärkeren Vorstoß bedeckte der Gletscher seicht die Talflanken oberhalb des Trograndes. „Entsprechend dieser verschiedenen Mächtigkeit konnte er den Trog weiter stark, die seitlichen Teile aber nur wenig vertiefen.“ Der Trogrand blieb so als Kante zwischen den Streifen ungleicher Tiefenerosion erhalten. —

b) Längsprofil.

1. Bei ungehemmtem Abfluß. Die Form der Abtragung ist mehr oder weniger stark rhythmisch-zusammengefaßt ('Differentielle Erosion'):

Die Stärke der Erosion des fließenden Wassers nimmt von der Quelle zur Mündung hin stetig zu mit der Zunahme der Wassermasse. Die Wirkung an jedem tiefer gelegenen Punkt ist gesteigert um die von oben zuströmenden Abflußmengen. Die Erosion macht sich deshalb im Unterlauf am stärksten geltend, schafft hier Verebnung, während das Gefälle oberhalb zunächst steiler wird. Diese Theorie der 'rückschreitenden Erosion' wurde von *Philippson* (Pet.Mitt.1886 u.ö.; Grundzüge II,2.1924.p.129ff.) am klarsten und konsequentesten entwickelt.

2. Bei gehemmtem Abfluß. Die Form der Abtragung ist mehr oder weniger diffuse (Massenbewegungen):

Intensive und gleichmäßige Durchtränkung des Bodens, ständige Neubildung von Verwitterungs-

schutt führen zur Abflachung des Böschungswinkels der Gehänge und ganzer Landschaften. Der Niederschlag fließt nur zum geringeren Teil oberflächlich ab, er durchtränkt und beschwert den Boden und ermöglicht so weitgreifende Massenbewegungen. Das langsame Abwärtswandern der Verwitterungsstoffe unter dem Zug der Schwerkraft und unter der Einwirkung von Temperaturwechsel, Frost, und besonders Bodendurchtränkung bezeichnen wir nach dem Vorgange *Götzingers* (1907) als 'Gekrieche'. Auch im Flußbett selbst wird infolge der hier geringeren Strömungsstärke der Geschiebetransport weniger von der Größe der Abflußmenge als von der in dem Geschiebe aufgespeicherten Schwereenergie bestimmt. Dieser Vorgang muß sich in seiner Wirkung gerade im Oberlauf am stärksten bemerkbar machen.

Das Gleichgewichtsprofil der Flüsse wird in der Regel eine Kompromißkurve darstellen, gemäß dem Anteil der beiden Vorgänge. Es empfiehlt sich deshalb auch hier wieder, zunächst die Extreme zu studieren.

Der Vorgang der 'rückschreitenden Erosion' ist u. a. formbestimmend in der von *E. Obst* (1923; ähnlich *Fr. Jäger* i. Zs. Ges. f. Erdk. 1923 p. 14ff., für das Hochland von SW-Afrika; vgl. auch *B. Brandt* 1922; ferner *L. D. Cairnes* 1912, zit. *Supan* 1916 p. 625f.) beschriebenen Inselberglandschaft des Ostafrikanischen Schollenslandes. Die Verwitterung wirkt hier im wesentlichen nur in der Trockenzeit, es folgt dann in den Regenmonaten eine Periode überwiegender Abtragung. Massenbewegungen infolge Rutschungen durchtränkten Bodens kommen also nicht in Betracht. Selbst in den feuchten Regenmonaten wird die Feuchtigkeit sehr schnell aufgezehrt; sonstige abtragende Kräfte machen sich kaum bemerkbar. Dafür wirkt die 'rückschreitende Erosion' umso stärker; denn bei dem ungehemmten oberflächlichen Abfluß und der Menge lose angehäuften Verwitterungsmaterials kann die Zunahme an Geschwindigkeit und Abflußmenge nach abwärts zur vollen Wirkung kommen. Das Ergebnis dieses Zusammenwirkens von differentieller Erosion, Flächenspülung und Wandverwitterung ist eine weitgehende Verebnung (Rumpfflächenbildung) im unteren Teil, die Herausbildung unvermittelt steil aufragender Inselberge im oberen Teil. Das 'Rückwärtsschreiten' der Erosion erfolgt hier im buchstäblichen Sinne. Der Böschungswinkel bleibt während des ganzen Vorganges der gleiche. (Vgl. die Erörterung des Problems bei *Philippson* II, 2. 1924, p. 331ff.)

In gemäßigt-feuchten Klimaten überwiegt dagegen die Höhenunterschiede ausgleichende, sanfte Reliefs schaffende, Gehänge verflachende, mehr oder weniger 'diffus' arbeitende Abtragung

durch die Schwerkraft. Die Wasserteilchen finden hier nur langsam und mühsam den Weg abwärts und werden dabei zu Hilfskräften der Nivellierung. Die obersten Gerinne der Rückengebirge sind 'Schuttgerinne' mit spärlicher, oft unterbrochener Wasserführung; der Schutt kann selbst die Abflüsse der ständigen Quellen aufsaugen. (*O. Lehmann* 1918.) Was im Bette liegt, ist weniger 'Geröll' oder 'Gehänsel' als vielmehr kriechender Verwitterungsschutt. Die Gehängeentwicklung ist infolgedessen eine ganz andere und dem ersten Typus entgegengesetzte. —

VII.

Der Fließvorgang.

Infolge seiner Zähflüssigkeit nimmt freifließendes Wasser auch in völlig glatten Betten keine beschleunigte Bewegung an: Die Geschwindigkeit nimmt nur solange zu, bis die aufgenommene Beschleunigung durch die Schwerkraft den ebenfalls mit der Geschwindigkeitszunahme wachsenden inneren Widerständen gleich wird. (*Lippke* 1914 p.206.) „Die Gleichförmigkeit der Bewegung bleibt unter dem alleinigen Einfluß des dem fließenden Wasser eigentümlichen Gleitwiderstandes bestehen, der einen seiner Größe und dem Gefällsverhältnis des Stromes entsprechenden Beharrungszustand hervorruft.“ Die verbreitete Ansicht, daß eine fließende Wassermasse nur in einem rauhen Bette Beharrung annehmen könne, ist also aufzugeben.

Die 'glatte' Reibung fester Körper zeigt ein ganz entsprechendes Verhalten, wie *Charlotte Jacob* (1912) durch Versuche mit gut polierten und gesäuberten Platten nachwies. Die Bewegung ist auch hier eine gleichförmige, nicht beschleunigte. Eine für die Theorie der Reibung höchst bedeutsame Feststellung! Die Reibung wächst zunächst mit der Geschwindigkeit, zuerst rasch, dann langsamer, um schließlich praktisch konstant zu werden (ebda.p.137).

In der Wirklichkeit gibt es freilich keine vollkommenen Wandungen, aber nicht die Rauigkeit der letzteren ist es, die die Beschleunigung vernichtet, sondern die 'Rauigkeit' vermehrt nur die Reibungswiderstände, zu deren Überwindung dann eine erneute Beschleunigung erforderlich ist, die das fließende Wasser durch Vergrößerung seines Spiegelgefälles selbsttätig herbeiführt (*Lippke* a. a. O.;

vgl. *H. Engels* I.1921.p.53; *Schober*, Diss.1915.p.36ff. — Über Turbulenz und Rauigkeit siehe weiter unten!)

Die Sohlengeschwindigkeit ist infolgedessen auch kein Maß für den Widerstand des Geschiebes. Sie ist lediglich eine Funktion der Wassertiefe. Sie ist in der Regel eine endliche Größe, kann aber auch unter Umständen (so bei kleinen Wassertiefen, wo die bewegte Masse gering ist) gleich Null werden. (*Lippke* 1911.) Sie nimmt bei gleichen Wassertiefen gleiche Werte an, zeigt sich also unabhängig vom Gefälle.

Zahlreiche Beobachtungen weisen auf eine Geschwindigkeitsverminderung in den obersten Wasserschichten hin. Sie wird von *Darcy* und *Bazin* (*Recherches hydrauliques*, 1865) auf die inneren Bewegungen der Strömung zurückgeführt. Auch diese Erscheinung zeigt uns deutlich die autonome Selbstregulierung des Fließvorganges. Die Geschwindigkeit der Wasserfäden nimmt nicht einfach rein passiv mit der Entfernung von den „verzögernden Bett-
rauhigkeiten“ (!) ab, welcher Ansicht man beim Durcharbeiten der Lehrbücher (z. B. *Sölch* i. *Kende*, Handb.d.Geogr.I.1914) immer wieder begegnet. Zum Problem vgl. *Jasmund* 1911 p.455; *C. Hefle* 1899; bsd.: *Rümelin* 1913 p.48f.; *H. Engels* I.1921.p.57.

Die Angriffe, welche die Bettsohle durch die Strömung erfährt, bezeichnet *H. Engels* (*Zs.f.Bauwesen* 1912) als „Räumungskraft“. Ihr steht das „Widerstandsvermögen“ der Flußsohle gegenüber. Die Räumungskraft ist annähernd proportional dem Quadrate der mittleren Geschwindigkeit; sie nimmt zu mit der Zunahme des Porengehaltes der Sohlenschicht. Im Anschluß an *Lippke* kommt *H. Engels* zu einer Ablehnung des bekannten *Kreuterschen* Schleppekraft-Gesetzes, welches — unter Vernachlässigung der inneren Widerstände — die Verzögerung nur mit Hilfe der äußeren Faktoren zu erklären und zu berechnen sucht.

Die drei Fließzustände.

Th. Rehbock (1917 p.1) unterscheidet drei verschiedene Arten des Wasserabflusses: Gleiten, 'Strömen' und 'Schießen'. Eine Wassermasse kann nach *Rümelin* (1913 p.69) durch sukzessive Steigerung der Geschwindigkeit nacheinander alle drei Bewegungszustände annehmen. Das 'rhythmische' Phänomen, d.h. die 'turbulente' Strömung, ist auch hier an die mittleren Geschwindigkeiten geknüpft, oberhalb und unterhalb deren gleichförmiges Fließen stattfindet. „Der Gleitzustand tritt bei zu steiler Neigung auch bei rauhem Bett wieder ein.“ (*Rümelin* 1913 p.65.) Die Oberfläche bei schießendem Wasserabfluß (über dessen Beurteilung nach *Rehbock* noch

keine Klarheit herrscht) ist im allgemeinen glatter als bei schnell fließendem 'strömendem' Wasser; sie nähert sich in ihrem Aussehen wieder mehr demjenigen des gleitenden Wassers. Auch sonst zeigen Strömen und Schießen entgegengesetztes Verhalten.

„Bei einer Flüssigkeit von so geringer Zähigkeit, wie sie das Wasser aufweist, kommt das „Gleiten“ — die Laminar- oder Parallelbewegung — bei der sich die einzelnen Flüssigkeitsteilchen in zueinander parallelen Bahnen bewegen, nur selten vor..., während eine zähe Flüssigkeit auch bei großen Querschnitten und Geschwindigkeiten noch zu gleiten vermag. Im gleichen Bett kann z. B. bei einer Temperatur von 11° C Rüböl noch bei einer etwa 300mal größeren Geschwindigkeit gleiten als Wasser.“ (*Rehbock* p.1.) „Bei sehr geringem Wasserabfluß kann aber gelegentlich doch gleitendes Wasser in regelmäßig ausgebildeten Kanälen, in Ausnahmefällen auch in natürlichen Flußbetten beobachtet werden, wie aus der Spiegelglätte der Oberfläche, aus dem Stillstehen des Wassers unmittelbar am Ufer, am besten aber durch die Einleitung eines Farbstoffadens erkannt werden kann, der bei gleitendem Wasser als scharf begrenztes schmales Band abtreibt, während er sich bei turbulent fließendem Wasser schon bald rauchartig in der Wassermasse verteilt ... Im Unterlauf größerer Flüsse scheint beim Kentern der Strömung infolge eindringenden Flutwassers bei ganz windstillem Wetter aber doch gelegentlich die Gleitbewegung einzutreten“ (*Rio de la Plata!*). (*Rehbock* p.3.)

„Bei einer bestimmten, von den Abmessungen des Bettes und dem Reibungs- oder Zähigkeitsmodul der Flüssigkeit abhängigen Geschwindigkeit, welche *Osborne Reynolds* (1883) die 'kritische Geschwindigkeit' genannt hat und die beim Vorhandensein mehrerer Geschwindigkeitsgrenzen als die obere 'Gleitgrenzgeschwindigkeit' bezeichnet werden soll, hört aber die Fähigkeit zu gleiten auf und es tritt turbulentes oder wirbliches Fließen ein, bei dem die einzelnen Wasserteilchen in scheinbar regellosen Bahnen auch quer zur Hauptbewegungsrichtung durcheinandergewirbelt werden ...“ (*Rehbock* p.1.)

In 'scheinbar' regellosen Bahnen! Denn, wie wir im folgenden noch sehen werden, die echte Turbulenz ist ein für unser Auffassungsvermögen zwar wenig 'regelmäßiger' und durchsichtiger, doch objektiv ein durchaus 'einfacher' und 'gesetzmäßiger' Vorgang. 'Turbulenz' ist deshalb nicht etwa, wie viele denken, nur ein negativer Sammelbegriff, der „alle die Zustände des Fließens umfaßt, die nicht zur geschichteten Bewegung gehören“. (Vgl. hierzu *Graevell*, Die fließ. Bewegung des Wassers. Zs.f.d.ges.Tur-

binenwesen. 17.Jg.1920.) Die Theorie der Turbulenz läßt sich also auch unmöglich auf der Tätigkeit hinzutretender Störungsbewegungen aufbauen. Denn 'Turbulenz' im engeren Sinne ist nicht gleichbedeutend mit wüstem Durcheinander, „wirren inneren Bewegungserscheinungen“, ständigen „inneren Vibrationen und Wirbelungen“, die sich „teils gegenseitig vernichten, teils von den Wandungen zurückgeworfen werden“. Sie ist keine „komplexe Bewegung“, die noch „durch die Zufälligkeiten (!) der Pulsationen“ weiter verändert wird (*Graevell* a. a. O.): *R. v. Mises* (1912) und *F. Noether* (1913) lassen die Turbulenz fort-dauernd von „Störungen“, die von den „molekularen Unebenheiten“ (!) der „Wandrauhigkeit“ ausgehen sollen, gespeist werden.

Wo es mit unserer Kenntnis der Bewegungsvorgänge vorbei ist, pflegen sich 'wirblige' Bewegungen einzustellen. Wirbel sind für viele ein Zauberwort, mit dem keine sachliche Vorstellung mehr verbunden ist. (Vgl. *A. Betz* 1921.) Wie wir in anderem Zusammenhange (Kap. XIX Abschn. 3) noch zeigen werden, entstehen regelrechte Wirbel immer nur im Anschluß an Störungen und Unregelmäßigkeiten; sie gehören also in die Klasse der Ausgleichsbewegungen. Auf zufällige Störungen und Unregelmäßigkeiten läßt sich aber nicht die physikalische Theorie einer Erscheinung aufbauen, die ihrem ganzen Auftreten nach etwas durchaus Gesetzmäßiges und Bestimmtes hat. Wir müssen also von den störenden Begleiterscheinungen abstrahieren, um zu dem Elementarphänomen der echten 'Turbulenz' vorzudringen, d. h. also, wir müssen die einfachsten Verhältnisse aufsuchen.

Eine sehr anschauliche Schilderung des Überganges vom 'Gleiten' zum 'Fließen' gibt *Schoklitsch* (1920):

„Wird bei der Fortbewegung des Wassers in offenen Gerinnen eine bestimmte Tiefe [und damit eine bestimmte Geschwindigkeit!] überschritten, so ändert sich das Bild, das die Wasserbewegung bietet, vollständig. Schlammwasser, das bei geringen Tiefen mit milchig aussehender, einfarbiger Oberfläche fortrinnt, bekommt fast plötzlich ein marmoriertes Aussehen; es hat den Anschein, als würden neue Bewegungen zur früher geradlinig fortschreitenden hinzutreten; das schlammige Wasser gleicht nun fast einem Strom von durcheinandergleitenden Schlangen. In klarem Wasser verschwinden die früher scharf begrenzten Farbbänder, die von eingestreuten, abfärbenden Körnern herrühren, und an ihre Stelle treten farbige Wolken. Bei flüchtigem Anblicke scheint es, als würden in diesem Bewegungsstadium die Wasserteilchen regellos hin- und hergeworfen; eine genauere Beobachtung des schlammführenden Wassers lehrte jedoch bald, daß es sich auch hier um gesetzmäßige Vorgänge handele“ (p.903f.). „Diese einfachste turbulente Bewegungsweise, die kurz 'Fließen' genannt sei,

kann nur in sehr regelmäßigen, glatten Rinnen beobachtet werden. Treten zur Fließbewegung noch Wirbel und Querströmungen hinzu, so bietet die Bewegung jenes Bild, das besonders in natürlichen Gerinnen überall zu sehen ist..." (p.906).

L. Hopf (1910 p.35) macht darauf aufmerksam, daß die sichtbare Oberflächenunruhe von der eigentlichen Turbulenz ganz unabhängig sei und ihre direkte Beobachtung verwehre. In besonderen Fällen scheint dies aber doch möglich zu sein. So berichtet *Schoklitsch* (p.909): „Besonders in natürlichen Gerinnen kann oft an Strompfeilern beobachtet werden, daß die Stauwelle mit ziemlich regelmäßigen Intervallen abwechselnd laut rauschend emporsteigt und dann wieder herabsinkt, und man erkennt bei genauerer Beobachtung, daß im Gerinne in versetzten Reihen Wallungen, umgeben von zahlreichen kleinen Wirbeln, herabziehen, in denen das Wasser lotrecht aufwärts strömt (es hat den Anschein, als würde es kochen) und zwischen denen sich viel rascher fließende Wasserbänder durchschlängeln. Trifft eine Wallung auf die Pfeilerschneide, so bleibt die Welle glatt, niedrig und ruhig, trifft hingegen ein rasch fließendes Band darauf, so spritzt das Wasser laut rauschend in die Höhe.“ Diese von Wasserbändern umgebenen Wallungen lassen sich am Rhein immer dann gut beobachten, wenn bei geeignetem Wind die Wallungen mit Kräuselwellen bedeckt sind, die Wasserbänder dagegen ölig-glatt erglänzen.

„Der ausgebildeten Turbulenz entspricht eine wesentlich andere Geschwindigkeitsverteilung über den Röhrenquerschnitt als der Laminarbewegung, außerdem entsprechen ihr wesentlich höhere Strömungswiderstände.“ (*Prandtl*, „Flüssigkeitsbewegung“. Handwbt.d.Nat.4.1913.)



Laminarströmung

(Prandtl Fig. 42.)



Turbulente Strömung

(Prandtl Fig. 41.)

Die Annahme der turbulenten Bewegungsform setzt also das strömende Wasser in den Stand, den scherenden Verzerrungen durch Gleitung den größt-

möglichen Widerstand entgegenzusetzen; die innere Reibung wird ein Minimum, die äußere ein Maximum; die einzelnen Wasserteilchen wechseln nicht ständig ihre Nachbarschaft wie bei der Gleitbewegung, sondern bleiben möglichst lange in Berührung miteinander. Bei den Wasserwellen läßt sich, worauf hier vergleichsweise hingewiesen sei, dieselbe Richtung des Geschehensablaufs feststellen: Das gleichförmige Mitströmen der obersten Wasserschichten in der Windrichtung wird abgelöst von einer Bewegungsart, die von einem Minimum der inneren Reibung begleitet ist und bei der die Wasserteilchen, die in der Ruhelage sich nebeneinander befinden, auch in Bereiche einer Wellenbewegung stets in Berührung miteinander bleiben.

„Beim Gleiten des Wassers müssen nur die durch die Zähigkeit der Flüssigkeiten bedingten Energieverluste durch die Arbeit der Schwere ersetzt werden. Diese Verluste sind bei dem verhältnismäßig leicht beweglichen Wasser nur gering. Sie sind von der Rauigkeit der Wandungen des Bettes unabhängig, weil beim Gleiten die äußersten Wasserfäden des benetzten Querschnittes unmittelbar am Bett die Geschwindigkeit Null besitzen, d. h. stillstehen und daher keine Wandreibung zu überwinden haben. — Die beim turbulenten Abfluß — und zwar sowohl beim Strömen als auch beim Schießen — infolge der bei der Mischung verschieden schnell fließender Wasserteilchen eintretenden Verluste an kinetischer Energie sind dagegen von der Rauigkeit der Wandungen abhängig, weil bei der turbulenten Bewegung sich auch die Wasserfäden unmittelbar am Bett fortbewegen und die Rauigkeit der Bettwandungen die Querströmungen und infolgedessen auch die bei der Mischung von Wasserteilchen auftretenden Energieverluste beeinflußt.“ (Rehbock 1917 p.9f.)

Selbst wenn wir diesen verzögernden Einfluß der Wandrauigkeit anerkennen, so müssen wir doch daran festhalten, daß ihr eine wesentliche Rolle bei den Turbulenzerscheinungen nicht zukommt. Versuche von *Ludw. Schiller* (1920) erwiesen die weitgehende Unabhängigkeit der unteren Grenze des Turbulenzeintrittes vom Rauigkeitsgrad der Rohre. Auch *Noether* (1921) sieht in der Turbulenz neuerdings einen freien Bewegungszustand im glatten Rohr, bei dem einzelne größere, am Einlauf oder sonst stattfindende Störungen nur eine auslösende Rolle spielen.

Auch bei der Turbulenz können wir eine geringe Beschleunigung des Eintritts der rhythmischen Differenzierung in Gegenwart minimaler Störungen feststellen. *L. Schiller* (1920) stellte durch Versuche an glatten Rohren fest, daß die *Reynolds-*

sche Zahl, bei welcher die laminare Strömung in die turbulente umschlägt, umso höher liegt, je geringer die Einlaufsstörung ist. Desgleichen bestätigt sich das Kriterium des 'funktionellen Zusammenhanges': „Turbulent fließendes Wasser kann durch Vorschalten eines geeigneten Siebes auf kurze Strecken laminar gemacht werden.“ (*Graevell* 1919 p.113.)

Nach *Prandtl* (a.a.O. p.119) sind die Ursachen der Turbulenz „trotz großer Anstrengungen seitens der Theoretiker bisher noch nicht aufgeklärt“. (Ebenso neuerdings *R. v. Mises* 1921.) Für die Turbulenz der Atmosphäre zieht *V. H. Ryd* (1920) dieselbe Bilanz.

VIII.

Gerade Flußläufe mit Geschiebebewegung und mäandrierende Flußläufe.

a) Äußere oder innere Ursachen?

Die Ausführungen des vorigen Kapitels zeigten uns, daß die Form des Wasserabflusses in Flußläufen nicht lediglich als das Ergebnis äußerer Einwirkungen hingestellt werden darf, sondern daß sich im Wasser 'freie' Bewegungszustände herausbilden, die ihren eigenen Gesetzen gehorchen und auch ihrerseits die Bettgestaltung beeinflussen. Gegenüber der vorwiegenden Betonung der 'äußeren Ursachen' (der 'mechanischen Bedingtheiten') erkannten wir die hohe Bedeutung der 'inneren Ursachen' (der 'zwecksetzenden Form'), und wir verfolgten das eigenartige Zusammenwirken dieser beiden Ursachen. Die Versuchung ist nun groß, aus diesem innigen Zusammenspiel einen schematisierten Gegensatz zu machen, aus dem dann die antithetische Problemstellung erwächst: Ist die Bettgestaltung des Flusses ein Werk innerer oder ein Werk äußerer Kräfte? In Anwendung auf die Theorie der geraden Flußläufe mit Geschiebebewegung und der mäandrierenden Flußläufe würden sich aus dieser Fragestellung sogleich zwei Gruppen von Theorien ergeben: Die eine Gruppe würde mit Ursachen rechnen, die von außen auf den Fluß einwirken, die andere Gruppe würde die Ursache in das Wasser selbst hineinverlegen. Zur letzteren Gruppe würden z. B. die kymatologischen Theorien rechnen, die die Bettgestaltung hinstellen als das Werk des „pendelnden“ oder „sich schlängelnden“ Stromstriches oder des „oszillatorischen Strömungsverlaufs“. Da wir selbst nun auf Grund verschiedener Überlegungen mit der Existenz von 'freien Mäandern' im Gegensatz zu den auf

äußere Faktoren zurückgehenden sog. 'gezwungenen Mäandern'¹⁾ rechnen zu dürfen glauben, so liegt auch für uns die Versuchung nahe, uns dem Vorgange der Kymatologen anzuschließen und die Ursache der Mäanderbewegung zu sehen in rhythmischen Zustandsänderungen, in einem 'Ditropismus' des fließenden Wassers, das periodisch zwischen zwei Grenzzuständen: dem rascheren und dem langsameren Strömen, bzw. dem breiten und seichten Querprofil und dem schmalen und tielen Querprofil abwechselt. Zur Stütze dieser Theorie ließe sich manches anführen. In anderem Zusammenhange wird jedoch noch klar werden, daß diese Annahme auf die verschiedensten Bedenken stößt und deshalb fallen zu lassen ist. Um unsere Stellungnahme gleich vorwegzunehmen: Für uns liegt die Ursache weder in äußeren, noch in inneren Verhältnissen, sondern liegt in der Grenze selbst, in der Reibungszone (der gemeinsamen Mischungszone) der beiderseitigen Medien. Es läßt sich zeigen, daß im kleinen wie im großen das gleiche physikalische Gesetz wirkt und daß die 'Stabilisierungstendenz' von den kleinen Transportkörpern des Geschiebes über die wechselständigen Geschiebepänke zu der mäandrischen Bettgestaltung hinaufführt, die geradezu als ein Wunderwerk der Stabilisierung dasteht.

b) Zur Mechanik des Geschiebetransportes.

Die bei der Untersuchung der Bewegungsverhältnisse der Rippelmarken, Dünen und Wasserwellen gewonnenen Erkenntnisse lassen sich hier zum Vergleiche heranziehen. Auch hier haben wir eine Relativbewegung zwischen Wasser und Sand bzw. Geröll. Innerhalb bestimmter Grenzbedingungen muß die gemeinsame Trennungsfläche also auch hier eine rhythmische Zerlegung erfahren, d. h. der Geschiebetransport geschieht nicht gleichmäßig und gradlinig, sondern auf dem Rücken von dünenartigen 'Transportkörpern'.

Schon in der Lagerung abgeflachter Geschiebe zeigt sich die Tendenz zur Ausbildung von 'Schutzformen' gegen die Räumungskraft der Strömung. Die Experimente von *Owens* (1912; vgl. Ders., Diskussion zu *King* 1916 p. 208 f.) über den Betrag des Absatzes von festen Körpern in Wasser ergaben, daß sich die niederfallenden Körper in solche Lage setzten, daß sie den größtmöglichen Widerstand zu ihrer Bewegung durch das Wasser bieten. „That is quite the contrary to what might be expected at first sight.“ Die

¹⁾ Die Unterscheidung in „freie Mäander“ und „Zwangsmäander“ bei *Philippson II*, 2. 1924 p. 101 ff. geht von anderen Gesichtspunkten aus.

hinteren Kiesel sind gewöhnlich auf die vorderen hinaufgeschoben und schaffen so eine dachziegelförmige Struktur (*Daubrée*; vgl. *Frauenfelder*, Flußinseln. Diss. 1897), „die der Lage der Schuppen beim Fisch nicht unähnlich ist“ (*Jasmund* 1911 p. 345).

Die schon erwähnten Flußrippeln (vgl. Kap. „Rippelmarken“!) haben in der Regel „breite und nahezu flache Kämme“. Sie sind am schönsten ausgebildet bei ganz geringer Strömungsgeschwindigkeit. (Vgl. *Cornish* 1914 p. 266; *Blasius* 1910; *H. W. Ahlmann* 1914 p. 18 ff.) Diese senkrecht zur Abflußrichtung verlaufenden 'Parallelrippeln' finden sich nach *Rehbock* (1917 p. 7; s. a. *H. Engels* 1905: Experimente im Flußbaulaboratorium, mit schönen Phot.!) an den 'strömenden' Zustand gebunden; bei 'schießendem' Wasser kommt es dagegen zur Ausbildung von 'Schrägbänken'.

Eine den Bänken entsprechende Kleinform bezeichnet *H. W. Ahlmann* (1914) als „Transportdeltas“. Man sieht sie aus der Parallelrippelfelung hervorgehen und schließlich immer individuellere Formen annehmen, wenn sich die Stromgeschwindigkeit steigert. Ihr Abstand betrug in den von *Ahlmann* beobachteten Fällen nur wenige Dezimeter, die Leeböschung etwa 6 cm. Die Linienordnung der Reihen ist im Gegensatz zu den Rippeln zerbrochen und durch kurze Platten mit vollkommener Deltaform ersetzt. Wie der Dünenkörper durch die Kleinform der Rippelmarken gegliedert ist, so werden auch „die Sandbänke durch einen Haufen Transportdeltas aufgebaut und bilden aus diesen Elementen eine größere Einheit“. „Auf dem ausgezeichneten Grundriß über den korrigierten Rhein unterhalb Straßburg, wo die Bänke mit Kurven gezeichnet sind, sieht man deutlich, wie ihre Oberfläche aus kleinen Deltaplatten zusammengesetzt ist, welche sich aneinander vorbeischieben, während gleichzeitig ihre Leeseite nicht gerade und einfach, sondern aus mehr oder weniger langen Ausläufern zusammengesetzt ist.“ (*H. W. Ahlmann* 1914 p. 39.) Der Transport auf dem Rücken der wandernden Bänke vollzieht sich also nicht kontinuierlich, sondern in rhythmisch wiederholten Etappen. Die sich am Fuße der Luvseite der Bänke immer wieder neu bildenden Transportdeltas gehen, nachdem sie langsam über ihren Rücken gekrochen, an der Leeseite wieder in ihnen auf. — Die Form der Geschiebebänke selbst beschreibt *H. W. Ahlmann* (p. 38) als „ausgezogen spindelförmig oder breit-dreieckig und schildförmig, mit langer, gewölbter Luvseite und kurzer, steiler Leeseite“.

Treibt das Geschiebe nur in geringer Menge über festen Untergrund, so kommt es zur Bildung von Schutzformen, die man als 'subfluviale Barchane' bezeichnen kann. Der unterste Abschnitt des

Oberrhens ist bei nur sanft gekrümmtem Lauf gekennzeichnet durch ein breites Bett, großenteils gespalten durch langgestreckte, 'weidenblattförmige' Inseln. (*Honsell*, Beitr. III. 1885.) In der Tat treten unterhalb Oppenheim zum ersten Male Felsen im Rhein auf. „Was hier [d. h. unterhalb Mainz] in der Stromsohle beweglich ist, ist nur eine nicht mächtige Schicht Sandes, meist dem Main entstammend, die über der festen Sohle weggetrieben wird.“

Über eine obere Geschwindigkeitsgrenze hinaus vermag der bankförmige Geschiebetransport sich nicht zu halten. Sobald das bis dahin gerollte und geschobene Material schwebend transportiert werden kann, verflachen sich die Bänke. (*H. W. Ahlmann* 1914. p. 42.) *Partiot* (1871) erwähnt, daß eine ganze Bank auf diese Weise sich auflösen und verschwinden kann. (Über die gleiche Erscheinung bei Winddünen vgl. Kap. „Rippelmarken“: „Grenzbedingungen“!) Wie wir noch sehen werden, macht bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten auch die mäandrierende Bewegung mit ihrer welligen Differenzierung der Grundriß- und Sohlenform einer gestreckten und gleichförmigen Bewegung Platz.

c) Die Geschiebebewegung in geraden Flußläufen.

Die Bettgestaltung in einem geraden Fluß ist eine Form des Geschiebetransportes. Und zwar nimmt das Geschiebe die Form an, die den größtmöglichen Widerstand gegen die scherende Einwirkung des Wassers bietet, die die inneren Reibungsbewegungen des Geschiebes auf ein Minimum herabsetzt und andererseits den Wasserabfluß erleichtert. Diese Form ist die der wechselständigen dünenartigen Geschiebebänke. Der Bewegungsmechanismus entspricht ganz dem der wandernden Düne. „Auf den oberen schwach ansteigenden Flächen der Kiesbänke rollt der Strom das Geschiebe in mehr oder minder starken Schichten hinauf, bis der höchste Punkt überschritten ist und das Geschiebe auf den unteren steilen Abhängen niederfällt. Hier bleibt es in Ruhe, bis die ganze Kiesbank darüber fortgewandert ist und nunmehr das Geschiebekorn seine kleine Wanderung über die Bank von neuem beginnt. Es sind also nicht etwa die ganzen Massen der Kiesbänke gleichzeitig in Bewegung, sondern immer nur die oberen Schichten auf den dem Stromangriff ausgesetzten Flächen ...“ (*Jasmund* 1911 p. 351.) Zu jeder Aufschüttungsform ('Kiesgrund') gehört eine entsprechende Hohlform ('Kolk'); je tiefer diese ist, um so stärker ist stromab die zugehörige Verlandung. Beide bilden zusammen die Arbeitsform des Geschiebetransportes. (Vgl. *Jasmund* 1911 p. 189.)

Die wandernde Geschiebebank „ist die geschlossene Bildung, in

welcher der Geschiebetransport in einem festen Flußlauf vorwärtstransportiert wird. Infolgedessen ist somit nicht der Talweg selbst der Weg, auf welchem das Geschiebe vorwärts bewegt wird, sondern er ist hauptsächlich die Rinne oder der Ablaufweg für das Wasser und den Sinkstoff, während das Geschiebe nebenan in den Bänken stromabwärts wandert“. (*H. W. Ahlmann* 1914 p. 38.) Die Tiefenlinie zeigt oft scharfe Knicke, liegt streckenweise hart einem Ufer an, um dann plötzlich quer aufs andere Ufer überzuspringen. Bei Hochwasser macht sich gelegentlich die gerade Strömungsrichtung geltend. Zwischen Bank und Ufer bildet sich eine flache Hochwasserrinne aus.

„Nach einem Hochwasser findet man, daß sämtliche Kiesbänke sich um ein annähernd gleiches Maß an demselben Ufer entlang, wo sie schon vorher lagen, stromabwärts verschoben haben.“ (*Jasmund* 1911 p. 350.) Beim sog. 'geraden Fluß' zeigt sich die Verteilung der Tiefen völlig unabhängig von der Grundrißform des Laufes. „Die Kiesbänke verfolgen auch am scharf einbuchtenden Ufer entlang fast ungestört ihre Bahn, und ebenso die Kolke auch am ausbuchtenden Ufer.“ (*Jasmund* p. 354f.) Auch bei Geschwindigkeitssteigerung bzw. -verminderung zeigt sich die Unabhängigkeit der wandernden Bänke der Hohlform des Flußbettes gegenüber. Wie *Döll* (1896) berichtet, vermehren und verkürzen sich die Bänke mit steigender Stromstärke, rücken näher aneinander, um sich dann bei abnehmendem Strom zu verlängern, weiter voneinander zu trennen und sich an Anzahl zu vermindern.

d) Mäandrierende Flußläufe: Die Gestaltung des Bettreliefs in der Vertikalen.

Die Bettgestaltung des sog. geraden Flusses, die wir als eine Form der Geschiebebewegung erkannten, kommt dadurch zustande, daß in einer mehr oder weniger geradlinigen, gleichförmig gestreckten rinnenartigen Hohlform wechselständige Geschiebebänke sich als selbständige Transportkörper abwärts bewegen. Die Hohlform selbst bleibt von dieser Differenzierung des Geschiebetransportes noch verhältnismäßig unberührt. Sowohl ihre Grundrißform wie auch das Längendiagramm der mittleren Sohlenhöhe zeigt noch annähernd eine gerade Linie. (*Jasmund* 1911 p. 354f.) Anders dagegen beim mäandrierenden Flußlaufe. Hier greift die Differenzierung über auf die Hohlform des Flußbettes selbst. Das Längenprofil des Talweges ebenso wie die Grundrißform des Laufes nehmen einen welligen Verlauf an, und zwar stehen beide Wellenlinien in einer festen räumlichen Be-

ziehung zueinander: Die Wellenform der Sohle spiegelt sich in der Krümmung wider. Die 'spezifische Krümmung' einer Laufstrecke wird geradezu zum Maßstab für die mittlere Tiefe des Talweges an derselben Strecke²⁾. Die Senkungen der Talweglinie entsprechen den Kolken oder Krümmungen, und ihre Erhebungen den 'Übergängen' oder geraden Strecken. Dank dieser festen räumlichen Beziehungen vermag sich die Bettform nur noch um sehr geringe Beträge abwärts zu verschieben, und zwar immer nur als Ganzes, d. h. einer Verschiebung der horizontalen Krümmungen entspricht zugleich eine Verschiebung der 'Tiefen' und 'Übergänge' um den gleichen Betrag. Doch vollziehen sich diese Verschiebungen so langsam, daß Krümmungen und Talweg als praktisch festliegend angesehen werden können. Während in geradlinigen Flußstrecken die wandernden Sandbänke das Flußprofil beständig verändern, sind die Ablagerungen an den konvexen Ufern der Mäander verhältnismäßig stabil³⁾.

²⁾ Jasmund 1911 p.225; p.222 u. ö. — Den unmittelbaren Zusammenhang zwischen der Gestaltung des Längsprofils und der gewundenen Grundrißform des Laufes erkannte als erster: Fargue (1868, 1878, 1884 u. ö.; s. a. Ders., *Hydraulique fluviale*, 1908) auf Grund eingehender Studien an der Garonne. Die Grundsätze Fargues wurden späterhin an der Elbe, Loire, Waal, Maas u. a. bestätigt gefunden. Es ist ein Genuß, unter Hinzuziehung der Meßtischblätter an Hand der synoptischen Kurven- und Tiefendiagramme diese durchgehende Gesetzmäßigkeit bei den einzelnen Flüssen zu verfolgen. Für die Garonne vgl. Fargue, *Ann. ponts et ch.* 1868, Atlas; = *Allg. Bauzeitung* 36, 1871, Atlas; für die Elbe: M. Weber 1898; für die Mosel: M. v. Tein 1905; für die Waal: C. A. Jolles 1918; L. R. Wentholt 1926; s. a.: *Protocoles et rapports du comité technique ayant effectué le voyage d'exploration sur le Rhin en 1924.* — Gerade ein vergleichendes Kartenstudium der Waal (1:5000 und 1:10000) in ihrer Bettgestaltung vor und nach den Regulierungsarbeiten von 1881, 1888, 1909 und 1925 vermag uns auch der Lösung der Frage näher zu bringen, die für die Beurteilung des Mäanderphänomens von entscheidender Bedeutung ist: Wie vollzieht sich und wie erklärt sich der Übergang des 'geraden' Flusses mit wechselnden Geschiebebänken in den 'mäandrierenden' Flußlauf, und umgekehrt?

³⁾ Durch vergleichendes Kartenstudium der Mississippiwindungen fand W. S. Tower (1904), „daß in den früheren Stadien des Mäanderwachstums ein schnelleres Talabwärtswandern stattfindet und daß mit zunehmendem Krümmungsbogen das Wandern abnimmt“. So ergaben auch die Beobachtungen Gg. Wagners (1920 p.25) an den voll ausgebildeten Windungen der schwäb.-fränk. Stufenlandschaft „kein so einfaches Flußabwärtswandern der Prallstellen“, wie es noch E. Scheu (1909) glaubte annehmen zu dürfen. Auf die 'relative Beständigkeit' der an Anzahl geringen Scheitelkolke des 'freien' Flusses im Verhältnis zu den zahlreichen und sich ständig verschiebenden Embryonalkolken des 'festen' Flusses weist auch H. W. Ahlmann (1914 p.45 u. p.70) hin; s. a. Supan 1916 p.522, Faber (zit. H. Engels 1921 p.333, vgl. Fig.246) fand diesen Gegensatz klar ausgeprägt an zwei aufeinanderfolgenden Rheinstrecken unterhalb von Basel. Die Festlegung des Talweges läßt sich mit Hilfe äußerer

Die Form der wandernden Düne wird abgelöst von relativ festliegenden 'rückenartigen Sohlenerhebungen', den sog. 'Übergängen' oder 'Furten', die vom unteren Ende eines konkaven Ufers ausgehend schräg durch den Strom sich zum oberen Anfang des konkaven Ufers der nächstfolgenden Windung hinziehen. Da die Form dieses wellenförmigen Rückens relativ festliegt, „bleibt das an der Oberfläche befindliche Geschiebe im allgemeinen an der Oberfläche und wird nicht wie bei den wandernden Kiesbänken jahrelang verschüttet“. (*Jasmund* 1911 p. 356.) Da die Verschiebungen des Horizontalprofils verhältnismäßig unbedeutend sind, ist auch die 'Wellenlänge' des Vertikalprofils nur unbedeutenden Veränderungen unterworfen. Dagegen ändert sich das Sohlenrelief in der Vertikalen je nach der augenblicklichen Wasserführung. Wie bei den Reibungswellen auf Sand und auf Wasser die Wellenhöhe das veränderlichste Wellenmaß ist, so auch hier: Die Wellenhöhe nimmt zu mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit. Die 'Übergänge' pflegen bei hohem Wasser sich zu erhöhen und bei Niedrigwasser sich auszulaufen. Umgekehrt pflegen die Kolke bei Hochwasser sich zu vertiefen und bei Niedrigwasser wieder aufgelandet zu werden. (*Jasmund* p. 356.) Da der mäandrierende Flußlauf im Vergleich zum geraden Flußlauf eine höhere Stabilitätsform darstellt, sind die Niedrigwassertiefen über den Furten oder Schwellen bei festliegendem Talwege stets größer als im beweglichen Talwege. Denn, wie wir noch zeigen werden, lastet beim mäandrierenden Flußlaufe die Aufgabe der 'Stabilisierung' nicht ausschließlich auf den Schultern der vertikalen Differenzierung, sondern sie wird zugleich von der horizontalen Differenzierung mit übernommen. Namentlich bei Feinheit des Geschiebematerials überwiegt die seitliche Erweiterung der Krümmungen, die Tiefe der Kolke ist nur unbedeutend und übertrifft nicht die Tiefe der geraden Strecken mit gleicher Breite. (*H. W. Ahlmann* 1914 p. 64.) In solchen Fällen erhalten wir gewissermaßen eine Hypertrophie der horizontalen Windungen gegenüber der vertikalen Gestaltung des Sohlenreliefs. Der vertikalen Differenzierung ist durch den Flußspiegel eine absolute Grenze gesetzt, sie ist also schon dadurch gegenüber der horizontalen Differenzierung benachteiligt. Zu einer 'Hypertrophie' der horizontalen Differen-

Faktoren, die für den Stromstrich gewisse Festpunkte schaffen, beschleunigen bzw. herbeiführen. Die Ausbildung einer 'Schutzdecke', das Bestehen eines einheitlich geschlossenen Bettes auch bei Hochwasser, geringe Veränderung der Erosionsbasis unterhalb der mäandrierenden Strecke wirken weiter begünstigend auf die 'Festlegung' des Talweges.

zierung kommt es ferner bei horizontaler Schichtung des Gesteins. „Die regelmäßig geschichteten Gesteine, vor allem des Hauptmuschelkalks, sind gegen Tiefenerosion ziemlich widerstandsfähig, weniger aber gegen Seitenerosion. Denn ersterer setzt eine härtere durchgehende Bank ein großes Hindernis entgegen, und oft ist das ganze Flußbett mit natürlichen Steinplatten gepflastert. Die Seitenerosion aber findet immer eine Schichtfuge, eine Schiefertonglage, ein dünnes Kalkbänkchen, wo sie einsetzen kann.“ (*Gg. Wagner* 1920 p. 27.)

e) Mäandrierende Flußläufe: Die Gestaltung des Bettreliefs in der Horizontalen.

Wenn wir bisher unser Augenmerk vorzugsweise auf die vertikale Gestaltung des Sohlenreliefs richteten, so war dies weniger objektiv als methodisch gerechtfertigt. In Wirklichkeit sind die vertikale und die horizontale Gestaltung der Ausdruck eines einzigen Vorganges. Trägt man mit *M. Weber* (1898) die kilometrische Krümmung k graphisch auf und vergleicht die hierbei erhaltene Kurve mit dem Tiefendiagramm des Talweges, so ergibt sich, daß zwischen diesen beiden Linien eine weitgehende Symmetrie stattfindet. Die Wahrscheinlichkeit ist also groß, daß die bei der Relativbewegung zwischen Wasser und Geschiebe eintretenden physikalischen Erscheinungen auch für die Grundrißgestaltung des Mäanderlaufes verantwortlich sind.

Rippeln und Dünen sind Transportkörper, die die Fortbewegung des Sandes durch den Wind (oder durch das Wasser) vermindern. Die sog. 'Reibungskraft' zwischen Wind und Düne ist geringer als die zwischen Wind und flach ausgeschüttetem Sande. Das Geschiebe lagert sich also so, daß die 'Reibungskraft' zwischen dem fließenden Wasser und dem Geschiebe geringer wird, daß beide Medien sich nicht mehr ineinander verkrallen und verzahnen (vergleichbar einer Egge, die über ein Ackerfeld gezogen wird), sondern mehr oder weniger glatt und unbehindert aneinander vorbeigleiten. Die Verminderung der 'Reibungskraft' geschieht zunächst auf dem Wege der Entmischung der beiden Medien in der Grenzzone (Verminderung der gegenseitigen Durchdringung, des 'Porengehaltes' des Geschiebes). Auf dem Rücken der 'Transportkörper' des Geschiebes ist diese Entmischung vollzogen, eine weitgehende Geschlossenheit der Grenzschicht ist hergestellt. Diese Geschlossenheit verhindert, daß das angreifende Medium in die Grenzzone eindringt. Die wellige Differenzierung ist also der formale Ausdruck dieser Ent-

mischungstendenz. Bei Medien, die sich in der Grenzzone nicht mischen, wie Luft und feuchter Sand, bleibt die Oberfläche ebenflächlich und undifferenziert. Die Geschlossenheit des Geschieberückens wird unterstützt durch Ausbildung einer Schutzdecke aus größerem Material, welche die Geschiebebewegung noch mehr verringert und zugleich den glatten Abfluß befördert. Eine relativ feste Lage des Talweges ist ihrer Ausbildung günstig (*H. Engels*).

Für die Größe der (äußeren) sog. 'Reibungskraft' ist entscheidend, ob ein Zusammenhaften der beiden Medien an der Berührungsfläche stattfindet. Bei gewissen Kombinationen, wie z. B. Luft — Öl, ist sie bei niedrigen Geschwindigkeiten sehr gering: Die beiden Medien gleiten aneinander ab, es kommt nicht zu scherenden Verzerrungen in der Grenzzone. Die Reibungskraft nimmt in diesem Falle mit der Geschwindigkeit zu. Dagegen zeichnen sich andere Kombinationen von Medien, wie z. B. Luft — Wasser, Luft — Sand, Wasser — Sand dadurch aus, daß bei geringer relativer Geschwindigkeit bzw. bei der Geschwindigkeit Null die Reibungskraft an der Berührungsfläche hohe Werte annimmt.

Nach *H. Engels* (1912) nimmt die 'Räumungskraft' des Wassers zu mit der Zunahme des Porengehaltes der Sohlenschicht. Ist der Porengehalt groß, so wird bei hoher Strömungsgeschwindigkeit die ganze Grenzschicht des Geschiebes mit in Bewegung geraten. Es ist aber klar, daß diese Arbeitsleistung des Wassers nur auf Kosten seiner Bewegungsenergie geschehen kann. Die Geschiebeführung ist also mit Bewegungsverlust des Wassers verbunden. Nach dem Gesetz des geringsten Widerstandes wird der Wasserabfluß deshalb seine größte Strömungsgeschwindigkeit in die Stellen des Flußquerschnittes verlegen, die diesen verzögernden Einwirkungen am wenigsten ausgesetzt sind. Da nun das Geschiebe, der Schwerkraft folgend, die tiefste Lage des Bettes aufsuchen muß, so werden die Stellen des ungehinderten Abflusses zunächst in der Nähe der beiderseitigen Uferwände sein müssen, denn die 'Räumungskraft' des Wassers auf die Uferwände ist nur sehr gering, folglich auch die Bewegungsverluste; das Wasser gleitet an den Seitenwandungen relativ ungehindert ab. Demzufolge würden sich also zwei Stromstriche ausbilden, die den Seitenwandungen anliegen würden. Hierzu kommt es jedoch nicht, da diese Zerteilung des Wasserabflusses mit Bewegungsverlusten verbunden wäre, die die erzielten Gewinne an Bewegung ohne weiteres aufzehren würden. Aus diesem Dilemma hilft sich nun der Fluß in der Weise, daß er einerseits die Einheitlichkeit und Geschlossenheit seines Stromstriches beibehält, andererseits diesen Stromstrich doch ab-

wechselnd den beiden Uferwandungen anliegen läßt. Würde der Stromstrich beständig nur einem Ufer anliegen, so würde dies eine einseitige Ablenkung der Wassermassen aus der Hauptfließrichtung bedeuten. Zu dieser Ablenkung bedürfte es aber wieder einer gewissen Energie, die dem Flusse ungenützt verloren ginge. Es wird deshalb nur dort zu einer einseitigen Abfluß-Asymmetrie bzw. zu einer ungleich starken Ausbildung der beiderseitigen Prallstellen kommen, wo die Energie hierzu dem Flusse von außen geliefert wird, also etwa durch die ablenkende Wirkung der Erdrotation. — Durch das Überwechseln des Stromstriches halten sich die beiderseitigen Abweichungen von der Hauptrichtung der Flußachse gegenseitig die Wage. Die mit einer Pendelbewegung verbundenen Energie- und Bewegungsverluste sind bekanntlich nur gering.

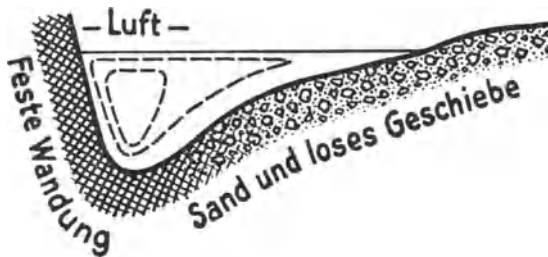
Die Form, in der sich die Pendelbewegung vollzieht, scheint unsere Theorie zu stützen: Der Stromstrich eilt quer über den 'Übergang' oder die 'Furt' in stumpfem Winkel auf das Ufer zu, folgt dann stets eine Strecke lang dem Ufer, um sich dann wieder mit einem stumpferen Winkel von ihm abzuwenden. Besonders beim geraden Fluß zeigt die Tiefenlinie oft scharfe Knicke, sie liegt streckenweise hart einem Ufer an, um dann plötzlich quer aufs andere Ufer überspringen⁴⁾.

Fassen wir nunmehr die beiden gegensätzlichen Profile ins Auge, zwischen denen der Wasserabfluß beim mäandrierenden Flusse ab-

⁴⁾ Vgl. z. B. Calciati 1909 p. 118: „Le courant s'acharne (contre la rive) et suit le paroi pendant un certain trajet, de manière que le sommet de l'angle d'incidence et le sommet de l'angle de réflexion se trouvent séparés par une distance qui peut être de 100 et 400 mètres décrivant une courbe.“ Siehe auch H. Engels 1921 Fig. 242. — Der Vergleich mit der Pendelbewegung einer „prallenden“ Kugel oder eines hin und her reflektierten Strahles ist also ganz unzutreffend. Ebenso wenig hat die Form der einzelnen Flußwindungen irgend etwas zu tun mit bestimmten geometrischen Formen (Kreisform! Sinuslinie!). Um festzustellen, ob die Windungen die richtige, ihnen zukommende Form haben, ob sie also störungsfrei entwickelt sind, steht uns kaum ein anderes Mittel zur Verfügung, als uns in das dynamische Kräftespiel einer größeren Flußstrecke einzufühlen und zu sehen, ob es 'rhythmisch' verläuft. Selbst die starken Größenschwankungen der Windungen, oder das häufig zu beobachtende 'Umschlagen' der Krümmungsscheitel nach innen (mittlere Ahr!) und andere geometrische 'Unregelmäßigkeiten' werden dann unter Umständen als gesetzmäßige Bestandteile des rhythmischen Gesamtbildes erscheinen. Um die Form der Windungen zu charakterisieren, bedarf es mindestens zweierlei Angaben: 1. der Größe der Windung (groß—klein); 2. des Krümmungsgrades, ausgedrückt durch die mittlere kilometrische Krümmung (scharf—flach). Große Windungen können flach, kleine Windungen können scharf sein, usw. Die Kreisform ist nur ein geometrischer Sonderfall in dieser Formenmannigfaltigkeit.

wechselt: das Querprofil des Kolkes und das Querprofil des 'Überganges', und sehen wir zu, inwiefern in beiden Fällen die Relativbewegung der zwei Medien Wasser und Geschiebe an ihrer gemeinsamen Grenzfläche 'stabilisiert' worden ist!

1. In den Kolken, d. h. am Scheitel der Krümmungen, liegt der Stromstrich der festen Wandung hart an. Der Wasserabfluß vollzieht sich hier ungehindert. Des Geschiebes hat sich der Fluß in der Weise entledigt, daß er es zur Seite geschoben hat. Einerseits hat das Geschiebe dort eine stabile Lagerung angenommen, andererseits hat sich die Strömung von dem Geschiebe zurückgezogen. Auch beim 'geraden' Flußlauf wird das Geschiebe nicht im Talweg vorwärts



Schematischer Querschnitt am Krümmungsscheitel.

bewegt, sondern der Talweg ist die Rinne für das Wasser, während das Geschiebe nebenan in den Bänken stromabwärts wandert. (*H. W. Ahlmann* 1914. p. 38.) — Wie durch die vertikale Differenzierung das Geschiebe sich auf den Rücken der 'Übergänge' anlagert, so findet durch die horizontale Differenzierung eine starke Anlandung an der Innenseite der Krümmungsscheitel statt; dort wird der Flußquerschnitt von unten, hier von der Seite her durch das Geschiebe stark eingengt. (Vgl. unten *W. S. Tower*.) Sowohl in der Grenzzone des Geschiebes wie an der Oberfläche der festen Wandung sind deshalb die Verlagerungen durch scherende Differentialbewegung nur gering. Die reibende Einwirkung der Medien aufeinander ist vermindert, sie gleiten verhältnismäßig glatt aneinander ab. Besteht die feste Wandung aus anstehendem Fels, so gilt also hier der alte Erfahrungssatz zu Recht: „Les roches attirent les eaux.“ („Essai sur la théorie des torrents et des rivières“ par le citoyen *Fabre*. Paris. An VI (1797) p.105; zit. *J. Rein* in *Pet.Mitt.*1896 p.129ff.) Der Stromstrich liegt ferner nicht unmittelbar an der Oberfläche des Wassers (vgl. Kap. „Der Fließvorgang“!), da die sog. Reibungskraft zwischen Wasser und Luft ebenfalls hoch ist.

Die ungleichen Reibungswiderstände sind es also, die den Stromstrich aus seiner indifferenten Mittellage verdrängen. Die Erosion des Steilufers in der konkaven Flußstrecke ist erst eine sekundäre Folgeerscheinung des engen Anliegens des Stromstriches. Es ist schon ein gedanklicher Abweg, wenn man dem Flusse etwa die 'Tendenzen' zuschreiben wollte, zu erodieren, um seine Windungen zu erweitern. Eher läßt sich sagen: Der Fluß erkaufte seinen 'stabilen' Abfluß längs der festen Wandungen mit einer immer stärkeren Abweichung von der Hauptgefällsrichtung infolge der (unbeabsichtigten) Erweiterung der Schlingen. Das Wachstum der Mäander wird also so weit gehen, bis durch die Laufverlängerung die Strömung über dem Bettmaterial in der Krümmung so schwach geworden ist, daß zur Herstellung der 'Stabilität' nur eine geringe Abweichung des Stromstriches aus der indifferenten Mittellage genügt — oder bis die durch die Abweichung von der Zugrichtung der Gravitation geschaffene latente Spannung sich bei Hochwasser in einer Geradelegung plötzlich und gewaltsam löst.

Sehen wir von diesem Falle ab, so ist es wiederum eine Bestätigung unserer Theorie, wenn wir sehen, daß gerade bei Hochwasser, also bei hoher Strömungsgeschwindigkeit und lebhaftem Geschiebetransport, der Stromstrich den festen Wandungen besonders eng anliegt, daß die vertikale und die horizontale Differenzierung sich verschärft. Allerdings können infolge der vergrößerten Wassermasse die angesammelten Verlandungen niedrigerer Wasserstände zum Teil abgetrieben werden (*Jasmund* 1911 p. 181), im übrigen arbeitet das Hochwasser jedoch lebhaft an der Vertiefung und Verschärfung der Kurven. „Bei steigendem Wasser gewinnen die Wirbel in den gekrümmten Stromstrecken an Kraft und vertiefen hier das Bett, während auf den Übergängen sich unter Verminderung des Gefälles Auflandungen bilden. Bei fallendem Wasser vertiefen sich dagegen wieder die Übergänge und landen die großen Tiefen in den Krümmungen auf.“ (*Jasmund* p. 356.)

Ist unsere Theorie richtig, so muß die relative Beschaffenheit von Flußgeschiebe und Ufermaterial auf Eintritt oder Nichteintritt des Mäandrierungsvorganges einen entscheidenden Einfluß haben. Dies ist auch wirklich der Fall. Nach den Feststellungen von *v. Lóczy* und *Cholnoky* (1907) bilden diejenigen Flußstrecken Mäander aus, deren Geschiebe leichter beweglich ist als das Ufermaterial. Ist dagegen das Geschiebe größer und schwerer beweglich als das Ufermaterial, so rückt der Stromstrich von den Ufern ab, behält seine Mittellage und strömt so nicht neben, sondern dicht über das relativ 'stabile' schwere Geröll, das sich in Form von 'Untiefen' im Flußbett verteilt oder Flußteilungen hervorruft.

2. Werfen wir nun einen Blick auf das Querprofil des 'Überganges' (der 'Furt'), so sehen wir auch hier die Grenzzone der beiden Medien stabilisiert. Zwar hat der Stromstrich hier keine Möglichkeit, vom Geschiebe abzurücken, er liegt vielmehr dem Geschiebe dicht auf, aber gerade hier hat das Geschiebe die Schutzform des rückenartigen Walles angenommen, die gegebenenfalls noch durch eine 'Schutzdecke' aus größerem Material gepanzert ist. —

f) Schlußbemerkung.

Der schlagendste Beweis für die Richtigkeit unserer Theorie wäre der experimentelle Nachweis der 'spontanen' Entstehung eines Mäanderlaufes aus einer zunächst geraden und in der Gefällsrichtung liegenden Laufstrecke, bzw. unterhalb einer geraden und in der Gefällsrichtung liegenden Einlaufstrecke, wenn kein Bett vorgebildet ist. Es würde sich dann zeigen, ob die Mäanderbildung 'zufälligen' äußeren Störungen oder aber einer immanenten Gesetzmäßigkeit gehorcht. Das Experiment würde auch den Nachweis erbringen können, ob, wie bei den anderen rhythmischen Phänomenen, eine 'Selbstregeneration verletzter Teile' stattfindet. Beobachtungen bei Flußkorrekturen lassen dies bereits vermuten. „Ein zum Serpentieren neigender Strom beharrt in dem Streben, nach Ausschaltung einer Windung die benachbarten Windungen in erhöhtem Maße auszubilden.“ (*Jasmund* 1911 p. 163; Beispiele vom Niederrhein: Ders., Die Arbeiten der Rheinstrombauverwaltung 1851—1900.) Die regulierte Theiß neigte schon sehr bald wieder zur Verwilderung. „Zahlreiche Durchstiche bei Tokay, die ursprünglich gerade gelegt waren, haben sich heute zu echten Mäandern entwickelt.“ (*Vujevic* 1906.) Die 1875 bei Wien zu einem geraden Lauf regulierte Donau wies nach *Wex* schon 1880 fünf Bogen auf. *Minard* erzählt (nach *G. Hagen*, Handb. d. Wasserbaukunst, 1853. I, 2. p. 346), daß die Oise an einer regulierten Laufstrecke die Ufer des Kanals dermaßen zerstörte, daß sie endlich durch fortgesetzten Abbruch wieder genau in das alte Bett zurückkam. — Man sieht: auch der Natur erscheint die gerade Linie nicht immer als der kürzeste Weg zum Ziele. —

Wir erheben nicht den Anspruch, die „äußerst merkwürdige Erscheinung der Flußmäander“ (*F. M. Exner*) restlos geklärt zu haben. Sehr viele Fragen harren noch der Lösung. Die Frage, wieweit auch äußere Faktoren an dem Vorgang der Mäandrierung beteiligt sein können, wurde von uns nur gestreift. Die Diskussion der verschiedenen bisherigen Erklärungsversuche wird uns noch in einem besonderen Kapitel beschäftigen. Es ist überhaupt zweifelhaft, ob das Mäander-

problem mit Hilfe der physikalischen Methode allein zu lösen ist. Es scheint vielmehr gerade hier ein Fall vorzuliegen, wo die geographische Methode der physikalischen zu Hilfe kommen muß. Ein eingehendes Studium der Verbreitung der Mäander wird uns den Einfluß der einzelnen Faktoren besser erkennen lassen als rein physikalische Überlegungen, die sich vorläufig nur auf ein unvollkommenes Beobachtungsmaterial stützen können. Die Mäanderbildung ist keineswegs so allgemein verbreitet, wie man zunächst anzunehmen geneigt ist. „Bei benachbarten Flüssen gleicher Entwicklungsgeschichte hat vielfach der eine Fluß Mäander, der andere nicht, und an ein und demselben Fluß wechseln Mäander- und geradlinige Strecken mehrfach miteinander ab, ebenso Zwangs- und Gleitmäander. Während ablagernde Flüsse . . . fast immer mäandern . . ., kommt es bei vielen eingeschnittenen Flüssen und Flußstrecken überhaupt nicht zur Mäanderbildung . . .“, usw. (*Philippson* II, 2. 1924. p. 103 ff.) Um zu gesicherten Ergebnissen zu gelangen, wird es sich deshalb empfehlen, die Mäanderbildung zunächst einmal innerhalb eines größeren gleichartigen Gebietes zu untersuchen, dessen geologische Vorgeschichte außerdem schon hinreichend geklärt ist. (*Philippson* a. a. O.) Eine solche Untersuchung wird ihr Augenmerk besonders auf die relative Beschaffenheit des Geschiebe- und Ufermaterials richten müssen. —

In den beiden nächsten Kapiteln werden wir die Wirksamkeit der 'Entmischungstendenz' der gemeinsamen Grenzschicht unter andersgearteten Bedingungen kennen lernen. Während bei den bisher besprochenen Erscheinungen der Fall der 'parakinetischen' Relativbewegung, d. h. der Bewegung zweier Medien 'aneinander vorbei', vorlag, haben wir es bei den nun zu besprechenden Erscheinungen des Büßerschnees und des Strukturbodens mit einer 'diakinetischen' Relativbewegung zu tun, d. h. mit einer 'ineinander' und 'durcheinander' gerichteten Bewegung zweier Medien. Diese besondere Art der Bewegung führt auch zu einer besonderen Form der Selbstdifferenzierung. —

IX.

Büßerschnee.

Als zu Ende des vergangenen Jahrhunderts Forschungsreisende die erste Kunde von den eigentümlichen Schmelzformen der tropischen Schneefelder und Gletscher zu uns herüberbrachten, wußte man mit

diesen Formen noch nicht viel anzufangen. Heute liegen jedoch genügend zuverlässige Beobachtungen von den verschiedensten Stellen vor, so daß eine zusammenfassende Klärung des Phänomens bereits mit Erfolg unternommen werden kann.

An den Osthängen der argentinischen Kordilleren, wo man die Schmelzformen zuerst kennen gelernt hat, führen sie im Volksmund den bezeichnenden Namen *Nieve Penitente*, d. h. Büßerschnee. Ausgedehnte Schneefelder sind hier in parallele, 1½ bis 2½ m hohe Figuren verwandelt. Von ferne betrachtet nehmen sie sich wie ein Chor stehender oder knieender, in weiße Schleier gehüllter Frauengestalten aus. „Figur — so schildert sie *Güßfeld* — reiht sich an Figur, jede hoch und starr aufgerichtet, übermenschlich groß, eine jede von ihrem Nachbar verschieden, und alle scheinen, versteinerten Sündern gleich, auf ein erlösendes Zauberwort zu harren.“ (*Supan*.)

Terminologie. Die Subsumierung der rhythmischen Schmelzgebilde unter die Bezeichnung 'Büßerschnee' hat vielfach Anstoß erregt. Denn man findet den sog. 'Büßerschnee' kaum auf Neuschnee, häufiger auf Altschnee, in seiner typischsten Ausbildung aber auf *Firn*. (*J. Früh* 1915; *Hans Meyer* i. Zs. Ges. f. Erdk. 1908 p. 98.) Nach *Reichert* (1909/10 p. 349) wird durch die Verfirnung „eine für spätere Modellierung geeignete Konsistenz“ geschaffen. Eis entwickelt, wie *Workman* (1913/14 p. 289ff.) hervorhebt, ganz entsprechende Formen; sie bedecken in charakteristischer Ausbildung alte Gletscherfelder. — Der Name 'Penitente' (ohne den Zusatz 'Nieve', in Anknüpfung an die Nebenform 'los penitentes') bietet sich als einzige generelle neutrale Bezeichnung; sie legt sich nicht willkürlich fest auf bestimmte Formen, wie 'Schmelzkegel' (*Spethmann*), 'Furchenfirn' (*Keidel*) und 'Zackenfirn' (*Hans Meyer*, nach *v. Thielmann* und *R. Schäfer*), auch nicht auf ein bestimmtes Material, wie 'Büßerschnee' und 'Zackenfirn' bzw. 'Zackenschnee' (*Fritz Jäger*).

Streckung und Neigung der Formen. Ein auffallendes Merkmal der 'Sonnenpenitentes' ist die Streckung aller Formen, sowohl der hohlen als auch der erhabenen, in derselben Richtung. „In ungestörter Parallelität und Richtung ziehen die Kämme über alle Unregelmäßigkeiten der Oberfläche hinweg. . . In allen Fällen, an mehrere Kilometer entfernten Stellen maß ich stets die gleiche Richtung.“ (*Fritz Jäger* 1909 p. 175.) Durch diese gleichmäßige Streckung aller Einzelformen kann zuweilen bei flüchtiger Betrachtung der Eindruck entstehen, als wären Reihen vorhanden. (*Keidel* 1914.) In niederen Breiten, und zu einer Jahreszeit, wo die Sonne eine der Breite gleichsinnige und etwa gleiche Deklination hat, ist die Streckung eine ausgesprochen west-östliche, in anderen Fällen weicht sie mehr oder weniger von

dieser Richtung ab. So stellte *Hauthal* (Zs.Ges.f.Erdk.1908 p.108) am Osthang der argentin. Kordillere durchgehend Nordwest-Südost-Verlauf fest; denn „die Sonne übt in diesen Gegenden eben dann ihre stärkste Wirkung aus, wenn sie am nordwestlichen Himmel steht“. Allgemein dürfen wir sagen: die Streckung der Hohl- und Vollformen ist eine solche, daß die Verteilung der Bestrahlungsintensität über die Form hin während des ganzen Verlaufs der (stärksten) Insolation möglichst gleichmäßig (unverändert) bleibt. Diese Bedingung ist um so mehr erfüllt, „je längere Zeit die Sonne jeden Tag nahe der Halbierungsebene des von den beiden Abhängen der Rinne gebildeten Winkels bleibt und je höher sie dabei steht. Das ist offenbar in niederen Breiten der Fall, besonders im Sommer der betr. Halbkugel, weil dann die Sonne hoch kulminiert und in der Nähe der Kulmination ihr Azimut besonders langsam ändert; es gilt ferner umso mehr, je mehr die Vertiefung ostwestlich verläuft. So würde unter dem Äquator zur Zeit der Tag- und Nachtgleiche die Sonne in einer genau von Osten nach Westen streichenden Rinne mit vertikalen Wänden den ganzen Tag hindurch nur den Boden bestrahlen“. (*Ad. Schmidt*, Zs. Ges. f. Erdk. 1908 p. 107.) Die Schmelzformen können also geradezu als 'Sonnenscheinautogramme', 'Heliogramme' bezeichnet werden. (*J. Früh* 1915 p. 423; vgl. auch die Ausführungen von *Keidel* 1909/10.) — „Runde Hohlformen kommen zustande durch Verhüllung der Sonne morgens und abends hauptsächlich eine Streckung, wenn die Sonne um die Mittagsstunde verhüllt wird, wie dies in tropischen Gegenden häufig der Fall ist. Im ersten Fall ist das Ergebnis eine Pyramidenform, im zweiten mehr eine Kammform, wobei Übergänge jeder Art vorkommen.“ (*Klute* 1914/15 p. 303.)

Das Prinzip der unveränderten Bestrahlung kommt auch in der Größe des Einfallswinkels der Wände der Kämme und Zacken zum Ausdruck. Nach *Keidel* läßt sich ein „Einfallen polwärts“ feststellen. „Alle Formen, die vor den Herbstäquinoktien entstanden waren“, so berichtet *Klute* (1914/15 p. 289ff.) vom Kilimandscharo, „fielen nach Süden ein, unter einem Winkel, der dem der Sonnenstrahlen entsprach“. Die Sonnenpenitentes auf dem Tschingelfirn im Berner Oberland, die *Fritz Jäger* (Zs. Ges. f. Erdk. 1908 p. 102) beobachtete, „hatten alle Charakteristika der Kämme am Kilimandscharo ... Aber sie waren viel stärker geneigt, sie lagen viel schräger, so ungefähr 45° und nach Süden überhängend. In beiden Fällen standen also die Kämme in der Richtung der mittäglichen Sonnenstrahlen, so daß diese in die Rinnen zwischen den Kämmen bis auf den Grund hineinscheinen“.

Formtypen. Wie bereits bemerkt, bilden sich je nach der Ver-

teilung der stärksten Insolation über den Tag hin im einen Fall langgestreckte Furchen und Kämme, im anderen Fall von vorneherein einzelne Zacken aus. Es muß also davor gewarnt werden, die beobachteten Formtypen ohne weiteres untereinander zu einer genetischen 'Entwicklungsreihe' zu verbinden. Es ist vor allem zu beachten, daß bisher fast nur Momentbeobachtungen vorliegen; selbst wo diese sich auf ein und dieselbe Schneefläche beziehen, sind sie für gewöhnlich stichprobenartig über Zeiträume von Monaten oder gar Jahren hinweg angestellt; die sukzessive Ausbildung der Formen von den ersten Anfängen bis zur vollen Entwicklung wurde kaum jemals kontinuierlich verfolgt.

1. Der schalenförmige Typus. „Schalenartige Hohlformen, die im Durchschnitt Spannengröße erreichten, während ihre Tiefe nur wenige Zentimeter maß“, fand *Spethmann* (1909/10) auf dem Kamme des Riesengebirges. Sie treten nicht einzeln, sondern stets gesellig in Gestalt eines Feldes auf. Sie sind auch in den Alpen eine bekannte Erscheinung. Von „Riesen-Firnschalen“ berichtet *J. Fröh* (1915 p.424, vgl. Taf.55 Abb.2!): „Die kräftige Strahlung auf Firne des Mt. Rainier (46° 40' N., Washington, USA) erzeugt dort mehr als 30 cm breite und tiefe, wasser- und staublose, in scharfen Graten sich berührende 'snow cups and honey combs', ohne Umformung zu parallelen Furchen und Kämmen oder gar solitären Figuren.“

2. Der Furchentypus. In den Alpen beobachtete *J. Fröh* (a.a.O.), wie die Sonne die Schneeoberfläche „in unregelmäßigen Linien“ angriff. „Das schienen mir die ersten Versuche zu sein.“ Die Furchen sind nach der Ansicht *Keidels* (a.a.O.p.181) „die wirklich gesetzmäßig begrenzten morphologischen Elemente des Büßerschnees“. „Die Furchen sind verschieden groß, aber die Furchen gleicher Größe sind ziemlich regelmäßig über die Schneedecke verteilt.“ Rhombenförmige Vertiefungen, wie man sie zuweilen beobachtet, stellen Übergänge zur Napfform dar.

3. Der Nadel- und Pyramidentypus. Hier ist die Vollform von vorneherein das Primäre. *Fritz Jäger* (a.a.O.p.176) erwähnt kleine, 1—3 cm hohe Eisnadeln auf Gletschern. *Workman* (1908/09 p.267) beobachtete auf einem Fleck von 7×4 m im Geviert „diminutive pyramids, beautifully shaped, in longitudinal rows orienting from south to north. Those at the upper end were about 10 cm high, but they diminished in height with the slant [Neigung] of the bed, until at the lower (north) end they were only 2 cm high“. Als Beispiele extremer Größenklassen führt *Workman* (1913/14 p. 292 f.) an: „The feathery pinnacles only a few centimetres high traced by the sun's action in new fallen snow — the considerably larger penitente-projections formed from névé — the gigantic pinnacles of sérac-penitente

ten metres or more in height.“ Auch die von *Spethmann* (1907/08) aus Island beschriebenen „Schneeschnitzkegel“, sowie die Pyramiden der von *Hauthal* (vgl. Zs. Ges. f. Erdk. 1908 p.110) bereiten Penitentesfelder scheinen von vorneherein als Vollform aufzutreten, ohne den Umweg über ein Schalen-, Kamm- und Furchenstadium zu nehmen. —

Der Vorgang der Penitente-Bildung geht während der ganzen 'Vegetationsperiode' der Penitentes ununterbrochen vor sich. Alte und junge Formen finden sich nebeneinander. Ist der Abschmelzvorgang soweit fortgeschritten, daß die gestreckten Kämme keine hinreichende 'Schutzform' mehr darstellen, d. h. daß dem Minimalprinzip mit dieser Form nicht mehr genügt wird (vgl. den Übergang vom Dünentypus zum Barchantypus!), so kommt es auch in den Kämmen selbst zu rhythmischer Differenzierung, die K ä m m e lösen sich in Zacken auf. Der Gedanke einer 'zyklischen Formenentwicklung' (Entwicklungsprinzip!) ist auch hier durchaus nicht am Platze. „Wo ich Büber-schnee gesehen habe“, sagt *Hauthal* (Zs. Ges. f. Erdk. 1908 p.110), „da erhielt ich den Eindruck, daß sich nicht erst parallele Kämme bilden, sondern daß von Anfang an einzelne isolierte, in parallelen Reihen stehende Spitzen sich herausbilden.“ Vom Kilimandscharo hatten dagegen schon *Hans Meyer* (1900 p.363) und nach ihm *Fritz Jäger* (1909 p.176) berichtet, daß die Zacken aus den parallelen Kämmen des Karrenfirns herausgeschnitten werden, was *Khute* (1914/15 p.299) am Mawensi bestätigt fand. „Die tiefer gelegenen (Penitentesfelder) waren meist schon in Zacken umgeformt, während die höher gelegenen und damit später entstandenen erst als Kämme und Leisten entwickelt waren. Doch kamen auch auf einem Schneefeld verschiedene Formen nebeneinander vor.“ „Auffällig waren — so berichtet *J. Früh* (1915 p.425) — die nachfolgenden Umformungen der Kämme durch Scharten zu einer Sierra, einer 'spitzzahnigen Säge' (*F. Jäger*). Immer tiefer greifen die Scharten bis zur Reduktion des Kammes auf — das ursprüngliche Streichen andeutende — Verbindungsstücke von Tausenden von Solitärgebilden von 1—5—6 m Höhe.“ Die peripheren Partien sind dabei gewöhnlich am reifsten entwickelt. Auf großen Zacken bilden sich wieder kleinere Einkerbungen. — Da die Zackenreihen weiter auseinanderstehen als die Kämme im Anfangsstadium, so findet nach der Vermutung *Jägers* (1909 p.181) eine gesetzmäßige Herausnahme von Zwischenkämmen durch Abschmelzen statt.

Theorie.

„Die Schwierigkeit des Problems liegt... in der Frage, warum bilden sich überhaupt von Anfang an

einzelne Figuren, warum schmilzt nicht die gesamte Schneeeismasse gleichmäßig ab?“ (*Hauthal* 1903 p.128.) „Warum werden die Schalen mitsamt den sie trennenden Kämmen nicht gleichmäßig niedergeschmolzen? Warum werden die Bodenstücke der Schalen immer tiefer, während die Käme zwischen ihnen viel länger stehen bleiben und nur relativ langsam in einzelne Pyramiden zerfallen, die sich noch lange allein aufrecht erhalten?“ (*Hans Meyer* i.Zs.Ges. f.Erdk.1908 p.105.)

Eine wichtige Tatsache hat vor allem bei der bisherigen Forschung nicht genügende Berücksichtigung gefunden: Es läßt sich zeigen, daß es sich bei den Penitentes um ein Diffusionsphänomen handelt, und zwar um Diffusion von Schmelzwasser in Firn (bzw. Schnee oder Eis). Die Voraussetzung für eine Anwendung unserer Theorie der rhythmischen Phänomene ist hiermit gegeben: Als Folge der Ineinanderbewegung zweier Medien kommt es innerhalb ganz bestimmter Grenzbedingungen zur Entstehung von über den Raum hin rhythmisch verteilten Oberflächenspannungskörpern, d. h. zu Gebildeformungen, mit denen ein Minimum an innerer Bewegung verbunden ist.

Eine völlig glatte und homogene Firnfläche sei bei trockener Luft und niedriger Temperatur einer gleichmäßigen Bestrahlung ausgesetzt. Eine ebenso gleichmäßige Verdunstung und Erniedrigung der Firnfläche an jeder einzelnen Stelle müßte die Folge sein. Dieser logisch-deduktive Schluß wird jedoch von der Erfahrung widerlegt, nicht dank der Mangelhaftigkeit und Unvollkommenheit unseres 'Kosmos', in dem streng mathematische Regelmäßigkeit und Gleichmäßigkeit nur selten verwirklicht ist, und in dem die Bazillen 'minimaler Unregelmäßigkeiten' allerorten ihr willkürliches Spiel treiben, sondern dank des gesetzmäßigen Auftretens des Elementarvorganges der rhythmischen Differenzierung. Das gleichmäßige Übereinander verwandelt sich auch hier nach und nach in ein rhythmisches Nebeneinander. Während zwischen den Pyramiden sich der Firn bis auf den Grund wegschmelzen läßt, erhärtet er im Inneren der Pyramiden, besonders an ihrer Spitze, zu dem widerstandsfähigsten Eis. „The central portion of each (pinnacle), even when softened by the sun, was much denser than the outer surface or than the surrounding névé.“ (*Workman* 1907/08 p.22.) „All pinnacles, even the smallest, were composed of very hard compact ice, destitute of air bubbles, and breaking with a vitreous fracture, quite different from the soft aerated ice around them.“ (*Ders.*, 1908/09 p.261.) Es bilden sich also spontan (d. h. nicht lokal-kausal bedingt) rhythmisch verteilte „centres or foci of special density“ aus, die durch immer erneutes Angefrieren anwachsen, in dem Maße wie rings umher die Abschmelzung fort-

schreitet. „Die Spitze oder der Kamm der Firnzacken besteht aus viel dichterem Eis als die übrige Firnmasse der Zacken. Es wird stärker vom Schmelzwasser durchtränkt und friert in der Kälte der Nacht zu kompaktem Eis, ein Vorgang, der sich täglich wiederholt, so daß der Eiskopf in steter Erneuerung auf der Kulisse oder der Einzelpyramide erhalten bleibt, bis diese selbst dem Erdboden gleichgemacht ist. „Die Eiskrönung der Firnpyramiden wirkt also auf den darunter liegenden weniger kompakten Firn schützend, wie der Deckstein auf einem Gletschertisch oder einer Erdpyramide.“ (*Hans Meyer* i. Zs. Ges. f. Erdk. 1908 p. 105.) Der Abschmelzprozeß dauert nach wie vor an, aber die Insolation holt dann nicht mehr die verdunstenden Partikelchen einzeln auf dem Wege der Diffusion aus dem Inneren des Firns heraus, sondern greift kompakte Oberflächen an. Die inneren Bewegungen sind somit, in Richtung nach der Spitze der Pyramiden hin, in zunehmendem Maße auf ein Minimum reduziert. Das Schmelzwasser vermag sich dank der Minimaltendenz zu seinesgleichen zu flüchten. Eng beieinandergepfercht, in extremster 'Kompaktheit' harren die Schmelzpartikelchen da ihres Schicksals. Ihre enge Zusammenscharung ist ein eiserner Wall für die angreifenden Sonnenstrahlen, die wohl noch die peripheren Teile abschmelzen, aber nicht mehr durchgängig innere Bewegungen veranlassen können. Die Streckung und das 'Einfallen' der Formen ist deshalb auch so beschaffen, daß der Minimaltendenz während des ganzen Verlaufes der (stärksten) Insolation in möglichst unveränderter und möglichst gleichmäßiger Weise genügt wird. Der Nachweis der Richtigkeit dieser Überlegungen soll nun im einzelnen angetreten werden.

1. Es müssen die Vorbedingungen für Diffusion im strengen Sinne des Wortes gegeben sein. Nur in trockenem Firn oder Schnee vermag Schmelzwasser in flüssiger oder verdunsteter Form zu diffundieren. Die Verschiedenheit der beiden Medien muß so ausgeprägt sein, daß von 'Oberflächenentwicklung' und gleitenden 'Reibungsvorgängen' im Inneren gesprochen werden kann. Der Schnee wird trocken gehalten durch Lufttrockenheit und niedrige Temperatur. Tritt eine feuchtere Periode ein, so wird der Schnee feucht und naß und die Büßergestalten schmelzen dahin. Auch Nebel wirkt strahlenverhüllend, schmelzend und anlagernd. In der Tat fand *Kafner* (1915), als sich bei Zusammentreffen besonders günstiger Umstände (lange Frostperiode, anhaltend trockenes, sonniges Wetter) bei Sofia Büßerschnee entwickelte, „die Schneedecke innerlich pulverig-trocken“. *Klute* (1916/17) nennt als Entstehungsbedingungen der von ihm unter entsprechend günstigen Umständen beobachteten Vorkommnisse im Schwarzwald: „geringe Lufttempera-

tur, geringe Luftfeuchtigkeit, besonders zur Zeit der Erwärmung über Mittag, sowie Wolkenlosigkeit und starke Ein- und Ausstrahlung. Sobald einer dieser Faktoren fehlt, ... tritt keine Weiterbildung des Büßerschnees ein, sondern Zerstörung der Formen durch Schmelzung.“

2. Bei der Bildung des echten Büßerschnees handelt es sich weniger um einen Schmelz- als um einen Verdunstungsprozeß. „Das Abschmelzen des Schnees darf nicht durch die Luftwärme, sondern muß hauptsächlich durch die Strahlungswärme geschehen. Dabei muß die Trockenheit und Verdampfungskraft der Luft so groß sein, daß der größte Teil des geschmolzenen Schnees in Dampf- form übergeht.“ (*F. Klute* 1914/15 p.305.) Am Kilimandscharo „wird der Schmelzprozeß häufig bei Lufttemperaturen unter 0° allein durch die Strahlungswärme verursacht“ (p.302). „Auch um die Mittagsstunden schwankt das Thermometer hier nur um den Nullpunkt. Doch gefriert das durch die Strahlung verursachte Schmelzwasser trotzdem nicht, sondern wird von der trockenen Luft sofort aufgenommen, eine Erscheinung, die auch bei großen Kältegraden in Sibirien beobachtet wurde, wo nasse Kleidungsstücke bei tiefen Temperaturen unter 0° trocknen (nach *Hann*)“ (p. 300)¹⁾. Anhaltend trockenes Strahlungswetter und starke Verdunstung hält auch *J. Früh* (1915) für die wesentlichsten Faktoren. Am Kibo konnte *Fritz Jäger* (1909 p.177) „direkt beobachten, wie die Kämme bei klarem Wetter von einem Tag zum anderen größer wurden“. Als *Jäger* (*Zs.Ges.f.Erdk.*1908 p.102) auf dem Tschingelfirn im Berner Oberland Sonnenpenitentes entdeckte, „war die letzten Tage stets schönes klares Wetter gewesen“. (Übereinstimmend *R. Neumann* 1908/09.)

3. Der Büßerschnee erweist sich auch insofern als reines Verdunstungs- und Diffusionsphänomen, als bei niedrigen Temperaturen die verdunstende Wirkung der Ausstrahlung dieselbe Rolle zu spielen scheint wie die der erwärmenden Einstrahlung. „Der Büßerschnee findet sich in Breiten und in Höhen, wo die Nachttemperatur stets, oft sehr bedeutend, unter 0° sinkt.“ (*Hauthal* 1903 p.128.) „Die große Ausstrahlung in kalten Nächten der Hochregionen wird eine fast ebenso große Rolle spielen wie die Einstrahlung bei Tage.“ (*Hellmann*,

¹⁾ Keidel (1909/10 p. 111) und *Hauthal* (*Zs.Ges.f.Erdk.*1908 p.95ff.) trafen am Osthange der argentinischen Cordilleren die bestentwickelten Formen in Lagen, die vor den herrschenden Luftströmungen am meisten geschützt waren und das trockenste Klima hatten.

Zs.Ges.f.Erdk.1908 p.103.) Der beständige Wechsel von Gefrieren und Wiederauftauen ist eine weitere Quelle innerer Bewegungen; auch diesen wird das Minimalprinzip die Bahnen weisen. (Vgl. Kap. „Strukturboden“, wo die Verhältnisse ähnlich liegen. Auf die Bedeutung der Regelation weist dort besonders *Sapper* hin.)

4. Unsere Theorie findet eine wertvolle Stütze in den Untersuchungen von *H. W. Ahlmann* und *A. Tveten* (1923 p.51ff.) am Horung-Massiv (Jotunheim, Norwegen). Durch sie sind wir jetzt genauer unterrichtet über die physikalischen Prozesse bei dem Übergang des Schnees in Firn und weiterhin in Eis. Es zeigte sich, daß dieser Vorgang selbst bei homogenen Anfangsbedingungen nicht in gleichmäßiger räumlicher Verteilung durch die ganze Schneedecke hindurch vor sich geht, sondern daß er hier in der Form der sukzessiven Anlagerung an mehr oder weniger regelmäßig verteilte 'Ansatzkerne' erfolgt, d. h. es kommt in der sich verfirnenden und vereisenden Schneedecke zu Gebildeformen (Eisschichten, Eispfeiler), bei denen der genannte Vorgang bereits weiter fortgeschritten ist als bei der umliegenden 'Bettsubstanz'. „The profile was traversed by various thick layers of ice, each of them exactly parallel to the surface of the snow form and grouped round the lower and upper parts of the profile. In addition to this there were vertical pillars of ice, composed of compressed layers of ice 2—3 dm broad and extending from the surface down to the thick layer of ice at 2,80 m. These peculiar ice-pillars occur in large numbers on the higher snow-forms towards the close of the summer (!). They stand out on the surface of the snow as wart-like elevations (!) with an average diameter of 1 dm . . .“ Wie von *A. Tveten* angestellte Versuche bestätigen, genügt hierzu die Einwirkung regelmäßiger Temperaturschwankungen: „Quantities of new snow have been gathered in glass cylinders and exposed for temperature variations in one end, while the rest of the cylinders was kept at a constant temperature. The speed of the firnification proved to take place proportionally to the amplitude and the frequency of the temperature alternations.“ Wird also die Firnoberfläche erwärmt, so ist die Luft zwischen den oberflächlich liegenden Körnern im Vergleich zu der unterlagernden Masse mit Wasserdampf gesättigt. Daraufhin kommt es zu einer Verfestigung (Sublimation) von Wasserdampf bis in tiefere Lagen der Firnmasse hinein, während ein gewisser Betrag des Wasserdampfes auf dem Wege der Verdunstung in die Atmosphäre übergeht. Entscheidend ist nun, daß diese Sublimation zu Kleinbewegungen führt, die in ihrem Verlaufe den von unserer Theorie berührten Differenzierungs-

gesetzen gehorchen. Auf dem Wege der wiederholten Transformation des Wasserdampfes wandern so die Teilchen einer 'stabileren' Lagerung zu. Die großen Kristalle wachsen auf Kosten der kleineren, und die kristallinen Agglomerate lagern sich den Eisschichten an, die so an Mächtigkeit zunehmen. Die Bildung der Eisschichten und Eispfeiler erscheint so als das natürliche Schlußglied einer Tendenz zur räumlichen Zusammenlagerung von Teilchen, die in einer 'Bettsubstanz', einem 'Dispersionsmittel' zunächst diffuse verteilt sind.

Vorkommen des Bùßerschnees.

a) Lokale Bedingungen. Die schönsten und größten Bùßerschneefiguren fand *Hauthal* (Zs.Ges.f.Erdk.1908 p.109) herausgebildet „in auf ebenem Boden lagernden, horizontal geschichteten Firnfeldern“. — Homogenität des Materials ist nicht nötig. *Hauthal* (p.113) berichtet von einem „großen Bùßerschneefeld, dessen Material nicht eigentlich Schnee, sondern ein grobes, durch Schnee zusammengehaltenes Konglomerat von größeren und kleineren Blöcken war. Hier waren die Figuren ebenso scharf herausgeschnitten wie in den reinen Firnfeldern“. In einem von *Jäger* (1909 p.175) beobachteten Falle hatte die Zackenbildung in einer ('oberflächenaktiven'?) Schicht von Neuschnee begonnen und dann auf den unterliegenden schmutzigen Firn durchgegriffen. — In ebenso auffallender Weise zeigt sich eine weitgehende Unabhängigkeit des Phänomens vom Wechsel der örtlichen Verhältnisse und von der ursprünglichen Form der Schneeoberfläche. „Die Schneekämme liefen ganz geradlinig hinweg über alle größeren und kleineren Unebenheiten der Schneeoberfläche, über Buckel und Mulden sowie über die einzelnen Ballen des Lawinenschnees. Auch an verschiedenen Orten hatten sie stets die gleiche Richtung.“ (*Jäger* 1909 p.180.) „Man findet den Bùßerschnee in ganz verschiedener Lage und mit verschiedener Exposition, oft schon bei benachbarten Feldern. Dieser Umstand und die Übereinstimmung der Streckung und Neigung und die wiederholte Entstehung neuer Furchen auf einer schon stark gebrochenen Oberfläche zeigen, daß ein allgemein wirkender Einfluß, der von örtlichen Unterschieden ganz unabhängig ist, bei der Entstehung des Bùßerschnees tätig ist.“ (*Keidz* 1914.)

b) Klimatische Bedingungen. Die prägnanteste und treffendste Zusammenfassung der wesentlichen Bedingungen gibt *Hans Meyer* (Zs.Ges.f.Erdk.1908 p.100): „Die von mir beobachteten Vorkommnisse sind also beschränkt auf die Regionen oberhalb 5000 m, wo die Dünne der Luft, die strahlende Wärme der Sonne, die Lufttrocken-

heit und Verdunstung und in einigen Lagen auch die Heftigkeit und Dauer der Winde das Maximum für Ecuador erreichen. Und zwar sind es Gebiete, die ausgezeichnet sind durch hohen Sonnenstand, durch den Wechseleinermonatelangen, sehr niederschlagsarmen Jahreszeit (verano) und einerebenfallsmonatelangen sehr niederschlagsreichen (invierno) und durch die Regelmäßigkeit kalter Nächte unter 0° und niedriger, wenig über 0° stehender Lufttemperatur bei Tage.“ Dank der Jahresperiodizität des Niederschlages können sich die Schmelzformen lange entwickeln, ohne wieder verschüttet zu werden. — *Brückner* (Zs.f.Gletscherk.2.1907/08. p.296) weist auf die sehr geringe Jahresschwankung der Temperatur hin, durch die sich die typischen Büßerschneeregionen (Anden u. Äquatorialafrika) auszeichnen. Sie ermöglicht ein ungestörtes Fortschreiten der rhythmischen Differenzierung auf dem Wege der Summation gleicher minimaler Tagesbeträge.

Die Verbreitung der typischen Büßerschneeformen ist im wesentlichen beschränkt

1. auf den Breitengürtel zwischen 40° N.Br. und 40° S.Br. Insbesondere sind zu nennen das äquatorial-afrikanische Hochgebirge, der Himalaya unter etwa 35° N.Br., Kaschmir, Karakorumgebirge, die Anden, von Mittelchile an bis in die kalifornische Sierra Nevada (*Hans Meyer, J. Früh* 1915 p.426), und zwar zeigt die bestentwickelten Formen der Osthang der argentinischen Cordillere von 27° bis etwa 36° S.Br. (*Hauthal*). Im eigentlichen Tropengürtel sind nach *Keidel* (1909/10 p.192) die Formen weniger scharf begrenzt und nicht so deutlich gestreckt;

2. auf einen bestimmten Höhengürtel (nach *Hauthal* in den Anden zwischen der 3500- und 5000 m-Linie), nämlich den Streifen zwischen der Schneegrenze und der unteren Grenze des Winterschnees. „Der Winterschnee wird aber, wo er beträchtlich unter 3000 m hinabreicht, nicht mehr zu Büßerschnee verändert, ehe er vergeht“ (*Keidel*).

Kombinationsrhythmen (bei Staub- und Schuttbedeckung).

Fritz Jäger (1909 p.180) stellt mit Entschiedenheit fest: „Die Kämme, die ich ... beobachtete, so winzig sie noch waren, ... machten den Eindruck, daß sie aus der glatten, unveränderten Firnoberfläche nur durch die Sonnenstrahlung ausgeschmolzen seien.“ Auch bei den von *J. Früh* (1915) im Kanton Appenzell beobachteten Vorkommen war „jede primäre reihenförmige, äolische Form der Schneeoberfläche ausgeschlossen“. „Rippelmarken, Schneegangeln und Schmelz-

näpfe sind auf keinen Fall zur Entstehung nötig.“ (*Klute* 1914/15 p.305.) Immerhin läßt sich für gewisse Fälle doch der Einfluß einer vorgebildeten Oberflächenstruktur der Schneedecke auf die Ausbildung der Schmelzformen feststellen. Doch ist dieser Einfluß vielfach nur ein 'formkatalysatorischer', d. h. die Ausbildung der Schmelzformen wird durch sie nicht 'hervorgerufen', sondern nur beschleunigt. Über den Einfluß von Rippelmarken bemerkt *Keidel* (1914): „Nur darf man dabei nicht an eine unmittelbare Beziehung zwischen dieser Form und dem später erscheinenden BÜßerschnee denken. Im Gegenteil, je größer diese Formen sind, umso mehr stören (!) sie den Vorgang der BÜßerschneebildung. Sie bleiben, solange sie da sind, ein fremdes Element (!), bis sich die durch die Strahlung erzeugten Furchen — vielleicht sehr oft durch Abweichen von den gewöhnlichen Maßen — den besonderen Bedingungen angepaßt haben.“

In anderen Fällen ist die fragliche Oberflächenstruktur gar nicht 'vorgebildet', sondern sie hat sich gleichzeitig und parallel mit der Differenzierung der Schneedecke zu Schmelzformen herausgebildet. So kann sich z. B. eine auflagernde Staub- oder Schuttschicht an der Ausbildung der Schmelzfiguren beteiligen. Diese Bedeckung beteiligt sich dann als drittes Medium aktiv mit an der Differenzierung. Gleichzeitig mit der Herausbildung der Eisköpfe konzentriert sich der Schutt zu rhythmisch verteilten Flecken. (Der Fall, daß gewöhnliche Schutflecke, die von vorneherein solche waren, rein passiv den darunterliegenden Teil der Schnee- bzw. Eisfläche schützen, wie der Felsblock eines Gletschertisches, bleibt hier natürlich außer Betracht. In diesem Falle entsprechen die Dimensionen des Eispeilers auch ganz genau denen der Schuttdecke.) So sind die Schneefelder, auf denen sich die von *Spethmann* (1907/08) beschriebenen 'Schneeschmelzkegel' bilden, völlig glatt und bieten keine Unebenheiten. „Trotz der gleichmäßigen Schneeoberfläche verteilt der Staub und Grus sich nicht als einheitliche, dünne Decke“, sondern von vorneherein ordnen sich die einzelnen Partikelchen in Reihen (*Sp.* sagt ungenau: „Rippelmarken“) an, die sich späterhin in einzelne regelmäßig verteilte Fetzen auflösen; innerhalb dieser Fetzen bilden sich „Knötchen“ heraus, die schützende Wirkung der Staubbedeckung steigert sich gleichmäßig von der Peripherie bis zu diesen Knötchen hin, es entstehen regelmäßige Kegelformen, die schließlich allein noch „unverbunden auf nacktem Fels“ übrig bleiben. Die größte Dicke der Staub- und Grusbedeckung findet man unter den Spitzen der Kegel! Eis- und Schneeschmelzkegel vom *Spethmannschen* Typus beobachtete *Workman* (1908/09 p.261) auf Gletschern: „Where the covering was thickest, the ice projected highest.“ Die Entstehungsweise der Flecken von Sand und Schlamm erscheint

Workman als rätselhaft; sie konnten weder äolische, noch alluviale Bildungen sein! Ebensovienig fand *Workman* (1913/14 p.312) eine Erklärung für die merkwürdige Verteilung und gestreckte Formausbildung der dünnen Schuttflecke auf Gletscheroberflächen, deren Einschmelzen ²⁾ in das Eis zur Entstehung von Schuttaschen-Penitentes führt.

Den auffallenden Vorgang der Konzentrierung des Bedeckungsmaterials nach rhythmisch verteilten Punkten hin treffen wir auch bei den sog. 'Hügelmoränen' an, die *Workman* (Features of Karakorum glaciers. Zs.f.Gletscherk.8. 1913/14.p.65ff.) eingehend beschrieben hat. Sie nehmen gewöhnlich oberhalb der Vereinigungsstelle der Gletscher ihren Anfang. „Once formed, hillocks persist for a long time and may be traced down for many kilometres, sometimes to the end of the glacier.“ Kommen sie bei ihrer Wanderung gletscherabwärts in den Bereich eines stärkeren Nebengletschers, so wachsen sie plötzlich an Größe, und neue treten hinzu. Am oberen Ende des Gletschers, wo das Moränenmaterial noch spärlich ist, trifft man auf isolierte Hügel von Moränenmaterial, „their bases being separated by intervening level ice“. „These, as they descend, increase in size and height till their bases coalesce.“ Sie wachsen beim Abwärtswandern zusammen zu einer kontinuierlichen Moräne, die immer mehr an Größe zunimmt. Die Größe der Hügelmoränen variiert zwischen wenigen Metern und 150 Metern in ganz extremen Fällen. Die Entstehung dieser Hügelmoränen erklärt sich, wie gesagt, ebenfalls aus einer eigenartigen Zunahme der Mächtigkeit und Größe des Bedeckungsmaterials nach bestimmten, rhythmisch verteilten Zentren hin. Das Bedeckungsmaterial gelangt durch Auflagerung oder durch Ausschmelzung an die Oberfläche. „As soon as the moraine débris has collected to such a degree that it forms a continuous layer over the ice, the rate of melting of the ice beneath it is much lessened as compared with that of the white ice around; . . . under such circumstances, the moraines, losing little of their height through ablation while the white ice is rapidly wasting, must in time rise higher and higher above the latter . . .“ Wir haben so die paradoxe Erscheinung, daß die Böschungen der Hügel, anstatt sich mit der Zeit abzuflachen,

²⁾ Dünne Staubschichten, indem sie die Wärme stärker absorbieren und weiterleiten, fördern den Schmelzprozeß, dickere Schichten, die sich nur in den obersten, der Sonne zugekehrten Teilen stark erwärmen, wirken dagegen als Schutzdecke. Vgl. *Workman* 1913/14 p.93: „While the deposition of débris in large amounts, as in moraines, acts like a thick blanket to prevent ablation, small débris scattered about constitutes in the presence of the sun the most powerful agent to promote it.“ Ebenso H. Heß i.Handwbt.d.Nat.3. 1912.p.53.

an Steilheit eher noch zunehmen. „Curiously, the tops are often more heavily loaded than the lower parts and hollows between, and the débris may be of large size, the apices and crests of even the highest being crowned with immense boulders. (!) In their passage down the glacier the hillocks do not appear to become denuded of their débris-covering to any extent . . .“ „Often hillocks of great size are coated only with a comparatively thin, evenly distributed mantle 4 to 20 cm thick of finely broken rock-débris. In such cases the covering retains its place upon the slants in a most surprising manner, in spite of the fact that the inclination of the slants may be quite sharp.“ —

Pseudo-Penitentes und Mischtypen.

Es gilt nun noch, das 'echte' Phänomen der sog. 'Sonnen-Penitentes' (d. h. der lediglich durch die Einwirkung der Sonnenstrahlen auf eine homogene Schnee-, Firn- oder Eisschicht entstandenen Schmelz- bzw. Verdunstungsfiguren) abzugrenzen gegen formähnliche Gebilde anderer Entstehung. So kommt z. B. für manche Gebilde die Einwirkung der Sonnenstrahlung nicht in Frage; die schmelzende Wirkung geht dann oft von starken feuchtwarmen Winden aus, die über die Schnee-, Firn- oder Eisfläche hinwegstreichen und sie 'undulatorisch' abschmelzen. ('Wind-Penitentes'. Vgl. Kap. 'Formenschatz'!) Bei anderen Vorkommnissen ist die von unserer Theorie geforderte Voraussetzung: Homogenität der Oberflächenschicht, nicht erfüllt. Die Oberfläche war bereits irgendwie strukturiert, und die Gebilde werden durch den Schmelzvorgang lediglich selektiv herauspräpariert. ('Selektions-Penitentes'.) Ist die rhythmische Differenzierung zugleich mit wirksam, so kommt es zur Entstehung von Mischformen. Mischformen erhalten wir auch in den Fällen, wo die Differenzierung nicht von einer glatten Fläche ausgeht, sondern an bereits vorhandene, formähnliche Gebilde anknüpft. So bedürfen z. B. die sog. 'Séracs', d. i. die infolge kombinierter Quer- und Randspaltenbildung an Gefällsknicken usw. zersplitterten oberen Gletscherpartien, „nur der modellierenden Wirkung von Sonne und Wärme, um sie in Riesen-Penitente-Zacken von typischer Form zu verwandeln“. (*Workman* 1913/14 p.314.) Nach der Vermutung von *S. Günther* (Erdpyramiden u. Büßerschnee als gleichartige Erosionsgebilde 1904; s. a. *J. Früh* 1915 p.425) mag auch die Erosionswirkung des abfließenden Schmelzwassers gelegentlich die modellierende Tätigkeit der Verdunstung unterstützen. Der Nachweis einer erosiven Wirkung ist jedoch gerade für die typischen Vorkommnisse nicht zu erbringen. Denn in der enorm trockenen Höhenluft verdunstet das Schneewasser entweder sehr schnell oder verrieselt so gleich in dem lockeren Schuttboden. (*Hans Meyer* i.Zs.Ges.f.Erdk.1908

p.105; *Reichert* i.Zs.f.Gletscherk.4.1909/10.) Und *Fritz Jäger* (1909 p.181) erklärt geradezu: „Wir haben niemals auf der Oberfläche Schmelzwasser abfließen sehen.“

Auch für die erwähnten Selektions-Penitentes ist jedesmal erst der Nachweis ihrer selektiven Entstehung zu erbringen. *H. v. Staff* (1906), *H. Heß* (1908 p.190) und *Spethmann* (1909/10. p.138ff.) gehen bei ihrer Deduktion der Firnschalen usw. von Systemen sich kreuzender Rippelmarken aus, die der Schneedecke eine gitterartige Struktur geben sollen. Die weicheren Maschen schmelzen in der Sonne aus und vertiefen sich, während die fester angewehnten Kämme schwerer schmelzen und so stehen bleiben. Auch *J. Westman* (Beob. üb. d. Wasseraustausch zwischen der Schneedecke und der Luft im mittelschwedischen Tiefland. 1913) denkt sich seine „Schmelzgruben“ in dieser Weise entstanden; entsprechend verteilter Staub und Sand sollen die Unterschiede noch verschärfen. (S. a. *Workman* 1913/14 p.313.) Nach *Deecke* (1905) und *Uhlig* (1904) kann die Rippelstruktur auch, durch Anschmelzung fest geworden und durch nachfolgende Schneefälle zugedeckt, zu einer inneren Struktur der Firndecke werden. Eine innere Struktur der Firndecke kommt nach *Workman* (1913/14 p.296f.) namentlich auch bei geneigten Flächen durch langsame oder plötzliche Gleit- oder Rutschbewegungen zustande. Man erkennt diese Vorkommnisse daran, daß die herauspräparierten Rippen, Tiefenlinien und Pyramiden in der Bewegungsrichtung, d. i. in der Gefällsrichtung verlaufen bzw. gestreckt sind. Das morphologische Relief ist auch hier der Ausdruck der strukturellen Dichtigkeitsunterschiede. Die Zonen bzw. Zentren von besonderer Dichte leisten der Abschmelzung größeren Widerstand als die umliegenden Partien und treten deshalb als Rippen bzw. Büßerschneezacken heraus. Bezeichnend für diesen Typus ist die Feststellung, daß sich der oberflächlich wahrnehmbare Dichtigkeitsunterschied durch die ganze Tiefe oder Dicke der Schichten hindurch verfolgen läßt. Seitliche Aufschlüsse bieten hierzu Gelegenheit. (*Workman* 1913/14 p.300 u.303.) Der Umstand, daß diese 'Selektions-Penitentes' sich in besonders guter Ausbildung an schattigen Stellen finden, beweist schon ihre völlige Verschiedenheit von den echten 'Sonnen-Penitentes'. Ebensovienig kann man bei ihnen von einem eigentlichen 'Wachsen', d. h. von zunehmender Differenzierung sprechen. Sondern ist erst einmal die selektive Gleichgewichtsform (Selektionsterminante) erreicht, so vollzieht sich die Erniedrigung durch Abschmelzung von nun an ziemlich gleichmäßig. „The ratio of melting of the softer areas to that of the denser centres probably remained fairly constant throughout the summer, as the pinnacles exhibited about the same degree of development early and late in the

season“ (p.299). Hier fehlt dann auch die Launenhaftigkeit und Unberechenbarkeit des Auftretens, die den rhythmischen Phänomenen sonst eigentümlich ist: Wo Selektions-Penitentes a priori zu vermuten waren, wurden sie auch beobachtet. —

Zusammenfassung:

Wie bei den anderen rhythmischen Phänomenen muß auch beim Bùßerschnee das 'echte' Phänomen erst aus einer Reihe formähnlicher Pseudophänomene herausgesondert werden. Indem so einerseits die Möglichkeit der Herausbildung der Bùßerschneeformen aus einer präexistierenden mechanischen Struktur keineswegs bestritten wird, können andererseits die Entstehungsbedingungen für das 'echte' Phänomen scharf und exakt formuliert werden. Die Formenmannigfaltigkeit entsteht unabhängig von anfänglichen Differenzen, auf dem Wege der Selbstdifferenzierung eines in sich dynamisch zusammenhängenden physikalischen Systems. Die hierbei erfolgenden Zusammenlagerungen von Materie (der 'dispersen Phase') sind das Ergebnis von Kleinbewegungen des Wasserdampfes, der in der Schnee- bzw. Firnmasse zunächst diffuse verteilt ist, sich dann aber im Anschluß an regelmäßige Temperaturschwankungen bei der Sublimation den rhythmisch verteilten Ansatzzentren anlagert. — Wenn wir im folgenden Kapitel sehen, wie durch regelmäßige Temperaturschwankungen auch in andersgeartetem Bodenmaterial Kleinbewegungen entstehen, die zur Ausbildung regelmäßiger Formenmuster führen, so wird es sich dort im Prinzip um denselben Vorgang handeln.

X.

Strukturboden.

Als 'Strukturboden' bezeichnen wir nach dem Vorschlage von *Meinardus* (Zs.Ges.f.Erdk. 1912 p.257; Münsterer S-B.1912 p.16) einen Boden, der durch Sonderung der steinigen und feinerdigeren Bestandteile bestimmte Strukturformen angenommen hat. Diese Bezeichnung hat gegenüber sonstigen Vorschlägen (Solifluktion, Bodenfluß, Fließerdeboden, Schuttfazetten, Polygonboden, Karreeboden, Rautenboden [rutmark], Steinnetzboden) den Vorzug, daß sie das Charakteristische treffend hervorhebt, daß sie als neutraler, beschreibender Begriff nicht dem Wechsel der theoretischen Anschauungen ausgesetzt ist, daß sie die Gesamtheit der mannigfachen Erscheinungsformen des Phänomens um-

faßt und die Unterscheidung bestimmter Formen der Untergliederung zuweist, daß sie schließlich die Erscheinungen, die man bisher als 'Trockenrisse' (zu eng!), als 'Polygonboden Typus II' (*B. Högbom* 1910) oder 'Polygonboden' schlechthin, als 'Zellenboden' (*B. Högbom* 1914 p.320ff.), als 'Spaltenetze' (*Nansen* 1921) bezeichnet hat, nicht minder treffend als 'Texturboden'¹⁾ zu bezeichnen erlaubt. Dem Reibungsphänomen des 'Strukturbodens' würde dann das Spannungsphänomen des 'Texturbodens' zur Seite stehen, eine theoretisch recht befriedigende Lösung.

Die Bezeichnung 'Strukturboden' erscheint *B. Högbom* (1914 p.320) als zu weit, da sie auch die Steinstreifen, Steingirlanden usw. des Bodenflusses mit umfasse. Einen Nachteil können wir hierin nicht erblicken²⁾; immerhin mag es zuweilen wünschenswert sein, die 'Stehrhythmen' der Steinringe, Steinnetze usw. von den 'Translationsrhythmen' der Steinstreifen usw. zu unterscheiden. (Doch vgl. den Schluß dieses Kap.!) Die mannigfachsten Übergänge von einer zur anderen Form des Strukturbodens lassen sich beobachten. Doch liefert uns die „morphographische Einteilung“ (*Meinardus*) im wesentlichen folgende Typen:

1. Steinstreifen und Steinbänder,
2. Steinnetze oder Steinnetzwerk,
3. Steinringe oder Steinkränze,
4. Steinfelder oder Blockmeere mit Erdinseln oder Schuttinseln.

Sekundäre Gebilde: Steingirlanden oder Steinbögen zwischen den Steinstreifen oder innerhalb der Steinnetzmaschen.

Theorie. Unter Umgehung der hier besonders beschwerlichen induktiven Deskription wenden wir uns sogleich der Theorie des Phänomens zu. Wie erklärt sich der Sortierungsvorgang im Boden? Er erklärt sich aus der Tendenz zum Minimum der inneren Reibung. Die anordnungslos verteilten Bestandteile eines inhomogenen lockeren Bodenmaterials seien ständigen 'diakinetischen' Kleinbewegungen ausgesetzt. Der Geschehensablauf vollzieht sich dann in der Richtung auf

¹⁾ Vgl. U. Grubenmann, Gesteinsstruktur und Gesteinstextur. Handwb. d. Nat. Bd. 4, 1913, p. 1169. — Die Texturen sind weniger eng mit dem substantiellen Wesen der Gesteine verknüpft und hängen mehr von äußeren Umständen und Faktoren ab, die sich während der Gesteinsbildung geltend machen.

²⁾ *Meinardus* (Münsterer S-B. 1912, p. 16) bemerkt schon ausdrücklich: „Solche Bezeichnungen scheiden für das Gesamtphänomen aus, die entweder nur die Ausbildung der Formen auf horizontalem Boden oder nur die an Berghängen betreffen. Diese verschiedenen Ausbildungen sind offenbar nur Modifikationen derselben Erscheinung bei verschiedenen Gefällsverhältnissen und müssen daher als Unterbegriffe unter einen höheren Begriff subsumiert werden.“

eine Verminderung der Reibung der verschiedenartigen Bestandteile untereinander. Dies geschieht auf dem Wege der Sortierung. Es bilden sich Kerne, die die gröberen Bestandteile ausstoßen, um so, von diesen 'Fremdkörpern' befreit, gleich Lungen ungestört atmen zu können, während an der Peripherie die 'Fremdkörper' selbst, gleich von bewegter See ausgeworfenem Strandgut, sich relativer innerer Ruhe erfreuen. Das Gegebensein von ständigen inneren Kleinbewegungen als Hauptbedingung des Phänomens ergibt sich aus verschiedenen im folgenden zu besprechenden Tatsachen.

Material. Als Ergebnis des Sortierungsprozesses finden wir „lockere und trockene Anhäufung oder Packung der Gesteinsbrocken oder Blöcke, dagegen dichte, z. T. zähe und feuchte Häufung des feinerdigen Materials“ (*Meinardus*)³⁾. In der Tat haben wir für gewöhnlich ein Zusammenwirken dreier Medien: Wasser (Eis), feinerdige Bestandteile (Ton), und steiniges Material. Zwischen den beiden erstgenannten Medien findet ein inniges Zusammenwirken statt⁴⁾. Ein toniger oder lehmiger Erdboden mit gewisser Korngröße besitzt nach *Thoroddsen* (1913) große Kapillarität und vermag Wasser in bedeutender Menge aufzunehmen und in sich einzusaugen. Der Ton bewirkt gemeinsam mit dem Bodeneis (der 'Tjäle') eine künstliche Festhaltung und Aufspeicherung des Wassers in der oberflächlichen Bodenzone. Wo der Erdboden aus tonfreiem Sand oder aus den scherbigem Derivaten von Kalk- und Kieselgesteinen (*B. Högbom* 1914 p.372) besteht, bilden sich keine Polygone. Der 'bindige', zähe Ton verbindet sich mit der Feuchtigkeit zu einer eigenartigen Arbeitsgemeinschaft, er läßt sich von ihr mitziehen, macht ihre Wanderungen mit. Die Partien des Bodens mit reichlicherem feinerdigen Material nehmen, nach der bekannten Theorie *B. Högboms* (erstmalig 1910 p.53), „dank der Kapillarität mehr Wasser auf als ihre Umgebung. Bei der Eisbildung

³⁾ Ein besonders augenfälliges Beispiel bringt *Meinardus* (Münsterer S-B. 1912p.12f.; Zs.Ges.f.Erdkde.1912p.254f.): Auf dem harten, hellgrauen Bodenkahler Kalksteinkuppen auf Spitzbergen war als Zerfallsprodukt glazialer Gesteinsblöcke fremdartiges Bodenmaterial von roter Färbung zu ringförmigen Gebilden angeordnet in der Weise, daß trockene, kleine, hellrot gefärbte Gesteinssplitter ein kreisförmiges Feld mit dunkelrot gefärbter, durchaus homogener, feuchter, zäher, toniger Masse umgaben. Die inneren Durchmesser betragen kaum mehr als 20 cm.

⁴⁾ Die Kolloidchemie charakterisiert die Tone als zweiphasige Systeme, bei denen das Wasser die Rolle des 'Dispersionsmittels', die Mineralteilchen die Rolle der dispersen (d. h. in feiner Zerteilung auftretenden) Phase spielen, und führt dann das besondere physikalische Verhalten der Tone auf den kolloiden Charakter dieses Zusammenspiels zurück. (*Sven Odén* 1916.)

wird dann das Material von hier aus zentrifugal verschoben. Wenn nachher Schmelzung und damit folgende Volumenverminderung eintritt, wird das feinere Material von der Adhäsion mitgezogen, während die Steine peripherisch zurückbleiben. Wenn hinreichend oft wiederholt, muß eine merkbare Sortierung resultieren“. Auf Island friert im Frühjahr, nach *Thoroddsen*, nachts der Polygonboden, wenigstens teilweise, um am Morgen aufzutauen; im Laufe des Tages steigt das Wasser in den einzelnen Tonzylindern infolge der starken Verdampfung auf der Oberfläche, friert indes in der Nacht, dehnt sich aus und hebt die Mittelpartie des Polygons. Dem entsprechen jahreszeitliche Schwankungen: Im Winter sind die Tonpolygone strotzend emporgewölbt, besonders späterhin zur Zeit der Schneeschmelze, im Sommer ein wenig zusammengesunken. Nach *Ule* (1911 p.253—62, s. a. Ders., 1922 p.247f.) „füllt das Wasser den Mergelboden (des Polygonzylinders) ähnlich wie den Torf im Hochmoor; es tritt seitlich nicht aus, denn die Furchen (und Steinpackungen) ringsum sind, obwohl bis zu 1 m tief, vollkommen trocken“.

Die Kapillarität des tonigen Erdbodens wird wesentlich vermehrt, wenn der Erdboden mit Erdreich, mit Ton in Mischung mit Humus oder Tuffstaub, mit Humus und Pflanzenresten bedeckt ist (*Thoroddsen*). Die 'Bülten' (thufur) Islands verdanken diesem Umstande ihre Entstehung. Ihr Inneres besteht aus tongemischter Mòhella (vulkan. Asche) und Humus. Sie fehlen auf nacktem Felsboden; erst bei Vegetationsbedeckung, bei Vorhandensein von humusreichem Rasentorf begannen die Hügel sich aufzuwölben und behalten dann ihre Form.

Im übrigen besteht aber eine weitgehende Unabhängigkeit des Vorgangs der Detritussortierung von der petrographischen Beschaffenheit und Größe des sortierten steinigen Bodenmaterials. Die Steine können von sehr verschiedener Größe sein, von kleinerem Kies bis zu schweren Blöcken (*B. Högbom* 1914)⁵). Auch das Mengenverhältnis zwischen dem gröberen und feineren Materiale variiert innerhalb weiter Grenzen. Wo fast nur Verwitterungserde oder fast nur Gesteinsblöcke lagern, verschwindet das Phänomen. (*Ule* 1914 p.31.) Denn auf das Zusammenwirken von Wasser und homogenem,

⁵) Wo der Größenunterschied der Komponenten gering ist, besteht doch oft noch ein scharfer petrographischer Gegensatz. Vgl. die schöne Aufnahme von *Miethe* (1912) von Steinkränzen, „deren wulstartig erhöhte Umrahmung aus hellfarbigen, eckigen, kalkigen Gesteinsbrocken von geringer Größe besteht, während das umschlossene Feld mit dunklem, feinerdigem Material angefüllt ist.“

feinerdig = tonigem Boden ist unser Begriff der inneren Reibung nicht mehr anwendbar, bei den Blockfeldern ist andererseits der funktionelle Zusammenhang zu gering.

Unter extremen Bedingungen entstandene Formen pflegen besonders lehrreich zu sein. Solche Formen sind die in Blockmeeren verstreuten flachgewölbten 'Erd-' oder 'Schuttinseln' sowie die hohlförmigen 'Steinrichter' (Horizontaldurchmesser 1—7 m), bei denen ebenfalls das feinerdige Material nur eine untergeordnete Rolle spielt. Hatten die normalen Formen uns die Auffassung der Detritussortierung als eines einheitlichen Vorganges nahegelegt, so sehen wir hier, daß die Anhäufung des erdigen Materials von der des steinigen Materials relativ unabhängig verlaufen kann. Sei es, daß beide Medien unabhängig voneinander einer stabilen Anordnung zustreben, sei es, daß das eine Medium sich indifferent verhält, bzw. ihm ein leidendes Verhalten aufgezwungen wird. Die Schuttfelder „sind mit ihrem erdigen Inhalt auf die Gesteinsblöcke und Trümmer gleichsam aufgelagert und bilden annähernd horizontale Verebnungen von rundlichem Umriß, eine Art von Schuttinseln in einem unruhig bewegten Blockmeer“. (*Meinardus*, S.-B. 1912 p.4; *Zs.*1912 p.251.) Das spärliche feinere und lehmartige Material des Blockfeldes hat sich hier zusammengefunden, ohne daß das grobe Steinmaterial seinerseits sich an dem Vorgange merklich beteiligt hätte. Ähnlich zeigt bei den Steinrichtern, die aus peripherisch stark kantengestellten Einzelplatten zusammengesetzt sind, umgekehrt die Anordnung und die Größe der Steinpackung sich merkwürdig unbeeinflußt von der Beschaffenheit und Größe der eingeschlossenen Erdfelder. (*O. Stoll* 1917 p.6.)⁶⁾ Letztere wechselt vom Grenzwert Null bis Grenzwert Überdeckung des Steinkranzes. „Die Erdmasse kann so groß sein, daß sie über die Steinringe hinausschwillt . . . oder so gering, daß sie nur kleine gewölbte Schlammhügel mitten in den kraterförmigen Vertiefungen der Steinringe bildet. Bisweilen sind die am Ringe ganz frei von Schlamm.“ (*Nansen* 1921 p.108.) Die zentrifugalen Druckkräfte werden in diesem Falle von dem Wasser, als dem dritten Medium, allein ausgegangen sein; die Kantenstellung der plattigen Steine läßt sich anders schwerlich verstehen. Der Vorgang wird hier ähnlich verlaufen wie bei den nackten, beweglichen Blockmassen der oberen regio alpina (*B. Högbom* 1914 p.342f.), die sich ohne Mitwirkung von wassergesättigten, plastischen Erdbestandteilen zu Streifen oder Wülsten von kantengestellten Blöcken zusammenschieben: „Im Frühling oder Frühsommer bleibt zwischen den Blöcken

⁶⁾ O. Stoll glaubt hieraus schließen zu müssen, daß der Schutt erst nachträglich von außen den fertigen Gesteinrichtern aufgelagert werde.

ein Eiskuchen als der letzte Rest der Schneemassen des Winters lange liegen, und gute Wärmefänger, wie die Steine sind, geben sie zu Regulationsprozessen Veranlassung.“

Expansionsdruck. Die zunächst wahllos verteilten gröberen Steine werden von den erdigen Kernen aus zentrifugal verschoben⁷⁾. Von der Stärke des Expansionsdruckes legt die dichte Packung der Steinkränze Zeugnis ab. Die Lagerung ist oft so fest, daß eine Verschiebung der Steine nur mit einiger Anstrengung möglich ist, während die weiche, feuchte Bodenkrume der umschlossenen Felder mit dem Fuß oder dem Bergstock leicht aufgewühlt werden kann. (*Meinardus*, S-B.1912 p.3.) Wo die Steine platten- oder tafelförmig sind, werden sie von dem Expansionsdruck in eine gleichgerichtete, kantengestellte Lage senkrecht zur Druckrichtung gebracht, was an die Vorgänge bei der 'Druckschieferung' erinnert. Die peripherischen Platten sind am stärksten aufgerichtet. Es handelt sich hierbei, wie *B. Högbom* mit Entschiedenheit betont, in der Hauptsache um die ständig wiederholte Gefrierexpansion ('Frostschub') der mit Feuchtigkeit durchtränkten Tonzylinder. Besonders wirksam wird diese Expansion sein, wenn sie bei Unterkühlung und anschließender rascher Eisbildung plötzlich auftritt. (*Meinardus*, S-B.1912 p.23.)

Doch ist der Regulationsprozeß allein zur Erklärung der Anordnungsvorgänge im Boden nicht ausreichend. Dem Morphologen wird sich die Frage aufdrängen, weshalb sich die durch Regulation geschaffenen Kleinbewegungen im Boden in anderen Fällen einfach in einem gleichmäßigen 'Aufrieren' der gröberen Steine äußern, wobei ja eine vertikale Sortierung resultiert, bei der „das feinste Material nach unten, das gröbere nach oben angereichert wird, eine Sortierung, die mit der durch Schütteln erhaltenen eine recht auffallende Ähnlichkeit darbietet“. (*B. Högbom* 1914 p.304.)⁸⁾ Ein solcher Auf-

⁷⁾ *Meinardus* (1912) denkt umgekehrt an eine Attraktion der nahe beieinander liegenden Steine. Doch dann würden wir, wie *B. Högbom* (1914 p.315f.) treffend bemerkt, als Ergebnis Haufen von Steinen mit zwischengelagerten Erdmassen haben und nicht Erdfelder, welche von Steinringen umschlossen werden.

⁸⁾ — und ein auffallendes Schwerkraft-Paradoxon vorstellt! (Vgl. Kap. XIX, Abschn. 1!) Denn eigentlich müßte man doch erwarten, daß die spezifisch schwereren Steine in die lockeren Erdschichten oder den wasserhaltigen Erdschlamm versinken müßten; doch kann man z. B. in Nordsibirien nichtsdestoweniger sehen, wie schwere Steine auf einem Boden, der aus einer weichen, lehmigen Masse besteht, obenauf liegen. Ganz Ähnliches beobachten wir bei den Moränenhügeln. (Vgl. Kap. „Büßerschnee“.) Auch hier wandern die Blöcke nicht nur vertikal nach oben, sondern konzentrieren sich zugleich nach den Hügelspitzen hin.

frierungsprozeß ist auch beim Strukturboden bedingt. Beobachtungen an Aufschlüssen oder Grabungen (*B. Högbom* 1914 p.312; *A. Miethe* 1912; *Meinardus* 1912) ergaben, daß nach der Tiefe hin der Boden aus gemischtem Material besteht, mit oft auffallend großem Gehalt an feinerem Material. In den Steinkränzen findet man zuoberst die größten Steine, und die Größe nimmt nach abwärts in allmählichem Übergang zu feinem Grus und Schlick ab. Das feinkörnige Material wird so z. T. unter die Steine hinuntergearbeitet. (*Nansen* 1921 p.118.) Wir lernen so den Strukturboden als die Kombination einer vertikalen mit einer horizontalen Sortierung auffassen. Die relative Stärke der beiden Vorgänge läßt sich nicht so ohne weiteres feststellen, denn die Aufwärtsbewegung im Steinwalle läßt sich z. T. als umgebogene Horizontalbewegung fassen: Die Höhe des Steinwalles ist nach *Kurt Wegener* (zit. *W. Köppen* 1920) „ein Ausdruck für die horizontale, am Rande des Walles wirkende Schiebekraft der Lehmfläche“.

Die von *Miethe* und *Meinardus* beschriebenen Steinkränze überragten die inneren Flächen um etwa 5 cm, die äußere Umgebung aber um etwa 30 cm. Die Bildung erhebt sich also als Ganzes über die Umgebung; die Mitte des erdigen Inneren und der Steinkreis sind dazu noch besonders emporgewölbt. Das läßt auf eine starke Wasser- und Tonaufnahme des inneren Feldes schließen, eine Tatsache, die *Ule* (1911) im Auge hat, wenn er von dem rätselhaften Wasserdruck nach oben spricht. Nur so läßt sich verstehen, daß die wasserhaltige Tonmasse, anstatt sich unter dem Steinmaterial auszubreiten, an gewissen Stellen sich in Form von 'Tonzylindern' bis über die Oberfläche hinaus emporeißt und aufwölbt, oder sich als 'Schuttinseln' dem Blockmeere flach auflagert. Die Aufwärtsbewegung des Wassers verbindet sich also als zweiter Faktor mit der Wirksamkeit der Gefrierexpansion. Infolge des innigen Zusammenhanges von Feuchtigkeit und 'bindigem' Ton nimmt dieser an der Aufwärtsbewegung Anteil. Diese Aufwärtsbewegung mag mit den Konvektionsströmungen bei instabiler thermischer Schichtung (*Bénardsches Experiment*) eine gewisse entfernte Ähnlichkeit haben.

Zur Bestätigung erinnern wir an die bereits zitierte Darstellung *Thoroddsens* (1913 p.254): „... im Laufe des Tages steigt das Wasser in den einzelnen Tonzylindern infolge der starken Verdampfung auf der Oberfläche, friert indes in der Nacht, dehnt sich aus und hebt die Mittelpartie des Polygons.“ Wir haben somit im Strukturboden, ähnlich wie im Büßerschnee, eine kombinierte Wirkung von Frost und Verdunstung zu erblicken und werden deshalb auch an den von *O. Stoll* (1917) gegen die *Högbomsche* alleinige Betonung

der Regelationswirkung geäußerten Bedenken nicht achtlos vorbeigehen. „Die Regulation muß schon in geringer Tiefenur langsam wirksam sein“, denn von den Lufttemperaturschwankungen werden nur die obersten Schichten merkbar beeinflusst. „Frostwirkung und Regulation werden daher die einzelnen Tiefen sehr selten berühren.“ Diese Grenzfrage der Tiefenwirkung wird nicht so leicht zu lösen sein. Beide Ansichten lassen sich vereinigen, wenn wir die Kleinbewegungen in größerer Tiefe weniger aus den Bedingungen an Ort und Stelle heraus erklären, sondern sie mehr als Sekundärbewegungen auffassen, die von den oberflächlichen Partien her, besonders durch den kapillaren Zug des Verdunstungsvorganges genährt werden. — Nach den Feststellungen von *Miethé*, *Meinardus*, *Ule* reicht die deutliche Sortierung auch nur bis in unbedeutende Tiefen (50—60 cm) hinab. *B. Högbom* (1914 p.312) sucht die bessere Ausbildung in den oberen Partien damit zu begründen, daß für sie die „Regelationssaison“ länger daure.

Ist die Frostwirkung auch nicht der einzige, so ist sie doch, wie die geographische Verbreitung des Phänomens ergibt, der entscheidende Faktor. Es ist beschränkt auf die Wüstenlandschaften der polaren Zonen, d. h. die Länder mit subnivalem Klima, und die regio alpina, d. h. den klimatisch mit den höheren Breiten äquivalenten Saum hochalpiner Gebirgswelt (die 'Steingärtchen' der Alpen und die 'Blumenbeete' der Mongolei). (Vgl. die Übersicht bei *B. Högbom* 1914!) Es ist die Gegend mit beständig gefrorenem Erdboden (Eisboden oder Tjäle⁹⁾), über dem nur die obersten Schichten im Sommer auftauen. Bei der, absolut genommen, geringen Verdunstungsmenge (tiefe mittlere Jahrestemperatur!) ist der Boden der ebenen oder sanftgeneigten Flächen infolge der Abflußlosigkeit nach der Tiefe¹⁰⁾ und nach der Seite ziemlich mit Feuchtigkeit durchtränkt, andererseits läßt die geringe Menge der meist als Schnee fallenden Niederschläge keine größeren

⁹⁾ Auf Spitzbergen ist nach *B. Högbom* (1914p.296) die Tiefe bis zur Tjäle im Schutt- und Felsboden etwa 1 m, im bewachsenen Boden meist nur 20—50 cm. Auch über der Tjäle, bis etwa $\frac{1}{2}$ m unter die Oberfläche hinauf, bleibt die Bodentemperatur bis weit in den Juni hinein noch unter 0°. (*Meinardus*, Zs.1912p.258.)

¹⁰⁾ Eine wesentliche Bedingung! Nach *Thoroddsen* (1913) u. *B. Högbom* (1914) ist das Phänomen des Strukturbodens und der 'Bülten' geradezu an das Vorhandensein einer Tjäle gebunden. Sie unterstützt zudem durch ihre Temperatur den Regelationsprozeß und liefert beim Auftauen den anlagernden Schichten Feuchtigkeit. Aber ihre wichtigste Funktion ist die Verhinderung des Fortsickerns der Feuchtigkeit in der überlagernden Schicht. Für mittlere und niedere Breiten ist deshalb die Bildung von 'Schutfazetten' an die Nähe von Gletschern und Firnflecken gebunden. Sie liegen dann meist schon im Bereiche der orographischen Schneelinie, d. h. an Stellen, die nur kurze Zeit im Jahre schneefrei sind. (*Ule* 1911; 1914 I.)

Wasserläufe oder Versumpfung des Geländes zustande kommen. (*W. Credner*, Spitzbergen; *Geogr.Zs.*28.1922.p.5—17.) So wird *B. Högbom* nicht müde, die relative Trockenheit des Strukturbodens hervorzuheben, die ihn von den Erscheinungen des eigentlichen 'Bodenflusses' deutlich scheidet. Der Schutt ist im allgemeinen nur feucht bis trocken, nicht breiig! Um so mehr wird die 'grobdisperse' Phase, in der Wasser und Tonpartikelchen sich hierbei befinden, sowie die hinreichende Differenziertheit zwischen 'Dispersionsmittel' und 'Dispersoid' diese zwecks Verminderung der Reibung zur Sonderung und gegenseitigen Konzentrierung drängen.

Die Voraussetzung der Regulation, die täglichen Wärmeschwankungen um den Nullpunkt herum, ist für das arktische Klima in den Übergangszeiten erfüllt, die einen Wechsel von Tag und Nacht bringen. Nachts gefriert dann der Strukturboden wenigstens teilweise, um am Morgen aufzutauen. Im Winter und in den Sommermonaten ruht wegen der sehr niedrigen bzw. sehr hohen Temperaturen und der sehr geringen periodischen täglichen Wärmeschwankungen die Regulation. Während der 'Regelationssaison' gibt es aber dafür über der Tjåle eine mehr oder weniger mächtige Schicht, in der sie fast ununterbrochen arbeitet.

Wir erweitern nunmehr unsere Betrachtung, die sich bisher auf die Vorgänge bei der Ausbildung des einzelnen Steinkranzes beschränkte, und tun den bedeutsamen Schritt vom 'Individuum' zur 'Gemeinschaft'. Hier gelangen wir an den Punkt, wo unser Phänomen zur Förderung der allgemeinen Theorie der rhythmischen Phänomene etwas Spezifisches beizusteuern vermag. (Siehe auch den Kritischen Teil!)

Unsere Theorie wird so weitherzig sein dürfen, daß die bisherigen Anschauungen bequem in ihr Platz finden, wenigstens soweit sie nicht den Anspruch auf Allgemeingültigkeit erheben, sondern sich damit begnügen, ganz bestimmten Beobachtungstatsachen theoretischen Ausdruck zu geben. So zeigen gewisse Vorkommnisse uns das Bild von wahllos und 'zufällig' verstreuten oder einzelnen ('singulären'), isolierten Steinkränzen, das Bild ungestörten individualistischen Sichauslebens. Jeder Steinring ist von seinem Nachbar durch einen mehr oder weniger großen Zwischenraum getrennt. Auf diese Verhältnisse paßt ganz gut die bekannte Theorie von *B. Högbom* (1910 p.53; wiederholt 1914 p.314f.; zit. *Ule* 1911; *Sapper* 1912 u. ö.; *Köppen* 1920; u. v. a.). Nach ihr „dürfte die Mischung von feineren und gröberen Bestandteilen des Erdbodens immer ein wenig ungleichmäßig sein, so daß es gewisse Flecke gibt, wo das feinere Material reichlicher ist. Dank der Kapillarität nehmen dann diese

Stellen mehr Wasser auf als ihre Umgebung. Bei der Eisbildung wird dann das Material von hier aus zentrifugal verschoben . . ." usw. Die Verteilung dieser präexistierenden Ansatzkerne ist naturgemäß eine 'zufällige'. — Doch sind die wohlausgebildeten Steinringe „eigentlich keine allgemein auftretende Erscheinung“. Denn wo sich die Steinringe zusammendrängen, wird die Ellbogenfreiheit des Individuums gestört, seine Ausdehnungsmöglichkeit findet eine natürliche Grenze an dem gleichgerichteten Streben der übrigen Individuen. Es entstehen Übergangsformen, bei denen die Form der Steinkreise ein wenig polygonal werden kann. „Jedoch bleibt auch dann die Selbständigkeit jedes Steinwalls an der Berührungsstelle gewahrt, nur die Umrißform erscheint an solchen Stellen wohl deformiert, gleichsam verdrückt, als ob die Gebilde sich gegenseitig an der Vollendung der normalen Kreisform behindert hätten.“ (*Meinardus*, S.-B.1912 p.7.) Zwischen den einzelnen Kreisen bleiben von dem Tundraboden dann nur noch dreieckige, vertiefte Zwickel übrig. (*A. Mieth*e 1912 p.242.) Oft ist die Trennungsfurche kaum sichtbar. Mitunter bildet sogar ein gemeinsamer Wall die Grenze der beiden benachbarten Felder. (*Meinardus*, Ebenda p.9.) — Bei allseitiger Berührung kommt es so zur Bildung von allseitig deformierten, meist annähernd sechseckigen Steinkränzen, d. h. eines zusammenhängenden, über große Flächen ausgedehnten polygonalen Steinnetzwerks (*Sapper* 1914).

Den theoretischen Ansprüchen des 'genetisch' denkenden Morphologen ist mit der Aufstellung dieser — ziemlich lückenlosen — 'Entwicklungsreihe' Genüge getan. Der kausal-analytisch oder physiologisch vorgehende Morphologe ist etwas anspruchsvoller. Er vermag nicht einzusehen, wie eine durch ihre mathematische Regelmäßigkeit verblüffende Netzstruktur das Ergebnis einer chaotischen Konkurrenz sich drängender Singulärgebilde und zufälliger Zusammenwachsungen sein soll. Er sträubt sich gegen den Gedanken, mit dem der Genetiker als mit einer Selbstverständlichkeit umgeht, daß sich in solchen Fällen aus einem Chaos eine Ordnung eben — 'entwickele'! Besonders stimmt ihn die gleichmäßige Größe der Polygone nachdenklich. „Sie wechselt wohl von Fjeld zu Fjeld, aber auf demselben Fjeld weichen die Durchmesser der Polygone nur wenig voneinander ab.“ (*Ule* 1914 I p.31.) „Ähnlichkeit der Gestalt und Größe der durch die Sonderung ausgebildeten Formen bei demselben örtlichen Vorkommen“ ist nach *Meinardus* (1912) ein gemeinsames Merkmal aller beobachteten Formen. Auch *B. Högbom* konnte sich, wie sein zweiter Aufsatz (1914 p.315) zeigt, dieser Tatsache nicht mehr verschließen. Der letzte, entscheidende Schritt bleibt jedoch noch zu tun,

nämlich das Steinnetzwerk nicht als geometrisch-summatives Gebilde, als additives Zusammen aufzufassen, sondern als dynamisches 'System', innerhalb dessen sich gewisse vom Systemganzen aus geregelte Differenzierungsvorgänge abspielen, als 'physische Gestalt', deren 'Momente' sich gegenseitig 'im Ganzen tragen'. Die räumliche Anordnung und Ausbildung der Einzelformen beruht dann nicht mehr oder kaum noch auf den 'gewissen' präexistierenden erdigen 'Flecken', sondern auf der spontanen, d. h. systembedingten Entstehung von rhythmisch verteilten Ansatzkernen. Voraussetzung für die Regelmäßigkeit der resultierenden Formen ist ja eine von vornherein bestehende regelmäßige Anordnung der zentralen Punkte, von denen die Expansionswirkung ausstrahlt. Vom darwinistischen 'Kampf ums Dasein' läßt sich dagegen a priori ebensogut behaupten, daß das Widerspiel der Druckkräfte zu einem gegenseitigen 'Zurechtschieben', zu dem modus vivendi des 'leben und leben lassen' und so zu nivellierendem Ausgleich anfänglicher Differenzen führe, wie daß das Größere auf Kosten des Kleineren wachse (*Wi. Ostwald*) und sich so anfängliche Differenzen noch verschärften. Um dies zu entscheiden, müßte man schon die Verhältnisse der Steinringfelder eingehender Beobachtung unterwerfen.

Auch für die Variationen der Polygongröße von Fjeld zu Fjeld, d. h. also die Zahl der auf ein bestimmtes Areal entfallenden Ansatzkerne, wird sich möglicherweise eine bestimmte Gesetzmäßigkeit aufdecken lassen. Wie bei den anderen rhythmischen Phänomenen wird man eine Beziehung zu den Größenverhältnissen des Systems feststellen können; es sei nur an die von *Meinardus* beschriebenen Miniaturgebilde erinnert. Bei den lehrreichen Paraffinversuchen von *W. Magnus* (1913) stand die Polyedergröße der aus der Grundsubstanz ausgeschiedenen festen Strukturen in konstantem Verhältnis zur Schichtdicke. Je dünner sie ist, desto kleiner sind die Kammern, je dicker, desto größer werden sie. — Auch eine proportionale Beziehung zur Größe der zusammengeschobenen Steine werden wir nach *Meinardus* (S.-B. 1912 p. 25) annehmen dürfen.

Die hexagonale Form besitzt offenbar eine ganz besondere morphologische Dignität. Zunächst sind Hexagon und Quadrat (wenn wir vom Dreieck absehen) die einzigen Polygone, die ein gleichförmiges, lückenloses Netzwerk ergeben. Gegenüber dem Quadrat besitzt es den Vorzug, daß immer nur 3 Ecken in einem Punkte zusammenstoßen, daß die Abstände eines Zentrums zu denen aller unmittelbar benachbarten Zentren gleich groß sind, während beim Quadrat die Beziehungen zu den schräg benachbarten Feldern wieder andere sind, daß die Trennungsfurchen senkrecht auf der Verbindungslinie der Zentren stehen, die übrigen anstoßenden Seiten dagegen in radialer Richtung

verlaufen, daß bei vollkommener Raumausnutzung doch die natürliche Kreisform der Gebilde (als 'Oberflächenspannungskörper') möglichst gewahrt bleibt. Entsprechende Verhältnisse treffen wir auch bei dem den *Plateau-Quinckeschen* Gesetzen gehorchenden Netzwerk der Schäume, wo immer nur drei Lamellen in einer Kante sich schneiden.

Wir haben bisher nur die geschlossenen Figuren ('Stehrhythmen') des ebenen und schwach geneigten Geländes betrachtet, die, wie wir sahen, lediglich das Ergebnis innerer gegenseitiger Verschiebungen der Bodenbestandteile mit Schuttsonderung sind, nicht aber, wie man geglaubt hat, eine Art von Bodenfluß, d. h. von Translation von Bodenmaterial in bestimmter Richtung, oder eine Erscheinung „latenter Fließfähigkeit“, wie *Sapper* (1913) sich ausdrückt. Aber auch die jetzt noch zu besprechenden mehr oder weniger offenen Strukturformen an stärker geneigten Hängen sind alles andere als 'Fließformen'. Typische Fließformen von Stein-, Schutt- oder Erdmaterial, die diesen Namen verdienen, werden wir an anderer Stelle (Kap. XX) besprechen. Bei ihnen wird die rhythmische Differenzierung im wesentlichen durch die Gehängebewegung selbst geschaffen; weiches, plastisches Erdmaterial und starke Wasserdurchträngung ist meist der Vermittler dieser Bewegungen; die Glieder der Fließformen vereinigen sich zu einem Formenmuster, das an das der Flußsysteme erinnert. Der echte 'Streifenboden' dagegen zeigt eine Anordnung, die mehr an die der Rippelmarkenfelder erinnert: „Wenn ein Streifen stark zur Seite biegt, sieht man oft, wie die danebenliegenden gleichzeitig dieselbe Bewegung ausführen.“ „Es kommt auch nicht selten vor, daß sich ein Streifen gabelförmig nach unten verzweigen kann.“ (*O. Nordenskjöld* 1911 p.192ff.) Im Gegensatz zu den Fließformen werden divergierende Streifensysteme auch an gerundeten Rücken beobachtet, auf denen kein Wasser herabrieselt; Streifen und Wülste von kantengestellten (!) und zusammengeschobenen Blöcken, bei denen kein wassergesättigtes, plastisches Erdmaterial das Schmiermittel liefert und bei nur schwacher Böschung eine Differenzierung im Anschluß an eine der Schwerkraft gehorchende Fließ- oder Kriechbewegung nicht in Frage kommt. Der Gegensatz: Durchträngung oder Regelation? hat hier keine Bedeutung, die Regelation kann sich auch in den Dienst der Gravitation stellen. Es kommt an dieser Stelle vielmehr lediglich auf die Feststellung an, daß die für das ebene Gelände charakteristischen Strukturformen auf Gehängen infolge der Verschiebung des Wanderschuttes verzerrt und zerrissen werden. Sonst herrschen dieselben Verhältnisse (gewisse Durchfeuchtung, Eisboden usw.). Dieselben Kräfte, die auf horizontalem Boden den Detritus sortieren, sind auch auf geneigtem Boden wirk-

sam (*Meinardus*). Nur unterliegt ihr Werk hier äußeren Verzerrungen, ähnlich wie eine auf eine hin- und hergezogene Gummihaut gemalte Figur.

Die Felder sind in der Richtung der Bewegung in die Länge gezogen, und die Steinringe bilden ovale elliptische Figuren, die zuweilen in Steinstreifen übergehen, indem die Ringe durch die Streckung gesprengt werden und die Felder der Länge nach zusammenfließen. (*Nansen* 1921 p.121; ähnlich *Stoll* 1917 p.4.) Es entstehen so Streifen aus Schutt und Steinen, die einander parallel sich den Abhang senkrecht hinabziehen. Zwischen einige Dezimeter und ein paar Meter breiten Bändern von feinerem Material ziehen schmalere Steinränder, oft ein wenig rinnenförmig, und wenn die Steine plattig sind, mit diesen kantengestellt. (*Högbom* 1914.) *Ule* (1911 p.255) schildert die Veränderung beim Übergang auf einen gleichartigen, nur stärker geneigten Boden: „Der Boden bestand auch hier aus Geschiebemergel und Gesteinsblöcken, aber die Gesteinsblöcke lagen überwiegend zu Reihen angeordnet in den Furchen, die das Gelände, dem Gefälle folgend, durchschnitten, und zwischen denen sich als flachgewölbte Rücken der Geschiebemergel erhob, nur wenig von Blöcken bedeckt.“ *Meinardus* (S-B. 1912 p.14) beobachtete auf dem westlichen Abhang einer Kalkkuppe auf der westlichsten Lovén-Insel „eine streifenförmige Anordnung feinerdigen, dunklen Schutttes auf grauem, nacktem Fels in parallelen, der Gefällsrichtung folgenden Linien und im Abstand von wenigen Zentimetern. Der Abhang sah wie gekämmt aus“. — Oft bleibt der Steinkranz noch durch eine mäanderförmige Linie angedeutet, durch „lange Bänder von Steinen, die sich zwischen Partien von feinerem Schutt oder Lehm hindurchschlängeln, und zwar um so netzähnlicher, je geringer das Gefälle ist.“ (*O. Nordenskjöld* 1909 p.63; Ders., 1911 p.192 u. Taf.8 Fig.2.) Die in der Richtung des Gefälles durchhängenden sog. 'Steingirlanden' im lockeren Boden zwischen den Steinstreifen oder innerhalb der Steinnetzmaschen sowie die sonstigen Gebilde liefern nur geringe theoretische Ausbeute. (Vgl. *B. Högbom* 1914 p.335f.; *Meinardus*, S-B.1912 p.4.) Sie machen uns jedoch darauf aufmerksam, daß die Verzerrung der Gehängestrukturen mittelbar der relativ stärkeren Abwärtsbewegung des feineren Materials zuzuschreiben ist.

Texturboden.

Im Gegensatz zum Strukturboden bildet sich der Texturboden nicht durch die strukturell-materielle Sonderung eines Schuttgemisches, oder allgemeiner ausgedrückt, durch die Diakinese (Diffusion, inneren Verschie-

bungen) zweier Medien, also durch Reibungsvorgänge, sondern lediglich durch Spannungsvorgänge in ein und demselben elastisch-festen Medium. Für solche Vorgänge hat sich in der Geologie die Bezeichnung 'Textur' eingebürgert. Wir können deshalb in unserem Falle von einem 'Texturboden' sprechen. Diese Bezeichnung hat noch den Vorzug, daß sie die formalistische und unklare Bezeichnung 'Polygonboden' überflüssig macht. Es mag zunächst etwas befremdlich erscheinen, daß Spannungsvorgänge, die auf festes oder im Zustande der Erstarrung befindliches kontinuierliches Gestein beschränkt erscheinen, auch in losem Schwemmland auftreten sollen. Das Entscheidende ist jedoch nicht die Festigkeit und Starrheit, sondern der durch die Kontinuität des Bodens, die Homogenität und Feinheit, die Zähigkeit des tonigen oder humosen Bindemittels, die gleichmäßige Durchfeuchtung geschaffene funktionelle Systemzusammenhang. Die Vorbedingung für das Inkrafttreten der 'Tendenz zum Minimum innerer Spannungen' nach Überschreitung einer kritischen Grenze ist somit auch hier gegeben: die fragliche Schicht erhält eine spontane (systembedingte) Textur. — In Sand-, Kieselgrus-, Kalk-, Löß- und ähnlichen Böden, mit denen die Feuchtigkeit keinen zähen kapillaren Verband eingeht, können sich naturgemäß innere Spannungen nicht entwickeln. Bei gröberen Bodenarten kommt es wegen ungenügenden funktionellen Zusammenhanges nur zu unregelmäßigen Rissen und Sprüngen.

Risse pflegt man als 'zufällig' anzusehen, was einfach daher rührt, daß die 'Verteilung', die Anordnung, die Festlegung im Raume noch nicht zu den Objekten der wissenschaftlichen Betrachtung gehört. Höchstens daß die auffallende Regelmäßigkeit der Risse zum Nachdenken auffordert. Deduktiv gelangt man zu folgendem. Läßt man eine tonige Schicht in einem Gefäße durch Wasserzusatz aufquellen, so wird ihre Oberfläche gleichmäßig um einige Millimeter gehoben. Wird dieser Wasserzusatz der Tonschicht durch Verdunstung wieder entzogen, so müßte letztere ebenso gleichmäßig wieder in ihren früheren Zustand zurücksinken. Das ist auch das, was man theoretisch, d. h. an Hand der 'natürlichen' Logik und physikalischer Alltagserfahrungen für die entsprechenden Vorgänge in der Natur erwarten sollte. Da verschanzt sich nun die 'Selbstverständlichkeit' der Bodenrisse hinter die Unvollkommenheit der makroskopischen Verhältnisse. Lehrt doch die tägliche Erfahrung, daß schlechtes Holz und Mauern Risse bekommen, wenn sie austrocknen, daß Glas springt, wenn es zu stark erwärmt wird. Bei näherem Zusehen wird man jedoch erkennen, daß es sich in all diesen Fällen um örtlich bestimmte Differenzen von Beschaffenheiten oder Einwirkungen handelt, zwischen Ursache und

Wirkung besteht ein lokal-kausaler Zusammenhang; z. B. das sich zusammenziehende Holz ist an bestimmten Stellen eingespannt, Nägel halten es fest, es ist mit Aststellen durchsetzt, Ungleichheiten der Maserung machen sich bemerkbar und schaffen sich in Zerrungen und Rissen Ausdruck; die übrigen Partien bleiben verschont. Bei den feinerdigen, tischebenen Schwemmlandsböden wird man vergebens nach solchen lokalen Ursachen suchen, sie sind Schulbeispiele von Homogenität. Das regelmäßige Netz der Trockenrisse erhält erst durch unsere 'Tendenz zum Minimum innerer Spannungen' und durch den Begriff der 'systemkausalen Anordnung' der Spalten seine theoretische Rechtfertigung.

Die ausgelösten inneren Spannungen können als Begleitung verschiedener Vorgänge auftreten.

1. Trockenrisse. Sie sind eine Kontraktionserscheinung im Gefolge der Austrocknung der Erdoberflächenschicht. Sie entwickeln sich besonders schön in homogenem, tonigem, lehmigem Schlammboden, der nach intensiver Durchfeuchtung plötzlicher Austrocknung ausgesetzt ist, in unseren Klimaten z. B. in ausgetrockneten Teichen, Talsperrren und Pfützen, Schwemmländern und Deltabildungen. Sie sind eine verbreitete Erscheinung in Wüsten und Steppen (bes. Salzsteppen). In der Trockenzeit vollzieht sich hier ein energisches Zerplatzen des Bodens. Fast alle Vertiefungen im Sandmeer sind mit einer Tonschicht überzogen, die, hart wie eine Tenne, ein völlig horizontales Parkett bildet und von Trockenrissen polygonal durchschnitten ist. Ist die Tonschicht nur 1—2 cm mächtig, dann krümmen sich die eintrocknenden Platten wie Hobelspäne zusammen und werden ein Spiel des Windes. (*J. Walther* 1912 p.275; ebda.p.243 über 'Netzleisten' als Sandausfüllungen und 'Trockenwülste' als Formen salzhaltigen Tones; s. a.: *O. v. Niedermayer*, Die Binnenbecken d. Iran. Hochlds. 1920 p.54; *Passarge*, Die Trockengebiete Algeriens. *Stille's Geol. Charakterbilder*. 17.1913: Gebiete mit reichlichen Winterregen und trockenen und heißen Sommern.) — Die Größe der polygonalen Felder scheint in Proportion zu der Dicke des kontrahierten Lagers zu stehen. (*B. Högbom* 1910 p.56.) Die Felder haben gewöhnlich einen Durchmesser von 10 bis 20 cm (Handspannengröße), können aber auch in bedeutend größeren Dimensionen auftreten.

2. Zellenboden. Er ist ein ausgesprochen arktisches Phänomen. Er ist „ganz einfach zu erklären als Folge der Zusammenziehung der obersten Erdschichten, wenn sie im Frühling und Sommer auftauen, während die darunterliegenden Schichten gefroren bleiben“. „Dies muß zur Entstehung von Spalten führen.“ (*Nansen* 1921 p.109.) Wie den Struk-

turboden, trifft man auch ihn vorzugsweise dort, wo der Erdboden eine perenne Tjäle hat, d. h. beständig gefroren ist und nur die obersten Schichten auftauen. Eine Deutung des Zellenbodens als 'Trockenrisse' ist abzulehnen, „da noch im Spätsommer die Sedimente . . . eine starke Durchfeuchtung zeigen“. (*O. Stoll* 1917 p.4.) „Der Boden kann oft ganz naß sein, sogar unter Wasser stehen, ohne daß die Spalten sich geschlossen haben.“ (*B. Högbom* 1914 p.322.) Wären es Trockenrisse, so würden sie bei Durchnässung sehr bald verschwinden. Wir haben es vielmehr mit der Entladung von Spannungen zu tun, die durch die Volumverminderung beim Auftauen entstanden sind. Der Boden ist starken Kontraktionen und Expansionen ausgesetzt; gefrorener Zellenboden zeigt vielfach geschlossene Spalten, aufgetauter sehr weite Spalten.

Die Formen sind dank dem durch die Feuchtigkeit bedingten intensiven Systemzusammenhange sehr regelmäßig. „Der Boden ist durch Spalten bienenwabenhähnlich in ein Zellensystem zerteilt. Die bisweilen ganz regelmäßig sechseckigen Polygone messen meistens ein paar Dezimeter im Durchschnitt, seltener einen Meter oder mehr; fast immer sind sie bedeutend gewölbt . . . Die Spalten, die oft ganz scharfkantig sind, klaffen bis zentimeterbreit und mehr. Sie sind bisweilen nur einige Zentimeter tief offen, aber ihre Fortsetzung kann dann bei Grabung tiefer verfolgt werden.“ (*B. Högbom* 1914 p.321.) — Der Gegensatz zu den Trockenrissen erschließt sich schon äußerlicher Betrachtung: Die Trockenrisse zeigen durchschnittlich einen unregelmäßigeren Habitus; auch sind sie selten so tief; die Erdpartien pflegen — wohl entsprechend der von oben her angreifenden Verdunstungskontraktion — eine charakteristische konkave Form mit aufgebogenen Kanten zu zeigen, nicht, wie hier, das umgekehrte Aussehen. (Ebda. p.322.)

Die oft bedeutende Wölbung der Polygone des Zellenbodens gibt zu denken. Möglicherweise haben wir hier schon einen Übergang zu den Strukturphänomenen. Die Feuchtigkeit konzentriert sich (vgl. Büßerschnee!) in das Innere der Zellen; in diesen Zentren hält sich dann das Eis am längsten. Dies werden nicht die einzigen Übergänge sein, die zwischen Textur- und Strukturformen, zwischen Spannungs- und Reibungsphänomenen vorkommen.

B. K r i t i s c h e r T e i l.

XI.

Stoff und Form in der Morphologie.

Je mehr die Geomorphologie zum Range einer nicht mehr vorwiegend 'beschreibenden', sondern 'erklärenden' und 'allgemeinen' Wissenschaft emporsteigt, umso weniger wird sie sich in ihrem inneren methodischen Aufbau von stofflichen oder von formalen Gesichtspunkten leiten lassen. Sie wird vielmehr bestimmte Geschehensarten ins Auge fassen, deren Wirksamkeit sie durch die verschiedenartigsten Stoffgebiete hindurch und in ihren verschiedensten formalen Ausprägungen zu verfolgen und zu geordneter Darstellung zu bringen sucht. Vorliegende Arbeit macht einen Versuch nach dieser Richtung. Das methodische Ausgehen von der Form ist unter allen Umständen als bedenkliche Abirrung und als unwissenschaftlich zu bewerten, wie wir noch im einzelnen zeigen werden. Doch wird für gewisse praktische Zielstellungen und Betrachtungsweisen das methodische Ausgehen vom Stoffe seinen Wert behalten, wenn auch die immer mehr sich vollziehende Absonderung einzelner Stoffgebiete als selbständige Disziplinen aus dem Körper der Geographie und Geologie seine unvermeidliche Folge ist.

Die 'Elemente', die den stofflichen Charakter der Erdoberfläche bestimmen: Gestein, Verwitterungsboden, Eis und Wasser, Luft, geben den Namen für die einzelnen Teildisziplinen her: 1. Gesteinskunde (Geologie, Mineralogie), 2. Bodenkunde, 3. Glaziologie (Gletscherkunde), 4. Hydrographie, mit den Unterabteilungen der Meereskunde, Flußkunde, Seenkunde und der Grundwasser- und Quellenkunde (Hydrologie), 5. Meteorologie (Aerologie, Atmosphärologie, Witterungskunde), 6. der Russe *S. J. Jakowlew* (1915) möchte noch die „Sandkunde“ (Psammologie als weitere selbständige Disziplin abspalten. Der Pole *A. B. Dobrowolski* (1923) wünscht neben der Lithosphäre, der Hydrosphäre und der Atmosphäre die „Kyrosphäre“ besonders behandelt, d. h. also den gesamten Bereich der Erdoberfläche, in dem das Eis auftritt. Die „Wissenschaft vom Eise“ stellt sich zur Aufgabe das Studium der Bildung und Kristallisation des Eises, der physikalischen Eigen-

schaften des Eises mit Einschluß des Schnees, seiner Struktur- und Bewegungsformen und seines Vorkommens in der Luft. —

Aufgabe der Geologie und der physischen Erdkunde ist die möglichst umfassende Beschreibung und Erklärung aller Erscheinungen in dem ihnen zufallenden 'Forschungsgebiete'. Ein bestimmtes Geschehen findet hier Beachtung in dem Maße, als es in der individuellen und 'einmaligen' Wirklichkeit unserer Erdhülle realisiert ist, in ihr eine Rolle spielt, weniger nach der allgemein-physikalischen und prinzipiellen Bedeutung der in diesem Geschehen sich offenbarenden allgemeinen Gesetzmäßigkeiten. Physiogeographie und Geologie bedürfen so als „Ereigniswissenschaften“ (zum Begriff vgl. *W. Windelband*, Rektoratsrede 1894) notwendig der Ergänzung durch die „Gesetzeswissenschaft“ der Allgemeinen Morphologie. Bezeichnendes Symptom hierfür ist das überwiegende Interesse, das die 'einmaligen' Prunkstücke und 'Paradeschautellungen der Natur', wie Cañontäler, Wasserfälle, Alpenklamme usw. in den Lehrbüchern noch für sich beanspruchen, während z. B. der Polygonboden dem Geologen „mehr ein Kuriosum der Natur als eine direkt wichtige Erscheinung“ zu sein scheint (*B. Högbom* 1914 p.309), im Gegensatz zu der Solifluktion, dem undifferenzierten 'Bodenfluß', der wegen des durch ihn erfolgenden Materialtransportes für die arktische Denudation von der größten Bedeutung sei. Wir können solche offenerzigen Feststellungen nur begrüßen, denn sie zeigen uns wie im Blitzlicht das Andersgerichtetsein des Forschungsinteresses der Geologie, auch der sog. 'allgemeinen' oder 'dynamischen' Geologie. Das Forschungsinteresse des Geologen wird auch in Zukunft nach wie vor zugewandt bleiben den Vorgängen der Gesteinsbildung (Lithogenese), der Gesteinsveränderung („Metharmose“; *P. Kefler* 1921), der Abtragung (Denudation, Erosion) — weniger der Form als dem Maße der Abtragung — und der Auflagerung. Ebenso wird sich die Geographie wieder ihrem ureigentlichen Aufgabenbereich, der Landschaftskunde und Länderkunde zuwenden, da die Aufgabe, die ihr als der verbindenden Disziplin unter den Erdwissenschaften bislang mit zufiel, nämlich die Auffindung allgemeiner physikalischer Gesetzmäßigkeiten in den wechselseitigen Beziehungen zwischen den verschiedenen Erdsphären (Lithosphäre, Hydrosphäre, Atmosphäre usw.), nunmehr von der 'allgemeinen Morphologie' als einer besonderen naturwissenschaftlichen Disziplin mit eigener Methode und Fragestellung übernommen wird.

Die allgemeine Morphologie, die gerade diese 'wechselseitigen Beziehungen' als solche zum Problem erhebt, wird nicht bei der oberflächlichen Auffassung dieser Beziehungen als Wirkungen stofflicher, den erwähnten 'Sphären' zugehöriger, 'Agentien' stehen bleiben ('Wind-

wirkung', äolische, fluviale, glaziale Erosion usw.), sondern wird diese noch mehr oder weniger abstrakt-logischen 'Beziehungen' zur Anschaulichkeit bestimmter konkreter, physikalischer Vorgänge verdichten.

Die allgemeine Morphologie wird uns zu der Erkenntnis führen, daß für die zwischen zwei Medien sich abspielenden Vorgänge (insbesondere die Reibungsvorgänge) die materielle Beschaffenheit dieser Medien nur von sekundärer Bedeutung für die resultierenden Formen ist, daß es vielmehr in erster Linie auf die Art des Reibungsgeschehens (Parakinese, Diakinese usw.) ankommt, sowie auf den Feinheits- oder Zerteilungsgrad des Materials und etwa sonstige notwendige Voraussetzungen. Dünenformen lassen sich auf Kalksand ebenso gut nachweisen wie auf Quarzsand, Gipssand, Tonsand und Schneesand; wesentlich ist nur die körnige Struktur als solche; unter Wasser ebenso gut wie unter Wind (vgl. Kap. I u. VIII). Die Solifluktionserscheinungen lassen sich auf Spitzbergen in Diabas- wie in Sandstein- und Schiefermaterial gleichmäßig verfolgen. Günstig für die morphologische Aktivität scheint ein Verteilungszustand der Materie zu sein, wie er bei den 'Tonen' (im Sinne der physikal. Chemie, insbes. der Kolloidchemie) vorliegt: Die disperse Phase überwiegt, und das Dispersionsmittel (Wasser, Wasserdampf, Luft) ist nur als eine Füllung in den Zwischenräumen zwischen den Mineralteilchen anzusehen. Auch hier sind die physikalischen Vorgänge und Zustände nicht gebunden an ein bestimmtes Material, denn 'Tone' sind nach einer neueren Auffassung einfach „solche disperse Gebilde von Mineralfragmenten, in denen Teilchen kleiner als $2\ \mu$ vorherrschen“. (*Sven Odén* 1916 p.177.) Die 'Sande' unterscheiden sich von den 'Tonen' nur durch ihren geringeren Feinheitsgrad. — Folglich kann das Material keine Einteilungsgrundlage abgeben.

Oft sind die morphologischen Prozesse von chemischen Umsetzungen begleitet. Dies ändert jedoch nichts an dem rein physikalischen, stoffunabhängigen Charakter dieser Vorgänge. Bei den *Liesegang*schen Ringen verläuft der physikalische Vorgang der 'rhythmischen Fällung' unabhängig von der chemischen Reaktion (z. B. der Silberchromatbildung), trotz des ungefähren zeitlichen Zusammenfalls der beiden Vorgänge. (*R. E. Liesegang* 1913 p.86.) Kolloidchemie („Morphologie der Gele“), Kapillarchemie, Mechanochemie (*H. Freundlich*) und Elektrochemie (*Nernst*; vgl. *W. Köhler* 1920 p.35) sind, ebenso wie die Geomorphologie, letzten Endes physikalische Wissenschaften.

Ebensowenig ausschlaggebend ist der Aggregatzustand der Materie. Bei den Schienenriffeln sind es feste Körper, die aneinander vorbeigleiten, bei den subaquatischen Sandrippeln feste, 'halbflüssige' und flüssige, bei den subaerilen Sandrippeln feste, 'halbflüssige' und gas-

förmige, bei den Wolkenrippeln gasförmige Körper (mit fein zerteilter Flüssigkeit in Suspension). — Denn die sog. 'innere Reibung', auf die es hier ja allein ankommt, ist nicht an einen bestimmten Aggregatzustand gebunden. Sie kann alle Grade von höchster Dünflüssigkeit bis zur Festigkeit des Glases annehmen. (Vgl. Handwbt.d.Nat.I.1912.p.86: „Aggregatzustände“.) Die Besonderheit der 'festen' Stoffe wird sich also nur darin äußern, daß sie einer Verschiebung ihrer Teilchen gegeneinander einen besonders großen Widerstand entgegensetzen, d. h. daß sie eine relativ sehr große innere Reibung haben; der gasförmige Zustand dadurch, daß bei ihm die innere Reibung sehr gering ist.

Die absoluten Formausmaße geben ebenfalls keine Handhabe zur Aufrichtung von Scheidewänden. In Großform und Kleinform offenbaren sich die gleichen Gesetzmäßigkeiten. Von den 'mikromorphen' Miniaturgebilden des Zimmerexperiments läßt sich dasselbe Gesetz ablesen wie von den 'makromorphen' Gebilden der großräumigen Natur. Von den Dünensystemen der innerasiatischen Wüsten über die Riesenrippeln der Gezeitenströme zu den Sandrippeln des Strandes und den Miniaturrippeln des Experimentes führt eine lange Stufenleiter hinab. *H. P. Möller* (1921) erhielt bei seinen rhythmischen Fällungen in pflanzlichen Zellmembranen gelegentlich auf 1 mm 1000 und mehr Striche. ('Transponierbarkeit' der morphologischen Phänomene.)

Das physisch Gemeinsame, das all diesen scheinbar so äußerst verschiedenartigen physikalischen Gebilden zugrunde liegt, zu bestimmen, ist eine spezifische Aufgabe der allgemeinen oder 'physiologischen' Morphologie. Sie lehrt uns verschiedene Geschehenskategorien auseinanderzuhalten und führt uns ein in das Wesen des übersummativen, gestaltmäßigen Geschehens, u. a. in das der Reibungs- und Spannungsvorgänge und der durch sie geschaffenen Formen der Oberflächen und Unstetigkeitsflächen. Nur dieses methodische Vorgehen führt zu physikalisch exakten Ergebnissen.

Der nächstliegende, doch leicht zu trügerischen Erkenntnissen führende Weg ist der, von einer Betrachtung der Formen ausgehend, nach bestimmten formbildenden oder 'gestaltenden' Kräften zu suchen, d. h. also nach Kräften, deren Wesen darin bestehen soll, bestimmte Formen zu erzeugen. Voraussetzung dieser Methode ist der bewußte oder unbewußte Glaube, daß bestimmten Formen auch bestimmte Kräfte zugeordnet sein müßten. Doch kennt schon der morphologische Anfänger zur Genüge die Warnungstafel: 'Formhomologie!' Die Vieldeutigkeit und Verschwommenheit der Formen mag sich immerhin bei schärferer Analyse etwas verlieren (*Hettner* 1921), doch ist mit den in der menschlichen Natur begründeten subjektiven Hemmungen, denen die Formanalyse unterworfen ist, nun ein-

mal zu rechnen. Das Vermögen der Formauffassung und Formbeschreibung ist relativ wenig entwickelt. Erschwerend kommt nun noch hinzu, daß der Mensch gerade auf dem Gebiete der Formen zu grober Generalisierung, Klassifizierung und Typisierung neigt ('Wellenformen', 'Kreisformen', 'Kegelformen'). Dem willkürlichen und phantastischen Verflechten und Verweben aller möglichen Analogien ist hierdurch weitgehend Vorschub geleistet (Gleichung: Welle = Welle!). Die Mannigfaltigkeit der Formen wird auf wenige 'Grundformen' oder 'Urformen' (Gerade, Welle, Kreis, Wirbel, Spirale, Symmetrieverflechten) zurückgeführt und jede dieser 'Grundformen' hingestellt als das Ergebnis einer entsprechenden 'Formtendenz' oder 'Gestaltungstendenz' der Materie.

Da wäre zunächst zu fragen, welche Besonderheiten diese genannten Formen (Welle, Kreis usw.) zum Range von 'Grundformen' erhoben haben. Anscheinend handelt es sich hier um geometrische Elementarformen von hoher Ordnungsdignität. Bezeichnend für sie ist die Einfachheit und Gleichheit der Formelemente, ihre dadurch zwingende Einheitlichkeit, die ihre Auffassung erleichtert. (*R. Hamann*, Ästhetik. 2. A. p. 84 ff.: „Form“.) Jeder Teil wirkt durch die Beziehung zu anderen notwendig. — Ferner sind es Formen von besonderer physischer (praktischer Dignität: Es sind glatte, ebene und runde Formen, also Formen geringster äußerer Reibung, also zugleich äußerst 'praktische' Formen. Die subjektiven Vorzüge: Einfachheit, Regelmäßigkeit, Einheitlichkeit und leichte Handhabung wurden nun in echt anthropomorpher Weise umgedeutet zu objektiven Vorzügen: Man glaubte, es müsse im Plane der Natur liegen, diese Grundformen zu bevorzugen, d. h. also, man dürfe mit der Wirksamkeit von Kräften rechnen, die eigens auf die Schaffung solcher Formen hinzielen. Der Begriff des Kreises (und der Kugel) erschien den Griechen als der einfachste und vollkommenste! (*W. Frost* 1910 p.70.) Formulieren wir diesen Gedanken so, daß wir sagen: 'Die Natur hat die Tendenz, kreisförmige Gebilde zu schaffen', so haben wir hiermit eine neue Forschungsdisziplin begründet, die wir 'Kyklologie' nennen wollen, und ein dem *Baschimschen* mindestens gleichwertiges 'Gestaltungsgesetz' aufgestellt. Als Belege für die Wirksamkeit dieses 'Naturprinzips' können wir anführen: Die Pupille des Auges ist kreisrund, der Horizont ist es, der Regenbogen ist es; die Bläschen des Dampfes sind kugelförmig; viele niedere Tier- und Pflanzenformen zeigen Kreisgestalt, usw. (Vgl. *W. Frost* a.a.O.) Auf die Erscheinung der Oberflächenspannung könnte hingewiesen werden, die ja auch bestrebt sei, kugelförmige Gebilde oder Gebilde mit kleinsten Ober-

flächen zu schaffen. Man glaubt im Hinblick hierauf von einer „Tendenz zur kleinsten Oberfläche“ oder von einer „Tendenz zur Prägnanz der Struktur“, d. i. einer „Tendenz zur maximalen Knappheit der Ausbreitungsart“ (W. Köhler 1920 p.249ff., 255ff.) sprechen zu dürfen. Seifenblasen ordnen sich, sei es isoliert oder vergesellschaftet, stets nach dem „Prinzip der kleinsten Flächen“ an.

Die höchst eigenartige Zentrifugalkrafttheorie der Flußmäander wird uns auf dem Hintergrunde dieser Anschauungen verständlich. Die 'Zentrifugalkraft' ist hier formalistisch umgedeutet zu einer 'kreisförmige Bewegungen veranlassenden' Kraft, was letzten Endes auf eine leere Paraphrase hinausläuft. Da die Zentrifugalkraft in ganz bestimmten Fällen kreisförmige Bewegungen veranlaßt, wird sie auch in diesem Falle dafür verantwortlich gemacht, umso mehr, als sonst keine andere 'Kraft' zur Erklärung in Frage zu kommen scheint. Ja, so naiv unbewußt verläuft diese Selbsttäuschung, daß sogar die übliche Zentrifugalkraftformel in die Berechnungen eingesetzt (z. B. Vujević 1906 p.21ff.) und über die inneren Widersprüche der Beweisführung immer noch hinweggesehen worden ist. Die Zentrifugalkraft ist bekanntlich eine Trägheitskraft und könnte als solche etwa von einem gedachten Mittelpunkt aus einen stetig wirkenden Zug auf tangential fortstrebende Wasserteilchen ausüben, d. h. also, sie würde keine Abweichungen von der Fließrichtung schaffen, sondern im Gegenteil beseitigen! Man hilft sich damit, daß man das 'tangential Fortstreben' in Form einer anfänglichen starken Abweichung von der Gefällsrichtung als 'Voraussetzung' in die zeichnerische Darstellung hineinschmuggelt, oder daß man die „Zentrifugalkräfte“ (beachte den Plural!) einfach „ins Spiel kommen“ oder „sich entwickeln“ läßt.

Die geomorphologische Allergewaltskraft 'Erosion' betätigt sich als 'Seitenerosion' in obigem Sinne 'bogenbildend'¹⁾. Die geomorphologische Begriffsbildung läßt sich hier nicht besser charakterisieren als durch die Definition der Seitenerosion als 'seitliche Verbreiterungen oder Ausbuchtungen der Bettwände veranlassende Kraft', und Tiefenerosion als 'rinnenartige Vertiefungen schaffende Kraft'. Oder, wenn wir die Wirkungen weiter fassen, Seitenerosion als 'flächenhafte Verebnungen (Weitungen) schaffende Kraft' und Tiefenerosion als 'lineare Hohlformen schaffende Kraft', woneben dann noch die 'punktweise wirkende', zentrische Hohlformen schaffende Erosion

¹⁾ Der Begriff der 'Seitenerosion' ist schillernd. Man bezeichnet damit 1. den Vorgang der gleichmäßigen, flächenhaft-denudierenden Abtragung der Uferwände und Talwände, 2. den Vorgang der seitlichen Erweiterung und Verschärfung der Mäanderkurven, der im wesentlichen ein Umlageungsvorgang ist. (Vgl. z. B. Ahlmann 1914 p.55,67 u.71.)

zu nennen wäre (*Supan* 1916 p.474)²⁾. Stellt der Morphologe Erosion und Denudation in Gegensatz, so denkt er sich jene als eine mehr linienhaft, diese mehr flächenhaft wirkende Kraft. Im Materialabtrag erkennt er sehr scharfsinnig das Wirken der 'zerstörenden Kraft', im Materialauftrag das Wirken der 'aufbauenden Kraft' (z. B. des Windes; *W. Behrmann* 1919 p.153).

In allen Fällen sind es, wie wir sehen, bestimmte resultierende Formtypen, die die Grundlage für eine Beseelung der 'toten' Erdoberfläche mit 'Kräften' abgeben; Kräften, die, wie die Werkzeuge eines Kunstschreiners, lediglich der jeweiligen Herstellung bestimmter Formen dienen. Der strengen Denkwege der Physik müde, zimmert sich so der Morphologe auf eigene Faust sein Weltgebäude mit Hilfe illegitimer Gestaltungsprinzipien oder auch Entwicklungsprinzipien.

Kein Requisit aus dem 'Formenschatze der Erdoberfläche' ist von so vieldeutigem und unbestimmtem Charakter wie die Wellenform. Und doch glaubt *Otto Baschin*, seit Jahrzehnten, unter dem Einfluß der schon stark formalistischen *Helmholtz*schen Wellentheorie, eine „wellenförmige Oberflächenformen“ schaffende Kraft entdeckt zu haben, der alle Wellenformen auf der Erde ihre Entstehung verdanken sollen. Er spricht kühn von einem überall gültigen „Gestaltungsgesetz“ oder bescheidener von einer „Tendenz“ der Materie zur Wellenbildung. Seine immer wieder in etwas verändertem Gewand vorgetragene Lehre wurde teils begeistert aufgenommen, teils mit Stillschweigen übergangen, nirgends treffend widerlegt. Etwa gleichzeitig forderte *Vaughan Cornish* (1899) die neue Disziplin der „Kymatologie“, als den Teil der Geographie, „which deals with the Waves and Wave-structures of the Earth“. *Cornish* hatte jedoch hierbei weniger die Möglichkeit einer einheitlichen theoretischen Fundierung als die methodische Zweckmäßigkeit dieser Disziplin vor Augen (Die Form als Prinzip der Einteilung

²⁾ Der grundlegende Fehler liegt darin, daß der Morphologe die 'Ordnungsschemata' des deskriptiven Systematikers einfach als 'Kräfte' in seine kausalen, physikalischen Erklärungen übernimmt. So ist z. B. 'Erosion' gar keine physikalische Kraft, sondern ein morphologischer 'Vorgang', ein besonderer 'Vorgangstypus', der zu entsprechenden 'Formtypen' hinführt. Die Unterscheidung in Tiefen- und Seitenerosion stellt nur die vorwiegende 'Arbeitsrichtung', 'Tätigkeitsrichtung' oder 'Wirkungsrichtung' dieses Vorganges fest. (Vgl. *Philippson* II, 2.1924. p.119f.; *Pet.Mitt.* 1886p.71.) Geschlossene Hohlformen lassen sich auf einen zentralen Punkt, Fließformen auf eine Linie, und ausgedehnte, breite Verlagerungen auf eine Fläche 'beziehen'. Diese geometrischen Beziehungsgebilde verwandeln sich unter den Händen des Geographen zu den 'Wirkungsweisen' besonderer 'Kräfte'. Gegen eine kritische Handhabung der Ordnungsschemata zur Herstellung der ersten Orientierung, Etikettierung, Bestandsaufnahme und Charakterisierung ist natürlich nichts einzuwenden.

und Zusammenfassung!). 1900 bildete sich in England ein Ausschuß zur Untersuchung von „Terrestrial Surface Waves“ (zit. *Hunt* 1904), von dem man allerdings später nicht mehr viel gehört hat. *Baschin* hätte mit seinen Verallgemeinerungen und dem Aufsuchen entfernter Analogien nicht solchen Anklang gefunden, wenn seine Lehre nicht einem elementaren menschlichen Bedürfnisse nach Vereinheitlichung und Vereinfachung des Weltbildes entgegenkäme, als naive Reaktion auf das bedächtige Vorwärtsschreiten der vorwiegend analytisch gerichteten zünftigen Wissenschaft, die immer nur neue Verschiedenheiten entdeckt und neue Schwierigkeiten auftürmt. So möchte *A. Schmauß* (1921 p.10) die Anwendbarkeit der *Baschin-F. M. Exner*-schen Mäandertheorie auf die Wellenbewegungen der Luftzirkulation begrüßen, da wir dann „die Befriedigung“ hätten, „eine Fülle von Vorgängen . . . durch ein Prinzip erklären zu können, das wir im ganzen Weltgeschehen wiederfinden“. Es wäre eine einfache Sache um die Naturwissenschaft, wenn ihre Früchte so leicht zu pflücken wären, wenn etwa Wasser-, Sand-, Luft- und sonstige Wellen, gleich welcher Entstehung, alle einem Prinzip gehorchten, wenn die Flußmäander als 'horizontale Wellen' den übrigen 'vertikalen Wellen' an die Seite zu stellen wären, wenn zwischen dem im Winde flatternden „Wimpel eines fahrenden Schiffes“ und dem „bewegten Wasserfaden des Flusses“ wirklich eine „vollkommene“ und „offensichtliche“ Analogie bestünde (*Baschin* i. Zs. Ges. f. Erdk. 1915 p. 638f.; *Die Naturwiss.* 1918 p. 358), wenn die unter dem Einflusse der regelmäßigen Passatwinde entstandenen „natürlichen Windfahnen“ des *Juniperus* auf den westl. Kanaren (*O. Burchard* i. Met. Zs. 1912 p. 1; s. a. *Jak. Früh*, Die Abbildung der vorherrschenden Winde durch die Pflanzenwelt. Jber. geogr.-ethn. Ges. Zürich 1901/02 p. 56—153; weitere Lit. s. bei *Free* 1911!) wirklich „ein besonders auffälliger Beleg“ für die Tendenz zur Ausbildung „wellenähnlicher“ Formen wäre (*O. Baschin* i. Pet. Mitt. 1918 p. 52)³⁾, wenn die Bezeichnung der oszillatorischen Bewegungen der Luft als „Mäanderbildungen in der Atmosphäre“ (*A. Schmauß* i. Met. Zs. 1920 p. 295) mehr wäre als eine vage Analogie, wenn die flüchtige Ähnlichkeit, welche Uferlinien und Stromstrich mäandrierender Flüsse mit den Parameterkurven von Strömungslinien von Potentialbewegungen (*F. M. Exner*, Über oszillierende Strömungen in Wasser und Luft. Ann. Hydr. 1919 p. 158, vgl. Fig. 1) haben können, eine (sogar mathematisch fundierbare) „Erklärung“ für jene abgegeben würde. Schon rein äußerlich ist es ein

³⁾ Die Baschinsche Auffassung ist um so befremdlicher, als die bisherige Erklärung durchaus befriedigt: Die Zweige werden durch den Winddruck nach der Leeseite abgelenkt und diese Abkrümmung schließlich durch Wachstum fixiert (Einseitige Kronenausbildung durch Mechanomorphose).

Mangel des *Baschinschen* Gestaltungsgesetzes, daß es nur die sog. „wellenförmigen“ Oberflächenformen umfaßt, wodurch diese willkürlich aus dem Verbande der übrigen rhythmischen Phänomene gerissen werden. Die Barchane und die mannigfachen Übergänge zu ihnen fallen schon aus dem starren Schema (gestreckte und parallele Kämme! *Helmholtz!*) heraus. Andererseits sind z. B. die Reibungswellen, wie wir zeigten, gar keine Wellen im Sinne periodisch an- und abschwellender Bewegung.

Die Geomorphologie schleppt sich noch heute mit alten Kleidern, die andere Wissenschaften schon längst abgelegt haben. Auch in der Pflanzenmorphologie hat es eine Zeit gegeben, wo man glaubte, daß mathematisch faßbare Gestaltungsgesetze den Wuchs der Pflanzen und Tiere beherrschten. *Schimper* und *Braun* sprachen von der „Spiral-tendenz“ als von einer realen Kraft, die in dem Wachstum der Pflanzen sich äußern soll. „In ähnlichem Sinne suchte *H. G. Brown* die Tierformen auf einfache geometrische Formen, wie Kegel, Keil u. dgl. zurückzuführen, und er gab diesen Abstraktionen den Namen ‘Gestaltungsgesetze’. Es bestand die Meinung, morphologische Betrachtungen solcher Art seien der Aufstellung kausaler Naturgesetze äquivalent.“ (*W. Frost* 1910 p.76.)

Neuerdings glaubt der Wiener Biologe *Paul Kammerer* (1919) ein „fundamentales, beigeordnetes und selbständiges Prinzip des kosmischen Geschehens“ entdeckt zu haben, das er „Gesetz der Serie“ nennt. *Kammerer* gibt der Fassung seines „Gesetzes“ die letzte Erweiterung, deren ein formales Gestaltungsprinzip überhaupt fähig ist, indem er jegliche formale Bindung verschmätzt und der Natur lediglich die Tendenz zuschreibt, einen von gewöhnlicher Kausalität unabhängigen geordneten Wechsel von „Häufungen“ und „Leeren“ im Raum und in der Zeit herbeizuführen. Es ist offenbar das noch sehr unklar geschaut Problem der ‘Verteilung’ und der systembedingten Selbstdifferenzierung, welches den sonst ernst zu nehmenden Biologen bei seinen wortreichen⁴⁾, verschwommenen, Schiefheiten und Widersprüche bietenden Ausführungen leitete. *Kammerer* beruft sich u. a. auf die Untersuchungen *Sterzingers* (1911), die auf das Problem der Verteilung viel klarer lossteuern. *Sterzinger* geht aus von der oft unerklärlichen „Häufung“ bestimmter Ereignisse an gewissen Zeitpunkten (Geburtenziffer, Treffer bei Glücksspielen), von

⁴⁾ Sein großformatiges Buch hat 486 Seiten. Nachdem er uns durch seine Gravitations-, Imitations- und Attraktionshypothese hindurchgequält hat, entringt sich ihm auf S. 367 das Geständnis: „Wir sind nicht im Besitze der Kriterien, wovon Dauer und Stärke serialer Zusammenhänge bestimmt wird und woran wir ihr Bestehen oder Aufhören zu erkennen vermögen.“ Mit anderen Worten: Wir wissen gar nichts.

der „Häufung“ bestimmten Materials an gewissen Raumpunkten (Klexographie, Knäuelungen im Straßenverkehr, Blättersilhouetten der Bäume, in denen eine unverkennbare innere Rhythmik waltet, Gruppen- und Komplexbildung der Planeten und Atome, u. a. m.). Auf Grund solcher Erscheinungen glaubt *Sterzinger* (1911 p.218) „einigermaßen berechtigt zu sein, von einer allgemeinen Naturerscheinung sprechen zu dürfen“, und er „möchte sie die Erscheinung von der durchgängig auftretenden Knäuelung bezeichnen“. Aus verschiedenen Versuchen gewonnene Diagramme legten ihm „den Gedanken nahe, daß die Ursache der Knäuelung ein in den betr. Geschehnissen auftretender Rhythmus ist“. *Sterzinger* faßt Rhythmus hier dynamisch, als periodisch an- und abschwellendes Geschehen, vergleichbar den physikalischen Verdünnungs- und Verdichtungswellen. Im Grunde ist jedoch auch seine Theorie formalistisch, wenn er z. B. Gebirgszüge als „erstarrte Rhythmen“ aufgefaßt wissen will. Die *Kammerersche* „Serie“ ist nichts anderes, trotz aller gegenteiligen Versicherungen. Sie ist einfach ein Sammelname für regelmäßige Wiederholungen jeglicher Art in Raum und Zeit, sogar für solche, die ganz gewöhnlicher „Berührungskausalität“ unterworfen sind. Ich nenne nur das Beispiel des geschleuderten Flachkiesels, der nach *Kammerer* (p.455) eine „Serie“ auf der Wasseroberfläche tanzt, und der an jeder Stelle, wo er auftritt, als neue „Serie“ kreisförmig sich fortpflanzende Wasserwellen und entsprechende Schallwellen erregt. Diese formalistische Fassung des Rhythmusbegriffes ist es, die wir in populären naturphilosophischen Schriften immer wieder antreffen. Nicht nur fällt jedes periodische Geschehen unter diesen Begriff, sondern überhaupt jede regelmäßige Wiederkehr oder Anordnung von Etwas in Zeit und Raum. Angewandt auf lineare Geschehensabläufe erscheint hier die dynamische Wellenform zersprengt in die geordnete Wiederkehr von Beziehungspunkten. (Vgl. dagegen unsere empirische Fassung des Begriffes der 'Periodizität'!) — Auch rein temporäre Sukzessionen treten so in innerliche Beziehungen zueinander, das rhythmische Geschehensprinzip verbindet sie durch mystische Fäden.

Das Aufstellen von universalen, kosmischen Geschehensprinzipien sollten die Herren Psychologen, Physiologen, Biologen, Mediziner, Ästhetiker usw. ruhig den Physikern als den berufenen Leuten dazu überlassen und auf eine selbstgezimmerter naturphilosophischer Fundierung ihrer Betrachtungen lieber Verzicht leisten. Manchen unter ihnen ist nicht einmal der fundamentale Unterschied zwischen subjektiven (physiologischen) Rhythmen und objektiven (physikalischen) Rhythmen aufgegangen. Ihr Standpunkt ist naturgemäß der subjektive. Ihr

Blick ist auf die Bewertung der subjektiven Wahrnehmungsinhalte, nicht auf die der objektiven Zusammenhänge gerichtet. Der periodische Wechsel von Tag und Nacht, die in regelmäßigen Abständen erfolgenden Lichtblitze eines Leuchtturmes, das periodische Erscheinen eines an einem rotierenden Radkranz befestigten Lichtes usw. werden lediglich als Wahrnehmungsgebilde beurteilt, der ursächliche physikalische Vorgang selber dagegen bleibt unbeachtet. Die Ausführungen von *R. Westphal* (Elemente des musikal.Rhythmus 1872 p.3; zit. *Th. Wiemayer*, Musikal.Rhythmik u.Metrik 1917 p.24) betonen nachdrücklich den subjektiven Standpunkt. Wesentlich für den Rhythmus ist nach ihm 1. daß der Rhythmus das Gefühl einer Ordnung in uns erweckt (die Bewegungen des Sturmwindes und des rauschenden Wasserfalls sind hier nach nicht rhythmisch!); 2. „daß die aufeinanderfolgenden Grenzscheiden der einzelnen Zeitabschnitte nicht so weit auseinanderliegen, daß wir nur vermöge einer gewissen Reflexion ihrer Zusammengehörigkeit uns bewußt werden“.

Zu der Zeit, als *Schelling* seine „Naturphilosophie“ schrieb, war es die Erscheinung der 'Polarität', die man in der Struktur mancher Kristalle, besonders aber im Magnetismus und in der Elektrizität vorfand, die man geneigt war als eine Kategorie zu betrachten, welche die ganze Welt beherrsche (Tierreich — Pflanzenreich, Stickstoffpol — Kohlenstoffpol). Neuerdings taucht dieser Gedanke bei *Kammerer* (1919 p.150ff.) wieder auf, der den Begriff der Polarität rein äußerlich als polare Formenanordnung faßt. So soll sich im Reiche des Organischen die Polarität im Äußeren der Lebewesen hauptsächlich als Symmetrie (!) und Metamerie geben. Durch die Auffassung der symmetrischen Gebilde als 'polar' werden auch diese in das mystische Dunkel hineinbezogen, in das erst die kosmischen 'Prinzipien' Licht hineinbringen. Ist Symmetrie für das nüchterne Auge lediglich eine Form geometrisch-regelmäßiger Anordnung, ist sie z. B. bei der lebenden Substanz im wesentlichen ein Ergebnis der im Laufe der phylogenetischen Entwicklung wirksam gewesenen Anpassungsvorgänge an äußere Faktoren (*L. Rhumbler*, Körperregionen und Bauplan der Tiere. Handwbt.d.Nat.5.1914.p.964ff.), so erscheint sie hier als 'gefrorene Polarität', als „ein unbeweglicher, kristallisierter Rhythmus“. (*O. L. Forel* 1920.) Als Analogien des Polarisierungs- und „Symmetrierungsdranges“ der Naturgebilde nennt *Kammerer* aus dem Reiche des Anorganischen: Kristalle, Klangfiguren, Kraftlinien der Magnete, Bugwellen eines fahrenden Schiffes (!) usw. Zwei aufeinander zulaufende Billardkugeln sind nach ihm „polar gerichtet“; prallen sie aneinander ab, so tritt „Umkehr der Polarität“ ein. Dies mag zur Charakterisierung genügen.

„Ein ganz allgemeines Prinzip“ soll auch den Erscheinungen zugrunde liegen, denen *W. Behrmann* (1919) sein „Gesetz des Anwachsens durch sich selbst“ oder sein „Prinzip der Selbstverstärkung“ (vgl. Kap. „Selbstverstärkung“!) entnommen hat. „Es sollte,“ so wünscht *Otto Jessen* (*Pet.Mitt.*1922 p.84f.) „wie mir scheint, mehr als bisher geschehen, bei der Erklärung der Vorgänge auf der Erdoberfläche herangezogen werden.“

Zusammenfassung.

Vorstehende Ausführungen verfolgen den Zweck, die Methoden und Ziele einer dynamischen Morphologie gegen andersgeartete Forschungsrichtungen abzugrenzen. Da ihre Methoden und Ziele allgemeinphysikalischer Natur sind, so ergibt sich hieraus die Berechtigung, die Schranken der gewohnten Stoffgebiete zu überschreiten und Phänomene, die für die oberflächliche Betrachtung nichts Verwandtes zu haben scheinen (wie Strukturboden und Büßerschnee, Schneedünen und Sanddünen), einer gemeinsamen und vergleichenden Behandlung zu unterwerfen. Andererseits gilt es jedoch, die Gefahren einer solchen Grenzüberschreitung zu kennzeichnen und die Abwegigkeit der sog. kymatologischen Forschungsrichtung darzutun, die gewisse äußerliche Formübereinstimmungen schon für hinreichend zur Feststellung von „Analogien“ und zur Aufstellung von „Gesetzen“ erachtet.

XII.

Mechanisierung und Geometrisierung.

„Formung ist nicht Gestaltung.“
Rich. Hamann, Ästhetik.

a) Deduktive Einstellung.

In den Anwendungsgebieten der Physik hat man sich vielfach an ein passives Hörigkeitsverhältnis gegenüber dem derzeitigen Stande der reinen Physik, namentlich der klassischen Mechanik, gewöhnt, ein Hörigkeitsverhältnis, das oft noch durch die Machtansprüche der mechanistischen Weltanschauung verschärft wird. Eine bestimmte Erscheinung aus dem Anwendungsbereiche der Physik 'erklären', heißt oft nichts anderes, als sie in schon bekannte Begriffszusammenhänge, in das gegebene physikalische Weltbild einzuordnen, wo doch 'erklären' zunächst nur Erhellung, Aufklärung des Dunklen, Zergliederung, Analyse des Komplizierten und Unübersichtlichen, Herausschälung des

Elementarvorganges, Feststellung des Anteils der verschiedenen Vorgänge (ob bekannt oder unbekannt, ist gleichgültig), kurz: induktive Analyse sein sollte. Besonders bei den großräumigen (makromorphen) Erscheinungen, mit denen es die Geomorphologie zu tun hat, ist die Versuchung groß, zu glauben, es ließe sich mit dem Rüstzeug der Schulmechanik jede Erscheinung mühelos 'erklären' und etikettieren. Die *Davis*-Schule entwickelte hierin eine besondere Großzügigkeit. Ein paar 'Kräfte' genügen ihr, die sie mit einer selbstverständlichen Sicherheit wirken läßt, auch da, wo wir über ihre Bedeutung und Wirksamkeit nur ganz ungenügend unterrichtet sind. (Vgl. *Passarge* III.1920. p.518.) Die Aufgabe der Morphologie sieht sie in der „weder neuartigen noch schwierigen“ Ableitung von Folgerungen, die sich aus der Wirksamkeit der „bekannten Vorgänge“ Verwitterung und Erosion an ur-einfachen Ausgangsformen nach erfolgter Hebung ergeben. (*Davis-Rühl* 1912 p.71 u.ö.) Den Kleinformen gegenüber ist man vorsichtiger. Für *Davis-Rühl* u. a. fallen sie als belanglose 'Kuriositäten' überhaupt nicht in das Arbeitsgebiet des Geologen. (Vgl. dagegen *A. Hettner* 1921 p.11ff.); oder man rechnet sie nach dem Vorgange des alten *Schuchzer* unter die „Spielereien der gestaltenden Naturkraft“, die an dem mechanistischen Charakter des Weltgetriebes nichts ändern; sie werden dem morphologischen Raritätenkabinett zugewiesen.

b) Gravitation.

Der Geist der Morphologie ist leicht zu fassen, ihr Gebäude leicht zu überschauen. An Hand des in unserem Bewußtsein angelegten Gegensatzes Außen—Innen scheidet sie zunächst die 'Kräfte' auf und über der Erde von den 'Kräften' in der Erde, jene nennt sie 'exogen', diese 'endogen'. 'Einwirkung' von außen und 'Ausgestaltung' von innen stehen sich gegenüber. Die Erkenntnis, „daß das Relief des festen Landes ein Erzeugnis endogener und exogener Kräfte ist“, bezeichnet *Walter Penck* (1920 p.65) geradezu als „das Fundament morphologischer Wissenschaft“. In Wirklichkeit ist aber die sog. 'Erdoberfläche' gar keine mathematische Fläche, sondern eine breite Zone mit fließenden Grenzen. (Vgl. entsprechend die Definition der 'Küste' bei *Philippson* II,2.1924.p.285!) Die Grenze zwischen 'Innen' und 'Außen' ist nur ganz im groben zu ziehen; physikalische Unterscheidungen lassen sich im Anschluß hieran nicht treffen; hier wie dort wirken dieselben physikalischen Gesetze. Ist bei Flußläufen der felsige Untergrund, oder die Verwitterungsdecke, oder die Oberfläche der wandernden Gesschiebebänke, oder erst der Wasserspiegel die Grenze zwischen 'Innen' und 'Außen'? Soll man die Fließ- und Texturformen der aus-

tretenden Lavaströme als 'endogen', die in der Bodendecke selbst verlaufenden Bildungsvorgänge des Strukturbodens als 'exogen' bezeichnen? Wenn man nun aber ein so kompliziertes und enges Zusammenwirken zwischen den beiden „Wirkungsgruppen“ (*Philippson* II,2.1924.p.345) anerkennen muß, so wird man um so leichter die Anschauung preisgeben, als seien dem 'Innen' und dem 'Außen' je verschiedene und besondere elementare 'Kräfte' zugeordnet. Für die physikalische Betrachtung ist diese Scheidung praktisch wertlos. So verläuft z. B. der Vorgang der Rippelmarkenbildung in der von Luft bzw. Wasser durchsetzten Reibungsgrenzschicht selbst.

Was das 'Außen' selbst anbetrifft, so erscheint es im Lichte der weniger kritischen Forschung ebenfalls von einer grandiosen Einfachheit zu sein. Die Gesamtheit der exogenen Kräfte, Agentien, Vorgänge, Wirkungen, Erscheinungen erscheint ihr in Wirklichkeit nur als eine einzige Kraft. Für diese 'Kraft' gab die 'Erosion' den Namen. 'Erosion' wurde so zum Sammelbegriff für die Gesamtheit der Verwitterungs- und Abtragungsprozesse, für die Summe aller Zerstörung und Abfuhr. Da das Forschungsinteresse jedoch vorwiegend auf die mechanischen Bewegungsvorgänge gerichtet war, hielt man es für zweckmäßig, die Vorgänge der Auflockerung, des Zerfalls und der Umwandlung eines Gesteins an Ort und Stelle als 'Verwitterung' auszuseiden und sich der Fortbewegung (Abtragung) des von vornherein Losen, des Gelockerten und Zertrümmerten, also den Massenbewegungen und Massentransporten, als den eigentlichen Erosionsvorgängen, zuzuwenden. (Vgl. *Sjuts* 1907; *A. Hettner* 1921.) *Passarge* (1912) setzt für Erosion einfach „Abtragung“, für Erosionszyklus „Abtragungsverlauf“ ein. „Destruktion“ wird zum Inbegriff alles exogenen Geschehens. (*Supan* 1916 p.472.) Welche Kräfte gibt nun die Physik dem Morphologen an die Hand zur Erklärung der 'Abtragungsvorgänge'? Es war bald ausgemacht, daß wiederum eine einzige Kraft allen Abtragungserscheinungen zugrunde liege: die Gravitation.

Schon *Wettstein* (1880) läßt seine Untersuchungen in der Behauptung gipfeln: „Eins wird mir immer klarer, daß in der Gravitation die allgemeine und einheitliche Ursache gegeben ist nicht bloß für die Bewegung der Sonnen . . ., sondern auch für die Strömungen des Gasigen, Flüssigen und Festen auf der Erde, für die Gestaltung der Länder und Meere, für die Aufrichtung der Gebirge“ usw. Und *Walther Penck* (1922 p.124) glaubt schon erklären zu können: „Die Abtragungsprozesse können heute in den Grundzügen als bekannt gelten. Die Abfuhr der aufbereiteten Massen besorgt die Schwerkraft. Die Massenverlagerungen, welche die Abtragung ausmachen, sind also

durchweg Gravitationsströme.“ Und an anderer Stelle (1920 p.65): „Die exogenen Kräfte gehorchen ausschließlich der Gravitation.“ „Mit voller Gewißheit lassen sich heute schon die für ihr Zustandekommen und ihren Ablauf maßgebenden Gesetzmäßigkeiten erkennen“ (Beweglichkeit des Gesteinsmaterials und Gefällswinkel). — Nach *Supan* (1916 p.472) „trachten die exogenen Wirkungen“ (Agentien, destruktiven Kräfte) „die Erhöhungen abzutragen, die Unebenheiten auszugleichen, mit einem Wort: eine Verflachung herzustellen“, während die Wirksamkeit der „endogenen Faktoren“ in der ständigen Neubildung von Unebenheiten bestehen soll. — Der maßgebende Gedanke namentlich der *Davisschen* Richtung ist deshalb der Gedanke der fortschreitenden Abtragung und Einebnung des Landes, der Ausgleichung aller Reliefunterschiede, mit der *Davisschen* Peneplainlandschaft in der Ferne als drohendem Schreckbild.

c) Selektion.

Diese pan-gravitistische Auffassung bedurfte jedoch einer theoretischen Ergänzung, denn die Erfahrung weiß durchaus nichts von einem so eindeutigen und eintönigen Verlauf des Geschehens. Seitdem die weitgehende Bedeutung der selektiven Vorgänge erkannt war, lag die Versuchung nahe, diese Vorgänge schematisch überall da anzusetzen, wo neue Reliefunterschiede geschaffen wurden, wo Unterbrechungen bzw. Modifizierungen des allgemeinen Nivellierungsvorganges stattfanden. Alle vorkommenden Reliefformen lassen sich a priori und formal einwandfrei mit Hilfe des 'Prinzips' der Selektionswirkung erklären, und diese leichte Anwendbarkeit wird zur Gefahr namentlich da, wo eine andere Erklärungsmöglichkeit zu fehlen scheint. Das mechanistische Naturbild kennt nur die (auf dem Wege der Auswirkung lokaler Differenzen) 'geformte' Landschaft, da die Möglichkeit einer (auf dem Wege der Selbstdifferenzierung) 'gestalteten' Landschaft nicht gesehen wird. Jenen Typus in seiner Eigenart herauszustellen und so seine Abgrenzung gegen diesen Typus zu ermöglichen, ist die Aufgabe eines besonderen Kapitels. (Kap. „Selektion“.)

d) Hobelnde Erosion?

Der Bevorzugung der Gravitations- und Selektionswirkungen entspricht ganz die Auffassung der auf der Erdoberfläche vor sich gehenden Veränderungen als grobmechanische Vorgänge. Diese Auffassung, die eine ungeheuerliche Verfälschung des Weltbildes zur Folge hatte, ist heute, dank den kritischen Vorstößen aus allen Teilgebieten,

im Schwinden. In dem mechanischen Weltbilde wurde abgehobelt, ausgehobelt, ausgemeißelt, gesägt, eingeschnitten, ausgefurcht, geschürft ('Tiefenschurf'), gewühlt und gegraben ('Erosion'), gerissen und gebohrt, zerschabt ('Korrosion') und abgeschabt ('Abrasion'), genagt und gewetzt, gestutzt und abgeschrägt. Dadurch, daß diese Phrasen immerfort wiederholt wurden, hatten sie sich zuletzt „zur Überzeugung verknöchert und die Organe des Anschauens völlig verstumpft“ (*Goethe*, Weim. Ausg. II, 8 p. 120). Das neue, mehr chemisch orientierte Weltbild kennt nur noch das eine laufende Schema: 1. Mechanische Auflockerung, 2. Chemische Zersetzung, 3. Abtragung, Abtransport (Ablation), 4. Schliff (Glättung, Politur) und Abrundung. Dies sei nun an einigen Vorgängen erläutert.

Wie ein Hobel mit Hilfe des Hobelmessers das Holz abschabt, so soll auch das strömende Medium mit Hilfe der Geschiebe den festen Untergrund ausfurchen und so ganze Täler austiefen. Noch *Gravelius* (1914 p. 28) singt dieses Hobellied: „Indem es sich mit Geschieben belädt, erhält das Wasser nun erst das kräftige Werkzeug (!), mit dem es die Erdoberfläche furcht. Diese von der Wucht des Wassers vorwärtsgestoßenen Geschiebe greifen nun den Boden wühlend, bohrend, reißend an, so daß aus der embryonalen Furche, der Regenrille, allmählich eine Hohlform entsteht.“ Vor die Aufgabe gestellt, einmal tatsächliche Fälle von 'Korrosion' des Wassers anzugeben, wüßte man kaum etwas anderes zu nennen als die von wirbelnder Reibung geschaffenen Strudellöcher, Riesentöpfe und Kolke (So z. B. *Hettner* 1910 p. 367; und die Lehrbücher), die als lokale und sekundäre Erscheinungen unmöglich die Grundlage einer Theorie der Flußerosion abgeben können.

„Die mechanischen Wirkungen des Regens sind im Vergleich mit den chemischen nur von geringer Bedeutung.“ (*Kayser* 1921 I. p. 406.) Besonders augenfällig ist das Vorherrschen der chemischen Auflösung bei den Karrenbildungen. „L'eau n'y exerce presque aucune action mécanique; elle n'a qu'une action dissolvante.“ (*H. Schardt* 1884, zit. *Eckert* 1895.) Die Karren gehen ihrer bezeichnenden Formen verlustig, sobald sie in unreinem Kalk, z. B. in kieseligem oder tonreichem Kalkstein, oder unter Pflanzenbedeckung entstehen. (*A. Heim* 1877/78.) Mechanische Vorgänge wirken nur zerstörend auf den Prozeß der Karrenbildung ein. Die Annahme einer aushobelnden Wirkung von Oberflächenwässern, oder von subglazialen Schmelzwässern, die ein wirksames Schleifmaterial (!) in kleinen Rollstücken, Sand und feinem Steinmehl mitbringen (*Simony*, zit. *Eckert* 1895 p. 49ff.), hat deshalb mit Recht wenig Anklang gefunden.

Erst die Ungleichheit in der Intensität der mechanischen Auf-

lockerung und chemischen Zersetzung erzeugt die Unterschiede, die die Abtragung alsdann morphologisch auszuwerten imstande ist. Die Destruktionsarbeit der Flüsse „erreicht ihre höchsten Werte dort, wo tiefgründige Verwitterungserde oder mächtige, feinlockere Ablagerungen den Felsboden bedecken; wo diese fehlen, wie im Gebiet des alten Inlandeises an den Canadischen Seen und im Nordosten der Union, ist die mechanische Abtragung auffallend gering“. (*Supan* 1916 p.526.) Nach der Annahme *Passarges* (III p.323) greift die Verwitterung unter den an Grundwasser reichen Tälern viel tiefer hinab als auf den Gehängen. Auf die talbildende Wirkung tektonischer Schwächelinien und anschließender Denudation wurde bereits hingewiesen.

Auch beim fließenden Eise hängt die Wirkung ganz von der Verwitterungsfähigkeit der Unterlage ab. Ist diese nur gering, so ist auch der Abtrag minimal, die Wirkungen des Gletschers auf sein Bett erschöpfen sich in Schleifung, Schrammung, Glättung und Rundung seines felsigen Bettes. Besonders schön zeigt sich dies bei den Kalksteinen im schwedischen Grundgebirge, die gerade wegen ihrer geringen Härte gegen Frostverwitterung relativ geschützt waren, deshalb vom Eise nur zu Rundhöckerformen abgeschliffen wurden, während die viel härteren Silikatgesteine mit ihren vorspringenden Ecken und Kanten der Frostspaltung bzw. Zerklüftung immer wieder neue Angriffsstellen boten und so zerbröckelt als Geschiebe oder Blöcke vom Eise wegtransportiert werden konnten, mit der Wirkung, daß sich die Kalksteine nunmehr über die 'härteren' Silikatgesteine als Höhen und Rücken erheben: ein gutes Beispiel gegen die Hobeltheorie. (*A. G. Högbom* 1905 p.195f.) Bei fast allen Gesteinsarten findet dank der niedrigen Temperatur in den tiefen Gletscherschichten eine anhaltende und beträchtliche Verwitterung der vom Gletscher bedeckten Felslage statt, „so daß die Gletscherbewegung nicht festes, sondern bereits zermürbtes Material aufzuarbeiten und als Grundmoräne fortzuführen hat“. (*S. Günther* ²II. 1899 p.893; Ders. i. Zs. f. Gewässerk. 4. 1902.p.313.) Das Schwergewicht der glazialen Erosion liegt also in der transportierenden Tätigkeit des Eises und nicht in seiner mechanischen Massenwirkung auf die seinem Fortrücken entgegenstehenden Hindernisse. Das Relief der sog. 'Glazialtäler' erhielt nach *Brunhes* (1906/07 p.289ff.) seine erste rohe Ausbildung durch die verfrachtende Tätigkeit der prä- und interglazialen Wildbäche und Flüsse und ist dann durch eine eigenartige Arbeitsgemeinschaft des Eises mit den subglazialen Schmelzwässern weiter ausgestaltet worden. Die sanftgeneigten Gehängeformen der glazialen Täler in arktischen Gebieten sind nach *B. Högbom* (1914 p.290f.) allein ein Werk der Frostverwitterung. Die Tätigkeit der Gletscher besteht lediglich darin, das losgemachte Material wegzutransportieren und da-

durch die Abhänge von Schutt freizuhalten. Die Felsenabhänge werden so immer wieder aufs neue dem Frost ausgesetzt, „wodurch sie sich parallel mit sich selbst verschieben und somit das Tal erweitern und ein Querprofil zustandebringen, das durch seinen breiten ebenen Talboden und seine gleichmäßigen Seitenböschungen charakterisiert wird“.

Ein genaueres Studium der Abrasionsvorgänge lieferte entsprechende Ergebnisse. Die Fjorde Spitzbergens zeigen ein Steilufer auch dort, wo die Exposition gegen die Wellen sehr unbedeutend ist. Denn die Steilufer sind in erster Linie der niederbrechenden Wirkung der Frostsprengung zuzuschreiben. Die direkt erodierende Kraft ist ganz untergeordnet; Brandung und Eisgang beschränken sich auf die Verfrachtung des losgesprengten Materials. (*B. Högbom* 1914 p.294.) „An Küsten, die nicht der gewaltsamen Brandung der Ozeane offen ausgesetzt sind, spielt die Wellenbewegung der Hauptsache nach die Rolle einer Art von Abfuhramt, das die losen Verwitterungsprodukte wegschafft und dadurch ständig den Gesteinsgrund entblößt hält.“ (*H.W. Ahlmann* 1916 p.329.) Die ‚Abnutzung‘, ‚Abschabung‘, ‚Abnagung‘ durch die „Artillerie des Strandes“ (*Playfair*) hat man gewaltig überschätzt. Die direkte Wellendenudation beschränkt sich im wesentlichen darauf, die scharfen Formen durch Abfeilung der Kanten zu runden. (Ebda.p.351.) Im übrigen fördert sie natürlich die mechanische Verwitterung durch die Schlagkraft der Brandung, durch die Verdichtung und Verdünnung von Luft in Klüften und Spalten und durch den hydraulischen Druck der Wassermasse der Brandung in Klüften und anderen Höhlungen. (Ebda. p.329, nach *A. Geikie*.) Man faßt deshalb, wie dies von seiten guter Beobachter auch von jeher geschah, ‚Abrasion‘ treffender als „Kollektivbegriff für all die Prozesse, die direkt oder indirekt im Zusammenhang mit Wellenbewegung stehen und die Strandzone denudieren“. (Ebda.p.330.) Auch das Ergebnis dieser Prozesse war, wenigstens für das von *Ahlmann* untersuchte Grundgebirge des nordwestl. Schonen, nicht eine abgesägte, sondern eine zersplitterte, zerfetzte oder gezähnelte Steilküste.

Für die Tätigkeit des Windes verweisen wir auf die Darstellung von *J. Walther* (1912 p.166 u. ö.). Nach ihm ist „die abhebende Wirkung der bewegten Luft auf die weichen oder durch Verwitterung gelockerten Teile der Felsen die wichtigste Kraft in der Wüste“. Dadurch, daß der Wind Staub- und Sandteilchen aufhebt, schafft er Hohlräume; „diese Tätigkeit ist unvergleichlich wichtiger, als wenn er dann mit den aufgehobenen Teilchen den Felsboden schleift und bearbeitet“. „Wenn das Wüstenklima nicht die Kraft besäße, Felsen zu zerbrechen, Steine zu zerspittern und harte Massen in ein Haufwerk kleiner Bruchstücke zu zerlegen, dann würden die Stürme, die Tag und Nacht, oft

wochenlang durch die Wüste jagen, die mit unwiderstehlicher Gewalt Zelte aus dem Boden reißen, . . . auch nichts abzutragen haben.“ Die Ansicht, daß der Wind sich des Sandes als eines Werkzeuges bediene, um zu hobeln und zu korrodieren, entbehrt jeder Erfahrungsgrundlage. „The wind is usually an agent of removal rather than an agent of attack.“ (*Free* 1911 p. 24.) Als Spuren der tatsächlichen ‘Windkorrasion’ sind deshalb nur der ‘Staubschliff’ als Wirkung der feinen staubartigen Fragmente, und der ‘Sandschliff’ als Wirkung des bei kräftigen Stürmen aufgehobenen Quarzsandes zu nennen. (*J. Walther* 1912 p. 179ff.) Es ist derselbe Vorgang, der auch in der Technik praktisch verwertet wird, beim Sandstrahlgebläse. (Beispiele von Wirkungen der Windkorrasion auf das verschiedenste Material s. *Free* 1911 p. 27; Ref. v. *K. Stamm* i. *Int. Mitt. f. Bodenkunde* 3. 1913. p. 52.)

Auch bei der Ausbildung der ‘Wannennamib’ (Küstenwüste SW-Afrikas) ist die Deflation die modellierende Kraft. Nach einer Durchfeuchtungs- und Verwitterungsperiode werden die Salzpelite und die aufgelockerten Verwitterungsprodukte vom Winde ‘abgehoben’. „Der Wirkung der Deflation auf den Untergrund sind dadurch scharfe Grenzen gezogen, daß sie nur so weit wirken kann, wie eine Auflockerung der verwitterbaren Gesteine erfolgt ist. Aber es ist wohl zu beachten, daß ständig von neuem eine Auflockerung erfolgt.“ (*E. Kaiser* 1922.)

Die eigenartige gitter-, netz- und wabenförmige Verwitterung der Sandsteine wurde vielfach als ausmodellierende und auswetzende Wirkung des Windschliffes und Sandgebläses (oder der Wasserausspülung, des Spaltenfrostes usw.) gedeutet. Nach den neueren Untersuchungen von *O. Beyer* (1911), *Häberle* (1915) und *Paul Kefßler* (1921) ist auch sie in erster Linie auf chemische Verwitterung zurückzuführen. Die mechanischen Kräfte und die Vegetation wirken nur sekundär und unterstützend.

Sogar die Kegelform der ‘Hügelmoränen’ mit ihrem von dem Moränenmantel überdeckten Eiskerne versuchte man mechanisch zurechtzuzimmern. *Workman* (1913/14 p. 74) rechnet mit einer „Auffaltung“ der Eismasse durch seitlichen Druck zu „ridges and protuberances“. Die Entstehung von „hillocks“ an Stelle der zu erwartenden „ridges“ wird damit begründet, daß die Stärke des Druckes an verschiedenen Stellen variiere. Auf Grund solchen Verfahrens kann man tatsächlich die Entwicklung von Kegelformen aus einer ebenen Fläche heraus geometrisch-mechanisch deduzieren. Es genügt hierzu die Annahme: 1. einer Kraft, die die Masse rippenartig gliedert (Druck), 2. einer Kraft, die die Rippen zerhackt (die stets vorhandenen Unregelmäßigkeiten), 3. einer Kraft, die die entstandenen würfelförmigen Gebilde abböscht, stutzt und abrundet (Schwerkraft), und der Kegel ist fertig! Die Querzersägung

der Kämme der Büßerschneefelder zu zackenförmigen Gebilden ist für *C. Schoy* (Pet.Mitt.1914 II.p.267) eine logische Selbstverständlichkeit und ein Vorgang, der der Erklärung „keine nennenswerten Schwierigkeiten bietet“. Wie sollte „die vertiefende Wirkung der Sonne“ denn anders an den schon gebildeten Kämmen „zur Geltung kommen“? „Auf der abschüssigen (!) Oberfläche des Kammes ist neue Rinnenbildung kaum möglich.“ Die Sonnenstrahlen würden in die Gefahr kommen, bei ihrer Arbeit auszurutschen und sich den Hals zu brechen! Einige Autoren denken an die verschärfte Herausmodellierung von, in der schmelzenden Firndecke bereits angelegten, strukturellen Differenzen oder an eine Herauspräparierung der Zacken und Kegel nach Art der Gletschertische.

Baschin geht bei seiner Barchantheorie von einem Sandkegel als hypothetischer 'Urform' aus und läßt dann die Seiten so lange sich rascher verschieben als die Mitte, bis die zu demonstrierende Barchanform erreicht ist¹⁾. Weshalb die Flanken nunmehr ihr 'voreiliges' Wesen verlieren und die Form sich jetzt als Ganzes gleichmäßig vorschiebt, verrät uns *Baschin* leider nicht.

Die trichterförmige Hohlform der Dolinen wurde von *Cvijic* (1893) als das Ergebnis mechanisch-geometrischer 'Zuböschung' hingestellt. „Indem das Wasser an einer Klufffläche versickert, erweitert es die Kluff und schafft einen engen Schlot; seine Wandungen werden allmählich durch Lösung abgeöschert (!) und von Karren durchfurcht, daher zuerst trichter-, endlich schüsselförmig, wobei auch der Durchmesser wächst.“ (*Machatschek* III.1919.p.74; ebenso *Sölch* 1914 p.149.) Der Vorgang ist jedoch eher mit dem der Wannbildung in Parallele zu setzen, nur daß die angesammelte Feuchtigkeit nicht verdunstet oder ausgeschwemmt wird, sondern durch Klüfte und Risse in die Tiefe versickert. Abgesehen von der untergeordneten Selektionswirkung fällt den (meist engen) Spalten also lediglich die Rolle zu, dem rinnenenden Wasser und den gelösten und zersetzten Stoffen den Austritt nach unten zu gestatten; eine Bedeutung für die Ausgestaltung der Form haben die Spalten nicht. (Vgl. *Hettner* 1921 p.77.) Sie sind lediglich eine Voraussetzung der Wannbildung. Formbildend wirkt vielmehr die örtliche Intensität der Verwitterung, die wieder bedingt ist durch den 'Stehrhythmus' der Feuchtigkeitsverteilung.

Nicht grobmechanisch formende Einwirkungen sind es also, die das Antlitz der Erde gestalten. Stoß und Gegenstoß, Druck und Pres-

¹⁾ Ebenso *Solger* 1910 p.113, und schon *Reclus*, zit. *Sokolow* 1894 p. 91 f. u. 168 f. Die Beobachtung ergibt jedoch, daß die Vorwärtsbewegung der Sandkörner auf der ganzen Luvseite mit gleicher Geschwindigkeit in allen Teilen stattfindet. (Vgl. *Sokolow* 1894 p.262.)

sung sind nicht die alleinigen 'Weltallkräfte', sondern fast durchweg begegnet man dem stillen und unauffälligen, aber sich stetig summierenden Werke von Kleinbewegungen, die man nach der Lage der heutigen Forschungsrichtungen schon der physikalischen Chemie zuweisen muß. Denn wenn der morphologische Vorgang auch rein physikalischer Natur ist, so haben doch die uns hier interessierenden Vorgänge mit Hilfe der Methoden der physikalischen Chemie (bes. der Kolloidchemie) bereits weitgehende Klärung erfahren. Das stille, geordnete Walten der 'neptunischen' Kräfte, für die sich schon ein *Goethe* einsetzte, scheint auch hier gegenüber den Gewaltigkeiten und Unberechenbarkeiten der 'plutonischen' und 'vulkanischen' Kräfte den Sieg davonzutragen.

e) „Mechanische Unmöglichkeiten“ und mechanische Postulate.

Wegen ihrer Einfachheit und Zugänglichkeit, wegen ihrer engen Beziehungen zu den Erfahrungen und der Logik des Alltags verleiht die klassische Schulmechanik in ihrer Anwendung auf die Beurteilung der Naturvorgänge von jeher dem Wissenschaftler ein trügerisches Gefühl der Sicherheit, und der Freude über die Begreiflichkeit und Durchsichtigkeit der Natur für jeden, der einigermaßen über eine Kenntnis der mechanischen Gesetze verfügt. Die mechanische Gesetzensammlung ist so vollkommen und zuverlässig, daß man es sogar schon wagen kann, mit ihrer Hilfe die Naturvorgänge deduktiv abzuleiten, die Möglichkeit oder Existenz gewisser Vorgänge und Sachverhalte als mit den mechanischen Gesetzen unvereinbar zu bestreiten, sie als „Mystik“ abzulehnen, von „Beobachtungsfehlern“ zu sprechen und sie „zwanglos“ im schulmechanischen Sinne zu deuten. Auf Grund der gewonnenen Einsicht in das Wesen der rhythmischen Phänomene werden uns im folgenden die Widersprüche zu den unzweifelhaften Beobachtungstatsachen auf die Ergänzungsbedürftigkeit des Kanons der mechanischen Gesetze für den Handgebrauch des Morphologen hinlenken.

Hydrographen und Hydrologen sehen seit Jahrhunderten ihre Lebensaufgabe in der Entschleierung der Gesetze des fließenden Wassers, und doch hat das alte Bekenntnis *Galileis* für sie auch heute noch volle Gültigkeit: „Ich habe weniger Schwierigkeiten in der Entdeckung der Bewegung der Himmelskörper gefunden, ungeachtet ihrer erstaunlichen Entfernung, als in Untersuchungen über die Bewegung des fließenden Wassers, welche doch unter unseren Augen vorgeht.“ (*Lippke* 1910 p.291.) Der Geomorphologe ist unbeschwert von solcher Bedenk-

lichkeit. „Die physikalischen Gesetze der Wasserwirkung sind leicht zu verstehen²⁾ und durch Versuche festzustellen.“ „Bei keiner anderen Kraft (!) kann man mit solcher Wahrscheinlichkeit die entstehenden Formen ableiten wie beim fließenden Wasser“, meint *Passarge* (III. 1920.p.253). Gerade die Theorie der Erosion des fließenden Wassers „läßt sich rein mechanisch und . . . geometrisch fassen“, meint *Hettner* (1921 p.212). Die Entstehung des Flußnetzes ist für *Davis* (*Davis-Rühl* 1912 p.31f.,p.35) gar kein Problem. Daß sich „kleine Bächlein bilden“, daß „Ströme fließen“, daß eine sog. „Erosion“ Hohlformen schafft, gehört nach ihm zu den „Kenntnissen“, die wir im Schülerranzen für die Deduktionsstunde „mitbringen“ müssen. Die „Deduktion“ selbst vollzieht sich in der Weise, daß man das verschwommene hypothetische Relief einer „Uroberfläche“ unter der „Einwirkung gewisser bekannter Vorgänge“ sich so „entwickeln“ läßt, daß schließlich eine der Beobachtung in etwa entsprechende Form resultiert. Die angestrenzte Gedankenarbeit in der Deduktions-Dunkelkammer hätte *Davis* vielmehr zu dem Ergebnis führen müssen, daß durch die einsetzenden Abtragungsprozesse die „Urmulden“ der „Uroberfläche“ nicht vertieft und verschärft, sondern verflacht und eingeebnet werden müssen, wodurch die „Urflüsse“ sich wieder zu flachen Schichtfluten zurückbilden würden.

In sich folgerichtiger und einwandfreier sind die deduktiven Überlegungen, die *Chamberlin* und *Salisbury* (Geology.Lo.1908, übernommen von *Passarge* 1912 p.32 u.58) anstellen. Sie lassen eine aus gleichmäßigem, feinem Material aufgebaute vegetationslose Insel von gleichmäßiger Kegelform einem gleichmäßigen Niederschlag ausgesetzt sein. Das von der Logik geforderte Ergebnis dieser Voraussetzungen ist dann eine ebenso gleichmäßige Abspülung des Kegels zu einem unverändert gleichförmigen, doch flacheren Kegel. Flußbetten, die den Kegel zerschneiden, entwickeln sich „naturgemäß“ (will sagen: gemäß den Forderungen einer rationalistischen, hier durchaus nicht „naturgemäßen“ Logik) erst bei ungleichartigem und daher verschieden widerstandsfähigem Material. (Selektive Ausräumung!) Für die Bedeckung mit einer Firn- und Gletscherschicht soll dasselbe gelten. Der Gedanke der morphologischen Passivität des Fließmediums wird von *H. Wagner* (Lehrb.¹⁰I,2.p.260) auf die Spitze getrieben. Er läßt die Gewässer „den Gesetzen der Schwere nachgebend“, also passiv, sich in den Hohlformen der festen Unterlage sammeln. Nach *Gravelius* (1914 p.41) sind es stets vorhandenen „minimalen Unregelmäßigkeiten des Reliefs“, die bei sonst gleichmäßiger Abdachung „das Wasser zu rinnenhaftem Abflusse sammeln und es zu einem flächenhaften, in breiter Schicht

²⁾ So drückt sich auch *Calciati* (1909) aus: „assez facile à concevoir“.

erfolgenden Abflüsse nicht erst kommen lassen“. Würde man sich die *Davissche* „Uroberfläche“ einmal spiegelglatt denken, so würde es dann auch nicht zur Entwicklung eines Flußnetzes kommen können (!), denn ohne die „Hindernisse, oft unscheinbarer Art“, geht es nun einmal nicht. (*Davis-Rühl* 1912 p.33.) Da jedoch „kein Stück der Erdoberfläche eine mathematische, glatte Fläche“ ist, so wird es bei losen Massen, die „auf irgendeiner Abdachung abwärtswandern“, auch stets Ursachen geben, „welche die Bahnen benachbarter Massenteilchen sich vereinigen lassen“. (*W. Penck* 1920 p.90; ähnlich *Gravelius* 1914 p.41.) Unter der Annahme völliger Gleichförmigkeit der Ausgangsverhältnisse sollte es also „eigentlich“ gar nicht zur Entstehung eines Flußnetzes kommen³⁾. Mit derselben Logik schließt man, daß auch ein gleichmäßiger *W i n d* nur eine gleichmäßige Strömung der obersten Sand- oder Wasserschicht erzeugen könne und daß eine Sandfläche, die „absolut glatt“ ist, keine Dünenbildung aufweise, sondern lediglich von einer gleichmäßig flachen Sanddecke überzogen werde; auch sonst sei die Wirkung des Windes eine durchweg nivellierende, Erhöhungen vermöge er von sich aus nicht zu bilden, eine wellige Gestaltung der Trennungsfäche werde erst dadurch möglich, daß „in bestimmten Abständen die Reibung bald ein Maximum, bald ein Minimum erreiche“, es sei aber durchaus „nicht einzusehen, weshalb“ und inwiefern dies der Fall sein könnte; die Mithilfe eines „remous“ oder „obstacle“ (*F. A. Forel* 1883 p.57f.) sei unabweisbar. (*Bertololy* 1900 p.15f.; *S. Günther* ²II.1899. p.616; *B. de Beaumont* 1886, zit. Ebd.) — *C. Schoy* (Pet.Mitt.1914.II. p.211; Referat zu *Workman* 1914, Pet.Mitt.1916 p.112) leugnet die „undulatorische Schmelzwirkung“ des über eine Schneefläche hinfahrenden warmen und feuchten Windes (Vgl. Kap. „Büßerschnee“!) rundweg ab, indem er sie als „physikalisches Uding“ bezeichnet. Es gibt allerdings auch kaum ein physikalisches Buch, welches ihn eines Besseren hätte belehren sollen. „Wohl vermag der Wind eine Flüssigkeitsoberfläche zu falten (!) und zu furchen. Aber dann erfolgt der Windstoß (!) auf ein nahezu elastisches (!) Medium“, usw. usw.

³⁾ Da man ferner die Möglichkeit einer systembedingten Abgrenzung der Bereiche mehrerer aneinander grenzender Flußsysteme nicht sah, wurde auch die Umräumung jedes Flußsystems durch Bodenerhebungen zu einem logischen Postulat. Die Versuche Jaggars (vgl. oben Kap. „Flußnetz“) zeigen jedoch, daß zur Entstehung von Wasserscheiden irgendwelche Bodenerhebungen nicht notwendig sind. Vgl. auch Philippon II, 2. 1924. p. 87: „Früher glaubte man, daß Hauptwasserscheiden an beherrschende Erhebungen geknüpft sein müßten; trotzdem zahlreiche Ausnahmen bekannt wurden, spukte diese Ansicht bis zum Beginn des 19. Jahrh. und veranlaßte auf den Karten willkürliche Konstruktionen von Gebirgen längs der Wasserscheiden.“

Ebenso vermag nach allgemeiner Ansicht (*S. Günther* i.Zs.f.Gewässer.4.1902.p.313) „ein über eine ganz homogene Basis bewegter Gletscher von dieser zwar eine Übergangsschicht abzutrennen, nicht aber namhafte Unebenheiten neu zu schaffen, soweit nicht dafür schon Andeutungen vorhanden waren“. Die theoretische Überzeugung, daß das Inlandeis nur eine gleichmäßig flächenhafte Abnutzung des Untergrundes bewirken könne, veranlaßte *E. Werth* (1913/14), in dem radialstrahligen System von Seenketten und rinnenförmigen Wasserbecken der südschwedischen Halbinsel „Erosionswirkungen der subglazial sich bewegenden Schmelzwässer“ zu erblicken. Das Eis hätte sich höchstens „eine einheitliche fächerförmige Wanne“ geschaffen, das Wasser dagegen „trachte stets in einer Linie zu erodieren“ und vermöge so, im Gegensatz zum Eise, Rinnensysteme zu schaffen. Die Doppelgleichung Eis = flächenhaft, Wasser = linienhaft, läßt sich jedoch nicht aufrechterhalten. Die physikalische Möglichkeit der *Werth*-schen Auffassung wird überdies von *E. Brückner* (Zs.f.Gletsch.2 1907/08.p.367) bezweifelt. Auch ist die Möglichkeit nicht leicht abzuweisen, daß ein der radialen Abdachung folgendes präglaziales System von Tälern vom Eise später nur umgestaltet wurde. Immerhin bleibt noch die Möglichkeit einer Arbeitsgemeinschaft zwischen Eis und Schmelzwasser offen.

Die Wände der Sandsteinfelsen würden glatt und ebenflächig verwittern, die Schnee- und Firnfelder würden in gleichmäßigen Lagen niederschmelzen, sobald Gestein, Schnee und Firn eine homogene Beschaffenheit zeigen würden. „Je einheitlicher die Zusammensetzung des Gesteins ist, umso entschiedener wird auch der geometrische Charakter der Verwitterungsfläche sein Recht geltend machen.“ (*S. Günther* 1909.) Denn der Austritt der Feuchtigkeit erfolgt normalerweise in der Flächenfront, und erst „veranlaßt durch örtliche (!) Verhältnisse im Gestein“ „zieht er sich“ bei der wabenförmigen Verwitterung „räumlich zusammen auf einzelne Punkte“. (*O. Beyer* 1911 p.460) — „Wäre der Firn eine absolut homogene Masse, so wäre der Büßerschnee wohl gar nicht oder nicht so ausgeprägt vorhanden.“ (*Hellmann* i.Zs.Ges.f. Erdk.1908 p.103, Diskuss.)

Zur Entstehung von Rippeln und Dünen sollte es, wie wir bereits hörten, „eigentlich“ gar nicht kommen. Allenfalls sind manche Theoretiker noch geneigt, den Küstendünen eine mechanische Legitimität zuzubilligen, da sich hier kapillare Durchtränkung, verkittendes Seesalz, befestigende Vegetation als aufbauende Kräfte anführen lassen; und zwar sollen die Küstendünen dementsprechend in der Form regelmäßiger und durchlaufender Wälle auftreten. (*S. Günther* 1907.) Diese Auffassung findet jedoch an den wirklichen Verhältnissen keine Stütze.

Schon *Sokolow* (1894 p.267) wendet sich mit Entschiedenheit gegen „das Bestreben, einen Unterschied im Wesen der Barchane und der Dünen nachzuweisen, ... welchen die Gestalt regelmäßiger, der Uferlinie parallel sich hinziehender Wälle zugeschrieben wird“. „Eine solche irrige Vorstellung über die Stranddünen beruht auf der Verwechslung der sandigen, von den Meereswellen errichteten Strandwälle mit den Dünen, die ihre Erzeugung ausschließlich dem Winde verdanken.“

„Eigentlich“ sollte es auch keine *Strandspitzen* und *Küstenbuchten* geben, denn „die Brandung wirkt stets flächenhaft wie der Wind“. (*Supan* 1916 p.602.) „Nehmen wir an, die Küste sei ursprünglich geradlinig, die Höhe des Landes, der Gesteinswiderstand, die Brandungsstärke ganz gleichmäßig, so wird die Küste durch die Abrasion gleichmäßig zurückverlegt werden, also geradlinig bleiben.“ (*Philippson* II,2.1924.p.293; ebenso p.298f. für die Schwemmlandsküsten.) (So einleuchtend dieser Schluß auch ist, so trifft er doch, wie uns das experimentell nachprüfbare Phänomen der Strandspitzen beweist, zum mindesten für einen gewissen Bedingungsbereich nicht zu.) Die Wirkung der Brandung soll lediglich streckend und ausgleichend, ihr Endziel die gerade Linie sein. (*A. Penck* II.1894.p.582.) Die Wirkung der „Küstenversetzung“ genüge allein schon, um die toten Winkel der Haupt- und Zweighbuchten nach und nach auszufüllen, die einspringenden Kurven so zu verflachen und zum Verschwinden zu bringen. (*E. Werth* 1913 p.57 u.62.) Auch hier sind es die *Ausgleichsvorgänge*, denen sich das theoretische Interesse allein zuwendet.

Bei der Deduktion des *Flußnetzes* gehen einige Theoretiker gleich von der fertigen Flußrinne aus. Der *rinnenförmige Abfluß* ist für sie eine „Eigentümlichkeit“ des fließenden Wassers, die einer besonderen Erklärung nicht bedarf. Es ist gerade das Kennzeichen der Flußerosion, daß sie „linienhaft einschneidend“ wirkt. (*Supan* 1916 p.474.) Es wird sich also auf der gedachten Oberfläche sogleich ein System paralleler Rinnen ausbilden, wie wir es an Schutthalden, Eisenbahndämmen usw. tatsächlich beobachten können. Eigentlich sollte es überhaupt nur diese parallelen, schnurgeraden Flußkanäle geben. „Würden sich die Flüsse vom Ursprung bis zur Mündung auf glatten, schiefen Ebenen bewegen, so wäre ihr Lauf völlig geradlinig.“ (*Supan* 1916 p.517.) Dies umso mehr, als die gerade Linie „der kürzeste Weg zum Ziele“ ist, und der „gerade und gleichmäßige“ Flußlauf somit „il mezzo più compendioso“, um die Gewässer zur tiefsten Stelle des Landes zu tragen, „an das Ziel, das sie erreichen müssen“. (*Crugnola* 1902 p.270; ebenso *H. W. Ahlmann* 1914 p.49.) „Ist die Abdachung allenthalben von gleicher Steilheit, so ist es eine mechanische Unmöglichkeit,

keit (!), daß irgendeine Vereinigung zweier Rinnsale stattfinden kann.“ (*Peschel*, Neue Probleme d. Erdk. Lpz.1870.p.130.) Wie kommt es also trotzdem zur Entstehung eines Flußnetzes? Eigenartige Ansichten entwickelt *Stiny* (1910 p.109 ff.) Er läßt zu wiederholten Malen die trennenden Käme am unteren Ende zweier benachbarter Runsen einstürzen (!) und die beiden Wasserfäden sich vereinigen. Durch eine schematische Zeichnung (Ebda. Fig.27) wird dies erläutert. — Gern wird auf das kapillare Zusammenfließen der herabrollenden Tropfen auf der Fensterscheibe hingewiesen. Auch der Beistand der 'kleinen Hindernisse' (Steine, Rasenstückchen, Unebenheiten) wird nicht verschmäht: „Durch die Wiederholung solcher Hindernisse und die Ablenkung benachbarter Rinnsale von ihrem eingeschlagenen Wege werden diese bald voneinander entfernt, bald so genähert, daß sie sich in vielen Fällen zu gemeinsamem Lauf vereinigen.“ (*J. Rein* 1896.) Zuweilen hält man auch einen kleinen theoretischen Kunstgriff für erlaubt. Um die Notwendigkeit einer Vereinigung zu größeren Rinnsalen zu beweisen, legt *G. W. v. Zahn* (1912) der Deduktion eine „trichterförmige oder amphitheatralische Fläche“ zugrunde, bei der eine Vereinigung der Rinnsale schon aus rein geometrischen Gründen erfolgen muß. Als Gegenbeispiel braucht man nur auf die Vulkane mit ihrer regelmäßigen Kegelform zu verweisen, wo die geometrischen Bedingungen für das Entstehen nicht konvergierender Erosionsrinnen gegeben sind (*Barrancos*). Die auf den „geometrischen Bau der Entwässerungssysteme“ gerichteten abstrakt-theoretischen Untersuchungen von *Boussinesq* und *S. Günther* (Lit. bei *S. Günther* ²II.1899.p.813; Ders. 1902) gehen von der Vorstellung der Entwässerungsmulde (*bassin*) aus. Denkt man sich diese Entwässerungsmulde als eine Fläche von geometrischer Regelmäßigkeit, so müßten die Nebenflüsse, anstatt sich mit dem Hauptflusse zu einem Flußsysteme zu vereinigen, „eigentlich“ mit dem Hauptfluß asymptotisch einem gemeinsamen, unendlich weit entfernten Tiefpunkt zustreben. In der unvollkommenen Wirklichkeit fallen jedoch die Verhältnisse so aus, „daß die Falllinien den Talweg unter sehr spitzen Winkeln treffen“.

Die Tendenz, die Natur zu geometrisieren, entspringt keineswegs nur der Einseitigkeit der mathematisch orientierten Fachwissenschaft, sondern sie wird zugleich genährt von gewissen allgemeinen Gewohnheiten des Auffassens und Denkens, die, ohne daß wir es selber merken, das empfangene Bild der Wirklichkeit umgestalten und verfälschen. Es besteht so u. a. ein starkes psychologisches Bedürfnis, den Flußlauf als „Individuum“ aufzufassen ⁴⁾, was er in Wirklichkeit nicht ganz ist.

⁴⁾ Dieses Bestreben der 'Heraussonderung' mit Hilfe der Namengebung ist noch unentwickelt bei primitiven Völkern. Flüsse, Berge heißen hier

„Seine“ Mündung und „sein“ Unterlauf ist zwar für gewöhnlich scharf markiert und unzweideutig, aber nach oben hin verästelt er sich immer mehr, bis er schließlich in den obersten Rinnsalen seine Individualität ganz aufgibt, ein für die Bedürfnisse des menschlichen Verstandes wenig befriedigender Sachverhalt. Der Mensch liebt die zu Ende geführte „Individuation“ (*W. Frost*), er vergleicht den Flußlauf gerne mit seinem eigenen Lebensweg, der mit dem Akte der Geburt als dem ersten „Markstein“ unzweideutig einsetzt, als ungeteilte Linie verläuft und mit dem Tode ein ebenso scharfes und unzweideutiges Ende findet. Man sondert deshalb aus dem Flußnetze die stärkste Ader aus, was im Oberlauf nicht ohne Willkür abgeht, überträgt auf sie den Begriff des „Hauptflusses“ oder „des Flusses“ schlechthin und verleiht ihr, falls es nötig sein sollte, in Gestalt einer (x Meter über dem Meeresspiegel gelegenen) „Quelle“ noch einen deutlich sichtbaren und örtlich bestimmten Anfang. Ein fadenförmig auslaufender Strich (überhaupt jeder so verlaufende Sinnesreiz) pflegt in uns ein Gefühl des Unbehagens wachzurufen, da wir nicht recht sehen, an welcher Stelle der Strich (der Reiz) eigentlich aufhört. „Die Vorstellung, ein Fluß komme aus einer Quelle, die ebenso feststeht wie seine Mündung, befriedigt schon ob ihrer Einfachheit den Schönheitssinn ebenso sehr wie sie dem Kartenzeichner oft bequem ist.“ „Schon die Ebsdorfer Weltkarte aus dem 13. Jahrh. zeigt gerade auf deutschem Boden häufig am Ursprung der Flüsse eine kreisrunde Verdickung, um die Quelle recht deutlich zu machen.“ (*O. Lehmann* 1918.) In Wirklichkeit entwickeln sich die meisten Flüsse der unvergletscherten Rückengebirge des gemäßigt-feuchten Klimas aus mehreren gleichwertigen Quelladern, die ihrerseits aus zeitweise trockenen Ursprungsgräben hervorgehen, deren oberste Wasserführung in regenarmen Zeiten talabwärts wandert. Wo ständige Quellen auftreten, sind sie in der Regel „nicht so verteilt, daß es möglich wäre, sie als Ursprung von Flüssen anzusehen“. „Sie können nämlich entweder an einer Stelle den Quellbach verstärken, wo er auch in den trockensten Jahren schon von oben her Wasser führt, oder sie liegen vielleicht gerade in einem Tälchen, dessen Bach als Hauptquellbach nicht in Betracht kommt.“

Auf anderen Gebieten der Morphologie läßt sich Entsprechendes beobachten. Überall begegnet man jener eigentümlichen Taktik des Menschen, in seinem Kampfe um die geistige Beherrschung der Umwelt, diesen Aneignungs- und Eroberungsprozeß dadurch zu erleichtern und

nach den in der Nähe liegenden Dörfern und haben so verschiedene Namen. „Besonders in Trockengebieten fehlt häufig die Auffassung eines Flusses als Individuum, das einen besonderen Namen tragen muß, weil hier die Flüsse keine Verkehrsbedeutung haben ...“ (*Philippson* II,2.1924.p.84.)

zu beschleunigen, daß alles Naturgeschehen vorläufig so gedeutet wird, „als ob“ jedes in sich schwach gegliederte und nach außen zerfließende Geschehen ein deutlich strukturiertes und scharf begrenztes „Individuum des Geschehens“ (*W. Frost*) sei, als ob jedes in sich ruhende Nebeneinander ein aufgereihtes Nacheinander, jedes dynamische System ein Wechselspiel für-sich-bestehender und -betrachtbarer mechanischer Kräfte sei⁵⁾, und als ob es ein ‚gestaltmäßiges‘ Geschehen — aus dessen Maschenwerk bekanntlich kein Zipfel zum Anfassen herauschaut, das weder der geometrisch-mechanischen, noch der ‚organisierenden‘^{5a)} Analyse zugänglich ist und so der geistigen Erfassung und praktischen Bezwingung den unangenehmsten Widerstand entgegensetzt — überhaupt nicht gebe.

f) „A b f o r m u n g“?

Bewegen sich, wie es bei unseren rhythmischen Phänomenen der Fall ist, zwei Medien ineinander oder aneinander vorbei, so kommt es zu gegenseitigen (oder auch mehr oder weniger einseitigen) kausalen Einwirkungen der beiden Medien aufeinander. Die Art dieser kausalen Einwirkung ist naturgemäß nur durch Analyse der beobachteten Wirklichkeit, also empirisch zu ermitteln. Das bedarf eigentlich gar keiner weiteren Erörterung. Und doch pflegt die Praxis der ‚em-

⁵⁾ Selbst ein solches „Wechselspiel“ und „Zusammenwirken“ ist dem deduktiven Theoretiker noch nicht übersichtlich und handlich genug. Er denkt sich deshalb und behandelt die gleichzeitig sich abspielenden Vorgänge als nacheinander ablaufend. So vertritt Davis allen Ernstes die Ansicht, daß ein Hauptfluß immer älter sei als seine kleineren Nebenflüsse, daß diese sich erst vom Hauptflusse aus bilden. (Vgl. dagegen Philippon II, 2, 1924, p. 168 u. p. 186.) In der Davisschen Zyklen-theorie wird die Scholle zuerst gehoben, dann erst, nach vollendeter Hebung, wird sie zerfurcht und abgetragen. „So hat man sich daran gewöhnt, aus einer zerschnittenen Rumpffläche auf eine Zweihheit der tektonischen Bewegung zu schließen, und glaubt als einen Wesenszug der Krustenbewegungen ihren diskontinuierlichen, ruckweisen Ablauf erkannt zu haben.“ (W. Penck 1920 p. 73f.) Da man das Zusammenspiel nicht ‚durchdenken‘ kann, läßt man die Arbeit der äußeren Kräfte erst nach Abschluß der inneren Verschiebungen beginnen. W. Penck betont dagegen das gleichzeitige Zusammenwirken innerer und äußerer Kräfte (Eine der deutschen Morphologie geläufige Erkenntnis! Philippon II, 2, 1924, p. 335ff.) In seiner „Primärrumpfftheorie“ sucht er diese Erkenntnis zur Erklärung bestimmter Erscheinungen fruchtbar zu machen. In der formalen Kritik geben wir W. Penck recht. Wo der „ruckweise Ablauf“ und das schnelle Anfangstempo der Krustenbewegungen jedoch durch unvoreingenommene Auswertung unzweifelhafter Beobachtungstatsachen gesichert ist, wie z. B. im Rheinischen Schiefergebirge, wäre es töricht, dies zu leugnen.

^{5a)} Vgl. Kap. „Entwicklung“!

pirischen' Naturwissenschaft gerade auf dem Gebiete dieser 'elementaren' Beziehungen zu versagen. Indem sie einer kritischen, philosophisch vertieften Behandlung des Kausalproblems entraten zu können glaubt, läßt sie sich ins Schlepptau nehmen von der Verengung und Vereinseitigung, die das mechanistische Weltbild (kritisch-bewußter oder naiv-unbewußter Prägung) den kausalen Beziehungen zuteil werden läßt. Sehen wir zu, welche kausalen Beziehungen uns die Mechanistik als 'normale' und ohne weiteres anzunehmende Beziehungen kennen lehrt!

Sie unterscheidet, gestützt von der logisch-sprachlichen Kategorienbildung, zunächst zwischen einem tätigen (aktiven) und einem leidenden (passiven) Medium; im Falle der 'Wechselwirkung' sind beide Medien zugleich aktiv und zugleich passiv. Die Einwirkung des aktiven Mediums auf das passive geschieht auf dem Wege des *Formungsvorganges*, d. h. der Ausübung lokalkausaler, mechanischer Druckwirkungen auf die Oberfläche des passiven Mediums. Ein solcher 'Formungsvorgang' läßt sich darstellen als die Summe lokalkausaler Teilformungen, er läßt also für 'Gestaltwirkungen' keinen Raum, ferner läßt er durch die Annahme einer mechanischen Weitergabe der oberflächlichen Beeinflussung an das Innere des angegriffenen Mediums auch keinen Raum für eine aktiv-spontane Reaktion dieses angegriffenen Mediums auf die von außen erfolgten Einwirkungen. Das 'Urbild' aller Formungsvorgänge ist etwa der rohe, formlose Marmorblock, der durch eine Reihe lokal-kausaler Einwirkungen 'skulptiert' und 'modelliert' wird und so eine beliebige 'Form' aufgezwungen bekommt, oder die formlose Schneemasse, die sich zu einer Schneekugel 'formen' läßt. Der Vorgang der äußerlichen Formaufprägung läßt sich bekanntlich an Gipsmaterial ebenso vornehmen wie an Marmor; je bildsamer und plastischer, d. h. je passiver das zu formende Material ist (Wachs, Siegelack), umso ungestörter und vollkommener vollzieht sich der Vorgang der 'Aufprägung' oder 'Abformung' ⁶⁾.

Daß solche Abformungsvorgänge auch in der Morphologie eine Rolle spielen, soll nicht bestritten werden. Bekannt sind die *Kundt'schen Staubfiguren*, die dadurch entstehen, daß bei starken hohen Tönen die zahlreichen Knoten und Bäuche, in die sich die beiderseits geschlossene Pfeife teilt, sichtbar gemacht werden können durch Kork-

⁶⁾ Kennzeichnend für die künstlich 'geformten' Gebilde ist ihre 'Leblosigkeit' und ihre Widerstandslosigkeit gegenüber zerstörenden Eingriffen, wogegen die vom Winde gestaltete und „genährte“ Welle (*kyma anemotrophés*) 'lebt' und sich beständig selbst zu regenerieren vermag. Künstliche Sandaufschüttungen sind der raschen Einebnung durch den Wind preisgegeben; seine Zerstörungskraft nimmt zu mit der Steilheit der Sandböschung. (Vgl. die Versuche von Sokolow 1894 p.175 u. 288 ff.)

pulver oder dergl., das sich an den Bewegungsknoten anhäuft und das somit als 'Indikator' sowie als formbeständiger 'Abdruck' der Bewegungsvorgänge im Nachbarmedium angesehen werden kann. (Doch vgl. S. 13.)⁷⁾ Im Lee von Hindernissen bilden sich 'unfreie' Sandrippeln, hervorgerufen durch stehende Wellen im Luftstrom. Vgl. die von *H. King* (1916) in der Libyschen Wüste angestellten Versuche. Es handelt sich um Verdichtungs- und Verdünnungswellen. „The waves being rendered stationary by the fact that the position of the first node is fixed.“

Im allgemeinen sind jedoch die zur 'Abformung' gelangenden Bewegungsvorgänge in der Grenzzone eines der beiden Medien rein hypothetischer Natur. Man hat sie nicht durch Beobachtung festgestellt, sondern man hat geglaubt, von der Form der Trennungsfläche auf ihr Vorhandensein schließen zu dürfen. Ein solcher Rückschluß von der Form auf den formbildenden Vorgang ist fast immer ein gefährlicher Zirkelschluß. Eigentlich sollte, so argumentiert man, die Trennungsfläche zwischen zwei in relativer Bewegung befindlichen Medien glatt und ebenflächig sein. Ist sie dies nicht und zeigt sie ein wellenartiges Aussehen, so müssen entweder in dem überlagernden oder in dem unterlagernden Medium formende Kräfte angenommen werden, die die welligen Ein- und Ausbuchtungen an jeder einzelnen Stelle geschaffen haben. Im ersteren Falle wäre die Bildung als „ekto-dynamomorph“, im letzteren Falle als „endo-dynamomorph“ zu bezeichnen (Nach dem Vorschlag von *Glinka* 1914 p.35).

Zu den ersteren gehören z. B. Strudeltöpfe, zu den letzteren Lochbildungen, die durch Auswitterung von Konkretionen entstehen. Jene lassen sich charakterisieren als Ergebnis ungleicher Einwirkung bei gleichmäßigem Widerstand, diese als Ergebnis ungleichen Widerstandes bei gleichmäßiger Einwirkung; dort findet selektive Einformung (Einprägung), hier selektive Ausformung (Herauspräparierung) statt. Diese beiden gegensätzlichen Fälle sind dem mechanischen Denken so sehr konform, daß die Vorstellung Raum gewinnt, als sei jede morphologische Form entweder ein Ergebnis der ersteren oder der letzteren Art der Einwirkung. Ein lehrreiches Bei-

⁷⁾ Passarge (Handwbt.d.Nat.Bd.1.1912.p.619) möchte sogar die Helmholtzsche Wellenfläche auf diese Weise interpretieren. „Wie bei dem Chladnischen Versuch der Sand sich auf den Linien geringster Schwingung anhäuft, so häuft sich der Sand entlang der Linien geringster Bewegung an“ (d. h. geringster Bewegung der Luft!). In adäquaterem Sinne wollte eine phantastische, später aufgebene Vermutung von E. Philippi (1912) den „Streifenboden“ als eine durch Erdbeben entstandene Chladnische Klangfigur deuten.

spiel hierfür liefert die Theorie des Büßerschnees. Einige Theoretiker glauben die eigentümlich differenzierte Abschmelzung nur dadurch erklären zu können, daß sie sie als die Folge einer „gewissen“, d. h. höchst ungewissen, ungleichartigen Beschaffenheit (Struktur) des Schnee- oder Firnfeldes hinstellen; andere Theoretiker haben sich von der Homogenität der Schneefläche überzeugen lassen und sehen nun keinen anderen Ausweg als die Annahme einer — ungleichen Beschaffenheit der Sonnenstrahlen! (*Hauthal* i. Zs. Ges. f. Erdk. 1908 p.113, nach dem Vorgange von *W. Krebs* 1908; Bedenken äußert *Fritz Jäger*, Ebda.p.112.) Die regelmäßige streifige Reihenstruktur, in der oft Cirruswolken, Cirrusflöckchen angeordnet sind, gibt uns nach der Ansicht von *Krebs* „das Recht zur Annahme einer Art von bestimmter Struktur der Sonnenstrahlung“. Kommt die eine Möglichkeit nicht in Frage, so wird die andere Möglichkeit sogleich zum Range der logischen Selbstverständlichkeit erhoben. So bringt *Supan* (1916 p.553) unter diesem logisch-kategorialen Zwange die offenbare Unrichtigkeit, daß bei den Karren „die Vertiefungen stets (!) den leichter, die Erhebungen stets den schwerer löslichen Partien entsprechen. Auf diese Weise gelangt man noch dazu, jede positive Reliefform als „Härtling“ anzusprechen, und so ist dieser logisch-kategoriale 'Rückschluß von der Form' in der Regel nichts weiter als eine leere Paraphrase. Mancher Morphologe glaubt sogar, er habe etwas geleistet, wenn er z. B. die Felsenschalen als ein Werk der „ungleich fortschreitenden Zersetzung“ hinstellt und diese bedingt sein läßt durch „Unterschiede in der Widerstandsfähigkeit benachbarter Gesteinspartien“, wenn er den „Zackenfirn“ durch den „ungleichen Widerstand“ erklärt, den die Firnfläche dem Abschmelzungsvorgange entgegensetzt, oder wenn er die Wannenbildung in den Hochgebirgstälern aufgefaßt wissen will als „Folge der lokal und regional gesteigerten Krafterleistung der eiszeitlichen Gletscher“, usw.

Eine bestimmte Gruppe von Theorien, die sich mit der Erklärung der „wellenförmigen Oberflächenformen“ befassen, stellt die selektive Einformung bzw. Ausformung als sichtbare morphologische Wirkung von stehenden oder sich fortpflanzenden Wellen hin, die in der Grenzzone des überlagernden oder aber des unterlagernden Mediums verlaufend gedacht werden. Es ist namentlich das Rippelmarkenmuster, das nach einer auch heute noch nicht überwundenen Auffassung als einfacher 'Abdruck', als 'Wellenspur', 'Anzeiger' (Indikator), 'Abbild' von Bewegungen gilt, die über oder unter ihm vorüberziehen. Man glaubt, die Rippen und Furchen entsprächen den Wellenknoten und -bäuchen von stehenden Schwingungen des Wassers usw. (Vgl. aber oben Kap. „Rippelmarken“!) Oder man

faßt sie auf als Abdruck einer sinusartigen Bewegung (sinusoidal motion) der Luft. (*Free* 1911 p.67f., referierend.) „Die Sandwelle ist ein bleibendes Abbild (!) der Welle in der Luft oder dem Wasser, durch die die Sandform erzeugt wird.“ „Flüssigkeitswellen erzeugen Dünen und Mäander.“ (*F. M. Exner* 1921 p.328, 332.)⁸⁾ Nach dem *Baschinschen* „Gestaltungsgesetz“ (1918 u.1920) wird den Grenzflächen aneinander vorbeigleitender Medien eine Wogenform „aufgezwungen“. Bei festem Boden treten die periodischen Änderungen des Luftdrucks „in die Erscheinung“, „wenn lockeres Material vorhanden ist, das als Indikator dienen kann“. (*Baschin* 1918.) Den *Baschinschen* Bemühungen ist es in der Tat zu verdanken, daß die alte, schon von *F. A. Forel* (1883) als „exemple des erreus d’imagination d’un naturaliste“ verworfene Wellenspuretheorie erneut in Aufnahme gekommen ist. Sogar *Hahmann* (1910 p.40) spricht es *Baschin* gedankenlos nach, daß bei den Sandrippeln, „die in der Luft nach *Helmholtz* vorhandenen Wellen sich auf der Sandfläche abbilden“. Das Wogen des Kornfeldes ist nach *Seeliger* und *E. Bräuer* (1918) und anderen nur ein Sichtbarwerden, ein In-die-Erscheinung-treten eines bestehenden turbulenten (böigen) Bewegungszustandes der unteren Luftschicht. — Ähnlich hatte schon die alte Theorie von *Muncke* (Artikel „Meer“ in *Gehlers* physikal. Wörterb.) die Wasserwellen als Abdruck kurzperiodischer Schwankungen der Windstärke hingestellt; die „wellenartige“ Bewegung der Luft solle sich den oberen Flüssigkeitsschichten mitteilen. *Krümmel* (II.1911. p.58) bemerkt hierzu sehr treffend: Überläßt man dem Winde leicht fliegende Gegenstände, so bemerkt man, daß diese Wellen der Luft gar nicht vorhanden sind. „Flaumfedern, Watteflocken oder eine kleine Pulverwolke — sie bewegen sich so gleichmäßig schnell und so geradlinig wie nur möglich mit dem Winde fort.“ — Ein Einfluß der sog. „Böigkeit“ des Windes auf die Wellenbildung hat sich bisher nicht nachweisen lassen. Bemerkenswert ist immerhin die Tatsache, daß im großen die Windstärke dauernd kurzperiodischen wie langperiodischen Schwankungen unterworfen ist. „Diese Eigenart der Luftbewegung findet sich bei allen Winden und ist besonders ausgeprägt bei starken Stürmen. Stöße von wütender Kraft wechseln ab mit solchen von viel geringerer Stärke.“ (v. *Larisch-Moennich* 1925 p.27 u.56; ebenso *Cornish* 1910 p.109.) Doch scheint kein regelmäßiger formbildender Einfluß von ihnen auszugehen. Zwar ist ein periodisches Anwachsen und Abflauen des Seeganges nicht selten zu beobachten (Ebda. p.145f.), doch scheint diese Erscheinung in keiner unmittelbaren Be-

⁸⁾ Zu: Bettgestaltung als Abformung innerer Bewegungszustände des fließenden Wassers: vgl. Kap. „Mäandertheorien“.

ziehung zu dem periodischen Auftreten von Sturmböen zu stehen, da die Gruppen hoher Wellen in unregelmäßiger Folge sowohl während der Dauer der Böen als auch in den Intervallen aufzutreten pflegen. „Damit innerhalb der fortschreitenden Depression bestimmte Abschnitte mit größerer Windstärke bestimmten Wellengruppen größere Impulse vermitteln könnten, müßten diese Böenstellen ebenfalls in unveränderter Gestalt über weite Räume fortwandern ...“, was aber in der Praxis nicht der Fall ist. Vielmehr kommen innerhalb des Bereiches einer bestimmten Windrichtung die Böenstellen bald an dieser, bald an jener Stelle zu liegen, und so kann auch die Kraftübertragung auf bestimmte fortschreitende Wellensysteme nur eine unregelmäßige sein. Die periodische Wiederkehr höherer Wellengruppen ist nach *V. Cornish* und Graf *v. Larisch-Moennich* vielmehr bedingt durch die Interferenz eines die Sturmsee durchziehenden übergeordneten Wellensystems.

Die schematischen Annahmen, die die erwähnte *Helmholtz*-sche Theorie macht, stehen in auffallendem Widerspruch zu den Beobachtungstatsachen. Was zunächst das Wellenprofil anbetrifft, so sind die *Helmholtz*-schen Wellen „stationär“, d. h. sie lassen sich auf ein Koordinatensystem auftragen, das mit den Wellen selbst forttrückt. Doch nur gut ausgebildete Dünen bei Windstille bieten dieses Bild regelmäßiger Aufeinanderfolge fortschreitender rundlicher Wellenkämme (*Krümmel* II.1911.p.46). Die sekundäre Erscheinung der Dünung kann aber unmöglich die Grundlage für die Theorie der primären Erscheinung der echten Windwellen (Reibungswellen) auf Wasser usw. abgeben. Graf *v. Larisch-Moennich* (1925 p.144 Anm., zum Wellenprofil vgl. p.18 u.20 u. bes. p.114—116) fand auch in dem Bereich der „beständigen Passatwinde nirgends Anhaltspunkte dafür, daß der ‘ausgewachsene Seegang’ oder das ‘stationäre System’ von *Stokes* oder *Helmholtz* eintritt“. „Die Beobachtung zeigt uns in der Natur ein gerade gegensätzliches Verhalten.“ Das Wellenprofil ist nicht, wie *Stokes* für die „permanenten Wellen“ annimmt, symmetrisch, sondern mehr oder weniger dünenartig gebaut, und die Sturmwellen (in tiefem Wasser) sind nicht dann am steilsten, wenn der Unterschied zwischen Windgeschwindigkeit und Wellengeschwindigkeit aufgehoben ist (*Helmholtz*), sondern wenn er groß ist. Die Beobachtung ergibt ferner, daß die Wellengeschwindigkeit stets merklich hinter der (jeweilig höchsten) Windgeschwindigkeit zurückbleibt. — Außerdem bleibt bei den windgetriebenen Wellen „der einzelne Wellenkamm nur auf eine kurze Strecke hin ausgeprägt (!), um bald wieder zu verschwinden oder mit anderen Wellen zusammenzuzufießen, so daß er sein Dasein als Individuum verliert; dafür treten immer neue Wellen auf (!), aber nur, um rasch demselben Schicksal zu verfallen“. (*Krümmel* II.1911.p.84.) Hier handelt

es sich nicht um 'Unregelmäßigkeiten', die der Physiker und Mathematiker bei seiner deduktiven Behandlung vernachlässigen darf, sondern es ist dies das normale, typische Bild der Reibungswellen auf Wasser, die mit den stationären Wellen nur den Namen („Wellen“) gemeinsam haben. (Vgl. Kap. „Wasserwellen“!) Was das Bild der Wellen im Grundriß anbetrifft, so geht *Helmholtz* entsprechend von langgestreckten, parallelen Wellenzügen aus. Doch bieten höchstens gelegentlich die erwähnten Dünungen und die Gravitationswellen ein solches Muster, die Kammlängen der Windseen überschreiten dagegen nur selten das Dreibis Fünffache der Talbreiten, „wobei die Nachbarwellen keineswegs die geradlinige Fortsetzung liefern, vielmehr eine unregelmäßig staffelförmige (!) Ordnung vorherrscht“. (*Krümmel* p.46.) Diese Regel gilt keineswegs nur für das Anfangsstadium der Wellenbildung, sondern in gleicher Weise auch für die größeren Wellen. Alle Reibungswellen sind im wesentlichen nach demselben Muster gebaut, nur die Dimensionen sind vergrößert. (*Krümmel* p.57.) Sie lassen sich am treffendsten vergleichen mit einem Stück von Kreppgewebe oder Krepppapier. (Hauptrichtung der Fältchen senkrecht zum Verlauf der stattfindenden Einwirkung, bei gebogenem, geschlängeltem und staffelförmig versetztem Verlauf der Fältchen im einzelnen.) „Dieser Vergleich mit einem Krepp liegt jedenfalls viel näher als der in der Theorie oder auf schlechten Bildern leider nicht selten beliebte mit einem regelmäßig gestanzten Wellblech.“ (*Krümmel* p.58.) Da nun auch die Reibungswellen an der Grenzfläche anderer Medien ein ganz entsprechendes Bild liefern, gehen wir wohl nicht zu weit in der Behauptung, daß es eine „*Helmholtzsche* Wellenfläche“, im Sinne seiner Theorie, in der Natur überhaupt nicht gibt. —

Die äußere und innere Unhaltbarkeit der vorher besprochenen 'Wellenspurentheorie' konnte selbst einem oberflächlichen Nachdenken nicht verborgen bleiben, und doch begegnet man ihr immer wieder. Wie kann das Wirrwarr vorüberziehender Wellen des auflagernden Mediums überhaupt ein einheitliches und formbeständiges Abbild hinterlassen? Muß nicht schon der progressive und erst recht der nach Wellenlänge, -höhe und -richtung stets wechselnde Charakter der vorüberziehenden Wellen alle etwaigen Ansätze zu einer formenden Einwirkung auf die Sandfläche durch gegenseitigen Ausgleich und gegenseitige Zerstörung zum Verschwinden bringen? „Bei einer stehenden Welle, sollte man meinen, könnte man eher von einem Abdrucke sprechen, da die Lage der Knotenlinie stets dieselbe ist, während zu beiden Seiten derselben die Wassermassen sich abwechselungsweise heben und senken, so daß hier eine Depression im Sande erzeugt werden könnte. Der Umstand aber, daß die am Boden befindlichen Sandkörner hin- und her-

pendeln, und daß ferner die Länge einer Kräuselungsmarke nie der einer Welle entspricht, widerlegt auch diese Vermutung.“ (*Bertololy* 1900 p.50ff.; s. a. *Solger* 1910 p.29.) Die einzelnen Wasserwellen sind ganz außerordentlich viel weiter voneinander entfernt als die meist ganz entstehenden Rippelmarken des Sandes. Die gleichförmige Regelmäßigkeit der Sandrippeln steht zu der unregelmäßigen Mannigfaltigkeit der Wasserwellen in auffallendem Gegensatz.

Auch die Theorie der Sandriffe wird beherrscht von der Vorstellung der „Wellenspuren“. Nach der Ansicht *Passarges* (1912, Abb.39; mit augenfälliger Profilskizze!) sollen die Sandriffe Abformungen der auflaufenden Wasserwellen auf dem Meeresgrunde darstellen. Ein Vergleich des Abstandes der als verhältnismäßig beständig erkannten Riffe mit den gewöhnlich erreichten Wellenmaßen widerlegt aber diese Vermutung sofort. (*Th. Otto* 1913; vgl. *K. Andree* II.1920.) Die Veränderlichkeit der brandenden Wellen hat in keiner Weise eine entsprechende Veränderlichkeit der Riffe zur Folge. Die Vorstellung *Passarges* entspringt, ebenso wie die alte Interferenztheorie von *Hagen-Krümmel-G. Braun*, dem Bestreben, den Wechsel von Riffthal und Riffberg mit Hilfe formentsprechender (lokalkausaler), Einwirkungen aus dem darüberliegenden Medium zu erklären. Nach der letzteren Theorie sollen die suspendierten Sandmassen an den Interferenzpunkten von auflaufender Welle und Soogstrom der vorhergehenden Welle, deren Impulse einander gegenseitig aufheben, teilweise zum Niederschlag gelangen. Auch gegen diese Auffassung läßt sich (mit *Th. Otto* 1913) geltend machen, daß die Interferenz durchaus nicht immer nur an derselben Stelle eintritt, sondern daß sie mit den fortschreitenden Wellenkämmen gegen den Strand hin und dann eine Strecke wieder zurückwandert und außerdem infolge der Ungleichmäßigkeit der Wellenzüge ihren Schwerpunkt beständig verlegt. Die hier vorliegende Interferenz ist nicht als lokale prallende Gegeneinanderbewegung, sondern als — über eine größere Strecke hin sich vollziehende — gegenseitige Beeinflussung schichtartig einander überlagerter Bewegungen aufzufassen. Daß die ‚Brecher‘ der Brandungszone zu den ausgewachsenen Riffen in eine feste räumliche Beziehung treten können, bleibe unbestritten. Die Wasserbewegung stellt sich hier offenbar mehr oder weniger passiv auf das neugeschaffene Relief des Untergrundes ein, sie orientiert sich an ihm, nicht umgekehrt.

Nach einer viel diskutierten Ansicht von *V. Cornish* sind die Rippelmarken nicht die Einformung von Wellen der Luft (bzw. des Wassers), sondern die Ausformung von Wellen des Sandes. Der Sand selbst ist es, in dem sich die Wellenbewegung vollzieht. Der Sand läßt sich als „Halbflüssigkeit“ auffassen; die ‚Sandwellen‘ der

Rippelmarken- und Dünenfelder erscheinen so als den Wasserwellen analoge Bildungen. Auch *Hinks* (Diskuss. zu *King* 1916) erwägt die Möglichkeit ihrer Entstehung durch sich im Sande selbst fortpflanzende *Vibrationen*. Schon *Cholmoky* (1902) wendet ein, daß der Sand die zu einer echten Welle gehörige Orbitalbewegung doch unmöglich ausführen könne. Der Auffassung des Sandes als „Halbflüssigkeit“ erwuchs ein entschiedener Gegner in *H. King* (1916 p.189). Ihm erscheint der Sand als eine rein summative Gruppierung von Sandkörnchen: „Except that sand can be poured (ausgeschüttet) it has none of the attributes of a fluid. There is no cohesion between the particles, there is no capillarity, no diffusion of different kinds of sand, and what is of most importance for our purpose, there is no surface tension (!), and gravity acts upon sand in a different manner from a fluid.“ Solche nüchternen Feststellungen sind zu begrüßen, denn sie bekämpfen mit Recht die unkritische Sucht nach Formanalogien, den verschwommenen, alle Scheidewände niederreißenden Verallgemeinerungen aus dem kymatologischen Lager. Der Sand 'ist' zweifellos keine Halbflüssigkeit, und doch ist die Theorie von *Cornish* der (noch trübe) Niederschlag eines wesentlichen, theoretisch bis dahin noch nicht erfaßten Sachverhaltes. Mag der ruhende Sand noch als eine 'tote', nichtflüssige Massenansammlung kleiner Stoffteilchen gelten, so ändert sich dies, sobald die Sandmasse in Bewegung gerät. Die bewegte Schicht bildet dann ein Kontinuum, ein zusammenhängendes Ganzes, das die von außen kommenden Einwirkungen als Ganzes beantwortet und auf diesem Wege sogar eine rhythmische Selbstdifferenzierung eingeht. Es lag sehr nahe, diesen funktionellen Geschehenszusammenhang in der Grenzschicht des Sandes vergleichsweise zu dem Verhalten von Flüssigkeiten in Beziehung zu setzen.

G. H. Darwin (1884) hatte den im Lee der Sandrippeln und Dünen sich bildenden *Wirbeln* seine besondere Aufmerksamkeit zugewandt. Die Leewirbel sind für ihn die Walzen, die das Getriebe des Dünenbildungsprozesses in Gang bringen. Die Dünen sind nach ihm ein Werk der Wirbel, sie sind der Ausdruck eines Systems von „regularly recurring eddies in the air“. (Lit. s. a. *Free* 1911 p.67f.) Man denkt sich den Vorgang der Wirbelbildung „eingeleitet“ durch irgendeine „Störung“ nach Art der Schwingungserregung, durch kleine Hindernisse und Unregelmäßigkeiten oder durch die Bildung einer „*Helmholtz*schen Wellenfläche“⁹⁾. Die Auffassung der Dünen als 'Abformungen' von Luftwirbeln hat zugleich die Frage nach der Entstehung solcher Wirbel

⁹⁾ „Die Scheitel der Wellenfurchen sind die Kanten, von denen aus sich die Wirbelflächen bilden.“ Kompromißtheorie von *Hahmann* 1910 p. 40 ff.

einwandfrei zu lösen, will sie nicht einem Selbstverstärkungszirkel anheimfallen. Einen willkommenen Ausweg bot die *Helmholtz'sche Wirbeltheorie*. Nach ihr ist die Trennungsfläche zwischen zwei aneinander vorbeifließenden Flüssigkeiten eine Wirbelfläche, die das Bestreben hat, sich in Einzelwirbel aufzulösen. Und zwar bilden sich diese Wirbel in der von der Reibung beeinflussten Grenzschicht der Flüssigkeit, die 'drehend' wird. Mögen nun auch bei den Wind- und Wasserrippeln die Bedingungen für eine wirblige Auflösung der Grenzschicht des überlagernden Mediums in etwa gegeben sein (kleine Zähigkeit), große Strömungsgeschwindigkeit und relativ große Grenzschichtdicke), so spricht doch der Entstehungsverlauf und die Form der Rippeln entschieden gegen die Auffassung der Leewirbel als hydrodynamische 'Reibungswirbel'. Vielmehr sind die Leewirbel mit den drehenden Bewegungen im Schatten von Hindernissen zu vergleichen, die in irgendeine Strömung hineinragen; und so sehen wir sie von der stolzen Höhe der 'bewirkenden Ursache' zur Bedeutungslosigkeit eines Lückenbüßers herabsinken. (Vgl. Kap. XIX Abschn. 3; ferner Kap. I, Seite 20f.)

Die 'Hypothese' der Wellenerzeugung durch Wirbel müßte, um den Rang einer exakten 'Theorie' einzunehmen, die Existenz solcher Wirbel zunächst einmal beobachtungsmäßig nachweisen. Wir erinnern uns jedoch der Feststellung *Krümmels*, daß die auf dem Meere angestellten Beobachtungen statt der erwarteten regelmäßigen periodischen Schwankungen ein verhältnismäßig geradliniges und ungestörtes Fortgleiten der unteren Luftschichten ergaben. Entsprechende Feststellungen veranlaßten auch *v. Larisch-Moennich* (1925 p. 10f.), die von *Vaughan Cornish* aufgestellte Theorie der Fortbildung der Wasserwellen durch Wirbelwalzen abzulehnen. Nach *Cornish* ist das Wachstum größerer Wellen an irgendeiner Stelle begleitet vom Ausbleiben und teilweisen Erlöschen der kürzeren Wellen, welche vordem vorhanden waren. Dies hat nach ihm seine Ursache darin, daß die Zunahme an Höhe der kürzeren Wellen durch den Luftwirbel behindert ist, den die größeren Wellen bedingen. *Cornish* schwebt also das Bild einer wechselseitigen formenden Einwirkung zwischen Wasser und Luft vor. Die Wirbel läßt er durch größere Wellen bedingt sein, anderseits schreibt er der Luft das Bestreben zu, eine regelmäßige Reihe wandernder Wirbel zu bilden, mit langgestreckten horizontalen Achsen, deren Abstände mit den Wellenlängen korrespondieren. *v. Larisch-Moennich* bemerkt hierzu: „Es genügt festzustellen, daß ich trotz sorgfältiger Beobachtungen an keinem Punkte der Oberfläche der großen Wellen eine solche wirbelförmige Luftbewegung feststellen konnte. Vielmehr zeigt eine aufmerksame Untersuchung der in Betracht kommenden Wellenbilder, daß der Luftstrom alle Punkte des großen Wellen-

profiles bestreichen kann, und daß unter bestimmten Bedingungen überall kleinere Wellen, die ebenfalls weiterwachsen, vorhanden sind. Auch spricht gegen diese Theorie das Verhalten der Oberfläche großer regelmäßiger Dünungswellen, über die Wind von größerer Geschwindigkeit zu wehen beginnt. Er erzeugt dann gleichmäßig über der ganzen Fläche der großen Wellen ein System neuer Wellen, genau wie wenn die Oberfläche des Wassers ursprünglich glatt ist.“

Ziehen wir die Bilanz unseres kritischen Streifzuges, so ergibt sich, daß die Phänomene, die uns in vorliegender Arbeit beschäftigen, nicht bloße 'Abformungen', welcher Art auch immer, sein können, sondern daß eine ganz besondere Art der 'transeunten Wirkung' und der Formbildung vorliegt, wie sie in anderem Zusammenhange noch näher erläutert werden soll.

Z u s a m m e n f a s s u n g :

Die 'Mechanisierung und Geometrisierung' des Weltbildes ist eines der stärksten Hindernisse für die richtige theoretische Erfassung unserer rhythmischen Phänomene. Sie äußert sich zunächst in einer schroff deduktiven Einstellung zu den Beobachtungstatsachen, zu deren Erklärung ein eng begrenzter Kanon mechanischer Gesetze als ausreichend angesehen wird. Von diesen 'Gesetzen' wird die Gravitation zum Range einer morphologischen Universalkraft erhoben; dementsprechend ist das Interesse des Morphologen vorwiegend den Abtragungsvorgängen zugewandt. Da die Hinzunahme der Selektionswirkung zugleich die formale Möglichkeit ergibt, neu entstehende Reliefunterschiede zu erklären, wird auch von dieser Erklärungsmöglichkeit der weitgehendste Gebrauch gemacht. Die Ausbildung der Formenmuster wird hingestellt als das Ergebnis grobmechanischer Einwirkungen, nach Analogie der Bearbeitung starrer Massen durch Werkzeuge. Es konnte gezeigt werden, daß bei unseren rhythmischen Phänomenen diese Art der Beanspruchung im Verhältnis zu den charakteristischen 'Kleinbewegungen' nur eine untergeordnete Rolle spielt, daß vielmehr folgendes Schema gilt: 1. Mechanische Auflockerung; 2. Chemische Zersetzung; 3. Abtragung, Abtransport; 4. Schliff, Glättung und Abrundung. — Dem mechanistischen Naturbilde wohnt eine aggressive Tendenz inne, insofern als die Möglichkeit oder Existenz gewisser Vorgänge und Sachverhalte als mit den mechanischen Gesetzen unvereinbar rundweg bestritten wird, oder insofern als die Darstellung von Beobachtungstatsachen unauffällige und unbewußte Verschiebungen im Sinne der Befriedigung 'mechanischer Postulate' erfährt. Da die Möglichkeit der Selbstdifferenzierung eines physikalischen Systems nicht gesehen, bzw.

da sie gelehnet wird, wird das regelmäßige Oberflächenrelief unserer rhythmischen Phänomene gedeutet als Wirkung selektiver 'Ein-
formung' bzw. 'Ausformung', bei den rippelartigen Gebilden
speziell als Formwirkung stehender oder sich fortpflanzender Wellen
in der Grenzzone des auflagernden oder unterlagernden Mediums. —
Im nächsten Kapitel werden wir zeigen, daß neben den 'mechanistischen'
auch 'organistische' Denkgewohnheiten das Verständnis unserer Erschei-
nungen erschweren.

XIII.

Entwicklung?

Die Bemühungen mehren sich, die Natur aus der schlingpflanzen-
artigen Umklammerung durch mechanistische Ausdeutungen und
Umdeutungen zu befreien; langsam schwindet die Zwangsvorstellung,
daß ein Naturvorgang erst dann als 'erklärt' anzusehen sei, wenn er sich
auf bekannte mechanische Gesetze zurückführen lasse. Der Feind steht
jedoch nicht nur links, er steht auch rechts! Die Geomorphologie als
anorganische Naturwissenschaft hat sich ebenso entschieden gegen die
Übergriffe 'organistischer' Prinzipien zu wehren. So tiefgreifend
war der Einfluß der *Darwinschen* Lehre namentlich in England und
Amerika, daß ihre Grundvorstellungen das ganze wissenschaftliche
Denken in ihren Bann zogen. Die theoretische Physik hat sich aller-
dings fast ganz von ihnen freizuhalten vermocht; am wenigsten wieder
die physikalische Morphologie, als der aufnahmewilligste Mutterboden
für derartige Infektionen.

Das nur für Vorgänge im Leben der Organismen gültige Entwi-
cklungsprinzip wird formal übertragen auf anorganische Vorgänge;
auch die Formen der Erdoberfläche sollen die Fähigkeit haben, sich zu
'entwickeln'. Die Mannigfaltigkeit der geomorphologischen Prozesse
wird eingepreßt in das eine Schema: Fortlaufende Entwicklungsreihe
aus einer kleinen, keimartigen 'Anlage' über verschiedene 'Entwick-
lungsstufen' zur ausgewachsenen, vollausgebildeten Form. Da die 'keim-
artige Anlage' wegen ihres unscheinbaren, 'zufälligen' Charakters einer
besonderen Erklärung nicht bedarf, und da das weitere Anwachsen der
Form nach Analogie des organischen Wachstums sich 'zwangsläufig' und
sozusagen selbstverständlich zu vollziehen scheint, so besteht die von
dem Genetiker gelieferte Erklärung des Phänomens eigentlich lediglich
in einer äußerlichen Beschreibung des hypothetischen Geschehens-

ablaufs und der dabei sich zeigenden Formen. Soweit sich die Beschreibung auf wirkliche Beobachtung gründet, mag dies einigen Wert haben; denn unser Verständnis ist so sehr historisch gerichtet, daß wir einen Moment des Geschehens bzw. eine Form erst dann zu verstehen glauben, wenn wir sie im Rahmen einer kontinuierlichen Fortschrittsreihe gesehen haben. Die „genetische Methode“ tritt jedoch mit dem Anspruch auf, eine „erklärende Beschreibung“ der Landschaftsformen zu liefern. In Wirklichkeit erklärt sie nichts. Erst die physiologische oder kausalanalytische Methode beschreitet mit Erfolg den Weg der Erklärung¹⁾.

Die Beliebtheit des Entwicklungsprinzips erklärt sich nicht nur aus dem primitiven Drange nach 'Vermenschlichung', 'Organisierung' des anorganischen Weltbildes, sondern ebenso sehr aus dem modernen Drange nach einer Umdeutung des Weltbildes gemäß den Bedürfnissen des 'ordnenden', einfache geometrisch-mechanische Bilder bevorzugenden Verstandes. Artverschiedenes Nebeneinander von Formen wird linear aufgereiht zu einem genetischen

¹⁾ Vgl. z. B. die interessante Studie von J. T. Jutson (1917, bes. p. 429ff.), in der sich die kausalanalytisch-aktualistische Anschauung der von Gregory (Ebenda 1914 u. 1916) vertretenen genetisch-historischen entschieden überlegen zeigt. Während dieser sich damit begnügt, die flachen Salz- oder Trockenseen mit ihrer Bildung von eigenartigen „billiard-table rock floors“ auf alte miozäne Flußsysteme „zurückzuführen“, deren tote „Überbleibsel“ sie darstellen sollen, zeigt Jutson sie uns als das Ergebnis der heute wirksamen Faktoren und als eine der typischen Formen des semi-ariden Klimas, den Salzpflanzen verwandt. Die Formen wären auch entstanden, wenn kein altes Flußsystem an ihrer Wiege gestanden hätte; die flußartigen Verbindungen der Seen untereinander erklären sich für das zur Behandlung stehende Gebiet zwanglos als das Ergebnis einer allgemeinen sanften Geländeabdachung in südlicher Richtung. — „A Chrysalis ist not a butterfly, but a butterfly is none the less a butterfly because it has passed through the chrysalid state ... The final shape is what determines the type of a formation and establishes its claim to a place in this category.“ (Workman 1913/14 p. 292.) Die anorganische Materie hat zudem kein 'Gedächtnis', keine autonomen Nachwirkungen früherer Zustände, keine Vererbung, keine gesetzmäßigen Fortschrittsreihen. Die Aufdeckung von früheren Zuständen, das sog. Zurückgehen auf die 'Urformen', die 'Quellen', 'Wurzeln', 'ersten Anfänge' vermag also hier für die Erklärung und Charakterisierung von gegenwärtigen Zuständen nur wenig zu leisten.

Wohl aber kann es wertvoll sein, die tatsächlichen Nachwirkungen vergangener Zustände im Bilde der gegenwärtigen Natur zu verfolgen. So sind „die Diskordanzen der Flüsse nur aus ihrer Entwicklungsgeschichte zu verstehen“, „wie sie die Geologie des Gebietes ... an die Hand gibt“. (Philippson II, 2. 1924. p. 164ff.; II, 1. 1923. p. 12.) Wenn der historisch gerichtete Morphologe hierbei bemerkt, daß die konkordanten Flüsse „keiner besonderen Erklärung bedürfen“, so grenzt er hiermit seine Problemstellung und sein Arbeitsgebiet gegen das der physikalischen, dynamisch-theoretischen Morphologie ab.

Nach- und Auseinander einer einzigen Formenreihe. Es wird mit seiner Hilfe ein fester Anfang und damit ein fester Beziehungspunkt für alle weitere Entwicklung geschaffen und örtlich festgelegt. Dann braucht das Weitere nur noch an dem Faden der Zeit aufgefädelt zu werden. Die Natur mag eine noch so deutliche Sprache sprechen, sie muß sich diesen rationalistischen Ansprüchen fügen. Man glaubt so jeden Vorgang auf eine 'Anlage', einen 'Keim', oder auf einen ebenfalls lokal begrenzten und bestimmten 'Anstoß', einen 'Erreger', eine 'Störung' usw. zurückführen zu können. „Es muß ein Erreger der Welle vorhanden sein, denn ein Wellenzug setzt immer (!) eine periodische Störung in irgendeinem Punkte voraus, von dem die Störung ausgeht.“ *Franz Exner* (Vorlesungen, 1919 p.484), der dies schreibt, würde die Möglichkeit von spontan und simultan sich bildenden 'Reibungswellen' schon aus logischen Gründen verwerfen. Denn von nichts entsteht nichts, spontane Neuentstehung aus strukturloser Masse scheint undenkbar. Irgendetwas, und sei es auch noch so unscheinbar, muß den Vorgang 'veranlaßt' haben, und an irgendeiner bestimmten Stelle muß die Sache auch ihren Anfang genommen haben. Auf Entstehung, Wachstum und Fortpflanzung der Organismen sowie auf die mechanischen Schulbeispiele treffen diese Alltagserfahrungen zweifellos unbeschränkt zu, nicht aber, wie wir immer wieder feststellen müssen, für das Gebiet unserer rhythmischen Phänomene. Hier entsteht tatsächlich aus 'nichts', d. h. aus einer völlig ebenen Fläche, 'etwas', d. h. eine geordnete Mannigfaltigkeit anscheinend ganz 'für sich' bestehender Formindividuen, die strukturlose Masse nimmt 'spontan', d. h. durch eine nicht örtliche, sondern über das ganze System hin ausgebreitete 'Ursache' eine in keiner Weise vorgebildete neue Struktur an. Der Vorgang ist also dem der organischen 'Entwicklung' durch Zellentwicklung so unähnlich wie nur möglich. Hier haben wir jene 'Epigenese', die spontane Entstehung aus formlosem Stoff durch physikalische Kräfte, die *Casp. Friedr. Wolff* einst fälschlich für die Organentwicklung ansetzte. Hier liegt nichts in sich zusammengewickelt, was nur 'ausgewickelt' zu werden brauchte, hier ist nichts keimartig 'angelegt'²⁾, was sich knospenartig erschließen wird und dann anwachsen und sich voll 'entfalten' wird, hier gibt es keine Trennung zwischen einer 'Ursache', die eine zunächst noch in ihr enthaltene 'Wirkung' 'aus sich hervorbringt'. Ebensovienig läßt sich hier ein Trennungsstrich ziehen zwischen dem Anfang, der sog. 'Einleitung' eines

²⁾ Nach Davis, Baschin (Pet. Mitt. 1918 u. ö.) u. a. steckt in jedem Flusse schon die Anlage zu einem Mäander. Er kommt bloß zunächst nicht dazu, ihn zu entwickeln.

Formbildungsprozesses, bei der die Form zubereitet, 'angelegt' und die Wachstumsmechanik angekurbelt wird, und der sog. 'Weiterentwicklung', die weiter nichts Problematisches mehr bietet, alldieweil es eine selbstverständliche Eigentümlichkeit jeder 'Anlage' ist, daß sie sich immer 'weiterentwickelt', sich 'ausbildet' und weiterwächst. Eine „absolut glatte Sandfläche“ wird sich nach *S. Günther* (²II.1899.p.616) nur mit einer gleichmäßig dicken Sanddecke überziehen. Sobald aber durch „irgendeine Unregelmäßigkeit des Bodens“ ein „Ansatz“ gegeben ist, so hat dieser die Fähigkeit, eine Düne zustande zu bringen. — Für solche Auffassung ist bezeichnend die Art, wie *Keidel* (1909/10 p.177ff.) das Büßerschneeproblem charakterisiert: „Der Zweifel besteht aber nicht so sehr über diesen Vorgang als vielmehr über seinen ersten Anfang.“ Alles andere bietet theoretisch keine Schwierigkeiten; nur „eine letzte unbeantwortete Frage bleibt bestehen: Wie bewirkt die Sonne die erste Veränderung eines glatten Schneefeldes?“ (*Schoy i.Pet.Mit.*1914.II.p.211.) Betreffs dieses 'ersten Anfanges' neigt *Keidel* teils einer extrem-präformistischen Auffassung zu (nur bestimmte Formen, die schon die Merkmale der späteren Anordnung des Büßerschnees zeigen, können den Anstoß zu seiner Ausbildung geben), teils sind in seiner Vorstellung die den Anstoß liefernden 'Urformen' zu wahllos verstreuten, punkartigen und hypothetischen Miniaturkeimen ('unbedeutenden Unebenheiten') zusammengeschumpft.

Zuweilen findet man sogar für die sog. 'Einleitung' und für die sog. 'Weiterentwicklung' je eine besondere Theorie aufgestellt. Die „ursprüngliche Form“ des Büßerschnees ist nach *Keidel* (a.a.O.) ein Werk der erwähnten Unebenheiten und der „Teilbewegungen“; die Verstärkung und Weiterentwicklung dieser Form läßt er dagegen durch die Sonnenstrahlung erfolgen. „Ursache der Entstehung“ der Erdpyramiden ist nach *L. Sauer* (1904 p.4) der diese krönende Stein; und „Ursache der weiteren Erhaltung“ die Standfestigkeit des Materials. Der in sich durchaus einheitliche Vorgang der Entstehung und des Anwachsens der Meereswellen wird von der Theorie zerspalten in die Aufeinanderfolge zweier verschiedenartiger Vorgänge. Schon die Gebrüder *Weber* beschränkten die Gültigkeit der *Franklin*-schen Theorie auf die „allerkleinsten Wellen“; für ihre Weiterentwicklung sei die Annahme eines auf das Wasser fallenden Luftstoßes notwendig. Die Identifizierung des Anfangsstadiums der Meereswellen (auch der 'Reibungswellen') mit den im Experiment erzeugten, auf kleine Dimensionen beschränkten „Kapillarwellen“ (*Scott Russell*) schien seine physikalische Verschiedenheit von dem Stadium der „ausgewachsenen Wellen“ zu bestätigen. Ebenso bleibt die Anwendbarkeit der *Helmholtz*-schen Wellentheorie auf die „elementaren oder

kapillaren Wellen“ beschränkt. Übrigens ergibt „eine Anwendung der *Helmholtz*schen Formeln auch für Sturm nur Wellen von 17 bis 18 cm Länge“. (*Krümmel* II.1911.p.63.) „Sind aber erst einmal die embryonalen Wellen, die sich der Fältelung der Oberflächenmembran anschmiegen, erzeugt, so ist die stetige Verstärkung, falls nur der Wind anhält, etwas Selbstverständliches; letzterer vergrößert die Amplituden der Orbitalbewegung und damit die Wellenhöhen.“ (*S. Günther* ²II.1899.p.444; vgl. unten Kap. „Selbstverstärkung“!) Auch nach *Krümmel* (a.a.O.) bietet die Erklärung des Wachstums „verhältnismäßig nur geringe Schwierigkeit“, nach *Baschin* sogar „überhaupt theoretisch keine Schwierigkeit“. Sind die durch Saugwirkung (Theorie von *Helmholtz-Baschin*) entstandenen „allerkleinsten Wellen“ „erst einmal eingeleitet, so kann der horizontal wehende Wind auch seine Druckwirkung in steigendem Maße zur Geltung bringen“. (*v. Larisch-Moennich* 1925 p.8.) — Bezeichnend ist die Scheu, bei den 'makromorphen' Erscheinungen andere als grobmechanische Erklärungen anzuwenden. Deshalb läßt man jene subtilen, feineren Kräfte diese Erscheinungen nur 'einleiten'. Das hohe Gewoge des Meeres bildet nach wie vor die unbestrittene Domäne von Stoß und Gravitation; noch thront dort unumschränkt Poseidon mit seinem Dreizack! — Man stellt Theorien der Rippelmarkenbildung auf, sucht aber für die Dünen nach wie vor nach anderen, größeren Ursachen. Sogar *V. Cornish* ergeht es so. In seinem letzten Werke (1914 p.57 u.88) führt er die Rippelmarken auf Wirbelbildungen und auf die selektiven Einwirkungen des Windes auf Sandkörner verschiedener Größe zurück, die Dünen dagegen auf die allgemeine Bögigkeit des Windes. Auch in seiner Theorie der Wasserwellen unterscheidet er zwischen den kleinen, kurzen Wellen, für die die bekannten Theorien Gültigkeit haben, und der regelmäßigen Reihe wandernder Haupt- oder Sturmwellen, die durch auflagernde Windwirbel mit langgestreckten horizontalen Achsen, deren Abstand mit der Wellenlänge der Wellen korrespondiert, ausgeformt worden sind. Umgekehrt ist das Wachstum der Wirbel bedingt durch die Zunahme der Wellengröße. Dieser Gedankengang bedeutet jedoch eine unzulässige Anwendung des Wechselwirkungsprinzips (vgl. Kap. „Selbstverstärkung“!); *v. Larisch-Moennich* (1925 p.10ff.) äußert weitere Bedenken. (Siehe auch Kap. XII,f: „Abformung“!) — Bei den Rippelmarken verlegen einige Autoren die theoretische Scheidelinie sogar in den Vorgang der Rippelbildung selbst hinein. Nach der Ansicht *Hahmanns* (1910) kommt die *Helmholtz*sche Wellentheorie „nur für die Einleitung“ der Rippelmarkenbildung auf ebener Sandfläche in Betracht. Dagegen sei „die weitere Gestaltung“ der Rippelmarken, ihre Form und ihr Abstand, bestimmt durch die Art der Wirbel, die sich

hinter den Dünen nach dem Prinzip der *Helmholtz*schen Wirbeltheorie bilden. Ebenso die früheren Theorien: Sie beschränken die Wirksamkeit der von ihnen aufgedeckten Faktoren ausdrücklich auf das „Anfangsstadium“. (*Bertololy* 1900 p.69.) Auch *Philippson* (II,2.1924, p.276f.) gibt neuerdings für die „Entstehung“ und für die (Weiter-) „Entwicklung“ der Rippeln und Dünen je eine gesonderte Erklärung: „Das un stetige stoßweise Wehen des Windes“ schafft die ersten flachen Sandanhäufungen; das weitere Wachstum geschieht durch eine „Tendenz“ dieser Sandhäufchen, weiteren Sand aufzufangen und festzuhalten, wozu sie als aktive „Hindernisse“ befähigt sein sollen. (Vgl. Kap. „Selbstverstärkung“!) — Auch die Mäandertheorie hat diese theoretische Scheidung vorgenommen. Der Flußbogen wird durch Unregelmäßigkeiten des Geschiebes „angelegt“, dann durch die sich dabei „entwickelnde“ Zentrifugalkraft „weiter ausgebildet“. (*Ahlmann* 1914 p.51ff; *Machatschek* III.1919.p.38; s.a. Kap. „Mäandertheorien“!) „Unregelmäßigkeiten des Geschiebes“! Also die immer zu beobachtenden bzw. mit großer logischer Wahrscheinlichkeit als immer vorhanden anzusetzenden, unkontrollierbaren minimalen Unregelmäßigkeiten („casual surface inequalities“; *G. H. Darwin* 1884), die sog. 'kleinen Hindernisse' sind es, die den für die genetische Anschauungsweise unentbehrlichen 'Anlaß', 'Ausgangspunkt' oder 'Ansatzkern' liefern. Trotz ihrer meist lächerlichen Geringfügigkeit sind sie höchst wichtig, denn sie sind die Punkte, von denen die theoretischen Überlegungen ihren Ausgang nehmen können, von denen aus man dem Phänomen zuleibe rücken kann, das sich sonst 'nicht recht fassen' läßt³⁾. Das Steinchen auf der Sandfläche ist ein 'Ruheplatz' nicht so sehr für den windgetriebenen Sand, als vielmehr für die Überlegungen des Theoretikers. Nicht nur ist mit der Aufzeigung dieses 'Keimes' Entstehung und Wachstum des Phänomens 'erklärt', sondern es ist mit der Ansetzung eines 'kleinen Hindernisses' zugleich von vorneherein ein festes hic et nunc geschaffen, das Problem der Verteilung und der systemkausalen Differenzierung hierdurch gewaltsam beseitigt; der Vorgang erscheint vielmehr, vom Festpunkte ausgehend, als lokalkausal und linear, und demgemäß als 'leicht begreiflich'. Hieraus erklärt sich die Zähigkeit, mit der die Forschung an der 'Theorie der kleinen Hindernisse' festhält, trotz ihrer offen zutage liegenden und schon oft bemerkten Widersinnigkeiten. — Da bei der Düne nur eine dünne Oberflächen-

³⁾ Vgl. E. Becher (1914 p.332f.): „Unser Denken sucht nach Beharren- dem im Strom des Geschehens, nach unveränderlichen Realitäten, die dem Geist einen Ausgangs- und Haltepunkt (!) bieten, von dem aus er auch das wechselnde Geschehen überschauen und beherrschen lernt.“ — „Gib mir einen Punkt, wo ich hintreten und stehen kann . . .“, forderte schon Archimedes.

schiebt in Bewegung ist, ist die Wirkungsmöglichkeit der 'unbedeutenden Rauigkeit', des Steinchens, der Muschel, der Konservendose, des Tiergrippes, des Grasbüschels schon mit dem Augenblick beendet, wo der Sand über sie hinausgewachsen ist, und erst recht, wenn die Düne nun anfängt zu wandern und unbekümmert ihren Entstehungsort verläßt. *Sven Hedin* (1905.II.p.410) fand mit Recht absurd den Gedanken, die zahllosen großen vegetationslosen Dünen der asiatischen Wüsten mit ihrer regelmäßigen Anordnung zu erklären als Wirkungen zufälliger und unscheinbarer Hindernisse aus früheren Jahrhunderten. Er äußert die treffende Vermutung, daß unabhängig von diesen die Dünenbildung von irgendwelchen allgemeineren Gesetzen beherrscht werde. „If the masses of sand now in the desert Tschertschen were to be spread out perfectly evenly over the desert in a layer some 30 m thick, the sand would after a certain lapse of time be rearranged by the wind in dune-accumulations precisely similar to those that now exist.“ *H. Ayrton* (1910 p.286) wendet sich mit derselben Entschiedenheit gegen die *G. H. Darwinsche* Theorie der Rippelmarken: „It seemed to me impossible, that chance inequalities, having no relation with one another, but scattered here and there entirely without order, should develop into such ripples as are commonly seen on the sea shore — straight as if ruled, all of the same shape, and all at equal distances apart, or at distances varying according to some definite law.“

Die heute vorliegenden genaueren Beobachtungen der verschiedenen Vorkommnisse von Erdpyramiden berechtigen zu einer ganz entsprechenden theoretischen Beurteilung. Würde man sich aus dem Bodenmaterial, in dem die Erdpyramidenbildung vor sich geht, alle größeren Steine entfernt denken, so würde sich trotzdem ein System von Erdpyramiden herausbilden, ebenso schön wie bei der Anwesenheit der Steine, denen die Pyramiden nach der landläufigen Auffassung ihre Entstehung und Erhaltung ausschließlich verdanken sollen. Es ist interessant, zu verfolgen, wie der 'Stein' mit dem Fortschritte der Forschung immer mehr an Wertschätzung eingebüßt hat. Nach der alten, auf die Angaben von *Ch. Lyell* sich stützenden Theorie war der — die Aufmerksamkeit des Beobachters in hohem Grade auf sich ziehende — Stein auf der Spitze schlechthin das schützende Regendach, das die unter ihm befindliche Erdsäule vor Abspülung schützte, so daß er sich mit ihr allmählich aus der Umgebung heraushob. Der Erdpfeiler hing natürlich in seiner Existenz ganz von diesem Steine ab, ebenso wie der stützende Eisblock des Gletschertisches seine Erhaltung ganz der aufliegenden Steinplatte verdankt, die die Sonnenstrahlen fernhält. Bei Pyramiden, die keine Steinkappe trugen, glaubte man, daß sie diese erst im Laufe der Zeit verloren haben müßten, man war überzeugt, daß nach

dem Verlust des Steines auch die Tage der Pyramide gezählt seien⁴⁾. Den entschiedensten Gegner fand diese Theorie in *L. Sauer* (1904). Er schreibt dem Stein lediglich eine fördernde und ortsbestimmende Wirkung bei der ersten Entstehung zu. Der Stein spielt also für ihn nur noch die geschilderte Rolle des 'kleinen Hindernisses', des genetischen 'Ansatzpunktes'. Der Stein weist der Pyramide ihren Platz an, er lokalisiert die Rinnenfurchen des Wassers zu beiden Seiten und leitet die Aufhebung des rückwärtigen Zusammenhanges der Pyramide mit der Bergwand ein. „Ist der erste Schnitt hinter dem Stein geschehen, so ist dieser selbst als Schutz überflüssig; daher ist es auch gleichgültig, ob der krönende Stein groß oder klein ist.“ Bei vielen Vorkommnissen ist er nur faustgroß. Daß der Stein auf der Spitze zur Erhaltung der Form nichts beiträgt, ergibt sich daraus, daß „die Verjüngung des Kegels ohne Unterbrechung bis an den Stein heranreicht“. Wäre der Stein wirklich ein Schutz, so müßte der Durchmesser der Säule in der Nähe des Steins wieder allmählich dicker werden. Doch das ist nirgends der Fall. (*L. Sauer* 1904 p.11.) Die Häufigkeit der Steinbedeckung erklärt sich daraus, daß das für die Pyramidenbildung geeignete, leicht angreifbare und zugleich standfeste Bodenmaterial (z. B. Moränenschutt) vielfach kleinere Rollsteine und auch größere Steine zu enthalten pflegt, die dann bei dem Vorgange der Pyramidenbildung herausgewittert werden, ohne daß sie selber diesen Vorgang merklich beeinflussen. „An vielen Stellen kann man sehen, daß auch aus den senkrecht abfallenden Wänden größere Steine seitwärts hervorragen; bis zu 40 cm weit stehen sie vor, und die Wand, aus der sie hervorstehen, ist um sie herum in keiner Weise erhöht, so daß man fast den Eindruck hat, als wären diese Steine von außen in die Wand hineingesteckt. Vor allem auffallend ist es, daß auch auf der Unterseite der Steine an der Wand keinerlei Hervorragungen sich finden, was doch der Fall sein müßte, wenn die Steine für Wasser, das von oben herabfällt, ein Schutzdach, eine Art Regendach gebildet hätten.“ (*L. Sauer* p.6, vgl. p.8.) Nur in sehr lockerem und bröckeligem Material werden große Blöcke oder eine Vegetationskappe für die Erhaltung der Säulen wesentlich. Zuzugeben ist auch, daß in manchen Fällen eine akzentuierende, formverschärfende Wirkung der

⁴⁾ So noch: H. Wagner, Lehrbuch¹⁰ I, 2. p.324. — Der Versuch, die rhythmischen Phänomene mit der Annahme der schützenden Wirkung von Hindernissen zu erklären, stellt die primitivste Stufe der Theorienbildung dar. Auch die Dünen hielt man lange Zeit für Sandanhäufungen an und über Hindernissen. Noch S. Günther (²II.1899.p.616; Fig.125) glaubte der Düne einen besseren theoretischen Halt zu geben, wenn er ihr einen Pfahl in den Leib ramnte.

krönenden Kappe in der Tat zu beobachten ist. *Workman* (1913/14 p.298) berichtet, daß in einem Schneelawinenfelde die aus Firn mit Eis- spitze bestehenden Pyramiden des nivee penitente vielfach mit Gras- oder erdigen Klumpen bedeckt waren, „which, while protecting the pinnacles somewhat from heat, served to bring their outlines more sharply(!) into relief against the white groundwork from which they rose.“ Die Bedeutung der Kappe bei den Erdpyramiden wird auch davon abhängen, ob mehr der unmittelbar auftreffende Regen oder mehr die Spülwirkung der Wasserrinnen am Fuße der Pyramiden für die Form maßgebend ist. Die im Bodenmaterial verstreuten Steine werden wohl auch deshalb so häufig auf der Spitze angetroffen, weil der zunächst etwa noch vorhandene erdige Aufsatz durch die Verwitterung und durch das sich über dem Steine ansammelnde und an seinen Rändern austretende Sickerwasser relativ schneller entfernt wird als der gegen Verwitterungseinflüsse relativ unempfindliche und infolge seiner Schwere auch mit einem großen 'Beharrungsvermögen' versehene Stein. Der letztere Umstand wird von Bedeutung bei den Miniaturformen: Der Regen vermag die feineren Gesteinskörner fortzuschwemmen, während die größeren als Kappen auf winzigen Erdstielen sitzen bleiben. (*E. Kayser* 1921.I.p.409 Anm.) An die Stelle der Vorstellung von der aktiven Schutzwirkung hat also die von der passiven Re- manenz des Steinmaterials zu treten.

„Für die Höhe und Schlankheit der Säulen ist wohl nur die Beschaffenheit des Materials maßgebend.“ „Es schadet nichts, wenn der Stein endlich herabgefallen ist, die Säule bleibt dann ebenso fest und lange stehen wie ihre Nachbarn.“(!) (*L. Sauer* p.11.) Es ist deshalb nicht verwunderlich, wenn wir nach dem Zeugnis der verschiedensten Autoren (*Ratzel* I.p.557; *S. Günther* 1902 u.1904; *Kittler* 1897 p.9,18, 21f.u.ö.; *Sauer* p.3,6,8,9,11; *Machatschek* III.1919.p.32; u.a.) auch eine steinfreie, spitzsäulige Abart der Erdpyramiden antreffen, die keineswegs als Ausnahmerecheinung zu gelten hat. Bei 75% der Finsterbach-Pyramiden fehlen die Steine völlig, ohne daß dadurch deren Lebensdauer merklich verringert wird.

Die wesentliche Vorbedingung der Erdpyramidenbildung ist also, abgesehen von den klimatischen Faktoren (starke Durchfeuchtung in Form heftiger Regengüsse mit nachfolgender rascher Austrocknung, bei der sich die feuchte Masse wieder festigt) und der Bedingung des raschen Wasserabflusses und Materialabtransportes (Beschränkung auf steile Gehänge) lediglich ein Bodenmaterial, das einerseits mürbe und bröckelig ist und unter der Einwirkung des Wassers gleich zerfällt und zerfließt, andererseits doch für Bildung und Erhaltung nahezu senkrechter Be- grenzungsflächen genügend kittenden Zusammenhalt und Standfestig-

keit besitzt. (*Ratzel* I.p.556.) Diese Bedingungen erfüllen vor allem verfestigte Schuttmassen verschiedenster Entstehung. Wichtig ist bei ihnen die zusammenkittende Grundmasse aus feinen Ton-, Sand- oder Kalkpartikelchen als Vorbedingung für die steile Formenausbildung.

Ein weiteres Argument gegen die Überschätzung der Steinbedeckung ist der Formenschatz der Erdpyramidenbildung selbst. Es finden sich alle Übergänge von den kulissenartig am Hang sich hinabziehenden Erdwällen (Kämmen, Graten, Erosionssporen, Mauern), die durch parallellaufende Regenrinnen herausgehoben werden, bis zu den Gruppen isolierter Pyramiden, Kegel, Säulen oder Pfeiler, die ohne Formübergänge eine neben der anderen unvermittelt aus der steilen Schutthalde aufsteigen. Oft sind die Käme der „langen schmalkantigen Rippen“, die sich zum Tale hinabziehen, in kleine Zacken und Pyramiden zerlegt oder zeigen wenigstens Andeutungen von Spitzenbildung. (Vgl. bes. *L. Sauer* 1904 p.8!) Die Pyramiden erscheinen teils aus dem Kamme selbst herausgeschnitten, teils streben sie zu seiner Seite empor. Selten ist die Zerlegung völlig zu Ende geführt; in der Regel erkennt man noch die gemeinsame Basis, auf der die Pyramiden aufsitzen. Selbst völlig isolierte Pfeiler sind fast immer auf der Rückseite durch eine niedrigere bogenförmige Mauer mit dem Hange verbunden. In den Fällen, wo die rückwärtige Verbindung mit dem Hange völlig erhalten geblieben ist, kommt es zur Bildung bastionartiger Vorsprünge. Es ist ohne weiteres klar, daß nur eine solche Theorie der Erdpyramidenbildung als befriedigend angesehen werden kann, die diesen ganzen Formenschatz und nicht nur den extremen Typ der steingekrönten Säule umfaßt. *Philippson*, (II,2.1924.p.46f.) charakterisiert die Erdpyramiden deshalb sehr treffend als „gesteigerte Badlandformen“.

Es besteht, wie schon *S. Günther* (1904) richtig erkannte, zwischen dem Vorgang der Büberschnee- und der Erdpyramidenbildung weitgehende Übereinstimmung. Da die Verhältnisse bei den Erdpyramiden schwieriger und unübersichtlicher sind, kann vielleicht von dort her eine Klärung des Phänomens erfolgen. Die Stabilitätsbetrachtung läßt auch für die Erdpyramidenbildung die Wirksamkeit unserer 'Tendenz zum Minimum innerer Reibung' vermuten. Die zunächst sehr starke Diakinese (Diffusion von Wasser im Bodenmaterial, lebhafter und ständig sich wiederholender Wechsel von Durchfeuchtung und Austrocknung) wird übergeführt in Parakinese. Die Wasserteilchen zerstreuen sich nicht mehr in das andere Medium hinein, sondern bleiben in Schichten zusammen und fließen ab. Nicht der krönende Stein, sondern die ganze Bildung ist ein Regenschirm, vergleichbar den spitzen Runddächern von Erkertürmchen. Vielfach kommt es sogar zur Bildung einer Schutz-

rinde, „die recht glatt sein kann und dem Eindringen des Wassers ein größeres Hindernis entgegensetzt“ (Sauer p.11.) Die Parakinese selbst wird nun ihrerseits durch die Riefelungen und Kannelierungen und durch die rasche Vereinigung der Wasserteilchen zu einem dichten Nebeneinander paralleler, sich den Hang hinabziehender Wasserrisse in eine erhöhte Stabilität übergeführt. Die Analogie zu den Karrenformen drängt sich hier auf. Chr. Kittler (1897) hat deshalb die Bildung gegenüber Lyell als „kombinierte Erosions- und Denudationswirkung“ gekennzeichnet. Immerhin ist die 'echte' Erdpyramidenbildung in erster Linie 'Verwitterungsform' (durch unmittelbare Regenwirkung), weniger 'Spülform'.

Die Theorie der Karrenbildung ist seit Albert Heim (1877/78 p.427) in dasselbe Stadium eingetreten wie die der Erdpyramiden seit L. Sauer (1904): Es ist nur noch der letzte Schritt zur Anerkennung der rhythmischen Selbstdifferenzierung zu tun. Neben der Reinheit des Gesteins bedarf es nach Heim zur Entstehung der Karrenformen nur noch des Vorhandenseins kleiner Inhomogenitäten, wie etwa Versteinerungen oder dichter und härterer Stellen, die die Ansatzpunkte der ungleichmäßigen Verwitterung und der Furchen darstellen. Also nur noch punktweise werden die sich entwickelnden Formen im Raume durch äußerliche Faktoren festgelegt, nicht mehr, wie bei der alten Spaltentheorie und der Glazialtheorie, für ihre gesamte räumliche Erstreckung und für die ganze Zeit ihrer Ausbildung. Nach der letzteren Theorie (Agassiz 1840, Simony; zit. Eckert 1895 p.40 u. 49ff.) waren die Karren einfach das 'Werk' ehemaliger subglazialer Schmelzwässer, die wirksames Schleifmaterial in kleinen Rollstücken, Sand und feinem Steinmehl mitbrachten und so jene eigentümlich ausgehöhlten Formen schufen. Nur die Schmelzwässer verfügten über die genügende, zur Aushöhlung erforderliche mechanische Energie; nur sie vermöchten durch ihr lokal-begrenztes Einwirken (Aufsturz durch Gletscherspalten usw.) so scharf differenzierte Formen zu schaffen. Man konnte sich eben den Vorgang „nicht anders denken, als daß“ der formbildenden Kraft bis ins einzelne „die Wege gewiesen“ würden. Es ist nach Agassiz (zit. Eckert 1895 p.40) nicht einzusehen, weshalb gesäuertes Karrenwasser gerade auf ganz bestimmte Orte vom Himmel herabfallen sollte und nicht auf andere unmittelbar daneben liegende Stellen. „Il est impossible que sur une aussi petite surface les eaux atmosphériques aient jamais donné lieu au moindre petit filet d'eau.“ — Wenn man zur Erklärung der 'Föhrden' ebenfalls subglaziale Schmelzwässer heranzieht (E. Werth), so wird man sich auch hier von derartigen Überlegungen haben leiten lassen.

Den zur Bildung von Gesteinswaben führenden 'angeordneten'

Austritt des Sickerwassers an Sandsteinwänden sucht *P. Keßler* (1921 p.260f.) mit der Annahme entsprechend angeordneter Haarspalten zu erklären. Der Umstand jedoch, daß zur Erklärung, „warum das Wasser gerade hier seinen Weg nahm“, noch die Möglichkeit der rhythmischen Selbstdifferenzierung offen steht, läßt diese Haarspalten, die „weder mit unbewaffnetem Auge, noch, meistens, mit der Lupe zu erkennen sind“, stark hypothetisch erscheinen.

Es bleibt noch eine besondere Art der genetischen Kategorienbildung kurz zu charakterisieren, die darin besteht, daß nicht von einem form-unbestimmten Ansatzpunkte, sondern von einem fertigen Mutterindividuum, einer sog. 'Urform' ausgegangen wird, sei es nun, daß diese als erstes Glied eines mehrgliedrigen (metameren) Formenmusters die Entstehung der weiteren Glieder durch sukzessives Fortschreiten des genetischen Zeugungsprozesses veranlaßt, oder sei es, daß das artverschiedene Nebeneinander einer Gruppe selbständiger Formgebilde aufgereiht wird zu einer einzigen Formenreihe, bei der sich jede Form aus der vorhergehenden genetisch entwickelt, die 'Urform' also die Mutter der ganzen Formenreihe ist. — *Herta Ayrton* (1910 p.289) ist überzeugt, daß Rippelmarken sich ohne die Mithilfe eines Hindernisses auf freier ebener Sandfläche bilden können. Trotzdem sind ihre Versuche mit dem Schaukelbassin noch beherrscht von genetischen Gedankengängen: „I formed a fairly high ridge at some distance from the middle of the vessel and watched to see if others followed from that . . .“ „The 'brush' of the vortex in the lee of any existing dune or obstacle sweeps up a new ridge beside it . . .“ Der Urrippelwall wird so zum „starting point for other ripples“. Ist die Urrippel vorhanden, so ist die Bildung der weiteren Rippeln „a matter of course“. (p.307.)⁵⁾ — Auch verschiedene, bei ein und derselben Erscheinung auftretende, Formen werden untereinander zu einer Entwicklungsreihe verbunden. So glaubt *S. Günther* (1904 p.404), daß es „ohne vorgängige Sporenbildung nicht zur Herausbildung einer größeren Ansammlung von Erdpyramiden“ kommen könne, während *Sjuts* (1907 p.29) den Neigungswinkel des Hanges hierfür maßgebend sein läßt; bei steiler Böschung zerfurcht der

⁵⁾ Zur Erklärung der sukzessiven Bildung der Rippelwälle bei den Schaukelversuchen, sowie der 'Ringe' bei den Liesegangschen Diffusionsversuchen vgl. Kap. „Rippelmarken“, passim; und Kap. „Rhythmus und Periodizität“. Auch der Bleidraht bei den F. A. Forelschen Hindernisversuchen (1883 p.56ff.; vgl. Kap. „Rippelmarken“!) ist nur äußerlicher „point de départ“, nicht aber „origine“ im kausalen Sinne. Nur wenn das Hindernis sehr groß ist, kommt es zur Entstehung von reinen 'Hindernisriffeln' im Lee, die sich aber schon durch ihre Form von den echten Riffeln unterscheiden. (Zu „Hindernisformen“ vgl. Kap. „Selbstdifferenzierung“!)

abfließende Regen den Boden in der Weise, daß sich nicht erst langgestreckte Käbme und Grate bilden, sondern die Säulen unmittelbar aus dem Hange herausgeschält werden. Beides sind deduktive Überlegungen. In Wirklichkeit liegen die Verhältnisse wesentlich komplizierter, und zwar analog denen des Bößerschnees. (Vgl. Kap. „Bößerschnee“, Abschnitt „Formtypen“ 3: Der Nadel- und Pyramidentypus!) — Die Fragestellung nach der „Urform“ der Dünen „ist heute beliebt bei Geographen, welche den von den Biologen für eine Entwicklungsstufe von Organismen geprägten Ausdruck unbedenklich auf Ergebnisse mechanischer Vorgänge übertragen. In dem 'Barchan', d. h. in der Dünengestalt, welche vor dem Winde wandernde Sandhaufen und Sandhäufchen auf kahler Grundfläche (!) anzunehmen pflegen, erblicken viele die 'Urform'“. (*F. W. Paul Lehmann* 1919 p.103f.) Die langen Dünen denkt man sich generell durch Verwachsung mehrerer Barchane entstanden. Die Form der Parabeldüne gewinnt man dadurch, daß man die Vegetation die Ränder der Wanderdüne früher festhalten läßt als die Mitte. Fällt der Verbindungsbogen dem Wind zum Opfer, so entwickeln sich(!) nach *G. Braun* (zit. *Supan* 1916 p.593) aus den Parabeldünen die Strichdünen, die in der Richtung des vorherrschenden Windes verlaufen. „Die litoralen Formengruppen erscheinen somit als Glieder einer Entwicklung, die von einer Urform ausgehen.“ (*Machatschek* III. 1919.p.118.) Entsprechend hatte *Cvijić* (1900/01, zit. *Supan* 1916 p. 554; s. a.: *Philippson* II,2.1924.p.69f.) die oberflächlichen Karstformen als eine einheitliche Entwicklungsreihe aufgefaßt, wonach sich durch fortschreitende Erosion Karren in Dolinen, Dolinen in Uvalas, Uvalas in Poljes verwandeln. Im Gegensatz zu *Cvijić* leugnet *Katzer* (zit. Ebd.) jeden genetischen Zusammenhang zwischen diesen Formen. Wenn auch die durch Beobachtungen erhärtete theoretische Möglichkeit eines reihen- oder gruppenförmig verschmelzenden Zusammenschlusses der Dolinen zu Uvalas und Poljes außer Zweifel steht, so wird diese 'Möglichkeit' doch erst dann zu einer 'Wirklichkeit', wenn sie für den konkreten Einzelfall unzweideutig nachgewiesen wird. Sonst aber ist ohne weiteres auch die andere Möglichkeit ins Auge zu fassen, daß sich die betreffende Form unvermittelt und unabhängig von irgendwelchen Vorstufen herausgebildet hat. Nur für die Welt des Organischen gilt der Satz, daß höhere Formen in gesetzmäßiger Weise gewisse Vorstufen der Entwicklung zur Voraussetzung haben.

Zusammenfassung:

Wir sahen, daß die formale Seite des Entwicklungsprinzips die Theorienbildung der anorganischen Prozesse weitgehend beeinflusst. Das Schema: Fortlaufende Entwicklungsreihe aus einer 'keimartigen

Anlage' über verschiedene 'Entwicklungsstufen' zur ausgewachsenen, vollausgebildeten Form, wird auch auf diese Vorgänge übertragen. Artverschiedenes Nebeneinander wird so linear aufgereiht zu einem 'genetischen' Nach- und Auseinander einer einzigen Formenreihe. Der Auffindung der 'keimartigen Ursache', des 'ersten Anfanges' wird deshalb ein übertriebener Wert beigelegt, die 'Weiterentwicklung' dagegen als unproblematisch vernachlässigt. Es besteht eine Neigung, den Prozeß der 'ersten Anlage' und den der 'Weiterentwicklung' theoretisch zu sondern. Da die genetische Methode jeden Vorgang auf einen 'Anlaß' (Ansatzkern, Ausgangspunkt) zurückzuführen bemüht ist, müssen in den Fällen, wo ein solcher sich nicht ohne weiteres angeben läßt, fingierte 'minimale Hindernisse' diese Rolle übernehmen. Einer ernsthaften Kritik hält dieses Verfahren nicht stand. — Wir versuchten sodann, an dem konkreten Beispiele der Erdpyramiden das Eigentümliche der genetischen Betrachtungsweise etwas eingehender zu charakterisieren und die Schwächen dieser Betrachtungsweise darzutun. Es galt, die Bedeutung, die sie der Steinbedeckung als dem 'schützenden Regendach' bzw. dem genetischen 'Ansatzpunkte' zuweist, auf ihre wirkliche Berechtigung hin zu prüfen. Die Bedeutung der 'kleinen Hindernisse' wurde auch bei einigen anderen Phänomenen (Karren, Gesteinswaben usw.) nachgeprüft. — Eine besondere Art genetischer Kategorienbildung stellt nicht einen form-unbestimmten Ansatzpunkt, sondern eine formbestimmte 'Urform' an den Anfang einer gedachten Entwicklungsreihe hin. Ebenso wird das artverschiedene Nebeneinander einer Gruppe selbständiger Formgebilde genetisch aufgereiht zu einer einzigen 'Formenreihe'. Der genetisch-historischen stellten wir die kausalanalytisch-physiologische Betrachtungsweise entgegen. Das nächste Kapitel wird uns zeigen, wie der genetische Gedanke des Herauswachsens einer Form aus einem einzigen Ansatzpunkte durch die Auffassung dieses Anwachsens als 'Selbststeigerung' zum Range eines allgemeingültigen Naturprinzips erhoben wird.

XIV.

Selbstverstärkung?

„principiis obsta!“ (Ovid.)

Auch als 'exakte' Erfahrungswissenschaft kann die Morphologie einer festen naturphilosophischen Fundierung und einer planmäßigen theoretischen Durcharbeitung nicht entraten. Da ihr diese noch fehlt, wird sie einer mit Geschick propagierten Modetheorie leicht ein willen-

loses Opfer. Sie glaubt, alle Mystik hinausgeworfen zu haben und bemerkt nicht, wie sie durch die verschiedensten Hintertüren und Spalten wieder hereingrinst, ja sogar, wie in vorliegendem Falle, als neuentdecktes 'Prinzip' wieder hochhoffiziell empfangen und zur Verwendung warm empfohlen wird.

Wie man seinerzeit das *Davissche* Entwicklungsprinzip oder das *Helmholtz-Baschinsche* „Gestaltungsgesetz“ aufgriff, so findet auch jetzt das *Behrmannsche* „Prinzip der Selbstverstärkung“ (1919) begeisterte Anhänger. (Vgl. z. B. *Jessen* i. Pet. Mitt. 1922 u. „Die Verlegung der Flußmündungen . . .“ 1922 p.168; *Passarge* III.1920.p.100 u.253; *Mortensen* 1921 p.49 u.p.5.) Der Gedanke selbst ist nicht neu. *W. Frost* (1910 p.149) läßt ein „Prinzip der Selbststeigerung“ für gewisse Vorkommnisse gelten; praktisch spielt es, wie wir noch zeigen werden, in unzähligen theoretischen Beweisketten eine wichtige, aber verborgene Rolle.

Wie der Genetiker seine Aufgabe für beendet hält, wenn er den 'Keim' aufgezeigt hat, aus dem sich alles weitere „entwickelt“ habe, so ist jetzt nach *Behrmann* ein Phänomen dann befriedigend erklärt, wenn die 'kleinen Ursachen' namhaft gemacht werden, die den Vorgang der Selbstverstärkung 'eingeleitet' haben. Der Vorgang selbst erscheint, da er durch ein 'Prinzip' gedeckt ist, einer weiteren Erklärung nicht mehr bedürftig: Der Vorgang steigert sich 'aus sich selbst heraus'. Die Aufgabe ist also auch hier für den Theoretiker wesentlich vereinfacht. So braucht er bei der Erklärung der Dünen nur irgendwelche auf dem Sande liegende Konservendosen, Muscheln, Kieselsteine, Tiergerippe (*Passarge* III.1920.p.349) anzusetzen und die Selbstverstärkungsbatterie einzuschalten, und die Düne wächst vor seinen Augen. Wie lange? Natürlich nicht bis in den Himmel. Diesen Gedanken weist *Behrmann* entschieden von sich. Lehrt doch die Erfahrung, daß im geeigneten Augenblicke „störende Faktoren“, „fremde Ereignisse“ „diesem Gesetz des Anwachsens durch sich selbst Einhalt gebieten“. (!) Ein Anstoß im umgekehrten Sinne wird dann oft genügen, um das Phänomen wie bei einem rückwärts abgекurbelten Film wieder zum Verschwinden zu bringen. Für die Düne denkt sich das *Behrmann* so, daß der nunmehr zu schwach gewordene (die Beobachtung zeigt das Gegenteil!) Wind nur noch einen kleinen Wirbel erzeugt, der dann „die Düne wieder auffrißt“; und so geht es dann unaufhaltsam bergab nach dem Prinzip der Selbstvernichtung. (Vgl. Kap. „Mäandertheorien“ !)

Noch einen Schritt weiter geht übrigens die *Kammerersche* Kreislauf- oder Pendeltheorie, die dieses Spiel „in infinitum“ fortführt und so eine Reihe z. T. kosmischer Erscheinungen erklären will. Auch bei ihr ist „von restloser Ausgleichung bis zu neuentstehender

Verschiedenheit nur ein Schritt“, veranlaßt durch den Umstand, daß gleichgewordene „Pole“ sich abstoßen (!). *Kammerer* (1919) beschert uns damit das langersehnte 'Perpetuum mobile II. Art' (*Wi. Ostwald*, Allg. Chemie. 1891), das imstande sein soll, fortdauernd eine Energieart in die andere zu verwandeln und umgekehrt, ohne einen Energieverlust zu erleiden.

Wie nun aber, wenn die 'störenden Faktoren' einmal nicht rechtzeitig zur Stelle sind? Die Folgen sind in der Tat kaum auszudenken. Das Phänomen schwillt und schwillt weiter zu immer bedrohlicheren Ausmaßen. Es kann ja nicht anders! Ähnlich wie jener Hirsebrei im Märchen: Das Mädchen, das den Zauberspruch vergessen hat, stürzt entsetzt davon, bis schließlich die Hexe kommt und dem Selbstverstärkungsunfug ein Ende macht.

Schreitet man auf diesen Pfaden fort, so gelangt man wieder zu dem Weltbilde der Primitiven, dem Seifenblasenspiel unberechenbarer Zufälle. Man müßte dann auch folgerichtig das achtlose Wegwerfen von Konservendosen am Strande wegen der damit verbundenen Dünengefahr verbieten. Man würde dabei schon Bundesgenossen etwa in den Leuten finden, die den Weltkrieg deshalb für unvermeidlich hielten, weil ein an und für sich belangloser 'Stein' einmal 'ins Rollen gekommen' sei, oder die nach dem Kriege über die 'Schraube ohne Ende' seufzten, die, einmal in Bewegung gesetzt, eben durch ihre Tätigkeit die Löhne und Preise zwangsläufig immer weiter emporschraube.

Man wird diese Kritik abwehren wollen, doch läßt die Formulierung der *Behrmannschen* Theorie schlechterdings keine andere Deutung zu: Sie läßt den Sandhaufen wachsen „durch seine eigene Existenz“. Das minimale Anfangshindernis trägt, wie ein organischer Keim, „alle Bedingungen zur Entstehung der Düne in sich“; es genügt, wenn es kräftig genug ist, den Vorgang „einzuleiten“, und dazu gehört ja nicht viel. — Die 'Methode der kleinen Hindernisse' steht so im Bunde mit einer 'Philosophie des Immer mehr', die den theoretische Grundlage für die weitere Entwicklung liefert. „Sind aber erst einmal Krümmungen entwickelt, so läuft der Vorgang der seitlichen Erweiterung von selber weiter, indem er sich verstärkt.“ (*Passarge* III. 1920.p.253.)

Das Selbstverstärkungsprinzip findet seine stärksten Wurzeln in der logisch-sprachlichen Kategorienbildung. Diese spaltet das Geschehen in das 'aktive' Subjekt und das 'passive' Objekt. Es kann nun vorkommen, daß Subjekt und Objekt Glieder eines einheitlichen Ganzen sind. Die Sprache schreitet dann zur Identifizierung von Subjekt und Objekt, indem sie den Vorgang weniger genau so auffaßt, als gehe der Vorgang vom Ganzen aus und kehre zugleich wieder zu ihm

zurück: rückbezügliche oder reflexive Tätigkeit. (z. B.: 'Ich' rasiere 'mich'; genauer: Meine Hand rasiert meine Wangen.) Der moderne Mensch hat eine eigentümliche und wachsende Vorliebe für diese reflexive Form der sprachlichen Darstellung; sie dient ihm besonders dazu, die intransitive (inchoative, mediale) Form der Darstellung, die den Vorgang so läßt, wie er ist, zu verdrängen. (Vgl.: 'Der Vorgang nimmt zu, wird stärker'. Und: Der Vorgang verstärkt 'sich selbst'!) Denn indem die reflexive Formulierung den einheitlichen Vorgang künstlich zerspaltet in Subjekt und Objekt, stellt sie eine, wenn auch bescheidene, kausale Beziehung her, eine scheinbare, wissenschaftlich verwertbare Denkleistung ist vollbracht, der einseitigen und übersteigerten Tendenz des modernen Menschen zur 'kausalen Durchdringung' der Umwelt ist in der Form Genüge getan.

Jedes 'Werden' wird in dieser zersetzenden kausalen Lauge zu einem 'Tun'. Das dynamisch-einheitliche Geschehen des Anwachsens, des Stärkerwerdens, der Zunahme an Intensität usw., oder auch des Abnehmens, des Schwächerwerdens, des Nachlassens, der Abnahme an Intensität usw., wird hingestellt als Ergebnis des wechselseitigen Aufeinanderwirkens zweier Beziehungspunkte (verdinglichter Einheiten, Teilfaktoren), die abwechselnd Subjekt und Objekt spielen: Hier gebiert die Wirkung sogleich wieder in vergrößerter Gestalt ihre eigene Ursache. Der eine Beziehungspunkt läßt die gerade vom anderen erhaltene Verstärkung sofort diesem wieder verstärkt zugute kommen. Dank der 'Wechselwirkung', in die die beiden Punkte so zueinander getreten sind, blähen sie sich gewissermaßen gegenseitig auf bis zum Zerplatzen. Die logische Unhaltbarkeit des Wechselwirkungsprinzips in dieser Form fiel bereits *Schopenhauer* (zit. *E. Wentscher* 1921 p.222) auf.

Nimmt ein Vorgang an Intensität ab, so hat die (dem Vorgange untergeschobene) „Kraft“ „sich selbst Widerstände geschafft“; nimmt ein Vorgang dagegen an Intensität zu, so hat die „Kraft“ „sich selbst günstige Bedingungen geschafft“. So sieht z. B. *Passarge* (III. 1920, p.520; *Pet. Mitt.* 1919 p. 41 ff.) in dem natürlichen Abklingen der Ausgleichsvorgänge einen Kampf der „abtragenden Kraft“ ('Kraft' hier animistisch als selbständig handelndes und leidendes Wesen gedacht, das nach Beendigung des Ausgleichsvorgangs zwar 'ermattet' ist, aber zur Aufrechterhaltung des 'Gleichgewichtes' noch 'da' ist!) mit Widerständen, die sie sich im Verlaufe des Kampfes selbst schafft, nach dem Prinzip der Selbstschwächung. Die Tatsache, daß einer voll ausgebildeten Zykone eine relative Selbständigkeit und Dauer zukommt (*A. Wegener*, *Met.Zs.* 1921 p.154; vgl. *Free* 1911 p.86 über Wirbelwinde: „The spiral

motion, once started, tends to maintain itself“) wird von *Jessen* (Pet. Mitt.1922) umgedeutet in ein perpetuum mobile, das „aus sich selbst heraus“ günstige Bedingungen zu seiner Erhaltung schaffe. Die Erscheinung der Selbstdifferenzierung der abschmelzenden Schneedecke wird von *Keidel* (*Stilles Geol.Charakterbilder*.1914) in dieser eigenartigen Weise formuliert: „Man kann sagen, daß sich die Sonnenstrahlung unter allen Umständen schließlich die Bedingungen für die Entstehung des Büßerschnees selber schafft, wenn ihr andere Vorgänge nicht zu Hilfe kommen.“

Die im folgenden zur Darstellung kommenden Theorien unterscheiden sich dadurch, daß nicht mehr eine Kraft, sondern, wie schon gesagt, zwei miteinander in Wechselspiel tretende 'Kräfte' für die Verstärkung bzw. Schwächung verantwortlich gemacht werden. So wird die Dünenbildung von *Behrmann* (1919 p.153f.; die Klammern sind von mir!) hingestellt als das Wechselspiel von Luvwind und Leewirbel; sie übernehmen bei dem Wechselspiel abwechselnd die aktive und die passive Rolle: „Der Wind findet [an dem Anfangshindernis] einen Widerstand, er wird zum Emporsteigen gezwungen [passiv] und läßt den Sand, den er mit sich führt, hinter dem Gegenstande im Windschutze fallen. Dadurch wächst die Erhöhung [aktiv]. Der Wind wird gezwungen, stärker nach aufwärts zu biegen [passiv], er erzeugt hinter dem Sandhäufchen einen Wirbel, einen Konvektionsstrom [aktiv]. Wo Wind und Konvektionsstrom sich treffen, entsteht eine lokale Verminderung in der Geschwindigkeit des Windes, wodurch wieder die Transportkraft herabgesetzt wird und der mitgeführte Sand zu Boden fällt [passiv! Der Konvektionsstrom erdolcht seinen eigenen Erzeuger!]. Der Konvektionsstrom führt von der Rückseite Sand herbei, beide helfen somit an dem Aufbau des Sandhaufens [abwechselnd aktiv und passiv!] ...“¹⁾

¹⁾ Ähnlich schon: G.H.Darwin 1884 p.23: „Sobald ein Korn bei der Reibung über den Boden stecken bleibt (sticks), vergrößert es dadurch die Reibung an dieser Stelle“ usw. (Vgl. die Kritik von H. Ayrton 1910 p.286.) Sokolow 1894 p.107: „Ein an einem Hindernis gebildeter Hügel wird selbst zu einem Hindernis“ usw. Philippson (II,2.1924,p.276) unterscheidet zwar scharf zwischen „gezwungenen“ und „freien“ Dünen, erklärt aber die 'Entwicklung' der letzteren doch mit Hilfe derselben Argumentation: „Denn jeder Sandhaufen ist selbst das Hindernis, an dem sich, wie bei den gezwungenen Dünen, der Sand niederschlägt, so daß jeder Sandhaufen die Tendenz zum Wachstum in sich trägt.“ Siehe auch de Lapparent, *Traité de géol.*⁴ I.1900.p.143; Bertololy 1900 p.27; und die Aufsätze von O.Baschin: Das Anwachsen des Hindernisses „führt zu immer stärkeren Windstauungen (!), infolgedessen zu weiterer Sandablagerung“. Man begreift jetzt, wieso die Weiterentwicklung der dem Winde immer neue „Angriffsflächen bietenden“ Kapillarwellen des Wassers nach der Meinung Baschins „überhaupt theoretisch keine Schwierigkeit bietet“.

Bei den Strudellöchern oder 'Riesentöpfen' der Flußbetten denkt man sich ein ähnliches Wechselspiel: „Ist einmal ein solcher Topf angelegt, so erzeugt er in sich selbst eine spiralförmige Wasserbewegung, die ihn weiter ausschleift.“ (*Philippson* II, 2. 1924. p. 123; nach *J. Brunhes*.) Auch für die äolischen Gesteinshöhlungen nimmt *J. Brunhes* (1903 p. 139) ein Wechselspiel zwischen Sandgebläse und Höhlungsform an. Die auf 'irgendeine Ursache' zurückgehende Anfangshöhlung beeinflusst sogleich aktiv die Wirkungsweise der Sandkörner: „bon gré mal gré (!), le courant qui atteint le trou s'achève en un mouvement tourbillonnaire qui est imposé (!) par la giration dans la cavité. Les grains de sable . . . usent de plus en plus et approfondissent le trou dans lequel ils sont logés . . .“ Logisch noch straffer faßt den Vorgang der 'Schattenverwitterung' in Trockengebieten *J. Walther* (zit. bei *Bach* 1915 p. 30f.): „An den länger feucht bleibenden Stellen entsteht (durch Windausräumung) eine Vertiefung. Je tiefer das Loch ausgehöhlt wird, desto schattiger wird die Stelle, je schattiger aber eine Stelle in der Wüste ist, desto länger hält sich das Regenwasser als Bodenfeuchte. Je weniger verdunstet, desto stärker und desto intensiver wird die Verwitterung am Felsen sein.“ So kommt es dann zu den bekannten Verwitterungsformen. — Für die Pfannen der Trockengebiete bringen entsprechende Selbstverstärkungstheorien: *F. Jäger* (1922 p. 28; vgl. seine Büberschneetheorie 1909 p. 182) und *Passarge* (*Handw. d. Nat.* Bd. 1. 1912. p. 619). Auf Grund des Immer-mehr-Prinzips hat selbst eine flache Anfangsvertiefung nach *Passarge* schon „alle Aussicht“, daß demaleinst eine Pfanne aus ihr wird.

Nach *Huxley* und *Odell* (*Geogr. Journ.* 63. 1924 p. 207—229; zit. *Geogr. Jahrb.* Bd. 40. 1924/25 p. 140f.) wird die Entstehung des sog. Polygonbodens durch eine differenzierte Zerkleinerung des Bodenmaterials vorbereitet. Der Spaltenfrost zertrümmert die Felsflächen der Arktis rasch in größere und kleinere Steine. Wo aus irgendeiner Ursache eine differenzierte Zerkleinerung eintritt, wirkt sie als ein selbstverstärkender Vorgang („self-reinforcing process“), indem mehr Risse und mehr Oberfläche auch immer mehr Wasser bedeuten; und das bedeutet wiederum dann stärkere Frostverwitterung, usw.

Shaler (1895, zit. *D. W. Johnson* 1910 p. 600) legte sich die Entstehung der Strandspitzen so zurecht: Eine „criss-cross action of many waves“ ruft eine Miniaturbucht ins Leben, die, kaum entstanden, schon ihre eigene Weiterbildung in die Hand nimmt. It „heaps up the

Ein Handinhandarbeiten zweier Faktoren liegt scheinbar vor in dem Anwachsen der Strandhaferdünen. (Sokolow 1894 p. 70.) Doch vgl. Kap. „Selbstdifferenzierung“, Schluß: Die Rolle der Vegetation.

fluid, making the stroke a little harder in the center of the tongue and excavating the bottom of the bay still further . . .“ Als „Bucht“ ist sie eben dazu imstande.

Lassen wir das Phänomen der rhythmischen oder das der selektiven Differenzierung einmal aus dem Spiele, so kann die Analyse der Brandungswirkung jedoch zunächst immer nur eine Streckung der Strandlinie ergeben, nie aber eine Neuschaffung von Unterschieden. Dank der Kohäsion des Wassers werden die vorspringenden Spitzen am stärksten angegriffen. Das Steigen des Wasserspiegels im Inneren der Buchten ist eine Begleiterscheinung, die nicht als 'erosionsfähiger Stau' gedeutet werden darf. Bei den selektiv bedingten Abrasionsbuchten erklären sich die Krümmungen zunächst aus dem ungleichen Widerstand der Küste; doch hört auch hier der Vorgang der weiteren Vertiefung der Bucht schon auf, wenn eine Krümmung erreicht ist, „bei der die Wellenkraft am ganzen Ufer im Gleichgewicht steht“. Denn Höhe und Geschwindigkeit sowie die Kraft der Abrasionswelle verringern sich nach dem Inneren der Bucht hin. (*Philippson* II, 2. 1924. p. 294.) Von 'Selbstverstärkung' ist also keine Rede. — Auch für die Düne gilt als *ceterum censeo* zunächst: Der Wind ist 'nivelleur'! d. h. er ist bestrebt, alle Erhebungen zu erniedrigen und zu beseitigen. In der Tat erfährt eine künstlich aufgebaute Düne dieses Schicksal. (Vgl. die Versuche von *Sokolow* 1894 p. 175, vgl. p. 61f.; *B. de Beaumont*, zit. *S. Günther* ²II. 1899. p. 616.) Und wie eine vorweggenommene Entgegnung auf die *Behrmannschen* Argumente spricht es *Solger* (1910 p. 25) geradezu aus: „Denn hat sich auch einmal eine vorübergehende Sandhäufung gebildet, so wird sie doch, eben weil sie über die Umgebung herausragt, rascher angegriffen als diese und daher meist bald wieder zerstört. Sicher aber vernichtet sie der erste große Sturm.“ „Man kann auch wohl zuweilen an größeren Sandanhäufungen, die sich auf den kahlen Küstenstreifen bilden, die Entwicklung barchanähnlicher Bogenformen sehen; . . . aber wir müssen dabei immer bedenken, daß es sich hier nur um ganz vorübergehende, nach wenigen Tagen oder Wochen wieder verschwundene Formen handelt“ (Ebda. p. 30). Auch den Wanderdünen fehlt nicht nur die Fähigkeit eines 'Anwachsens aus sich selbst', vielmehr nimmt ihre Sandmasse bei der Wanderung immer mehr ab (Ebda. p. 74); denn sie gehen zurück auf eine 'Hypertrophie' der Sandanhäufung durch Vegetationsarbeit und sonstige bindende Faktoren. — Die unrythmische Selbstentstehung von Dünen, z. B. auf Flußsandflächen, ist noch nie beobachtet worden. Und selbst bei der rhythmischen Herausdifferenzierung der echten Dünenbildungen erinnert nichts an eine 'Selbstverstärkung'. Vielmehr kommt es hier schon nach kurzem 'dynamischen Verlauf' (*W. Köhler*) zur Ausbildung dauernder 'Arbeits-

formen', in denen sich ein 'stationäres Geschehen' auswirkt. So betont *Arbenz* (Karrenbildungen. Dt. Alpenztg. 1909/10 p. 226), daß die kleinen Rillen an den Wänden der Karrenrinnen stets dieselbe Form beibehalten und sich nie weiter vertiefen; d. h. die Abtragung erfolgt gleichmäßig, sowohl in den kleinen Rinnen wie an den zwischenstehenden feinen Grätschen.

Wir sahen, wie der Kausalitätstrieb bemüht ist, in den Anfang jeder ansteigenden bzw. absteigenden Verlaufskurve eine Wechselwirkungsbatterie einzubauen, auf deren Wirkung dann der anschließende Verlauf zurückgeführt wird. Entsprechend sucht man auch den wogen- den Fluß des rhythmischen Differenzierungsvorganges substanzialistisch zu zersetzen, indem man das dynamische System (die 'physische Gestalt') zum 'Kampf ums Dasein' für sich bestehender, in einer toten Bettsubstanz verteilter Individuen entwertet. Den 'Kampf' denkt man sich genährt von der allgemeinen Wachstumstendenz dieser Individuen (minimalen Abweichungen), und die Richtung der Entwicklung, das Ergebnis des 'Kampfes' glaubt man bestimmt durch vorgebildete minimale Begünstigungen unter den Individuen. In diesem Sinne behauptet das '*Ostwaldsche Gesetz*', daß 'das Große auf Kosten des Kleinen wachse'. Das mit einem anfänglich geringen Vorteil ausgerüstete Individuum vermag also diesen Vorteil im Kampfe zu vermehren und bleibt so mit wenigen Konkurrenten als Sieger auf dem Kampfplatz. Das *Darwinsche* Ausleseprinzip²⁾ verbindet sich hier mit dem *Behrmannschen* Selbstverstärkungsprinzip. „... they increase in size and advantage at the expense of those which began the contest(!) with but a slightly less favorable chance.“ (*D. W. Johnson* 1910 p. 620f.)

Soweit das *Ostwaldsche* 'Gesetz' mehr sein will als eine, zwar prägnante, aber doch ganz grobe und oberflächliche Beschreibung des Differenzierungsvorganges, müssen wir es ablehnen. Es läßt uns selbst über die Grenzen und den Grad seines Gültigkeitsbereiches ganz im unklaren; es sagt nichts aus über Aufhören oder Ausbleiben des Vorgangs, über das Verschwinden minimaler Anfangsbegünstigungen, die, wie bei den geomorphologischen Phänomenen häufig, auf Unregelmäßigkeiten der 'physischen Topographie' zurückgehen und somit aus dem Differenzierungsplane mehr oder weniger herausfallen. Seine Formulierung macht den Eindruck des Unbedingten, des Gesetz-mäßigen, des Zwangs-

²⁾ Nach ihm sollen, wie bekannt, 'zufällige' oder durch äußere Umstände auftretende minimale Vorteile bereits per se den Keim zu immerwährender Steigerung und schärferer Ausprägung in sich tragen. Heute wissen die Biologen, daß dieser Gedankengang zwar dem naiven Denken geläufig ist, daß er tatsächlich aber sowohl die erstmalige Entstehung als auch die volle Entwicklung des 'geeigneten' Merkmales unerklärt läßt.

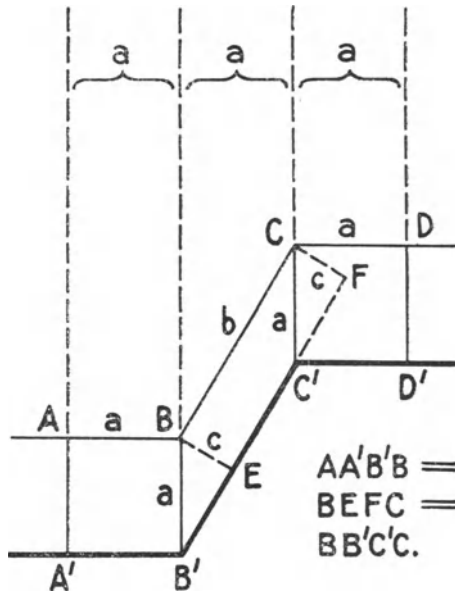
läufigen und Logisch-Selbstverständlichen; und so wird die 'Beschreibung' leicht zur 'Erklärung' erhoben. (Vgl. z. B. *W. Köppen* 1920: Strukturbodentheorie; *Passarge* 1912 p.25: Flußnetztheorie.) Der Tatbestand, für den das *Ostwald'sche* Gesetz den kürzesten Ausdruck sucht, ist folgender:

1. Die zu Beginn des Differenzierungsvorganges auftretenden Begünstigungen werden fortgesetzt und verschärft. Was einmal größer ist, bleibt es und wird es noch in stärkerem Maße. Hat sich einmal ein Keim (z. B. ein Kristall) gebildet, so ist sein Weiterwachsen nach dieser Regel selbstverständlich. Der Differenzierungsplan liegt mit anderen Worten bereits nach dem ersten tastenden Einsetzen des Vorganges fest; die Weiterentwicklung vollzieht sich planmäßig in den vorbestimmten Bahnen.
2. Weiteres Wachstum schafft Umgruppierungen, Übergänge einer Vielheit kleinerer Differenzierungsglieder zur Oligarchie von wenigen großen.

Im Gefolge des an sich unverdächtigen Begriffes der 'Labilität' hat sich der Selbstverstärkungsgedanke ebenfalls Eingang zu schaffen gewußt. Labilität besagt zunächst nur das Überflüssigsein eines besonderen Anstoßes zur Herbeiführung der für den Eintritt eines Vorganges notwendigen Konstellation; das Geschehen läuft unter diesen Umständen 'von selbst', d. h. ohne einen vorhergehenden Anstoß (besser: schon auf einen minimalen Anstoß hin) ab. Da nun der Erklärungstrieb des naiven Denkens vorzugsweise auf die Auffindung des (möglichst dinghaften) 'Anstoßes' gerichtet ist, der als 'Ursache', wie man meint, den Vorgang selbst 'tut' oder 'bewirkt', so scheint hier bei fehlendem 'Anstoß' der Vorgang gewissermaßen ganz 'ursachelos' zu verlaufen. Diesen eigenartigen Zustand, bei dem auf dem Wege der 'Selbstverstärkung' aus der Ruhe eine Bewegung buchstäblich 'von selbst' herauszuwachsen scheint, nennt man dann 'Labilität' oder 'Instabilität'. Nach *F. M. Exner* (1920 p.930) ist die Grenzfläche zwischen Wind und Wasser instabil insofern, als die geringsten Unebenheiten Schwingungen erzeugen (!), und die dadurch entstehenden größeren Unebenheiten ihrerseits diese Schwingungen verstärken. *H. Blasius* (1910 p.466) führt das Auftreten wechselständiger Geschiebebänke in geraden Flußläufen auf eine „Instabilität der ebenen Sohlenform“ zurück. „Eine zufällige Störung (!) der ebenen Sohle muß eine derartige Störung der gleichmäßigen Strömung hervorbringen, daß die von deren Geschwindigkeitsverteilung abhängige Sandbewegung eine Vergrößerung (!), Ausbreitung und auch Wanderung der ursprünglichen Störung zur Folge hat.“ — Oft zeigt jedoch der Zusammenhang, daß nur eine laxe und dadurch leicht mißverständliche sprachliche Formulierung vorliegt, die physi-

kalische Grundanschauung jedoch einwandfrei ist. So läßt *Barkhausen* (Handwbt.d.Nat.8.1913.p.1147f.) die Schwingungen sich „von selbst verstärken“; bei den Orgelpfeifen (Ebda.p.1151) soll der durch die Anfangsschwingung (passiv) „hineingebogene“ Luftstrom eben hierdurch (aktiv) das Strömen ins Innere verstärken.

Unsere Behauptung, daß der Gedanke der 'Selbstverstärkung' in den verschiedensten, und zwar allgemein anerkannten, morphologischen Theorien eine wichtige, aber verborgene Rolle spielt, soll nun noch an einigen besonders auffallenden Beispielen dargelegt werden. Wir werden



dabei die Feststellung machen, daß alle Theorien ungefähr von denselben logischen Sophismen Gebrauch machen.

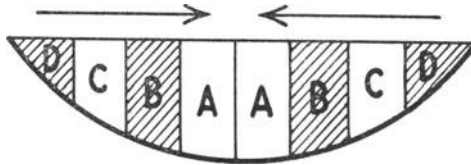
Die *Keidelsche* BÜßerschneetheorie (1909/10p.126) wird von *Klute* (1914/15 p.305) und anderen ohne Vorbehalt übernommen und von *C. Schoy* (1914 p.211) physikalisch weiter ausgebaut. *Keidel* läßt eine Vertiefung im Schnee von der Form einer Kalotte senkrecht zur Schnittfläche direkter Sonnenstrahlung ausgesetzt sein. Er erinnert sich ferner aus der Physik, daß die senkrecht zur Strahlungsrichtung eingestellten Flächen eines Körpers stärker erwärmt werden als die schräg eingestellten. Folglich wird die Ablation, so schließt *Keidel* scharfsinnig,

auf dem Boden der Kalotte größere Fortschritte machen als an den Rändern: Die anfangs noch flachschüsselige Form erfährt eine fortschreitende Vertiefung. Der Widerlegung wollen wir die geometrische Darstellung der Schmelzwirkung auf eine geneigte Oberfläche BC und zwei anstoßende Oberflächen AB und CD zugrunde legen, die alle von gleich starken Strahlenbündeln getroffen werden. Das „Maß der Ablation“ (*Keidel*) für BC ist dann, je nach der Einstellung des Betrachters, c oder a. *Keidel* übersieht nun, daß das Maß der Ablation für BC nicht senkrecht zu dieser Strecke, sondern in der Richtung der Strahlungseinwirkung gemessen werden muß, d. h. ebenfalls den Betrag a erreicht. Das bedeutet aber, daß die Kalotte während des ganzen Schmelzvorganges ihre Form beibehält, wenn nicht Schwerkraftwirkungen sie gar auffüllen. Zu einer weiteren Vertiefung kann es also auf diesem Wege nicht kommen. Jede Theorie, die einen Selbstverstärkungsvorgang statuieren will, verdient schon a priori das Mißtrauen des Morphologen.

Hinter der von *Keidel* versuchten Erklärung der Ostwest-Erstreckung der Schmelzfurchen verbirgt sich derselbe Fehler. Auch hier wird wieder die Bestrahlungsintensität zum Ausdruck bestimmter Formveränderungen genommen. Die Form bleibt jedoch auch hier, wie sie ist, nur verschiebt sie sich im Laufe des Tages unter dem Einfluß der hier in einer ost-westlichen Vertikalebene verlaufenden schief einfallenden Strahlen als solche etwas hin und her. Erst bei der Einwirkung sehr geneigt einfallender Strahlen werden in der Kalotte jeweilig Schattenräume (Hohlraumabschnitte) im Westen und im Osten ausgespart, die in ihrer Summierung allerdings eine ost-westliche Streckung der Form ergeben können, doch nur dann, wenn zugleich der Vorgang der rhythmischen Differenzierung immer wieder für die Vertiefung der Form sorgt.

Die Theorie der Erosionsfurchen tritt uns in der morphologischen Literatur in den verschiedensten Varianten entgegen. Sie sucht den sonderbaren Nachweis zu erbringen, daß eine unendlich flache, mit einem erosionsfähigen Fließmedium angefüllte Einmuldung sich zwangsläufig immer mehr zur Hohlform auswachsen müsse. Der Gedankengang ist folgender: Die Voraussetzungen für das Vorhandensein mehr oder weniger flacher Rinnen sind überall gegeben, „da kein Stück der Erdoberfläche eine mathematische, glatte Fläche ist“. In diesen mehr oder weniger flachen „Urmulden“ gehen nun aber „in der Zeiteinheit größere Gewichte über den Untergrund hinweg als in der Umgebung“. (*Walther Penck* 1920 p.90; ähnlich *Mortensen* 1921 p.5: über Rinnen in den Zuwachsriffen; *P. Arbenz* 1913 p.6: „erste Anlage“ > „immer mehr“.) Und nun schließt

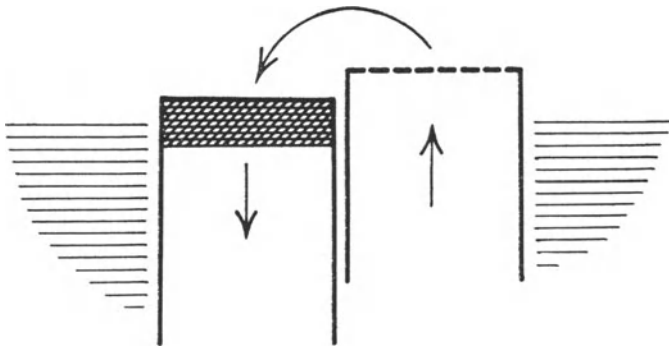
man streng logisch weiter: „Die Konzentrierung (!) des Gewichtes zieht notwendig (!) Verstärkung der mechanischen Beanspruchung des Untergrundes nach sich . . . Es entsteht eine Furche . . .“ (Ebda.). — Es ist nicht leicht, gegen diese Logik anzugehen. Versuchen wir zunächst, uns die zugrundeliegende Vorstellung etwas zu verdeutlichen. Zu diesem Zwecke denken wir uns den Querschnitt des erodierenden Fließmediums in senkrechte, gleichbreite Abschnitte zerlegt (siehe Fig.!), die wir mit Hobeln verschiedener Stärke vergleichen können. Es ist nun augenscheinlich, daß die mittleren höheren und schwereren Hobel mehr Arbeit leisten als die seitlichen. Die Folge ist, daß sich die Mulde 'immer mehr' vertieft. Umso mehr noch bei einem Fließmedium, wo der obere Rand der betr. senkrechten Abschnitte durch Zufluß von den Seiten her immer auf gleiche Höhe gehalten wird, wo also zugleich eine Selbststeige-



ung der Arbeitsfähigkeit der Abschnitte nach der Mitte hin stattfindet. Dem Querprofil des Fließmediums (und mit ihm der Erosionsfurche) würde man also die 'Tendenz' zuschreiben können, immer schmäler und tiefer, und an den Flanken immer steiler zu werden. Zu einem Kompromiß (sog. Gleichgewichtsprofil) würde es in der Natur nur deshalb kommen, weil die Hänge in der Regel nicht standfest sind und nachrutschen, die Schwerkraft also dieser Tendenz entgegenarbeitet. — Schade ist nur, daß man mit Hilfe derselben zwingenden Logik die zwangsläufige Verflachung einer tiefen Fließfurche auf dem Wege der Selbstschwächung dartun kann. Das ständige „Hingerissenwerden des losgelösten Ufermaterials zur Mitte hin“ würde sich in dieser Beweiskette noch viel besser ausnehmen. Man würde darauf hinweisen, daß das Fließmedium normalerweise ein geringeres spezifisches Gewicht habe als das Lagermedium, daß dieses also das Bestreben habe, das Fließmedium aus der unteren Zone der Rinne zu verdrängen, wodurch dessen Ausbreitungsform dann immer flacher und breiter werde, dies umso mehr, als in demselben Maße auch seine Erosionsfähigkeit nachlassen würde. — Nach *Herm. Wagner* (Lehrb. ¹⁰I,2 p.332) ist der Vorgang der Furchenbildung „leicht zu erklären“. Das erklärt sich leicht daraus, daß er mit sprachlichen Sophismen

operiert. Dadurch, daß er die Erosionsarbeit auf die „Sohle“ beschränkt, diese aber durch Zugrundelegung eines V-förmigen Querschnittes auf einen Punkt reduziert, erreicht er natürlich eine beständige Vertiefung dieser anfänglich wohl unendlich flachen V-Form. — Die einzige furchenbildende Kraft, die tatsächlich unter normalen Verhältnissen in Betracht kommt, ist, wie wir an anderer Stelle zeigen, die 'Tendenz zum Minimum der inneren Reibung' usw.

Auch hinter der *Duttonschen* Theorie der 'Isostasie' verbergen sich Selbstverstärkungs-Gedankengänge insofern, als die zu dem Abtragungsvorgang notwendigen Niwounterschiede durch den Vorgang selbst beständig erneuert werden. Wir erhalten so etwa das Bild einer Standuhr, die sich 'von selbst' aufzieht (siehe Fig.!). „Die belastete



ozeanische Kruste sinkt immer tiefer (!) ein, das entlastete Festland steigt, aber nicht ins Unendliche (!), da die zerstörenden exogenen Kräfte dem stets entgegenarbeiten.“ (*Supan* 1916 p.378; richtiger: *A. Sieberg* Aufbau u. physikal. Verhältnisse d. Erdkörpers usw. Geol. Rdsch. 12. 1921.) Das zu Beweisende wird auch hier schon in die 'Voraussetzung' mit aufgenommen: „Denn eine massenhafte Abtragung von Gesteinsmaterial, wie sie hierbei in Frage kommt, setzt bereits ausgedehnte, relativ höher gelegene Landschollen voraus und ebenso ausreichend tiefe Becken zur Aufnahme der abgetragenen Massen.“ (*Herm. Wagner*, Lehrb. ¹⁰I,2.1922.p.300.) Auf die Erklärung der „ersten Ursachen von hoch und niedrig im Bereich der starren Erdoberfläche“ ist die Theorie der Isostasie also keinesfalls anwendbar. — *Trabert* (Lehrb. d. kosm. Physik. Lpz.1911.p.653) läßt die Ozeanbecken dadurch entstehen, daß die sie tragende Säule infolge Abkühlung durch das überlagernde Wasser stärker kontrahiert wird als unter den Kontinenten. Dies hat

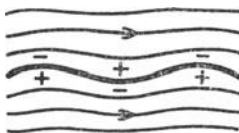
nach ihm zur Folge, daß der Boden der Ozeanbecken relativ zum Lande immer weiter(!) sinkt, die Becken also immer mehr(!) eingesenkt werden. *R. Schwinner* (Zs.f.Vulkanol.5.1919/20.p.224) weist bereits darauf hin, daß eine solche Anschauung im Widerspruch zum 2. Hauptsatz der Thermodynamik stehen würde.

Mit der Theorie der Wasserwellen hat das Selbstverstärkungsprinzip sogar seinen Einzug in die theoretische Physik gehalten. Es führt eine Linie von *Helmholtz* („Die Energie der Wellen“. Verh. phys.Ges.1889 p.74) etwa über *L. Prandtl* (1913 p.123) zu *Alb. Einstein* (Elementare Theorie der Wasserwellen und des Fluges. Die Naturwissenschaften.4.1916.p.509f.) Man glaubt zeigen zu können, daß eine unendlich schwach gewellte Begrenzungsfläche beim Vorbeiströmen eines Mediums sich zwangsläufig zu einer stärker gewellten Begrenzungsfläche ausbilden müsse. Der *Helmholtz*sche Gedankengang (wie er in seinen Originalaufsätzen vorliegt, nicht, wie er uns aus dritter Hand dargeboten wird) ist folgender: „Hoch aufgetriebene Wasserwellen haben immer schmalere, stärker gekrümmte Wellenberge und breitere, flacher gekrümmte Täler“ (a.a.O.p.68). Eine solche Begrenzungsfläche ist als Stabilitätsform zu werten. Wo diese Begrenzungsform nicht angetroffen wird, wo sie etwa noch ebenflächig ist, besteht „die Neigung, unter Mitwirkung all der kleinen Störungen, welche die mitlaufenden anderen Wellen in der Wirklichkeit erzeugen, der Form geringster Energie zuzustreben“. (Berliner S-B.1890.II.p.870.) *Helmholtz* versucht nun nachzuweisen, daß die angegebene Form tatsächlich eine „Stabilitätsform“, eine „Form geringster Energie“ ist. Er läßt deshalb an ihr eine Flüssigkeit vorbeiströmen und stellt fest, daß in der Grenzzone dann die Fließgeschwindigkeit an den Ausbuchtungen geringer, in den Einbuchtungen dagegen größer ist. Da nun im vorliegenden Falle „die räumliche Ausdehnung der Teile mit verminderter lebendiger Kraft, welche in die Erweiterungen fallen, größer ist als die der Gebiete mit vermehrter Geschwindigkeit in den Verengungen, deshalb überwiegt in der Gesamtsumme der lebendigen Kraft die Verminderung.“ (Verh.phys.Ges.1889 p.74.) Der „Energievorrat“ bei solcher Strömungsform ist also geringer als bei anderen möglichen Strömungsformen, und es gehorchen infolgedessen alle „instabilen“ Strömungsformen der Tendenz zur Annäherung an diese Stabilitätsform.

Der hohe Wert der *Helmholtz*schen Theorie besteht in der Auffassung der Wellen als thermodynamische Stabilitätsform, und in der Vermeidung lokal-kausaler Gedankengänge. Die offensichtliche So-

phistik, auf der seine Theorie im übrigen aufgebaut ist, wird man als das psychologisch verständliche Bestreben werten, eine Lücke in der Erkenntnis eines Phänomens formal auszufüllen, um den logischen Bedürfnissen des unzufriedenen Intellekts eine vorläufige Befriedigung zu bieten.

Auf eigentliche Selbstverstärkungs-Gedankengänge stoßen wir erst bei den Interpreten der *Helmholtz*schen Theorie. *Prandtl* (a.a.O.) verfolgt ebenfalls mit Hilfe der Methode der kleinen Schwingungen die Möglichkeit des Anwachsens von Wellen zwecks Annäherung an eine stabile Strömungsform und kommt zu folgendem Ergebnis: „Ist eine schwach gewellte (!) dünne Wand in einer Flüssigkeitsströmung vorhanden, vgl. Fig.48, so stellt sich in den hohlen Teilen erhöhter Druck



Prandtl a. a. O. p. 123 Fig. 48.

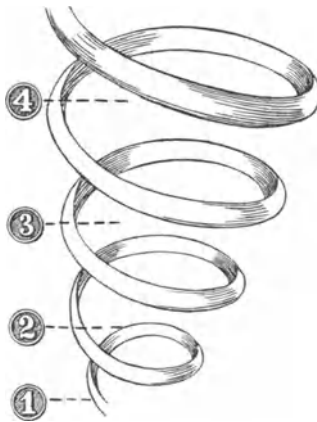
ein, in den erhabenen Unterdruck. Die Flüssigkeitsströmung sucht demnach die Durchbiegung der Wand zu vergrößern (!). Das Flattern der Fahnen hat hierin seinen Grund.“ Trennungsflächen sind also nach *Prandtl* ganz allgemein instabil.

In fast wörtlicher Übereinstimmung mit *Prandtl* entwickelt *Albert Einstein* (a.a.O.) seine „elementare Theorie der Wasserwellen“. Auch bei ihm „strebt die Flüssigkeit die vorhandenen Ausbiegungen der Wand zu vergrößern“. Auch er weist auf das Flattern der Fahnen hin.

Es ist in den seltensten Fällen möglich, eine Theorie vollständig abzulehnen. Immer wird es ein Gebiet geben, für dessen Geschehen die Theorie mehr oder weniger adäquat ist; und der zur Last gelegte Irrtum besteht dann nur in der Überschreitung des Anwendungsbereiches der Theorie. Die Analyse der Wirklichkeit liefert in der Tat Material, das sehr stark in die Richtung der Selbstverstärkung weist. Oft ist es auch eine neue spezifische Betrachtungsweise, die der neuen Theorie, selbst wenn sie in dieser Form widerlegt wird, doch einen methodischen und heuristischen Wert verleiht. „Der Menscheng Geist würde ja auch nicht leicht die Energie zu irgendwelchen willkürlichen Konstruktionen aus sich hernehmen, wenn ihn nicht ein unklar geschautes wirkliches Sein dabei leitete.“ (*W. Frost* 1910 p.238.)

Der gültige Anwendungsbereich des Prinzips der Selbstverstärkung sind nicht einfache physikalische Systeme, sondern höhere Beziehungskomplexe. Durch Veränderungen an Gliedern eines Beziehungskomplexes wird dieser als Ganzes mitbeeinflusst; das Ganze wirkt umgekehrt hemmend oder fördernd auf die Teiglieder ein. Die wechselseitigen Beeinflussungen summieren sich dann zu einer Steigerung; die 'Wirkung' ist größer, als die verhältnismäßig geringfügige 'Ursache' es erwarten läßt.

So versucht die Reklame einer Zigarettenfirma („Die Wochenschau“, Düsseldorf, 21. Nov. 1926) die vorzügliche Qualität ihrer Zigarette so zu begründen: „1. Die Ware ist gut — der Umsatz steigt. 2. Der Umsatz steigt — die Ware wird besser.



3. Bessere Ware bringt größeren Umsatz, 4. und größerer Umsatz noch bessere Ware.“ Dadurch, daß die durch die große Produktion erzielten Ersparnisse immer wieder zur Verbesserung der Ware benutzt werden, entsteht ein „Kreislauf wirtschaftlicher Vorgänge“. Zwischen der 'Qualität' und dem 'Umsatz' der Ware bildet sich eine Wechselwirkung heraus. Da nun das Ergebnis des 'Kreislaufes' oder der 'Wechselwirkung' eine 'Steigerung' ist, so erhalten wir das Bild eines spiralförmig aufgebobenen Kreises oder einer sich erweiternden Zickzacklinie, bei mehrfacher Wiederholung das Bild einer Schneckenhaus-Spirale (siehe Fig.!) oder einer immer weiter ausholenden Zickzacklinie. Diese beiden Figuren geben also graphische Symbole ab für

eine Entwicklung vom Unendlich-Kleinen zum Unendlich-Großen. Doch kann jeweils nur ein stark beschränkter Ausschnitt aus diesen Figuren als Abbild der Wirklichkeit gelten.

Man kann sagen: Weil ich kein Geld in der Tasche habe, deshalb ist mein Gesamtbefinden schlecht; weil mein Befinden schlecht ist, deshalb ist auch meine Arbeitsleistung und meine Verdienstmöglichkeit verringert. — Damit ist aber auch alles gesagt. Der Zusatz „und so weiter“ ist unzulässig. Wir dürfen uns nicht von der primitiv-mechanistischen Struktur des sprachlichen Denkens gängeln lassen (Wenn —, so —, ist einmal —, dann —; usw.), dürfen nicht das Selbstverstärkungsschiffchen beliebige Male hin- und hersausen lassen, also etwa „in infinitum“! Die Beziehung ist mehr als statische Spannung zu denken, und das Maß der Steigerung ist zwar im einzelnen Falle durchaus verschieden, ist aber doch begrenzt und in etwa bestimmbar.

Was die Lebenskurve des Fatalisten und Optimisten über dieses Gesetz hinaustreibt, ist nicht 'Selbstschwächung' oder 'Selbststeigerung', sondern eine Wirkung des hier noch hinzutretenden ungehemmten Vernichtungs- bzw. Glückswillens. Gerne ergeht sich die Phantasie in Selbstverstärkungsträumen, die jedoch in der Wirklichkeit alle das Schicksal der bekannten Milchmädchenrechnung (*Lafontaine*) finden. Ebensovienig kategorische Geltung hat in unserer Wirklichkeit zum Glück der Satz: Ein kleiner Fehltritt von der rechten Bahn steigert sich bis zum rettungslosen Versinken im Laster!

Wir sahen, daß die Schrumpfkurve des Geldbeutels steiler wurde, sobald andere Teile des zugehörigen Komplexganzen, und mit ihnen das Ganze selbst, auf diesen Vorgang hin ihrerseits reagieren. Die Reaktion des Komplexganzen kann auch in der Auslösung eines neuen, bisher noch ganz unwirksamen Faktors bestehen. Jemand hat sich z. B. angewöhnt, täglich an bestimmter Stelle den Parkrasen zu überqueren. Nach gewisser Zeit ist das Gras so weit niedergetreten, daß sich auch in anderen Leuten die Vorstellung bilden kann: „Das ist ein Weg.“ Von da ab wird die Kurve der Wegausbildung jäh ansteigen. *Behrmann* würde hier sagen: Der Vorgang geht ganz von selber weiter, indem er sich selbst günstige Bedingungen zu seiner weiteren Steigerung schafft. — Bei chemischen Reaktionen treten zuweilen explosionsartige Vorgänge auf, die ihrerseits den Gesamtprozeß beschleunigen. — Die in unserem Klima nur geringe Dissoziation des Wassers vermag bei den 'Felschüsseln' auf Granit doch große Wirkungen zu erzielen, da durch die Umsetzung der Mineralien selbst stets wieder neue Spaltung hervorgerufen wird. (*P. Keßler* 1921 p.252.) Größere Dünen vermögen Feuchtigkeit kapillar zu halten und erwerben sich damit erhöhte Festigkeit (*Sölch* 1914 p.192) und die Möglichkeit weiteren

Wachstums in bestimmten Grenzen. Umgekehrt macht bei den zählbaren Dauergebilden der sog. „morphologischen Restformen“ (*B. Brandt* 1922) die Zerstörung nur langsame Fortschritte dadurch, daß diese immer trockener, quellärmer und bachloser und somit relativ unangreifbar werden für die mit Wasser arbeitenden Kräfte. Räumliche Differenzierungen sterben ab: Die Erosion wird diffuse und schwächt sich durch Verzettlung ihrer Angriffsstellen. Nach *Häberle* (1915 p.276) und *P. Kessler* (1921 p.262) macht sich an isolierten Felstürmen, an freistehenden Pfeilern meist ein Fehlen frischer Verwitterungsformen (z. B. Steinwaben) bemerkbar, während ältere verwaschene fast allenthalben zu beobachten sind. Der Gesteinskomplex und mit ihm das Einzugsgebiet des meteorischen Wassers, das die Verwitterung von innen heraus regelt, darf anscheinend einen gewissen unteren Größenwert nicht unterschreiten. — Die Abtragung eines Gebirges schlägt ein langsames Tempo ein, wenn es nicht mehr als Regenfänger wirkt.

In gewissen Fällen schließt schon die entstandene Abweichung von der Mittellage der Umgebung besondere Vorteile bzw. Nachteile in sich und treibt so als neu hinzugetretener Faktor den Vorgang noch ein Stück weiter. Besitzt jemand z. B. von Natur Redetalent und sprachliche Gewandtheit, durch die er sich in seinem Kreise vorteilhaft hervortuen(!) kann, so wird er oft und gern plaudern und Anekdoten und Scherze erzählen. Tut er dies aber erst einmal, so wird dadurch sein Talent wiederum noch gesteigert werden. Umgekehrt geht es dem Wortkargen, der leicht zu einem Verschlusenen oder in der Rede Schwerfälligen werden kann. (*W. Frost* 1910 p.148.)

Ein Unglück kommt selten allein. Wo Tauben sind, fliegen Tauben zu; wo Leute sind, kommen Leute hin. Wer ziemlich viel Geld hat, wird bald unverschämt viel Geld haben. Bemühe dich nur um den ersten Orden, die weiteren finden sich schon von selber ein! Solche Beispiele lassen sich je nachdem als Steigerungs- oder als Häufungsphänomen (Knäuelungsphänomen) auffassen. So weist der Brauch des Heckpfennigs, der nie im Beutel fehlen darf, deutlich auf die Bedeutung des 'Ansatzkernes' für die Haufenbildung hin. Andererseits ist man berechtigt, hinter der Häufung von Unglücksfällen letzten Endes eine 'Steigerung' zu suchen: Die gestörte Seelenverfassung, das geschwächte Selbstgefühl, das linkisch und zaghaft gewordene Verhalten zieht weiteres Unglück herbei.

Das Selbstverstärkungsprinzip gehört in die Reihe der Versuche, unter Umgehung der zu bedächtigen und zu verwickelten Methode der zünftigen Wissenschaft, schon mit Hilfe der allerersten und noch ganz

formalen Rohanalyse des Naturgeschehens unmittelbar zu allgemeinen 'Prinzipien' und 'Gesetzen' zu gelangen. Im Weltgeschehen wechseln Häufungen mit Leeren: Also gibt es ein „Gesetz der Serie“ (*Kammerer*). Manches Geschehen verläuft in wellenartigen Kurven: Also gibt es ein universales „Gestaltungsgesetz“, das auf die Herstellung von Wellenformen abzielt (*O. Baschin*). Die Verlaufskurve fast jedes Geschehens steigt erst flach, dann steil an: Also gibt es ein „Prinzip des Anwachsens durch sich selbst“ (*Behrmann*).

Ist auch von hier bis zu den wirklichen 'Prinzipien' und 'Gesetzen' noch ein weiter Weg, so kommt ihnen doch insofern eine gewisse methodische Bedeutung zu, als eine neue spezifische Betrachtungsweise sich in ihnen ans Licht wagt. Im vorliegenden Falle: das Studium der Verlaufskurven. Die anderen Naturwissenschaften sind bereits diesen Weg gegangen. Während z. B. die ältere Chemie an den Reaktionen nur den Anfangs- und Endpunkt beachtenswert fand, pflegt heute namentlich die physikalische Chemie den chemischen Prozeß wirklich als einen 'Prozeß', als einen zeitbeanspruchenden Vorgang in seiner Totalität ins Auge zu fassen. Manche chemischen Reaktionen „beschleunigen sich selbst“, d. h. sie fangen mit kleinen Geschwindigkeiten an, vergrößern ihre Geschwindigkeit bis zu einem Maximum, um dann allmählich abzuklingen. Der Chemiker spricht hier von „autokatalytischen Vorgängen“. Die sich selbst beschleunigenden Vorgänge, die nicht von chemischen Umsetzungen begleitet sind, werden nach dem Vorschlage von *Wi. Ostwald* (Über die zeitlichen Eigenschaften der Entwicklungsvorgänge. — Vortr. u. Aufs. üb. Entwicklungsmechanik. Heft 5. Lpz. 1908; vgl. *W. Roux* 1912 p. 35) allgemein als „autokinetische Vorgänge“ bezeichnet. — Im Gegenteil zur älteren Geologie und zur *Davisschen* Schule, die ihre Überlegungen an das Endergebnis von Krustenbewegungen anzuknüpfen pflegte, zeigt *Walther Penck* (1922), daß man erst durch eine Verfolgung des „Intensitätsganges und Ablaufs“ der Krustenbewegungen zu einer richtigen Beurteilung der Formen gelangt. Viele Krustenbewegungen verlaufen nicht ruckweise, sondern stetig, und die jeweilige Intensität der Bewegung prägt sich entsprechend morphologisch aus. Nimmt die Intensität zu, spricht man von „aufsteigender“, nimmt sie ab, von „absteigender“ Entwicklung. In der Regel setzt der Vorgang langsam ein, um später rasch an Intensität zu gewinnen. „Beginnt ein Krustenteil emporzusteigen, so passiert er zunächst stets Stadien beliebig langsamer Hebung.“ Die Erscheinung des sog. „Primärrumpfs“ wird von *W. Penck* hierauf zurückgeführt. Nach *Philippson* (II, 2. 1924. p. 382f.; p. 336f.; II, 1. 1923. p. 10f.) ist jedoch die Intensitäts-

steigerung hier nur eine Eigentümlichkeit des Anfangsstadiums. Sie erklärt sich daraus, daß der Vorgang zunächst Anfangshemmungen zu überwinden hat und sich erst allmählich zu seiner vollen Stärke auswächst. Ist dies Anfangsstadium aber einmal überwunden, so verlangsamt sich der Vorgang beständig, bis er schließlich ganz aufhört. Denn jeder 'Ausgleichsvorgang' räumt in seinem Verlaufe seine eigenen Ursachen fort. Hebungen sind aber nichts anderes als Ausgleichungen von Störungen im Erdinnern. Also tritt an die Stelle der 'Selbstverstärkung' hier sehr bald die 'Selbstschwächung' des Vorganges. In dem Maße aber, wie sich der Vorgang verlangsamt, wird auch die Abtragung gegen das Ende hin immer mehr über die Hebung Herr werden, d. h. wir erhalten keinen 'Primärumpf', sondern einen 'Endrumpf'.

Wenn die Verlaufskurve des Anfangsstadiums der verschiedensten geomorphologischen Vorgänge im Groben genommen eine solche Übereinstimmung zeigt, so ist dies eine — allerdings bemerkenswerte — 'Regel', die jedoch als formal übereinstimmende Auswirkung der verschiedenartigsten 'Gesetze' zu fassen ist. Wenn z. B. eine, einem konstanten Druck ausgesetzte, Eismasse zunächst nur sehr langsam und schwer, von einem bestimmten Stadium an aber schneller und leichter deformiert wird, so geht dies lediglich darauf zurück, daß zunächst die elastischen Kohäsionskräfte des Eises zu überwinden waren. „Once flow is initiated it proceeds rapidly and continues under pressures much lower than those required to overcome the elastic forces originally existing in the ice structure.“ (*Tarr u. v. Engeln* 1914/15 p.92.) Um einen Vorgang in einem mechanischen System in Gang zu bringen, muß zunächst ein durch Haftspannung und Reibung bedingter 'Anfangswiderstand' überwunden, eine bestimmte 'Empfindlichkeitsschwelle' überschritten werden.

Von weittragendster Bedeutung ist ferner folgendes: Die selektive sowohl wie die rhythmische Differenzierung setzen zunächst nur langsam und zögernd ein, machen dann aber rasche Fortschritte. — Glatte Oberflächen schützen wie ein Schild das darunterliegende Gestein vor den selektiven Angriffen der Atmosphären. Ebenheit ist so mehr als eine geometrische Form, sie ist ein schützender Panzer. Detaillierte Beobachtungen hierzu lieferten *H.W. Ahlmann* (1916) die glazialen Steilküsten von Schonen. Die Widerstandskraft der glattgeschliffenen Oberflächen sowie der größeren Bankungs- und Spaltenebenen gegen Denudation beruht „auf ihrer Ebenheit oder mit anderen Worten auf dem Mangel an Angriffspunkten“. Je größer die inneren Gesteinsunterschiede bzw. die Durchsetzung mit Spaltflächen, umso lebhafter

ist die selektive Reliefbildung an der Oberfläche, umso raschere Fortschritte macht die Abrasion. Die Vermehrung der Angriffspunkte im Verlaufe des Vorganges und die damit verbundene Intensitätssteigerung ist also ein Moment, das bei oberflächlicher Betrachtung als 'Selbstverstärkung' gedeutet werden könnte. „Das schwierigste und wichtigste ist die Erzielung der ersten Bresche oder des ersten 'Geschwürs' in der glazialen Oberfläche. Ist dies einmal getan, so ist die größte Widerstandskraft der geschlossenen, glazialen Form gebrochen, und die weitere Destruktion kann relativ leicht vor sich gehen“ (p.314). Es wird auch hier an Versuchen nicht fehlen, diesen klaren Sachverhalt durch Hineininterpretierung einer 'Tendenz', etwa im Sinne jener berühmten „tactique victorieuse“ der destruirenden Agentien, wieder zu verdunkeln. — Bei der Anlage von Vordünen an Küsten pflegt man auf möglichst gerade Linienführung mit sanften Krümmungen und auf eine möglichst gleiche Höhenlage der Krone zu sehen. „Der Wind findet dann keine besonderen Angriffspunkte und wirkt auf alle Strecken gleichmäßig.“ (Solger 1910 p.398.) Kleine Beschädigungen (z. B. durch ein Schaf, das einen Büschel Heidekraut ausrupft) wachsen sich hier sogleich zu großen aus, weil die schrägen (tangentialen) Komponenten der Windkraft, die sich sonst gegenseitig aufheben, hier in Tätigkeit treten; weitere Momente kommen hinzu. Dasselbe gilt für den Angriff des Wassers auf Dämme und Deiche. — Auch die rhythmische Differenzierung setzt langsam ein und steigert sich dann rasch. So dürfte beim Strukturboden „besonders der erste Anfang der Sortierung eine bedeutende Zeit zu seiner Entwicklung erfordern.“ (B. Högbom 1914 p.317.) Mit fortschreitender Sortierung „werden die Bedingungen für die Arbeitsintensität immer zunehmen, indem der Ausgangspunkt für die Volumveränderungen mehr fixiert und dabei auch die Wasserkapazität der zentralen Partien vermehrt wird.“ (B. Högbom 1910 p.53.) (s. a. Kap. „Rippelmarken“!)

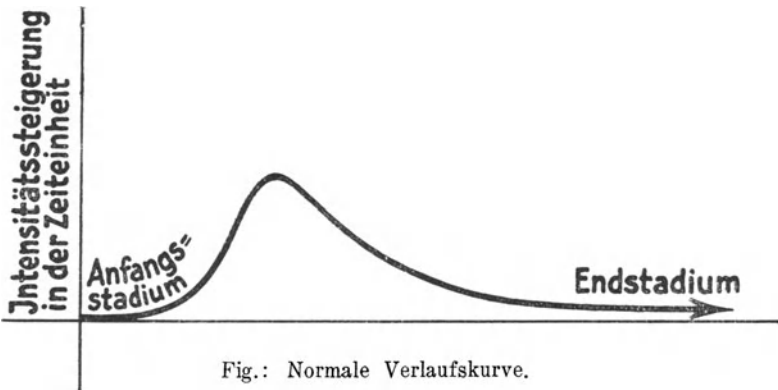
Wir sahen jedoch bereits, daß diese Intensitätssteigerung im wesentlichen auf das Anfangsstadium beschränkt bleibt. Hat der Vorgang einmal seine volle Stärke erreicht, so tritt an die Stelle der allmählichen Beschleunigung eine fortschreitende Verlangsamung des Vorganges bis zu seinem völligen Stillstand. Denn die Vorgänge der Erdoberfläche sind aufzufassen als „Ausgleichungen eingetretener Gleichgewichtsstörungen (Philippon II, 1. 1923.p.10f.). Wir können also von einer allgemeinen 'Tendenz zur Herstellung des Gleichgewichts' sprechen, die sich mit unserer 'Tendenz zur Stabilität' eng berührt. (Vgl. Kap. „Kausalproblem“.) Nach dem *Le Chatelierschen* Gesetz erzeugt jede Änderung eines physikalischen oder chemischen Gleichgewichtszustandes einen

Widerstand, der die Änderung rückgängig zu machen sucht. Dieser 'Widerstand' wird umso stärker sein, je größer die Abweichung vom Gleichgewichtszustand ist. War die 'Störung' (die 'Aktion') mehr oder weniger plötzlich, so wird der 'Widerstand' (die 'Reaktion') zu Beginn des Ausgleichsvorganges am stärksten sein und dann fortschreitend abnehmen, bis er bei Erreichung des Gleichgewichtszustandes von selbst erlischt. Stellen wir diesen Geschehensablauf mit Richtung auf die Erreichung des Gleichgewichts als die 'Tätigkeit' eines 'Vorganges' hin, so läßt sich sagen, daß „ein solcher Vorgang die eigenen Ursachen forträumt, so sich selbst schwächt und sich selbst endlich zum Aufhören bringt“. (*Philippson* II,1.1923.p.10.) In diesem Sinne läßt sich also von der „Selbstschwächung“ eines Vorganges sprechen. Man faßt die Bedingungen ins Auge, unter denen der (nach Art eines dauernden Wesens wirkende) 'Vorgang' arbeitet und stellt fest, daß seine Arbeitsbedingungen zunächst sehr günstig sind, sich dann aber beständig verschlechtern, bis bei erreichtem 'Ausgleich' der 'Vorgang' schließlich nichts mehr zu tun findet. Der Vorgang der Tiefenerosion bringt 'sich selbst' z. B. dadurch zu Ende, daß das Einschneiden nicht parallel zum Anfangsgefälle, sondern unter fortgesetzter Verminderung dieses Gefälles erfolgt. Denken wir uns z. B. eine Scholle der Erdoberfläche durch endogene Kräfte über ihre Umgebung gehoben, so wird in ihr das Gefälle der Flüsse verstärkt. „Diese schneiden sich infolgedessen kräftig (!) in die Tiefe ... Aber je tiefer sie einschneiden, desto mehr verringern sie gerade dadurch wieder ihr Gefälle, also die Ursache ihres Einschneidens; dieses wird daher langsamer und langsamer (!) ... Schließlich ist ein Gefälle der Flüsse erreicht, bei dem sie nicht mehr tiefer schneiden können ...“ „Die Tiefenerosion schwächt und verlangsamt sich mit ihrem Fortschreiten selbst, bis sie schließlich in einem endlichen Zeitabschnitt nur noch einen unendlich kleinen Betrag der Tieferlegung zuwege bringt.“ Die Höhe dieses 'Minimalgefälles' ist abhängig von der Wassermenge und dem Gesteinswiderstand. (*Philippson* II,1.1923.p.11; II,2.1924.p.33 u.p.127.) So verlangsamt sich auch der Vorgang der Mäanderbildung nach lebhaftem Einsetzen immer mehr, bis er sich schließlich „selbst zu Ende bringt“. (Ebda. II,2 p.101.)

Die 'normale Verlaufskurve' (siehe Fig.!) zeigt also für unsere Vorgänge (z. B. für das Anwachsen der Dünen und der Mäander) diese Reihenfolge: 1. langsames, zögerndes Einsetzen, 2. rasche, kräftige Ausbildung bei fortgesetzter Steigerung des Tempos, 3. Verlangsamung bei Annäherung an das Gleichgewichtsstadium, 4. schwaches Ausklingen. — Es sei jedoch nochmals hervorgehoben, daß diese Feststellung der Verlaufskurve den betr. Vorgang nur beschreibt, ihn aber nicht

zugleich auch erklärt. Denn das 'Gleichgewicht', dem der Vorgang zustrebt, ist jeweils ein anderes: In dem einen Falle ist es der Ausgleich von Spannungen, im anderen der Ausgleich von Höhenunterschieden durch Gravitation, in einem anderen sind es 'stabile' Bewegungsverhältnisse des Wassers und des Geschiebes, usw. Rein 'aus sich selbst heraus' entwickelt sich und verläuft eben kein physikalischer Vorgang. Die Verlaufskurve ist kein Formprinzip, mit dessen Hilfe ein beliebiger Punkt zu einem Riesengebilde anschwillt und dann wieder in sich zusammenschrumpft.

Der Begriff der 'Verlaufskurve' bedarf einer näheren Erläuterung. Zunächst kann lediglich der dynamische Entstehungsvorgang bis zu seinem Übergange in ein zeitunabhängiges Geschehen,



also die Ausbildung zur 'Arbeitsform', ins Auge gefaßt sein. Sodann läßt sich der Intensitätsgang des stationären (oder quasistationären) Geschehens selbst (Wolffg. Köhler 1920) durch eine Kurve darstellen. Der ganze Geschehenskomplex macht hier keine oder keine merklichen Veränderungen seiner Eigenschaften mehr durch, dementsprechend ist auch die Formenentwicklung 'stabil' (Gleichgewichtsformen, Arbeitsformen), und doch spielt sich überall in dem System noch fortwährend ein gleichförmiges Geschehen ab, dessen Intensitätsgang zu bestimmen ist. — Schließlich kann der Grad der Formenentwicklung bei kontinuierlicher Verschiebung der Bedingungen festgestellt und veranschaulicht werden. Es ist namentlich für die Differenzierungsphänomene charakte-

ristisch, daß sie von unteren Grenzbedingungen ausgehend über das Stadium schärfster und 'reifster' Formenentwicklung schließlich bei der Annäherung an die oberen Grenzbedingungen wieder zu dem undifferenzierten Anfangszustande zurückkehren. Durch diese gewissermaßen spiegelbildliche Rückkehr zur Ausgangsform wird der Vergleich mit einem 'Kreislaufe' nahegelegt. Hieran, nicht etwa an selbsttätig sich erneuernde und wiederholende Vorgänge, ist zu denken, wenn von 'Formenzyklen' die Rede ist. Da Anfangsstadium und Endstadium der Formenreihe einander ähnlich sind, reichen sie sich, bildlich gesprochen, die Hände und schließen so die 'Reihe' zu einem 'Kreise'. Der morphologische Vorgang selbst ist natürlich irreversibel, d. h. er ist „ein einfacher Ablauf, der, am Ende angelangt, sich nicht von selbst erneuert“, es sei denn, daß er durch unabhängig von ihm eingreifende Kräfte (Hebung, klimatische Änderung) wieder aufs neue eingeleitet wird. 'Von selbst' erneuert sich der Vorgang nie, ebensowenig wie sich eine Uhr 'von selbst' aufzieht. Wer also den 'Zyklus' als regelrechten 'Kreislaufvorgang' auffaßt, konstruiert ein, wenn auch zeitlich begrenztes, Perpetuum mobile. Auf diese logische Schwäche der *Davisschen* Zyklentheorie hat besonders *Philippon* (zuletzt: II, 2. 1924. p. 188) hingewiesen. Auch dem 'Zyklus' eignet keineswegs die Einfachheit, Unbedingtheit und Allgemeingültigkeit eines 'Prinzips'; auch er ist zunächst nur ein roher Vorgangstypus, dessen mannigfaches Wesen sich erst der empirischen Analyse erschließt. — Einen 'Zyklus' ergeben z. B. die Formen der Talbildung, wenn eine sanftwellige, geneigte 'Uroberfläche' über das Stadium 'reifer' Formenentwicklung in eine horizontale 'Festebene' übergeht. Der Fortgang der Talbildung bringt hier nacheinander Zerschneidung, dann Erniedrigung mit immer weitergehender Zerschneidung durch Nebentälchen, bei rascher Hebung auch mit Zuschärfung der Formen, dann eine weitere Erniedrigung mit Abflachung zuwege. (*Philippon* II, 2. 1924. p. 149; vgl. p. 188ff.) — Unter entsprechenden Voraussetzungen durchläuft auch der Karst einen regelrechten Formenzyklus. Wir setzen voraus, daß 'präkarstisch' sich flachwellige Abtragungsflächen gebildet haben, und lassen dann durch eine Hebung des Gebietes das Karstwasserniveau sich hinreichend senken. Wir erhalten dann folgende Etappen der Verkarstung: 1. Beginn der Verkarstung: Die Dolinen sind noch vereinzelt und lassen unverletzte Flächenteile zwischen sich; 2. Höhepunkt der Verkarstung: Die zahlreichen Dolinen berühren sich gegenseitig und lassen nur noch scharfe Grate zwischen sich; 3. Stilllegung der Verkarstung durch den Vorgang selbst (die Karst-

oberfläche ist inzwischen wieder durch Abtragung bis in die Nähe des Karstwasserniveaus erniedrigt worden): Durch die Dolinenböden hat sich eine Ebene gebildet, auf der nur noch einzelne spitze Kalkhügel aufragen, die auch allmählich erniedrigt werden. (*Philippson* II, 2. 1924. p. 75f.) — Einen deutlichen Zyklus durchläuft auch die (horizontale) Morphologie der Küsten: „Das Gesetz scheint allgemein zu gelten, daß, je weiter die Küstenzone entwickelt ist, umso einfacher ist die Küstenkontur.“ „Je breiter die Strandterrasse wird, umso schwächer werden die Wellen an der Strandlinie . . . Die Verwitterungsprodukte werden nicht mehr wegtransportiert, sondern sammeln sich an.“ „Insbesondere findet dies in Ravinen und Einbuchtungen im Kliff statt, welche dadurch geschützt werden. Die unbedeckten Landspitzen und Vorsprünge werden dagegen einem konzentrierten Angriff ausgesetzt und allmählich abgebaut. Das Endergebnis ist ein von Verwitterungsprodukten bedeckter, ebener oder nur in weiten Krümmungen gebogener Kliffabhang.“ (*H. W. Ahlmann* 1916 p. 381; ebenso *Philippson* II, 2. 1924. p. 295.) Kein 'Zyklus', sondern nur eine einfache Formenreihe ('Entwicklungsreihe') ist dagegen die allmähliche Abflachung des Kliffabhanges im Querprofil. (*Philippson* p. 291.) — Die *Behrmannsche* Schule wird den ersten Teil eines jeden Zyklus unter der Rubrik „Selbstverstärkung“, den zweiten Teil unter der Rubrik „Selbstschwächung“ buchen. (Vgl. z. B. *O. Jessen*, Die Verlegung der Flußmündungen u. Gezeitentiefs, usw. 1922 p. 168.) Daß hiermit nicht viel gewonnen ist, leuchtet wohl ein.

Mit den vorstehenden Ausführungen haben wir, wie wir glauben, den „Vorgang der Selbstbesinnung“ in der Morphologie „eingeleitet“. Die weitere Entwicklung dürfen wir nunmehr ruhig sich selbst überlassen. Denn „ist erst einmal . . . , . . . ganz von selber weiter“!

Zusammenfassung:

Das Prinzip der Selbstverstärkung läßt ebenfalls die voll entwickelte Form sich aus dem 'Anfangshindernis' wie aus einem organischen Keime heraus entwickeln. Es genügt, wenn dieses kräftig genug ist, den Vorgang 'einzuleiten'. Die Steigerung geschieht 'aus sich selbst heraus', die 'Weiterentwicklung' gilt als zwangsläufig. Die logisch-sprachliche Kategorienbildung zerspaltet auch die in sich einheitlichen Vorgänge in die Tätigkeit von Subjekt und Objekt bzw. in ein reflexives Tun. Nimmt die Intensität des Vorganges zu, so schafft er 'sich selbst' günstige Bedingungen, so verstärkt er 'sich selbst'; nimmt sie ab, so schafft er 'sich selbst' Widerstände, so schwächt er 'sich selbst'. Der Vorgang erscheint so als das Wechselspiel zweier Kräfte, die abwechselnd die aktive und die passive Rolle übernehmen. Die Theorien

der verschiedenen rhythmischen Phänomene liefern hierfür Beispiele. Das Prinzip hält jedoch einer strengen Deduktion nicht stand. Diese ergibt vielmehr die Streckung und Ausgleichung der Formen als das logisch zu Erwartende. Wo scheinbar Selbstverstärkung vorliegt, wie bei der Selbstdifferenzierung eines Systems, handelt es sich in Wirklichkeit um die Ausbildung dauernder 'Arbeitsformen'. — Auch das *W. Ostwalds*che Gesetz, welches aussagt, daß das Große auf Kosten des Kleinen wachse, läßt sich im Sinne des Selbstverstärkungsprinzips verwenden. Es ist jedoch nur die laxe Formulierung eines noch nicht ganz scharf gesehenen anderen Sachverhaltes. Auf Selbstverstärkungsgedankengänge stoßen wir bei den verschiedensten morphologischen Theorien: der des Büßerschnees, der Erosionsfurche, der Isostasie, der Wasserwellen, mit Einschluß der von *Helmholtz* und seinen Nachfolgern entwickelten Theorien.

Mit dem Prinzip der Selbstverstärkung wagt sich eine neue spezifische Betrachtungsweise ans Licht. Doch sind sein gültiger Anwendungsbereich nicht einfach physikalische Systeme, sondern höhere Beziehungskomplexe. Bei diesen summieren sich vielfach die wechselseitigen Beeinflussungen zwischen dem Ganzen und seinen Teilen bzw. seiner Umgebung zu einer Steigerung. Und zwar geschieht dies gewöhnlich in der Weise, daß im Verlaufe des Vorganges neue, bisher unwirksame Faktoren auftreten, die den Vorgang nun noch ein Stück weitertreiben. Neu ist hier das Studium der Verlaufskurven, d. h. die Verfolgung des Intensitätsganges und Ablaufes von Naturvorgängen. Man argumentiert: Die Verlaufskurve einer Reihe von Vorgängen steigt erst flach, dann steil an; also gibt es ein 'Prinzip des Anwachsens durch sich selbst'. In Wirklichkeit ist dies nur eine sog. 'Regel', die zum Ausdruck bringt, daß eine Reihe verschiedenartigster Gesetze sich formal in ähnlicher Weise auswirken. Für die uns interessierenden Erscheinungen läßt sich folgender Satz aufstellen: 'Die selektive sowohl wie die rhythmische Differenzierung setzen zunächst nur langsam und zögernd ein, machen dann aber rasche Fortschritte'. — Sowohl der dynamische Entstehungsvorgang, wie das stationäre (quasistationäre) Geschehen selbst, wie auch der Grad der sog. 'Formenentwicklung' bei allmählicher Abwandlung der Bedingungen können einer solchen Betrachtung unterworfen werden. Bei den sog. 'Formenzyklen' zeigt sich eine spiegelbildliche Rückkehr zum Anfangsstadium.

Das nächste Kapitel wird uns zeigen, daß besonders die Theorien der Mäanderbildung sich bewußt oder unbewußt in Selbstverstärkungsgedankengängen bewegen.

XV.

Mäandertheorien.

... von einem bösen Geist
im Kreis herumgeführt...

Einer Lösung des Mäanderproblems ist von vorneherein der Weg versperrt, solange der Begriff des 'Mäanders' in formalistisch-kymatologischem Sinne gefaßt wird¹⁾. 'Die' Theorie der gekrümmten Laufstrecke finden zu wollen, ist ein ebenso sinnloses Unterfangen wie das grübelnde Suchen nach 'der' Theorie der Welle. Die physikalische Mehrdeutigkeit der Formen ist eine Tatsache, die ebenso sehr elementares Gemeingut der Morphologen sein sollte, wie sie es z. B. für die Linguisten bereits ist. Will man deshalb die theoretische Unsicherheit noch durch einen laxen Sprachgebrauch chronisch gestalten, so braucht man nur, wie geschehen, den Begriff 'Mäander' auf alle Abweichungen des Flußlaufes von der Hauptgefällsrichtung auszudehnen. Es ist ein bedenklicher Auftakt, wenn *F. M. Exner* (1919 p.1) seine theoretischen Ausführungen mit dem Satze einleitet: „die Bäche, Flüsse und Ströme pflegen in Windungen talwärts zu fließen“, oder an anderer Stelle: „Jeder Bach oder Fluß ist geschlängelt“ (1921 p.327). *Otto Lehmann* (1915 p.92f.) scheidet wenigstens die bloßen 'Knickungen', 'Biegungen' und 'Krümmungen' aus, d. i. die (unstetigen oder stetigen) gezwungenen Laufänderungen und allgemeinen Richtungsänderungen, auf die der Fluß keinen Einfluß hat.

Bilden diese bloßen 'Krümmungen' eine mehr oder weniger gleichförmige Kette, so spricht man wohl von 'gezwungenen Mäandern'. Manche gewundene Laufstrecke, die der im Banne der Deduktion stehende Morphologe für einen echten 'Mäander' hält, ist eine solche Kette von Krümmungen. Man wird es nicht verhindern können, daß, wie *F. Schmaß* (*Methodik* 1919 p.153) fordert, schon die Schulknaben daran gewöhnt werden, in den Moselkrümmungen einen vorbildlichen Beleg für den Mäandertypus zu erblicken. Und doch liegen gerade hier die Verhältnisse, wie ein Studium der Meßtischblätter in Verbindung mit dem genauen Längsprofil-Diagramm des *v. Teinschen* Moselstromwerks (1905) ergibt, besonders verwickelt. Es fällt vor allem auf, daß die großen Krümmungen von dem regelmäßigen Wechsel von Furt

¹⁾ Der Ausdruck „Mäander“ sollte ausschließlich in kausal-dynamischem Sinne verwandt werden. Will man nur den Sachverhalt des regelmäßig gewundenen Laufes deskriptiv feststellen, so spreche man von „Windungen“!

und Kolk, dem Hauptkriterium für den Mäander, nur sekundär überlagert zu sein scheinen, so zwar, daß die Scheitel der größten Krümmungen mit ihren tiefen Kolken relativ feste Knotenpunkte abgeben. Und durch alle wie auch immer gestalteten Laufkrümmungen hindurch zieht sich in großartiger Einfachheit dieselbe gleichmäßig geschwungene Gefällskurve der Mosel, jene als gleich zu wertende Stücke ihres Körpers, nicht als Ausbuchtungen eines 'gedachten' Laufes ausweisend. Der Vorgang der Mäandrierung entfaltet sich hier in einem gegebenen System von 'Krümmungen'.

Als 'aufgezwungene Mäander' können auch die unter der Wirkung der 'diagonalen Stromzerlegung' stehenden Laufstrecken angesprochen werden, wozu auch die mehr oder weniger regelmäßigen Ablenkungen zu rechnen wären, die durch unregelmäßige Löslichkeit des Gesteins, weichere Bänke usw. veranlaßt sind ('Ablenkungsmäander'). Ferner gehören hierher solche Laufstrecken, die ihre Windungen den wechselständig mit hoher Bewegungsenergie einmündenden wasser- und geschiebereichen Nebenflüssen verdanken. So serpentinisiert der Inn im Oberinntal und die Etsch im Vintschgau, die Isar im glazialen Trogtal der oberen Isar zwischen den beiderseits am Talgehänge abwechselnden Schuttkegeln dahin. (*A. Penck* I.p.350; *W. Behrmann* 1912 p.193; *Philippson* II,2.1924.p.99.) — Derartige Windungen gehören in die Gruppe der wellenförmigen Zerlegung einer Geraden durch wechselständig angeordnete seitliche Einwirkungen. So flattert z. B. die Flagge im Winde wellenförmig unter dem Einfluß der wechselständig vorbeiziehenden „*Kármánschen* Wirbel“. So nimmt z. B. die Wasserscheide auf Kämmen und Graten einen geschlängelten Verlauf an, wenn die beiderseitig vordringenden Talenden mit ihren 'Ursprungstrichtern' wechselständig angeordnet sind (*Philippson* II,2.1924.p.173.) — Wirkt das 'aktive' Medium nicht von zwei Seiten, sondern nur von einer Seite her auf das 'passive' Medium ein, lagert z. B. das 'aktive' Medium dem 'passiven' Medium in horizontaler Anordnung auf, so gelangen wir zu der verwandten Gruppe der wellenförmigen Zerlegung einer Grenzfläche durch die in regelmäßigen Raumabständen sich wiederholende lokale Einwirkung des Angriffsmediums. Die Wellenform erscheint auch hier als das Ergebnis einer Summe lokal-kausaler Teilformungen. So begnügt sich auch die Wasserwellentheorie der Gebrüder *Weber* (1825, zit. *Krümmel* II. 1911.p.59) und die *Baschins* (in Anlehnung an *Helmholtz*, übernommen von *Krümmel* II.1911.p.62) damit, das einzelne Wellental bzw. den einzelnen Wellenberg zu erklären, und überläßt es dann dem Leser, die ergänzende Annahme einer regelmäßigen räumlichen Wiederkehr dieser

lokalen Einwirkungen zu machen. Nach der erstgenannten Theorie entsteht durch den Druck eines schräg auftreffenden Luftstoßes ein Wellental und ein Wellenberg. Die andere Theorie läßt (in merkwürdiger Anlehnung an das Prinzip des Vakuumzerstäubers) durch die „gewissermaßen aufsaugend wirkenden“ rascher strömenden oberen Windschichten „eine Portion (!) Wasser“ sich senkrecht erheben und einen Wellenberg bilden, dessen Wassermassen zugleich nebenan je ein Wellental hervorrufen. Weshalb nur örtlich eine „Portion“ Wasser und nicht die ganze Wasseroberfläche gleichmäßig „niedergedrückt“ bzw. „emporgesaugt“ wird, wird bei diesen Theorien verschwiegen. (Vgl. Kap. „Rhythmus u. Periodizität“!)

Manche Theoretiker (z. B. *Davis-Rühl* 1912 p.56; u. a.) lassen die Mäander wohl aus Krümmungen entstehen, doch sind die Krümmungen nach ihnen gleichsam nur eine Rohform, die der Fluß vorgefunden hat und die er nun für seine Bedürfnisse zurechtschleift. Hier verschwindet eine Krümmung, weil sie zu klein ist (Auslese!), dort wächst eine Krümmung „durch sich selbst“, dort wird eine zu scharfe Krümmung abgerundet, weil die Strömung ihr nicht zu folgen vermag, ein gegenseitiger Ausgleich der Biegungen findet statt, usw., und so werden die eckigen, unregelmäßigen, ‘ungehobelten’ Krümmungen schließlich zu ganz manierlichen, glatten, schön geschwungenen Windungen. — Die auf die *Baschinsche* Interpretierung der *Helmholtz*schen Theorie zurückgehende Wasserwellen- und Rippelmarkentheorie von *Solger* (1910 p.26) und *E. Kayser* (⁶1921 p.197f.) bildet ein Seitenstück zu dieser Anschauung. *Baschins* erfolgreiche Tätigkeit bestand bekanntlich darin, die *Helmholtz*schen Ideen in den verschiedensten grobmechanischen Vorstellungen der Alltagserfahrung zu verankern. Und so erklärt er die *Helmholtz*sche Wellenfläche einfach als ‘Fläche geringster Reibung’. Denn daß man über die glatten Wellenkämme und -täler der *Helmholtz*schen Wellen mit der Hand wie über Polsterkissen reibungsloser hinweggleitet als etwa über das zackige Gewoge eines Gebirgsreliefs, wird jeder ohne Widerspruch hinnehmen. Und so lesen wir bei *Solger*: „Gerät die obere Flüssigkeit, die Luft, in Bewegung, so wird das Gleichgewicht an der Grenzfläche gestört, diese nimmt im ersten Augenblick unregelmäßige (!) Formen an, aber von der darüber hinstreichenden Luft werden sie sofort gleichsam abgeschliffen, so daß nur diejenigen bestehen bleiben, an denen die Luft mit möglichst geringer Reibung streichen kann. Und das sind nach den *Helmholtz*schen Berechnungen die Formen einer Wellenoberfläche.“²⁾ „Daß die

²⁾ In Wirklichkeit ist jedoch das Anfangsstadium nicht „unregelmäßig“ und das ausgewachsene Stadium ist nicht „regelmäßig“ im Sinne des von der

Energieabgabe dabei kleiner wird“, meint *E. Kayser*, „ist leicht zu ersehen“ (Verweis auf Ebenda Fig.76). „Die Windschicht geht eben über die Täler ohne große Reibung fort.“ (!) Ja, es läßt sich behaupten, daß die dank dem Vorhandensein der Wirbel 'symmetrisch' geschwungene Wellenform der darüber hinströmenden Luft noch „weniger Reibung biete als eine ebene Fläche“. (!) (*Hahmann* 1910 p.41.) — Mit mechanisch 'regulierenden' und 'korrigierenden' Kräften rechnet auch *Ivar Högbom* (1923 p.123f.): Einerseits schaffen die vertikalen Komponenten der Windbewegung ganz von selbst wellenförmige Leitlinien für die Dünenbildung, andererseits bearbeitet der Wind die höheren Dünenkämme stärker, so daß bald eine gleichmäßige Höhe hergestellt ist. (sog. „general equalization.“) Entsprechend denkt sich *A. C. Lane* (1887; zit. *D. W. Johnson* 1910 p.600) die Entstehung der sog. Strandspitzen: „They have their beginnings in accidental irregularities of the beach, they become evenly spaced as the result of some process of adjustment not clearly understood.“³⁾ Für die Küstenbuchten selektiver Natur muß freilich die Möglichkeit einer progressiven Verähnlichung und Abrundung durch fortschreitende Abrasion zugegeben werden. Denselben Gedankengängen, nur in die Vertikale übertragen, begegnen wir in der Lehre *A. Pencks* von der Gleichheit der Kammhöhen. („Gipfelflur“, „oberes Denudationsniveau.“) Je höher und steiler eine Erhebung aufragt, „desto schneller wird sie durch die Abtragung erniedrigt, während die niedrigeren Höhen langsamer erniedrigt werden. So holen die ersteren die letzteren gewissermaßen ein. Setzen wir den Fall, daß die Talsohlen in gleichem Niveau und gleichem Abstand voneinander liegen, so werden ursprünglich verschieden hohe Kämme zwischen ihnen infolge dieser schnelleren Abtragung der höheren Kämme nach gewisser Zeit annähernd gleich hoch werden.“ (*Philippson* II,2.1924.p.50, mit Fig.; p.149.)

Theorie beliebten geometrischen Schematismus. Der Gegensatz ist im Grunde nur eine willkürliche deduktive Konstruktion. Die Reibungswellen auf Wasser z. B. sind in jedem Stadium ihrer Ausbildung ungefähr nach demselben Muster gebaut. Durchgehend treffen wir das charakteristische „Kreppmuster“ an (Krümmel), nirgends dagegen die hypothetische Willkür und Regellosigkeit des Anfangsstadiums, nirgends auch bei den ausgewachsenen Wellen die geometrische Regelmäßigkeit der Form eines gestanzten Wellbleches. Das gleiche gilt für die übrigen rhythmischen Phänomene.

³⁾ Der maßgebende Rhythmusbegriff der Ästhetik war bislang ein ähnlicher. „Die Form des Rhythmus ist die Form des Überganges, des Ausgleiches oder der Verbindung. Eine senkrechte Linie, die sich auf einer Horizontalen erhebt, hat etwas Abruptes, das sie verliert, wenn statt dessen eine ansteigende und abschließende Wellenlinie diese Erhebung darstellt.“ (R. Hamann, Ästhetik.1.Aufl.1911.p.78 f.)

Haben die bisher besprochenen Anschauungen das Gemeinsame, daß hier die Flußlinie durch seitlich wirkende Kräfte ausgebuchtet wird, so rechnen andere Theorien mit dem mechanischen Druck von in der Flußrichtung wirkenden Kräften, die, sei es als vorwärts gerichteter Druck, sei es als rückwärts wirkender Stau, den Flußschlauch wie ein zwischen parallelen seitlichen Widerlagern zusammengepreßtes Stahlband wellenförmig ausbiegen. Den Anspruch, hiermit eine generale Mäandertheorie zu liefern, erhebt u. a. *Sokol* (1921 p.202). Als Analogon weist er auf das seitliche Zusammenpressen einer durch eine Glasröhre gezogenen, gerade gereckten stählernen Uhrfeder hin. Vermindert sich an einer Flußstrecke plötzlich das Gefälle, so wird infolge der verminderten Stromgeschwindigkeit unterhalb mehr Wasser zufließen, als wegfleßt. „Die vergrößerte Wassermenge verhält sich dann wie die stählerne Feder in der Röhre.“ — Auch hierzu bieten die Theorien der anderen Wellenphänomene lehrreiche Parallelen. Man glaubt, daß Windstöße die Wasseroberfläche „falten und furchen“ (*Schoy* 1914 p.211), etwa so wie man die Tischdecke sich in Falten legen sieht, wenn man sie an einer Stelle mit den Händen vorwärts schiebt, oder wie sich der Handrücken runzelt, wenn man mit dem Finger drückend über ihn hinwegfährt, oder wie Gebirgsfalten durch seitlichen Druck entstehen können. Eine gewisse Berechtigung und Logik hat diese Auffassung, soweit sie von der Tatsache ausgeht, daß die oberste Flüssigkeitsschicht sich wie eine selbständige Membran verhalten und somit auch durch seitlichen Druck gefältelt werden kann. Das Flüssigkeitshäutchen, das die Oberfläche des Wassers überzieht, „wird vom Winde angegriffen und, weil es sich nicht zerreißen läßt, in Falten gelegt“. (*S. Günther* ²II.1899.p.444; *Supan* 1916 p.296.) Man verweist hierbei auf die klassischen Versuche von *Scott Russel* (1844), der durch das vertikale oder horizontale Vorschieben eines gespannten Drahtes bzw. Fadens vor diesem auf der Wasseroberfläche sog. ‘Kapillarwellen’ erzeugte⁴⁾. Besteht für diese Wellen die Bezeichnung ‘Kapillarwellen’ zu Recht, so müssen wir anderseits feststellen, daß die ‘Reibungswellen’ auf dem Meere in ihrem Anfangsstadium nicht das mindeste mit diesen ‘Kapillarwellen’ zu tun haben, ebensowenig wie sie in ihrem späteren Stadium mit den ‘Gravitationswellen’ irgendwie übereinstimmen. Der Scharfblick *O. Krümmels* (II p.60) hat den schwachen Punkt jener Theorie treffend erfaßt, wenn er zweifelnd fragt: „Kann der doch immer nur über die Oberfläche hingleitende Wind so wirken wie ein

⁴⁾ Die dem Drahte nächsten Wellen hatten die größte Wellenlänge (8,3 mm), die am weitesten vor dem Drahte aufgeworfenen Wellen nur etwa 5 mm Länge von Kamm zu Kamm.

fester, das Oberflächenhäutchen durchdringender und es vor sich herschiebender Gegenstand?“ „Ferner zeigt die Beobachtung, daß sich der vom Winde unmittelbar getroffene Teil der Wasseroberfläche mit diesen elementaren Wellen bedeckt, statt daß, wie die vorgetragene Theorie will, dies auf dem Teil der Wasseroberfläche geschehen müßte, der vor dem vom Winde getroffenen Gebiete liegt.“

Neben dem Phänomen der 'Druckfältelung' spielt auch das der 'Zugfältelung' oder *Runzelung* bei den Wellentheorien eine gewisse Rolle. So glaubt *F. A. Forel* (1883) die Rippelmarken mit den Streifen in der inneren Handfläche vergleichen zu dürfen. Eine 'Schrumpfungstheorie' der Mäander steht noch aus. *F. Toula* (1914; vgl. *W. Paulcke* 1912) stellte interessante Versuche mit Gummiballonen (bzw. gespannten Gummihäuten) an, auf denen geologische 'Schichten' aufgetragen waren, um die Entstehung von Gebirgsfaltungen durch Innenschrumpfung aufzuhellen. Auch im Reiche der Kolloide kommt es zu Innenschrumpfungen (rhythmischen Kontraktionen), namentlich dann, wenn eine normale Verkleinerung einer Gallerte beim Trocknen deshalb nicht möglich ist, weil sich außen eine besonders widerstandsfähige Kruste gebildet hat, oder weil der Stoff zwischen zwei Glasplatten eingepreßt ist. (*R. E. Liesegang* i. Koll. Zs. 15, 18. 1914.)

Eine andere Gruppe von Mäandertheorien läßt äußere mechanische Einwirkungen aus dem Spiele und verlegt die Ursache der Mäanderbildung in das fließende Wasser selbst.

Es besteht eine physikalische Tradition, wonach die Stromfäden beim Fließen nicht gerade Linien, sondern 'spiralig gekrümmte Linien' beschreiben. Es lag nun nahe, wenigstens für ein unanschaulich-deduktives Theoretisieren, diese 'spiraligen Krümmungen' mit den Flußwindungen in Verbindung zu bringen, die Annahme zu machen, daß, „wenn die Symmetrie der Ufer erst ein klein wenig beeinträchtigt ist“, durch das spiralige Fließen „ganz von selbst hier der sich stetig vertiefende Einschnitt, dort die progressive Geschiebeablagerung stattfinden muß“. (*S. Günther*² II. 1899. p. 916.) Ähnlich glaubt *Rümelin* (1913 p. 81), der von ihm entdeckte Ditropismus und pulsierende Charakter des natürlichen Fließens biete zugleich eine Erklärung für die Tatsache, „daß alle sich selbst überlassenen Flußläufe Windungen zeigen“. Dies ist jedoch so wenig der Fall, als etwa die am Bug eines gleichmäßig dahinfahrenden Nachens oder Dampfschiffes 'pulsierenden' Wellen (die als unsichtbare elastische Verdichtungswellen noch in großer Entfernung festgestellt werden) mit den ebenfalls 'spontan' sich bildenden 'Reibungswellen' der Wasseroberfläche identisch sind. Schon *H. W. Ahlmann* (1914 p. 61) weist darauf hin, daß die Pulsationen sicher nicht von solcher Stärke und Dauer sind, daß der permanente Strom

und der ganze Materialtransport dadurch bestimmt würden, und ebensowenig haben die Kurven dieser Linien eine mit dem Bogen des Flußlaufes zu vergleichende Länge. —

Nur der Kuriosität halber sei erwähnt, daß *Otto Baschin* in der Mäanderlinie eine „*Helmholtz'sche Wellenfläche*“ erblickt, und daß *F. M. Exner* (1913) die nach *Sandström* (1911) unter ganz bestimmten speziellen Bedingungen eintretende oszillatorische Bewegung der Luft zu einem allgemeinen oszillatorischen Strömungsprinzip erweitert, unter das auch die Mäanderbewegung fallen soll. Ein späterer Aufsatz (*Ann. Hydr.* 1919 p. 155) bringt neben mathematischen Berechnungen eine umfassende theoretische Begründung: „Die gradlinige Strömung ist nur ein vereinzelter Fall unter allen möglichen Potentialbewegungen.“ Sie ist also nur ein „unwahrscheinlicher Spezialfall“. Demnach „erhalten wir für jede andere Anfangsbedingung oszillatorische Bewegungen in der Flüssigkeit“. Die in einem trogartigen Bette abrollende Kugel zeigt ja entsprechendes Verhalten: „Sie wird niemals eine gerade Bahn beschreiben, niemals die tiefste Lage im Querschnitt der Rinne behalten, sondern infolge der geringsten Unregelmäßigkeit (!) von Kugel oder Rinne nach rechts oder links von der Mittellinie abweichen ... Das gradlinige Abrollen der Kugel in der Rinne ist unendlich unwahrscheinlich, das schwingende Abrollen die Regel, die stabile Bewegungsform.“ (!) (*F. M. Exner*, Wiener S-B. 1919. p. 1454.) *Exner* gebührt hiernach das Verdienst, das Mäanderproblem als Scheinproblem entlarvt und vielmehr den gradlinigen Flußlauf als Problem hingestellt zu haben. — Auch die deduktiven Ausführungen von *Davis* (1903 u. ö.) forderten den Mäander als Endprodukt jeder (!) normalen Flußentwicklung. Jeder Fluß „erstrebt“ die Mäanderform. Hat der Fluß „Raum“ zu Windungen, so bildet er auch welche. (Vgl. *O. Lehmann* 1915 p. 172f. u. ö.) *Calciati* (1909 p. 99) ist deshalb erstaunt, sie nicht überall in der Natur vorzufinden: „Pourquoi et comment le méandre n'est-il pas la forme générale (!) de chaque rivière? ... Nous n'avions trouvé à vrai dire aucune réponse directe et certaine à cette question et elle me semble difficile à donner.“

Eine weitere Gruppe von Mäandertheorien richtet den Blick nicht so sehr auf die 'Ursachen' der Schlingenbildung, als auf die *Wirkung*, die diese Schlingenbildung auf die allgemeinen Strömungsverhältnisse des Flusses hat. Die Einstellung ist also mehr oder weniger teleologisch. Man faßt die Mäanderbildung auf als Glied in der Reihe der Vorgänge, die auf die Schaffung von 'Gleichgewichtsprofilen' von 'stabilen' Abflußverhältnissen entsprechend den allgemeinen Bedürfnissen des 'Flußhaushalts', oder auch auf die nutzbringendste (sic!) Verwendung der Flußenergie abzielen.

Honsell (1887 p.46) will die Mäanderbildung „nur als eine Form des Gleichgewichts“ aufgefaßt wissen, „das sich unter Wechselwirkung der Abflußbedingungen hergestellt hat“. Die Windungen nehmen übereinstimmende Dimensionen an, der Größe des Wasserlaufs, dem Flußhaushalt entsprechend. (*Otto Lehmann* 1915.) Das normale (Gleichgewichts-)Gefälle eines Flusses 'entspricht' zugleich seiner Wassermenge und seiner Last. Es besteht demnach ein Bestreben des Flusses zur Erreichung dieses Gleichgewichtsgefälles. Zur Erreichung bedient er sich der Mäander, die seinen Lauf verlängern und damit das Gefälle vermindern. Die Grenze der Mäanderausbildung ('Flußentwicklung') ist hiermit zugleich gegeben. (*Sölch* 1914 p.168; *A. Penck* I.1894.p.347.) Um das Eigenartige dieser Auffassung zu verstehen, halte man im Auge, daß nach ihr alle anderen 'Ursachen' der Mäanderbildung nur die Rolle etwa der 'einleitenden' Anstöße bei Schwingungen spielen können. Wäre die Theorie konsequent, so dürfte sie sich der Folgerung nicht verschließen, daß der Vorsprung, den die Seitenerosion (in der Mäandrierung) dank ihrer leichteren Arbeitsmöglichkeit zunächst erringt, später von der nachhinkenden Tiefenerosion wieder eingeholt wird, was zur Folge hat, daß sich die Mäander wieder sukzessiv nach schräg-innen zurückbilden würden. Die Theorie steht außerdem im Widerspruch zu der Verbreitung der Mäander, worauf *A. Hettner* (1910 p.375 Anm.2) gelegentlich hinwies. In Verbindung mit der noch zu besprechenden Theorie der Energieverwendung ergibt sich zudem ein eigenartiger Selbstverstärkungszirkel, wie er u. a. in der Theorie *Sokols* (1921 p.203) zutage tritt: „Wo Mäander gebildet sind, sinkt das relative Gefälle, und der Fluß kann desto mehr (!) Energie zur seitlichen Erosion ausnützen,“ d. h. er kann jetzt erst recht Mäander bilden. — Gegen die teleologische Blickrichtung ist an sich nichts einzuwenden, soweit damit nur die Richtung des Geschehensablaufes, nämlich die Annäherung an gewisse stabile Zustände, bezeichnet werden soll. (Sie ist also nicht etwa nur ein Notbehelf; eine Vorstufe der mechanisch-kausalen Erklärung, wie *Sokol* meint.) Doch müßten wir im vorliegenden Falle schon eine höchst eigenartige Labilität des geradlinigen Abflusses annehmen, und der Fluß müßte in seine Windungen gleichsam hineintappen oder hineinfallen, d. h. das Abweichen von der Zugkraft der Gravitation kann nur mit einem anderen physikalischen Elementarvorgang, nicht aber mit einer beliebigen Zielsetzung legitimiert werden, denn der Fluß ist nun einmal kein überlegendes Wesen. Obige Theorie scheint nun aber in der Tat mit der Auffassung zu spielen, daß der Fluß das ihm von der Erosionstheorie 'gesteckte Ziel', die Annäherung an das Gleichgewichtsprofil, nicht auf dem mühsamen geraden Wege 'anstrebt', sondern durch

raffiniertes Drehen und Winden 'erschleicht' ('Erschleichungs-mäander'), aus Bequemlichkeit, wie *Sokol* meint, „um den Tiefenschurf nicht ausüben zu müssen“.

Doch was gilt die Bequemlichkeit, wenn die Pflicht ruft? Der Fluß ist eingespannt in den Dienst der Gravitation, und all sein Bestreben ist darauf gerichtet, die ihm zugewiesene 'Aufgabe' rastlos und restlos zu erfüllen. Er wird unter 'Ausnützung' seiner ganzen 'lebendigen Energie' eine möglichst große 'Arbeitsleistung' anstreben und sich so willig einfügen in das utilitaristische Weltbild des modernen technischen Menschen. Hierin liegt die geheime Zugkraft der Energieverwendungstheorie. Der Fluß läßt 'seine Kraft' nicht brach liegen, er betätigt sie. Hat er keine Arbeit, so sucht er sich welche. Der Tiefenschurf bietet ihm für gewöhnlich keine hinreichende Betätigungsmöglichkeit, da der Fluß ja „zwischen Quelle und Mündung gewissermaßen festliegt“ (*Davis-Braun*²1917.I.p.126), und oft unvertiefbare Flußstellen die Vertiefung lähmen (*A. Penck*, I.1894.p.315). Doch wie die ganze Natur auf Tätigkeit gestellt ist, so schafft auch er sich in dem Ausbau von Windungen ein Mittel, seine jungen Kräfte 'auszutoben', seine 'überschüssige' Energie nach Herzenslust auszugeben. ('Überschüßmäander'.)⁵⁾ Woher diese eigenartige Vorstellung? Sie erhält, so seltsam es auch klingt, ihre letzte Nahrung aus dem primitiv-animistischen Kraftbegriff, der ja auch die Perpetuum-mobile-Sucher zu ihren immer neuen verfehlten Versuchen antrieb. (*Ichak* 1914.) Wie letztere in den Gravitationserscheinungen selbständige 'Triebkräfte' erblickten, Kräfte, die wie die Muskelenergie des Menschen 'da' sind und wartend bereitliegen, eine nie versiegende Quelle von Arbeitsfähigkeit darstellen und in beliebiger Richtung verwandt werden können, so soll auch heute noch der Fluß über einen gewissen Betrag an Energie verfügen, an Energie, die man sich ihm innewohnend denkt. Mechanistische und organistisch-animistische Denkweise gehen den üblichen, Verstand und Gemüt zugleich befriedigenden Bund ein. Der Fluß ist einerseits 'natürlich' nur ein Zusammen von Wasserteilchen, die passiv talab dem Zuge der Schwere folgen, andererseits erscheint er hier als (absolut gedacht) schwach oder 'kräftig' wie ein Mensch. Die Arbeitsrichtung ist beliebig. Wie es einem organischen Lebewesen frei steht, je nach Bedürfnis mit den Beinen zu strampeln oder die vorderen Extremitäten in Bewegung zu setzen, so soll

⁵⁾ Nach A. Penck (I.1894.p.348 ff.) finden wir die Mäanderbildung „dort, wo die Erosionskraft eines Flusses stärker ist, als sie in der Tiefenerosion zur Wirkung kommen kann“, „wo Tiefenerosion zwar möglich, aber nicht ganz zur Entfaltung kommen kann“. Nach Ahlmann (1914 p.67) „kommt“ dort, wo die laterale Erosion auf Widerstand stößt, „alle Kraft für die Tiefenerosion zur Anwendung“. (S. a. Sölch 1914 p.159!; H. Wagner, Lehrb.¹⁰ I.2.p.336.)

auch der Fluß die Möglichkeit haben, 'seine' Energie in verschiedener Weise zu 'verwenden' oder 'auszunützen', sich auf bestimmte Tätigkeiten zu 'konzentrieren' (*Sokol* 1921 p.203; *A. Penck* I.1894.p.315); sei es, daß er seine seitlichen Organe betätigt (Seitenerosion), oder mit den Organen der Bauchseite scharrt, wühlt und hobelt (Tiefenerosion). Im 'Stromstrich' denkt man sich die ganze Kraft des Flusses zusammengefaßt, der Stromstrich wird zum handelnden Etwas.

Wer etwas leisten will, muß sich zusammenraffen und auf den kleinsten Punkt die größte Kraft vereinigen. Auch das fließende Wasser und das fließende Eis will Arbeit leisten, „it seeks to establish itself as a corrasive agent“. Zur Beschleunigung des Abtragungsvorganges konzentriert sich deshalb das abfließende Wasser in einzelne Flußadern, in diesen Adern selbst schafft es sich Stellen erhöhter Arbeitsleistung: seine „tactique victorieuse“ (*Brunhes* 1903) schafft den Wechsel von Kolken und Furten, schafft die Wirbel und Strudel als Werkzeuge der Bearbeitung des Bettes. Der Gletscher schafft sich die Drumlinformen, um weitergehend korradieren zu können (... „by accomplishing corrasion by local concentration of force at the bases of trenches in the morainic mass; the same force spread out over the whole area would produce only negligible results. All streams act alike in this connection ...“ *Andrews* 1909 p.289.) Der Ditropismus im gewundenen Flusse wäre demgemäß auch zielbewußte Taktik des arbeitenden Wassers.

Wenn man schon mit anthropomorphen Vorstellungen arbeitet, so dürfte auf Grund unserer neuen Theorie die gegenteilige Auffassung wohl die richtige sein. Die Materie sucht nicht die Arbeit, sondern sie flieht sie. Sie drückt sich mit Hilfe bogenförmiger Ausbiegungen regelrecht an der Arbeit vorbei! Statt einer 'tactique victorieuse' bemerken wir eine 'Taktik des passiven Widerstandes'; mit auffallender 'Widerhaarigkeit' sträubt sich die Materie gegen die hinab- und auseinanderzerrende unerbittliche Kraft der Gravitation, ähnlich wie ein Hund an der Leine, der sich zusammenduckend und aufbäumend schleifen läßt. Die Arbeitsfreudigkeit, die uns zuweilen beseelt, dürfen wir nicht auch der Materie zuschreiben wollen. Diese ist 'träge' und wird es immer bleiben.

Der jugendliche Fluß zeigt Windungen: seine überschäumende Energie tobt sich in ihnen aus; die gebändigte Energie des männlichfesten Flusses zeigt gestreckten Lauf, der greisenhafte Fluß zittert wieder hin und her aus — Energielosigkeit. „Flüsse mit schwachem Gefälle werden immer zur Mäanderbildung neigen. Denn bei ihnen ist die Energie gering, so daß jede Störung im Laufe sich maßgebend zur Geltung zu bringen vermag.“ (*Gravelius* 1914 p.36.) Hindernisse, „oft unscheinbarer Art“, „zwingen“ dann den Fluß, sich in schlangenartigen

Windungen zu bewegen. (*Supan* 1916 p.517.) Die Mäanderbildung soll bei kleinen Flüssen deshalb besonders häufig sein, weil sie „leichter abgedrängt werden als große“. (*Philippson* II,2.1924.p.101.) ('Schwächlingsmäander.') Oder der Fluß ist infolge des mangelnden Gefälles unschlüssig, wohin er sich wenden soll, er irrt rat- und ziellos bald hierhin, bald dorthin. ('Verlegenheitsmäander.') *Obst* (II.1923. p.163) berichtet einen solchen Fall: „So minimal wird hier [d. h. auf der Zwischenscholle] das Gefälle, daß die beiden Flüsse nicht einmal ihre Richtung beibehalten, sondern wie im Rausch hin und her taumeln und sich schließlich in die Arme fallen.“ ('Taumelmäander.') Einst kraftvolle Flüsse, denen ein Teil ihrer Wassermasse plötzlich entzogen wurde, schlottern energielos auf der Talebene hin und her, „wie ein abgemagerter Körper in einem zu weiten Kleide schlottert“ (*Otto Lehmann* 1915 p.101.) ('Schlottermäander.')

Auf die mannigfachen Versuche, dem Mäanderproblem mit Hilfe des Selbstverstärkungsprinzips beizukommen, wurde bereits in anderem Zusammenhange (Kap. „Selbstverstärkung“) hingewiesen. Für anspruchslose Gemüter ist diese Theorie die bestechendste. 'Anlage' und 'Weiterentwicklung' sind gegeben und vollziehen sich durch sie nach einer selbstverständlichen Zwangsläufigkeit. Die Mäander sind zunächst in jedem Flusse schon im Keime angelegt (*Baschin*). Für diesen Präformismus bedarf es nicht einmal jener „Unregelmäßigkeiten der Urmuldenlinien“ (*Davis-Rühl* 1912 p.54) oder was der 'kleinen Hindernisse' und 'Ansatzkerne' mehr sind. Für die genetische Methode ist mit der Aufzeigung der keimartigen 'Ursache' bereits alles getan. „Die Windungen, wenn sie einmal angelegt sind, müssen sich notwendigerweise (!) immer weiter ausziehen.“ (*Hettner* 1910 p.375.) Der Fluß, zunächst gewaltsam beiseite geschoben, beginnt, freiwillig vor dem Hindernis davonzulaufen und um es herum immer größere Bogen zu beschreiben. — Am Anfang war der Strauch. „In einem Flußbett hat sich ein Baumstamm verankert oder ein Strauch festgesetzt, der den Sand fängt und den ersten Anlaß zur Bildung einer Sandbank bildet“ usw. (*Behrmann* 1919 p.154.) Durch einen „Baumstrunk“ oder einen „Strauch“ „wird das Wasser mit hartem Stoß (!) gegen das gegenüberliegende Ufer getrieben“. (*Crugnola* 1902 p.271.) Nun „entwickeln“ sich „Zentrifugalkräfte“; diese schwächen sich durch ihre selbstbewirkte Radiusvergrößerung. „Und daher vermag ein ganz zufälliges und unbedeutendes Ereignis, wie das Hineinfallen eines Stückes Rasen oder eines Strauches den Fluß zur Seite zu drängen und ihn zu zwingen, eine neue Windung von sehr viel kleinerem Radius zu bilden.“ (*Davis-Rühl* 1912 p.56.) — Ein Strauch steht an der Wiege des Mäanders, ein Strauch gibt ihm den Todesstoß!

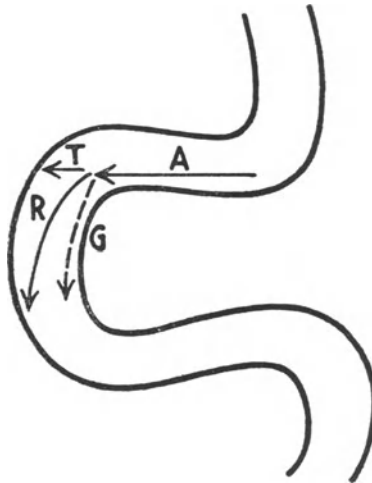
Was berechtigt uns, irgendwelchen Hindernissen des Flußbettes eine Keimwirkung zuzuschreiben? Wir haben den Wind als 'nivelleur' kennengelernt und dürfen mit derselben Entschiedenheit behaupten: Das fließende Wasser ist ein 'Strecker'! Es wird sein Bestreben nie verleugnen, allen Störungen zum Trotz seinen gestreckten Lauf durchzusetzen. Die Wirkung der Trägheit wird den Stromstrich die schwächste Kurve beschreiben lassen, die ihm die Gestalt des Flußbettes verstattet, d. h. er wird nicht den Außen-, sondern den Innenseiten der Krümmungen anliegen. „Statt die Ursache der regelmäßigen Bogen des Serpentin- und Mäanderlaufes zu sein, bilden diese lokalen Hindernisse den Ursprung der Anomalien, Störungen und Unregelmäßigkeiten des Bogenlaufes.“ (*Ahlmann* 1914 p.60.) Und welche Rolle spielen die Sträucher und 'Sinkbäume'? Sie spielen etwa die Rolle der Bühnen bei der Flußregulierung, d. h. sie vermögen kleine Verschiebungen oder Verbiegungen des Stromstriches zu veranlassen, weiter aber auch nichts. „Am Missouri, dessen Wasser neben überaus großen Mengen von Sinkstoffen noch zahlreiche Zweige, Blätter, Gräser und Wurzelfasern mit sich führt, hatte man die Beobachtung gemacht, daß ein reich belaubter Baumzweig, ein Strauch usw., der vom Strome fortgeführt, an irgendeiner Stelle aufgehalten wurde, dort eine Ansammlung von Zweigen und Fasern bewirkte, und daß, wenn das den Strauch haltende Hindernis stark genug war, dem Wasserdrucke zu widerstehen, sich alsbald die Sinkstoffe dahinter ablagerten.“ (*Lange* i. Zs.f. Bauwesen. 1883; zit. *E. Engels* 1921 p.453.) An ostindischen Flüssen, am Unterlauf des Mississippi und Hwang-ho machte man ähnliche Beobachtungen. Solche 'Sinkbäume' sind mit Erfolg an der Theiß und an der Donau zur Aufkiesung tiefer Kolke verwendet worden; sie können ferner bei Ufereinbrüchen Schutz gewähren. Daß sie auch Flußwindungen geschaffen hätten, davon verlautet in der hydrotechnischen Literatur nichts. Im Naturzustande mag eine „Ablenkung des Laufes bei Hochwasser“ die Folge sein. „Das ist jedoch nur eine besondere Art der Verschiebung von Flußläufen.“ (*J. Rein* 1896 p.129; s. a. *Otto Stutzer*, Geogr. u. geol. Beob. an Flüssen u. Bächen d. mittl. Magdalentales in Kolumbien. Pet.Mitt. 1925 p.67; *H. Böhme*, Schwimmende Jnseln. Pet.Mitt.1926 p.11.)

Die 'minimalen Störungen' schaffen isolierte Ausbuchtungen des Flußlaufes um festliegende Punkte, die sich unter dem Drucke der 'Zentrifugalkraft' immer mehr aufblähen, bis sie durch ihre eigene Überentwicklung zerplatzen. Eine ganz unsinnige Auffassung, wie sie namentlich von *Davis-Rühl* (1912 p. 56f.) vertreten wird. Die stillschweigende Einführung einer 'Zentrifugalkraft' ist hierbei noch nicht das Unsinnigste. Denn „Zentrifugalkräfte“ (Der Plural deutet

das Ungewisse ihrer Herkunft und ihres Wesens an) können sich nach der Lehre der Genetiker „entwickeln“, aus nichts heraus, sie wachsen an ihrer eigenen Wirkung und ersterben schließlich wieder an ihrer eigenen Wirkung. „Sobald aus irgendeinem geringfügigen Anlaß in einer ursprünglich geradlinigen Strecke eine Verlegung des Stromstriches eingeleitet wird, kommt die Zentrifugalkraft zur Entwicklung, wodurch das äußere Ufer immer stärker angegriffen wird.“ (*Machatschek* III. 1919.p.38; vgl. *A. Penck* I.1894.p.347; *Vujevic* 1906 p.21ff.; *Davis-Rühl* 1912 p.56f.; *Ahlmann* 1914 p.51ff.; *Prandtl* 1913 p.129; *F. M. Exner* i. Ann. Hydr. 1919 p.156; u. a. m.) *Vujevic* stellt sogar mit Hilfe der bekannten Zentrifugalkraftformeln und zeichnerischer Darstellung verschiedene Berechnungen an und verstrickt sich dabei naturgemäß in die sonderbarsten Widersprüche. *L. Henkel* (Pet. Mitt. 1922 p.147) untersucht ganz ähnlich das Kräfteverhältnis zwischen Gefälle und Zentrifugalkraft und gelangt unter Einsetzung der Zentrifugalkraftformel zu dem Ergebnis, daß „die Wirkung der Zentrifugalkraft also hier ein mehrfaches von der des Gefälles“ ist. Womit für *L. Henkel* die Frage, weshalb die Strömung das konkave Ufer unterwäscht, befriedigend gelöst ist. *J. Bartels*, der diese „einfache Lösung“ nicht gesehen hat, muß sich von *L. Henkel* Unkenntnis der bekannten mechanischen Gesetze vorwerfen lassen. — Den psychologischen Wurzeln dieser eigenartigen Zentrifugalkrafttheorie, zu der sich aus der Geschichte des wissenschaftlichen Denkens schwerlich Seitenstücke beibringen lassen, haben wir bereits an anderer Stelle (Kap. XI u. Kap. XIV) nachzugehen versucht. Die Physik weiß nur von einer Trägheitskraft, von dem Widerstand gegen die Ablenkung aus der Tangente, als Spezialfall des Trägheitsgesetzes, wonach jedes Massenteilchen der Ablenkung aus der geraden Bewegungsrichtung einen Widerstand entgegengesetzt. Wo ist aber hier das festliegende oder bewegte Zentrum, das 'geflohen' werden soll? Wo ist die schleudernde Bewegung? Woher die Verschärfung der Krümmung? Die 'Zentrifugalkraft' der Mäandertheorien ist lediglich eine Umschreibung für die unbekannte Kraft x , die die Eigenschaft haben soll, die gerade Flußstrecke an gewissen Stellen kreisförmig auszubuchten. 'Zentrifugalkraft' bedeutet hier einfach 'kreisförmig wirkende Kraft', 'gewundene Laufstrecken schaffende Kraft'. Setzen wir nun noch Kraft = Vorgang, wozu uns der laxer morphologische Sprachgebrauch berechtigt, so behalten wir statt der erhofften 'Erklärung' eine leere Paraphrase nach scholastisch-vitalistischem Muster in Händen.

Voraussetzung der 'Zentrifugalkraft' ist eine 'Zentripetalkraft', d. h. es müßte zunächst bewiesen werden, daß eine nach dem Mittelpunkt der zu beweisenden Kreis-

bewegung gerichtete Kraft existiert. Dieser Beweis dürfte den Theoretikern doch einiges Kopfzerbrechen machen. Da diese Kraft offenbar gar nicht existiert, wird sich die Wassermasse an dem gedachten Punkte einfach, dem Trägheitsgesetz zufolge, in tangentialer Richtung von dem (angenommenen) Kreise entfernen, d. h. wir erhalten keine 'Zentralbewegung', sondern eine einfache Trägheitsbewegung. Diese Trägheitsbewegung vermag jedoch bei freier Bettgestaltung kreisförmige Ausbuchtungen nicht zu schaffen, mag der



A = Ablenkung durch Hindernis; T = Trägheitskraft;
G = Gravitationskomponente; R = Resultierende Bewegung.

Anfangsimpuls noch so stark gewählt werden. (Über das Pendeln bei unfreier Bettgestaltung siehe unten!) Nehmen wir z. B. eine starke Richtungsänderung des Flusses als gegeben an, so wird der Stromstrich unterhalb dieser Stelle dank der Trägheitsbewegung eine Kurve beschreiben, die der eines fallenden Flüssigkeitsstrahles entspricht, der aus einem horizontalen Rohre austritt, d. h. die Bahn ist eine Resultante aus Trägheit und Gravitation, bzw. Gravitationskomponente. (Vgl. die Fig.!) Will man also die Mäanderbewegung aus solchen Trägheitsbewegungen erklären, so müßte man bei jeder einzelnen Halbkurve eine irgendwie bedingte Richtungsänderung des Flusses schon voraussetzen, d. h. in der Natur nachweisen oder — wenn dies nicht möglich ist — als logisch wahrscheinlich hinstellen, d. h. fingieren. Das be-

deutet aber, daß das zu Beweisende schon stillschweigend in die Voraussetzung aufgenommen wird!

Hierin liegt auch die logische Schwäche der neuerdings von *Albert Einstein* (1926 p.223f.) vorgetragenen Mäandertheorie. Die Überlegungen *Einsteins* gehen nicht von der geraden, sondern gleich von einer schwach gebogenen Laufstrecke aus (von einer „Krümmung“, die der Fluß „erleidet“) und suchen dann zu zeigen, wie sich diese schwache Biegung dank der Zentrifugalkraft immer weiter ausbuchten müsse. (Die Deduktion wird auf die Mitte der Kurve beschränkt; die beiden Enden der Kurve werden dagegen als festliegend behandelt!) „In allen Querschnitten des Flußlaufes wirkt, wo dieser gebogen ist (!), eine nach der Außenseite der Biegung (von A nach B) gerichtete Zentrifugalkraft.“ (A ist der innere und B der äußere Scheitelpunkt.) Bis hierin stimmt also die Deduktion durchaus mit den oben besprochenen Selbstverstärkungstheorien überein. Neu ist bei *Einstein* nur die sorgfältige Analyse der Quersirkulation und deren Bedeutung für die Erosionstätigkeit des Flusses am konkaven Ufer. Zu einer Quersirkulation kommt es nach *Einstein* überall dort, wo die Geschwindigkeitsverteilung über den Flußquerschnitt hin dadurch unsymmetrisch wird, daß die Wassermassen, insbesondere die am schnellsten strömenden Teilchen, durch eine hinzutretende Kraft (Zentrifugalkraft oder ablenkende Kraft der Erdrotation) nach einer Uferseite gedrängt werden. Die schneller strömenden Wasserschichten tauchen dann an dieser Uferseite unter die infolge der Sohlenreibung langsamer strömenden Schichten hinab und vermögen so eine starke Erosionswirkung auf das Ufer auszuüben. Das erodierte Material lagert sich dann an der anderen Uferseite ab, wo die durch die Sohlenreibung verzögerten Wasserschichten von der Zirkulation in die Höhe gezogen werden, die Bedingungen für ungestörte Ablagerung also günstig sind. — Besteht die Behauptung *Einsteins*, er habe Hydrographen und Geographen vergeblich um Aufklärung gebeten und daraufhin diese Gedankengänge als etwas Neues lanciert, zu Recht, so ist dies wiederum ein beschämender Beweis für die auf dem Gebiete der Flußkunde herrschende Zersplitterung und mangelnde fachliche Verwertung der Literatur. Den *Einsteinschen* Gedankengang (Zentrifugalkraft — spiralisches Fließen — Quersirkulation — Erosion am Steilufer — Quertransport des Materials usw.) finden wir in auffallender Übereinstimmung u. a. bereits entwickelt von *H. Girardon* (Bericht von *Th. Rehbock* i. Zentralbl. d. Bauverw. 14. 1894. p.534f., 541ff.; Anz.i.Geogr. Jahrb. 1895 p.416f.). —

Die letztgenannten Theorien lösen bereits das Geschehen im Flußlauf auf in eine Reihe voneinander ziemlich unabhängiger Einzelgeschehen; lokale Verhältnisse schaffen lokale Vorgänge; für das Ge-

staltmäßige, das Sich-im-Ganzen-Tragen des Geschehens im Flußschlauch fehlt der Blick. Diesen Mangel vermeidet eine andere Theorie, die die gesamten Mäander einer Flußstrecke als Wirkung eines einzigen mechanisch durchsichtigen Vorganges deutet. Sie stellt die Windungen dar als Wirkung des pendelnden Stromstriches. Das Pendeln setzt an einer bestimmten Flußstelle ein und pflanzt sich dann flußabwärts fort. Jede nächstfolgende Windung ist eine Wirkung der vorigen. Die mechanistische Umprägung des Geschehens ist vollkommen: Statt eines simultan-gestaltmäßigen gegenseitigen Bezogenseins der einzelnen Teile erhalten wir sukzessiv-mechanische Fortpflanzung einer lokalkausalen Einwirkung, der Mäandrierungsvorgang wird als ein ein-sinnig-linearer Geschehensablauf gedacht, der irgendwo 'anfängt' und dann progressiv fortschreitet. Als mechanisches Analogon findet man deshalb auch treffend die in einem trogartigen Bette unter Hinundherpendeln hinabrollende Kugel genannt (so z. B. *F. M. Exner* i. Wiener S-B.1919). „Stößt das fließende Wasser auf eine Felswand, so prallt jeder einzelne Wasserfaden ab wie die Billardkugel (!) an der Wand des Tisches.“ (*J. Rein* 1896 p.129.) „Aus der Konkaven stößt das Wasser schief nach dem anderen Ufer hinüber (!) und bohrt hier von neuem...“ usw. (*Gravelius* 1914 p.36.) Der falsche Begriff des 'Prallhanges' ist von dieser Auffassung herzuleiten. Die Zeichnung bei *Calciati* (1909 p.96 Fig.5) führt diese Prallmechanik ungewollt ad absurdum. Obwohl dieser Vorstellungskreis den Beobachtungstatsachen durchaus widerspricht, ist er doch allgemein akzeptiert. Schon die Hilfsannahmen und stillschweigenden Voraussetzungen, die die Theorie macht, geben zu den schwersten Bedenken Anlaß. An den Anfang der mäandrierenden Laufstrecke stellt sie ein großes Hindernis, welches mindestens so bedeutend sein muß, daß es eine starke Abweichung des Flusses von der Gefällsrichtung hervorrufen kann. Je stärker die Abweichung, umso mehr Pendelschwingungen braucht der Fluß, um sich in die Gefällsrichtung zurückzufinden. Wo findet sich in der Natur der Felsriegel, die starke Biegung, der starke seitliche Zufluß, der für eine derartige starke Abweichung verantwortlich zu machen wäre? (Sie sind ebenso hypothetisch wie die „unter einem sehr spitzen Winkel auf das Wasser auftreffenden Luftstöße“, denen nach der Theorie der Gebrüder *Weber* die Meereswellen ihre Entstehung verdanken sollen; wobei also die Welle ebenfalls eine Art Übergangskurve darstellt.) Wo finden sich die von einer solchen Störung aus flußabwärts in gesetzmäßiger Progression abnehmenden und ersterbenden Pendelungen? Sogar der physikalische Versuch ist hier wenig ermutigend. *F. M. Exner* (Wiener S-B.1919 p.12ff.) ließ in eine künstliche gerade Flußrinne Wasser unter einem seitlichen Winkel von 45°, später sogar 90°, einlaufen. Die Bedingungen

der Theorie waren also vollauf gegeben. Trotzdem konnte nur theoretische Voreingenommenheit das, was sich bildete, als 'Mäander' ansprechen. Das Wasser suchte, wie zu erwarten, lediglich die unvermittelte knickartige Richtungsänderung kurvenartig auszurunden. Da sich die Ausgleichskurve jedoch zugleich an dem vorgezogenen geradlinigen Bett orientieren mußte, nahm sie eine gewundene Form an. Im anderen Fall wären überhaupt keine Windungen entstanden. Nach 2—3 solcher Windungen hatte sich das Wasser bereits in die neue Laufrichtung hineingefunden. Eine große Kurve, zwei kleinere flußabwärts, dann gerader Verlauf. Von einer bestimmten 'Wellenlänge' oder gar einer 'Gürtelbreite' konnte hier überhaupt keine Rede sein. Weder ein 'Fortzeugen', noch ein Wandern der ausgebildeten Windungen talabwärts fand statt. Auch von einer 'Wachstumstendenz' war nichts zu spüren. Obwohl die Ursache der Windungen durchaus nicht geringfügig war, blieb es bei diesen kümmerlichen Ausgleichskrümmungen, mochte der Versuch auch noch so lange fortgesetzt werden. Wie *F. M. Emner* diese klaren Versuchsergebnisse zu einer Bestätigung der Pendeltheorie umdeuten kann, ist mir unerfindlich. Lehrreich ist in diesem Zusammenhange ein Versuch von *R. F. Griggs* (1906). Ein Regengewässer wurde in ein vorgerichtetes Bett geleitet. „Die vorgebildeten (!) Mäander hatten alle Halbkreisform und denselben Radius, boten also für den Fluß überall gleichmäßige Bedingungen.“ Das Ergebnis war das zu erwartende: Deutliches Bestreben des Flusses, sich der unnatürlichen, aufgezwungenen Bettform zu entledigen, bunter Wechsel von Ablagerung und Abtragung, Durchbrechung der Kurvenhalse usw., also Tendenz zum gestreckten Lauf. Kein Wunder, denn das Wasser ist ein 'Strecker'! Auch *Griggs* verschließt sich den Folgerungen seiner Versuche. — Auch *H. Engels* (1921 p.219) stellte, nach dem Vorgange von *J. Thomson* (Proc. Roy. Soc. Lo. 1877/78 p.356; vgl. Ebda. 1876/77 p.5ff.), seine Modellversuche im Flußbaulaboratorium Dresden mit bereits geschlängelten Modellflüssen an. Sie galten freilich mehr dem Studium der Quercirkulationen. Auf den so naheliegenden Gedanken, die Selbstentwicklung von Mäandern aus einer geraden Laufstrecke mit beweglicher Sohle zu verfolgen, ist wohl noch niemand gekommen. Es bestätigt sich auch hier wieder, daß ein Experiment gewöhnlich erst dann unternommen wird, wenn die Theorie seinen Verlauf bereits vorauszusagen und eine Erklärung hierfür zu bieten vermag.

Auch zu der Verbreitung der Mäander befindet sich die Pendeltheorie in einem auffallenden Widerspruch. *W. S. Tower* (1904 p.591f.) und *R. F. Griggs* (1906) wiesen bereits darauf hin, daß nach der Theorie die Flüsse mit starkem Gefälle und hoher Strömungs-

geschwindigkeit auch eine entsprechend kräftige Mäanderentwicklung zeigen müßten, während die Beobachtung doch das Gegenteil zeige.

Verfehlt ist schließlich die Auffassung von der Wirksamkeit des 'Stromstriches'. Letzterer ist lediglich die geometrische 'Linie größter Stromgeschwindigkeit', kein nach der Peripherie hin agierendes, autonom wirkendes zentrales Kraftbündel. Der 'Stromstrich' erscheint in der Literatur gerne animistisch verselbständigt, als ein launenhafter, allerorten Anstoß erregender Flußgott, und Seitenerosion als seine exzentrische Tochter. Ihm braucht man nur, wie man getan hat, die 'Tendenz' zuzuschreiben, immer der Außenseite der Kurven anzuliegen, um das Mäanderproblem mit einem Schlage zu lösen. Kein Wunder, daß schon *J. Thomson* (Proc.Roy.Soc.Lo.1876/77) die Lehre vom hin- und herprallenden Stromstrich als „rough notion“ von Dilettanten bezeichnete.

Der mit viel mathematischem Scharfsinn unternommene Versuch *F. M. Exners* (Wiener S-B.1919), die alte Pendelungstheorie durch eine quantitative Analyse zu vertiefen, kam reichlich post festum. Schon *Cholnoky* (1907 p.137) erkannte das Unzutreffende des Vergleiches mit der in einem trogartigen Bette dahinrollenden Kugel und des Vergleiches mit einem Pendel, dessen sich bes. amerikanische Hydrologen und Geophysiker bedienten, um auf ihnen ihre Theorie schwingender Fortpflanzung aus Urkrümmungen aufzubauen. Der eigenartige Gedanke bei *F. M. Exner*, die Mäanderbildung aus fortgetragenen Spiegelschwankungen zu erklären, stammt wohl aus derselben Quelle, durch die auch *O. Baschin* auf abwegige Gedanken geriet. *A. Hofmann* schreibt in seinem bereits erwähnten Aufsatz (1917 p.677ff.): „Wir hätten damit ein Oszillieren des Wassers um eine in der Längsrichtung des Stromes liegende Achse, wobei infolge der talabwärts gerichteten Bewegung des Gesamtstromes eine scheinbar schlangenförmige Bewegung resultiert.“ Die Gedankenbrücke zu den Mäanderserpentinen ist hier leicht geschlagen. So ergänzt *Exner* das Bild der in pendelartigen Schwingungen abrollenden Kugel durch das fortgetragener Querschwingungen. „Da auf der konkaven Seite der Flußwindungen, wo das Ufer ausgehöhlt wird, der Wasserspiegel vermöge der Zentrifugalkraft stets etwas höher stehen muß als auf dem konvexen Ufer, so ist die Grunderscheinung der stehenden Welle oder Seiche, die Spiegelschwankung, gegeben . . . Die Schwingungsdauer quer zum Flusse läßt sich aus der Formel für die Seiches berechnen . . .“ (Ebda. p.1455). Und nun folgen seitenlange Berechnungen, die zudem, wie eine Nachprüfung durch dreidimensionale zeichnerische Darstellung ergibt, infolge Vermischung der beiden physikalischen Bilder nicht ohne innere Widersprüche sind.

Die *Exnerschen* Mäander „haben nach ihrer Entstehung aus fortgetragenen Querschwingungen reine Sinusform“. Die Mannigfaltigkeit der natürlichen Mäanderformen mit ihren bald flachen und gestreckten, bald scharfen und rückläufigen, Schlingenhälsen und Durchbrüche schaffenden Kurven wird vergewaltigt durch ein totes geometrisches Schema. Der Leser wird beruhigt durch den Hinweis auf die notwendige Vernachlässigung von Nebenfaktoren, die einer „einfachen Theorie“ und einer „kurzgefaßten Betrachtungsweise“ nicht zur Last gelegt werden dürfe. „Eine wesentliche Schwierigkeit kann daher in dieser Unstimmigkeit der Theorie nicht gesehen werden.“ Den Berechnungen an Hand der Karte werden einfach die Mittelwerte zugrunde gelegt. Die schreienden Unstimmigkeiten zwischen Beobachtung und Theorie (Abweichungen bis zum 2—4fachen des errechneten Wertes) werden auf das Konto der „turbulenten Bewegung des fließenden Wassers“ gesetzt.

Zusammenfassung:

Die Möglichkeiten der Entstehung einer gekrümmten Laufstrecke sind überaus zahlreich, ebenso wie die der Entstehung einer wellenförmigen Wasseroberfläche. Die Verwendung des Begriffes 'Mäander' hat deshalb nur einen Sinn, wenn man ihn auf bestimmte Arten von Flußwindungen beschränkt, für die eine elementare und einheitliche Entstehungsursache angenommen oder wenigstens vermutet werden kann. 'Gezwungene Mäander' (im physikalischen Sinne) sind nichts anderes als Krümmungen. Bei der Mosel entfaltet sich der Vorgang der Mäandrierung in einem gegebenen System von Krümmungen. Unser Interesse ist im vorliegenden ausschließlich der Theorie der 'freien Mäander' (im physikalischen Sinne) zugewandt. Besonders reizvoll ist es, einen bestimmten Gedankengang durch die Theorien der verschiedenen Wellenphänomene hindurch zu verfolgen, wie dies im vorstehenden versucht wurde. Die sich dabei ergebenden Übereinstimmungen sind umso bemerkenswerter, als die betr. Phänomene den verschiedensten Stoffgebieten angehören.

In systematischer Gruppierung liefern die vorhandenen Theorien folgende gedachte Möglichkeiten der Entstehung von Flußmäandern:

1. durch äußere mechanische Einwirkungen, wie einmündende Nebenflüsse, unregelmäßige Gesteinsbeschaffenheit usw.;
2. durch Umformung gegebener Krümmungen mittelst Abrundung und gegenseitigen Ausgleich;
3. durch wellenförmige Ausbuchtung des Flusses mittelst Druck oder Stau der Wassermassen in der Flußrichtung;

4. a) durch die spiralförmige Fließform der Stromfäden,
 b) durch den pulsierenden Charakter des natürlichen Fließens,
 c) durch den oszillatorischen Charakter der Strömungsbewegungen überhaupt;
5. durch die Tendenz zur Stabilität, insbesondere zur Herbeiführung des Gleichgewichtsgefälles;
6. durch die Tendenz zur größtmöglichen 'Ausnutzung' der lebendigen Energie des Flusses;
7. durch die Tendenz zur Konzentrierung der Energie an bestimmten Stellen zwecks Erzielung größerer Wirkungen;
8. durch die leichte Ablenkbarkeit bei schwachem Gefälle durch Hindernisse;
9. durch die Vergrößerung minimaler Anfangskrümmungen auf dem Wege der genetischen 'Weiterentwicklung' oder der zwangsläufigen 'Selbstverstärkung'. (Auch die hierbei herangezogene sog. 'Zentrifugalkraft' entwickelt und steigert sich durch ihre eigene Tätigkeit.)
10. durch die pendelnde Bewegung des Stromstriches. Das Pendeln setzt an einer bestimmten Störungsstelle ein und pflanzt sich dann flußabwärts fort. *F. M. Exner* ergänzt diese Theorie durch die Annahme fortgetragener Querschwingungen. —

Die letztgenannte Theorie faßt also die Bewegungsverhältnisse des mäandrierenden Flußlaufes auf als ein periodisches Pendeln zwischen zwei Grenzzuständen. Wir mußten diese Auffassung ablehnen. Die Verschiedenheit der 'rhythmischen' von den 'periodischen' Vorgängen zusammenfassend zu zeigen, ist die Aufgabe des nächsten Kapitels.

XVI.

Rhythmus und Periodizität.

Wie man die Begriffe 'Form' und 'Gestalt' unbedenklich nebeneinander verwendet, so pflegt der wissenschaftliche Sprachgebrauch auch zwischen 'rhythmischen' und 'periodischen' Vorgängen keinen Unterschied zu machen¹⁾. Der laxer Sprachgebrauch ist auch hier nur ein Spiegel der theoretischen Unklarheit. Wir werden im folgenden, indem wir eine Reihe echt periodischer Vorgänge vorführen, Gelegenheit nehmen, die Grenzlinie zwischen den beiden Geschehenstypen scharf und konkret zu ziehen.

¹⁾ Vgl. z. B. W. Roux, Terminologie d. Entwicklungsmechanik. 1912. Artikel „Gestalt“; Schneiders Handwbt. d. Botanik. 2.A.1917. Artikel „Rhythmus“ und „Periodizität“.

Von den Fällen äußerer (heteronomer) Periodizität, bei denen die regelmäßige Wiederkehr von Etwas in bestimmter Zeit von seiten der Umwelt durch periodischen Wechsel irgendwelcher Bedingungen induziert ist, wollen wir hier absehen. Hierher würde z. B. gehören die von dem Wechsel der Jahreszeiten usw. induzierte Periodizität des Wachstums bei Pflanzen und Tieren, die sich in den Wachstumsringen an Baumstämmen, an Muschel- und Schneckenschalen, Knochen und Zähnen äußert. Würden wir die *Liesegangschen* Ringstrukturen dadurch erzeugen, daß wir hintereinander mehrere Tropfen der Reagenzien auf die gleiche Stelle setzen (*Liesegang* 1913 p.84), so hätten wir auch hier äußere Periodizität. Das gleiche gilt für die geologischen Schichtungen und Bänderungen, die durch unterbrochene Absätze aus Wasser, Magma und Luft, durch Rutschen und Fließen usw. zustande kommen. Bei den Gletschern gilt es, zwischen der äußeren Periodizität der Firnschichtung und der inneren Periodizität der Bewegungsschichtung zu scheiden. Die regelmäßigen Reihen der oberflächlichen Schuttbänder (Ogiven) auf Gletschern sind nach *Tyndall* (*Die Gletscher der Alpen*. 1898 p.458) ein Ausdruck des, regelmäßigen Schwankungen unterworfenen, Anwachsens des Gletschers. — Wird ein schwingungsfähiges physikalisches Gebilde äußeren Einwirkungen unterworfen, deren Stärke periodisch schwankt, so vollführt es unter dem Zwange der äußeren oder eingepprägten Kräfte 'erzwungene Schwingungen' im Gegensatz zu den freien oder natürlichen oder Eigenschwingungen, welche das System ohne diesen Zwang, sich selbst überlassen, nur unter der Wirkung seiner inneren Kräfte ausführt.

Theoretisches Interesse erwecken erst die Geschehensabläufe mit innerer (autonomer) Periodizität. Bei ihnen kommt ein Ansprechen auf periodische Beeinflussungen von außen nicht in Frage; vielmehr findet eine Selbstdifferenzierung statt, die wir zur Unterscheidung von der 'rhythmischen' als 'periodile Differenzierung' bezeichnen wollen. Während jene sich simultan-räumlich in 'dynamischen Systemen' (physischen Gestalten) abspielt, stellt diese eine sukzessiv-zeitliche Kette auf- und auseinanderfolgender gleicher Geschehensglieder dar. Führen wir z. B. einen Violinbogen gleichmäßig über eine mit Kolophonium²⁾ bestrichene Saite,

²⁾ Wie bei den Reibungswellen auf Wasser usw. handelt es sich auch hier darum, daß zwei Medien zueinander in einen engen Haftkontakt treten. Wird dieser durch eine Zwischenschicht, z. B. Öl, aufgehoben, so unterbleibt die Differenzierung hier wie dort.

so bildet sich auf dem Wege der periodilen Differenzierung eine Sukzession gleicher Geschehensglieder von folgendem Typus: 1. Anhaften der Saite an dem Bogen. 2. Anwachsen der 'Haftspannung' bis zu einer Maximalgrenze. 3. Plötzliches Sichlosreißen und Zurückschwingen der Saite. — Wiederholung des Vorganges. —

Wir werden den Vorgang demnach charakterisieren als periodische Überwindung von Haftspannungen. (Vgl. hierzu ausführlich *Barkhausen* i.Handwtb.d.Nat.8.1913.p.1149ff.) Die Geschehensglieder reihen sich einsinnig-linear aneinander, während bei der rhythmischen Differenzierung die einzelnen 'Momente' sich gegenseitig 'im Ganzen tragen' und jedes von ihnen um das andere dynamisch 'weiß'. Dieser grundlegende Unterschied ist vielfach verkannt worden. Unsere rhythmischen Phänomene wurden zu 'periodischen' Vorgängen umgedeutet. Und so hat auch in ihre Theorienbildung die Vorstellung von einer periodischen Überwindung von Haftspannungen Eingang gefunden. Als Analogon der Rippelbildung glaubt *Baschin* (Die Naturwiss.6.1919.p.521f.) auf das periodische Abgleiten des angefeuchteten Daumens auf der Fensterscheibe oder Tischplatte hinweisen zu dürfen. Die Riffelbildung auf Schienen (Vgl. Kap. II!) möchte *A. Wichert* (1921) auf „Reibschwingungen“ zurückführen. Das durch sie hervorgerufene „absatzweise Gleiten“ soll die „Vorbedingung“ für eine „wellenförmige Abnutzung“ liefern, an deren Ausgestaltung dann auch „andere Faktoren“ mitbeteiligt sind. Um die der Wirklichkeit entsprechende Riffelbreite herauszubekommen, läßt *Wichert* in den Rädern mehrere in der Phase gegeneinander versetzte Schwingungen einander überlagert sein. „Reibschwingungen“ sind nach *Wichert* „alle periodischen Bewegungen eines mit Masse behafteten Körpers, der auf einem anderen gleitet oder an welchem ein anderer Körper entlang gerieben wird“. „Der auf der Saite eines Streichinstrumentes erzeugte Ton, das Knarren der Türe, das Kreischen der Bremsklötze und das Pfeifen heißgelaufener Achsen von Eisenbahnfahrzeugen sind Folgen von Reibschwingungen.“ — Schon die Theorie der Wasserwellen von *Benjamin Franklin* (zit. *KrümmeI* II p.59) basiert auf der Vorstellung von einem periodischen Anhaften und Wiederabgleiten des Windes auf der Wasseroberfläche. Die oberflächlichen Wasserteilchen haften der Luft zunächst an, können ihr jedoch nicht mit gleicher Geschwindigkeit folgen, da sie von den tieferen Wasserschichten zurückgehalten werden. „Die Luft reißt sich also, wenn der Druck der nachfolgenden Luft einen gewissen Grad erreicht hat, von den Wasserteilchen los, an denen sie hafteten, und gleitet über das Wasser hin, bis die Spannung so vermindert ist, daß die Luft von neuem, während sie sich nur langsamer fortbewegt, am Wasser

zu haften anfängt und sich die erwähnte Erscheinung wiederholt.“ — Wir wiesen jedoch bereits darauf hin (oben Kap. XII f.: „Abformung“), daß die Annahme formbildender kurzperiodischer Schwankungen der untersten Luftschichten an der Beobachtung keine Stütze findet. Aus demselben Grunde müssen wir auch eine auf *Helmholtz* zurückgeführte Theorie ablehnen, die die Wasserwellen in ihrem Anfangsstadium mit kurzperiodischen Druckschwankungen der unteren Luftschichten in Zusammenhang bringt. Man denkt an eine periodische Druckverminderung durch Saugwirkung nach dem Prinzip des Vakuumzerstäubers. „Der über das Wasser hinstreichende Luftstrom wird in seinen unteren Teilen durch Reibung aufgehalten; dadurch üben die höher gelegenen Luftschichten eine saugende Wirkung auf die darunter befindlichen, dem Wasser unmittelbar aufliegenden Schichten aus. Die Folge davon ist, daß der Druck, den die Luft auf das Wasser ausübt, an verschiedenen Stellen (!) in unregelmäßiger Weise (!) vermindert wird, die Bedingung für ein stabiles Gleichgewicht an der Grenzfläche von Wasser und Luft ist gestört und das Wasser muß nach oben ausweichen.“ Und so bildet sich dann eine große Zahl kleiner unregelmäßiger Wellen. (v. *Larisch-Moennich* 1925 p. 4 u. 8; vgl. *Krümmel* II.1911.p.62!)

Immerhin erscheint uns die Auffassung als 'periodisches Elastizitätsphänomen' wenigstens auf die Erscheinung des wogenden Kornfeldes und der „langen, über geschlossene Waldgebiete dahineilenden Wogenzüge“ (*O. Baschin*) anwendbar, die man so gerne als Beispiel einer '*Helmholtz*schen Wellenfläche' anführt. Wir gehen von der einfachsten Annahme eines gleichmäßig wehenden, nicht turbulenten oder böigen Windes aus (vgl. dagegen *R. Seeliger* u. *E. Bräuer* 1918 p.33), oder besser gesagt, wir rechnen mit der Möglichkeit, daß die 'Turbulenz' nicht der für das normale Phänomen morphologisch entscheidende Faktor ist. Ferner rechnen wir mit dem Vorhandensein eines auflastenden Winddruckes auf den elastisch nachgebenden Halmen und der zwischen ihnen ruhenden Luftschicht. Die Bedingungen für die Entwicklung einer periodischen Differenzierung sind dann gegeben: die niedergedrückten Halme schwingen elastisch zurück, zugleich die von ihnen 'versteifte' Luftschicht, anderseits schwingt auch die auflastende Windschicht in elastischen Verdichtungen und Verdünnungen.

Ist diese Auffassung richtig, so haben wir hiermit zugleich ein Beispiel für eine weitere Variante der periodischen Vorgänge: Das auflagernde Medium gleitet nicht einfach über das unterlagernde Medium hinweg, sondern es sinkt bei der Bewegung etwas in die Grenzzone des plastisch nachgebenden unterlagernden Mediums ein und schiebt

die so erfaßten Partien eine Strecke weit in der Bewegungsrichtung vor sich her, wodurch sich dann eine periodische Aufeinanderfolge von Materialverdrängung und Materialanhäufung, von Verdünnung und Verdichtung herausbildet. Nach *F. Märtens* (1913 Nr.28; 1919 p.120) ist dieser Fall bei den Schienenriffeln gegeben. Da der an der Oberfläche liegende Schienenstoff weicher ist als der Kern, so ist das Rad beim Laufe bestrebt, den Schienenstoff an der Lauffläche vor sich herzuschieben. Dieses Schieben beginnt an Stellen, wo „durch irgendeine äußere Ursache“ das Rad sich in den Schienenstoff eindrücken kann. Der Schienenstoff gibt zunächst elastisch nach, bis an einer bestimmten Stelle die Stauung (!) so stark wird, daß eine Überanstrengung über die Fließgrenze stattfindet. Wird nun aber Eisen in kaltem Zustande über seine Fließgrenze hinaus beansprucht, so erfährt es Gefügeveränderungen, die den überanstrengten Stellen eine größere Härte verleihen. Diese Stellen, die sich durch größere Härte auszeichnen, bilden dann die Riffeln. Der durch das Gleiten im Riffeltale abgeschliffene Stoff ist in den Berg eingewalzt, über dem dann ein Rollen des Rades stattfindet. — So stoßen wir auch hier wieder auf das wichtige Grundproblem: 'periodile' oder 'rhythmische' Differenzierung? Wegen des engen Übereinstimmung der Schienenriffeln mit den Riffelbildungen zwischen andersartigen Medien neigen wir der letzteren Auffassung zu. (Vgl. Kap. II, I, XVIII u. ö.)

Auch der Streit um die Theorie der *Liesegang'schen Ringe* läuft im wesentlichen auf die Entscheidung der Frage hinaus: Periodile oder rhythmische Differenzierung? Nach der *Wi. Ostwald'schen* Übersättigungstheorie (*Liesegang* 1913 p.92) wird die wandernde diffundierende Lösung „zeitweise durch Erreichung der metastabilen Grenze überrascht, und das Übersättigte kristallisiert dann in Form einer Linie aus“. Die Bildung der zweiten Linie hat das Vorhandensein der ersten zur Voraussetzung. Diese ist schuld, weshalb sich die zweite getrennt von ihr bildet. „So geht dies immer weiter fort.“ (Ebenda p.89 u. 91.) Der Vorgang wird also als periodische Überschreitung einer Übersättigungsgrenze gedeutet. Es gelang jedoch *Hatschek* (*Koll.Zs.* 10,124.1912.) nachzuweisen, daß die Bänderung auch eintritt, wenn die Bildung einer übersättigten Lösung ausgeschlossen ist, und zwar unabhängig von etwa vorhandenen Keimen! Zur Aufstellung einer positiven Gegentheorie fehlte jedoch die naturphilosophische Grundlage. Wenn auch — bedingt durch die Wanderungsgeschwindigkeit und die Konzentrationsabnahme der diffundierenden Lösung — der Zeitpunkt der Ausbildung für jeden folgenden Ring etwas später liegt, und so sukzessiv ein Ring sich an den anderen schließt, so ist das Geschehen nichtsdestoweniger simultan-kausal, indem das Systemganze nach in-

härenten Gesetzen die — zunächst noch gleichmäßig in Lösung befindlichen — Moleküle sich an bestimmten Stellen zusammenlagern läßt, den Ringen so ihren Platz und ihr Material anweisend. Wir verweisen auch hier wieder auf das Beispiel der Sandrippeln im geschaukelten Wasserbassin, die sich deshalb von der Mitte aus in sukzessiver Aneinanderreihung entwickeln, weil die relative Geschwindigkeit von der Mitte nach den Seiten hin ein bestimmtes Gefälle aufweist. Welcher Elementarvorgang bewirkt den rhythmischen Zusammentritt von Molekülen in einem Systemganzen? Hier liegt das Problem³⁾.

Bei den meisten Vorgängen mit innerer Periodizität bildet die Elastizität die Kraft, die das Medium in seinen normalen, spannungslosen Zustand zurücktreibt; es handelt sich also fast durchweg um periodische Überschreitung maximaler Spannungen. Auch die Stoßwellen (Gravitationswellen) auf Wasseroberflächen sind, im Gegensatz zu den rhythmischen Reibungswellen, ein echt periodisches Geschehen. Doch wirkt hier die Schwere als rücktreibende Kraft, die den normalen, ebenen Wasserspiegel herzustellen sucht. Elastische Schubkräfte, die der Bewegung benachbarter Teile aneinander vorbei entgegenwirken und sie damit weiterleiten könnten, kommen hier nicht in Betracht, auch nicht sonstige Materialeigenschaften. Die Ausbreitung der Schwerkraftwellen ist in Quecksilber dieselbe wie in Wasser. (*Barkhausen*, Schwingende Systeme. Handwbt.d.Nat.8.1913.p.1046.)

Die Verlaufskurve der Periodizität ist hier annähernd wellenförmig, wie auch bei den Schwerkraft-Schwingungen des Pendels und den elastischen Schwingungen der angeschlagenen Stimmgabel. Häufiger, ja geradezu charakteristisch für die periodischen Vorgänge ist ein gezackter Verlauf in der Form von Sägezähnen: Die Spannung wächst wiederholt langsam an, um dann nach Überschreitung der Maximalgrenze plötzlich abzubrechen. So bewegt sich z. B. die angestrichene Violine saite langsam hin, wenn sie am Bogen klebt, und sehr schnell zurück, wenn sie der Bogen losläßt. Geht das Anwachsen der Spannung mehr im Verborgenen ohne begleitende sinnfällige Bewegungen vor sich, wird also ein scheinbares Ruhestadium jedesmal von einer unvermittelten Spannungsauslösung unterbrochen, so haben wir den dritten Typus der Periodizität: die intermittierenden Vorgänge. Hierher gehören z. B. die Zungenpfeifen, bei denen die im Windrohr zusammengepreßte Luft periodisch den elastischen Zungenverschluß durchbricht. (Vgl. *v. Grützner*, Stimme u. Sprache. Handwbt.d.Nat.9.1913.p.629ff.)

³⁾ Vgl. auch die Bildung eines Systems von Dünenwällen bei gleichzeitig zurückweichender Strandlinie. (Solger 1910 p.43u.51.)

Es kommt also letzten Endes auf die Betrachtungsweise an, ob man einen Vorgang als zackenförmig oder als intermittierend anspricht. Die periodische Loslösung von Tropfen an der unteren Öffnung eines Flüssigkeit enthaltenden Rohres oder Gefäßes erscheint als intermittierend, wenn man an das von Pausen unterbrochene Fallen und Aufschlagen der Tropfen denkt, als zacken- bzw. wellenförmig, wenn man das allmähliche Längerwerden des Tropfens mit wachsendem Drucke, die darauf folgende Einschnürung und kugelige Lostrennung unter sofortigem Nachrücken eines nächsten hängenden Tropfens ins Auge faßt. Dasselbe gilt für den Fall, daß ein Ausflußrohr von einer federnden Platte von geeigneter Stärke verschlossen wird. Die Flüssigkeit entleert sich dann intermittierend. Der Flüssigkeitsdruck in der Röhre steigt dabei jedesmal bis zu einer gewissen maximalen Höhe an. Vgl. auch die sog. 'pulsierenden' chemischen Reaktionen (*Bredigsche Rhythmen*; zit. *E. Küster* 1913 p.104), bei denen z. B. Sauerstoffbläschen von einer Metalloberfläche in regelmäßigem Rhythmus aufsteigen. — Auch bei den intermittierend erfolgenden Eruptionen heißer oder kalter Springquellen (Geysir; Gesteins-Springquellen, Schlamm-sprudel usw.) ist es die periodische gewaltsame Entladung von Druckspannungen, die von einer ständigen Energiequelle gleichmäßig genährt werden. (Lit. s.: *S. Günther* ²II.1899.p.810f.,802f.; *E. Kayser* ⁶1921.I.p.438ff.; *K. Keilhack*, Grundwasser u. Quellen 1912 p.339ff.!) Nach der Ansicht einiger Forscher vermag die in dem einfach-zyllindrischen Steigrohr befindliche Flüssigkeit die automatische Verschlößbildung selbst zu besorgen, nach anderen wird der explosionsartig sich entladende Überdruck (bzw. die Überhitzung) erst durch eine geeignete Anordnung des Eruptionskanals herbeigeführt. Man denkt an Verzweigungen, Knickstellen, Einschnürungen, die die Aufgabe von hydraulischen Verschlüssen übernehmen. — Die merkwürdige Erscheinung der 'Bore' oder der 'Sprungwelle' der Flußaestuarie (bsd. der Seine und des Severn) soll gleichfalls auf eine plötzliche Verengung des Durchflußprofils zurückgehen. „Ihre Bildung ist geknüpft an eine ausgeprägte Verringerung der Wassertiefe im Flußbette oder eine sehr starke seitliche Verengung, verbunden mit einer scharfen Biegung des Bettes.“ (*K. Andree* II.1920.p.117ff.; vgl. *Krömmel* II.1911.p.303.)

Das Auftreten der periodilen Differenzierung bei Elastizitätsphänomenen ist ebenso wie das der rhythmischen Differenzierung bei den Reibungsphänomenen an bestimmte Grenzbedingungen geknüpft. Bei zu starkem oder bei zu schwachem Anblasen schweigt die Zungenpfeife still. Die Telephondrähte singen nur bei ganz gleichmäßigem, schwachem Winde. Ganz allgemein entstehen bei zu schnellen Bewegungen keine Schwingungen, auch nicht bei zu langsamen. — Wie

das erste Einsetzen der rhythmischen, wird auch das der periodilen Differenzierung durch die Abwesenheit von kleinen Anfangsstörungen (Anstößen) erschwert und hinausgezögert. (Vgl. *Barkhausen* i. Handwbt. d. Nat. 8. 1913. p. 1147, 1150f.)

All dies trifft namentlich zu bei den als 'Pulsationen' bezeichneten eigentümlichen Schwankungserscheinungen. Sie treten dort auf, wo Körper in sich selbst als Medien sich bewegen, bzw. ein Medium sich in oder an einem ähnlichen Medium bewegt. Im Gegensatz zu verwandten rhythmischen Erscheinungen handelt es sich hier um die „ineinandergeordnete Bewegung eines Systems von Massengebilden“ (*Rümelin* 1913 p. 92), die durch „elastische Kräfte“ deformiert werden, d. h. also um elastische Spannungs- oder Druckschwingungen, die auf die Haftwirkung der äußeren Reibung, genauer: auf laminare Schubkräfte hin einsetzen. Die Pulsationen bleiben aus, wo die Bewegung in einem Medium erfolgt, das gegen die Körpermasse nahezu vernachlässigt werden kann, wie beim freien Fall, beim Wurf, rollenden Rad usw. Das bisher ziemlich vernachlässigte Studium der Pulsationserscheinungen verdient wegen der Grenzziehung zwischen ihnen und den rhythmischen Reibungsphänomenen besondere Sorgfalt. Die Pulsationen werden namentlich bei sich bewegenden Flüssigkeiten, Dämpfen und Gasen beobachtet. Bekannt ist die Erscheinung des Rauches, der bei Windstille aus Fabrikschornsteinen als wirbliches Band aufsteigt. (*Rümelin* 1913 p. 24.) Das gleiche Bild bietet sich, wenn man aus einer in Wasser getauchten Kapillare einen Strahl gefärbter Flüssigkeit mit einer, im Vergleich zur Strömung des Wassers, höheren Ausflußgeschwindigkeit austreten läßt. (*Schoklitsch* 1920 p. 905; s. a. *Rümelin* 1913 p. 23.) — Fließendes Wasser zeigt innerhalb bestimmter Grenzbedingungen leicht den Zustand des „Ditropismus“. (*Rümelin* 1913; vgl. oben S. 211.) Es lassen sich an ihm ein „Fließkörper“ und ein „Fließmedium“ unterscheiden, deren relative Bewegung Pulsationen hervorruft. Für die natürlichen Flußläufe stellt *Jasmund* (1911 p. 339f.) fest: „Die Pulsation ist am schwächsten in der Oberfläche, am stärksten in der Sohle (!), sie ist stärker in der Nähe des Ufers (!) als im Stromstrich, merkbarer bei kleinen als bei großen Geschwindigkeiten, d. h. mit der Zunahme der Geschwindigkeit nimmt in ein und demselben Profil die Pulsation ab.“ Die Beobachtungen Rümelins beziehen sich auf breite und gerade Werkkanäle mit festen Wandungen (und natürlich ohne Geschiefbeführung). *Rümelin* gelangt zu folgenden Sätzen:

1. Die Pulsationszeit p oszilliert um einen konstanten Mittelwert, und zwar a) in einem Profilverpunkt, b) für ein und dieselbe Vertikale, c) für ein und dasselbe Querprofil; sie ist unabhängig von der horizontalen Geschwindigkeitsverteilung und von

der Lage des Stromstrichs (p.18). — *R.* schließt hieraus mit Recht auf das Gegebensein echter 'Schwingungen' und einer „irgendwie geordneten Bewegung eines ganzen Massensystems“ (p.21).

2. Die mittlere Pulsationszeit ist eine Funktion der mittleren Wassertiefe und der mittleren Geschwindigkeit (p.21 u.p.40).

3. Zyklonale Bewegung der Wirbelkörper ist nicht möglich (p.35).

4. „Die Wasserteilchen der äußersten Wirbelfäden eines Wirbelkörpers beschreiben beim Fließen sinusartige Kurven oder 'Fließlinien', deren Erzeugung aus der reinen Wälzlinie man sich durch beschleunigende bzw. verzögernde Kräfte denken kann. Ein Abbild dieser Beschleunigungen und Verzögerungen sind die Pulsationen.“ „Die Bewegung der Wirbelkörper gegeneinander beim Fließen ähnelt der Bewegung der einzelnen Glieder eines kriechenden Schlangenleibes“ (p.38).

5. Die Wirbelkörper haben eine mittlere Höhe von $\frac{2}{3}$ der mittleren Wassertiefe, und in der Fließrichtung besitzen die K. voneinander einen in der Schwingungsruehlage konstanten Abstand. Das obere Drittel der fließenden Wassermasse drückt auf die unteren, wälzenden Partien und wird durch diese mitgeführt.

Auch bei den sog. 'Wanderwellen' handelt es sich um elastische Eigenschwingungen des Wassers, die durch von der Wandreibung ausgehende laminare Schubkräfte erzeugt werden. Auch hier haben wir zunächst eine gleichförmige Bewegung, die, von einer bestimmten kritischen Grenze ab, sich in eine stoß- und schußweise Bewegung auflöst. Sie sind am besten zu beobachten in geraden Werkgerinnen oder Wildbachgerinnen von kastenförmigem Querschnitt bei geringer Wassertiefe, gleichmäßig geneigter, glatter Sohle und verhältnismäßig steilem Gefälle. Läßt man in ihnen Wasser stationär zuströmen, so bilden sich in kleinerer oder größerer Entfernung von der Zuströmungsstelle spontan 'Wanderwellen' aus. (Vgl. *Forchheimer* 1904 p.321f.; Ders., 1914 p.200—203; *V. Cornish* i.Geogr.Journ.29.1907.p.26, mit Abb. aus schweizer Bachrinnen; Ders., 1910.) *Forchheimer* schildert den Vorgang wie folgt:

„Zur künstlichen Hervorrufung genügt eine gerade Rinne, die, weil die Wellen zu ihrer Ausbildung eine gewisse Lauflänge erfordern, bei 0,16 oder mehr Gefälle mindestens 6 m lang sein soll.“ Oberhalb des Beginns der Wanderwellen liegt also stets eine Strecke mit ebenem Spiegel ('Anlaufeld', 'Startraum'!). Die deutlich erkennbaren Wellen entspringen nach der Vereinigung kaum bemerkbarer Schwellungen. „Eine höhere Welle holt eine niedrigere voranschreitende ein; ist dies geschehen, so trennen sich die beiden Wellen nicht wieder, sondern verschmelzen zu einer einzigen noch höheren, welche ent-

sprechend rascher ihren Weg fortsetzt.“ „Bei gleichförmigem Sohlengefälle nehmen die Wanderwellen während ihres Laufes allmählich an Schnelligkeit zu.“ „Bei vollständig ausgebildeten Wanderwellen kann die Wassertiefe nahezu Null werden . . . ; am Kopfe der steil abfallenden Welle rauscht dann eine Wassermenge, zu der im Laufe der Wanderung nur wenig neues Wasser hinzukommt, abwärts; das Wasser löst sich in einzelne während des Falles sich ausdehnende Zungen auf.“ „Die Bewegung ist also eine stoß- oder schußweise.“

Grenzbedingungen: Das Auftreten der Wanderwellen liegt zwischen einer unteren und oberen kritischen Grenze. Eine Verringerung des Gefälles verursacht eine Abnahme der Geschwindigkeit und unter Umständen sogar den Übergang zur gleichförmigen Wasserbewegung. Vergrößerung der Wassertiefe (also Annäherung an die Verhältnisse der natürlichen Wasserläufe) wirkt in demselben Sinne. In diesem Falle scheinen die Wanderwellen von den *Rümelinschen* 'Pulsationen' abgelöst zu werden. Charakteristisch für das Wanderwellenstadium ist anscheinend eine Zweidimensionalität der Bewegungsverhältnisse: In dem breit-flachen, rechteckigen Kastenprofil kommt die seitliche Wandreibung kaum in Betracht; die — infolge des großen Gefälles lebhaften — Differentialbewegungen verlaufen hier im wesentlichen parallel zum Boden des Gerinnes. — *Christen* (1903 p.132) erhielt stets Wellen, wenn er in seinem Werkkanal die Wassertiefe außerordentlich herabsetzen wollte. Nach den Versuchen von *Schoklitsch* (1920 p.916) treten Wanderwellen in glatten, seichten Gerinnen stets dann auf, wenn die mittlere Geschwindigkeit in der Nähe der kritischen liegt. — Die Erklärung, die *Forchheimer* für das Phänomen gibt, ist wenig überzeugend, auch die herangezogenen Analogien.

Nach *Krümmel* (II.1911.p.128) finden sich Wanderwellen auch am Strande. Der die Strandböschung wieder abwärts strömende Teil der Welle hat die Neigung, die Form der Wanderwelle anzunehmen. „Bei der Brandungswoge legen sie sich in Gestalt paralleler Falten senkrecht gegen die Richtung des abwärts strömenden Wassers, das, namentlich infolge des Sickerverlustes, nur in einer sehr seichten Schicht (!) noch vorhanden ist. Dies ist übrigens der einzige Fall, wo Wanderwellen im Meerwasser auftreten.“

Wir sahen an dem Beispiel der Springquellen, daß schon die einfachen Verhältnisse eines zylindrischen Steigrohres genügen, um den Druck periodisch bis zu einer Maximalgrenze ansteigen zu lassen, daß sich die Periodizität aber vielfach im Anschluß an örtliche Unregelmäßigkeiten entwickelt. Beispiele einer völlig 'freien' Ausbildung lieferten uns die 'Pulsationen' und 'Wanderwellen'. Dagegen scheinen die gelegentlich festzustellenden Spiegelschwankungen

auf Flüssen an die Stauwirkung von örtlichen Hindernissen geknüpft zu sein. Die von *Alb. Hofmann* (1917 p.677—679) bei Mehlem-Königswinter beobachteten Spiegelschwankungen des Rheinspiegels sind den theoretischen Bemühungen *Baschins* (vgl. dessen Notiz: Ebd. 33.1918.p.104, ferner i. Pet. Mitt. 1918 p.53) leider nicht entgangen⁴⁾. Nach der Vermutung *Alb. Hofmanns* handelt es sich um Spiegelschwankungen (nach Art der Seiches) um eine in der Längsrichtung des Stromes liegende Achse, „wobei infolge der talwärts gerichteten Bewegung des Gesamtstromes eine scheinbar schlangenförmige Bewegung resultiert“. Diese Auffassung steht im Einklang mit den trefflichen Beobachtungen *Vaughan Cornishs* (Progressive and stationary waves in rivers. Engineering.Lo.1907; Anz. i. Pet.Mitt. 1908; Ders., 1910.) Nach ihm entstehen stehende Wellen bei entsprechender Beschaffenheit des Flußbettes, namentlich, wenn Hindernisse zu Rückströmungen Anlaß geben, ebenso bei Wehren. Abwechselndes Heben und Senken des Spiegels wurde ferner nach *Forchheimer* (1904 p.339) an Einschnürungen und einspringenden Ecken offener Gerinne, nach *Kreuter* (Handb.d.Ing.-Wiss.Wasserbau³II,1.1900.p.193) auch an Gefällsbrüchen beobachtet, in denen sich das Wasser verlangsamt. Da die Bettgestaltung des Rheines gerade oberhalb Mehlem bekanntlich sehr unausgeglichen ist, wird es nicht schwer halten, die hier wirksamen Ursachen festzustellen.

Otto Baschin hat mit seinen „Analogien“ wirklich wenig Glück. Es ist nicht nur Verständnislosigkeit (*Baschin* i. Pet.Mitt.1918 p.53f.), die viele Forscher bisher abgehalten hat, das Flattern der Fahnen, das Pendeln des Stromstriches und die *Helmholtz*schen Wellen als Ausdruck eines und desselben „Gestaltungsgesetzes“ zu betrachten. Wir ziehen es vor, uns die treffliche Darstellung *Barkhausens* (Handwbt.d.Nat.8.1913.p.1151ff.) zu eigen zu machen:

„Das ruhige gleichmäßige Strömen der Luft um einen festen Körper herum ist nur bei ganz kleinen Geschwindigkeiten stabil. Bei größerer Geschwindigkeit bilden sich infolge der Reibung der Luft an dem festen Körper Wirbel aus, die periodischen Charakter besitzen. Bei einer im Winde

⁴⁾ Für *Baschin*, der auf der Suche nach Bestätigungen „seines (!) Gesetzes“ bei *Hofmann* das Wort „schlangenförmige Bewegung“ liest, ist es sofort ausgemacht, daß es natürlich nur jene „Pendelung des Stromstriches um seine Mittellage“ sein kann, von der in der morphologischen Literatur schon so oft die Rede war, ohne daß man sich etwas Rechtes darunter vorstellte. Bezeichnend ist es, daß die einleuchtende und wohl auch richtige Erklärung *Hofmanns*, die für alles Weitere auf den Weg der Beobachtung verweist, einfach beiseite geschoben wird, die geographische Anfrage nach der Verbreitung des Phänomens dagegen unbeantwortet bleibt.

flatternden Flagge (Fig. 12) ... bildet sich abwechselnd ein Wirbel auf der linken und auf der rechten Seite aus; dies Umspringen der Wirbel, das an sich auch von selbst eintritt, wird durch die Schwingungsbewegung in den richtigen Rhythmus gebracht.“ Das Phänomen der Abspaltung drehender Einzelwirbel bei der Strömung um einen Körper, die dann in regelmäßiger Reihe hinter dem Körper einherziehen, ist unter der Bezeichnung der *Kármánschen* Wirbel bekannt. Unter Umständen wird auch die allgemeine 'Turbulenz' oder Böigkeit des Windes für das Flattern der Wimpel und Fahnen, namentlich auch für das „Schlackern oder Vibrieren eines Segels, längs dessen Fläche der Wind entlangstreicht“ (*K. Andree* II. 1920. p. 13), verantwortlich sein.



(Barkhausen a. a. O. Fig. 12.)

'Schneiden' jeder Art pflegen das vorbeiströmende Medium in Schwingungen zu versetzen. Das Pfeifen des Sturmes im Tauwerk, sein Heulen durch enge Tür- und Fensterspalten, sein Pfeifen um ein Felsgrat oder um ein Hauseck, längs der Kupefenster eines Eisenbahnzuges sind bekannte Beispiele dafür. „Wenn ein Nachen mit gleichmäßiger Geschwindigkeit durch stehendes Wasser gezogen wird, wenn ein Dampfboot auf einem See fährt, so bilden sich am Bug pulsierende Wellen.“ (*Rümelin* 1913 p. 22.) — Vielfach vollführen die Schneiden selbst Eigenschwingungen, wie die bei gleichmäßigem, schwachem Winde singenden Telephondrähte und die in gleichmäßig fließendem Wasser eingerammten Pfähle.

H. King (1916 p. 199—202) untersuchte in der Libyschen Wüste die Entstehung von Rippeln im Lee von Hindernissen, hervorgerufen durch stehende Verdichtungs- und Verdünnungswellen im Luftstrom. Die entstandenen Rippeln unterschieden sich in Größe, Abstand und Form merklich von der gewöhnlichen Dünenrippelung. Die feste Position des Hindernisses hatte hier eine gleichfalls feste, unveränderliche Lage des ersten Schwingungsknotens und somit die Ausbildung stehender Schwingungen im Gefolge gehabt. Zur Bestätigung dieser Anschauung ließ *H. King* Rauch über ein aufgestelltes Brett hinwegstreichen.

Auf Grund der gewonnenen Einsicht in das Wesen der periodischen Vorgänge werden wir nunmehr um die richtige Einordnung gewisser geomorphologischer Erscheinungen nicht mehr verlegen sein.

Strömende Bewegungen werden häufig durch einen lokalen Widerstand in intermittierende verwandelt. Groß ist namentlich der Ein-

fluß, den Querschnittsverengerungen auf den Verlauf des Abflusses ausüben. Gletscherschwankungen können nach *M. v. Frey* (Zs. dt.u.öst.Alpenver. 14.1883.p.244ff., bes.p.253) durch die Sohlenreibung hervorgerufen sein, insofern als die Reibung „eine gleichförmige Bewegung in einen rhythmischen Wechsel von Beschleunigung und Verzögerung aufzulösen“ vermag. Stärkere Firnansammlungen in schnee reichen Wintern bewirken einen kaskadenartigen Abfluß des Eises nach dem Prinzip des hydraulischen Widders (Vgl. Anz.i.Geogr. Jahrb.10 p.53, u. *S. Günther* ²II.1899.)

An Küsten, deren Strandlinie landwärts zurückweicht, kommt es in gewissen Zwischenräumen zur (periodischen) Neubildung großer Wanderdünen, die wir dann in etwa gleichen Abständen hintereinander wandern sehen. Der Zeitpunkt für die Entstehung einer neuen Wanderdüne aus dem Sande der Küstendünen ist dann gekommen, wenn infolge des Zurückweichens der Strandlinie die ständigen Verletzungen der schützenden Pflanzendecke ein solches Ausmaß angenommen haben, daß größere wanderfähige Sandmassen in Bewegung gesetzt werden können. Letzteres kann nach Überschreitung einer gewissen 'Spannungsgrenze' sehr unvermittelt vor sich gehen. (*Solger* 1910 p.128.)

Kommt es in einem aus Schuttmassen oder weichen Gesteinen bestehenden Abhange zu Rutschungen, so vollziehen sich diese normalerweise langsam und gleichmäßig über einen längeren Zeitraum hin; die Bewegung kann aber auch periodisch sehr heftig werden und in den Zwischenzeiten fast ganz ruhen. „Ist der Abhang bewachsen, so ist oft die Ansammlung einer größeren Spannung (!) nötig, um die verfilzte Vegetationsdecke zu zerreißen, worauf dann ein heftiges Hervorquellen (!) der rutschenden Masse erfolgt.“ (*Philippson* II,2.1924.p.27.)

Der „Brandungsstrom“ wälzt sich „wie ein ziemlich schnell fließender Fluß“ an der Küste vorbei. „Längs einer geradlinigen Küste wird seine Wirkung wachsen, er wird sich immer tiefer in das Land einfressen, d. h. eine Bucht entstehen lassen. Bei weiterem Vordringen längs der Küste wird er das Wegschaffen des Materials nicht mehr bewältigen können, so daß ein Stück hinter der Bucht die Abtragung aufhört ... Es bleibt so ein Vorsprung stehen, an dem der Brandungsstrom frei ins Meer schießt und seinen Schutt ablädt. Dahinter wird er wieder von neuem entstehen u. s. f.“ (*H. Mortensen* 1921 p.11. Die futurische Ausdrucksweise erweckt jedoch den Verdacht des „bloß Gedachten“!)

Ein periodisches Sich-Entfernen des Flußschlauches von der Hauptgefällsrichtung treffen wir auch auf den Schuttkegeln von Wildbächen an. Überläßt man den Bach sich selbst, so pendelt er im

Laufe der Jahrhunderte auf seinem Schuttkegel hin und her und erhöht ihn regelmäßig in allen seinen Teilen. (Vgl. *Philippson* II, 2. 1924. p. 114.) An den Mündungs-Schwemmkegeln großer Flüsse läßt sich zuweilen die gleiche Erscheinung beobachten. Der Hwang-ho baut bald an dem einen, bald an dem anderen Flügel des Schuttkegels energischer und verläßt dann immer plötzlich den überentwickelten Flügel. (*E. v. Cholnoky*, Flußregulierung und Bodenmeliorationen in China. Budapest 1905; *Anz. i. Pet. Mitt.* 1906 p. 92.) — In den Flußmündungen an der friesischen Küste läßt sich eine periodische sprunghafte Zurücknahme der Fahrrinne als Abschluß eines langsamen Seitwärtsrückens feststellen. Die wandernden Sande der Küstenversetzung drängen die Rinnen hier z. B. nach rechts vor sich her, so daß der von links herankommende Flutstrom immer weiter ausholen muß, bis die maximale Lage erreicht ist, dann erfolgt ein Zurückspringen der Strömung. (*Jessen*, Die Verlegung der Flußmündungen und Gezeitentiefs, usw. 1922 p. 168; ebenso *Poppen* 1912 p. 352ff.)

Zusammenfassung:

Die 'rhythmischen' Phänomene zeigen auf den ersten Blick eine weitgehende Übereinstimmung mit bekannten 'periodischen' Vorgängen der Physik. Sie sind deshalb, wie wir an verschiedenen Beispielen zeigen konnten, von physikalischer Seite her auch vielfach als solche aufgefaßt worden. Es ergibt sich hieraus die Notwendigkeit, auch diese 'periodischen' Vorgänge einmal im Zusammenhange zu betrachten, unter besonderer Berücksichtigung von Vorgängen aus dem Gebiete der physikalischen Erdkunde. Aus einer solchen Gegenüberstellung des rhythmischen und des periodischen Geschehens ergibt sich dann mit Evidenz ihre physikalische Verschiedenartigkeit; sie hilft zugleich die besondere Eigenart beider schärfer zu erfassen.

Die Fälle äußerer (heteronomer) Periodizität bleiben außer Betracht, da sie ein besonderes theoretisches Interesse nicht beanspruchen. Aufgeführt werden nur Fälle mit innerer (autonomer) Periodizität. Eine solche liegt vor, wenn ein sich selbst überlassenes System unter der Wirkung seiner inneren Kräfte 'freie Schwingungen' oder 'Eigenschwingungen' ausführt. Es läßt sich hier von 'periodiler Selbstdifferenzierung' sprechen. Der physikalische Vorgang ist der der periodischen Überschreitung maximaler Spannungen (bsd. 'Haftspannungen') bei elastischen Medien. Im Gegensatz zu den rhythmischen Phänomenen reihen sich hier die Geschehensglieder einsinnig-linear aneinander, die einzelnen 'Momente' tragen sich nicht

gegenseitig 'im Ganzen'. — Die Verlaufskurve der Periodizität ist wellenförmig oder sägezahnförmig gezackt: Die Spannung wächst langsam an, um dann plötzlich abzubrechen. Ob man den Vorgang als 'intermittierend' anspricht, hängt von der Betrachtungsweise ab. Begünstigend auf die Ausbildung der periodilen Differenzierung wirken lokale Unregelmäßigkeiten, wie z. B. plötzliche Verengerungen des Durchflußprofils bei den Springquellen oder den fortgetragenen Spiegelschwankungen auf Flüssen. Völlige Abwesenheit von Anfangsstörungen zögert die Differenzierung hinaus. Das Auftreten der periodilen Differenzierung ist gleichfalls an Grenzbedingungen gebunden.

Dies gilt besonders für die 'Pulsationen'. Sie treten dort auf, wo Körper in sich selbst als Medien sich bewegen, bzw. ein Medium sich in oder an einem ähnlichen Medium bewegt. Innerhalb bestimmter Grenzbedingungen kommt es dann zur 'ineinandergeordneten Bewegung eines Systems von Massengebilden', die durch elastische Kräfte deformiert werden. Die Pulsationen sind hiernach aufzufassen als elastische Spannungs- oder Druckschwingungen, die von laminaren Schubkräften genährt werden. Fließendes Wasser zeigt leicht den Zustand des 'Ditropismus' (*Rümelin*). Es lassen sich an ihm ein 'Fließkörper' und ein 'Fließmedium' unterscheiden, deren relative Bewegung Pulsationen hervorruft. — Elastische Eigenschwingungen des Wassers, hervorgerufen durch laminare Schubkräfte, sind auch die sog. *Wanderwellen*. Auch hier geht die gleichförmige Bewegung spontan über in eine stoß- und schußweise. — Das *Flattern der Fahnen* bei ruhigem Winde ist ein beliebtes Beispiel der *Kymatologen*. Es erklärt sich jedoch zwanglos aus der periodischen Abspaltung drehender Einzelwirbel bei der Strömung um einen Körper. Bei den pulsierenden Wellen am Bug der Schiffe spielt der Bug die Rolle einer 'Schneide', die das vorbeiströmende Medium in Schwingungen versetzt. — 'Periodische' Vorgänge (im kausal-dynamischen Sinne) sind ferner *Gletscherschwankungen*, soweit sie dadurch entstehen, daß die von der Bettreibung ausgehenden verzögernden Kräfte periodisch gewaltsam überwunden werden. Ferner bei gewissen Flußmündungen die *sprunghafte Zurücknahme der Fahrrinne* als Abschluß eines langsamen Seitwärtsrückens.

Zweck vorstehender Ausführungen war die Abgrenzung der 'rhythmischen' Phänomene gegen die 'periodischen' Vorgänge. Aufgabe des folgenden Kapitels ist ihre Abgrenzung gegen die 'selektiven' Vorgänge, mit denen ebenfalls eine Verwechslung leicht möglich ist.

XVII. Selektion.

Die bedeutende Rolle, die die 'Gestaltungsvorgänge' mit Selbstdifferenzierung in der Morphologie spielen, ist wohl nur deshalb so spät erkannt worden, weil sie nur selten ganz rein, meist aber in eigenartiger Verkettung mit selektiven Prozessen aufzutreten pflegen, und weil jedes Gestaltphänomen gewissermaßen ein formähnliches Pseudophänomen selektiver Entstehung zur Seite hat, mit dem es verwechselt werden kann. Die Grenzziehung, zu der der Morphologe deshalb auf Schritt und Tritt genötigt ist, wird umso leichter sein, je schärfer die beiden gegensätzlichen Typen, die 'geformte' Landschaft einerseits und die 'gestaltete' Landschaft andererseits, in ihrer Eigenart erfaßt sind.

'Selektion' im morphologischen Sinne hat nichts zu tun mit dem *Darwinschen* Begriff der 'Auslese'; vielmehr versteht man darunter die Neuentstehung von Reliefunterschieden im großen und kleinen durch den ungleichmäßigen Widerstand, den das Gestein der Einwirkung der 'destruierenden und nivellierenden Agentien' bietet. Werden, um ein Beispiel zu nennen, die Bohlen hölzerner Wehre, über die ständig Wasser fließt, so sehr abgewaschen, daß die Äste wie aus einem abgetretenen Fußboden aufragen (*A. Penck* I.1894.p.313), so ist dies ein selektiver Vorgang. Wenn dagegen bei Wasserfällen, die über Stufen gleichmäßig widerständigen Gesteins herabstürzen, die darüber hinschießenden Wassermassen nebeneinander karrenähnliche Furchen einschneiden (*Sölch* 1914 p.168), so ist dies ein rhythmischer (gestaltmäßiger) Vorgang. Denn es liegt weder ungleichmäßige Einwirkung des Wassers, noch ungleichmäßiger Widerstand des unterlagernden Mediums vor.

Charakteristisch für die 'Selektionslandschaft' ist die Anpassung des Reliefs an die Struktur und Textur, die Lagerung und Verbandsfestigkeit der Gesteine. Alle sog. weicheren Partien sind in hohem Maße abgetragen, die sog. härteren bleiben mit kräftigem Relief als Erhebungen erhalten, und die Höhenunterschiede sind umso größer, je stärker der Gegensatz in der Widerstandsfähigkeit ist. (*Machatschek* III.1919.p.52; *Philippson* II,2.1924.p.377: „Härtlings-“ bzw. „Ausraumländschaften“.) Das Längenprofil der Täler zeigt Unausgeglichenheit, und bei gewissen Lagerungsverhältnissen kommt es zur Ausbildung einer Stufenlandschaft. 'Härtlinge' beleben das Relief. Auch die äolische Abtragung in Trockengebieten schafft selektiv bedingte Niveau-

unterschiede. Der Wind ist eben nicht nur 'nivelleur', sondern ebenso sehr 'modelleur' und 'préparateur'. Selbst in unseren Gegenden vermag er u. a. Straßen mit gelockertem Boden in Hohlwege zu verwandeln. — In den feuchtheißen Tropen ist die Selektionslandschaft weniger ausgeprägt, weil bedeutende Verschiedenheiten im Widerstand der überhaupt zersetzlichen Gesteine gegen chemische Verwitterung verhältnismäßig selten auftreten (*Sapper* 1914 p.91).

Die Aufstellung morphologischer 'Landschaftstypen', die jedesmal einer spezifischen morphologischen Geschehensart ihr Gepräge verdanken, kann dazu dienen, die Fähigkeit zu analytisch-zergliederndem Sehen, zu physiologisch-dynamischer Betrachtungsweise zu entwickeln und zu steigern¹⁾. So zeigt uns die 'gestaltete Landschaft' gestaltmäßige Reibungsvorgänge, die zur Selbstdifferenzierung führen. Ein schönes Beispiel bringt die Abbildung bei *B. Högbom* (1912 p.57; sowie 1914 p.246): „Plateaurand mit drei durch Frostverwitterung ausmodellierten Erosionstrichtern. Am Fuße des Berges Stromformen der Fließerde und im Vordergrund Polygonboden, Sassen Bay.“ — In der 'Gravitationslandschaft' haben alle Erhebungen den charakteristischen Böschungswinkel angenommen, Schutthalden verdecken die Fußlinie, Schutt füllt die Einmündungen aus und schafft Verflachungen, flächenhafte 'Gravitationsströme' und 'Gekriech' ziehen sich die Abhänge hinunter. (Material und Struktur des Gesteins ist dabei als homogen angesetzt.) — Schließlich bedingt das Vorherrschen einer der beiden großen 'Wirkungsgruppen' der Erdoberfläche zwei weitere Landschaftstypen. Das Relief der 'endodynamo-morphen (tektonischen) Landschaft' ist nur das Ergebnis von Vorgängen der Erdkruste. Die Form der Erhebungen ist im wesentlichen noch so, wie die endogenen Vorgänge sie geschaffen haben. Faltensättel und -mulden, Verwerfungshänge, Bruchstufen, Horste, Spalten und Klüfte sind charakteristisch; hinzu kommen die vulkanischen Aufbau- und Zerstörungsformen. (Vgl. die Mondlandschaft!) — Ihr Gegenbild ist die 'ektodynamo-morphe Landschaft'. Wie jene den inneren, so verdankt diese den äußeren Vorgängen ihr Gepräge. Die Wirkungsweise der äußeren Vorgänge ist zu

¹⁾ Die deduktiv gewonnenen Davisschen Typen sind für uns wertlos, die Passargeschen Typen dienen einer 'vergleichenden', nicht einer 'allgemeinen' Landschaftskunde. Wie Philippson (II.2.1924,p.370) treffend bemerkt, „ist jede Landschaft, mögen wir sie weit oder eng begrenzen, schließlich eine nur einmal vorkommende Kombination von Erscheinungen“. Eine allgemeine Typeneinteilung der Landschaften ist deshalb nicht möglich. Wohl aber lassen sich Einteilungen derselben nach einem Einteilungsgrund schaffen. Ein solcher Einteilungsgrund ist für uns hier der nach dem vorherrschenden physikalischen Vorgang.

nächst abhängig vom Klima. Hiernach lassen sich eine aride, eine humide und eine glaziale Landschaft unterscheiden. Das Übergewicht der 'äußeren Formung' über die 'innere Formung' ist umso größer, je länger und je ungestörter die Abtragung und Erosion an der Umgestaltung der Grund- oder Ausgangsform hat arbeiten können. „So kann eine zertalte Hochebene völlig in ein 'unterjochtes' Erosionsgebirge aufgelöst, eine Scholle kann in Kämme oder Rücken zerschnitten werden, so daß die Ebenheit der ursprünglichen Oberfläche gänzlich verschwindet und aus den ganz verschiedenen Gebirgstypen sich sehr ähnliche Landschaften entwickeln, sofern die Abtragungsbedingungen ähnliche sind...“ (*Philippson* II, 2.1924, p. 377.)

Eine besondere Rolle fällt den selektiven Vorgängen bei der Entstehung und Weiterentwicklung des Flußnetzes zu. (Vgl. Kap. „Flußnetz“!) *Hettner* (1921 p. 114) und andere Autoren haben dort, wo sie auf die Beziehungen des Talnetzes zum inneren Bau zu sprechen kommen, immer nur den Vorgang der fortschreitenden Anpassung des Talnetzes an die Tektonik und die Gesteinsbeschaffenheit vor Augen: Das Netz kann sich zunächst auf einer gleichmäßig abgedachten tektonischen Oberfläche frei entwickeln, doch durch 'Ausräumung' des nivellierenden 'Verputzes' (um das Bild eines verfallenden Mauerwerks zu gebrauchen), bzw. durch selektive Erosion gewinnt die bisher indifferente innere Struktur und Textur einen immer stärkeren Einfluß auf das Relief. Es ist aber auch der umgekehrte Vorgang denkbar: In einem Gebiet von starkem tektonischen Relief, aber gleichmäßiger Gesteinsbeschaffenheit ist zunächst die Talgestaltung vorwiegend durch die Tektonik vorgezeichnet; das Talnetz macht sich jedoch immer unabhängiger von ihr und zwingt ihr ihre eigenen Gesetze auf. In Verschiebungen der Wasserscheide (sog. „Kampf um die Wasserscheide“, *Philippson* II, 2.1924, p. 171ff., 174ff.), in Anzapfungen, in Veränderungen der Wasserführung und des Längsprofils, in Laufverschiebungen (Talasymmetrien) wird die Dynamik des Wasserabflusses und das systembedingte Kräftespiel zwischen den einzelnen Adern zum Ausdruck kommen. Sie schaffen einen allmählichen Ausgleich der Verzerrungen, die dem System durch äußere Faktoren zunächst aufgezungen waren.

Lange Zeit hat man die Bedeutung der Gesteinstextur für die Reliefbildung unterschätzt. Für die Anlage eines Gewässer- und Talnetzes pflegte man die Abdachungsverhältnisse eines Gebirges und etwa noch den Wechsel der Gesteinsart verantwortlich zu machen. Besonders der Gestalttheoretiker muß bestrebt sein, der Gesteinstextur volle Beachtung zu schenken, um sich nicht später durch Rückzugsgefechte bloßzustellen. Die morphologische Analyse wird, als wichtigste

Aufgabe, von Fall zu Fall eine sorgfältige Grenzziehung, die Feststellung des Anteils des selektiven und des rhythmischen Differenzierungsvorganges in Angriff nehmen. — Die von *Salomon* (Lit. bei *W. Panzer* 1923) angeregten Arbeiten an den Rändern des Rheintalgrabens brachten sämtlich als Ergebnis eine oft augenfällige Übereinstimmung besonders der kleinen Talstücke mit den Hauptkluftrichtungen, und *Deecke* (1918) erkennt in fast allen Schwarzwaldtälern und -tälichen das Bruchnetz verschiedenster Störungszeiten wieder. *W. Panzer* (a. a. O.) gelang der Nachweis eines engen Zusammenhanges zwischen Druck, Landverbiegung und Bruchnetz einerseits und Talrichtung andererseits. Die strahlige Anordnung der Gewässer- und der Bruchlinien in Fennoskandia läßt sich so gemeinsam auf eine kuppelförmige Aufwölbung der Landoberfläche zurückführen. Voraussetzung für die Wirksamkeit des selektiven Modellierungsvorganges ist jedoch, daß die auflagernde Verwitterungsschicht bereits abgeräumt ist und daß durch die Vorarbeit der epigenetischen Talbildung, der in der Gefällsrichtung in die Tiefe ragenden Haupttäler, Einschnitte geschaffen sind, die der Denudation die Angriffsmöglichkeiten liefern und in denen die Abtragungstoffe fortgeschafft werden können. So erst vermag die allgemeine Hangabtragung die Gesteinsklüfte, Ruscheln, Klaffe, Verwerfungen und Schwächezonen herauszuarbeiten, und es ist kein Zufall, daß gerade die kleinen, kurzen Seitentäler der Mittelgebirgsflüsse meist die gute Anpassung an das Gestein und seine Klüftung zeigen. Der Modellierungs- und Formungsprozeß der Selektionslandschaft ist ein Werk nicht so sehr der Erosion, als der Denudation. Die auffallende Regelmäßigkeit in Richtung und Abstand, die den Linien der Bruchnetze sowie den vulkanischen Eruptionszentren eigentümlich ist, überträgt sich auch auf die selektiv ausmodellierten Formen: die Erosionsrinnen, Küstenlinien, Vulkanbildungen usw. (Vgl. *W. Deecke*, Ein neues Grundgesetz der Gebirgsbildung. N.Jb.Min.1908.I.p.119; II.p.32 u. 55; 1910.I.p.118.)

Für die Strandzone des Grundgebirges im nordwestlichen Schonen lieferte *H. W. Ahlmann* (1916 p.348) „den Nachweis der fundamentalen Bedeutung, die die Schwächezonen in Form von Bankungsebenen, Einzelspalten, Spaltenzügen und Diabasgängen für die Orientierung der Abrasion und der subaerilen Verwitterung und damit für die Entwicklung der gesamten Topographie haben. Durch die Herausdenudierung dieser Schwächezonen sind Spalten, Klüfte, Kanäle, Gänge und Grotten gebildet worden, die den Gesteinsboden zersplittert und ihn in einzelne Partien zerstückelt haben, welche dann ihrerseits in kleinere Stücke nach Spaltenlinien und Absonderungsebenen zerteilt worden sind.“ Der Abrasionsgrad scheint in direktem Verhältnis zur Frequenz von Spalten-

linien des Gesteinsbodens zu stehen. „Die postglaziale Verwitterung, orientiert nach den Spalten und Bankungsebenen des Gesteinsgrundes, hat demnach das Gebiet zerfetzt und es sowohl in seiner Gesamtheit als im Detail formenreicher(!) gestaltet“ (a.a.O.p.320). — Auch für andere stark gegliederte und buchtenreiche Küstenstrecken wurden die sog. Schwächelinien als wichtigste Formbildner nachgewiesen. (v. Zahn 1909; Gradmann 1917; u. a.; s. a. Philippson II, 2.1924.p.289.) Doch ist gerade hier größte Vorsicht am Platze, denn die Versuchung für den Forscher ist groß, die „Schwächelinien“ und die „Zonen härteren Gesteins“ aus den beobachteten Formen rückwärts zu erschließen. Nur die unmittelbare Beobachtung der morphogenetischen Vorgänge in der Natur (v. Richthofen) und die „Detailanalyse der Abrasionsprozesse“ (H. W. Ahlmann) führt hier zu gesicherten Ergebnissen.

Wo in der glazialen Oberfläche der von H. W. Ahlmann (1916 p.313) beschriebenen Strandzone zwei Spaltenzüge zusammenstoßen, oder wo ein Zug mit einer größeren Einzelspalte anastomosiert, bilden sich „Geschwüre“, unregelmäßige, aber von geraden Spaltenflächen scharf begrenzte Höhlungen, die immer weiter um sich fressen. Für alle Hohlformen der sog. 'Lochverwitterung' ist die prinzipielle Möglichkeit einer derartigen Entstehung gegeben; namentlich für die Kluftkarren und Kluftdolinien, sowie für die 'geologischen Orgeln', die als örtliche Erweiterungen vertikaler Klüfte aufzufassen sind, auf denen die auflösenden Sickerwässer ins Gestein eindringen. (E. Kayser 1921.I.p.452 u. Fig.337; S. Günther 2II.1899. p.941; Ders., 1921 p.19.) Verwandte Gebilde sind die senkrecht oder schräg abwärtsführenden Schlotte der 'Karrenröhren', 'Karrenbrunnen' und 'Avens', gleichfalls Erweiterungen von Klüften oder Schichtfugen durch chemische Lösungsvorgänge. (Grund 1910.) Die Übergangsformen der 'Karrentrichter' und 'Karrenschüsseln' führen schon zu den Dolinen, deren Formen nicht rein selektiv bedingt sind. Immerhin sind die 'Kluftdolinien' auf Kluftkarrenfeldern im wesentlichen damit erklärt, „daß beim Kreuzen mehrerer Kluftsysteme oder durch Häufung paralleler Klüfte lokal stärker zerklüftete Gebiete geschaffen werden“ (Grund 1910), wohin sich die Feuchtigkeit mangels einer einheitlichen Abdachung konzentriert. Die genannten Vertiefungen sind in der Regel nicht kreisrund, sondern in der Richtung der maßgebenden Spalte elliptisch in die Länge gezogen. (Sjuts 1907 p.37.) In den sog. Barren Grounds der Hudsonsbai-Länder liegen zwischen den Felsbuckeln flache, vom Eise ausgeschliffene Wannen der verschiedensten Dimensionen. „Die Wannen entstanden an Stellen lokal verstärkter, zumeist aber durch die Gesteinsbeschaffenheit vorgezeichneter, also selektiver Erosion, im Bereich weicherer

Schichten oder dort, wo durch Brüche und die an ihnen eingetretene Gesteinszerrüttung der Erosion die Wege gewiesen wurden.“ (*Machatschek* III.1919.p.82.)

Es ist das Eigentümliche bei den geomorphologischen Formen, daß generelle Erklärungen für sie nicht gegeben werden können. Die Theorie kann nichts tun, als Lösungsmöglichkeiten zeigen und den Blick für das Charakteristische der einzelnen Formen schärfen; Aufgabe der Praxis ist die von Fall zu Fall verschiedene Verteilung des Beobachtungsmaterials auf diese Lösungsmöglichkeiten. Die Entscheidung der Frage: Sind die Karren ein Werk der selektiv-modellierenden Formung, oder der rhythmisch-differenzierten, von Gesteinsstruktur und -textur unabhängigen Gestaltung?, ist beispielsweise nur auf diesem Wege zu geben. Größere Karrenspalten auf wenig geneigten Flächen lassen sich mit viel Wahrscheinlichkeit auf die Erweiterung präexistierender Klüfte, Adern und Schichtfugen zurückführen. (*M. Eckert* u. a.) Fast alle Kalksteinmassive sind mehr oder weniger durchsetzt von Diaklasen, Synklasen und Piezoklasen. Diese sog. 'Kluftkarren' verlaufen unabhängig von den Böschungsverhältnissen und zerlegen die Schichtplatten in einzelne Stücke, oft auch in schmale Blätter. Wenig kompakte oder unreine Kalkgesteine, wie der Dolomit, sind fast nur mit Kluftkarren bedeckt (*Machatschek*). Beim Schrattenkalk konnten *Arn. Heim* u. *P. Arbenz* (1912) feststellen, „wie die Auflösung und zugleich Auflockerung durch Gefrieren der durchtränkten Rißchen den primären Unregelmäßigkeiten der Gesteinstextur genau nachgetastet hat“, während u. a. beim Seewenkalk ohne weiteres „die völlige Unabhängigkeit des Furchenverlaufs von vorgezeichneten Spalten“ zu erkennen war. Das letztere, also das Auftreten von 'Rinnenkarren' oder 'Rillenkarrn' ist das bei weitem häufigere, es ist wesentlicher als die Auflösung des Kalkes den Klüften entlang (*P. Arbenz*). Die Rinnenkarren sind meist ganz unabhängig von Schichtfugen und Klüften und sind durchweg im Sinne des Gefälles orientiert. Dem Gegensatz von Kluftkarren und Rinnenkarren entspricht die von *M. Eckert* (1905) in Vorschlag gebrachte allgemeine Scheidung der Verwitterungsvorgänge in 'architektonische' und 'ornamentale'. — So können z. B. den steilen Gebirgsabhängen der arktischen Landschaft lediglich durch die Erosion des abbröckelnden Materials regelmäßige, sich nach oben grätenartig verzweigende Systeme von 'Steinschlagrinnen' („Raßkars“, vgl. Kap. „Formenschatz“!) 'ornamental' aufgeprägt werden. Andererseits kann das regelmäßige Nebeneinander von Furchen und Rippen auch durch eine entsprechende Gesteinsstruktur 'architektonisch' angelegt und dann nur selektiv herauspräpariert worden sein: „Bei geneigter Lagerung bilden widerständige

Schichten an den Abhängen vorspringende Rippen, die sich, entsprechend dem Einfallen der Schicht, steil oder schräg am Abhang in die Höhe ziehen ... Wechselt widerständige und nachgiebige Schichten eng miteinander ab, so entsteht eine vollständige Rippung der Gehänge, die sich auch auf Plateauflächen fortsetzen kann.“ (*Philippson* II, 2. 1924. p. 40.) Fällt das Gehänge nach rückwärts gratartig ab, so erscheint der Grat sägeartig gegliedert, „indem die widerständigen Schichten die Erhöhungen, die nachgiebigen die Einsattelungen des Grates veranlassen“. Der zackige oder girlandenförmige Verlauf des Kammes kann wiederum auch rein 'ornamental' bedingt sein in den Fällen, wo die 'Ursprungstrichter' der erwähnten Steinschlagrinnen oder der Wasserrinnen von beiden Seiten gegeneinander arbeiten. (*Philippson* II, 2. 1924. p. 44 u. p. 172f., mit Fig.)

Bei der „gitter-, netz- und wabenförmigen Verwitterung der Sandsteine“ ist es besonders schwer, zwischen selektiver und rhythmischer Differenzierung zu scheiden. Kein Zweifel herrscht hinsichtlich der Lochbildungen, die durch Auswitterung von Konkretionen, Einschlüssen, Gasblasen, augenfälligen Struktur- oder Texturunterschieden (basische und saure Bestandteile im Gneis) entstehen. Namentlich da, wo sich kugelige Konkretionen mit geringen Zwischenräumen aneinanderreihen, entstehen Formen, die an Waben, bzw. an Schüsseln und Wannen (bei horizontalen Flächen), oder an Strudeltöpfe erinnern. Ihre nachträgliche Vergrößerung ist nicht nennenswert. (*P. Kessler* 1921 p. 244.) Als normale Ursache jener regelmäßigen, neben- und untereinander angeordneten Hohlräume kommen jedoch solche mehr zufällige Erscheinungen nicht in Betracht. *Häberle* (1915 p. 268) fordert mit Recht von dem Gestein, das solche regelmäßigen Formen zeigt, gleichmäßige Strukturverhältnisse, gleichartige chemische und mineralogische Beschaffenheit und eine gleichmäßige Verteilung des Bindemittels. Das Formenmuster kann also nicht als Ergebnis lokaler Teilursachen, sondern muß entweder als Ausdruck einer formentsprechenden Textur des Gesteins oder aber als rhythmische Selbstdifferenzierung aufgefaßt werden. Die Erklärungsversuche haben bisher nur die erstere Möglichkeit ins Auge gefaßt. Formbestimmend bei dieser selektiven Strukturierung und Modellierung sind nach *Häberle* erstens die Schichtfugen oder auch gröbere Sande zwischen feineren; von ihnen aus soll der auf Schaffung der Hohlräume gerichtete Zerstörungsprozeß seinen Ausgang nehmen, ihre Entfernung voneinander soll für die Größe der Waben bestimmend sein, bei konkordanter Lagerung soll eine mehr gitterförmige, bei diskordanter Lagerung eine mehr maschig-netzförmige Verwitterung auftreten; zweitens die mehr oder weniger regelmäßige

angeordneten Sickerbahnen (Ebda.p.278), an deren Austrittsstellen das Gestein eine Infiltration und Verhärtung erfährt, die dann von der Verwitterung herauspräpariert wird. *Häberle* hat jedoch mit der Annahme regelmäßig angeordneter Sickerbahnen das Problem der Verteilung nur nach rückwärts verschoben; er flüchtet sich sogar in den Zirkelschluß, eine Reihe weiterer Faktoren zu nennen, die ihrerseits „Richtung und Verlauf“ der Bahnen „bestimmen“ sollen (Ebda. p.276). Diese Lücke sucht *P. Kestler* (1921 p.260 ff.) mit seiner „Haarspaltentheorie“ auszufüllen. Die von ihm 'vorausgesetzten', aber nicht beobachtungsmäßig nachgewiesenen Haarspalten sollen die senkrechten oder schrägen Komponenten des Formenmusters stellen. Die Haarspalten selbst werden als das Ergebnis von Torsions- oder Druckvorgängen hingestellt. Die Verhärtung der Wände soll also bei den Waben von in ihrer Mitte liegenden sehr feinen Klüften ausgehen. „Daß die Wabenklüfte in ihrer Richtung und in ihrem Abstand von der Lage und Dicke der Schicht abhängig sind, läßt sich damit erklären, daß der Abstand der Diaklase ganz allgemein sowohl von der lithologischen Beschaffenheit wie der Dicke einer Gesteinsbank abhängt.“ Die sich herausbildende (und durch die Verwitterung auch morphologisch zum Ausdruck kommende) wabenartige Gesteinsstruktur wäre hiernach lediglich das getreue Bild einer schon bestehenden Gesteinstextur. Es muß jedoch bemerkt werden, daß selbst der einwandfreie Nachweis der hypothetischen Haarspalten für ein kausales Abhängigkeitsverhältnis zwischen Struktur (bzw. Oberflächenform) und Textur noch nichts beweisen würde, da sie, wie in manchen Fällen Talrichtung und Gesteinsklüfte oder Strukturboden und Texturboden, in ein auffallendes Deckungsverhältnis (Parallelität) zueinander treten können.

Zusammenfassung :

Sind wir vor die Aufgabe gestellt, bestimmte Groß- oder Kleinformen der Natur zu erklären, so ist jedesmal zunächst die Möglichkeit einer selektiven Entstehung ins Auge zu fassen. Wo die betr. Form lediglich das Ergebnis ungleichmäßiger Einwirkung von außen, bzw. ungleichmäßigen Widerstandes von innen ist, scheiden unsere anderen, komplizierteren Erklärungsmöglichkeiten selbstverständlich aus.

Charakteristisch für die 'Selektionslandschaft' ist die Anpassung des Reliefs an die Struktur und Textur, die Lagerung und Verbandsfestigkeit der Gesteine. Lehrreich ist die Zusammenstellung mit anderen morphologischen Landschaftstypen, wie der 'gestalteten Landschaft', der 'Gravitationslandschaft' und der 'endodynamo-morphen (tektonischen) Landschaft'. Ein wichtiger Faktor der Reliefbildung ist die Gesteinstextur. Talanlage und Talrichtung lassen sich vielfach

auf Gesteinsklüfte zurückführen. Auch hierbei können regelmäßige Formenmuster entstehen. Für manche felsige Küstenstrecken sind die sog. 'Schwächelinien' des Gesteins die wichtigsten Formbildner. Auch die verschiedenen Hohlformen der sog. „Lochverwitterung“ lassen sich grundsätzlich auf sich kreuzende Spaltenzüge usw., d. h. auf eine selektive Entstehung zurückführen. Die 'Kluftkarren' unterscheiden sich schon ihrem ganzen Auftreten nach deutlich von den systemhaft angeordneten 'freien' Rinnenkarren. Schwieriger ist schon die Entscheidung der Frage, ob die Struktur der 'gitter-, netz- und wabenförmigen Verwitterung der Sandsteine' durch eine entsprechende Textur vorgebildet ist. — Wechselt in einem räumlichen Bereich die Intensität der Selektion von Ort zu Ort in regelmäßiger Weise, so kommt es leicht zur Ausbildung eines Formenmusters, das mit den durch (rhythmische) Selbstdifferenzierung entstandenen große Ähnlichkeit hat. Diese Möglichkeit ist bei den im nächsten Kapitel zu besprechenden Fällen echter Selbstdifferenzierung stets im Auge zu behalten.

XVIII.

Selbstdifferenzierung.

Differenzierung ist Entstehung von regelmäßigen Verschiedenheiten dort, wo zunächst Einheit und Einförmigkeit bestand. Die Fälle, wo diese Verschiedenheit durch eine entsprechend differenzierte Einwirkung von außen induziert, 'aufgeprägt' (eingeprägt), bzw. durch entsprechend differenzierte vorgebildete Anlagen von innen 'ausgeprägt' werden, scheidet jedoch hier aus. Bleibt also übrig die sog. s p o n t a n e Differenzierung (Selbst- oder Eigendifferenzierung). Sie tritt auf bei den sog. periodischen Vorgängen (Vgl. Kap. XVI!) als 'innere Periodizität' und bei den sog. rhythmischen Phänomenen als 'innerer Rhythmus'. Sie bildet sich aus im Anschluß an Reibungsvorgänge ebenso wie im Anschluß an Spannungsvorgänge. Sie tritt uns entgegen in den verschiedenartigsten Gewändern: als spontane Zerlegung eines Geschehens in diskrete 'Phasen', als spontane innere Strukturierung einer zunächst strukturlosen Masse, als 'diakinetischer Rhythmus' bei der Bewegung zweier Medien ineinander, als 'parakinetischer Rhythmus' bei ihrer (scherenden) Bewegung aneinander vorbei.

Voraussetzung für das Auftreten einer jeden Selbstdifferenzierung ist, daß der ganze zu differenzierende Bereich ein zusammenhängendes physikalisches System bilde. Für ausgedehnte physikalische Systeme gilt aber der Satz, daß sie ohne alle beson-

deren Einzelvorrichtungen in sich strengste Raumordnung aufweisen können. (*W. Köhler* 1920 p.180.) Auf diese spontane straffe Raumordnung kommt alles an. Ob diese Eigenordnung des Systems nun noch in sich differenziert ist, ist erst von sekundärer Bedeutung, Hieraus erklärt sich auch eine zunächst auffallende und befremdende Eigentümlichkeit unserer Begriffsbildung: Wir sprechen von 'Rhythmus' nicht erst bei dem differenzierten, sondern schon bei dem undifferenzierten Geschehen in physikalischen Systemen. Auf einem anderen Gebiete gelangte bereits *Rud. Bode* im Anschluß an die Schriften des Ausdruckstheoretikers *Ludw. Klages* zu einer ähnlichen Auffassung vom Rhythmus: „Bereits die einfachste, metrisch ungegliederte (!) Bewegung, z. B. das einmalige Heben des Armes kann rhythmischen Charakter haben.“ (*R. Bode*, Rhythm.Erziehung, 1920; s. a. Ders., Ausdrucksgymnastik, 1922 Einl.; u.a.Schriften.) Die landläufige und zugleich im wissenschaftlichen Sprachgebrauch, namentlich der Physiologie, eingebürgerte Auffassung vom 'Rhythmus' als einer irgendwie gearteten regelmäßigen ('metrischen') Wiederholung von Bewegungen wird also von *Bode* wie von uns bewußt aufgegeben. Eine wertvolle theoretische Stütze liefert uns der Begriff der 'Gestalt' und der (dynamischen) 'Raumstruktur' bei *Wolfg. Köhler*. 'Struktur' ist für *Wolfg. Köhler* nicht das Auftreten eines bestimmten Formgerippes, Maschenwerks oder dergl., sondern ganz allgemein jede in physikalischen Systemen sich herausbildende Eigenordnung des Geschehens.

Zusammenfassend wiederholen wir: 'Rhythmisch' ist jedes Geschehen von Gestaltcharakter, insbesondere jedes gesetzmäßig in sich differenzierte Geschehen von Gestaltcharakter.

Daß ausgedehnte physikalische Systeme auch ohne alle besonderen Einzelvorrichtungen (Mechanismen) deutliche und straffe Raumordnung aufweisen können, ist eine keineswegs geläufige Erkenntnis. Denn „die 'Dinge' unserer Umgebung verhalten sich gegeneinander zumeist, und wenigstens für unsere passive Alltagserfahrung, summativ, bilden also nicht in für uns merklichem Maße physikalische Systeme miteinander“. (*W. Köhler* 1920 p.170.) Und so war auch der Blick des Naturwissenschaftlers zunächst 'praktisch', weniger 'ästhetisch' eingestellt. Es ist kein Zufall, daß die Reaktion gegen die Mechanisierung und Geometrisierung des Weltbildes von der Ästhetik und ihren Nachbarzweigen auszugehen pflegt, die sich allein noch den Sinn für gestaltmäßige Zusammenhänge, für Verteilungen und Gruppierungen bewahrt hatten. „Von einem System, in welchem nicht örtlichen Vorgängen einzeln ihre Bahn absolut vorgezeichnet ist, erwarten wir Unordnung, Ineinanderlaufen und Verschwimmen.“ (*W. Köhler* p.180.) Wo die Natur eine deut-

liche Ordnung zeigt, wird diese oft gar nicht bemerkt, oder wenn bemerkt, so doch nicht zum Gegenstande wissenschaftlichen Nachdenkens erhoben. Lokale Faktoren werden namhaft gemacht, der 'Zufall' wird zu Hilfe gerufen¹⁾, unzulässige 'Analogien' werden vorgeschoben, oder die Regelmäßigkeit der Anordnung wird gar mit geringschätzigem Übertrieben in das Gebiet der optischen Täuschungen oder subjektiven Überreibungen verwiesen. *Jefferson* (1909, zit. *Johnson* 1910 p.608) schrieb den Strandspitzen „a fictitious appearance of regularity“ zu. *B. Högbom* (1910 p.54) gab zu, daß die gleichmäßige Größe der Strukturbodenfelder „ziemlich schwer erklärlich“ sein dürfte; doch suchte er gleich darauf diese Gleichmäßigkeit durch den Hinweis auf das subjektive Moment der übertriebenen „Schematisierung der Eindrücke“ bei den bisherigen Beobachtern und die Vernachlässigung der „schlechter ausgebildeten Formen“ theoretisch zu entwerten. Doch gibt er in seinem späteren Aufsatz (1914 p.315) die „ganz auffallende Regelmäßigkeit“ des gut entwickelten Strukturbodens unumwunden zu.

Die Vorstellung, als sei zur Herstellung einer regelmäßigen Anordnung eine Reihe lokaler Einzelkräfte erforderlich, stand all diesen theoretischen Bemühungen hindernd im Wege. „In Wirklichkeit bedarf Ordnung in ausgedehntem physischen Geschehen nicht einer Bindung von lokalem Geschehen an unveränderlich vorgezeichnete und isolierte Wege, sondern ist auch in zusammenhängenden physischen Systemen möglich und realisiert, als Eigenordnung oder Struktur des Geschehens selbst.“ (*W. Köhler* p.188.) Bereits *E. Küster* (1913 u. Die Naturwiss. 2. 1914.p.74) zog, nach dem Vorgange von *R. E. Liesegang* (1913 u.ö.), aus seinen Gelatineversuchen die theoretische Folgerung, „daß bereits einfache Diffusionsvorgänge rhythmische Strukturen entstehen lassen können“, und daß „ein anfangs homogenes Medium rhythmische Differenzierungen annehmen kann, ohne daß die Außenwelt diesen Rhythmus durch rhythmischen Wechsel irgendwelcher Bedingungen induzierte“. Die Außenwelt liefert nur die „Realisationsfaktoren“ („Auslösungs- bzw. Betriebsfaktoren“); die „Qualität“ des Geschehens wird jedoch durch diese „äußeren Faktoren“ nicht mitbestimmt; die Differenzierung ist also 'spontan', wenn auch nicht in absolutem Sinne, denn nichts kann ja seinen Zustand 'ganz von selber' verändern. (*W. Roux*

¹⁾ Schon Goethes geologische Studien (*Semper* 1914 p.57,62,130 u.ö.) spiegeln diesen Kampf der 'simultan-chemischen', auf die Erkenntnis größerer gesetzmäßig gegliederter Systeme gerichteten Betrachtungsweise, mit der 'sukzessiv-mechanischen', aus Einzelne gehefteten Denkweise, die in regelmäßigen Anordnungen, wo sie solche antrifft, schon deshalb das Walten eines 'unwesentlichen Zufalls' erblickt, weil das Problem der 'Anordnung' und 'Verteilung' aus dem Bereich ihres Denkens überhaupt herausfällt.

1912 p.367.) *W. Magnus* (1913 p.290) fand bei seinen Versuchen über die Ausscheidung fester polyedrischer Strukturen aus flüssiger Grundsubstanz — als das Gemeinsame aller dieser Bildungsprozesse, „daß ungefähr gleichzeitig in ungefähr gleichen Abständen ungefähr gleiche Formelemente sich aus der anscheinend ungeformten Grundsubstanz herausdifferenzieren“.

Die rhythmische Differenzierung findet sich besonders gut ausgebildet bei flacher, schichtenartiger Ausbreitung des betr. Mediums und bei Vorhandensein einer scharfen Diskontinuität der Differenzierungszone gegen ihre Unterlage. Zu den erwähnten Ausscheidungen fester polyedrischer Strukturen (*W. Magnus*, a.a.O.) kam es am leichtesten in dünnen Schichten. Je dünner die Schicht, um so kleiner die Kammern, je dicker, um so größer werden sie; mit der Größe nimmt dann zugleich die Regelmäßigkeit ab. Die Beobachtungen über „Zonenbildung in kolloidalen Medien“ (*Liesegang'sche Ringe* usw.) betreffen anscheinend durchweg Präparate, welche flächenhaft ausgebildet sind. Versuche mit dreidimensionaler Ausbildung sind weniger bekannt. Ebenso vollzieht sich der Sortierungsvorgang des 'Strukturbodens' durchweg in einer der Regolation ausgesetzten Oberflächenzone, die sich von dem ständig gefrorenen Untergrunde, der 'Tjäle', als besondere Schicht abhebt. Diese scharfe Abgrenzung gegen die Unterlage befördert den dynamischen Systemzusammenhang innerhalb der Oberflächenschicht, verhindert ein unregelmäßiges Absickern der eingedrungenen Feuchtigkeit, begünstigt die Regolation und erleichtert ferner, bei den Bodenflüßvorgängen auf geeigneter Unterlage, als 'Gleitplan' die Relativbewegung der 'beweglichen Oberhaut' des Bodens gegen den unbeweglich liegenden harten und glatten Untergrund. (*W. Salomon* 1916; *Ule* 1911 p.255; u.a.) Die erforderliche Diskontinuität gegen die Unterlage ist auch dann gegeben, wenn eine dünne Schicht lockeren und fremdartigen Materials unmittelbar einer kahlen Felsoberfläche aufliegt. Die Steinkränze sind dann besonders schön ausgebildet. (Vgl. *Meinardus*, S-B.1912 p.12f.; *Nansen* 1921 p.119.) — Die schönsten und größten *Büberschneefiguren* fand *Hauthal* (1908 p.109) „in auf ebenem Boden lagernden, horizontal geschichteten Schneefeldern“ herausgebildet. Die *gitter-, netz- und wabenförmige Verwitterung* senkrechter Felswände findet sich nach *P. Keßler* (1921 p.259) „nur an Sandsteinen, die aus ziemlich raschem Wechsel von Schichten ungleicher Korngröße bestehen“. *H. Crammer* (1905) berichtet von einer „außerordentlich regelmäßigen und deutlichen“ *Furchung der Winterschneedecke*. Die Differenzierung des Sickerwassers in regelmäßig verteilte Stränge ging auch hier bezeichnenderweise über einer durchlaufenden Trennungs-

fläche vor sich: Die „Hülle von Neuschnee“ lag hier über einer „älteren, zusammengewachsenen, daher dichteren und mehr oder weniger vorherrschenden Schneedecke“. — Flußmäander scheinen dort besonders schön ausgebildet zu sein, wo das Gestein horizontal geschichtet ist oder wo unter einer dünnen Decke weichen Gesteins unvermittelt ein härteres Gestein zutage tritt. — Sand- und Schneebarchane sind auf festen, glatten und kahlen Flächen am besten entwickelt. Flächen, die teilweise mit Gras und Gebüsch bewachsen oder sonstwie uneben sind, zeigen andere und unregelmäßige Bildungen. Ebenso fehlen die Barchane „in den mit einer mächtigen einheitlichen Schicht lockeren Sandes bedeckten Wüsten“. (Sokolow 1894 p.172 u.259.) Es gibt anscheinend keine besseren Vorbedingungen für den Eintritt der rhythmischen Differenzierung, als wenn ein glatter Felsboden, eine Tonfläche, eine Salzplatte, eine gepanzerte Sandtenne, oder auch nur eine Sandschicht von anderer Beschaffenheit und Konsistenz, überlagert ist von einer dünnen Decke lockeren Sandes. (Vgl. Seite 26 ff. u. Seite 311 f. !)

Da die rhythmische Differenzierung sich relativ unabhängig von äußeren Faktoren vollzieht, muß auch die hierbei zutage tretende Formenbildung besonderen eigenen Gesetzen gehorchen. Erste Vorbedingung ist zunächst eine gewisse Langsamkeit und Stetigkeit des Geschehens. Denn die Selbstdifferenzierung ist ein 'Summationseffekt'. Je schneller der Vorgang sich vollzieht, um so zahlreicher, kleiner und dicht gedrängter pflegen die Differenzierungsglieder des Systems zu sein. Nach E. Küster (Über rhythm. Strukturen im Pflanzenreich. Die Naturwiss. 2.1914. p.73) ist z. B. die Wirkungssphäre der sog. 'Keime' (d. i. Ansatzzentren) umso beschränkter, je schneller die Eintrocknung erfolgt. Die Keimbildung bei Kristallisationsvorgängen regelt sich bekanntlich nach derselben Gesetzmäßigkeit. Auch eine Abhängigkeit von der Größe des Systems läßt sich nachweisen. Im allgemeinen bilden sich die Differenzierungsglieder völlig spontan aus der undifferenzierten Masse heraus, entsprechend der 'kristallinen Urzeugung'. (Vgl. Handwbt. d. Nat. 5.1914. p.1125.) Doch können, wie bei der Kristallisation, auch bereits vorhandene (eingeführte) Keime mitwirken (Vgl. unter den einzelnen Kap.!). Es lassen sich alle Übergänge aufzeigen von der 'reinen' Selbstdifferenzierung bis zu den mehr oder weniger konkretionären Bildungen um gegebene Ansatzkerne herum. Entsprechend also auch alle Übergänge von den regelmäßigen Mustern der 'geselligen' Formen über die unregelmäßige Gruppenbildung zu den Einzelformen der 'solitären' Gebilde²⁾.

²⁾ Vgl. hierzu Workman 1908/09 p.270: „An apple does not cease to be an apple because it may happen to be the only one found on an apple

Die Fälle von Anhäufung um vorhandene Ansatzkerne herum leiten schließlich über zu den reinen 'Hindernisformen', bei denen von einer Selbstdifferenzierung überhaupt nicht mehr die Rede sein kann. Die entstehende Form ist hier lediglich der sichtbare Ausdruck für die Strömungslinien des an dem Hindernis vorbeistreichenden Mediums; ihre Gestalt und Größe richtet sich nach der Gestalt und Größe des Hindernisses; sie bietet einer analytischen Betrachtung keine nennenswerten Schwierigkeiten, und so ist das Bestreben erklärlich, z. B. jede Düne ganz allgemein als Hindernisform hinzustellen. Besonders aus den älteren Lehr- und Handbüchern mußte man dem Eindruck gewinnen, als gäbe es überhaupt keine 'freien', sondern nur 'gezwungene' Dünen. Man vergaß dabei, daß es Sache des Dünenbaues, nicht aber der physikalischen Theorie (*S. Günther* ²II. 1899. p. 616 Fig. 125, u. a.) ist, jeder Düne zum besseren Halt einen Pfahl in den Leib zu rammen. Es kommt überhaupt weniger darauf an, ob ein 'Hindernis' bei einer beobachteten Form mitgewirkt hat, als vielmehr wie weit und in welchem Grade es mitgewirkt hat. So kann z. B. die echte Dünenbildung äußerlich an eine vorhandene Hindernisform anknüpfen und kann später beim Weiterwandern dieses Hindernis wie einen unverdauten Fremdkörper hinter sich zurücklassen. Mag sich also auch mancher 'Zungenhügel' im Lee von Hindernissen ³⁾ nachträglich in eine Düne verwandeln, so steckt doch keineswegs die Tendenz zur Dünenbildung von vorneherein in ihm, sondern es ist ein neuer Prozeß, der dann hinzutritt, und der sich oft in einer durchgreifenden Formumbildung äußert. (Vgl. hierzu *Sokolow* 1894 p. 257f., p. 71 u. Fig. 4.) Wir müssen also unterscheiden 1. Dünenformen, die sich 'spontan', durch 'Urzeugung', doch den Gesetzen des Systems gehorchend, aus der formlosen Masse herausdifferenziert haben; 2. Dünen, für deren Anfangsstadium ein 'minimales Hindernis' den Bildungskeim, den ersten Fixpunkt lieferte; 3. Dünen, für die ein größeres Hindernis den 'Ansatzkern' abgab, dessen Aufgabe aber mit dem Augenblicke erledigt war, wo ihn die weiterwachsende Düne unter sich begrub; 4. Dünen, die ihre Existenz lediglich einem Hindernisse von entsprechenden Ausmaßen verdanken (reine Hindernisdünen). — So fällt z. B. dem Dornbusch, an dem die

tree, neither is the nature of a Schmelzkegel or a nieve-pinnacle altered by the circumstance that it stands alone, provided it be developed under the same or similar conditions as when associated with others."

³⁾ Bei nachgiebigen und durchlässigen Hindernissen sammelt sich der Sand im Lee, bei festen und geschlossenen Hindernissen im Luv an. Die günstigste Sandanhäufung bewirkt ein unnachgiebiger, durchlässiger Zaun; der Scheitel des Hügels liegt dann ungefähr über dem Zaune. Vgl. Otto Schulze, Dünenbau, in: Solger, Dünenbuch 1910 p. 384.

Bildung eines regelmäßigen wandernden Barchans beginnt, eine ganz andere Funktion zu, als der Tamariske, die als 'Sandfänger' durch ihr fortgesetztes Weiterwachsen einen unbeweglichen 'Vegetationshügel' von 3 bis 5 m, einen sog. 'Neuling', um sich herum bildet. (*Sokolow* 1894 p.174f.; 183 Anm.) → Überhaupt ist es das Kennzeichen der echten Hindernisformen, daß sie dem sie verursachenden Hindernisse fest und starr anliegen. Hindernisse im Flußbett z.B. erzeugen festliegende Sand- oder Geröllbänke, die sich an derselben Stelle erhalten bzw. immer wieder neu bilden. Hierdurch unterscheiden sie sich von den wandernden Geschiebebänken, die z. T. auch von Hindernissen ausgehen mögen, aber sich nun von Jahr zu Jahr, oft um einige hundert Meter, stromab verschieben und sich eben dadurch als 'freie' Transportkörper ausweisen.

Auch die, in der Richtung der Eisbewegung gestreckten, flachgewölbten Grundmoränenformen der sog. Drumlins zeigen diese verschiedenen Stufen der Abweichung von der reinen Selbstdifferenzierung. Auch hier handelt es sich um gesellschaftlich (geschart) auftretende Formen, die der Landschaft ein streifiges Aussehen geben, das unabhängig vom Schichtstreichen des Untergrundes usw. ist; bei aller absoluten Verschiedenheit der Ausmaße pflegen die Glieder eines bestimmten Drumlinsystems unter sich gleichartig zu sein. Je gleichförmiger der Untergrund, umso auffallender die streifige Differenzierung. Die 'Hindernisformen' spielen also auch hier nur die Rolle der störenden Ausnahme. Auch wo ein fester Kern die Bildung 'hervorgerufen' zu haben scheint, ist die Vermutung berechtigt, daß dieser feste Kern nicht präexistierte, sondern in seiner jetzigen Form auch nur ein Produkt des allgemeinen Differenzierungsprozesses ist. Für die von *A. G. Högbom* (1905 p.197) untersuchten nordschwedischen Drumlinlandschaften „scheint es die Regel zu sein, daß die Drumlins sich um oder an einen Kern von anstehendem Gestein akkumuliert haben. Manche der niedrigen und stark langgezogenen Drumlins dürfte jedoch diesen Kern entbehren(!). Möglich ist, daß diese Drumlinsformen den ersten Anstoß zu ihrer Bildung durch ein großes Geschiebe(!), welches in der Grundmoräne arretiert wurde, erhielten“. Bei anderen Vorkommnissen ist der Kern von Grundgebirge so groß, daß „die Moränenmasse nur als eine die Reliefformen des Gesteinsgrundes ausgleichende Decke anzusehen ist“. Doch muß sich auch das (nicht zu große) 'Hindernis', wo es hervorragt, den Anforderungen des Systems fügen: es wird nach dem Vorbilde der übrigen Formen ausmodelliert und zurechtgeschliffen(p.180), und so kann z. B. ein Rundhöckerfels mit anschließendem Moränenschweif einen echten Drumlin bilden. 'Hindernisform' ist ein solcher Drumlin nur, soweit er nach Lage und sonstigen Ausmaßen aus dem System her-

ausfällt; er läßt sich dann vergleichen mit den Hindernisdünen oder den lanzettförmigen Flußinseln, die sich an oder um einen festen Gesteinskern herum gebildet haben. Die Form stellt dann nur eine Übergangskurve für das vorbeifließende Medium dar. — Eine so wichtige Rolle der 'Ansatzkern' also auch für die Beschreibung bestimmter Vorkommnisse spielen mag, so unwichtig ist er für die kausale Erklärung des Phänomens, denn es geht ebenso gut ohne ihn. Ob der arretierende Kern oder die an demselben akkumulierte Moräne „quantitativ die größere Rolle spielt, hängt einerseits von dem mehr oder weniger hervortretenden Relief des Untergrundes ab, andererseits von der verfügbaren Menge der inneren Moräne und der Transport- bzw. Erosionsfähigkeit des Eises“. Dementsprechend finden wir in den peripherischen Gebieten der Vereisung in der Regel „mächtige Drumlinshügel mit einem kaum merkbaren Kern“, in den zentralen Gebieten dagegen „Drumlinberge, welche eine nur dünne oder gar unvollständige Überkleidung durch Moränenakkumulation bekommen haben“ (p.197).

Wo diese „Überkleidung durch Moränenakkumulation“ ganz fehlt, d. h. also wo der Gletscher unmittelbar auf eine anstehende Felsfläche erodierend einwirkt, treffen wir die analoge Form der 'Rundhöcker' ('roches moutonnées'), deren Auftreten noch weitergehende Schlüsse zu ziehen gestattet. Im anstehenden Fels schleift das Eis „gerundete Buckel von ovalem oder keilförmigem Grundriß“ aus, deren Längsachse der Eisbewegung entspricht. Die von der Eisbewegung getroffene flach ansteigende Luvseite ist poliert, die von ihr abgewandte steilere Leeseite ist rau. Man wird an Dünenformen erinnert. Die Rundhöcker treten, ebenso wie die Drumlins, meist gesellig auf, zu Hunderten oder Tausenden dicht gedrängt. Länge, Höhe und Steilheit wechseln. „Jedoch herrscht innerhalb einer Herde von Rundhöckern in der Regel die gleiche Größenordnung.“ „Eine Abhängigkeit von Gesteinsart und Lagerung besteht nur zuweilen.“ (Philippson II, 2.1924. p.243f.) Die Möglichkeit, daß vorhandene Kuppen unter dem Druck des Gletschers in Rundbuckelform umgeschliffen werden, scheidet also für die Erklärung der 'typischen' Form aus. Auch die Fälle weitständiger, unregelmäßiger und mehr vereinzelter Anordnung vermögen die auffallende Regelmäßigkeit des 'typischen' Grundrißbildes nicht zu entwerten. Weshalb bearbeitet das Eis eine beliebige, auch ebene Gesteinsoberfläche nicht gleichmäßig? Weshalb führt seine Einwirkung zu der differenzierten Form rhythmisch verteilter Buckel? „Der Grund, weshalb der Gletscher mit Vorliebe Rundformen ausschleift, ist noch ungeklärt.“ „Es müssen im Eise am Boden Druckdifferenzen vorhanden sein, die in einem gewissen Rhythmus wirken.“ (Philippson a.a.O.)

Rhythmischen „Druckdifferenzen im Eise“ verdankt auch die

eigenartige Rippung glazialer Felsflächen (*Philippson* II, 2. 1924. p. 245) ihre Entstehung, die man zuweilen statt der Rundformen antrifft. Der Formentypus der „lang in der Richtung des Eises gezogenen parallelen Felsrücken mit Furchen oder Trögen dazwischen“ beherrscht zuweilen ganze Landschaften. Die einzelnen Rücken sind oft viele Kilometer lang. „Durch die Gesteinsbeschaffenheit ist die Rippung nur zuweilen zu erklären, da sie oft unabhängig von der Schichtung verläuft. So ist z. B. das aus flachlagernder, gleichmäßiger Molasse bestehende Plateau zwischen dem Genfer See und Freiburg durch den Rhône-gletscher in typischer Weise in dessen eigener Bewegungsrichtung (hier SSW-NNO) gerippt.“ Beim Plateau- und Inlandeis kommt es auch sonst zu Differenzen quer zur Bewegung: Schneller bewegte und mächtigere 'Strömungen' wechseln mit zurückbleibenden Streifen. So muß, wie bei den Gebirgsgletschern, „auch im Boden dieser Vereisungen die Neigung bestehen, trogförmige Mulden und Rücken auszarbeiten“. (a. a. O. p. 227.) In vielen Fällen mögen diese Mulden von Flußtälern vorgebildet sein. Daß dies jedoch keine notwendige Voraussetzung für das Zustandekommen der Differenzierung ist, zeigen die Fälle, wo die Richtung der Eisbewegung von der Richtung der vorgebildeten Täler abweicht. Die Tröge und Furchen sind hier genau der Richtung der Eisbewegung entsprechend eingeschliffen. „So ist die Gegend von Kristiania stark gerippt quer über die Täler hinweg.“ (*Philippson* a. a. O. p. 262.)

Die „rhythmische Kräfteverteilung“ im Eise äußert sich bei den Gebirgsgletschern hauptsächlich in einer Differenzierung des Längsprofils. Das Talsohlengefälle von Gletschertälern ist viel ungleichmäßiger als das von Flußtälern. „Strecken fast ebenen Talbodens wechseln mit steilen Stufen.“ (*Philippson* p. 252f.) Dieser Stufenbau, und zwar in steilen und oft viele Hunderte von Metern hohen Stufen, ist fast für alle vergletschert gewesenen Täler charakteristisch. Die Stufen fallen quer über die ganze Breite des Trogbodens annähernd gleichmäßig ab. Die Erklärung als „Konfluenzstufe“ trifft nur für gewisse Fälle zu. Auch Gesteinsunterschiede sind meist nicht vorhanden. Die regelmäßige Aufeinanderfolge der Stufen läßt deshalb auch hier das Walten einer systembedingten Differenzierung vermuten. Zu der Stufenform gesellt sich vielfach noch eine 'Ungleichsinnigkeit' des Sohlengefälles. Aus dem anstehenden Gestein der Talsohle schleift die Gletschererosion einen Wechsel von 'übertiefen' Becken und von Felsriegeln aus. „Analogien dazu bieten die Kolke in den Flußbetten, die aber viel seltener und kleiner sind.“ „Diese Riegel bilden häufig die Krönung einer Talstufe, kommen aber auch ohne Stufe vor.“ (*Philippson* p. 253f.) Auch hier hat man zunächst nach

lokalen Ursachen gesucht. Die Riegel sollen durch das zonale Auftreten von härteren, massigeren oder spaltenärmeren Gesteinen bedingt sein. *Salomon* (Abh. geol. Reichsanst. 21, 2) sucht diese „Lokalisierung“, diese „Selektion“ der Gletschererosion auf „Differenzen der Klüftbarkeit und der Anordnung ihrer Ebenen“ im homogenen Gestein zurückzuführen. Wenig Wahrscheinlichkeit hat die Annahme des Einflusses lokaler Talverengungen oder lokaler Gefällsverminderungen für sich. „Bei manchen Becken, die unterhalb einer Konfluenzstufe oder auch ohne solche am Zusammenfluß von Gletschern liegen, kann die Ursache der Druckverstärkung in dem Zusammenfluß gesucht werden. Auch der plötzliche Übergang von steilem zu flachem Gefälle, wie am Fuß einer Stufe, kann, wie beim Wasserfall, ein Becken ausarbeiten. Bei vielen Becken trifft aber alles dies nicht zu.“ (*Philippson* a. a. O.; übereinstimmend *Passarge* III. 1920. p. 321f.) Vielmehr sehen wir uns auch hier wieder zu der Annahme einer „rhythmischen Kräfteverteilung im Gletscher“ genötigt. — Diese Feststellungen *Philippsons* sind eine willkommene Stütze der von uns vorgetragenen Anschauungen von ‘Selbstdifferenzierung’ bei morphologischen Erscheinungen.

Ebenso wie die oben besprochenen ‘Drumlins’ können sich auch Dünen systeme über festliegenden Kernen aufbauen. Der Sand entstand in solchen Fällen meist an Ort und Stelle, durch die Zerstörung der sandhaltigen Hügelkerne unter der Einwirkung der Atmosphäre. *Vatonne* (zit. *Sokolow* 1894 p. 182) beobachtete solche Hügel (aus Kreide, Mergeln und Sandsteinen) in der tripolitan. Sahara bei Ghâdamês und verfolgte die allmähliche Bedeckung der Hügel mit Sand, von der ersten dünnen Sanddecke bis zur vollkommenen Umhüllung. — Die Entscheidung, ob eine echte ‘lebendige’ Düne oder nur eine ‘tote’ Hindernisform vorliegt, kann auch hier nur von einer Gesamtbetrachtung des Systems aus getroffen werden. Ein anderes ist es, ob sich die Selbstdifferenzierung innerhalb eines Systems bei ihrem tastenden Vorgehen der Hindernisse zu eigenen Zwecken bedient, ein anderes, ob letztere selbständig und unabhängig voneinander den Sand an sich zu ziehen und so festzuhalten suchen. Die Entscheidung, wieweit im einzelnen Falle der Sand, oder aber das Hindernis für die Anordnung und die Größe der Formen maßgebend ist, gehört zu den schwierigsten Aufgaben der Morphologie. — Was die Küsten- und Flußuferdünen anbelangt, so neigt man heute dazu, sie ganz der Vegetation auszuliefern und dem Sande für die Formbildung nur eine passive Rolle zuzubilligen. Eine systembedingte Anordnung der Einzelformen wäre dann nur noch insofern verwirklicht, als auch der Rand der Vegetationsbedeckung, der sich mit der Dünenzone räumlich deckt, nicht, wie es zunächst scheint, ‘willkürlich und regellos’, sondern

nach einer gewissen lockeren Gesetzmäßigkeit ausgefranst und aufgelöst zu sein pflügt. Denn nicht an jeder beliebigen Stelle entwickelt sich ein pflanzliches Hindernis, und nicht jedes 'Hindernis' wird zum erfolgreichen Sandfänger. Außerdem wird, je höher die Erhebung, umso mehr der Sand dem Pflanzenwachstum seine eigenen Stabilitätsbedingungen vorschreiben. Es ist aber nützlich, zunächst den Gegensatz zu den auf dem Wege reiner Selbstdifferenzierung entstandenen echten, kahlen Wüstendünen scharf herauszuarbeiten. Schon die erste Vorbedingung zu einer Selbstdifferenzierung fehlt bei ihnen: Kein flach und weit ausgebreitetes System mit gleichen Bedingungen über die Fläche hin, sondern nur ein schmaler Streifen an der Grenze des bewachsenen Landes gegen den pflanzenfeindlichen Strand ist hier Schauplatz der Dünenbildung. Die Übersandung der Randgebiete der Pflanzenzone hat hier zur Bildung eines festliegenden, dem Verlauf der Küste folgenden 'Randwulstes', der *Solgerschen* 'Urdüne', geführt. Den Rand der Wüstengebiete säumen ähnliche Wälle ein; es ist die Übertrittsstelle in eine feuchtere, eventuell auch vegetationsbedeckte Zone. (*V. Cornish* 1914 p.70; *v. Staff* 1906 p.56, für den Rand der Pußta.) Neben der Vegetation wirkt hier die Feuchtigkeit verfestigend. Je nach den örtlichen Bedingungen tritt der Randwall auf als einheitlicher Vegetationswall, oder als hintereinandergestaffelte Rücken (Vgl. *Solger* 1910 p.51ff.), oder als kurze Rücken und Kuppen von verschiedener Höhe, nach Art von Bollwerken mit Vorpostenketten. Durch die erste Entstehung all dieser Sandhügel an 'zufälligen' Hindernissen kommt etwas Willkürliches in die ganze Anordnung, das erst durch sekundäre Momente, bsd. durch die gleichmäßigen Bedingungen, die die Topographie fast an jeder Stelle darbietet, wieder ausgeglichen wird. So erklärt sich der reihenweise Zusammenschluß der Einzelformen. (*Sokolow* 1894 p.140 u.151f.) Liegen die Verhältnisse bei den einzelnen Vorkommnissen also auch sehr verschieden, so lassen sich doch nach *Philippson* (II,2.1924.p.275) drei Elemente des Küstendünenstreifens herausheben, deren gesonderte Betrachtung den Formenschatz etwas verständlicher macht: 1. Als Grenze gegen den Strand hin ein geschlossener kuppiger Sandwall: die Vordüne; 2. dahinter ein oft mehrere Kilometer breiter Dünenegürtel, mit kuppigen Dünenzügen und Einzeldünen in unregelmäßiger Anordnung besetzt; 3. als Abschluß gegen das Binnenland ein besonders hoher und zusammenhängender Wall. — Auch in dynamischer Hinsicht scheidet die Küstendüne aus der Reihe der rhythmischen Phänomene aus, denn sie bedient sich der Pflanzen nicht nur als 'Ansatzkern', sondern ist in ihrer Existenz ganz und gar von ihnen abhängig. Sie vermag sich überhaupt nur auf den Krücken der Vege-

tation emporzuarbeiten, sie läßt sich von ihr in einer eigenartigen Arbeitsgemeinschaft künstlich emporzüchten und fällt wieder in sich zusammen, wenn man ihr diesen äußeren Halt nimmt. Sie entsteht, wächst und erhält sich mit fremder Hilfe. Wo infolge zu starker Winde kein Pflanzenwuchs aufkommt, fehlen auch die Dünen. (Solger 1910 p.115.) Die vergänglichen embryonalen 'Sandhäufchen' der Strandzone behaupten sich in ihrer Existenz erst, wenn die Strandvegetation von ihnen Besitz ergriffen hat. (Th. Otto 1913 p.442.) Versucht die Küstendüne als 'Wanderdüne' die Krücken der Vegetation wegzwerfen⁴⁾, so verliert sie nach und nach immer mehr an Sandmasse und erschöpft im Kampfe gegen den nivellierenden Wind und die anstürmende Vegetation ihre letzten Kräfte. Im Gegensatz hierzu treten uns die Flugsandketten der Wüste als 'Dauerformen' entgegen, die sich von der ersten Entstehung an gleichsam 'ohne fremde Hilfe emporgearbeitet' haben und die Fähigkeit weiteren Wachstums in sich tragen. Angenommen, das Hinterland des Sandstrandes einer Küste oder eines Flußufers wäre eine vegetationslose Ebene, so wären auch hier zwar die Bedingungen zu einer Selbstdifferenzierung der landeinwärts wandernden Sandmassen gegeben, doch würde diese Selbstdifferenzierung, wie bereits an anderer Stelle (Kap. „Rippelmarken und Dünen“) ausgeführt, sich in charakteristischer Steigerung nach leewärts hin erst allmählich ausbilden, nicht aber schon unmittelbar an der Ausgangsstelle des flugfähigen Materials zu derartig gedrängten und ausgeprägten Dünenbildungen führen. Und künstlich läßt sich der Grad der Selbstdifferenzierung nur in sehr geringem Maße beschleunigen, denn auf künstliche Bildungen wirkt der Wind im allgemeinen sogleich zerstörend und abtragend. Wenn die entblößten Küstendünen oft ein mit dem der Wüstendünen übereinstimmendes Querprofil zeigen, so ist dies gleichsam nur eine übergestreifte Maske.

Ein morphologischer Typus kann nicht durch Vorkommnisse widerlegt werden, die nicht zu ihm passen. Wir haben im vorstehenden nur den verbreiteten Typus der Küsten- und Flußdünen vor Augen gehabt. Die Bezeichnung als solche sagt ja zunächst nur etwas aus über die Herkunft des flugfähigen Materials. Und so sind naturgemäß auch Küsten und Flüsse denkbar, die einem angrenzenden vegetationslosen Trockengebiet Material zum Bau echter wandernder Reibungsdünen liefern.

Die Vorgänge bei allen rhythmischen Phänomenen komplizieren sich, sobald eine Vegetationsbedeckung mit ins Spiel kommt.

⁴⁾ Nach Solger (1910 p.141ff.) hängt jeder kahle Flugsandabhang, jede Wanderdüne in irgendeiner Weise zusammen mit der Zerstörung einer bewachsenen Düne.

Die Art ihrer Einwirkung ist je nach den Bedingungen verschieden. Zunächst kann die Vegetation einen auch ohne sie vorhandenen Rhythmus befestigen, steigern, akzentuieren. Neben den Steinkappen sind es Rasenstücke, Strauchwerk und Bäume, die als Krönung der Erdpyramiden diese noch schärfer hervortreten lassen. Dünen oder sonstige Sandhügel, die eine Pflanzenkappe tragen, können es zu einer auffallenden Steilheit bringen. *Sokolow* (1894 p.187) und *Lessar* (zit.Ebda.) trafen in Sandgebieten, die teilweise mit Gras und Gebüsch bewachsen waren, stets höhere Dünen an als auf kahlen Sandflächen, auf welchen die Dünen Sichelgestalt besitzen. „Zu dieser Höhenzunahme tragen die auf dem Dünengipfel wachsenden Sträucher selbst bei, indem sie den zugewehten Sand aufhalten.“ (Ebda.p.254.) — Die Vegetation kann ferner einen Rhythmus erst schaffen, der ohne sie nicht oder kaum in die Erscheinung treten würde. Die von *Th. Thoroddsen* (1913; s.a. *B. Högbom* 1914 p.326f.) beschriebenen Bülten (thufur) auf Island erhalten dadurch, daß sie mit Vegetation bedeckt und mit Rasentorf bekleidet sind, die Fähigkeit, sich zu heben und ihre so gewonnene Form zu behalten; denn der humusreiche Rasentorf besitzt eine bedeutende Kapillarität und eine enorme Wasserkapazität. „Auf vollständig nacktem Tonboden sind keine Bülten zu sehen.“ — Die unbeweglichen sandigen ‘Vegetationshügel’ der Trockengebiete sind der unmittelbare Ausdruck einer entsprechend differenzierten Verteilung der pflanzlichen Bedeckung: „Their universality in arid and semiarid regions is largely due to the tendency of desert plants to grow in clumps or colonies with bare spaces between. These isolated colonies easily catch the blown dust and sand.“ „It is obvious that similar mounds may be produced by the removal of soil from the intervening spaces instead of by accumulation at the locus of the plant.“ (*Free* 1911 p.50f., mit Lit.; s. a. *Sokolow* 1894 p.71; p.174f.: „Neulinge“; p.183 Anm.) Die Vegetation leitet hier als aktiver ‘Keimbildner’ und ‘Sandfänger’ die ganze Formbildung von den ersten Anfängen bis zur ausgewachsenen Dauerform, dank der eigentümlichen Fähigkeit gewisser Pflanzen (z. B. der Sandweide, der Tamariske, des Strandhafers), sich immer wieder aus dem Sande hervorzuarbeiten. Der Strandweizen, das Strandrohr u. a. leiden unter wiederholten Sandverwehungen nicht; im Gegenteil scheinen diese für ihr Gedeihen wesentlich zu sein, da sie an festgelegten Dünen, bei denen die Sandbewegung aufgehört hat, bald absterben. (*Sokolow* 1894 p.70.) Dieser Vorgang des allmählichen Heranwachsens eines bedeutenden ‘Vegetationshügels’ aus einem winzigen Pflanzenkeimling mag die empirische Wurzel gewesen sein für jene berühmte ‘Theorie der kleinen Hindernisse’. „In fact most examples of the influ-

ence of small hindrances as originating dunes observed in nature refer to this consequence of the action of plants.“ (*Ivar Högbom* 1923 p.121.) — Wie die Entstehung, so wird auch die Art der Verteilung und Anordnung der Formen geregelt durch die jeweiligen Wachstumsbedingungen der Vegetation. „Die schwächeren, aber dichteren Arten des Sandstrandes und der Vordüne hatten alle die Tendenz, zwischen sich oder um sich Einzelanhäufungen von Sand zustande zu bringen; nur da, wo etwa eine Art in großer Menge auftrat, kam ein gleichmäßiger Dünenzug durch sie allein zustande.“ Die ganze Düne entsteht so aus einzelnen Buckeln und kleinen Hügeln. An der Ostsee ist es hauptsächlich der Strandroggen (*Elymus*), der die einzelnen Rasen und Trupps mit seinem Rhizomgeflecht verbindet, durch seine Ausbreitung die kleinen Einzelbuckel mehr oder weniger zum Verschwinden bringt und so der Düne zu einer gleichmäßigeren Oberfläche verhilft. (*P. Graebner* i. *Solger*, Dünenbuch.1910.p.217.)

Während die büschelartig über ein nacktes Gelände verteilte Vegetation, wie wir hier sahen, die Differenzierung der Oberflächenformen steigert oder sie überhaupt erst schafft, pflegt eine mehr oder weniger geschlossene Pflanzendecke ganz im Gegenteil eine Formenmannigfaltigkeit, die sie etwa vorfindet, zu verwischen und auszugleichen. Die Selbstdifferenzierung wird von der sich über sie hinwegziehenden Pflanzendecke gewissermaßen erstickt. Das Flußnetz der bewachsenen Landschaft ist viel weitmächtig als das feingegliederte der vegetationslosen Landschaft. Besonders die Karrenbildung braucht ebene und kahle Flächen. „Die Vegetation bringt die Karrenbildung größtenteils zum Stillstand.“ „Wohl werden vorhandene Karren durch die ätzende Wirkung von Humussäuren und Sickerwasser unter Schutt und Vegetation ab und zu weitergebildet, nirgends ist aber eine Neubildung von wirklichen Karren unter solcher Bedeckung nachgewiesen worden.“ (*P. Arbenz* 1913 p.7 u.ö.) Nach *Alb. Heim* (zit. *Eckert* 1895 p.56) hört die Bildung der Karren auf, sobald sie von der vordringenden Alpenvegetation und von Humusboden überdeckt werden. — Auch die Differenzierungsformen des lockeren Sandes, Reihendünen, Inlanddünen und Barchane, bedürfen nackter und ebener Flächen; schon gegen geringe Störungen sind sie äußerst empfindlich. Wird eine Sandwüste mit wandernden Barchanen durch Vegetation 'festgelegt', so zeigt sich neben der Verwischung der Sichelgestalt zunächst noch eine gewisse Höhenzunahme der Kämme, wenigstens soweit die vordringende Vegetation auch von diesen Besitz ergriffen hat. (Typus der 'höckerigen Wüste'.) „Bei weiterer Bewachsung der Höckersande, vorwiegend natürlich der Mulden und der unteren Teile

der Höcker, findet der Wind nirgends mehr Material, um die Hügel zu erhöhen, und es bleiben seiner Tätigkeit nur die Gipfel preisgegeben.“ Er trägt sie ab und lagert den Sand unter dem Schutze der Büsche in den Mulden, den Zwischenräumen der Höcker, nieder und füllt sie allmählich aus. Auf diese Weise wird die häufende Tätigkeit des Windes durch die nivellierende abgelöst. Die Höckersande gehen allmählich über in eine schwachhügelige Sandsteppe. (*Sokolow* 1894 p.265; ähnlich *Solger* 1910 p.152.)

Zusammenfassung:

Während bei der im vorigen Kapitel besprochenen 'selektiven Differenzierung' die regelmäßigen Verschiedenheiten bereits latent 'angelegt' waren und nur 'ausgeprägt' zu werden brauchten, bilden sich bei der Eigen- oder Selbstdifferenzierung die regelmäßigen Verschiedenheiten erst im Verlaufe des Reibungs- oder Spannungsvorganges 'spontan' und 'simultan' aus der zunächst homogenen und strukturlosen Masse heraus. Voraussetzung ist, daß der ganze zu differenzierende Bereich ein zusammenhängendes physikalisches System bildet. Physikalische Systeme haben die Fähigkeit der 'Selbstordnung', d. h. der spontanen Annahme einer Eigenstruktur. Diese deutliche und straffe Raumordnung wirkt besonders auffällig und beansprucht unser besonderes theoretisches Interesse, wenn sie nicht 'einfach' bleibt, sondern sich in sich differenziert. Die auffallende Regelmäßigkeit der Formenmuster unserer rhythmischen Phänomene erhält ihre theoretische Begründung erst durch die Einführung des Begriffes der Selbstdifferenzierung. Diese findet sich besonders gut ausgebildet bei flacher, schichtenartiger Ausbreitung und bei scharfer Diskontinuität der Differenzierungszone gegen ihre Unterlage. Die Selbstdifferenzierung ist ein 'Summationseffekt' und verlangt deshalb eine gewisse Langsamkeit und Stetigkeit des Geschehens. Sie tritt uns nicht immer in reiner Ausprägung entgegen. Es führen Übergänge von den regelmäßigen Mustern der 'geselligen' Formen über die unregelmäßige Gruppenbildung zu den Einzelformen der 'solitären' Gebilde. Die Fälle von Anhäufung um vorhandene Ansatzkerne herum leiten ferner über zu den reinen 'Hindernissen'. Kennzeichen der letzteren ist, daß sie dem sie verursachenden Hindernis fest und starr anliegen und auch in Größe und Gestalt von ihm dauernd abhängig bleiben. Von ihnen zu unterscheiden sind die Fälle, wo ein 'minimales Hindernis' nur den 'Bildungskeim', den ersten Fixpunkt liefert, oder die Fälle, wo ein größeres Hindernis für das erste Entwicklungsstadium den 'Ansatzkern' abgibt. An dem Beispiele der Drumlinformen werden diese verschiedenen Stufen

der Abweichung von der reinen Selbstdifferenzierung veranschaulicht. Die in den anstehenden Fels glazialer Landschaften eingeschliffenen „Rundhöcker“ und langgestreckte „Rippungen“, ebenso die Stufen-, Riegel- und Beckenbildung sind Beispiele relativ ungestörter Selbstdifferenzierung. Die Küsten- und Flußuferdünen unterscheiden sich von den echten, kahlen Wüstendünen dadurch, daß sich bei ihnen der Vorgang der Selbstdifferenzierung nur sehr unvollkommen entfaltet. Der eigentliche Dünenbildner ist hier die Vegetation, deren Wachstumsgesetzen auch die Anordnung der Einzelformen gehorcht. Überhaupt kompliziert sich bei den rhythmischen Phänomenen das Formenmuster, wenn eine Vegetationsbedeckung mit ins Spiel kommt. Sie wirkt je nach den Bedingungen in verschiedener Weise: 1. Sie schafft überhaupt erst einen Rhythmus, der ohne sie nicht oder kaum hervortreten würde (‘Vegetationshügel’). 2. Sie befestigt oder steigert einen auch ohne sie vorhandenen Rhythmus. 3. Wo sie mehr oder weniger geschlossen auftritt, wirkt sie verwischend und ausgleichend auf eine gegebene Formenmannigfaltigkeit.

XIX.

Zur Physik der rhythmischen Phänomene.

1. Gravitation und Oberflächenspannung.

Für die formbildenden Vorgänge der Erdoberfläche kommen im wesentlichen zwei in ihrer Wirkungsweise entgegengesetzte Kräfte in Betracht: die Schwerkraft und die Oberflächenspannung. Jene gleicht aus, verflacht und verwischt, diese sondert, führt zusammen, individualisiert und schafft neue Formunterschiede. Jene ist ‘nivelleur’, diese Reliefbildner. Jene schafft mit an der Architektur, den Großformen des Erdbaues, diese liefert die ornamentale Auszierung. Deduktive Überlegungen, die auf der vorherrschenden Wirksamkeit der Gravitation fußen, werden als vorläufiges oder absolutes Endziel jedes Erdgeschehens den Formausgleich, die sich in endloser Eintönigkeit hin-streckende *Peneplain* (*Davis*) und ein verwaschenes Stoffgemenge hin-stellen und werden zur Erklärung der trotzdem vorhandenen und sich kaum vermindernden „ektropischen Mannigfaltigkeiten“ (*P. Kammerer* 1919 p.157ff.,163ff.) zum Gedanken des „Kreislaufes“ (*Linck* 1912) ihre Zuflucht nehmen. Einer späteren Zeit wird es unfaßbar sein, daß man Jahrzehnte hindurch morphologische Lehrgebäude errichtet hat ohne Berücksichtigung der morphologischen Kraft *kat'exochén*, der Ober-

flächenspannung. Diese wissenschaftliche Lücke erklärt sich wohl z. T. daraus, daß in der Physik vorzugsweise die Äußerungen der Oberflächenspannung bei ruhenden Medien, nicht die bei bewegten, Beachtung gefunden haben.

Überall dort, wo man sich Gestaltungen vollziehen sieht, die vom Standpunkte der Gravitation etwas Auffallendes, ja Paradoxes haben, darf man mit einiger Sicherheit die Wirksamkeit einer Oberflächenspannung vermuten. Wir werden sie in besonderer Reinheit überall da ausgebildet finden, wo die Schwerkraft am unwirksamsten ist, also bei starker sog. Oberflächenentwicklung. Bekanntlich werden die eigenartigen gravitationswidrigen und 'ektropischen' Erscheinungen der kolloidchemischen und biologischen Prozesse gerade auf ihre enorme Oberflächenentwicklung zurückgeführt. *Driesch* bezeichnet die Oberflächenspannung als 'Mittel' der Morphogenese. Das Organische hat sich der 'Erdenschwere' am erfolgreichsten entledigt. Unsere Phänomene machen die ersten Ansätze hierzu¹⁾.

Um die Wirksamkeit der Oberflächenspannung in den oft sehr eigenartigen und sich von der Kugelgestalt stark entfernenden Bewegungsformen festzustellen, bedarf es zunächst einer richtigen Auffassung vom Wesen der Oberflächenspannung. Es gilt, sich von gewissen Vorstellungen zu befreien. Zunächst von der Vorstellung der 'Spannung', als handle es sich um die elastische Kontraktion einer gespannten Oberflächenmembran oder um eine Spannungsverminderung der tangentialen Komponente der Kohäsionskraft. Diese Anschauung verführt leicht dazu, die letzte Ursache des Geschehens, statt in die Einwirkung auf die Grenzflächenzone vom Nachbarmedium her, in die Oberflächenhaut selbst, bzw. in den Körper selbst als Ganzes zu verlegen. Oberflächenspannung ist jedoch eine auf äußere Beeinflussung hin einsetzende Reaktionserscheinung. — Dann von der Vorstellung, daß das Wesen der Erscheinung in der Herstellung einer bestimmten Form bestehe (Tendenz zur Kugelgestalt, Tendenz zur

¹⁾ Es gibt also nicht nur in der organischen (W. Roux 1912; vgl. Auerbach 1912), sondern auch in der anorganischen Natur einen „formativen, gestaltliche Mannigfaltigkeit produzierenden Ektropismus“. Dieser Ektropismus ist jedoch auch hier nur eine „besondere Art“ der Entropie. Denn gerade unsere rhythmischen Phänomene zeigen, daß Entropismus keineswegs immer gleichzusetzen ist mit 'Verteilung', 'Zerstreuung', nivellierendem 'Ausgleich', mit der Ausglättung, Verflachung einer bestehenden Formenmannigfaltigkeit, dem Abbau eines irgendwie Strukturierten, sondern daß unter Umständen sogar „die Mannigfaltigkeit der sichtbaren und unsichtbaren Gestaltung“ durch ihn selbst vermehrt werden kann. Die Vorstellung, die man vom 'dynamischen Gleichgewicht' zu haben pflegt, ist hier nach zu korrigieren.

kleinsten Oberfläche), denn sie scheidet als formalistisch aus der Reihe berechtigter Denkweisen aus. — Ferner von der Vorstellung, als beschränke sich der Gültigkeitsbereich der Oberflächenspannung auf flüssige Medien und auf 'kapillare' Ausmaße. Richtig ist nur, daß sie bei sehr kleinen Stoffmengen allerdings für das Verhalten der Stoffe schlechthin bestimmend wird, da hier der Widerstand der Gravitation leichter zu überwinden ist. Kugelformen größeren Maßstabes erhält man u. a., wenn das umgebende Medium die gleiche Dichte wie das umschlossene hat. — Bekanntlich besitzen auch die festen Körper eine Oberflächenspannung; sie lassen sich als Flüssigkeiten mit großer innerer Reibung auffassen, anderseits die Gase als solche mit kleiner innerer Reibung; Übergänge lassen sich experimentell verfolgen; so nimmt z. B. die Oberflächenspannung einer Flüssigkeit gegen ihren Dampfraum mit steigender Temperatur nach einer linearen Funktion ab und wird schließlich, wenn die Differenz der beiderseitigen inneren Reibung wegfällt, gleich Null. Der Reibungskoeffizient nimmt entsprechend mit steigender Temperatur ab^{1a}). Innere Reibung ist allen Medien eigentümlich, wir haben nur graduelle Unterschiede zu erwarten. Das Auftreten der rhythmischen Differenzierung und die jeweilige Form dieser Gebilde sind eine Funktion der inneren Reibung. (Vgl. z. B. *Hahmann* 1910.) Die viskosen Wellen des Teers sinken in sich zusammen und verschwinden, wenn man die Reibung aufhebt, die ihre Entstehung veranlaßt hat; es sei denn, daß eine starke 'Oberflächenentwicklung' das Weiterbestehen der 'Oberflächenspannungskörper' ermöglicht. „Ist die Bewegung sehr energisch, so trennt das Wasser schließlich die viskosen Wellen des Teers voneinander, indem es sich zwischen sie einschiebt, und diese bleiben dann bestehen, auch nach Aufhören der Bewegung.“ (*Candolle* 1883 p. 249. Übersetzg.) — Es gilt, sich überhaupt von dem Vorurteile freizumachen, als erschöpfe sich die Wirkung der sog. 'Reibung' in der Verzögerung von Bewegungen, oder als sei sie gar gleichbedeutend mit dem Widerstande, den äußere Rauigkeiten und Eckigkeiten dem sich vorbeibewegenden Medium zu bieten pflegen. Es könnte nicht von 'glatter Reibung' ('äußerem Gleitwiderstand') und auch nicht von 'innerer Reibung' ('innerem Gleitwiderstand') die Rede sein, wenn wir nicht mit einer eigentümlichen Tendenz der Materie rechnen dürften, erzwungenen Verschiebungen ihrer Teilchen gegen-

^{1a}) Ram Krishen Sharma (Quart. Journ. Indian Chem. Soc. 2. 1925. p. 310f.; Phys. Ber. 1926) untersuchte die Beziehungen zwischen der Oberflächenspannung und der Zähigkeit von Flüssigkeiten und fand: 1. Haben zwei Stoffe bei den Temperaturen T_1 bzw. T_2 (abs.) gleiche Oberflächenspannung, so ist T_1/T_2 durchweg konstant. 2. Der Logarithmus der Oberflächenspannung eines Stoffes ist eine lineare Funktion des Logarithmus der Viskosität.

einander Widerstand zu leisten, eine Tendenz, die sich nicht nur in Bewegungsverzögerungen, sondern darüber hinaus noch in formalen und strukturellen Umlagerungen der Grenzzone äußert.

Die morphologische Analyse legt den Gedanken nahe, in der Oberflächenspannung eine Fähigkeit der Materie zu sehen, deformierende Einwirkungen so durch geeignete Umlagerungen zu beantworten, daß die Menge der vorhandenen inneren Reibungsbewegungen dadurch vermindert wird. — Die Oberflächenspannung bei ruhenden Medien kann keine großen Wirkungen erzielen, da hier als Erzeuger von inneren Reibungen in der Grenzzone nur kleine Störungen und Erschütterungen und die *Brownsche* Bewegung der Moleküle des Nachbarmediums in Betracht kommen; die völlige Bewegungslosigkeit ist bekanntlich nur scheinbar. Befindet sich dagegen das Nachbarmedium in sichtbarer Relativbewegung zum betrachteten Medium, so wird es in diesem auch lebhaftere und umfanglichere innere Reibungsbewegungen hervorrufen, und so wird auch die Reaktion hierauf eine stärkere sein können: die Umlagerungen zur Verminderung der Reibungsmenge nehmen entsprechend größere Ausmaße an. Die Tätigkeit der sog. Oberflächenspannung besteht also darin, immer weitere Partien des Mediums aus der bewegten 'Kampffront', dem Bereiche störender Einwirkungen, herauszuziehen und sie in 'Ruhestellungen' 'hinter der Front' überzuführen. Dies ermöglicht und erreicht sie durch fortschreitende Verkürzung und Abrundung des Frontverlaufes. Bei den flüssigen Kristallen sind diese Umlagerungen bekanntlich schrittweise zu verfolgen. Der Einbeziehung weiterer Partien in die Ruhestruktur dient auch die Vereinigung mehrerer kleinerer Massen der gleichen Substanz zu einer einzigen Masse. Die zahlreichen kleinen Tropfen einer beschlagenen Glasscheibe z. B. vereinigen sich im Laufe der Zeit zu größeren Tropfen. Unsere rhythmischen Phänomene zeigen entsprechendes Verhalten. — Auch wo es nicht zu besonderen Formbildungen kommt, läßt sich der Widerstand der Materie gegen scherende Deformationen ihrer Grenzzone (innere Reibung) bereits feststellen. Körner auf der Oberfläche des lockeren Sandes, der Einwirkung des Windes ausgesetzt, nehmen nach Verlauf einiger Zeit die Lage an, in welcher sie dieser Einwirkung den größten Widerstand zu leisten vermögen. (*Sokolow* 1894 p.14.) In Wasser niederfallende Körper suchen sich in solche Lage zu setzen, daß sie den größtmöglichen Widerstand zu ihrer Bewegung durch das Wasser bieten. (*Owens* i. Diskuss. zu *King* 1916.)

Hierzu kommt ein weiteres. Bestimmend für die Wirksamkeit der inneren Reibung ist nicht das spezifische Gewicht, die Dichte, oder die

chemische Beschaffenheit, sondern allein die Korngröße der Partikeln. Dies wird für die groben makroskopischen Verhältnisse ebenso zutreffen wie für die molekularen. Besitzt eine beliebige, ständigen Kleinbewegungen oder Verschiebungen ausgesetzte Masse Partikeln verschiedener Korngröße, so muß sich auch hier die Tendenz zum Minimum der inneren Reibung in entsprechenden strukturellen Umlagerungen äußern. Und zwar werden sich die feinkörnigsten Partikeln am ersten aus der bewegten Zone herausziehen und sich der Ruhestuktur angliedern, da die innere Reibung bei ihnen den größten Wert hat. Die gröberen Bestandteile werden von ihnen in die bewegte Kampffront hinausgestoßen, sie haben einen geringeren „Haftdruck“ (*Traube*). Die Sortierung vollzieht sich unter Umständen sogar im auffallenden Widerspruch zur Schwerkraft. Bekannt ist das Auffrieren von Steinen, Blöcken, Saurierknochen an der Oberfläche der Fließerde in arktischen Gebieten; selbst die schweren Toneisensteine (Spezif. Gew.: 3,3 gegen Fließerde : 2—2,5) machen den Vorgang mit. (*B. Högbom* 1914 p.304; 1910 p.49.)²⁾ Aus Wüstengebieten wird das Auswittern von Kieselkonkretionen, von abgesprengten Splittern von Grundmauern usw. berichtet. (*J. Walther* ²1912 p.124 u.130f.) Quelle der Kleinbewegungen und Verschiebungen des Erdmaterials sind auch hier wieder die starken, regelmäßigen Temperaturschwankungen, verbunden mit Exsudation bzw. Regelation. Auch das Wesen des Strukturbodens besteht in einer solchen Sortierung im Bereiche der Regelationswirkungen: Alles gröbere Material reichert sich nach der Oberfläche zu an, während die tieferen Lagen einen oft auffallend großen Gehalt an feinerem Material aufweisen. (*B. Högbom* 1914 p.304.) Die Wirkung von Kleinbewegungen auf Aggregate mit Partikeln verschiedener Korngröße läßt sich durch Schüttelversuche experimentell verfolgen. Man sieht dann, wie sich die feineren Partikel unter die gröberen herunterarbeiten. Bei zu großer Verschiedenheit des spezifischen Gewichtes überwiegt jedoch die Schwerkraft, und die Sortierung erfolgt in entgegengesetzter Richtung, z. B. wenn man einen Mehlkasten beutelt, der ein Stück Eisen enthält. (*Cholnoky*, Spitzbergen. 1912, zit. *B. Högbom* a.a.O.) So hat die Auswitterung von Gegenständen auch ihr Gegenstück in der natürlichen Begrabung (*burial*) von Gegenständen in den Boden. Sie vollzieht sich z. T. ebenfalls im Anschluß an gegenseitige Bewegungen der Erdpartikeln. Wenige Jahre genügen oft, um das Begräbnis an Steinen,

²⁾ Passarge (III.1920.p.184) weist auf die bekannte Erscheinung hin, daß sich Rinnen rund um Steine bilden, als hätte sich die Erde von den Steinen zurückgezogen. Bei großen Blöcken kann die Rinne einen bis einige Dezimeter breit und ebenso tief sein. Man wird hierbei an den Meniskus nicht benetzender Flüssigkeiten erinnert.

Münzen, Medaillen u. dergl. zu vollziehen. „Even more striking is the fact that a layer of ashes, lime etc., if spread on a field will gradually sink as a layer (!), and may be found years later as a distinct stratum a few inches below the surface.“ (*Free* 1911 p.106ff.)

Bei der gesonderten Betrachtung der Phänomene (Dünen, Hügelmoränen usw.) haben wir bereits die Formdifferenzierung (die formale Umlagerung) einerseits und die (aktive) 'Schutzdeckenbildung' (die strukturelle Umlagerung) andererseits als zwei Erscheinungsarten desselben Vorganges aufzufassen gelernt. Es ist eine der physikalischen Chemie geläufige Tatsache, daß durch Oberflächenspannungskräfte eine Ansammlung oder Ausscheidung gewisser Stoffe in der Grenzschicht hervorgerufen werden kann. Nach dem sog. *Gibbs*-schen Theorem sammeln sich die 'oberflächenaktiven' (d. h. die Oberflächenspannung von Wasser erniedrigenden) Stoffe an der Oberfläche an, und zwar verdrängen diejenigen, die die Tension am stärksten erniedrigen, die weniger aktiven; sie haben den geringsten 'Haftdruck'. Die Oberflächenschicht wirkt dann bestimmend auf die Formbildung der ganzen Masse, eine Erscheinung von der größten Tragweite, deren Verfolgung in den makromorphen Erscheinungen der Erdoberfläche für den Morphologen von besonderem Reiz ist. — „Eine relativ geringe Flüssigkeitsmenge breitet sich auf der Oberfläche einer anderen sehr stark aus, falls die beiden Flüssigkeiten geeignet gewählt werden. Dabei erteilt die ausgebreitete Flüssigkeit der Oberfläche fast völlig ihre eigenen Eigenschaften. Ein Beispiel bietet die Beruhigung der Meereswellen durch eine Ölschicht.“ (*F. Auerbach*, Molekularkräfte. Handwbtb. d. Nat. 6. 1912. p. 1009.)

2. Phase und Diskontinuität.

Sind in einem physikalischen System verschiedene Substanzarten vereinigt, so wird nach den Sätzen der Thermodynamik das Entropiemaximum nicht etwa in einem homogenen Ausgleich der Verschiedenheiten (durch Vermischung) erreicht, sondern die vorhandenen Substanzarten verteilen sich auf eine Anzahl je in sich homogener 'Phasen', das System zerlegt sich spontan in diskrete 'Phasen' sehr verschiedener Beschaffenheit. Diese 'Phasen' werden durch sog. 'Unstetigkeitsflächen' voneinander getrennt. Doch ist auch die Phasenbildung wiederum nur eine Beantwortung von inneren Reibungsbewegungen. *V. W. Ekman* (Beitr. z. Theorie der Meeresströmungen. Ann. Hydr. 1906) zeigte, daß der Reibungskoeffizient in homogenem Wasser sehr viel größer ist als in geschichtetem, da sich in letzterem die Bewegung längs der durch die Dichtigkeitsunterschiede geschaffenen Gleitflächen mehr laminar vollzieht, während bei

ersterem die Wirbelbildungen große Reibungsverluste verursachen. *Rehbock* (1917 p.9) weist darauf hin, daß bei der turbulenten Bewegung die Verluste an potentieller Energie durch Reibung ganz erheblich größer sind als diejenigen beim Gleiten des Wassers, da beim turbulenten Abfluß beständig eine Mischung verschieden schnell fließender Wassermassen eintritt. Ganz allgemein besitzen die Reibungsbeiwerte zwischen verschiedenen schnell fließenden Wasserteilchen eine beträchtliche Größe und können sogar die Reibungsbeiwerte zwischen Wasser und einer festen Wand erheblich übertreffen. Deshalb ist auch die Energieabgabe des Wasserstroms an die sog. 'Wasserwalzen', bsd. die Grund- und Deckwalzen (*Rehbock* 1917 p.32), so beträchtlich. Denn an der Berührungsstelle erfolgt durch das Eindringen einzelner Wasserfäden vom Wasserstrom in die Wasserwalzen ein sehr inniges ineinandergreifen des Wassers. Eine scharfe Trennung der Walzen vom eigentlichen Wasserstrom ist nicht möglich. — Bei in sich homogenen Medien kommen also, wie wir auch noch in anderem Zusammenhang sehen werden, durchlaufende kinetische Unstetigkeitsflächen kaum zustande. Dagegen kann bei einem inhomogenen System (verschiedene Dichte, Temperatur usw.) die Phasenbildung, teleologisch gesprochen, ein 'Mittel' sein, um an den neu entstandenen Gleitflächen je einen Bewegungssprung zu schaffen und so die Reibungsbewegungen innerhalb der Phasen auf Kosten der (geringeren) Reibung an den Gleitflächen selbst zu vermindern³⁾.

Es gibt keine 'formale' Ordnungstendenz, keine Ordnung als Selbstzweck. Eine in sich ruhende Substanz bleibt immer chaotisch und amorph. Nur wenn Reibungsbewegungen gegeben sind, resultiert eine irgendwie geartete Ordnung. *J. W. Sandström* (1923) stellte Versuche an mit Wasserschichten verschiedener Temperatur und fand dabei, daß scharfe Diskontinuitätsflächen nur durch große relative Geschwindigkeiten zustande kommen. Sobald die relative Geschwindigkeit aufhört, wird die Fläche verwischt, indem ihre Isothermen auseinandertreten. Auch die sog. 'Polarfront' steht und fällt mit dem Auftreten von starken relativen Geschwindigkeiten⁴⁾. Die

³⁾ An den kinetischen Unstetigkeitsflächen scheint die von den angrenzenden Medien gewissermaßen nach hier ausgestoßene Bewegungsenergie in niedere Energieformen wie Wärme und Elektrizität umgesetzt zu werden. Die Experimente von *H. King* (1916 p.206) zeigten, „that sand blown off a dune is apparently heavily charged with electricity, and that that charge is positive. It is probably due to the friction of the sand against the dune, for it is hardly likely that it could have picked up such a heavy charge from the atmosphere“.

⁴⁾ *A. Schmauß* (*Met.Zs.*1919) glaubt dagegen an ein „anscheinend be-

Plötzlichkeit des Auftretens und des Verschwindens von sog. 'Totwasser' (*Ekman* i. Ann. Hydr. 32.1904. p.562ff.) mag ebenfalls hierauf zurückgehen. Unter 'Totwasser' versteht man das Lagern einer dünnen Schicht leichteren Flußwassers oder Brackwassers über salzigem Meerwasser in der Nähe von Küsten. — Ruht über dem Eise eines Sees kalte Luft, so ist die Grenzfläche zu der darüber befindlichen wärmeren Luft zunächst noch diffuse, sie wird erst scharf, wenn die kalte Luft mit großer relativer Geschwindigkeit seitlich (talabwärts) abzieht. — Blieb bei den *Sandströmschen* Versuchen das Wasser im Gefäße still, so verschwanden, wie aus der Mischbarkeit von kaltem und warmem Wasser zu erwarten, die schon vorhandenen Diskontinuitätsflächen, und der vertikale Temperaturgradient wurde wieder gleichförmig. „Wenn man in dieses stabil gelagerte Wasser einen festen Körper eintaucht und denselben zwischen zwei Niveaus bewegt, so entstehen Diskontinuitätsflächen in diesen beiden Niveaus und zwischen denselben eine homogene Wasserschicht. Das beste Mittel, die Diskontinuität dieser Flächen recht scharf zu machen, ist, die homogene Zwischenschicht in zirkulierende Bewegung zu bringen, so daß große relative Horizontalbewegungen bei den Trennungsflächen auftreten.“

3. Welle und Wirbel.

Vorbedingung für die freie Entstehung von Unstetigkeitsflächen ist, wie bereits ausgeführt, eine nicht zu geringe Differenz der inneren Reibung auf beiden Seiten. Ebenso ist das Auftreten der rhythmischen Differenzierung gebunden an eine nicht zu geringe und nicht zu große Differenz der beiderseitigen inneren Reibung⁵⁾. Die Selbstdifferenzierung ergänzt und vervollständigt gewissermaßen das 'Stabilisierungswerk' der Phasenbildung. So bilden sich Luftwogen immer in den Höhen der Atmosphäre, die einen Dichte- und Windsprung aufweisen, d. h. an Schichtflächen der Temperatur. „Über und unter dieser

liebig langes“ Bestehen der Temperaturschichtungen der Luft, die nach ihm „erfahrungsgemäß nur durch konvektive Vorgänge“ zerstört werden.

⁵⁾ Vgl. u. a. Kap. „Rippelmarken“, Abschnitt „Zähigkeitsdifferenz“! Keinesfalls dürfen die beiden Medien verschwommen ineinander übergehen. Der Büßersnee darf nicht feucht sein, da sonst der Gegensatz der beiden Medien aufgehoben würde; starker Regen hemmt die Ausbildung der Meereswellen (Halbfaß, Vergl. *Seenkunde*. 1923 p.146); in den ständig regenfeuchten Gebieten treten Karrenbildungen nur in kleinerem Maßstab auf (Volz, *Nordsumatra* I p.211); auch in den bekannten Karrengebieten hört die echte Bildung unter der Bedeckung mit Erde und Schutt auf, unter Schnee und perennierenden Firnflecken ist sie auch nur unvollkommen entwickelt (Eckert 1895 p.59); ebenso sind die Erdpyramiden gebunden an rasche Austrocknung; breiartige Vermischung von Feuchtigkeit und Erdmaterial ist ihr ärgster Feind.

Grenzfläche liegen Schichten von etwa 200 bis 300 m, in denen die Wogenbildung vor sich geht. Diese Schichten weisen nur geringe, aber sehr regelmäßige Temperaturschwankungen auf ... Die Temperaturschwankungen lassen sich zwanglos dadurch erklären, daß am Meteorographen während des Durchschreitens dieser Schichten regelmäßige Wellenberge mit gehobenen und Wellentäler mit herabsinkenden Luftmassen vorübergezogen sind.“ (*F. Trey* i. Met. Zs. 1919 p. 27.) Sind die Feuchtigkeitsverhältnisse so, daß dicht unterhalb der Schichtgrenze nahezu Sättigung herrscht, so „bildet sich in den aufwärts bewegten Wellenbergen Wolkenmasse, während in den Wellentälern mit ihrer absteigenden Bewegung die Tropfen verdampfen. Dem irdischen Beobachter erscheinen dann die Wellenberge als ebensoviele Wolkenstreifen, während dazwischen in den Wellentälern der blaue Himmel sichtbar wird.“ (*R. Börnstein* i. Handwbt. d. Nat. Bd. 1 p. 596f., nach *Helmholtz*.) In gleicher Weise wird das Erscheinen eines Wogennebels eingeleitet. (*W. Georgii*, Die Ursachen der Nebelbildung. Ann. Hydr. 1920 p. 250ff.)

Die Wogenbildung stellt ein mittleren relativen Geschwindigkeiten angehöriges Zwischenstadium dar. Ist die relative Geschwindigkeit zu groß, so nimmt die Grenzschicht wieder einen gestreckten Verlauf, und die Wogen lösen sich wirblich auf. „Unter solchen Bedingungen, wo wir Wasserwellen branden und Schaumköpfe bilden sehen, werden zwischen den Luftschichten sich ausgiebige Mischungen herstellen müssen.“ (*Helmholtz* i. Verh. phys. Ges. 1889 p. 61.) Hier eröffnet sich eine Reihe wichtiger Probleme. Wie haben wir uns die sog. „Aufrollung der Diskontinuitätsfläche“ im einzelnen zu denken? Auch hier wieder können nicht so sehr deduktive Überlegungen als vielmehr aus den Beobachtungstatsachen induktiv gewonnene Anschauungen zum Ziele führen. Schematisierte mathematische Hilfsvorstellungen dürfen nicht ohne weiteres zum Range realer physikalischer Gebilde erhoben werden. Wir werden also zu untersuchen haben, ob und wie weit die Strömung in der Grenzschicht tatsächlich die Kombination einer gradlinigen (laminaren) mit einer kreisförmigen (spiraligen, wirbelartigen) Bewegung darstellt, bzw. ob und wie weit bei einer Steigerung der relativen Geschwindigkeit jene in diese übergeht. Mit einer gewissen Sicherheit läßt sich schon folgendes feststellen:

Phasenbildung oder Überlagerungen durch Invasion schaffen zunächst glatte und gestreckte Unstetigkeitsflächen. Auf dem Wege der Selbstdifferenzierung findet dann unter gewissen Bedingungen eine Zerlegung der Grenzfläche in ein System von schräg aufgerichteten Stabilitätsflächen (Luvflächen der ‘Wogenbildung’) statt. Diese ‘Wellenform’,

die die Grenzfläche nunmehr angenommen hat, erklärt sich aus der Wirksamkeit der Stabilitätstendenz und steht in keiner unmittelbaren kausalen Beziehung zu irgendwelchen Wirbelungen. Der im Lee der 'Woge' auftretende, oft nur in Andeutung vorhandene, Wirbel ist eine sekundäre Erscheinung, die auf die Formbildung der Grenzfläche keinen wesentlichen Einfluß hat. Keinesfalls ist die Wogenbildung aufzufassen als formale Auswirkung des Vorbeiziehens von mehr oder weniger regelmäßig verteilten hypothetischen Wirbelwalzen, eine Annahme, die in der Beobachtung durch nichts gestützt wird. (Vgl. Kap. XII, Abschnitt f: „Abformung“!) Ebenso wenig haltbar ist die Vorstellung, daß die Wogen immer größere Ausbuchtungen annehmen und sich schließlich in einzelne Wirbelkörper auflösen, wodurch dann die Unstetigkeitsfläche ihr Ende findet (Stadium der 'Aufrollung'). In der Wogenbildung liegt nicht die Tendenz, den Ausgleich und die Vermischung der beiderseitigen Schichten zu befördern (*Helmholtz*, Sitzgsber. 1888, I. p. 661 ff.), sondern sie zu verzögern. Die Steilheit der Wogen geht über ein (ziemlich niedrig anzusetzendes) Maximum nicht hinaus. Bei einer weiteren Steigerung der relativen Geschwindigkeit wird der Umriß der Wogen unbestimmt, sie zerflattern oder werden weggefegt⁶⁾, und die Bewegung an der Trennungsfläche nimmt wieder einen gestreckten und glatten Verlauf. Die Diskontinuität selbst pflegt dann allerdings durch eine den Übergang herstellende Mischungszone (Suspension!) zwischen den beiden Medien etwas unscharf zu werden, aber immer noch ist von dem Auftreten und der formbildenden Wirkung festumrissener und regelmäßig angeordneter Wirbel keine Rede. Vielmehr ist je nach den Bedingungen die ganze Mannigfaltigkeit 'turbulenter' oder auch 'schießender' Bewegungszustände anzutreffen, aus denen sich die Wirbel nicht als selbständige Faktoren herausheben lassen. Die Vermischung der verschieden schnell bewegten Teilchen innerhalb der beiderseitigen Medien besorgt die Turbulenz, und zwar durchaus nicht nur auf dem Wege spiraliger Aufwicklung. Die Existenz und der Verlauf der Trennungsfläche ist durch diese inneren Bewegungen nicht wesentlich gefährdet. Da nach Ausweis der Erfahrung die Trennungsflächen nicht dauernd bestehen bleiben, viel-

⁶⁾ Nach Ausweis der Verhältnisse bei den Rippelmarken, Dünen, Wolkenrippeln, Wasserwellen, dem Wasserabflusse usw. Vgl. auch die Gestaltung der Trennungsfläche zwischen gleitendem und fließendem Wasser in einem (seitlich) schräg gestellten Gerinne: „Stets nahm die Trennungsfläche eine wellige Form an und die Wellen liefen stromab fort, bei den geringeren Geschwindigkeiten blieben sie glatt, bei größeren wurden sie ausgefranst und zeigten bei einer weiteren Geschwindigkeitszunahme das Aussehen brandender Wellen, und sie zerflatterten stellenweise zu wolkenartigen Gebilden.“ (Schoklitsch 1920 p. 917.)

mehr Zirkulations- und Vermischungsvorgänge nichts Ungewöhnliches sind, greift man zu der Vorstellung der mechanischen 'Aufrollung', um mit ihrer Hilfe das Verschwinden der Unstetigkeiten zu erklären. Für *Helmholtz* u. a. sind die Zyklonen und Antizyklonen Glieder in der Kette der allgemeinen Zirkulation. Aufgabe der Forschung wird es auch hier wieder sein, die unzutreffende mechanistische Auffassung durch eine treffendere physiko-chemische zu ersetzen. Die Trennungsfäche wird nicht aufgerollt, sondern bleibt zunächst so, wie sie ist, bestehen, wird dann aber bei Nachlassen und Aufhören der Relativbewegung unscharf und verwischt (diffuse), indem die Isothermen usw. wieder auseinander treten; die Unterschiede gleichen sich aus auf dem Wege einer irgendwie gearteten 'friedlichen Durchdringung'. Eine Stütze findet diese Auffassung an den Lehren der *Bjerknesschen* Schule, die die Zyklonen und Antizyklonen nicht mehr als selbständige Wirbelkörper, sondern als die Wogen einer durchlaufenden Wellenfläche aufgefaßt wissen will. Namentlich zwischen der südwärts dringenden kalten Polarluft und der nordwärts dringenden warmen Luft soll es zu einer wellenartigen Bewegung der (polarwärts aufsteigenden) Gleitfläche kommen. Für die Schnittlinie der Schichtgrenze mit der Erdoberfläche wurde der Ausdruck 'Polarfront' geprägt. Wo die Diskontinuität unscharf ist, bricht die Reihe der Wellen (sog. 'Zyklonen') ab. Die Existenz 'aufgerollter' Wirbel wird bestritten. (Vgl. u. a. *R. Wenger*, Neue Grundlagen der Wettervorhersage. *Met. Zs.* 1920. p. 247.) Besonders die schnell wandernden Zyklonen haben einen ausgesprochenen Wellencharakter. Je ausgeprägter die Wellennatur der Zyklonen ist, um so lebensfähiger sind sie, während das Hervortreten des Wirbelcharakters nur für 'stationäre' (d. i. ortsständige) oder sich auflösende Zyklonen charakteristisch ist. (*A. Wegener*, Sind die Zyklonen *Helmholtz'sche* Luftwogen? *Met. Zs.* 1921 p. 300—302; im Anschluß an *Bjerknes*.)

Um das physikalische Dogma von der wirbelartigen Auflösung der Gleitfläche zweier reibenden Flüssigkeiten mit Erfolg zu bekämpfen, müssen einerseits die theoretischen Gedankengänge, die zu dem Dogma geführt haben, einer kritischen Nachprüfung unterworfen werden, andererseits die Fälle tatsächlichen Vorkommens von Wirbeln genauer untersucht werden.

1. Die Reibung wirkt verzögernd auf die Grenzschicht einer reibenden Flüssigkeit ein, so daß im Bereiche der Reibungskräfte scherende Differentialbewegungen auftreten werden, d. h. wir erhalten ein gleichförmiges Übereinandergleiten (um eine minimale Differenz) verschieden schnell bewegter Schichten. Das ist alles, was sich zunächst auf Grund deduktiver Überlegungen sagen läßt. Dem Physiker erwuchs nun die Aufgabe, die von der Erfahrung gelieferte

Turbulenz zu erklären. Er faßte die Turbulenz auf als Überlagerung von laminarer und wirbelartiger Bewegung. Es galt also die Wirbel zu erklären. Er löste diese Aufgabe mit Hilfe einer genetischen Formenreihe, bei der das Anfangsglied durchaus hypothetisch war und bei der nur das Endglied von vorneherein feststand (quia demonstrandum erat). Entweder verteilte er in der Grenzschicht in passenden Abständen sog. 'Wirbelfäden' und ließ diese sich dann zu sog. 'Wirbelwalzen' auswachsen, oder er ging von einer sanftwelligen Fläche von ebenfalls passenden Dimensionen aus und zeigte dann mit Hilfe von Selbstverstärkungs-Gedankengängen (Vgl. Kap. XIV) oder mit Hilfe des schillernden Begriffes der 'Labilität' die Notwendigkeit der immer stärkeren Ausbuchtung dieser gewellten Fläche bis zur Aufrollung zu regelrechten Wirbeln. (*Helmholtzsche Wirbelfläche*; vgl. *Prandtl, Flüssigkeitsbewegung*. Handwbt. d. Nat. 4. 1913.) Zugleich schwang dabei die Vor-



(Prandtl a.a.O. p.123 Fig. 49.)

stellung mit, daß die Reibung durch die Wirbelwalzen verringert werde, etwa so wie schwere Kisten über hingelegte Holzstäbe leichter fortzurollen als über den Boden gleitend fortzuschieben sind, wobei man das Unzutreffende des Vergleiches nicht bedachte. Ganz deutlich tritt diese Vorstellung zutage bei *H. King* (1916 p.204f.): „Next the ground there is a layer of air which moves considerably more slowly than the layers above it, especially when, owing to a strong wind, it is loaded with sand. We also know that this layer only increases its speed at a very slow rate with an increase in the velocity of the layer next above it. (*J. A. Udden* 1898 p.24.) Consequently, when the wind is blowing, this lowest layer is strongly acted upon by a tangential force in the direction of the wind and below by a second tangential force in the opposite direction. The result, especially in the gusts, must be a tendency to set up vortices with a horizontal axis to act as a kind of ball bearings (!) to allow the upper and more rapidly moving layer of air to pass along more easily.“

2. Untersuchen wir die wirklichen Vorkommnisse von regelrechten Wirbeln, so finden wir, daß durchweg der Fall der periodischen Ablösung von Wirbelkörpern im Lee von

Hindernissen, Widerständen, Unregelmäßigkeiten irgendwelcher Art (Vgl. Kap. „Rhythmus und Periodizität“) vorliegt, während für die Annahme der spontanen Auflösung einer freien Trennungsfläche in eine Wirbelreihe sich unzweideutige Belege nicht bringen lassen⁷⁾. Besonders die sich an dem Hinderniskörper periodisch abspaltenden und in regelmäßiger Reihe hinter dem Körper einherziehenden sog. *Kármánschen* Wirbel müssen immer wieder zur Stützung der Theorie der Wirbelflächen herhalten. Das von *A. Betz* (1921 p.197) herangezogene und abgebildete Beispiel verlangt ebenfalls eine etwas abweichende Beurteilung. Die Wandreibung geht jenseits des Körpers unvermittelt über in die Reibung an der ruhenden Flüssigkeit. Nun besitzen aber nach *Rehbock* (1917 p. 32) die Reibungsbeiwerte zwischen verschiedenen schnell fließenden Wassermengen eine beträchtliche Größe und pflegen sogar die zwischen Wasser



A. Betz a. a. O. Abb. 16: „Allmähliche Bildung von Wirbeln aus einer in die freie Flüssigkeit hineingeschobenen Grenzschicht.“

und fester Wand erheblich zu übertreffen. Infolgedessen kommt es in einiger Entfernung von dem Körper zu einer Stauwirkung, die hier — ebenso wie bei den *Kármánschen* Wirbeln oder bei der im Winde flatternden Flagge; vgl. Kap. „Rhythmus und Periodizität“ — zur periodischen Bildung abtreibender Wirbel führt. Da die Wirbel nur Ausgleichsfunktion haben, verschwinden sie in weiterem Abstände schnell (ähnlich wie die *F. M. Exnerschen* „Mäander“!). „... die drehende Flüssigkeit häuft sich gegen den Mittelpunkt der Spiralen hin an, und nach einiger Zeit sind nur noch einzelne Wirbelkerne meist in ganz regelmäßigem Abstände voneinander zu erkennen.“ — In diese Kategorie gehören auch die von *Alfr. Wegener* (Sind die Zyklonen *Helm-*

⁷⁾ Foureau (La cataracte d'Assouan. 1905; zit. Supan 1916) bemerkt (im Gegensatz zu Brunhes), daß Wirbel nur dort entstanden, wo die Strömung auf Hindernisse stieß. Der von Brunhes (z. B. *L'allure réelle des eaux et des vents enregistrée* [!] par les sables. 1906) unermüdlich verfochtene Hauptsatz, daß 1. die normale Bewegung des fließenden Wassers in Wirbeln vor sich gehe, und daß 2. der Sand die Spuren dieser Wirbel bewahre, beruht auf demselben Trugschluß, der in einer längst überwundenen Epoche auch die Auffassung der Rippelmarken als 'Wellenspurten' veranlaßt hatte. (Vgl. Kap. XII, Abschnitt f: „Abformung“; ferner Seite 295, Anmerkung).

holtzsche Luftwogen? Met. Zs. 1921 p.300—302; vgl. *F. M. Exner*, Die thermische u. dynamische Auffassung der Luftbewegungen. Met. Zs. 1922 p. 75 ff.) zur Erklärung der (als „wirblige Wellen“ auftretenden) Zykklonen herangezogenen „Wasserwirbel, die sich hinter einem Brückenpfeiler an der vertikalen Trennungsfläche zwischen dem starkströmenden und dem ruhigen Wasser bilden“. — Bei größeren Geschwindigkeiten scheint die regelmäßige Wirbelreihe allgemein von einer unregelmäßig „durchwirbelten“ Bewegung abgelöst zu werden.

Zusammenfassung:

Es läßt sich eine Tendenz der Materie feststellen, erzwungenen Verschiebungen ihrer Teilchen gegeneinander Widerstand zu leisten. (Tendenz zum Minimum der inneren Reibung. Widerstand gegen scherende Deformationen der Grenzzone.) Diese Tendenz äußert sich nicht nur in Bewegungsverzögerungen (sog. 'Reibung'), sondern darüber hinaus noch in formalen und strukturellen Umlagerungen der Grenzzone (sog. Erscheinungen der Kapillarität oder Oberflächenspannung). Wir versuchten so eine theoretische Brücke zwischen Reibung und Oberflächenspannung zu schlagen, indem wir die formbildende Wirkung der Oberflächenspannung bei (relativ) bewegten Medien auffaßten als Modifikation ihrer formbildenden Wirkung bei (relativ) ruhenden Medien. Auch die im nächsten Kapitel gegebene Systematik der Formen legt uns den Gedanken nahe, den gesamten Formenschatz der rhythmischen Phänomene aufzufassen als Abwandlung der Kugelgestalt gemäß der jeweiligen besonderen (relativen) Bewegungsform. All diese Formen stellen Begrenzungsflächen dar, die den größtmöglichen Schutz gegen das Eindringen deformierender Energie bieten, oder mit anderen Worten, bei denen die scherenden Differentialbewegungen in der Grenzzone möglichst klein sind. Schon bei der ersten Inangriffnahme unseres Themas gelangten wir versuchsweise zu folgender Formulierung: 'Bewegen sich zwei Medien ineinander oder nebeneinander hin, so kommt es innerhalb ganz bestimmter Grenzbedingungen zur Entstehung von im Raumerhythmisch verteilten Oberflächenspannungskörpern.'

Ist diese Hypothese richtig, so ist die Oberflächenspannung der eigentliche Reliefbildner der Erdoberfläche, im Gegensatz zur ausgleichend, verflachend und zerstreud wirkenden Schwerkraft. Die Wirkungen der Oberflächenspannung scheinen die Wirkungen der Schwerkraft vielfach geradezu aufzuheben. Oberflächenspannung sowie innere Reibung sind weder an sog. kapillare Verhältnisse, noch an einen bestimmten Aggregatzustand gebunden. — Ist die Grenzzone des

Mediums strukturell inhomogen, so wird die formale Umlagerung ergänzt durch eine strukturelle Umlagerung im Sinne der Minimaltendenz. (Z. B. Schutzdeckenbildung bei Rippelmarken, Dünen, Hügelmoränen; Auswitterung von Steinen usw.) Auch hier ergibt sich eine Brücke zwischen Reibung und Oberflächenspannung. Wie die physikalische Chemie lehrt, kann durch Oberflächenspannungskräfte eine Ansammlung und Ausscheidung gewisser Stoffe in der Grenzschicht hervorgerufen werden. Die Oberflächenschicht wirkt dann bestimmend auf die Formbildung der ganzen Masse.

Die formalen und strukturellen Umlagerungen bedingen eine Verschärfung der Diskontinuität an der Grenzfläche. Zu demselben Ergebnis führt die sog. 'Phasenbildung'. Ein inhomogenes System zerlegt sich im Anschluß an Reibungsbewegungen in diskrete, in sich homogene 'Phasen'. Durch die 'Entmischung' sowie durch den entstehenden Bewegungssprung an den Gleitflächen werden die Reibungsbewegungen innerhalb der Phasen auf Kosten der (geringeren) Reibung an den Gleitflächen selbst vermindert. Hiermit stimmt überein, daß das spontane Auftreten von scharfen Unstetigkeitsflächen an große Relativbewegungen gebunden ist.

Vervollständigt oder ergänzt wird das Stabilisierungswerk der Phasenbildung durch formale und strukturelle Umlagerungen auf dem Wege einer Selbstdifferenzierung der Grenzzone. So bilden sich Luftwogen immer in den Höhen der Atmosphäre, die einen Dichtewingsprung aufweisen, d. h. an Schichtflächen der Temperatur. Wogenbildung ist ein mittleren relativen Geschwindigkeiten angehöriges Zwischenstadium. Bei zu großer relativer Geschwindigkeit nimmt die Grenzschicht wieder einen gestreckten Verlauf, und die Wogen lösen sich wirblich auf. Die Auffassung der Strömungen in der Grenzschicht als Kombination einer geradlinigen (laminaren) mit einer kreisförmigen (spiraligen, wirbelartigen) Bewegung darf jedoch nicht dazu führen, überhaupt die Wogenbildung aufzufassen als formale Auswirkung des Vorbeiziehens von mehr oder weniger regelmäßig verteilten (hypothetischen) Wirbelwalzen, oder in der sog. 'Aufrollung' der Unstetigkeitsfläche einfach eine Auflösung in einzelne Wirbelkörper zu sehen. Denn diese sind zunächst nur das Produkt einer nicht ganz einwandfreien Deduktion. Für die Annahme der spontanen Auflösung einer freien Trennungsfläche in eine Wirbelreihe lassen sich unzweideutige Belege nicht erbringen. Das Auftreten von regelrechten 'Wirbeln' beschränkt sich vielmehr auf den Fall der periodischen Ablösung von Wirbelkörpern im Lee von Hindernissen, Widerständen, Unregelmäßigkeiten irgendwelcher Art.

Wir werden der Mithilfe des 'Wirbels' zur Erklärung der Wogenform um so eher entraten dürfen, als, wie uns das nächste Kapitel zeigen wird, die Wogenform nur ein Sonderfall des rhythmischen Geschehens bei einer bestimmten Bedingungskonstellation ist und deshalb jede Theorie auch nur generell für die Gesamtheit des Formenschatzes aufzustellen ist.

XX.

Der Formenschatz der geophysischen Phänomene mit Selbstdifferenzierung.

Dem geophysischen Geschehen ist ein geomorphologischer 'Formenschatz' in strenger Gesetzmäßigkeit zugeordnet. Wie sich jenes im wesentlichen auf einen Elementarvorgang zurückzuführen ließ, so stellt auch die Mannigfaltigkeit des letzteren keine artverschiedene und starre, in sich unverbundene Musterkollektion von Formen dar. Sie läßt sich vielmehr auffassen als kontinuierliche Modifikation der bei allseitiger Homogenität der Bedingungskonstellation auftretenden Kugelgestalt als der geometrischen 'Haut' des formal einfachsten Oberflächenspannungskörpers. Die Fälle sind nicht selten, wo die Bedingungskonstellation eines Geschehens sich entweder im räumlichen Nebeneinander oder im zeitlichen Nacheinander allmählich und kontinuierlich verändert. In diesen Fällen weist auch der Formenschatz ein räumliches und zeitliches Zusammenverwandter, ineinander übergehender Formen auf. An Hand dieser Beispiele kommt eine Art kinematische Bewegung in die Formtypen, sie zerdehnen sich und ziehen sich zusammen, sie verästeln und vereinigen sich. Wir sehen Formtypen sich abwandeln, bis sie auf dem Wege über sog. 'Mischtypen' unmerklich in einen anderen Typus übergehen. Diese Formenabwandlung ist natürlich keine notwendige Voraussetzung für das Zustandekommen der Einzelformen. Es gibt keine Form, die nicht bei entsprechender Bedingungskonstellation ebensogut unmittelbar und unvermittelt von umliegenden oder vorhergehenden Formen auftreten könnte. Mit der Lehre von den genetischen 'Formenzyklen' und ihren 'Entwicklungszuständen' hat unsere Systematik also keine Berührung.

Auf die Formen der bereits ausführlich behandelten Phänomene wird bei der nachfolgenden Zusammenstellung nur kurz hingewiesen

werden. Der sich durch alle Formentypen hindurchziehende Gegensatz von 'parakinetisch' (d. h. durch Bewegung zweier Medien aneinander vorbei) und 'diakinetisch' (d. h. durch Bewegung zweier Medien ineinander) entstandenen Formen wird hierbei nur eine sekundäre Rolle spielen.

a) Senkrecht zur Bewegungsrichtung gestreckte reihige, lineare Formen. (Riffeltypus.)

Der Riffeltypus stellt im wesentlichen eine Stabilitätsform des unterlagernden, weniger beweglichen, Mediums dar, über das (bzw. durch das) das überlagernde Medium in Form einer zusammenhängenden Schicht hinwegstreicht (bzw. hindurchstreicht). Das Material des unterlagernden Mediums pflegt flüssig oder pulverförmig zu sein (Wasser, Sandkörner, Gipskörner, Salzkörner, Schneekörner, vulkanischer Staub und Grus, usw.), das des überlagernden Mediums gasförmig oder flüssig (Luft, Wasser). Der Aggregatzustand scheint für unser Phänomen jedoch keine Rolle zu spielen, denn es tritt auch sonst in den seltsamsten Kombinationen auf. Eine im Winkel von etwa 45° aufgestellte eiserne Schwelle im Hüttenwerk Phönix, auf der Klemmplatten aufgeworfen und zum Abrutschen gebracht wurden, zeigte starke Riffelung. (*Kayser* 1916 p.11; vgl. Kap. „Schienenriffeln“!) Wie im Zusammenwirken fester Körper, so zeigt sich bei den Wolkenrippeln (den *Helmholtz*-schen „Luftwogen“) die nämliche Gesetzmäßigkeit im Zusammenwirken gasförmiger Körper. Wird eine schneebedeckte Straße mit Schlitten vorwiegend in einer Richtung befahren, so bilden sich wellenartige Absätze in dem so verfestigten Schnee. (*Cornish* 1914.) Die Bildung der rinnenförmigen Seenketten, Föhrden usw. im ehemaligen Gebiete von Gebirgsgletschern bzw. des Inlandeises, mit ihrer regelmäßigen Aufeinanderfolge von Riegeln und Schwellen, läßt vielleicht für bestimmte Vorkommnisse eine entsprechende Deutung zu. (*Philippson*.) Ebenso eigenartig ist die 'undulatorische Schmelzwirkung des Windes' auf Schnee und Firn. (Vgl. oben Kap. „Büßerschnee“.) *F. M. Exner* (Geogr. Annaler 3. 1921.p.327—335) erwägt sogar die Möglichkeit einer Umlagerung größerer Erdmassen in Wellenform durch den Wind: „Viele flache Gebiete Europas, die seit langer Zeit von Menschenhand bearbeitet, gepflügt werden, sind nicht wirklich eben, sondern einigermaßen gewellt. Es wäre noch zu prüfen, ob die Wellenrichtung mit den vorherrschenden Windrichtungen in Beziehung steht.“ Selbst wenn wir diese Erklärung als phantastisch ablehnen, so bleibt doch die wellenförmige Oberflächengliederung vieler Ebenen als auffällige und vor-

läufig unerklärte Tatsache bestehen. Manche flache Steppenlandschaften z. B. zeigen „zahllose parallele, flachgewölbte Rücken von gleicher Höhe, sanfte Mulden ohne ausgeprägtes Rinnsal und ohne flache Sohle. Derartig sind die ‚rolling plains‘ der nordamerikanischen Prärien. Auch die Rumpffläche des Donezgebietes, aus gefalteten Gesteinen bestehend, ist wellig gegliedert“. (*Philippson* II, 2. 1924. p. 358; Lit. p. 399.) Es ist wenig wahrscheinlich, daß diese Formen alle demselben Gesetz gehorchen. Zunächst gilt es überhaupt in jedem Falle festzustellen, ob die Gliederung quer oder parallel zur Wirkungsrichtung des auflagernden Mediums verläuft, oder ob gar nur eine selektive Ausformung der Gesteinsstruktur vorliegt.

Die enge Verwandtschaft der sog. ‚*Liesegang*schen Ringe‘ mit den Riffelbildungen ist unverkennbar. Man könnte sie geradezu als ‚Diffusionsriffeln‘ bezeichnen. Das Wesentliche des Vorganges besteht in dem Zusammentritt des in der Bettsubstanz in kolloidaler Verteilung enthaltenen Materials zu parallelen Zonen (Bändern, Streifen). In ihnen ‚reichert sich‘ das betr. Material ‚an‘, während die Zwischenräume ‚verarmen‘. Die Achatbänderung mit ihrem oft hundertfältigen Wechsel von eisenoxydfreien und eisenoxydhaltigen Chalzedonlagen (*Liesegang*, Die Achate, 1915) wird durch diesen Vorgang befriedigend erklärt; ebenso die bekannte Erscheinung der ‚Verwitterungsringe‘ (*Liesegang* 1913 Kap. XII) und der sog. *Liesegang*schen Diffusionsschichtung, für welche nicht nur die Lithosphäre, sondern auch die Atmosphäre Belege liefert. So kommt es auch in der kolloidalen Lösung: Luft — feste bzw. flüssige Suspensioide nicht selten zu rhythmischen Fällungserscheinungen, „sei es, daß der Fällungsvorgang von der Erdoberfläche oder von der Substratosphäre aus vor sich geht. Das Ergebnis sind die Wolkenetagen oder, falls es nicht so weit kommt, die durch feinere Trübungen sichtbar gemachten Schichtenbildungen der Atmosphäre“. (*A. Schmauß* i. Met. Zs. 37. 1920. p. 153.) Wie im Experiment der Abstand der Fällungsschichten mit der Entfernung vom koagulierenden Zentrum nach einer geometrischen Reihe wächst (*H. Prelinger*, Verh. phys. Ges. 1920 p. 96), so wächst auch der Abstand der Wolkenetagen mit der Entfernung von der Erdoberfläche. (*A. Schmauß* i. Met. Zs. 38. 1921. p. 225f.)

b) Parallel zur Bewegungsrichtung gestreckte reihige lineare Formen. (Rillentypus.)

Der Rillen- oder Rinnentypus stellt im Gegensatz zum Riffeltypus im wesentlichen eine Stabilitätsform des überlagernden, beweglicheren Mediums dar, welches sich in diesen Rillensystemen konzentriert,

während das unterlagernde Medium seine zusammenhängende Ausbreitungsform zu bewahren pflegt.

Ist ein steiler, aus lockerem und einigermaßen homogenem Material bestehender und vegetationsfreier Hang der Einwirkung des Regens ausgesetzt, so bildet sich spontan ein System von parallelen Regennissen, Racheln, Runsen aus, die sich in der Gefällsrichtung den Hang hinabziehen. Die Barrancos auf Aschenkegeln gehören hierher. Ebenso die gleichmäßige Furchung der Firnflächen, die auch noch bei sehr geringen Böschungen aufzutreten pflegt. „Sie entsteht in ihrer ersten Anlage im Frühsommer oder am Morgen, wenn die obersten Schichten zu schmelzen beginnen, während die etwas tieferen Lagen, noch gefroren, das Schmelzwasser nicht versickern lassen, oder besonders, wenn plötzlicher Regen auf die gefrorene Firnfläche fällt.“ (*A. Heim* 1885 p.103.) Von einer „außerordentlich regelmäßigen und deutlichen“ „Furchung der Winterschneedecke in den Gebirgstälern“ berichtet *H. Crammer* (1905). „Die Furchen hatten nach Schätzung eine Tiefe bis zu 15 cm und folgten dem stärksten Falle der Böschung.“

Besteht der Hang aus mehr oder weniger festem (felsigen) Material, so kommt es unter günstigen Bedingungen, von denen im folgenden noch die Rede sein wird, zur Bildung von Rillen, Riefen, Rinnen, Karren (Schratten). In unseren Gegenden beschränken sie sich auf leicht lösliche Gesteine, wie Steinsalz (*E. Kaiser*, N.Jb.f. Min.1909.I.p.14: Cardona in Spanien) und Gips, ferner Kalksteine und reine Dolomite. Den Regenrillen in losen Sanden entsprechen die Karrenformen in groben Sandsteinen, die z. B. *De Martonne* (1899 p.28) aus den rumänischen Karpathen beschreibt. In den feuchten Tropengebieten finden sich prächtige Regenrillen (Riesenkarren) auch an den steilen Hängen kristalliner Massengesteine, wie des Granits. (*M. Bauer*, Beitr. z. Geol. d. Seychellen. N. Jb. Min. 1898. II. p.192; vgl. *Kayser* 1921. I. Fig. 309 u. Lit.!) Die mechanische Wirkung des abfließenden Regenwassers kann offenbar in einzelnen Fällen zur Bildung von Karren genügen. Sie sind weder an ein bestimmtes Gestein, noch an ein bestimmtes Klima gebunden. An felsigen Küsten erzeugt der Rücklauf der Brandung vielfach Rillen und Karren. (*Philippson* II, 2.1924. p.281, p.44 u. 48.) Eine genaue Beschreibung der 'Brandungskarren' der Insel Delos lieferte *L. Cayeux* (1911, zit. Ebd.) Auf Gletschern schaffen die oberflächlichen Schmelzwasser häufig langgestreckte Furchen in der Richtung der Eisbewegung, also des Gefälles. In einem von *W. Ule* (1911 p.256; s.a. *E. Mikkelson* i. Geogr. Journ. 41. 1913) beobachteten Falle „war die ganze Eismasse in ihrer Längsrichtung von parallelen Rinnen durchzogen, in denen, da es gerade geregnet

hatte, während meines Überschreitens reichlich Wasser floß“. Besonders auf dem Eise der Zunge des Gletschers „sammeln sich die Schmelzwasser zu Bächen, die sich kleine, steilwandige Rinnen einschmelzen, diese folgen zuweilen leichter schmelzbaren Eisschichten, besonders den blasenreichen Bändern, und bewirken so eine Rillung der Oberfläche. Das Eis bringt durch seine Schmelzbarkeit im Wasser und durch seine Klüftigkeit ähnliche Erscheinungen hervor wie der Kalkstein; so finden sich nicht selten Karren auf dem Eise...“ (*Philippson* II,2.1924. p.205.) — Auf den winterlichen „Bacheisbildungen“ in Mittelasien fand *Sven Hedin* (*Sci.Results* III.p.487ff.,Taf.84—87;zit.*P.Fickeler* i.Pet.Mitt.1926 p.250) „zahllose Miniaturteiche und -bäche, die regelrechte hydrographische Systeme bildeten. Die kleinen, einen Fuß breiten und einen halben Fuß tiefen Rinnsale flossen in glasklaren Eisbetten, die sich mit leuchtendem Hellgrün gegen den umgebenden weißen Schlamm abhoben“.

Auch wo Kalkfels auf größeren, flachen und mehr oder weniger stark geneigten Flächen zutage tritt und dem Einflusse der Atmosphärien ausgesetzt bleibt, trifft man auf Systeme von parallelen, in der Gefällsrichtung verlaufenden Rinnen, sog. Karren oder Schratzen. „Chemisches Lösungsvermögen des Wassers mit und ohne Kohlensäure, bei (durch die Schneeschmelze in den Hochgebirgen, durch Regen in anderen Gebieten) steter Erneuerung des schnell abfließenden Wasserstroms, untergeordnet auch Humuswässer und die lebendige Kraft des fließenden Wassers, sind die Bildner der Karren.“ (*P. Keßler* 1921 p.251.) In schönster und regelmäßigster Ausbildung findet man sie in reinem und kompaktem Kalk und Dolomit. Von Schichtfugen, Klüften und Spalten zeigen sich die Rinnensysteme in der Regel auffallend unbeeinflusst. (*P. Arbenz* 1913.) An steil abfallenden Felsflächen verlaufen die Karren unter sich und zu der Fallinie der Fläche streng parallel; sie haben hier die Form halbrund ausgehöhlter Rinnen, nach Art der Kannelierung (Riefelung) griechischer Säulen, und zwar ist sowohl die dorische Kannelierung mit ihren scharfen Graten, wie auch die jonisch-korinthische mit ihren mehr oder weniger breiten ebenflächigen 'Zwischenstegen' vertreten. Die dachartigen, oft recht scharfen Schneiden „können ihrerseits wieder in kleine spitze Haken und Zacken zerfallen, ein Vorgang, den man vielleicht als ein stark verkleinertes und durch die Gesteinsbeschaffenheit modifiziertes Abbild der Erdpyramidenbildung ansehen darf, weil hier wie dort ein durch Regenrinnen herausgeschnittener Kamm, ein Erosionssporn, durch seitliche Erosion in einzelne Spitzen zerteilt wird“. (*Sjuts* 1907 p.40 u.28f.) Auf weniger geneigten Flächen begegnet man anderen Formen: klaffenden, scharf eingeschnittenen Rinnen und Furchen, deren Tiefe

und Breite mit der Annäherung an die Horizontalität noch wächst. Diese spaltenartigen Rinnen sind vielfach gewunden und verästelt, auch im Vertikalschnitt meist gewunden. Mit den großen, metertiefen Rinnen sind entsprechende Miniaturformen vergesellschaftet. „An den Kämmen der Karrenrippen treten nicht selten feine Kannelierungen auf, die uns durch ihre Regelmäßigkeit und Zierlichkeit überraschen. Jedes Gräbchen mißt etwa Fingerbreite und ist höchstens 2 cm tief.“ An den Kämmen pflegen sie am ausgeprägtesten zu sein und nach den Flanken hin zu verschwinden. (*P. Arbenz* 1913.) „Auch die Rillenbildung auf der Oberfläche freiliegender Kalksteinstücke, ihre Bedeckung mit zahlreichen seichten Riefen gehört wahrscheinlich hierher, da es sich auch in diesem Falle um Ätzungserscheinungen durch wäßrige Lösungen, also um eine wesentlich chemische Wirkung zu handeln scheint.“ (*E. Kayser* 1921. I, p.407; s. a. *Eckert* 1895 passim.)

Besondere theoretische Beachtung verdienen die 'Rillensteine'. Sie verdanken, ähnlich wie die rillenartige Karrenkannelierung (s.o.!) chemischen Lösungsvorgängen ihre Entstehung. Nach *J. Walther* (1912 p.126) entstehen die Rillen „im Boden, und zwar nahe der Bodenoberfläche, durch die Ätzwirkung aufsteigender, sich hier konzentrierender Lösungen. Indem sie langsam an der Oberfläche der im Boden verteilten Kalksteine entlang ziehen, bilden sich nicht körnige, sondern linear verbundene Rauigkeiten“. Durch die äolische Abtragung des tonigen (!) Bindemittels zwischen den Geröllen pflegen dann die geätzten rauen Flächen freigelegt und damit der Zerstörung überliefert zu werden. „Es handelt sich stets um Gesteine von ziemlich gleichmäßigem Gefüge, die aus nicht allzuschwer löslichem Material bestehen“, z. B. homogene Kalke. (*P. Keßler* 1913 p.414.) Ihr Vorkommen erstreckt sich besonders auf die niederschlagsreicheren Teile arider Gebiete, dann aber auch auf Gebiete mit feuchtem Klima (Alpen, Jura u. a.). (*E. Kayser* 1921. I, p.313 u.407; *B. G. Escher* 1913.) Nicht alle Rillensteine der ariden Gebiete verdanken ihre Entstehung aufsteigenden Salzlösungen. *W. Salomon* (1916 p.21) weist auf die Möglichkeit einer Herausmodellierung durch äolische Sandrieselung hin. Für andere Vorkommnisse rechnet *M. Blankenhorn* (Ebda.p.26) mit einer ätzenden Wirkung durch Wasser von oben.

In Wüstengebieten vermag der Wind mit Hilfe des Geschoßhagels (mitraille) von Sandkörnern auf geeigneten Felsflächen feine Rinnen auszumeißeln. Ebenso vermag das mit suspendierten kieseligen Stoffen beladene Wasser die Bohrmeißel (pointeaux) und die Schaufeln (aubes) der Turbinen riefenartig zu skulptieren. Diese Erscheinungen lieferten *Lugeon* (Ann.Géogr.1915) Analogien zu einer von ihm be-

schriebenen merkwürdigen riefigen Ziselierung der flachen, felsigen Uferbänke von Hochflutbetten einiger Flüsse. (*Lugeon* 1921.) „Au moment de la crue ... les grains de sable suspendus, entraînés en filets linéaires (!), burinent la banquette de ce lit majeur et ils y sculptent de fines stries droites ou légèrement ondulées, parallèles entre elles, ou bien, si un obstacle s'y présente, formant des figures rayonnantes.“ Die wirblichen Strömungen des engeren Bettes gehen über der seichten Uferplatte in ein gradliniges Gleiten der Wasserfäden über. Die sich bildenden Riefen (stries) liegen genau in der Bewegungsrichtung der Wasserfäden. Wo die Strömungsgeschwindigkeit zu gering ist, macht die Riefelung einer gleichmäßigen Politur der Felsoberfläche Platz.

Die eigenartigen Längsdünen oder Strichdünen der Wüstengebiete bestätigen die objektive Berechtigung der von uns getroffenen Scheidung eines (transversalen) Riffeltypus und eines (longitudinalen) Rillentypus. In jenem glaubten wir eine Stabilitätsform des unterlagernden, in diesem eine solche des überlagernden Mediums zu erblicken. Es muß nun in der Variation der betr. Bedingungskonstellationen eine kritische Grenze geben, bei der der eine Typus in den anderen übergeht. Dies ist auch wirklich der Fall, und zwar im wesentlichen nach Maßgabe der Bewegungsgeschwindigkeit des überlagernden Mediums. Nach *V. Cornish* (1897 p.278) zeigen die Dünenrücken der Indischen Wüste eine longitudinale Anordnung, wo der Wind am kräftigsten weht, wo sich starke Stürme ungehemmt entfalten können; dagegen transversale Anordnung, wo der Wind verhältnismäßig flach ist. Ein Mischtypus vermittelt zwischen ihnen. Dies fand *Cornish* später (1902 p.159) für die Schneewellen Canadas, desgleichen *O. Nordenskjöld* (1911 p.126) für die 'Sastrugi' der Antarktis bestätigt. Es handelt sich hier, wie in den Wüstengebieten Zentralasiens und Afrikas, den Schneeflächen Lapplands (*Axel Hamberg* 1907 p.11) und Sibiriens durchweg um Gebiete, in denen sich starke Stürme ungehemmt entfalten können. Die bekannten „Rippelmarken im Wolkenmeer“ (Wolkenrippeln) bilden sich nach *Hans v. Staff* (1906 p.48) nur bei sehr gleichmäßiger, schwacher Luftströmung, „während stärkerer Wind sie zu federfahnenähnlichen Gebilden umformt, deren Längsrichtung parallel der des Windes ist“. — Die dynamische, und damit auch formbestimmende, 'Überlegenheit' des Windes über den Sand oder Schnee scheint verschärft zu werden, wenn die Sandzufuhr auf der Wüstenfläche, bzw. die Schneezufuhr auf dem Binneneise verhältnismäßig nur gering ist. (*Free* 1911 p.65.) Es kann nicht gleichgültig sein, ob die Umlagerung mehr als Anhäufung (Vollform!) oder als Wegnahme (Hohlform!) von Material sich vollzieht. So scheint gelegent-

lich auch die Zerreißung des Zusammenhanges in dem unterlagernden Medium diesen Formtypus zu schaffen. *O. Nordenskold* hebt in seiner Schilderung das Fehlen der Querdnenwlle und die bedeutende Längserstreckung der Schneewlle im Verhältnis zu der geringen Höhe und Breite hervor. Die einer offenen Eisfläche unregelmäßig auflagernde dünne Schneedecke sammelt sich zu „zerstreuten Schneehaufen“, „niedrigen, wohl selten mehr als fuhohen, langgestreckten Erhebungen, die sich äußerst regelmäßig nach der herrschenden Windrichtung hinziehen, mit allmählicher Abdachung nach der Windseite und steil oder häufig etwas überhängend auf der Leeseite“. Die parallelen Züge bilden gelegentlich Anastomosen.

Die Schwierigkeiten, die sich einer dynamischen Analyse entgegenstellen, steigern sich, wo ein drittes Medium mit ins Spiel kommt. So verdanken die subglazialen Rinnensysteme der sog. Föhrden (schwed.: Fjrde), ebenso wie die subglazialen Wallssysteme der sog. sar einem eigenartigen Zusammenwirken von Eis, Schmelzwasser und Moränenmaterial, bzw. anstehendem Untergrund ihre Entstehung. *E. Werth* (1909 u. 1913/14) unterscheidet scharf zwischen den sog. 'Fjorden' als lokalkausalen Einzelformen und den sog. 'Frden' als den Gliedern zusammenhängender geschlossener Systeme mit paralleler oder im ganzen radialstrahliger Anordnung der Glieder, die sich unter einer einst zusammenhängenden Inlandeisdecke ohne Rücksicht auf Form- oder Materialverschiedenheiten des Untergrundes ausgebildet haben.

Wir sahen, daß das an Gehängen abfließende Wasser unter den mannigfachsten Bedingungen ein System paralleler Rinnen zu schaffen vermag, in denen sich der Abflvorgang vollzieht. Wir lernten ferner diese Rinnenbildung bewerten als Äußerung einer sich bei dem Abflvorgang herausbildenden systembedingten Selbstdifferenzierung, die auch dann noch gültig ist, wenn andere Verschiedenheiten und Unregelmäßigkeiten mit ins Spiel kommen. Es soll nun gezeigt werden, daß außer für das fließende Wasser auch für andere Fliemedien, vom Schlamm bis zu den Gesteinstrümmern, der rinnenartig-differenzierte Abfl charakteristisch ist.

Jenseits der Grenzbedingungen werden wir auch hier wieder das schichtartige, undifferenzierte Abfließen oder Abkriechen antreffen. Der Transport wird dann über große Flächen gleichzeitig ausgeführt. Geologisch kommt gerade dieser Art der Abfuhr die größte Bedeutung zu. (*B. Högbom* 1914 p. 363.) Nach den Beobachtungen *Sappers* (1912 p. 261) „fließt auf Spitzbergen an manchen

mäßig geneigten (!), hauptsächlich aus feinerdigem Material gebildeten Hängen der von Wasser völlig durchtränkte Boden während und kurz nach der Hauptschneesmelze in breiter zusammenhängender Front langsam abwärts“, ohne daß eine Sonderung in Einzelströme zu erkennen ist. Es versteht sich, daß mit abnehmender Beweglichkeit des Fließmediums auch die Differenzierung weniger ausgeprägt ist. Wo die Solifluktion bereits sanfte, ausgeglichene Bodenformen schafft, würde das Wasser noch „eine furchterliche Badlandlandschaft“ entwickeln. (*B. Högbom* a.a.O.) Die Geschwindigkeit des Fließvorganges scheint keine absoluten Grenzen zu kennen. Von dem langsamen Kriechen der arktischen Fließerdeströme bis zu dem katastrophenartigen Abrutschen der gletscherartig langgestreckten 'Frane' des Apennin (*G. Braun* 1907 u.1912; *Ders.*1908) und dem Abgleiten der geröllartigen Grundlawinen in durch innere Reibungsdifferenz geschaffenen Kanälen (s.u.!) finden sich alle Übergänge. Die Rutschbewegungen leiten bereits zu den Sturzbewegungen über, bei denen die Kontinuität der Reibung zerreißt.

Das Ergebnis des Fließvorganges ist die Schaffung einer, bzw. mehrerer nebeneinander liegender Abflußrinnen. In der halbtrichterförmigen 'Abrißnische' setzt die Differenzierung ein, in dem 'Abzugskanal' ist sie vollendet, und in dem Schwemm- bzw. Schuttkegel (der oft mit den Nachbarkegeln zu einer zusammenhängenden Decke verwächst) verliert sie sich wieder. So sieht auch *Stiny* (1910 p.110) mit Recht in dem sog. 'Feilenbruch' (der 'Runse') das Urelement der Form der Erosionstäler, nicht in der im Hinblick auf die zirkusartigen Talschlüsse sich ergebenden 'Birnenform' oder Trichterform, zumal diese oft erst auf dem Wege nachträglicher Erweiterung und Rückverlegung zustande kommt. — Während bei den zunächst zu besprechenden Fließvorgängen noch die flüssigen Bestandteile überwiegen, werden wir diese in den weiterhin zu behandelnden Erscheinungen der 'festen' Solifluktion immer mehr zurücktreten sehen.

Zwischen den Wildbächen und den Erdschlipfen vermitteln die sog. Muren, zähflüssige, ruckweise sich abwärts wälzende Massen, gewöhnlich aus einem Gemisch von Wasser, Erde, Schutt, Blöcken und Holz bestehend. Sie entwickeln sich vorzugsweise in allen über der Vegetationsgrenze gelegenen Hochgebirgsgegenden, gelegentlich auch in tieferen Lagen, sowie in Wüstengebieten. (*Machatschek* III.1919.p.32.) Bedingungen für ihr Zustandekommen sind nach *Philippson*(II,2.1924.p.154): „steiles Gefälle, ein leicht verwitterbares, bröckliges Gestein, so daß sich zwischen zwei Ausbrüchen massenhafter Schutt im Trichter

anhäufen kann; das Fehlen von Wald und einer dichten Rasendecke; gelegentliche Wolkenbrüche.“ *Stiny* (1910 p. 89) unterscheidet Eismuren (von den Trümmern eines Gletschersturzes herrührend), Aschenmuren (vulkanische Schlammströme), Moormuren und Geschiebemuren (Schuttmuren). Der wasserreiche Kern pflegt bei den Muren von einer wasserärmeren Haut umgeben zu sein, jedoch kommt es nicht zur Ausbildung einer eigentlichen Rinde wie beim Lavastrom. (*Stiny* p.37.) Der Abtransport des Materials geschieht bei der Mure nicht in der Form eines ununterbrochenen Fließens, sondern in der Form einzelner sog. 'Murgänge', d. h. wiederholter plötzlicher und gewaltiger Ausbrüche von Material. In der Zwischenzeit liegt das Bett nahezu trocken.

Das gleiche gilt für die plötzlichen 'Abgänge' feuchter schmelzender Schneemassen an steilen Gehängen in der Form sog. 'Grundlawinen'. Auch hier schaffen sich die 'abgehenden' Massen durch ihre eigene Tätigkeit besondere Sturzbahnen, die die Form flach eingeschnittener Runsen annehmen. Möglich wird dies dadurch, daß die meisten Grundlawinen sich immer wieder an derselben Stelle bilden und dieselbe Bahn verfolgen. Mit dem stark zusammengepreßten Schnee wird zugleich Schutt abtransportiert. Ein sog. 'Lawinenzug' setzt sich zusammen: „1. aus dem Ursprung, einem meist etwas muldenförmigen Steilhang, 2. der fast gradlinig am Gehänge, oft mitten durch Wald herabziehenden Sturzbahn, die meist eine Kerbe (Runse) im Gehänge bildet, und 3. der Ablagerungsstätte am Talboden oder auf einer Terrasse, wo der Schnee meist in Form eines steilen Kegels zur Ruhe kommt . . .“ (*Philippson* II,2.1924. p.193ff.; Vgl. ferner *F. W. Sprecher* 1902.)

„Die abrutschende Bewegung des Firns an allen über die ebeneren Firmulden und Gletscher aufragenden Hängen streift diese in vertikale Rippen und Runsen.“ (*Philippson* II.2.1924. p.365.)

In den Trockengebieten, in den kalten Regionen, ganz besonders im Hochgebirge, bilden sich an steilen felsigen Hängen durch Abbröckeln 'Steinschlagrinnen' aus. (*Philippson* II,2.1924.p.25.) Das Relief der steilen Gebirgsabhänge der arktischen Landschaft ist ein Werk der Frostverwitterung, nicht der normalen Wassererosion. 'Erdflüsse' vertreten hier die Rolle der Wasserflüsse. „Abwärtslaufende, scharfe Rinnen, oft mit nischenförmigen Erweiterungen, zwischen phantastischen Vorsprüngen mit Türmen und Zinnen, skulptieren die Bergwände. Wo die Gesteine weniger widerstandskräftig und die Abhänge weniger steil sind, werden die Rinnen länger und verzweigen sich regelmäßig nach oben, so daß sie, besonders wenn schneegefüllt, die Gebirge mit einer

charakteristischen Grätenstruktur zeichnen.“ (*B. Högbom* 1914 p.281.) Die Erosion des durch den Spaltenfrost gelockerten und abwärts bewegten Materials, nicht die Wassererosion ist es, die diese Rinnen ausgräbt und erweitert. Die Anordnung und Struktur der Rinnen läßt diese ebensowenig nur als ein Werk der selektiven Verwitterung erscheinen, und von noch geringerer Bedeutung ist der Umstand, daß bei der Selbstdifferenzierung des Gehänges kleine Bachfurchen (*B. Högbom*) oder „gewisse Stellen von geringerer Widerstandsfähigkeit“ (*W. Wråk* 1916 p.289) die Rolle der 'ersten Anlage' gespielt haben können. Die markierten Erosionsrinnen sammeln die herabrollenden Blöcke auf und dirigieren sie. Die Blöcke brechen meist einzeln los, zerspringen aber dann bei der Unterfahrt und kommen wie ein Schwarm von Steinen herunter. (*B. Högbom* 1914 p. 283.) Entsprechendes berichtet *W. Wråk* (p.291) von den (nach ihm) sog. „Raßkars“: „Le rasskar est large dans sa partie supérieure et dans sa partie inférieure se rétrécit en un canal rocheux escarpé . . . Il est probable que ce sillon est formé en partie du moins par l'érosion des matières rocheuses s'écroutant. Ces masses peuvent sans doute arracher et emporter d'autres matières rendues libres par la désagrégation.“ „Les rasskars ne se trouvent d'ordinaire que dans les roches fermes.“

Setzen sich Ton-, Lehm-, Mergel- oder Sandmassen bei genügender Geländeneigung infolge starker Wasserdurchtränkung in Bewegung, so kann bereits von Erdfließen oder Solifluktion gesprochen werden. Der Fließvorgang verläuft ähnlich dem des fließenden Eises (Gletschers) oder fließenden Wassers. Die Fließfähigkeit beruht hier auf der durch den Wassergehalt geschaffenen Plastizität des Materials. Diese 'Durchtränkungsfließerde' findet sich namentlich unterhalb der mehr beständigen Sommerschneeflecke. (*B. Högbom* 1910 p.45ff.; *Ule* 1911.) Es ist die auf der Erde verbreitetste Ausbildung von Erdfließen. Dagegen bleibt die sog. Regelationsfließerde beschränkt auf die Gebiete typischer Frostverwitterung und perennierender Tjäle (gefrorenen Untergrundes). Der beständige Wechsel von Gefrieren und Tauen veranlaßt in der Oberflächenschicht große Volumveränderungen, wodurch eine Beweglichkeit entsteht, die das Abwärtsgleiten auf dem gefrorenen Boden wie auf einer Gleitbahn begünstigt. (*B. Högbom* 1910; *Meinardus* S-B.1912 p.19f.); ferner wird das Sicker- und Schmelzwasser über der Tjäle zurückgehalten und so eine Wasserdurchtränkung der aufgetauten Oberflächenlagen ermöglicht. (*Sapper* 1912 p.269.) Immerhin ist es nötig, mit *B. Högbom*(1914 p.358) auch die relative 'Trockenheit' dieser 'festen' Solifluktion hervorzuheben. Daß bei der Entstehung dieser Formen von Fließerde der

Frost eine wichtige und entscheidende Rolle spielt, dafür spricht schon ihre Beschränkung auf die arktischen Gebiete.

Während diese Erscheinungen noch an arktische oder eiszeitliche Verhältnisse gebunden sind, werden trockene, „bachbettlose Korrasionsfurchen“ überall dort angetroffen, wo „Aufbereitungsmassen nicht einzeln (wie an Felswänden), sondern akkumulativ abwandern“. (*W. Penck* 1920 p.90f.) Die Täler beginnen hier mit ungeritzter Sohle. Besonders auf den Rumpfflächen der deutschen Mittelgebirge bildet die bachbettlose Korrasionstalung Systeme, die sich wie die wasserführenden Talnetze nach rückwärts verästeln. Soweit Wasser beteiligt ist, fließt es über der Grasnarbe ab oder erhöht durch Einsickern die Beweglichkeit der Aufbereitungsmassen. *H. Schmitthenner* (1920), der diesen „Dellen“ eingehende Untersuchungen widmet, denkt an eine Arbeitsgemeinschaft zwischen dem abrinrenden Wasser, das kleine Furchen gräbt, und dem Nachrücken der Aufbereitungsmassen, das jene Furchen wieder verwischt. Doch dürfte (nach *W. Penck*) diese Anschauung wohl nur für die semihumiden Gebiete zutreffen. *Philippson* (II.2.1924.p.153 u.341ff.), der die Dellentheorie eingehend erörtert, nimmt weitere Einschränkungen vor. Nach ihm sind die Dellen vielfach nicht aus den rezenten Kräften und Verhältnissen zu erklären, sondern sind „infolge der Hebung fossil gewordene, sanfte Talungen und Ursprungsmulden in der Einebnungsfläche“.

In kleinem Maßstabe findet man Ströme losen trockenen Materials im Verein mit Rillenbildung im Sande der Dünen. Hat z. B. der Sand des Strandes nach einer längeren Durchfeuchtung seine Beweglichkeit wiedererlangt, so sieht man in fast jeder durch Fußspuren oder sonst künstlich geschaffenen steilwandigen Vertiefung Rieselbäche aus meist dunkleren Sandkörnern einmünden, wie Finger zu einer Handwurzel, eine besondere Art von Schuttsortierung. Auch *Passarge* (III.1920.p.180) spricht von herabrieselnden Sandbächen und flachen Rillenbildungen an Sandhängen, vergleichbar den kleinen Schlammströmen der Lehmhänge. Auch auf frisch aufgeschütteten Vulkan-Aschenkegeln bilden sich nach *Passarge* gelegentlich solche Ströme losen trockenen Materials (sog. Aschenlawinen), sternstrahlige Rillen hinterlassend.

Während sich die bisherigen Erscheinungen zum Teil noch zu Flüssen mit geringer oder periodischer Wasserführung oder gar mit einem einmalig erfolgten Wassergange in Vergleich stellen ließen, ist bei den sog. Blockströmen die Analogie zu dem Wasserflusse, namentlich zu seiner erstarrten, zähflüssigen Abart, dem Gletscher, vollkommen. Sie sind u. a. für die flachhügelige Landschaft der Falklandinseln charakteristisch. „Von den aufragenden Quarzitrücken sind

große Quadern losgemacht und den Böschungen entlang zu Blockstreifen und Stromsystemen zusammengeführt.“ (*B. Högbom* 1914 p. 353; *J. G. Andersson* 1906 u.ö.) Die Blockströme haben ausgesprochene Stromform und vergabeln sich oft nach oben, indem sie in mehrere Entstehungsrinnen hineinführen. Die auch aus unseren Breiten bekannten diluvialen Felsenmeere sind erst durch Wegspülung des zähen Lehms entstanden, in dem die Blöcke von ‘Erdblockströmen’ ursprünglich eingebettet waren. (*W. Salomon* 1916.)

c) Verzweigungsformen. (Flußnetztypus.)

Gelegentlich der theoretischen Untersuchung des Abfluvvorganges (siehe S. 71!) stellten wir fest, daß bei Veränderung gewisser Größen, namentlich bei abnehmendem Neigungswinkel, das System paralleler Abflußrinnen übergeht in ein solches mit mehr oder weniger ausgeprägten Verästelungen der oberen Laufstrecken, in den sog. Flußnetz-Rhythmus. Diese Erscheinung trifft auch für alle anderen, z. T. im vorstehenden besprochenen, Fließmedien zu. Auch die Rinnen der Karren stellen oft „verästelte kleine Talsysteme“ dar (*Grund* 1910), mit Verzweigungen nach oben, die denen der Wasserläufe ganz analog sind. (*P. Keßler* 1921 p.251.) Die Gabelung der ‘Blockströme’ nach oben, sowie die „charakteristische Grätenstruktur“, mit denen die Regulationsfließerde die weniger steilen Hänge der arktischen Landschaft zeichnet, wurden bereits erwähnt. Eine andere Gruppe von Verzweigungsformen beruht auf dem dynamisch entgegengesetzten Vorgange der von einer bzw. mehreren einheitlichen Rinnen ausgehenden ‘Verzweigung’ im Sinne des analogen Pflanzenbaues. Oft läßt sich kaum entscheiden, welcher von den beiden Fällen vorliegt. Man wird z. B. zunächst geneigt sein, die Prielsysteme des Wattengürtels mit ihren eigenartigen Verzweigungen als Wirkung des — zunächst in einem einheitlichen Kanal vorwärts drängenden, sich dann aber dynamisch verzettelnden — Flutstromes zu fassen. Neuere Forschungen haben jedoch erwiesen, daß dem Ebbestrom die morphologisch ausschlaggebende Bedeutung zukommt und daß die Rinnensysteme also der ersteren Gruppe angehören. Bei eintretender Flut steigt das Wasser in diesen engen, tief ausgefurchten Rinnsalen an und breitet sich dann, sobald eine gewisse Höhe überschritten ist, über die weiten zwischenliegenden Vorländer aus, sie mit einer halbflüssigen Decke von frisch gefallenem Schlick überziehend. (*Engels* I.1921.p.369f.) Der Ebbestrom führt einen Teil dieses Schlickes wieder mit sich fort und erweitert die Tiefs. Er vermag dies um so leichter, als er um das während der Flutzeit aufgestaute Flußwasser reicher ist und er die Sedimente nur bergab zu

bewegen hat. (*K. Andree* 1920.) Dort, wo Watteninseln vorgelagert sind, drängt er sich mit mächtig 'saugender' Wirkung zwischen ihren Pforten hindurch und läßt dann, wo er aus dem Wattenmeer in die offene See hinaustritt, den mitgeführten Sand in Form unterseeischer Schuttkegel fallen. (*Solger* 1910 p.120.) Es handelt sich also bei den Tiefsystemen um morphologische Gebilde von relativer Selbständigkeit. Wie bei den festländischen Flußsystemen „kann man von Hauptflüssen, Nebenflüssen erster, zweiter usw. Ordnung, Wasserscheiden, Bifurkationen, Abtragungs- und Ablagerungsgebieten usw. sprechen. Auch der Vorgang der Abzapfung kehrt ... dort wieder“. Eigentümlich sind jedoch die starken Auskolkungen des Strombettes. (*O. Jessen*, Die Verlegung der Flußmündungen und Gezeitentiefs. 1922. p.169; s.a. *Dodge* i.Science 1894 über „beach rills“.)

Bei den Deltabildungen spaltet sich dagegen umgekehrt ein einheitlicher Flußschlauch in der Richtung des Strömungsverlaufs in mehrere Arme, die sich ihrerseits weiterverzweigen. Die Deltabildungen beanspruchen ein hohes theoretisches Interesse. Manche Deltabildungen lassen sich zur Not, angesichts der völligen Gleichheit des Gefälles innerhalb eines großen Winkels, nach Analogie der Schwemmkegel als Bild spielerischer Laufverlegungen fassen. Kleine Stauungen bei Hochwasser werden dann genügen, um eine Abzweigung im Anschwemmungsgebiete zu veranlassen. Begünstigt werden diese Abspaltungen und Verlegungen durch den Umstand, daß sich in großen Mündungsebenen das Flußbett vielfach zwischen seinen Dämmen über das Niveau der umgebenden Ebene erhöht. (*Philippson* II, 2.1924. p.114f., 304.) Die einzelnen Arme bilden zusammen dann ein oft sehr verwickeltes System. Die typische Deltabildung besteht jedoch in der Fähigkeit des Flusses 1. sich, unter gewissen Umständen, zur Erhöhung der hydrodynamischen Stabilität zu spalten, 2. seinen schlauchartigen Strömungszustand, selbst bei fehlenden Bettwandungen, aufrecht zu erhalten, sich zu diesem Zwecke Laufrinnen auszutiefen, diese Aus-tiefungen zu erhalten und sich schließlich etwa noch durch geeignete Ablagerung des mitgeführten Geschiebes die fehlenden Bettwandungen selbst zu schaffen. — Ist die letztgenannte Fähigkeit nicht genügend vorhanden, so bleibt das Delta „unterseeisch“. Es erhebt sich dabei die Frage, „unter welchen Bedingungen die Flußablagerungen unterseeisch bleiben, unter welchen sie über den Meeresspiegel emporwachsen. Daß allgemein wirkende Ursachen dabei im Spiel sind, ergibt sich schon aus dem geselligen Auftreten beider Mündungsformen“. (*Supan* 1916 p.584f.) Die Frage: In welchem Falle entwickelt ein Fluß nur subfluviale Sandbänke, und in welchem Falle entwickelt er Flußinseln? berührt wohl dasselbe Problem.

Im ersteren Fall begnügt sich der Fluß damit, „bei großen Bettbreiten mehrere, nebeneinanderliegende, Stromrinnen auszuwaschen, die aber in fortwährendem Wechsel an der Wasserführung teilnehmen“. „Je näher der Mündung, umso breiter wird in der Regel der Strom, umso mehr bilden sich Rinnen aus, die durch Sände und bei Niedrigwasser trockenlaufende Bänke voneinander getrennt sind ...“ (*Engels* I.1921 p.371f.) Dies gilt besonders für Flußmündungen mit starker Gezeitenbewegung, in denen der Ebbestrom noch bis weit über die Mündung hinaus eine mehr oder weniger divergierende Anordnung von Bänken und Rinnen herstellt. (*Philippson* II,2.1924.p.305f.) Immerhin besteht auch hier die Möglichkeit, daß sich Gezeitenkanäle durch Verschlammung der Ufer, Emporwachsen der Bänke zu Inseln mit Hilfe von Versandung und Vegetation, nachträglich zu regelrechten Flußarmen umbilden. (*A. Penck*, zit. *Andree* II.1920.p.119f.) Von ausschlaggebender Bedeutung für die Gestaltung des Querprofils ist die Art des Sinkstoffes: „Ein Strom, dessen Wasser nur Sand mit sich führte, würde im Bereich der Meeresflut in nicht langer Zeit völlig unschiffbar werden.“ Dagegen lagert sich der Schlick in der Regel nicht im eigentlichen Stromschlauche, im Talwege ab, sondern dort, wo durch Sandbewegung bereits eine Erhöhung (von wenigstens der Höhe der halben Flut) entstanden ist. Die durch den andringenden Flutstrom besorgte Schlickablagerung erreicht dann schließlich eine solche Höhe, daß auf ihr sich Pflanzenwuchs bilden kann; usw. (*Engels* a.a.O.) Die Aufschlickung bewirkt also Erhöhung des Ufergeländes, Einengung der Strombahn und Erhaltung der Fahrtiefe.

Im zweiten Fall, den wir ins Auge faßten, besitzt der Fluß selbst von vornherein die Fähigkeit, sich die über das Wasser aufragenden Uferdämme fortlaufend selbst zu schaffen. So ist das Wachstum des Mississippideltas ganz auf die Mündungsarme des Stromes, die sog. Pässe, beschränkt, die alljährlich in der Hochwasserzeit um 200 engl. Fuß in den mexikanischen Golf vorrücken, während in der übrigen Zeit das Wachstum fast gänzlich ruht. (*Hilgard* i. *Popular Science Monthly* 1912.) Die Pässe sind noch 15 km weit ins Meer hinaus von Dämmen begleitet. (*A. Penck* II.1894.p.505); zugleich mit den Dämmen werden die vorgelagerten 'Barren' immer weiter hinausgebaut. Die Art, wie der Fluß hier an den äußersten Vorposten arbeitet, ist entscheidend für die ganze Form. Die Geschlossenheit des Flußschlauches bleibt bis in die äußerste Spitze gewahrt. Der Dichteunterschied zwischen Fluß- und Seewasser ist es wohl, der in diesen Fällen mit Hilfe geeigneter und genügender Sinkstoffe so scharfe materielle Abgrenzungen zwischen den beiden Flüssigkeiten schafft. „Die schwereren Sinkstoffe ... bleiben

fest liegen, sobald das leichtere Flußwasser bei der Begegnung mit dem schwereren Seewasser in die Höhe steigt, während die leichteren ... Stoffe von dem Flußwasser in das Meer hinausgetrieben werden.“ (*H. Engels* I.1921.p.345ff.) —

Auch unter den Kleinformen der anorganischen Natur begegnen wir Verzweigungen. Nach jedem Regen kann man, z. B. auf den flachen Schwemmhalden von Tongruben, Miniatur-Flußsysteme beobachten. Auf Schicht- und Klufflächen bemerkt man vielfach „überaus dünne dunkle, aus Fe- und Mn-Oxyden bestehende Absätze von Lösungen“, die sich auf diesen Flächen bewegen, sog. Dendriten. „Wegen ihrer moos- bis bäumchenförmigen Gestalt werden sie von Unkundigen oft für Pflanzenversteinerungen gehalten.“ (*Kayser* 1921.I. p.450f.; Fig.335.) *E. Liesegang* (1913 p.101; Fig.5) ließ Gelatine mit Silberchromatbänderung zwischen Glasplatten trocknen. „Die Gelatine schrumpft dann zu Dendriten zusammen, die in der Hauptsache senkrecht auf den einzelnen Silberchromatlinien stehen.“

Hohes theoretisches Interesse beanspruchen schließlich die charakteristischen Ausbreitungsfiguren, die sich bei punktförmiger Einwirkung eines Mediums auf die Fläche eines anderen Mediums ergeben. So lassen sich nach *v. Bezold* (zit. *K. Kurz*, *Lichtenbergische Figuren*. Handwbt. d. Nat. 6. 1912) auf und mit strömenden Flüssigkeiten, durch Ansaugen oder Wegblasen, büschelartige Figuren erzeugen. Kongruente Leuchtfiguren lassen sich auf einer photographischen Platte fixieren. Verwandt sind die sog. 'Lichtenbergischen Figuren'. Im engeren Sinne sind dies Staubfiguren, die beim Übergang einer elektrischen Ladung auf einen Nichtleiter durch ungleiche Ausbreitung der Elektrizität entstehen. Sie lassen sich auf festen, flüssigen und luftförmigen Körpern erzeugen. „Bei Harzflächen kann man die durch das Aufströmen der Elektrizität bedingten Veränderungen unter Umständen noch nach Wochen sehen, wenn man die Fläche zum Schmelzen bringt, wobei sich dann entsprechende rillenförmige Figuren ausbilden.“ Für die Form der Figuren scheint die Schnelligkeit des Zuströmens maßgebend zu sein. So werden die Strahlen der positiven Figur bei schneller Entladung gerade und gleichlang; bei langsamer Entladung krümmen sie sich und nehmen die charakteristische, sich nach außen verästelnde Büschelform an. Bei sehr langsamem Zuströmen kann die positive Figur direkt die Gestalt der negativen, d. h. Ringgestalt, annehmen.

d) In der Bewegungsrichtung gereichte Windungen.
(Mäandertypus.)

Echte Mäander sind eine Zustandsform der linearen Fließbewegung. Seitliche Beeinflussung, etwa durch einmündende Nebenflüsse, spielt nur eine untergeordnete Rolle. Die Mäanderbildungen beschränken sich nicht nur auf normale Flußläufe. So bilden z. B. Schmelzwasser, welche über die geneigten Hänge der mit Schnee bedeckten Firnfelder im Hochgebirge abfließen, kleine, regelmäßig mäandrierende Bächlein. (*Lagally* 1915 p.22.) Im Unterlauf der Flüsse mit starker Gezeitenbewegung bewegen sich Ebbe- und Flutstrom „innerhalb der von festen Ufern begrenzten Wasserbahnen nach denselben Gesetzen wie ein normaler Fluß“, d. h. sie beschreiben ebenfalls z. T. Mäander. Infolge der entgegengesetzten Strömungsrichtung und bei verschiedener Ebbe- und Flutrinne bilden sich dann oft mehrere Mäander aus, die sich überkreuzen oder deren Scheitelpunkte etwas gegeneinander verschoben sind. (*Jessen*, Die Verlegung der Flußmündungen u. Gezeitentiefs usw. 1922 p.173f.) Auch die Talform der Wüste, der sog. Wadi, ist, wie die Windungen und der ausgesprochene Gegensatz eines Gleithanges und eines Prallhangs beweisen, das Werk von Flußmäandern. (*A. Hettner* 1921 p.79.) Ob auch der an der Küste vorbeiziehende schnellfließende sog. Brandungsstrom als frei mäandrierender, Aus- und Einbuchtungen schaffender Fluß zu betrachten ist, wie *Mortensen* (1921 p.12) annimmt, lassen wir dahingestellt. Die Transportmechanik der „Küstenversetzung“, über die wir seit den Untersuchungen *Philippons* (1893) gut unterrichtet sind, läßt jedenfalls den Vergleich mit einem „Strome“ nicht zu. — Bei der weitgehenden Analogie zwischen Flußbewegung und Gletscherbewegung (*S. Günther* ²II.1889.p.741 u.747; vgl. aber *Philippon* II,2.1924.p.198.) nimmt es nicht wunder, auch beim Gletscher eine, wenn auch nur geringe Tendenz zum Mäandrieren anzutreffen. „Verbindet man die Punkte größter Geschwindigkeit bei mehreren hintereinanderliegenden Steinlinien, so erhält man, wie beim Fluß, einen Stromstrich, der von einer gebogenen Uferseite zur anderen pendelt.“ (*Passarge* III.1920. p.308; Abb.148.) Dem Wechsel von Furt und Kolk scheint hier der Wechsel von Riegeln und Wannern zu entsprechen. (*J. Brunhes* 1906/07 p.289.) — Die Mäanderbildungen leiten über zu den eigentümlichen Spiralbildungen, die sich gelegentlich bei Strömungen auf zylindrischen Bahnen ergeben.

e) Senkrecht zur Bewegungsrichtung gereichte Buchungen bei schräg ansteigender Lage der Grenzfläche und auskeilender Bewegung des Angriffsmediums. (Nischentypus.)

Der Beschreibung der sog. 'Strandspitzen' war ein besonderes Kapitel gewidmet. (Kap. IV.) Bei ihnen wird der zunächst geradlinige Grenzstreifen von Wasser und Strand übergeführt in ein System von gegenseitig ineinandergreifenden Zungen.

Wo die Brandung festes Gestein zu bearbeiten hat, müssen sich beständigere und entsprechend abgeänderte Formen bilden; auch müssen hier schon andere Erklärungsmöglichkeiten in Betracht gezogen werden. In leicht löslichen Kalkstein gräbt die Woge durch chemische Erosion tiefe Höhlen, Kammern und Gänge ein. (*Supan* 1916 p.604.) Am steilen Ostufer des Gardasees arbeitet die Brandung aus dem roten Marmor runde Nischen und Kesselchen aus. (*G. Prinz* 1907.) Diese sind in die Felsenplatte einmodelliert und verlieren landwärts an Tiefe; in ihnen arbeitet das Wasser mit wirbelnder Bewegung¹⁾. Als Produkte der zurückströmenden Wellen, die das von den Stoßwellen abgelöste Material mit sich führen, sieht man schmale, aber ziemlich tiefe Gräben. „Nachdem die Wellen längere Zeit an den Kesselchen

¹⁾ Der 'Nischentypus' geht hier über in den 'Topf- oder Kesseltypus'. In Kalkplatten am Fuße von Steilküsten werden gelegentlich zylindrische Ausstrudelungslöcher mit senkrechter Achse, sowie kleinere Auswaschungslöcher beobachtet. (*Kayser* 1921.I.p.637.) Die Brandung vermag nach *Geinitz* (1903) in einem Kliff, das Schleifmaterial liefert, wenn sie sich nicht ungehindert zurückziehen kann, seitliche Riesentöpfe einzubohren. Strudellöcher und Riesentöpfe sind auch eine verbreitete Erscheinung felsiger Flußbetten. Es sind kreisrunde Vertiefungen mit senkrechten, oft spiralig gerillten, glatt geschliffenen Wänden, von kleinsten Dimensionen bis zur Tiefe von 15 m und ebensolchem Durchmesser. Sie finden sich oft in großer Zahl nebeneinander in schnell fließenden Gewässern, besonders in Stromschnellen. Durch ein Fortarbeiten der Zwischenwände können sich ganze Reihen von Löchern zu einer steilwandigen Rinne vereinigen. (*Philippson* II,2.1924.p.123; *E. Brunhes* 1906 u. ö.) *E. Fleury* (1907) unterscheidet zwischen den „marmites“ der Bettsohle und den „chaudrons“ der Seitenwände. Nach den Beobachtungen *Philippsons* (Ref. zu *Fleury* i. *Pet. Mitt.* 1908) sind die Kessel in den Jurakalken vielfach an bestimmte Schichten gebunden, so daß sie, diesen Schichten folgend, reihenweise an den Talwänden aufsteigen. Wie es Kartreppen gibt, so folgen sich oft Kesselbildungen staffelförmig übereinander. (*Brunhes* 1902.) Für die Bildung von Strudellöchern eignen sich am besten Sandsteine, Kalksteine, Massengesteine; dagegen bröckelige und schiefrige Gesteine nicht. — Weitere Lit.: *Bern. Brunhes* u. *Jean Brunhes* 1904; *E. Chaix* 1902; *Ders.* 1903; *H. Heß v. Wichdorff* 1914.)

und Grübchen arbeiteten, erweitern sich dieselben, bis die Scheidewand zwischen denselben verschwindet.“ „Senkrecht zur Angriffslinie der brandenden Wellen formt sich auf diese Weise aus den vielen Nischen eine zusammenhängende halbzyklindrische Böschung.“ Auf die gleiche Weise kommt es auch zur „stufenweisen Entstehung von unzähligen Buchten“. Durch das Einstürzen der zwischen ihnen liegenden Vorsprünge vergrößert sich der Bereich der Brandungsterrasse. — Etwas ähnliches beobachtete *Calciati* (1909 p.120) an den Molasse-Steilufeln der Sarine: „La partie des grandes parois concaves qui se trouvent encore en contact avec la surface de l'eau est d'allure ondulée à festonnements symétriques et réguliers.“ Auch eine interessante Beobachtung von *F. W. Paul Lehmann* (1922) läßt sich hier anführen: „Ganz eigentümliche Schmelzerscheinungen zeigten sich im Winter 1921/22 [Febr.] in der Eisdecke der Pleiße bei Leipzig . . . Auf der Strecke des langsam (6—8 cm/sec) fließenden Wassers . . . lag noch ein Eisrand. Er schnitt nicht geradlinig oder in leicht geschwungener Linie gegen das offene Wasser ab, sondern zackig wie eine Riasküste. Wo sie am besten ausgebildet war, ragten zwischen 2 m tiefen Buchten 11 — bei langer aufmerksamer Beobachtung leichter Abschmelzung unterworfen — Kaps der dünnen Eisdecke vor, die durchschnittlich 2,5 m voneinander entfernt waren. Auch hier [wie bei den vorher beschriebenen barchanartigen Schmelzlöchern auf dem Flusse selbst] der Rest einer Abschmelzung von unten, die nicht gleichmäßig erfolgte, sondern in Intervallen.“

Je größer die Buchten, umso mehr muß allerdings mit lokalen Ursachen, also tektonischen und selektiven Vorgängen, gerechnet werden. Wird man jedoch innerhalb dieser Großbuchten Miniaturformen desselben Typus antreffen, so wird man zu einer sorgfältigen Abgrenzung des Kräfteanteils genötigt sein. Auf Grund schematischer Beschreibungen lassen sich natürlich keine Schlüsse ziehen²⁾. *H. Mortensen* (1921) fand das Kliff der samländischen Steilküste streckenweise in überraschend regelmäßiger Weise (p.12) aufgeschlossen. „Mehr oder minder tiefe runde Einbuchtungen, deren Sehnenlänge zwischen wenigen Metern und über 50, ja 100 m schwankt“, waren in das Kliff

²⁾ Z. B. Der „algerische Küstentyp“: die „durch Brandungsbuchten aufgeschlossene Form der Steilküste“, bei der „selbst die größeren Golfe ihrerseits wiederum aus kleineren von Halbkreisform bestehen“. (Theob. Fischer, Mittelmeerbilder NF p.61.) „Überall, wo das Meer durch Brandungswellen oder Strömungen überwiegenden Einfluß auf die Gestaltung und Entwicklung, seien es Steilküsten oder Flachküsten, ausübt, nimmt die Küstenlinie die Form aneinandergereihter Kreisbogen an, an Steilküsten mit kleinem, an Flachküsten mit großem Radius . . .“ (Ders., Zur Entwickl.-Gesch. d. Küsten. Pet. Mitt. 1885 p.411 ff.)

hineingearbeitet (p.48ff.). „Merklichen Verschiedenheiten des inneren Baus passen sich die entstehenden Formen naturgemäß an, so daß die Regelmäßigkeit des öfteren gestört ist, im Prinzip jedoch ist der Vorgang immer derselbe“ (p.50). Als besondere Typen der Kliffbuchungen nennt *Mortensen* noch die Quellnischen, Trichterbuchungen, Zirkusformen und Kesselbuchungen, deren 'Anordnung' ebenfalls sehr regelmäßig ist. Bei der Ausgestaltung dieser Formen wirkt neben der Brandung der „angeordnete Grundwasseraustritt“, die „angeordnete Flächenspülung“ und die „angeordnete Abtragung“ mit (p.51ff.). Die Arbeit der Brandung wird so ergänzt durch die Arbeit des Klimas in Gestalt von Verwitterung und Erosion, „wie überhaupt am Kliff alle die Umgestaltungen zu bemerken sind, die jede Steilstufe betreffen“. (*Philippson* II, 2.1924. p.290.) — Diese Kräfte wirken noch ständig. „Die Vorsprünge verschwinden nicht, die Buchten werden nicht zugeschüttet.“ (*Mortensen* p.62.) „Das Gesetz, daß das Meer die vorspringenden Teile ganz besonders angreift und zurückschneidet, die Buchten dagegen ausfüllt, gilt somit durchaus nicht allgemein, sondern nur dort, wo die Buchten tiefer sind oder die Vorsprünge weiter hervortreten, als es dem erstrebten Ausgleichszustand entspricht“ (p.12). — Bei Abrasionsküsten spiegelt sich das Vertikalprofil des Kliffhanges im Horizontalprofil des Küstenverlaufes wider. Diese Entsprechung ist charakteristisch für unseren 'Nischentypus'. „Wo eine Höhe an die Küste herantritt, wird das Kliff hoch und weicht langsamer zurück als an den niedrigeren Stellen, wo weniger Gestein abzutragen ist. Höhen bilden also Vorsprünge, Mulden und Täler bilden Buchten der Küste.“ (*Philippson* II, 2.1924. p.293.) — Steile 'Ursprungstrichter' finden sich auch im Quellgebiet der Flüsse; sie treten besonders an steilen Talflanken als Anfänge kleiner Nebentäler auf; auch sie sind oft zu mehreren reihenweise nebeneinander angeordnet. Der 'angeordnete Grundwasseraustritt' schafft dann oft ein regelmäßiges Nebeneinander von „Quellnischen“. „Wenn mehrere Quellen nebeneinander aus einem Bodenwasserhorizont entspringen, kann der ganze Abhang von Buchten mit Vorsprüngen und 'Zeugen' gegliedert und dabei rückwärts verschoben werden.“ (*Philippson* p.154, mit Fig.; p.64.) Arbeiten die Ursprungstrichter zu beiden Seiten der Wasserscheide eines Kammes oder Grates gegeneinander, so wird das Längsprofil des Kammes bzw. Grates sägezahnförmig oder girlandenförmig zerlegt. (*Philippson* p.172f., mit Fig.) Aus der formalen Mittelstellung des Nischentypus ergibt sich ja, daß das System von Buchungen bald mehr im Horizontalprofil (Strandspitzen; Buchten an Flachküsten!) bald mehr im Vertikalprofil (Kamm- und Gratformen!) formal zum Ausdruck kommt. Die Nischenbildung selbst verläuft

schräg ansteigend zwischen dem von diesen beiden Profilen gebildeten rechten Winkel. —

Wenn wir im nachstehenden auch größere Bucht- und Nischenbildungen (soweit sie nicht selektiv usw. bedingt sind) in diesen Zusammenhang einbeziehen, so leitet uns dabei die Vorstellung, daß auch hier das Angriffsmedium brandungsartig gegen das andere anstürmt, daß es einen mehr oder weniger schrägen Festungswall nicht an allen Stellen gleichmäßig, sondern in der aufgelösten Form regelmäßig verteilter Stoßtrupps zu bearbeiten versucht. Alle verwitternden Kräfte können in diesem Sinne Angriffsmedium sein, und so schafft die differenzierte Angriffstaktik immer wiederkehrende typische 'Arbeitsformen'. Der Rand einer zurückweichenden Landstufe ist selten ungliedert; meist ist er gebuchtet, zerlappt oder gefranst. Die Zeugenberge „bilden sich immer aufs neue, wenn ältere Zeugen zu Trümmern und Staub zerfallen und in alle Winde geweht worden sind. Sie lösen sich immer wieder vom Tafellande ab, und immer wieder umkränzt ein neuer Zeugengürtel das sich verkleinernde Hamada-plateau“. Hier am Rande des Tafelgebirges und im Gewirr seiner Felsentäler kondensieren sich die herbeigetragenen feuchten Luftmassen und stürzen als Wolkenbrüche nieder. Meilenlange Täler, von Amphitheatern, Kesselbuchten und blinden Sackgassen begrenzt, dringen in das Tafelgebirge hinein, kleine und große Zungenberge lösen sich in Zeugen auf, usw. (*J. Walther* 21912 p.205 u.224.) — Auch wo der Wind an Küsten und in Wüsten zerstörend anbraust, verfährt er nicht anders. Immer sind es muldenartige Breschen, die in gewissen Abständen den dem Winde ausgesetzten Hang des Hindernisses zerfurchen, auch ohne daß solche Mulden irgendwie vorgebildet wären.

Auch der jährlich sich wiederholende Rückzug des Randes der winterlichen Schneedecke führt in der glazialen Landschaft an mittelsteilen Gebirgsabhängen zu einer eigenartigen Differenzierung, der Karbildung. Ermöglicht wird hier die Differenzierung durch die fortwährenden Temperaturschwankungen um 0° und die daraufhin einsetzenden Kleinbewegungen der Frostverwitterung und des Frostschubs in Arbeitsgemeinschaft mit entsprechenden Formveränderungen der auflagernden Schnee- oder Firnflecken. Die Differenzierung besteht darin, daß einerseits Frostverwitterung und Frostschub an dem Gehänge in einer solchen Weise arbeiten, daß sie eine immer stärkere Konzentration des den Sommer überdauernden Schnees in nebeneinander angeordneten kesselförmigen (lehnsesselförmigen) Nischen ermöglichen, und daß andererseits diese Schneeflecken mit ihrer, durch die zunehmende Vertiefung nach rückwärts bedingten, vermehrten Mächtigkeit ein immer intensiveres Arbeiten der Frostverwitterung und des Frostschubes in

ihrer unmittelbaren Nachbarschaft hervorrufen. Die Ursache dieser Differenzierung ist auch hier nicht mit Hilfe von Selbstverstärkungsgedankengängen, sondern mit Hilfe einer Stabilitätsbetrachtung zu ermitteln. Es ist zu zeigen, inwiefern durch die Karbildung die Kleinbewegungen in der Firnleckenzone einer erhöhten Stabilität zugeführt werden. Diese Aufgabe bleibt einer künftigen, mit sorgfältiger Detailanalyse arbeitenden Forschung vorbehalten. Genetische Betrachtungen helfen hier wenig. Es ist für die Endform relativ gleichgültig, ob sie aus irgendeiner präexistierenden Einsenkung, also aus Ungleichmäßigkeiten des Gesteins, Steinschlägen, Felsstürzen, Zusammensacken losen Schuttes oder aus präglazialen Wasserrinnen (*E. Richter* 1900 p.4; 21f.), ob sie aus Sammeltrichtern von alten Gehägebächen, Sammelbecken von Sturzbächen in amphitheatralischen Talanfängen (*Löwl, Kilian* u. a., zit. *Kayser* 1921.I.p.602; s.a. *Machatschek* III.1919.p.85), oder ob sie aus den trichterförmig erweiterten Erosionsrinnen der Frostverwitterung (*B. Högbom* 1914 p.292) hervorgegangen sind. Eine Beziehung zu irgendwelchen Tälern ist oft gar nicht vorhanden, die Kare setzen sich dann unvermittelt in einem Steilabfall fort (*E. Richter* a.a.O.); die Notwendigkeit einer Präexistenz von Einsenkungen ist mehr als fraglich. — Das Sich-Einfressen des Schneeflecks geschieht weniger durch vertiefende als durch rückwärtsschreitende Erosion. „Dafür spricht schon der Umstand, daß Kare in demselben Gebirgsabhang, unabhängig von ihrer Größe, in etwa derselben Höhe gelegen sind.“ (*B. Högbom* 1914 p.292.) Der an den oberen Rändern des Firnlecks und an den umrahmenden Felsabhängen besonders kräftig arbeitende Spaltenfrost liefert das Verwitterungsmaterial, das dann der Frostschub, das Erdfließen, das Schmelzwasser und der etwa hier seinen Ursprung nehmende Gletscher weiter verfrachten. Die Beteiligung eines Gletschers ist zur Ausbildung des Kars nicht notwendig. (*B. Högbom* 1912 p.242ff.) Bemerkenswert ist jedoch, daß die Firnmulde der meisten heutigen Gebirgsgletscher ebenfalls eine lehnsesselähnliche Form hat, „die sich, wenn wir uns den Firn fortdenken, von dem typischen Kare nur durch ihre Größe unterscheidet“. (*Philippson* II,2.1924.p.264.)

f) Rings geschlossene Formen, bei Lage der Grenzfläche senkrecht zur Bewegungsrichtung. (Kegel-, Netz-, Schüssel- und Trichtertypus.)

Von den in den vorhergehenden Abschnitten besprochenen 'offenen' Formen führen kontinuierliche Übergänge (vgl. den nächsten Abschnitt: „Übergänge“) zu den 'geschlossenen' Formen, die als 'Stehrhythmen' symmetrisch zu einer auf der

Oberfläche senkrecht stehenden Bewegungs-komponente gebildet erscheinen.

Wird die gemeinsame Begrenzungsfläche zweier Medien durch physikalische oder chemische Vorgänge, die sich an ihr zwischen diesen Medien abspielen, in ein System von Aus- und Einbuchtungen zerlegt, so spricht man von Interaktion oder pseudopodialer Durchdringung. Der Vorgang soll zunächst an den bei senkrechter Bewegung zur Grenzfläche entstehenden geschlossenen Aus- und Einstülpungen erläutert werden. *C. G. Schooneboom* (1922) schichtete auf die Oberfläche einer 5—8%igen NaCl-Lösung vorsichtig etwas Blutserum. Sobald die Flüssigkeiten sich berührten, beobachtete er eine lebhafteste Massenbewegung. Die obere Schicht wurde in die untere und die untere nach oben gezogen. Solche Vorgänge sind besonders leicht zu verfolgen bei Zusatz von Eosin. *Verworn* (Allg. Physiol. 1915. p.721; Fig. 316) bringt zur Illustrierung der Pseudopodienentwicklung nackter Protoplasmamassen verschiedene form-analoge „Ausbreitungsformen von Öltröpfen in alkalischer Flüssigkeit“. Durch chemische Beziehungen gewisser Bestandteile des Flüssigkeitstropfens zu Stoffen des umgebenden Mediums (Chemotaxis) wird in vorliegendem Falle die Oberflächenspannung „an bestimmten Stellen“ herabgesetzt. Wie bei der Zonenbildung in kolloidalen Medien scheint es auch hier nicht unbedingt notwendig zu sein, daß der, letzten Endes physikalische, Vorgang von chemischen Umsetzungen begleitet ist. Die in der Anordnung der Oberflächenspannungsdifferenzen zutage tretende rhythmische Gesetzmäßigkeit ist jedoch bisher zu wenig beachtet worden. Handelt es sich doch bei dem normalen Phänomen nicht um „lokal hier und dort“ (*Verworn*) wirkende präexistierende Verschiedenheiten von Reizeinwirkungen, sondern um eine Selbstdifferenzierung der Form bei zunächst völliger Homogenität auf beiden Seiten.

Nach den Beobachtungen von *F. Klute* (1916/17) erfolgt das Eindringen der Schmelzwasser in die Schnee- oder Firndecke an einzelnen Stellen rascher als an anderen. Die durch Eosin kenntlich gemachten 'Sickerbahnen' haben Trichterform. „Durch das Auftreten von Sickerbahnen entstehen Dichtigkeitszonen, die durch nächstliches Gefrieren noch stärker hervortreten und die Abschmelzung, besonders die durch Sonnenstrahlung, selektiv beeinflussen.“ „Das einsickernde Schmelzwasser übte nur geringe Schmelzwirkung an den unteren Schichten aus, trotzdem diese öfters naß waren.“ (Vorhandensein und Erhaltung dieser materiellen Diskontinuität scheint von derselben Wichtigkeit zu sein wie u. a. beim Büßerschnee.) „Im ganzen wurde der Vorgang sechsmal beobachtet, jeweil mit dem gleichen Resultat.“

Bei manchen Bildungen mit 'geschlossenen' Formen ist die Vollform das Charakteristische und in die Augen Springende, bei anderen ist es die Hohlform. Eine Mittelstellung nehmen die ohne wesentliche Formveränderungen der Oberfläche sich vollziehenden rein strukturellen Umlagerungen ein, z. B. die des Strukturbodens. Der Anschluß nach beiden Seiten hin wird auch hier durch Übergangsformen vermittelt. (Vgl. die kegelförmigen 'Hügelmoränen' einerseits und die hohlen 'Steinrichter' anderseits.)

Der Vorgang der differenziellen Abschmelzung der Firndecke pflegt oft mit der Ausbildung von Hohlformen (Firnshalen, -näpfen, rhombenförmigen Vertiefungen, Firnfurchen) zu beginnen und in der immer schärferen Herausbildung von Vollformen (Nadeln³⁾, aus Kämmen herausgeschnittenen Zacken, Pyramiden, Schneeschmelzkegeln) zu endigen. Doch braucht diese Entwicklungsreihe nicht unbedingt durchlaufen zu werden; die Vollformen können auch von vorneherein als solche auftreten, und umgekehrt die Hohlformen als solche erhalten bleiben. (Vgl. Kap. „Büßerschnee“!) Auch auf den Karren- und Erdpyramidenfeldern ist das charakteristische Formelement zunächst die sich das Gehänge hinabziehende Rinne und Furche. Zwischen diesen Rinnen und Furchen bleiben ebeflächige Streifen oder dachartige, oft recht scharfe Kämme (Grate, Mauern, Erosionssporne) stehen. In dem Maße, wie die Differenzierung auf diese übergreift, entwickeln sich auch hier Vollformen: Die Kämme zerfallen in Zähne, Zacken oder spitze Haken bei den Karren (*Sjuts* 1907 p.40), in Bastione oder Zacken, Kegel, Säulen und Pyramiden auf den Erdpyramidenfeldern. Doch ist auch hier für manche Vorkommnisse mit einer primären Ausbildung der Vollformen zu rechnen; dies wird namentlich dort zutreffen, wo die Kegel in relativer Unabhängigkeit aus den Seitenwänden der Kämme emporstreben. Ob die Vollform mehr als Kegel, Säule oder Pyramide ausgebildet ist, ist nicht von Belang; denn diese drei Formen „kommen in allen möglichen Übergängen und unterschiedslos überall verteilt vor“. (*Sauer* 1904 p.4.)

Daß bei den besprochenen Erscheinungen der Typus der allseitig geschlossenen Form nicht zur reinen oder ausschließlichen Ausbildung gelangt, ist beim Büßerschnee aus dem geneigten Einfallswinkel der morgendlichen und abendlichen Sonnenstrahlen, bei den Karren und Erdpyramiden aus der fast durchweg steilen Neigung des Gehänges zu

³⁾ „An einem Lawinen-Schneekegel hat Forel beobachtet, wie ein herabstürzender Bach sich durch die Schneemasse ein tunnelartiges Loch gegraben hatte; das von oben herabspritzende Wasser hatte nun um dieses Loch herum auf der Schneeoberfläche viele kleine isolierte spitze Pyramiden und Nadeln herausgearbeitet.“ (Zs.Ges.f.Erdk.1908 p.110. Diskuss.)

erklären; es ist der Rinnentypus mit seinen Badlandformen, der sich hier einmischt. Die steilen Rinnen übernehmen hier den für eine scharfe Formenausbildung unerläßlichen raschen Abtransport des meteorischen Wassers und des mit ihm jeweilig abgespülten Erdmaterials. Der normale Büßerschnee bedarf keiner steilen Gehänge, da der Abtransport auf dem Wege der Verdunstung erfolgt. Bei den Karrenformen ist bei fehlender Neigung die Möglichkeit unterirdischen Abtransportes gegeben.

Die Ring- und Netzformen des Strukturbodens finden eine Entsprechung in den regelmäßigen, neben- und untereinander angeordneten, isoliert-rundlichen oder vergesellschaftet-maschenförmigen Hohlräumen der „gitter-, netz- und wabenförmigen Verwitterung“ an senkrechten Felswänden, besonders des söhlig lagernden Sandsteins. Die netzartige Struktur entsteht hier durch Vorgänge im Gesteine selbst; die äußeren Faktoren wirken nur selektiv ausräumend. — Andererseits gibt es auch netzartige Strukturen, die durch die Einwirkung der äußeren Faktoren dem Gestein gewissermaßen nur aufgeprägt wurden. Und zwar wird auf Grund unserer Theorie eine solche netzartige Differenzierung dann entstehen können, wenn das Angriffsmedium nahezu senkrecht auf die Gesteinsoberfläche einwirkt (‘Stehrhythmus’). Das Netzmuster entspricht dann dem Rillennmuster, bei dem die Einwirkung parallel zur Oberfläche erfolgte. So erzeugt der Rücklauf der Meeresbrandung an felsigen Küsten vielfach Rillen und Karren (vgl. oben Abschnitt b!), die chemische (Salzgehalt!) und mechanische Wirkung des Spritzwassers außerdem eine löcherige, netzförmige Zerfressenheit der verschiedensten Gesteine. (*Philippon* II,2.1924.p.44 u.281.)

Den „Wannen, Schüsseln und Töpfen auf horizontalen Felsplatten“ widmet *P. Keßler* (1921 p. 238 ff., mit Lit.; einige Lit. auch bei *Sjuts* 1907 p.18; ferner *Söleh* 1914 p.148.) eine eingehende Untersuchung. Sie werden hauptsächlich auf Granit angetroffen. Bildungen, die auf ausgewitterte Konkretionen oder sonstige gegebene Verschiedenheiten der äußeren Einwirkung oder der inneren Widerständigkeit zurückgehen, scheiden für unsere Betrachtung natürlich aus. — Die Becken stehen zuweilen durch Rinnen miteinander in Verbindung oder greifen ineinander; am Felsrand finden sich halbgeöffnete Formen, sog. Armsessel, die an Größe mit den Wannen übereinstimmen. Gesteinsunterschiede werden den ‘ersten Anlaß’ zur Wannenbildung geben, doch vermögen sich die Löcher über die Grenzen dieser hinaus zu erweitern und sich so durch verschiedenartiges Gestein hindurchzuarbeiten. (*Keßler* 1921 p.251f.) Die Weiterentwicklung der zunächst noch flachen Schüsseln geschieht mit Hilfe der Verwitte-

rung durch Wasserspaltung (aktive Jonenwirkung, CO₂ oder anderer Lösungsmittel⁴⁾. Eine ständig wiederholte Entfernung des verwitterten Materials ist für die Ausbildung der Form unerlässlich. Sie kann durch den Regen selbst geschehen. „Fällt Regen bis zum Überlaufen der Wanne, so wird die Minerallösung verdünnt und teilweise herausgeschafft. Ein nicht zu seltener Wechsel zwischen Niederschlägen und starker Verdunstung gehört also zur Entstehung der Wannen.“ In unserem kälteren Klima gesellt sich die Frostsprenkung hinzu. „Während das Wasser auf den glatten Flächen sofort abfließt, vermag es aus dem Grunde der Wannen in dem bereits angegriffenen Gestein kapillar in die Höhe zu steigen und durch Sprengwirkung den Topf seitlich zu erweitern.“ Zur vollständigen Ausräumung, besonders des sich am Grunde anreichernden Quarzgruses, bedarf es jedoch außerdem der mechanischen Ausräumung, etwa durch den Wind. Die Windausräumung hat ebenfalls häufige gänzliche Austrocknung der Wannen zur Voraussetzung. Wirblice Ausstrudelung durch den Wind kann die Ausräumung unterstützen. Wird bei der Schneeschmelze die Eisfüllung der Wannen gehoben, so kann auch hierbei der eingefrorene Grus mit entfernt werden. Verfolgt man die Verbreitung der Wannen über die Erde, so gelangt man ebenfalls zu dem Ergebnis, daß ein trockenes Klima, in dem Trockenzeiten mit kurzen, aber oft heftigen Niederschlägen abwechseln, für die Wannenbildung am günstigsten ist. Ein solches Klima herrscht heute in Teilen der Arktis und Antarktis, herrschte, zur Zeit der größten Vergletscherung, in den deutschen Gebirgen auf Höhenlagen, die an die Schneegrenze heranreichten, herrscht ferner in der Wüste. Infolge der geringen Niederschläge kommt es zu Salzausblühungen; das versickerte Wasser steigt wieder kapillar in die Höhe und scheidet dabei die gelösten Salze aus. Die Löcher vergrößern und vertiefen sich unter dem Einfluß der Salzverwitterung.

Auch auf horizontalen Platten von Kalken und Dolomiten kommt es zur Bildung von Schüsseln, Becken und Wannen. (*Keßler* 1921 p.257f.) Der in den Wannen gelöste Kalk wird bei Regen mit dem Wasser ausgeschwemmt. Reichliche, gleichmäßig verteilte Niederschläge sind deshalb den Wannen im Kalk günstig. Schüsseln und Wannen in Sandstein sind u. a. aus der Sächsischen Schweiz und aus dem Pfälzer Bergland bekannt.

Etwas anders verläuft der Vorgang bei den sog. Dolinen, flachen, napfförmigen Vertiefungen im anstehenden Kalkstein. „In Karstgebieten liegen sie oft zu Tausenden unregelmäßig verteilt in geringen Abständen,

⁴⁾ S. Günther ²II.1899.p.878 („Kesselbildung“) nennt die Schwefelsäure und den Ammoniak des Regenwassers.

so daß die Oberfläche wie blatternarbig erscheint.“ (*Philippson* II, 2. 1924. p. 68 u. 76.) Die Feuchtigkeit wird bei ihnen nicht ausgeschwemmt, sondern versickert unter ihrem Boden durch kleine Spalten. Zunächst bilden sich an einzelnen rhythmisch verteilten (oder auch selektiv bedingten) Punkten „bevorzugte Versickerungsstellen“ aus, die das Wasser aus weiterem Umkreise an sich ziehen. Nicht die Ursache, sondern erst die Wirkung dieser Kontraktion ist dann die fortschreitende Auflösung des Gesteins und die Vertiefung der Form in der Umgebung dieser Versickerungsstellen. (Natürlich begünstigt die fortschreitende Vertiefung auch ihrerseits wieder die Kontraktion.)

Der für die Wannengebilde so wichtige Wechsel von Durchfeuchtung und Austrocknung kann in der Wüste außer in jahreszeitlicher auch selbst in täglicher Wiederholung auftreten. „Bei den niedrigen Temperaturen der Nacht, infolge der starken Ausstrahlung in wolkenfreien und staubfreien Zeiten, kommt es zu häufiger Tau-, ja Reifbildung. Kurze Zeit nach Sonnenaufgang aber ist schon jede Feuchtigkeit verdampft. Aber die vielfache Wiederholung ersetzt die Intensität des einzelnen Vorganges.“ (*Erich Kaiser* 1923.) So arbeitet die Taubildung mit an der Ausgestaltung der Wannengebilde. Die Vertiefung der Hohlform macht raschere Fortschritte dort, wo ein durchlässiges Gestein (Arkosen, Sandsteine usw.) einen Bruchteil des Wassers einsickern läßt. Wir haben dann in den kapillaren Sickerbahnen und Auftriebsbahnen jene 'diakinetischen' Kleinbewegungen, die, wie wir wissen, leicht zur Selbstdifferenzierung führen. (Bei wasserundurchlässigem Gestein verläuft der Vorgang überwiegend 'parakinetisch'.) Das, worauf es bei all diesen Schüssel- und Wannengebilden ankommt, ist nicht so sehr der Vorgang der Verwitterung und Abtragung als solcher, als vielmehr das morphologische Problem, daß dieser Vorgang sich so scharf differenziert, daß seine Intensitätskurve an den Hohlformen eine so unvermittelte Ausbiegung nimmt. Da die Hohlform irgendwie eine erhöhte Stabilität darstellt, ist für die 'Tendenz zur Stabilität' Verwitterung und Deflation ein 'Mittel' zu morphologischen Umgestaltungen in diesem Sinne. Haben wir bei den Wannengebilden eine 'Tendenz zur Konzentrierung der Feuchtigkeit an rhythmisch verteilten Stellen zur Verminderung der bei den Kleinbewegungen entstehenden inneren Reibung', so liegt hier eine Selbstumgestaltung der — dank Verwitterung und Deflation beweglichen — 'physischen Form' im Sinne dieser Tendenz vor.

Dem ständigen Wechsel von Durchfeuchtung und Austrocknung vermögen nur wenige Gesteine standzuhalten. „Where it is desired to convert chalk or slate into clay, it can be effected by simply steeping the material in water and then exposing it to the sun, and repeating the process again and again until it is reduced entirely.“ (*J. W. Evans* i.

Diskuss. zu *Jutson* 1917 p.436.) So lagert auch statt der vorher sehr festen, harten, widerstandsfähigen Arkosen usw., z. B. der von *E. Kaiser* (1922 p.167) beschriebenen „Wannennamib“ (Küstenwüste SWAfrikas), schließlich ein mürbes, weiches, leicht zerreibliches Gestein am Boden des ausgetrockneten Regensees in der Hohlform. — Die in der Trockenperiode einsetzende Deflation kann nur soweit wirken, als ihr eine Auflockerung der verwitterbaren Gesteine vorgearbeitet hat. Die tonig-salzigen Rückstände (Salzpelite) des Wannenbodens werden von der Insolation mit Trockenrissen durchzogen und Haut für Haut, Lage für Lage oberflächlich von den neugebildeten Sedimenten abgelöst. Entweder in größeren Fetzen, noch mehr aber in feinen, weiter von der Insolation zerkleinerten Sand- und Staubkörnchen wird das neu gebildete Sediment vom Winde abgehoben und entfernt.

Geschlossene Wannenbildungen treten uns, als charakteristisches Formelement der ariden Landschaft, auch in größeren Dimensionen als 'Pfannen' entgegen. Die Pfannen übernehmen in den abflußarmen Gebieten die Rolle der fehlenden Flußbetten: Sie bestimmen als 'Stehrhythmen' die Oberflächengestalt und die Wasserführung. Die physiologische Gleichartigkeit von Fluß und Pfanne wird durch zahlreiche Übergänge bestätigt. Es finden sich alle Übergänge von Kalkpfannen zu Kalkflüssen. (*Fritz Jäger* 1922; s. a. unten den Abschnitt „Übergänge“!) Ebenso ist bei schwach geneigtem Gelände die Anordnung und gegenseitige Verbindung der 'Trockenseen', z. B. von Westaustralien, eine solche, daß der Eindruck eines in Ansätzen stecken gebliebenen (oder aus einer feuchteren Klimaperiode zu diesen Ansätzen reduzierten) Entwässerungssystems erweckt wird. „The main drainage receptacles of the country“ sind hier die Trockenseen selbst mit ihren verbindenden Armen. (*J. T. Jutson* 1917.) Bemerkenswert ist auch hier wieder, daß die verschiedensten Unregelmäßigkeiten des 'Urreliefs' und die verschiedensten 'genetischen' Vorgänge⁵⁾ schließlich alle in die Ausbildung derselben typischen Formen einmünden. Die 'genetische' Betrachtung der Pfannen bedarf deshalb der Ergänzung durch eine 'physiologische' Betrachtung, die die Pfannen als für die gegebenen Bedingungen notwendige Stabilitätsform hinstellt.

An jeder Pfanne unterscheiden wir das Pfannenbecken und die Pfannenausfüllung. Das Pfannenbecken ist flachschüsselförmig ins Gelände eingesenkt. Die Ausfüllung verleiht der Pfanne dann erst den ebenen Boden und somit erst die eigentliche Pfannengestalt. (*F. Jäger* a.a.O.p.23 u. Abb.1.) Doch bilden die Pfannen ohne Ausfüllung einen

⁵⁾ Über Entstehungsmöglichkeiten s. *F. Jäger* a.a.O.p.27f., p.34.

besonderen und nicht unwichtigen Typus. — „Auf dem ebenen Boden ist das Wasser in so dünner Schicht ausgebreitet, daß es in der Trockenzeit völlig zu verdunsten pflegt“ (p.34). „Die ebene, meist vegetationslose Ausfüllung der Pfanne erinnert an einen Wasserspiegel und entsteht auch durch einen periodischen Wasserspiegel, in dem das feinste Material erst schwebend erhalten wird und sich dann gleichmäßig absetzt. So entstehen Lehm- und Tonpfannen und schließlich Salzpfnannen“ (p.29). Die Kalkpfannen sind wegen ihres zähen Schlammes vielfach undurchlässig und bilden deshalb mehr oder weniger beständige Seen. Für das Aussehen der Pfannen ohne Ausfüllung ist die Beschaffenheit des Untergrundes maßgebend. Man unterscheidet hiernach: a) Pfannen in anstehendem Fels, b) Pfannen in wenig verfestigten Deckschichten, c) Pfannen in lockerem Verwitterungs- oder Anschwemmungsboden (p.23). — „Die große Mehrzahl der Pfannen sind Erscheinungen geringerer Größenordnung. Ihre Becken haben einige zehner oder einige hundert Meter Durchmesser, allenfalls ein paar Kilometer, und die Tiefe der Pfannenbecken beträgt wenige Meter, sagen wir höchstens 5“ (p.28). Die Pfannen und Trockenseen sind, ebenso wie die besprochenen Kleinformen, an ein periodisch trockenes Klima gebunden; also in der Regenzeit Durchfeuchtung und starke chemische Verwitterung, in der Trockenzeit Entfernung des gelockerten Materials durch den Wind. Das Wasser der Pfannen besteht je nach der Durchlässigkeit des Bodens mehr aus Regenwasser oder mehr aus Grundwasser. „Ist der Boden der Pfanne undurchlässig, so daß das Wasser nur durch Verdunstung aufgezehrt wird, so kann sie, wenn sie gut gefüllt war, monatelang überschwemmt sein.“ „Ist der Boden durchlässig, so verliert die Pfanne das Wasser in wenig Stunden oder Tagen“ (p.30). Doch tritt das Grundwasser dann vielfach als Grundwasserteich oder dauernder Grundwassersee zutage oder ist in wenigen Metern Tiefe zu ergraben (p.34). Ist die Auffassung richtig, daß der kapillare Auftrieb und die Verdunstung auch hier bestimmte Stellen, eben die Pfannen, bevorzugt, so könnte man von Fenstern oder Augen des Grundwassers sprechen. — Die Salz- oder Trockenseen von Westaustralien, die ebenfalls noch heute in Um- und Weiterbildung begriffen sind, verdanken ihre Entstehung ähnlichen Bedingungen. (*J. T. Jutson* 1917.) Unzählige seichte, tischebene Wannen, die nach den Regenfällen mehr oder weniger Wasser enthalten, doch gewöhnlich trocken sind, geben diesem Bezirke sein Gepräge. Ihre Größe wechselt von wenigen yards (sog. Tonpfannen) bis zu mehreren Meilen in Länge und Breite. Sie liegen entweder isoliert oder

zu Gruppen aneinandergereiht, enge flußartige Kanäle setzen die Seen oft nach verschiedenen Richtungen hin fort, ohne jedoch unbedingt die Verbindung mit einem anderen See herzustellen. Das Klima ist subarid und zeichnet sich aus durch geringe Veränderlichkeit des Wetters, durch sehr hohe tägliche Temperaturschwankungen (im Winter zuweilen Nachtfröste bei starker Insolation am Tage) und sehr lebhaft Verdunstung. Die Voraussetzung für eine Differenzierung als Summationseffekt von Kleinbewegungen ist also auch hier gegeben, — „The evaporation is so great that the lakes rapidly dry up and remain so for most of the year.“ Ein Teil des Wassers versickert; der Grundwasserspiegel liegt dicht unter der Oberfläche. Die Exsudation ist sehr stark. — Bei der Verdunstung des Wassers bilden sich Salz- und Gipsniederschläge, die Jahr für Jahr vom Wind weggeblasen werden. (Gipsdünen in der Nähe!) Die Wirksamkeit der Deflation findet (nach der Theorie von Woodward 1897, zit. Ebda.) ihre natürliche Grenze an der vom Grundwasser gespeisten feuchten Bodenschicht. Die Bildung der Seebecken geht noch heute vor sich. Es kommt zu Zerteilungen, Vereinigungen, Anzapfungen und Neubildungen; fast alle Seen sind in langsamer Wanderung begriffen. Man erkennt dies an dem Gegensatz zwischen dem zurückweichenden steilen Erosionsufer und dem weniger steilen Akkumulationsufer, wo der Wind Material anweht. So entstehen die merkwürdigen tischebenen Felsoberflächen, wie sie nach *Lamplugh* (zit. ebda., Diskuss.) auch im Inneren von Südafrika und in Arizona angetroffen werden. „The dry floors of the lakes are abnormally smooth and level. The lakes are in some cases actually rock-floored in parts, especially along their borders, and these rock-floors form ‘billiard table’ surfaces. Other portions are covered with fine detritus“ (some inches high). — Zur Systematik der „Wannen und Seen“ vgl. *Philippson* II, 2. 1924, p. 318ff.

g) Übergänge.

Zwischen den im vorstehenden aufgeführten Formentypen vermitteln in strenger Gesetzmäßigkeit mannigfache Übergangsformen. Solche Übergangsformen mögen, entsprechend der Bedingungskonstellation, unvermittelt und isoliert auftreten, oder sie mögen im zeitlichen Nacheinander bzw. im räumlichen Nebeneinander als Glied einer nicht nur gedachten, sondern wirklichen ‘Formenreihe’ auftreten. Diese ‘Formenreihen’, durch die *Davissche* Zyklentheorie in ein ganz falsches Licht gerückt, sind sehr verschieden zu bewerten. Keinesfalls aber sind

sie jener Zwangsläufigkeit unterstellt, die wir bei den biologischen Entwicklungsreihen feststellen müssen. Ihnen am verwandtesten sind noch die Formenreihen, in denen sich die fortschreitende Ausbildung einer Form im zeitlichen Nacheinander oder räumlichen Nebeneinander vollzieht, von der unvollkommenen instabilen Anfangsform bis zur 'stationären' und stabilen Endform. Dieser Vorgang als solcher ist nicht ohne weiteres umkehrbar (irreversibel), und doch läßt sich, wie ein Vergleich der Phänomene ergibt, nicht sagen, daß die eine Form jeweils das Anfangsstadium, die andere das Endstadium verkörpere. Soweit die Formenreihe auf die allmähliche Verschiebung der Bedingungen oder auf die verschieden starke Mitwirkung der Schwerkraft (Neigungswinkel!) bei dem Differenzierungsprozesse zurückgeht, ist sie beliebig umkehrbar und einschränkbar.

1. Fassen wir diesen letzteren Fall zunächst ins Auge, so erkennen wir, daß die Glieder der Formenreihe hier nur Modifikationen derselben Erscheinung bei verschiedenen Gefällsverhältnissen darstellen. Wir sehen z. B., wie die für das ebene Gelände charakteristischen Formen des Strukturbodens auf Gehängen infolge der Verschiebung des Wanderschuttes verzerrt und zerrissen werden, wie die Steinringe und -netze sich zu Steinstreifen auseinanderziehen. Dieselben Kräfte, die auf horizontalem Boden den Detritus sortieren, sind auch auf dem geneigten Boden wirksam, doch ist hier die Schwerkraft als weiterer formbestimmender Faktor hinzutreten. Für die Hohlformen der Kleinverwitterung in Kalken und Dolomiten gilt im wesentlichen das gleiche. Sehr steile Kalkwände wittern glatt ab, weniger steile zeigen Systeme paralleler und gestreckter Rinnen, mäßig geneigte ein Gewirr sich verzweigender Furchen, horizontale Platten zeigen Schüsseln, Becken und Wannen. „Auf sanftgeneigten Schichtenflächen erreichen die Karren ... den höchsten Grad der Wildheit. Von regelmäßigen Rinnensystemen oder Spalten, die den Klüften folgen, ist öfters nichts mehr zu sehen. Es bleibt ein regelloses Gewirr von anastomosierenden, äußerst unregelmäßigen Rinnen und Löchern von beträchtlicher Tiefe, und die Rippen lösen sich bei geringer Böschung der Oberfläche in Zapfen auf. Lose liegende Karrenblöcke sind häufig.“ (*Heim-Arbenz* 1912.) Nicht selten werden karrenähnliche Verbindungslinien zwischen den Wannen angetroffen (*P. Keßler* 1921), oder Wasserrisse und Trockentäler, die mit Dolinen vergesellschaftet sind und in diesen enden (*Grund* 1910). Neben dem Neigungswinkel kann jedoch auch die Durchlässigkeit und die Art der Zerklüftung des Bodens, die mitgebrachte kinetische Energie des Wassers, der Grad der Pflanzenbedeckung u. a. (*Hassert* 1899) für die entstehende Form bestimmend sein. In dem

abflußarmen Gebiet von Deutsch-SW-Afrika fand *F. Jäger* (1922 p.25) „alle Übergänge von Kalkpfannen zu Kalkflüssen“. Viele Pfannen sind langgestreckt in der Richtung der allgemeinen Geländeneigung, manche haben Krümmungen wie ein Flußlauf. Zuweilen findet man verkalkte Flußbetten, ganz von der Beschaffenheit der Kalkpfannen, in deren Kalktuff die Pfannenkrater hintereinandergereiht sind wie Perlen einer Kette. — Die gleiche Formenreihe stellte *H. Crammer* (1905) fest an Hand eines großartigen Experimentes, das die Natur selbst in einigen Alpentälern Tirols angestellt hatte. Auf den beiderseitigen Hängen lag eine Decke dichteren und mehr oder weniger verharschten Schnees, der von einer Hülle von Neuschnee bedeckt war. Auf diesen Neuschnee hatte es geregnet, das einsickernde Regenwasser hatte sich an der Grenze beider Schneelagen gesammelt und war dann in einzelnen Strängen, den Gefällslinien folgend, über die Oberfläche des alten Schnees herabgerieselst. Über den Wassersträngen hatte sich der Jungschnee gesetzt, was auf der Oberfläche der Schneedecke durch die Bildung von Furchen zum Ausdruck kam. „Auf steilen Hängen entstanden gerade, auf weniger steilen geschlängelte und auf sehr wenig geneigten Schneeflächen stark gewundene Furchen.“ Letztere endigten nach kurzen Laufstrecken in kleinen, mulden- bis trichterförmigen Grübchen, die sich durch Nachsacken des Neuschnees über Versickerungslöchern bildeten. In einigen Fällen „entstand in der gewundenen Furche eine ganze Reihe von Grübchen“. Auf ganz horizontalen Flächen sammelte sich das Wasser „an unzähligen Stellen in den Vertiefungen des Harsches, bis es sich durch diesen Wege in die Tiefe gebahnt hatte. Darum fehlten auf der Talsohle die Furchen vollständig, und an ihrer Stelle waren da zahllose Grübchen“, „so daß die Fläche wie blatternarbig aussah“. „Am klarsten trat die Beziehung zwischen der Neigung des Gehänges und dem Verlauf der Furchen hervor, wo sich die Neigung plötzlich stark änderte. Genau an dieser Stelle gingen die geraden Furchen in gewundene über oder umgekehrt, je nachdem das untere Gefälle flach oder steil war.“ — Wir sehen also auch hier wieder, daß es zur Erklärung der gewundenen, der anastomosierenden, der sich punktiert auflösenden usw. Zwischenformen einer Zuhilfenahme besonderer 'Störungen', lokaler 'Unebenheiten' usw. keinesfalls bedarf, daß sie derselben einfachen Gesetzmäßigkeit gehorchen wie die am Anfang bzw. Schluß der Formenreihe stehenden geradlinigen Furchen und kreisförmigen Grübchen, auch wenn sie unseren subjektiven, an Gerade und Kreis orientierten Vorstellungen von formaler 'Regelmäßigkeit' nicht ganz entsprechen wollen.

2. Auch sonst schaffen kontinuierliche Veränderungen der Bedingungskonstellation im zeitlichen Nacheinander oder räumlichen Nebeneinander gelegentlich Formenreihen. Bei den Zonenbildungen in kolloidalen Medien nimmt die Konzentration (und damit auch die Diffusionsgeschwindigkeit) des diffundierenden Mediums vom Ausbreitungszentrum nach der Peripherie hin allmählich ab. Die unmittelbare Umgebung des Zentrums wird oft lediglich infolge der überstarken Konzentration noch einen strukturlosen Niederschlag zeigen (*H. P. Möller* 1921 p.135), was für die Beurteilung des unten zu besprechenden 'Anlauffeldes' oder 'Startraumes' wichtig sein kann. Der Beginn der Zonenbildung ist feinstreifig. Die zarten homogenen Streifen zeichnen sich durch Anastomosen aus. Mit der Entfernung vom Ausbreitungszentrum wächst dann Breite und Abstand der Zonen. Allmählich macht sich eine feine Körnelung bemerkbar. Die Ränder werden undeutlich und verwaschen, namentlich der dem Ausbreitungszentrum abgewandte Rand (Polarität!), während der Zwischenraum schon nicht mehr ganz frei von Niederschlagspartikelchen ist. „Die Zonen werden immer grobkörniger und in der Farbe blasser; langsam geht die Bänderung in einen zonenlosen, gleichmäßig von groben Körnern erfüllten Niederschlag über, der sich zunehmend lichtet, bis sich keine ausgefällte Substanz mehr nachweisen läßt.“ (*H. P. Möller* 1921 p.103 u.145.) Jedes einzelne Glied dieser Formenreihe tritt auch getrennt für sich auf: der strukturlose Niederschlag, dann die rhythmische Fällung, bei der die Materie wenigstens innerhalb einer Linie, Schicht oder Schale zusammenhängt, und die konkretionäre Fällung, bei der die gröberen Partikel sich entweder noch in Form einzelner Lagen anhäufen (z. B. das lagenförmige Vorkommen von Feuersteinknollen in der weißen Kreide, entstanden aus gleichmäßig verteilter Kieselsäure) oder bereits mehr oder weniger gleichmäßig in der ganzen Masse verteilt sind. (*Liese gang* 1913 p.122f.) Auch hier liegt durchaus kein Anlaß vor, der zonalen als der 'normalen' Fällungsart gegenüber der auf 'Störungen' beruhenden konkretionären Fällungsart einen besonderen Rang einzuräumen, wie es *Liese gang* (a.a.O.) tut. Ebensowenig werden für die anastomosierenden Bildungen besondere Störungen oder Komplikationen verantwortlich zu machen sein, wie *E. Küster* (1913 p.45) annimmt. Auch die Rippen der Rippelmarkensysteme sieht man bald langgestreckt in auffallender Parallelität getrennt dahinlaufen, bald schwach anastomosieren, bald sich netzartig untereinander verbinden, kleine, mehr oder weniger kurze, oft muschelförmige Mulden zwischen sich freilassend. Die Reihendünen bieten dasselbe Bild, nur in einen größeren Maßstab übersetzt („like huge ripple systems“, *Free*

1911 p.64); auch ihre Rippen zeigen zuweilen einen schlangentartig gewundenen Verlauf, bilden Ausläufer, und vereinigen sich mittelst Querausläufer. — Lassen wir den Diffusionsvorgang nicht mehr in einer Ebene verlaufen, sondern nötigen wir, mit *E. Küster* (1913 p.37ff.), der Gelatine die Form eines Hohlzylinders auf, so haben wir eine entsprechende Mannigfaltigkeit der Formen zu erwarten: unverbundene, regelmäßig übereinanderliegende Ringe, durch schraubenartige Übergänge miteinander verbundene Ringe, regelmäßige Schrauben oder Spiralen, sich gabelnde, miteinander anastomosierende und netzartige Strukturen bildende Schraubenbänder, usw.

3. Die zunehmende Breite der Zonen nach der Peripherie hin, die sich gleichzeitig in der zunehmenden Grobkörnigkeit der Partikeln äußerte, ließ sich bei den *Liesegang*schen Ringen auf die nach der Peripherie hin abnehmende Diffusionsgeschwindigkeit zurückführen. Diese Erscheinung wird nun von einem weiteren Vorgang überlagert; ihr Zusammenwirken liefert die bewußte Formenreihe. Wir haben vom Zentrum zur Peripherie hin ein Gefälle von Substanzreichtum zu Substanzarmut. Dieses führt zu radialen Zerreißen der Substanz in den peripheren Zonen. Diese Zerreißen wird befördert durch eine zunehmend flache Ausbreitung der Substanz über einer scharfen formalen und materialen Unstetigkeitsfläche. Von hier aus empfängt auch der eigenartige Barchantypus z. T. seine richtige Beurteilung. (Vgl. Kap. XVIII u. Kap. I: „Der Barchantypus“!) Barchane sind den Randgebieten der großen Sandfelder der Erde eigentümlich; sie fehlen „in den mit einer mächtigen einheitlichen Schicht lockeren Sandes bedeckten Wüsten“. (*Sokolow* 1894 p.172.) Vom Rande des turkmenischen Sandmeeres, das von Norden gegen die Oase von Buchara heranschreitet, berichtet *J. Walther* (1912 p.261 u.264): „Der feste, graue Tonboden wird überlagert von lockerem, gelbem Flugsand; das Sandgebiet endet aber nicht etwa in Gestalt eines einheitlichen Walles, sondern löst sich an seinem Rande in einzelne Sandhaufen auf.“ Am Rande selbst „herrschen die Einzelbarchane vor. Je mehr man aber in die innere Region der Sandwüste eindringt, desto zahlreicher werden die reihenförmig verschmolzenen Dünenkämme...“ Es dürfte hiernach einleuchten, daß jeder Erklärungsversuch, der die Barchanform gedanklich aus dem Verbande ihrer Umgebung herauslöst, von vorneherein zum Scheitern verurteilt ist. Das Phänomen der randlichen Zerfransung, Verkrümelung, Auflösung der einheitlichen Masse in isolierte Gebilde, ist auch sonst anzutreffen. *J. Früh* (1915 p.425) fand die peripherischen Partien der Büßerschneefelder „am reifsten entwickelt“. Hierunter versteht er die Umformung der Kämme zu

spitzzahnigen Sägen, dann zu Solitärgebilden von 1 bis 6 m Höhe, die nur noch durch niedrige Verbindungsstücke miteinander in Verbindung stehen. Dasselbe beobachtete *F. Kühn* (Pet.Mitt.1913.II.p.136): „Am Rande standen die einzelnen Figuren isoliert auf der Schuttunterlage, so daß man bequem zwischen ihnen einhergehen konnte, aber schon einige Meter weiter hinein standen sie so eng beisammen, daß der Boden völlig verschwand und das Ganze eine Masse bildete, indem die Figuren nur durch schmale, tiefe Spalten getrennt waren, an der Basis aber zusammenhingen.“

4. Zwei weitere Arten von Formenreihen fordern ihre begriffliche Behandlung getrennt von den bisher genannten: Die Formenreihe von der unausgebildeten zur voll ausgebildeten Form, und die Formenreihe von der niederen Stabilitätsform zur höheren Stabilitätsform. Es lassen sich dabei zwei Leitsätze aufstellen: 1. Wachstum und Differenzierung brauchen Zeit, 2. Wachstum und Differenzierung brauchen Raum. Der Sinn dieser Sätze wird sogleich klar werden. Betrachten wir z. B. ein Wellenbild, so wird die Größe und Form der Welle an einer bestimmten Stelle nicht nur von den physischen Eigenschaften der beiden Medien und ihrer relativen Geschwindigkeit an dieser Stelle, sondern zugleich von dem Ausbildungsgrade der betr. Welle abhängen, der sich nach der Länge der Zeit und des Raumes richtet, die die Welle zu ihrer Ausbildung bereits durchgemessen hat. Und zwar trifft dies nicht nur zu für die Gravitationswellen des Wassers, die für unsere Betrachtungen ausscheiden, sondern auch für die echten Reibungswellen und die übrigen Differenzierungsphänomene.

So stellt die Barchanform bereits eine Stabilitätsform dar, wenn auch eine niedere. Eine Formenreihe führt zu ihr hin: über ein unregelmäßiges Gerinnen und Zusammenballen zur Schildform, zur Hörnerausbildung und zur Herausbildung von Luv- und Leeang. (Sog. 'dynamischer Verlauf'.) Diese ersten Stabilitätsformen zeigen sich bereits auffallend spröde gegen nachträgliche Veränderungen der Bedingungskonstellation; wie sie einmal gewachsen sind, so suchen sie zu bleiben. *W. S. Barclay* (1917) sah die Ausbildungsstadien von Barchanen nebeneinanderliegen: „On the western border of the [Peruvian] desert the sand remains largely inchoate, but after about 15 or 20 miles dunes [d. i.: Barchane] begin to appear.“ Sie wachsen dann an Zahl und bilden förmliche Schlachtreihen. „Once formed the dunes take their typical halfmoon-shape and proceed in stately sequence south-east across the Pampa.“ — Doch wohnt einer so differenzierten Sandfläche im allgemeinen bereits die Tendenz inne, sich zu einer noch höheren Stabilitätsform emporzudifferenzieren. Die 'vorläufige' Besetzung durch

Barchane geht allmählich über in eine 'endgültige' Besetzung durch reihenweis vergesellschaftete Barchane oder regelrechte Reihendünen. Eine logische Notwendigkeit hierzu liegt nicht vor, denn die vielen kleinen Barchane können ebensogut zu wenig großen Barchanen verschmelzen, was ja auch vorkommt. Die Bewegungen und Materialumlagerungen bei den Reihendünen sind unvergleichlich langsamer als die bei den Barchanen, und erst recht bei den kleinen Barchanen (*Sokolow* 1894 p.270). So treffen wir denn dort, wo die Dünenbildung bereits vor geraumer Zeit begonnen hat, vorzugsweise Reihendünen an (Ebda. p.266 f.). An Küsten erscheint die Reihenbildung durch äußere Umstände begünstigt: „Die durch die Sandwälle bedingte zonale Anordnung der höchsten Punkte des Strandestellenweise schon die ersten Anfänge der Dünenbildung, sich in Reihen zu ordnen.“ (*Th. Otto* 1913 p.443.) — Die Ausbildung der Rippelmarken und Reibungswellen auf Wasser vollzieht sich in derselben Richtung. Zunächst bilden sich viele kleine netzartig verästelte Rippeln, deren Maschen sich aber bereits deutlich senkrecht zur Bewegungsrichtung einstellen. Die Weiterbildung liefert dann vor allem eine erhöhte Regelmäßigkeit in der Seitenerstreckung der Rippelkämme. Auch die Reibungswellen auf Wasser besitzen am Orte ihres Einsetzens noch keine bedeutende Länge, die Kräuselungen sind staffelartig oder anastomosenartig gegeneinander versetzt, und ihre Kämme sind schwach gebogen. Je weiter leewärts, umso größer und umso 'ausgebildeter' und 'stabiler' werden die Formen, besonders die Längserstreckung der Kämme wird ausgedehnter und geradliniger; Wellen höherer Größenordnung bilden sich. (*Krümmel* II.1911.p.57f.) — Der Differenzierung geht zeitlich und räumlich voraus ein strukturloses, undifferenziertes Stadium, das wir, soweit es räumlich in die Erscheinung tritt, 'Anlauffeld' oder 'Startraum' nennen wollen; zeitlich kommt es in der Länge der Zeit zum Ausdruck, die bis zu dem ersten tastenden Einsetzen der Differenzierung zu verstreichen pflegt. Bei ablandigem Wind setzt die Kräuselbildung auf Wasserflächen erst in einer gewissen Entfernung vom Ufer ein, ebenso bei den Rippelmarken auf Sand usw. und den *Liesegang*schen Ringen. (Genaue Angaben über die wechselnde Ausdehnung des Anlauffeldes macht *H. P. Möller* 1921 p.135ff.)

XXI.

Die kausalanalytische Methode.

„Ins Innere der Natur dringt Beobachtung und Zergliederung der Erscheinungen, und man kann nicht wissen, wie weit dieses mit der Zeit gehen werde.“

Wir können diesen Ausspruch *Kants* (Kritik d. r. Vernunft) zum Leitgedanken der kausalanalytischen Methode erheben. Die Kausalanalyse liegt im beständigen Kampf mit jener deduktiven Einstellung, die auch in der Morphologie immer mehr Anhänger zu finden scheint. „Statt aus der Natur zu lesen, tragen wir unsere vorgefaßten Meinungen in sie hinein, spannen sie in ein fertiges Schema, und wo es mit dem Prokrustesbett nicht stimmen will, da wird mit Hilfhypothesen nachgeholfen. Das ist der sicherste Weg, sich über alte Irrtümer hinwegzusetzen und einen Fortschritt in der Erkenntnis zu hindern.“ (*R. Grödmann* 1917 p.215.) Man glaubt, das 'Erklären' einer Erscheinung könne nur darin bestehen, daß man sie in schon bekannte Erfahrungs- und Begriffszusammenhänge einbezieht, sie als Beleg eines bekannten physikalischen Gesetzes oder unter dem Bilde alltäglicher gewohnter Vorgänge schaut¹⁾. Man vergißt dabei leicht, daß die echte 'Erklärung' zunächst die Erscheinung 'aufzuklären', d. h. sie in ihrer Eigenart zu begreifen sucht. Die unausbleibliche Nebenwirkung eines solchen Verfahrens ist, daß man selbst alltägliche und unzählige Male beachtete und verwertete Erscheinungen „einfach darum nicht oder nur im Vorübergehen als Problem behandelt, weil unsere Kenntnis der Gegenwart nichts zur Lösung Geeignetes an die Hand gibt“. (*M. Semper* 1914 p.17.) Infolgedessen ist die moderne Morphologie von einer auffallenden Problemlosigkeit. Zu allen Erscheinungen, die in vorliegender Arbeit behandelt werden, liefert sie Erklärungen und 'Theorien', die den Eindruck des Endgültigen und befriedigend Gelösten machen. Nur selten stellt sie eine dieser Erscheinungen als vorläufig unerklärt hin (Mäandertheorie!). Ließe man die Probleme mehr spontan aus der unvoreingenommenen Beobachtung und Analyse

¹⁾ „Wenn der Davisianer in die Landschaft hinauskommt oder die Karte betrachtet, spricht er beim ersten Blick ein genetisches Urteil aus, weil er die Formen ja nur unter die vorhandenen Begriffe subsumiert; von einer unvoreingenommenen Feststellung der Eigenschaften und Merkmale ist nicht die Rede.“ (*Hettner* 1921p.208.)

der Phänomene heraus erwachsen, so wäre die wirkliche Natur unserer rhythmischen Phänomene schon längst erkannt worden. Vorliegende Arbeit hat deshalb nicht nur den Zweck, eine neue Theorie zu bieten, sondern die betreffenden Erscheinungen z. T. überhaupt erst einmal als Probleme erscheinen zu lassen.

Für diesen Zweck konnte uns die mathematische Formelsprache noch keine Dienste leisten. Denn mathematische Formeln bedürfen, „um richtig und brauchbar zu sein, offenbar der Voraussetzung, daß dieser Vorgang einwandfrei erkannt ist. Solange eine derartige Erkenntnis nicht vollständig gelingt und experimentell umfassend bestätigt wird, haben schärfere mathematische Formulierungsversuche nur einen zweifelhaften Wert“. „Die Gleichungen, Operationen und Beweise der Mathematik als einer rein formalen Wissenschaft können nie etwas anderes ergeben, als was in die Voraussetzungen hineingearbeitet wurde.“ (*Rümelin* 1913 p.103 u.p.4.) Die bisher vorliegenden Versuche zu einer mathematischen Behandlung reizen wenig zur Nachahmung. Wenn Goethe eine so schroffe Haltung gegen die Mathematik als Hilfswissenschaft der Physik einnimmt, so spricht aus ihr ebenfalls die Enttäuschung des Morphologen. Denn „in der Morphologie ist es ganz unmöglich, Gesetze anders als durch Anschauung und Begriffsbildung aufzustellen“. (*A. Hansen* 1919.) Dies ist aber der Weg der Kausalanalyse.

Dagegen können die Beziehungen der allgemeinen Morphologie zur Physik nicht eng genug sein. Die allgemeine Morphologie ist nicht 'angewandte Physik', wohl aber ein von der physikalischen Wissenschaft bisher vernachlässigtes Teilgebiet der Physik mit besonderen, nur ihr eigentümlichen Problemen. Eine physikalische Wahrheit anzustreben, wird stets das Ziel des Morphologen sein. Beide Wissenschaften sind 'Gesetzeswissenschaften': ihr Ziel ist die Auffindung allgemeiner Gesetzmäßigkeiten, nicht die Erforschung einmaliger Wirklichkeiten. Das einzelne gegebene Beobachtungsobjekt hat niemals als solches wissenschaftlichen Wert, es gibt nur das Material her für die denkende Verarbeitung, die Herausschälung einer allgemeinen Erkenntnis. Eine 'Allgemeine Morphologie' in diesem strengen methodischen Sinne gibt es bisher noch nicht. Vorliegende Arbeit stellt einen Versuch in dieser Richtung dar. Es sei auf die Annäherung hingewiesen, die in ganz ähnlicher Weise zwischen der Biomorphologie und der Physiologie bereits stattgefunden hat. *Verworn* (*Handwbt. d. Nat.* 7.1912 p.873) erklärt: „Wir wissen heute, daß die Formbildung, wie sie sich in der Entwicklung äußert, nur ein Ausdruck des Geschehens in der lebendigen Substanz ist wie der Stoffwechsel und die Energieumsetzungen, und daß sie sich von den

beiden letzteren Seiten des Lebensvorganges überhaupt nicht trennen läßt.“ Wie die Schmetterlingsform einer Gasflamme oder die kunstvolle Wasserfigur eines Springbrunnens sind auch die organischen Formen „nur der Ausdruck eines ganz bestimmten Komplexes von Vorgängen“. *Verworn* bezeichnet deshalb die Morphologie, soweit sie die Formbildung behandelt, als „einen Teil der Physiologie“. *Verworn* scheint sich jedoch der Tatsache, daß es spezifisch morphologische Probleme gibt, nicht genügend bewußt geworden zu sein.

Die allgemeine Morphologie wird sich als Zweig der Physik unbedingt auch die altbewährten physikalischen Methoden aneignen müssen, die sich mit denen der Kausalanalyse im wesentlichen decken. Der Morphologe wird sein nächstes Ziel darin sehen, einen Fall richtig zu isolieren und in sich richtig aufzufassen. Er wird die Gelegenheiten in der Natur aufsuchen, wo er das Phänomen 'in Reinkultur' ohne Mitwirkung störender Komplikationen, studieren kann, oder wird sich diese günstigen einfachen und übersichtlichen Verhältnisse im Experiment selbst zu schaffen suchen.

Er wird sich namentlich dem Studium der Kleinformen widmen und die so gewonnenen Erkenntnisse für die größeren Gebilde nutzbar machen. Denn eine wesentliche Eigenschaft der morphologischen Gebilde ist ihre 'Transponierbarkeit'. In Großform und Kleinform wirkt dasselbe Gesetz; die absoluten Maßstäbe spielen keine Rolle. Die Anwendungsmöglichkeit des Experimentes ist deshalb auch unbeschränkt. Der Arbeitsplan, den *Cornish* (1897 p.279) sich für seine Untersuchung der Rippelmarken- und Dünenbildung wählte, bestand darin, „zuerst das Verhalten des geblasenen Sandes in handlichem Maßstabe (upon a manageable scale) zu untersuchen und dann die Ergebnisse zur Erhellung der größeren Phänomene zu verwenden“.

Es kann nicht Aufgabe des experimentierenden Morphologen sein, die komplizierten Erscheinungen der Natur möglichst getreu im Experimente nachzuahmen, sondern er wird von genau bekannten und zunächst möglichst einfachen Bedingungen ausgehen. Nur so wird durch planmäßige Entfernung aller Störungen dem Gesetze unbedingte Geltung verschafft und dieses zur Reindarstellung gebracht. (So z. B. *Th. A. Jaggar* 1908 p.297.) Die Fallgesetze sind wohl deshalb relativ so früh erkannt worden, weil die Gravitation zu den von Natur bestisolierten Erscheinungen gehört und dementsprechend Formel und Erscheinung genau übereinstimmen. (*Frost* I. 1910. p.181.) Nur von einem planmäßig und mit Überlegung geleiteten Experiment können befriedigende Antworten erwartet werden. Was die Analyse der Naturerscheinung selbst nicht vermag, das vermag die experimentelle Untersuchung der Abhängigkeit von wechselnden Bedin-

gungen durch methodische Variation dieser Bedingungen. So können z. B. im Flußbaulaboratorium „nacheinander für sich die Wirkungen von Änderungen des Gefälles, der Wassertiefe, der Bettform und -größe, der Abflußmenge und der Geschiebeform und -größe, hydraulischer Größen, erforscht werden“. (*Schober* 1915 p.4.) Reine Deduktion würde hier unter Umständen zu ganz abwegigen Ergebnissen führen. „I think all questions connected with the movement of sand by air or water should be investigated experimentally when possible; because the movements are so complex and the results so unlooked (!) for sometimes, that one is liable to arrive at conclusions which are utterly wrong unless they are put to the test of experiment.“ (*Owens* in der Diskuss. zu *King* 1916.) Wir halten es deshalb mit *Karl Sapper* (Das Experiment in der physikalischen Geographie. Pet.Mitt.1913.II.p.1) für „im hohen Grade wünschenswert, daß an unseren Universitäten und an anderen Lehranstalten besondere Laboratorien für physikalische Geographie eingerichtet werden, in denen gewisse Vorgänge der Erdoberfläche, wie etwa Bodenbewegungen, Dünenbildung ... u. a. ... experimentell nachgeahmt würden, um den Mechanismus der Erscheinungen eingehend studieren zu können ...“ Am Schlusse seines Buches „Das Experiment in der Geologie“ (1912 p.108) tut *W. Paulcke* den verheißungsvollen Ausspruch: „Die Experimentalgeologie ist berufen, ein wichtiger Zweig der geologischen Forschungsarbeit zu werden, und ihre Neubelebung, wie ihr systematischer Ausbau, ist dringend zu wünschen.“ — Der Wunsch *Sappers* und *Paulckes* ist nur zu berechtigt. Die Physik ist ohne Experiment schon nicht mehr denkbar. In der Morphologie werden aber Stöße von Aufsätzen über die Flußmäander geschrieben, ohne daß auch nur einmal der Versuch unternommen worden wäre, einen echten Mäander im Experiment 'synthetisch' zu gewinnen.

Zu der experimentellen Prüfung tritt als wertvolle Ergänzung die vergleichende Beobachtung. Sie kann dazu dienen, unter verschiedenen Annahmen eine Entscheidung zu treffen. Die auf verschiedenen Gebieten gewonnenen Erkenntnisse stützen sich gegenseitig. So ist auch vorliegende Arbeit kein aneinandergesetztes Mosaik, sondern ein organisches Ganzes, dessen einzelne Glieder sich gegenseitig ergänzen und rechtfertigen. Durch die Methode vergleichender Beobachtung wird das Gesetz planmäßig eingekreist, wird es wie ein gejagtes Wild von allen Seiten umstellt. — „Besser bekannte verknüpfen sich mit schwerer deutbaren Gebieten und helfen diese aufhellen.“ (*Schwinner* 1919/20.)²⁾ Aber wohl gemerkt, nicht in der Weise

²⁾ So betreibt Oskar Walzel zwischen Literatur- und Kunstwissenschaft „wechselseitige Erhellung“.

des so beliebten 'Illustrierens' durch 'analoge Beispiele' und mehr oder weniger poetische, verschwommene und irreführende Vergleiche! Eine Betrachtung kann nur fruchtbar sein, wenn sie uns die Erscheinungen zeigt „im Lichte klarer physikalischer Bilder, nicht bloß im schwankenden Zwielficht geographischer Homologien“. (*Schwinner* a.a.O.)

XXII.

Das Kausalproblem.

Zusammenfassung.

Die Hindernisse, die einer richtigen Beurteilung unserer rhythmischen Phänomene im Wege stehen, reichen hinab bis in die letzten Tiefen der elementaren Kategorienbildung. Eine planmäßige kritische Sondierung des theoretischen Untergrundes und eine feste naturphilosophische Fundierung erscheint deshalb unerlässlich. Überlegungen dieser Art münden aber stets in eine Auseinandersetzung mit dem sog. Kausalproblem.

Nicht der 'Idee' der Kausalität, d. h. der Idee einer alles beherrschenden Weltordnung, des streng gesetzmäßigen Ablaufs alles Geschehens (*W. Frost* 1910 p.134), sondern dem empirischen 'Begriffe' der Kausalität gilt unsere Kritik. Es ist das Verdienst von *W. Frost* (1910 p.178), gezeigt zu haben, daß es keine 'absolute Kausalität' im Sinne eines 'allgemeinen Gestaltungsprinzips' gibt. Soweit der übliche Kausalbegriff den Anspruch erhebt, etwas über eine ganz bestimmte konkrete und besondere Beziehung zwischen Vorgängen auszusagen, müssen wir ihn ablehnen. Da der empirische 'Begriff' der Kausalität auf Grund der Verallgemeinerung eines bestimmten mechanischen Vorgangstypus gewonnen ist, sind wir berechtigt, auf Grund der Feststellung andersgearteter Vorgangstypen seine Allgemeingültigkeit zu bestreiten und auf die Notwendigkeit hinzuweisen, die jeweilige Form der 'Kausalität' durch Analyse der empirischen Sachverhalte in jedem einzelnen Falle besonders zu ermitteln. In vorliegender Arbeit wird dieser Versuch unternommen. Er ergibt die völlige Unvereinbarkeit des vorgefundenen Geschehens mit dem zur alleinigen Norm erhobenen mechanischen 'Vorgangstypus' der Bewegung von starren Körpern und der Bewegungsübertragung durch Druck und Stoß. Seine bevorzugte Stellung verdankt dieser Vorgangstypus seiner Häufigkeit, seiner Einfachheit und seiner fast

unbegrenzten Schematisierbarkeit: Die Bewegungen sind einsinnig-lineare Progressionen im Raume. Das räumliche Verhältnis von 'Vorausgang' und 'Folge' läßt sich verwenden als zeitliches Folgeverhältnis. Die Gesamtheit der Progressionen bildet zusammen einen einheitlich fortschreitenden 'Strom des Geschehens'. Die Verzeitlichung des Raumes ist vollzogen. Auch der wirkliche 'Fluß' wird so gedeutet als geometrische Gruppierung lediglich vorwärts gerichteter Bewegungen kleinster Massenteilchen. Daß diese Auffassung unzutreffend ist, konnten wir zeigen¹⁾. Als weitere Besonderheit des mechanischen Vorgangstypus kommt hinzu: Ursache und Wirkung sind räumlich scharf begrenzte Vorgänge, die sich besonders auch voneinander scharf abheben. 'Bewegung' und 'bewegter Gegenstand', die in unserem 'dynamischen Moment' noch eine unlösliche Einheit bilden, lassen sich hier bequem sondern: Der Gegenstand bleibt bei der Bewegung unverändert, nur seine Beziehungen wechseln. Die künstliche Zerspaltung in 'Ursache' und 'Wirkung' ist auf unsere Phänomene nicht anwendbar. Jedes 'Moment' ist hier Ursache und Wirkung zugleich. Ursache und Wirkung gehen hier (realiter und begrifflich) zusammen auf in dem Vorgange selbst. Die mechanische Kategorienbildung geht bei der Festlegung von 'Ursache' und 'Wirkung' eines Vorganges aus von den Geschehensdiskontinuitäten. Diesseits ist für sie das (aktive) Ursache-Medium, jenseits das (passive) Wirkungs-Medium. Es besteht eine Neigung, von der Diskontinuität ausgehend 'Ursache' und 'Wirkung' zu verdinglichen. Die Anwendung dieses Verfahrens ist mit der undinglich-fließenden Natur unserer Phänomene völlig unvereinbar; ebenso die von der Diskontinuität aus vorgenommene Scheidung in eine 'aktive' und eine 'passive' Seite des Geschehens. Die mechanistische Auffassung läßt

¹⁾ „Stößt das fließende Wasser auf eine Felswand, so prallt jeder einzelne Wasserfaden ab wie die Billardkugel an der Wand des Tisches ...“ (J. Rein 1896p.129.) Man stellt den Fließvorgang des mäandrierenden Flusses in Parallele zu der kontinuierlichen Sukzession von einem bestimmten Punkte abgelassener, in einer geneigten Rinne pendelnd abrollender Kugeln. Die einzelnen Mäanderbögen schließen sich aneinander zu einer fortlaufenden Kausalkette. Der nächstfolgende Mäander ist jeweils die 'Wirkung' des vorhergehenden. — Fliegt ein Stein ins Wasser und verbreiten sich von der Aufschlagstelle aus Stoßwellen, so behaupten wir allerdings mit Recht, daß die Ursache der Wirkung (räumlich) 'vorangehe', bzw. daß diese jener (räumlich) 'nachfolge'. Der Flußlauf bildet jedoch, wie wir bereits an anderer Stelle zeigten, als stabile hydrodynamische Strömungsform, eine Geschehensstruktur von 'Momenten', die sich simultan und gegenseitig, also gewissermaßen richtungslos, 'im Ganzen tragen'. Wird bei einem mäandrierenden Flußlaufe ein Flußbogen infolge natürlichen Durchbruchs oder künstlichen Durchstichs begradigt, so reagiert nicht nur die Flußstrecke unterhalb, sondern auch die oberhalb auf diesen lokalen Eingriff mit entsprechenden Verschiebungen; usw.

z. B. den 'passiven' Sand vom 'aktiven' Winde zu Dünen geformt werden. Wir lernten jedoch ganz im Gegenteil die Dünenform als eine Stabilitätsform des Sandes auffassen, der die Luftbewegung sich mehr oder weniger passiv anbequemen muß. Den Ausweg aus diesem Widerspruch fanden wir in einer Scheidung des Geschehens in Aktion und Reaktion, d. h. in 'äußere Ursache' und 'innere Ursache', oder in 'mechanische Ursache' und 'Zweckursache'. Jene stört das Gleichgewicht, diese stellt es wieder her. Unser Interesse ist also vorwiegend den spontanen Reaktionen der Materie auf äußere Einwirkungen hin zugewandt. Ihr Studium wurde bisher unter dem Zwange der mechanistischen Naturauffassung, die nur äußere Ursachen kennt, ungebührlich vernachlässigt. Wir fanden, daß spontane Umgruppierungen großen Bereichs gebunden sind an gestaltete Gesamtprozesse in physikalischen Systemen. Die 'Momente' der dynamischen Strukturen müssen sich gegenseitig in ihrer spezifischen Gruppierung tragen, das physische Material darf nicht nur 'verteilt', nicht nur ein geometrisches Muster selbständiger Teilchen sein. (*Wolff. Köhler.*)²⁾ Die hier entwickelte 'dynamische Naturauffassung' geht zurück auf *Leibniz*. Nach ihm ist die Materie in sich selbst wirkungsfähig. Seine 'Monade' ist eine Vereinigung von leidender und tätiger Kraft, von mechanischer Bedingtheit und zwecksetzender Form. (*E. Wentscher* 1921 p.55 u.67.) Wir unterscheiden hiernach eine passive und eine aktive Seite des Geschehens, d. h. gleichgewichtsstörende, 'beeinträchtigende', äußere Einwirkungen von 'Ursachen' einerseits und zwecksetzende, gleichgewichtschaffende, eigengesetzliche Beantwortungen dieser Einwirkungen andererseits. In der Physik begegnet uns diese Anschauung z. B. in dem *Le Chatelierschen* Gesetze: „Jede Änderung eines physikalischen oder chemischen Gleichgewichtszustandes erzeugt einen Widerstand, der die Änderung rückgängig zu machen sucht.“ Da das formale Kausalgesetz nur über die 'Aktionen', die mechanischen Bedingtheiten, also über die passive Seite des Geschehens etwas auszusagen vermag, bedarf es der Ergänzung durch das 'zwecksetzende' teleologische oder finale Prinzip. *G. Th. Fechner* suchte bereits in seinem System den uralten Gegensatz von Mechanismus und Teleologie zu überwinden. Er wandte sich mit Entschiedenheit gegen die übliche unbegründete Verketterung des teleologischen Prinzips. Erst die Verbindung des formalen Kausalgesetzes mit dem teleologischen Prinzip

²⁾ Der Begriff des 'spontanen' Geschehens ist natürlich nicht im absoluten oder vitalistischen Sinne zu verstehen. Ohne Aktion (Beeinflussung von außen) keine Reaktion. „Es gibt kein solches System, das zu irgendeiner Zeit unter dem ausschließlichen Einflusse seiner eigenen inneren Kräfte stünde.“ (Stallo, zit. J. Petzoldt 1923p.242.)

vollende unseren Begriff von der Gesetzlichkeit im Weltall. Beide unterscheiden sich nur so, daß man „beim Kausalprinzip den Grund, beim teleologischen das Ziel einer und derselben gesetzlichen Auseinanderfolge ins Auge faßt.“ (Einige Ideen p.91.) Das Finalprinzip fragt nicht nach den Ursachen, sondern nach der Richtung und dem Enderfolg alles Geschehens. Es gibt nach *Fechner* einen gemeinsamen Enderfolg alles Geschehens: die Stabilität. Die objektiven Kennzeichen des 'Zwecks' oder 'Ziels' findet *Fechner* also in der Stabilität des betr. Systems. Die Richtung jedes Geschehens zeigt einen Fortschritt zu stabilen Zuständen. Das Prinzip der 'Tendenz zur Stabilität' ist somit das allgemeinste Geschehensgesetz schlechthin. Es zeigt uns alles Geschehen als ein Gerichtetes. (Vgl. *J. Petzoldt* 1923 p.215 u.ö.; zit.ebda.: *A. Lampa* 1915.) Es zeigt uns, daß alle Veränderungsvorgänge in Systemen schließlich zu einem Gleichgewichtszustand, zu relativen Abschlüssen führen. Vielfach zeigt die Richtung des Geschehensablaufs eine Annäherung an ein Maximum oder ein Minimum (irgendein Ausdruck, eine Größe wird 'möglichst groß' oder 'möglichst klein'), „also an Zustände, die durch innerhalb der betreffenden Systeme gelegene Bedingungen nicht mehr über- oder unterschritten werden können, d. h. wieder an stabile Zustände“. So lassen sich unsere 'rhythmischen Phänomene' fassen als Ausdruck einer 'Tendenz zum Minimum innerer Reibung in der gemeinsamen Grenzzone zweier an- oder ineinander vorbeigleitender Medien'. Theoretische Stütze bietet ferner der II. Hauptsatz der Thermodynamik, der ebenfalls die Richtung der natürlichen Geschehnisse charakterisiert. Nach ihm sind alle 'von selbst' verlaufenden Vorgänge irreversibel, d. h. die Entropie des sich verändernden Systems nimmt bei ihnen zu, und sie münden schließlich alle in Gleichgewichtszuständen.

Zur allseitigen Erfassung eines Phänomens genügt jedoch nicht die Anwendung der 'kausalen' und der 'finalen' Betrachtungsweise.

Hinzukommen muß eine eingehende 'Beschreibung' oder 'Bestimmung' des Geschehens durch 'Bestimmungsmittel', namentlich zur Feststellung der 'Grenzbedingungen' eines Elementarvorganges, des Gültigkeitsbereiches eines physikalischen Gesetzes. Zur 'Ursachenforschung' muß die 'Bedingungsforschung' hinzutreten. Die Geographie ist eine solche Bedingungsforschung. Ihr Ziel ist die Aufdeckung funktionaler Beziehungen zwischen den einzelnen Bestimmungsstücken der 'konditionalen Gesamtkonstellation'. (Vgl. *Verworn* 1918.) Die „Wirkungskausalität“ wird auch noch in anderer Hinsicht ergänzt durch eine „Beziehungskausalität“ (*W. Roux*). Die Geographie als Raumwissenschaft verfolgt weniger die einzelnen Geschehensabläufe, als vielmehr „die netzartig verknüpften

gegenseitigen Beeinflussungen“ ungleichartiger Vorgänge, „das korrelative Ineinandergreifen aller Faktoren“. Die „Wechselwirkung“ wird so zum geographischen Kernbegriff. (*E. Sander*, „Rhythmus“ —? *Pet. Mitt.* 1924 p. 262f.)

Das funktionale Beziehungsnetz breitet sich nicht gleichförmig über die Erde hin aus, vielmehr gibt es innerhalb der gesamten Erdoberfläche objektive Gesamtheiten, die als Einheiten hinzunehmen sind. Diese in sich geschlossenen Gebiete endlichen Bereichs mit streng angebbaren und realen Eigengesetzen nennen wir physikalische Systeme oder, mit Betonung ihrer spontanen Struktur, physische Gestalten (*Wolfg. Köhler*). Unsere rhythmischen Phänomene sind solche übersummativ physikalische Gebilde von Gestaltcharakter. Wie und wann selbständige 'Teile' zu geometrischen Mustern, zu summativen Gruppierungen zusammentreten, kann als beliebig gelten; Teile können in die Gruppierung aufgenommen oder von ihr ausgeschlossen werden, ohne daß sich an diesen oder an dem Restgebilde realiter etwas ändert. (Beispiel: ein Schneeball und anderseits eine in Alkohol suspendierte Ölmasse.) Alle Komplizierungen und Kombinationen lassen sich auf diese Weise 'fundieren'. Bilden die 'Teile' dagegen ein physikalisches System, so ist bei gegebener Gesamtbedingung nur eine bestimmte Spontangruppierung möglich und verwirklicht. (*W. Köhler* 1920 p. 58 u. 166.)³⁾ Die physikalischen Systeme sind also keine willkürlichen Zusammenfassungen, die erst unser Denken vornimmt. „Das Gestaltgesetz, dem ein solches Material folgt, und die spezifische Struktur, welche jedesmal gerade diese Gesamtheit objektiv und spontan annimmt, schreiben uns vor, was wir da 'als eines' anerkennen müssen.“ (*W. Köhler* 1920 p. 168; s. a. p. 33ff., p. 155ff., p. 92, p. XVI.) „Der lokale Zustand an keiner Stelle besteht selbständig für sich, und nur im Gesamtgebilde kann er sich halten, wie er ist.“ Die verbreitete Anschauung, daß jede physikalische Erscheinung als die Summe oder allgemeiner Resultante von gleichartigen Partialerscheinungen an Teilen angesehen werden kann, ist also unzutreffend.

³⁾ Vgl. *Rud. Bode*, *Der Rhythmus u. s. Bedeutung f. d. Erziehung.* 1920. p. 9: „Jeder Rhythmus ist eine absolute Ganzheit; wir können willkürlich nichts daran verändern, ohne ihn sofort zu zerstören. Der Takt dagegen baut sich auf aus Elementarteilen, deren Vertauschung nur eine neue Kombination herbeiführt.“ — Die organisch einheitliche, rhythmische Gesamtstruktur des Körpers schafft und regelt als primäre Gegebenheit alle Teilbewegungen, jene ist nicht lediglich eine beliebige 'Zusammenfügung' von diesen. (*Rud. Bode*, *Ausdrucksgymnastik* 1922 p. 17 ff.) Ziel der Ausdrucksgymnastik ist nach *Rud. Bode* die Wiederherstellung der verlorengegangenen bzw. gestörten Einheit des durch die Körperbewegung erzielten muskulären Gesamtbildes, der Einheit des Bewegungsablaufs, der Geschlossenheit des Triebgefühls.

Sie erklärt sich z. T. aus dem Umstande, daß die 'Dinge' unserer Umgebung sich in der Tat — zumeist und wenigstens für unsere passive Alltagserfahrung — gegeneinander summativ verhalten, also nicht in für uns merklichem Maße physikalische Systeme miteinander bilden. (W. Köhler 1920 p.170 u. p.48.) Bei den Erscheinungen der Erdoberfläche drängt sich jedoch der Systemcharakter dem Betrachter geradezu auf. Unsere rhythmischen Phänomene sind wenig 'dinghafter' Natur, geometrische Bewegung selbständiger Teile spielt kaum eine Rolle, den 'Teilen' fehlt fast durchweg jene absolute Starre, die für die 'Teile' der maschinenartigen (mechanischen) Gebilde so bezeichnend ist. Ihr flüssiger oder 'halbflüssiger' Charakter begünstigt vielmehr allerorten die Ausbildung der mannigfachsten Systeme und in sich zusammenhängender Strukturen (Spontangruppierungen).

Damit die entsprechende Gestaltwirkung sich ergibt, müssen die 'Teile' einander funktionell nahe kommen. Wir fanden, daß auch schon eine für unsere Begriffe relativ unvollkommene Annäherung der Teile (z. B. des Sandes, des Bodenflusses usw.) hierzu ausreicht und daß die Gestaltwirkungen sich in gleicher Weise bei großräumigen Erscheinungen zeigen. Es hieße „die Dinge mit allzu menschlichem Maße messen, wollten wir bei unsichtbaren oder unauffälligen, nichtsdestoweniger vorhandenen Zwischenräumen hartnäckig von einem einzelnen, einheitlichen Körper, dagegen bei geräumigeren Intervallen von einer Vielheit einzelner Körper sprechen, deren jeder für sich allein einheitlich sei“. (P. Kammerer 1919 p.111.) Die Entscheidung, von welchem Stadium an der Systemzusammenhang in eine geometrische Stückverteilung übergeht, ist eine Angelegenheit des Experimentes und der vergleichenden Beobachtung.

Die geomorphologischen Strukturen können sich in der Regel frei ausbilden, indem sie nicht gebunden sind an eine unveränderliche 'physische Form'. Die Selbstumbildung der Gestalt geschieht stets in der Richtung einer weiteren Herabsetzung der Strukturenergie. (Vgl. die Entwicklung des 'geraden' zum frei mäandrierenden Flußlauf!) Die geomorphologischen Strukturen pflegen ferner mit Selbstdifferenzierung aufzutreten. Diese in sich differenzierten Strukturgebilde sind trotz aller scheinbaren formalen 'Unregelmäßigkeiten' der Ausdruck einer streng gesetzmäßigen Raumordnung.

Geometrische Elementarformen oder landläufige Ordnungsschemata können nicht die Grundlage abgeben für eine entsprechende kausale Einteilung nach 'Kräften', die man jenen einfach zuordnet (z. B.: räumlich und zeitlich, außen und innen, vertikal und horizontal, gradlinig und kreisförmig, punktförmig, linear und flächenhaft wirkende Kräfte),

sondern die kausal-dynamische Erfassung der Wirklichkeit kann nur auf dem Wege der natürlichen Gliederung des Geschehens geleistet werden. Die geographische Morphologie unternimmt dies auf dem Wege der Feststellung von 'Beziehungen'. Wo sie ein weitergehendes Kausalitätsbedürfnis zu befriedigen sucht, geschieht dies vielfach nur dem äußeren Anscheine nach. Denn die 'Faktoren' und 'Argumentien', die sie namhaft macht, sind immer noch sehr komplexer Natur. Durch Einführung des Kraftbegriffes in diese Beziehungsforschung wird aber der trügerische Anschein erweckt, als werde hier zugleich das den Erscheinungen zugrunde liegende elementare Kräftespiel bloßgelegt, d. h. physikalische Erklärungen geboten. Solange sich der Geograph über das hier wirklich Geleistete keiner Täuschung hingibt, bleibe ihm diese terminologische Freiheit unbenommen. Immerhin ist und bleibt die modische Vorliebe des Geographen für den Kraftbegriff eine überflüssige Spielerei. Die 'Kraft' erscheint vielfach gleichbedeutend mit der 'Ursache', wie mit dem 'Vorgang' und mit der 'Wirkung'. Man trägt keine Bedenken, Begriffe wie: Kraft, Energie, Kraftwirkung, Wirkung, Faktor, Agens, Bedingung, Vorgang, Prozeß, Tätigkeit, Arbeit, Erscheinung usw. völlig synonym zu verwenden. Man wechselt, oft innerhalb eines einzigen Satzes, zwischen ihnen ab nach Maßgabe eines stilistischen Variationsbedürfnisses. Das Kausalproblem wird zu einer stilistischen Angelegenheit.

Literatur

- Ahlmann, H. W., Beitrag z. Kenntnis d. Transportmechanik d. Geschiebes u. d. Laufentwicklung d. reifen Flusses. (Sveriges Geol. Undersökn. Årsbok 8 Nr. 3. Stockholm 1914.)
- Mechan. Verwitterung u. Abrasion an d. Grundgebirgsküste d. nordwestl. Schonen. (Bull. Geol. Inst. Upsala XIII, 2. 1916, p. 299—389.)
- and A. Tveten, The recrystallization of snow into firn and the glaciation of the latter. (Geogr. Annaler V, 1 1923, p. 51—58.)
- Andersson, J. G., Solifluction, a component of subaerial denudation. (Journ. of Geol. XIV, 2. 1906.)
- Andree, K., Geologie des Meeresbodens. Bd. II. Leipzig 1920 Bornteaeger. (Bsd. p. 31—197: „Die am Strande wirkenden Kräfte u. die hierdurch erzeugten Bildungen“.)
- Andrews, E. C., Corrasion by gravity streams with applications of the ice-flood hypothesis. (Journ. and Proceed. Royal Soc. of N. S. Wales 43. 1909/10, p. 204—330; mit Abb.)
- Arbenz, P., Über Karrenbildungen. (= Neujahrsblatt d. Naturf. Ges. Zürich auf d. J. 1913.) Zürich o. J. (1913) Beer.
- Ayrton, Mrs. Hertha, The origin and growth of Ripple-mark. (Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. Bd. 84. 1910, p. 285—310; mit Abb.)
- Bach, E., Über die morphol. Bedeutung des Regens. Diss. Erlangen 1915.
- Banerji, S. K., Effect of Barriers on Ripple-mark. (Proc. Indian Assoc. for the Cultiv. of Science 8. 1923, p. 123—25.)
- Barclay, W. S., Sand Dunes in the Peruvian Desert. (Pampa del Sacramento.) (Geogr. Journ. 49. 1917, p. 53—56; mit Phot.)
- Barkhausen, H., Schwingende Systeme. (Handwbt. d. Nat. 8. 1913, p. 1030—50.)
- Schwingungserregung. (Handwbt. d. Naturwiss. 8. 1913, p. 1145—54.)
- Baschin, O., Die Entstehung wellenförmiger Oberflächenformen. Ein Beitrag zur Kymatologie. (Zs. Ges. f. Erdk. Berlin 34. 1899, p. 408—24.)
- Die Entstehung der Dünen. (Centralbl. d. Bauverwaltg. 20. 1900, p. 231 f.)
- Dünenstudien. Zs. Ges. f. Erdk. Berlin 1903, p. 422—30.)
- Die Wellen des Meeres. (= Meereskunde, Heft 12.) Berlin 1907.
- Die Entstehung der Flußmäander. (Pet. Mitt. 1916, p. 16.) (= Selbstanzeige für s. Aufsatz in Zs. Ges. f. Erdk. 1915, p. 634—39.)
- Ein geographisches Gestaltungsgesetz. (Pet. Mitt. 1918, p. 50—54.)
- Der Einfluß d. dynam. Gleichgewichtes auf d. Formen d. festen Erdoberfl. (Die Naturwiss. 6. 1918, p. 355—58, 521 f.)
- Das Gleitflächengesetz. (Die Naturwiss. Jg. 7. 1919, p. 816; s. a. Pet. Mitt. 1920, p. 25.)
- Riffelbildung u. gleitende Reibung. (Die Naturwiss. 6. 1918, p. 521 f.)
- Becher, E., Naturphilosophie. (= Kultur der Gegenwart. Abt. III, 7. I. Bd.) Leipzig 1914.

- Behrmann, W., Die Oberflächengestaltung d. Harzes. (= Forsch. z. dt. Landes- u. Volksk. XX, 2.) Stuttgart 1912.
- Die Formen d. Tieflandsflüsse. (Geogr. Zs. 21.1915.H.8.)
- Der Sepik. (= Erg.-H. d. Mitt. d. dt. Schutzgebiete 12.1917.)
- Im Stromgebiet des Sepik. Eine dt. Forschungsreise in Neuguinea. Berlin 1922 Scherl.
- Borkum, Strand- u. Dünenstudien. (= Meereskunde Nr. 153. XIII, H. 9.) Berlin 1919 Mittler.
- Der Vorgang d. Selbstverstärkung. (Zs. Ges. f. Erdk. 1919.p.153ff.)
- Bertololy, E., Kräuselungsmarken u. Dünen. (= Münchener Geogr. Studien, hsg. v. S. Günther, Heft 9.) München 1900.
- Betz, A., Wirbel u. im Zushang. damit steh. Begriffe d. Hydrodynamik. (Zs. f. Flugtechnik 12.1921.p.193—98.)
- Beyer, O., (Verwitterungerscheinungen beim Quadersandstein Sachsens.) (Zs. dt. Geol. Ges. 63.1911.p.429ff., 465f.)
- Blanck, E., Verwitterungskundl. Studien zum Tafoni- u. Karrenproblem. (Int. Mitt. f. Bodenkunde IX. 1919.)
- Blankenhorn, M., Zur Erklärung d. Rillensteine d. Nildeltas. (Zs. dt. Geol. Ges. 68. 1916. Monatsber. p.26.)
- Blasius, H., Über d. Abhängigkt. d. Formen d. Riffeln u. Geschiebebänke vom Gefälle. (Zs. f. Bauwesen 1910 Sp. 466—71, u. Atlas Bl. 49f.)
- Brandt, B., Über geomorphol. Restformen u. ihre Bedeutung f. d. Abtragung der Erdoberfl. (Die Naturwiss. 10.1922.p.1103—08.)
- Braun, G., [Über Rillen u. Racheln]. (Zs. Ges. f. Erdk. 1905 p.771; 1907 p.527; 1912.)
- Über Bodenbewegungen. (XI. Jahresber. Geogr. Ges. Greifswald 1908.)
- Brunhes, Jean, Le travail des eaux courantes: La tactique des tourbillons. (Mém. soc. Fribourg. des sci. nat. Sér. Géol. et Géogr. II,4 1902. p.153—224, m. Abb.)
- Érosion tourbillonnaire éolienne. Contrib. à l'étude de la morph. désert. (S.-A. aus: Memorie della Pontifica Accademia Romana dei nuovi Lincei. Vol. XXI p.129—48; 2 Taf.; Roma 1903.)
- L'allure réelle des eaux et des vents enregistrée par les sables. (La Géogr. 14.1906.p.193—210, mit Fig.)
- Érosion fluviale et érosion glaciaire. Observations de morphologie comparée. (Rev. de géogr. annuelle I.1906/07.p.281—308.)
- Brunhes, Bern., et Jean Brunhes, Les analogies des tourbillons atmosphériques et des tourbillons des cours d'eau et la question de la déviation des rivières vers la droite. (Ann. de Géogr. 13.1904. p.1—20.)
- Buchwald, M., Riffelbildung auf Straßenbahnschienen u. Ursachen. (Zs. f. Kleinbahnen 20. Jg. 1914 p.1101—16.)
- Cairnes, L. D., Differential Erosion and Equiplanation in portions of Yukon and Alaska. (Bull. Geol. Soc. of Am. Bd. 23. 1912; vgl. Supan 1916 p.623.)
- Calciati, Césaire, Le travail de l'eau dans les méandres encaissés. Les méandres de la Sarine. (= Mém. Soc. Fribourg. des sci. nat.; Sér.: Géol. et Géogr. Vol. 7.) Thèse. Fribourg (Suisse) 1909.
- de Candolle, M. C., Rides formées à la surface du sable déposé au fond de l'eau et autres phénomènes analogues. (Bibl. Univ. de Genève 1883. Archives d. sci. phys. et nat. III. pér. IX. tome p.241—78.)

- Chaix, E., Érosion torrentielle post-glaciaire dans quelques vallées. (Le Globe 41. Genf 1902.)
- Le pont des Oulles. Phénomène d'érosion par les eaux cour. (La Géogr. 8.1903.)
- Cholnoky, E. v., Die Bewegungsgesetze des Flugsandes. (Földtani Köz-löny Bd. 32.1902.p 106—43.)
- Über die Lageveränderungen des Tiszabettes. (Abrégé Bull. Soc. Hon-groise de Géogr. 1907.p.135—79. (= Földrajzi Közlemények Budapest. Bd. 35.)
- Coffey, G. N., Clay dunes. (Journ. of Geol. 17 1909.p.754 f.)
- Cornish, Vaughan, On the Formation of Sand Dunes. (Geogr. Journ. 8.1897.p.278 ff.)
- On Kumatology. The study of the Wawes and Wawe-Structures of the Atmosphere, Hydrosphere and Lithosphere. (Geogr. Journ. 13.1899. p.624—28; mit Abb. u. K.)
- On Desert Sand Dunes bordering the Nile Delta. (Geogr. Journ. Jan. 1900.p.1—32.)
- On the Observation of Desert Sand Dunes. (Geogr. Journ. 1908. Bd. 31. p.400—02.)
- Wawes of the Sea and other Water Wawes. London 1910.
- Wawes of Sand and Snow. London 1914.
- Crammer, Hans, Die Furchung der Winterschneedecke in den Gebirgs-tälern. (Pet. Mitt. 1905 p 237—39.)
- Crugnola, G., Zur Dynamik des Flußbettes. (Zs. f. Gewässerk. 4.1902. p.288—304; Forts.: 5.1903.p.241—51.)
- Cvijič, J., Morphol. u. glaziale Studien aus Bosnien usw. (= Abh. Geogr. Ges. Wien Bd. 2/3.1900/01.)
- The evolution of lapies, a study in Karst physiography. (The Geogr. Review 14.1924 p 26—49, mit Abb.)
- Darwin, G. H., On the Formation of Ripplemark in Sand. (Proc. Roy. Soc. of London. Vol. 36.1884 p.18—43.)
- Daubrée, Études synthét. de géol. experiment. Paris 1879. Deutsch von A. Gurlt. Braunschweig 1880.
- Davis, W. M., Incised Meandering Valleys. (Bull. Geogr. Soc. of Philadelphia 1906, Bd. IV Nr. 4)
- Meandering Valleys and Underfit Rivers. (Ann. Ass. American Geographers 3 1913 p.3—28; mit Diagr.)
- u. G. Braun, Grundzüge d. Physiogeographie. 2. Aufl. Bd. I Leipzig u. Berlin 1917. Bd. II: 1915.
- u. A. Rühl, Die erklärende Beschreibung d. Landformen. Leipzig u. Berlin 1912.
- Deecke, W., Läßt sich der Büßerschnee als vereiste Schneewehen auffassen? (Globus 87.1905 p 261 f.)
- Morphologie von Baden auf geol. Grundlage. (= Geol. v. Baden III. Teil.) Berlin 1918.
- Dobrowolski, A. B., Historja naturalna lodu. (Histoire naturelle de la Glace.) Warschau 1923. (XXVI, 940 S., 340 Textfig., Lit.; französ. Restümé.)
- Doell, A., Die Regulierung geschiebeführender Wasserläufe, bsd. d. Ober-rheins. (= Fortschr. d. Ing. Wiss. 2. Gr., H. 6.) Leipzig 1896.
- Dormus, A. v., Zur Frage d. Riffelbildg. auf d. Fahrflächen d. Schienen. (Stahl u. Eisen 36.1916 p.257 f.)

- Mac Dougal, D. T., Botanical features of north American deserts. (Carnegie Inst. of Washington. Publ. 99. 1908.)
- Eckert, Max., Das Karrenproblem. Die Geschichte seiner Lösung. Leipziger Diss. Halle 1895. (Ferner: Zs. f. Naturwiss. Bd. 68. 1896. p. 321—432; Lit.)
- Die Verwitterungsformen in den Alpen, bes. in den Kalkgebirgen. (Zs. dt. u. öst. Alpenver. 36. 1905. p. 16—35.)
- Einstein, Alb., Die Ursache der Mäanderbildung der Flußläufe u. des sog. Baerschen Gesetzes. (Die Naturwiss. 14. 1926. p. 223 f.)
- Engels, Hub., Untersuchg. üb. d. Bettausbildg. gerader od. flachgekrümmter Flußstrecken mit bewegl. Sohle. (Zs. f. Bauwesen 1905.) Auch: S.-A., Berlin 1905.
- Versuche üb. d. Räumungskraft d. fließ. Wassers. Zentralbl. d. Bauverw. 28. 1908. p. 105 u. 677.)
- Versuche üb. d. Reibungswiderstand zw. ström. Wasser u. Bettsohle. (= S.-A. aus: Zs. f. Bauwesen 1912 p. 473 u. 678.) Berlin 1912 Ernst.
- Handb. d. Wasserbaues f. d. Studium u. d. Praxis. 2 Bde. 2. verb. u. verm. Aufl. Leipzig 1921. (Vgl. bsd.: Bd. I; Dritter Teil: „Flußbau“.)
- Epry, E., Contribution à l'étude des ripple-marks. (Bull. Inst. Océanogr. Monaco 1922, Mai 30.)
- Escher, B. G., Über d. Entstehung d. Reliefs auf d. sog. „Rillensteinen“. (Geol. Rundsch. 4. 1913. p. 1—6; mit Taf.)
- Furchensteine (Galets sculptés), Rillensteine und Mikrokarren. (Eclogae Geol. Helvet. 14, 38. 1916.)
- Exner, Felix M., Über oszillatorische Strömungen der Luft. (Ann. Hydr. 41. 1913. p. 145—50.)
- Über oszillierende Strömungen in Wasser und Luft. (Ann. Hydr. 47. 1919. p. 155—68.)
- Zur Theorie der Flußmäander. (Wiener S.-B., math.-nat. Kl. Abt. IIa 1919. Bd. 128. H. 10. p. 1453—73; S.-A. p. 1—21.) (Beifällige Anz. v. O. Baschin in: Die Naturwiss. 8. 1920. p. 481 f.)
- Zur Physik der Dünen. (S.-A. Sitzgsber. Ak. d. Wiss. Wien, math.-nat. Kl. IIa. Bd. 129 p. 929—52. Wien 1920.)
- Dünen u. Mäander, Wellenformen d. festen Erdoberfl.; deren Wachstum u. Bewegung. (Geogr. Annaler III. 1921. p. 327—35.)
- Natürliche Bewegungen in d. Natur in geraden u. gewellten Linien. (Naturwiss. Wochenschr. 35. Bd. p. 385—90. 1921.)
- Über Schuttböschungen u. Bergformen. (Geogr. Annaler V, 1. 1923. p. 59—71.)
- Exner, Franz, Vorlesungen üb. die physikal. Grundlagen der Naturwissenschaften. 1. Aufl. Wien 1919. 2. Aufl. 1922.
- Faber, E., Über d. natürl. u. künstl. Bau geschiebeführender Flüsse usw. (Ber. üb. d. Hauptversammlg. d. Ver. f. Hebung d. Fluß- u. Kanalschiffahrt. 1896 p. 21.)
- Fargue, Expériences relatives à l'action de l'eau courante sur un fond de sable. (Ann. ponts et chauss. 1894 p. 426—66.)
- Hydraulique fluviale. La forme du lit des rivières à fond mobile. (= Encycl. des travaux publ.) Paris 1908 Gauthier-Villiers.
- Fenneman, N. M., Some features of erosion by unconcentrated wash. (Journ. of Geol. XVI. 8. 1908. p. 746—54.)
- Fleury, E., Le chaudron latéral, forme particulière de l'érosion par les eaux cour. (La Géogr. Paris. Bd. 15. 1907. p. 337—44, m. Abb.)

- Forchheimer, Ph., Wasserbewegung in Wanderwellen. (Zs. f. Gewässerkr. 6.1904.p.321—39; vgl. Ders., Hydraulik. 1914.)
- Forel, F. A., Les rides de fond, étudiées dans le Lac Léman. (Bibl. Univ. de Genève 1883. Arch. des scienc. phys. et nat. 3. Folge Bd. X p.39—72. Fast wörtlich übernommen in: Ders., Le Léman. 1895. Bd. II. p.249—74.)
- Forel, O. L., Le Rythme (!). Étude psychologique. (Journ. f. Psychol. u. Neurol. 26.1920.p.1—104.)
- Frauenfelder, K., Über Entstehung der Flußinseln. München 1897.
- Free, E. E., The movement of soil material by the wind, with a bibliography of eolian geology. (U.S. Department of Agriculture Bureau of soils, Bull. Nr. 68.) Washington 1911. (Ausführl. Literaturverz. — s. a. Referat v. K. Stamm i. Int. Mitt. f. Bodenk. 3.1913.p.50ff. u. in Ber. üb. d. Fortschr. d. Geol. 3.1912. H. 5/6.)
- Friedländer, Immanuel, Regelmäßigkeit der Abstände vulkanischer Eruptionzentren. (Zs. f. Vulkanol. IV.1918.p.15—31; S. a. Edda Bd. V. p.56—59, sowie Pet. Mitt. 1918 p.27f.)
- Frost, Walter, Naturphilosophie. Bd.I. Leipzig 1910. Barth.
- Früh, Jak., Entwicklungsformen u. Verbreitung d. Bäußerschnees. (Pet. Mitt. 1915 p.423—27; mit 2 Abb.)
- Geinitz, Rezente Riesentopfbildungen im Geschiebemergel d. Ostseeküste. (Centralbl. f. Min. 1903 p.414—16.)
- Gilbert, G. K., The transportation of débris by running water. (U. S. Geol. Survey, Prof. Paper 86. Washington 1914.)
- Glinka, K., Die Typen der Bodenbildung. Berlin 1914.
- Goerens, Paul, Beitrag zur Frage üb. das Gefüge riffliher Schienen. (Stahl u. Eisen 37. Jg. 1917 p.993—1001.) (= Nachdr. a. d. Druckschr. d. Komm. f. Riffelunters. Darmstadt.)
- Gradmann, R., Die algerische Küste in ihrer Bedeutung f. d. Küstenmorphologie. (Pet. Mitt. 1917 p.137 ff., 174 ff., 209 ff.)
- Graevell, Gedanken üb. d. Verhältnis d. laminar. z. turbul. Wasserbeweg. in Gerinnen. (Zs. f. d. ges. Turbinenwesen 16 1919.p.113—16.)
- Die fließende Bewegung des Wassers. (Zs. f. d. ges. Turbinenwesen 17.1920. p.241—45, 253—56.)
- Regelmäßige Unregelmäßigkeiten beim stat. Fließen in Wasserläufen. (Zs. f. d. ges. Turbinenwesen 17.1920.p.397—400, 424—27.)
- Gravelius, H., Flußkunde. Berlin u. Leipzig 1914.
- Griggs, R. F., The Buffalo River: An Interesting Meandering Stream. (Bull. Amer. Geogr. Soc. New York 38.1906.p.168—77.)
- Grund, A., Das Karstphänomen. (= Stille's Geol. Charakterbilder H. 3.) Berlin 1910. Borntraeger
- Günther, S., Handb. d. Geophysik. 2 Bde. 2. Aufl. Stuttgart 1899.
- Über gewisse hydrol.-topogr. Grundbegriffe. (Sitzungsber. bayr. Ak. d. Wiss., math. phys. Kl. Bd. 32. 1902.)
- Erdpyramiden u. Bäußerschnee als gleichartige Erosionsgebilde. (S-B. math.-phys. Kl. bayr. Ak. d. Wiss. München. Bd. 34.1904.p.397—420.)
- Ein Naturmodell der Dünenbildung. (Sitzgsber. Ak. d. Wiss. München, math.-nat. Kl. 37.1907.p.139—53.)
- Zur Frage der durch Verwitterung entstehenden Gesteinsauhöhlungen. (Prometheus XX.1909.p.321 ff.; mit Abb. u. 1 Kartensk.)
- Die Eiszeit auf d. schwäb.-bayr. Hochebene. 1921.

- Häberle, D., Die gitter-, netz- u. wabenförmige Verwitterung der Sandsteine. (Geol. Rundsch. 6.1915.p.264—85; mit Taf; Lit.)
- Haedicke, Herm., Noch etwas über Riffelbildung an Schienen. (Prometheus 27.1916.Nr.1383.p.491—93.)
- Hahmann, P., Die Bildung von Sanddünen bei gleichmäßiger Strömung. Leipzig 1912 Barth (= Bonner Phil. Diss. 1912.)
- Halbfaß, W., Grundzüge einer vergl. Seenkunde. Berlin 1923 Borntraeger.
- Hamberg, Axel, Die Eigenschaften d. Schneedecke in d. lappländ. Gebirgen. (= Naturwiss. Untersuchungen d. Sarekgebirges in Schwedisch-Lappland, hsg. v. Axel Hamberg, Bd. I, Abt. III: Gletscherkunde. Lf. I (p.1—68.) Stockholm 1907.
- Hansen, A., Goethes Morphologie (Metamorphose der Pflanzen u. Osteologie). Ein Beitrag z. sachl. u. philos. Verständnis u. z. Kritik d. morphol. Begriffsbildung. Gießen 1920.
- Hassert, K., Beiträge z. phys. Geogr. v. Montenegro. (= Pet. Mitt., Erg.-Heft 119) Gotha 1899.
- Hauthal, R., Büßerschnee (Nieve penitente). (Zs. dt. u. öst. Alpenver. 34.1903. p.114—31, mit Abb. Vgl. Ebda 1904 p. 260.)
- Hedin, Sven, Scientific Results of a Journey in Central Asia 1899—1902. Bd. I: The Tarim River. Stockholm 1904. Bd. II: Lop—nor. Leipzig 1905.
- Heim, Albert, [Über Erdpyramiden]. (Jahrb. schweiz. Alpenklub 13.1877/78.) — Handb. d. Gletscherkunde. Stuttgart 1885.
- Heim, Arn. u. Arbenz, P., Karrenbildungen in den Schweizer Alpen. (= Stille's Geol. Charakterbilder H. 10.) Berlin 1912 Borntraeger.
- Helmholtz, H. v., Über atmosphärische Bewegungen. (1.) (Berliner Sitzgsber. 1888 p.647—63.) (= Ders., Wiss. Abh. III Nr. 126.)
- Über atmosphärische Bewegungen. (2.) (Berliner Sitzgsber. 1889 p.761—80.) (= Ders., Wiss. Abh. III Nr. 127.)
- Die Energie der Wogen u. des Windes. (Berliner Sitzgsber. 1890 p.853—72.) (= Wiedemanns Annalen 41 p.641—62.) (= Ders., Wiss. Abh. III. Nr. 128.)
- Heß, Hans, Zackenfirn. (Pet. Mitt. 1908 p.188—91.)
- Büßerschnee. (Geol. Rundsch. I 1910, Besprech. p.310—13.)
- Heß v. Wichdorff, H., Über Strudellöcher im Flußbett der Schwarzaa in Thüringen u. ihre gegenwärt. Entstehung. (Jahrb. Preuß. Geol. l.a. 1914 p.271—75, mit Abb.)
- Hessle, C., Die mittlere Geschwindigkeit d. Wassers in natürl. Gewässern. (Zs. f. Gewässerk. 2.1899 p.20 ff.)
- Hettner, Alfr., Die Arbeit d. fließ. Wassers. (Geogr. Zschr. 1910.p.365—84.)
- Die Oberflächenformen des Festlandes, ihre Untersuchung und Darstellung. Leipzig u. Berlin 1921.
- Högbom, A. G., Studien in nordschwed. Drumlinlandschaften (Westerbotten). (Bull. Geol. Inst. Upsala VI. [1903] 1905 p.175—99; mit Abb. u. K.)
- Högbom, Bertil, Einige Illustr. z. d. geol. Wirkungen d. Frostes auf Spitzbergen. (Bull. Geol. Inst. Upsala IX.1908/09. Upsala 1910.p.41—59)
- Wüstenerscheinungen auf Spitzbergen. (Bull. Geol. Inst. Upsala XI.1912. p.242 - 51; mit Abb.)
- Über d. geol. Bedeutung d. Frostes. (Bull. geol. Inst. Upsala XII.1914. p.257—390; mit Abb. u. Literaturverz.)

- Högbom, Jvar, Ancient Inland Dunes of northern and middle Europe. (Geogr. Annaler V.1923 p.113—243; mit Kartensk. u. Diagr.) (p.115—139: „Dune-formation and Dune-morphology“.)
- Hofmann, Alb., Über e. merkwürdige Oszillation d. Rheinspiegels. (Naturwiss. Wochenschr. Jena NF. 16. Nr. 48. p.677—79.1917.)
- Holthoff, H. C., Riefenbildung auf Brechwalzen. (Engineer. Min. Journ. 1913. 28. Juni. p.1302.)
- Honsell, Beiträge z. Hydrogr. d. Großherzogt. Baden. Heft III. 1885. (Mit Atlas.)
- Über d. natürl. Strombau d. dt. Oberrheins. (Verhh. VII. dt. Geogr.-Tages zu Karlsruhe 1885. p.33 ff.) (S.-A. Berlin 1887.)
- Hopf, Ludw., Hydrodynam. Untersuchgn. Turbulenz bei einem Flusse. Über Schiffswellen. Leipzig 1910 Barth. (Im Ausz. in: Ann. d. Phys. F. 4 Bd. 32, 4.) (= Münchener Diss. 1909.)
- Hunt, A. R., 1. The Descriptive Nomenclature of Ripple-mark. (The Geol. Mag. Lo. 1904. N. Ser. V, 1 p.410—18.) 2. The new question of ripple-mark. (Ebda p.619—21.)
- Ichak, Frieda, Das Perpetuum mobile. (= A & G Bd. 462.) Leipzig 1914 Teubner. (Mit 38 Abb.)
- Jacob, Charlotte, Über gleitende Reibung. (Ann. d. Physik 4. F. Bd. 38. 1912 p.126—48.) (= Auszug aus Königsberger Diss. 1912. Dasselbe, Leipzig 1911 Barth.)
- Jäger, Fritz, Forschungen in d. Hochregionen d. Kilimandscharo. (Mitt. a. d. dt. Schutzgeb. XXII, Berlin 1909 p.113—46, 161—97.)
- Ergebnisse meiner Forschungen in Deutsch-SW-Afrika 1914/19. (In: Verhh. 20. dt. Geogr.-Tag zu Leipzig. Berlin 1922.)
- Jaggarr jr., Th. Aug., Experiments illustrating Erosion and Sedimentation. (Bull. Museum of Compar. Zool. Bd. 49, Geol. Series, Bd. VIII Nr. 6. Cambridge, Mass. 1908.)
- Jakowlew, S. J., Die Sande u. die mit ihnen verknüpften Probleme. Materialien zur Erforschung d. losen Sande Rußlands. (Isw. Russ. Geogr. Ges. Petersburg 1915 p.1—25; russisch.)
- Jasmund, R., Fließende Gewässer. (= Handb. d. Ingenieurwissensch. 3. Teil: Der Wasserbau. 1. Bd.: Die Gewässerkunde. 4. verm. Aufl., II. Kap. Leipzig 1911 Engelmann.)
- Jessen, O., Die Verlegung der Flußmündungen u. Gezeitentiefs an der festländ. Nordseeküste in jungalluvialer Zeit. Stuttgart 1922 Enke.
- W. Behrmanns „Prinzip der Selbstverstärkung“. (Pet. Mitt. 68.1922 p.84f.)
- Johnson, D. W., Beach Cusps. (Bull. Geol. Soc. Amer. 21.1910 p.599—624; Lit.)
- Contributions to the Study of Ripple-marks. (Journ. of Geol. 1916 p.809—19, nur referierend.)
- Shore processes and shoreline development. New York 1919.
- Jolles, C. A., Die Verbesserung der Waal. (Taschenkalender f. d. Rheinschiffahrt 1918.)
- Jutson, J. T., Erosion and the resulting land forms in sub-arid Western Australia, including the origin and growth of dry lakes. (Geogr. Journ. 50.1917 p.418—37.)
- Kaiser, Erich, Morphogenet. Ergebnisse auf Reisen während des Krieges in SW-Afrika. (Verhh. 20. dt. Geogr.-Tag zu Leipzig. Bl. 1922 p.159ff.)
- Abtragung u. Anflagerung in der Namib, der südwestafr. Küstenwüste. (= Stille's Geol. Charakterbilder 27/28. H.) Berlin 1923 Borntraeger.

- Kaiser, Erich, Die Diamantenwüste Südwestafrikas. 2 Bde. Berlin 1926 Reimer.
- Kammerer, Paul, Das Gesetz der Serie. Eine Lehre von den Wiederholungen im Lebens- und im Weltgeschehen. Stuttgart u. Berlin 1919 Dt. Verl.-Anst.
- Kármán, Th. v., Über laminare u. turbulente Reibung. (Zs. f. angewandte Math. u. Mechanik. Bd. 1.1921.H.4.p.233—52.)
- Kassner, C., Die Entstehung des Büßerschnees. (Pet. Mitt. 1915 p.57—59; mit 6 Zeichn.)
- Kayser, E., Lehrbuch d. Geologie. 6. Aufl. Bd. I u. II. Stuttgart 1921.
- Kayser, Dir. Dr. ing., Riffelerscheinungen auf e. Kölner Vorortbahn. (= Druckschriften d. Kommission f. Riffeluntersuchungen 1.) Köln 1916.
- Keidel, H., Über d. Büßerschnee d. argentin. Anden. (Zs. f. Gletscherk. 4.1909/10.p.31—66, 96—137, 177—93.)
- Büßerschnee in d. Argentin. Anden. (= Geol. Charakterbilder, hsg. v. H. Stille, 21. H.) Berlin 1914 Borntraeger
- Keidel, J., La nieve penitente de los Andes Argentinos. (= Ann. Minist. Agric. de la Nación Buenos Aires XII, 4.) Buenos Aires 1918. (84 S. m. Abb. = Erweiterte Fassung d. Aufsatzes von Zs. f. Gletscherk. 4.)
- Keilhack, K., Granatsand-Dünen auf Ceylon. (Zs. dt. Geol. Ges. 67.1915. p. 47—56; Taf. 3—8.)
- Kessler, Paul, Einige Wüstenerscheinungen aus nichtaridem Klima. (Geol. Rundsch. 4.1913p.413—23; mit 1 Taf.: Rillensteine.)
- Über Lochverwitterung u. ihre Beziehgn. z. Metharmose (Umbildung) d. Gesteine. (Geol. Rundsch. 12.1921.p.237—270; zahlr. Lit.)
- Kindle, E. M., Recent and fossil Ripple-mark. (Canada Dept. of Mines Museum Bull. Nr. 25. Ottawa 1917.)
- Some factors affecting the development of Mud-Cracks. (Journ. of Geol. 25.1917. Nr. 2.)
- King, W. J. Harding, The nature and formation of sand ripples and dunes. (Geogr. Journ. 47.1916.p.189—209; mit Abb. u. Diagr.)
- Study of a dune belt. (Geogr. Journ. 51.1918.p.16—33.)
- Kittler, Chr., Über d. geogr. Verbreitung u. Natur d. Erdpyramiden. (Diss. Erlangen.) München 1897. (Vgl. hierzu Böhm i. Pet. Mitt. 1899, Lit. Nr. 42.)
- Klute, F., Beob. üb. Zackenfirn (Büßerschnee) u. dessen Entstehung am Kilimandscharo. (Zs. f. Gletscherk. 9.1914/15.p.289—305; mit Phot.)
- Büßerschneebeobachtgn. im Schwarzwald. (Zs. f. Gletscherk. 10.1916/17. p.56—59.)
- Beob. üb. Sickerbahnen d. Schmelzwassers in Schnee u. Firnschnee. (Zs. f. Gletscherk. 10.1916/17.p.59f.)
- Köhler, Wolfg., Die physischen Gestalten in Ruhe und stationärem Zustand. Eine naturphilosophische Untersuchung. Braunschweig 1920 Vieweg (S. a. die Besprechg. v. E. Becher i. Zs. f. Psychol. Bd. 87.1921.p.1—44.)
- Köppen, W., Die natürlichen Steinringe u. Steinnetze d. kalten Zonen. (Met. Zs. 37.1920.p.98—100.)
- Krümme l, O., Handbuch d. Ozeanographie Bd II: Die Bewegungsformen des Meeres, 2. Aufl. Stuttgart 1911. [Bd. I: 1907.]
- Kühn, Franz, Aus den Hochkordilleren von San Juan (Argentinien). (Pet. Mitt. 1913.II.) (p.136f. über Büßerschnee; s. a. Taf. 11.)
- Küster, Ernst, Zonenbildung in kolloidalen Medien. (= Beitr. z. entwicklungsmechan. Anatomie d. Pflanzen I.) Jena 1913 Fischer.

- Küster, Ernst, Über rhythmische Strukturen im Pflanzenreich. (Die Naturwiss. Berlin. 2. Jg. 1914. p.73—78.)
- Lagally, M., Die bayr. Donau. E. morphol. Betrachtg. Progr. Regensburg 1915.
- Langenbeck, R., Büßerschnee in d. Walliser Alpen. (Pet. Mitt. 1908. p.285f.)
- Graf von Larisch-Moennich, Franz, Sturmsee u. Brandung. (= Monogr. z. Erdk. Bd. 33.) Bielefeld u. Leipzig 1925 Velh. & Klas.
- Leclère, F., Contribution à l'étude du cours de la Sarine. (Mitt. Nat. Ges. Freiburg (Schweiz) VIII.1919.p.93—149; mit Abb. u. K.)
- Lehmann, F. W. Paul, Anmerkungen z. Dünenmorphologie. (Pet. Mitt. 1918.p.175.)
- Bemerkgn. z. mod. Kymatologie usw. (Pet. Mitt. 1919.p.103f.)
- Stauungs-, Zerreißungs- und Schmelzungserscheingn. auf d. Eise v. Binnengewässern. (Pet. Mitt. 68.1922.p.188f.)
- Lehmann, Otto, Tal- u. Flußwindungen u. die Lehre vom geogr. Zyklus. (Zs. Ges. f. Erdk. 1915 p.92—111, 171—179.)
- Fluß- u. Bachursprünge in d. Rückenlandsch. d. feucht-gemäßigten Klimas. (Mitt. Geogr. Ges. in Wien. 61. Jg. 1918. p.113—42.)
- Über Quellen u. Grundwasser. (S-A: Geogr. Jahresber. aus Österreich XIII.) Leipzig u. Wien 1925 Deuticke.
- Leiner, Versuche üb. d. Reibungswiderstand zw. ström. Wasser u. Bettsohle. (Zentralbl. d. Bauverw. 1912 p.485.)
- Graf zu Leiningen, W., Über Erdpyramiden. (Abh. naturhist. Ges. Nürnberg. Bd. 18.1909.p.57—70, mit Abb. u. K.)
- Levy, Frdr., Der Formenschatz des Eiszeitalters. (Geogr. Zs. 28.1922.p.75—92.)
- Liesegang, Raph. Ed., Geologische Diffusionen. Dresden u. Leipzig 1913.
- „Kolloidchemie 1914—1922.“ (= Wissensch. Forschungsber., Naturw. Reihe Bd. VI.) Dresden u. Leipzig 1922. (Bsd. die Abschn.: XV: Keimwirkungen; XXI: Diffusion in Gallerten; XXII: Rhythmische Fällungen in Gallerten.)
- Linck, G., Kreislaufvorgänge in der Erdgeschichte. Jena 1912 Fischer. (40 S.)
- Lippke, Ingenieur, Die Grundgesetze des Gleichgewichts u. der gleichförm. Wasserbewegung in den natürl. Strömen. (Zs. f. Gewässerk. 9.1910. p.291—348.)
- Untersuchungen üb. d. Verteilung d. Wassergeschwindigkeiten in den Querschnitten der natürl. Strömläufe. (Zs. f. Gewässerk. 10.1911. p.243—88, 362—89; Dass., II: Weitere Untersuchgn. üb. d. Vertikalgeschwindigkeitskurve. Ebd. 12.1914. p.203—50.)
- Lugeon, M., Sur un nouveau mode d'érosion fluviale. (C. R. Ac. Sci. Paris 156. 1913.p.582—84.)
- Le striage du lit fluvial. (Ann. Geogr. 23/24. Jg. 1915.Nr.152.p.385.)
- Sur un nouvel exemple de striage du lit fluvial. (C. R. des séances del'Ac. Sc. Paris 1921.4. April.p.828—30.)
- Machatschek, F., Geomorphologie. (= Allg. Geogr. III.) (= AN & G Bd. 627.) Leipzig u. Berlin 1919.
- Landeskunde von Russisch-Turkestan. Stuttg. 1921. (Eingehend üb. Barchane.)
- Märtens, F., Ursache der Riffelbildung. (Stahl u. Eisen 33. Jg. 1913.p.1139—43; mit Phot. auf Taf.)
- Übersicht über d. bisher. Bestrebgn. u. Mittel z. Verhütung d. Schienenwanderns. (Stahl u. Eisen Jg.37.1917.p.136.)

- Märtens, F.**, Über d. Entstehg. d. Riffeln auf d. Schienenfahrfächen. (Organ f. d. Fortschritte d. Eisenbahnwesens NF 56. Jg. 1919. p.119—22; mit Zeichn. u. Phot.)
- Ursachen der Riffelbildung. (Organ f. d. Fortschritte d. Eisenbahnwesens NF 57. Jg. 1920. p.140.) (Notiz.)
- Magnus, Werner**, Zellenförmige Selbstdifferenzierung aus flüssiger Materie. (Berichte d. botan. Gesellsch. 31. 1913. p.290—303.)
- Marbut, C. F.**, Meanders. (Missouri Geol. Survey Bull. X p.94—109.)
- de Martonne, E.**, Lapiéz dans des grès crétacés. (Massiv du Bucegiu-Roumaine.) (Bull. Soc. Geol. de France (3) XXVII. 1899. p.28.)
- Le rôle morphologique de la neige en montagne. (La géographie 1920 p.255—67.)
- Meinardus, W.**, Beob. üb. Detritus-sortierung u. Strukturboden auf Spitzbergen. (Zs. Ges. f. Erdk. 1912 p.250—59.)
- Über einige charakterist. Bodenformen auf Spitzbergen. (Sitzgsber. med.-naturw. Ges. zu Münster i. W. Bonn 1912 p.1—42; mit Phot. u. Sk. u. e. ausführl. Literaturverz.)
- Meyer, E.**, Zur Klärung bedentsamer Fragen im Straßenbahn-Oberbau u. insbesond. d. Riffelbildung auf d. Schienen.) Berlin 1915 Hernemann. (S. a. Stahl u. Eisen 1915 p.843; 1916 p.124.)
- Meyer, Hans**, Der Kilimandscharo. Berl. 1900.
- In den Hochlanden von Ecuador. Berlin 1907 Reimer. (p.431—41 über Bäuerschnee; mit Lit.)
- Meythaler, F. K.**, Der Oberrhein. E. geschichtl. Studie a. d. Gewässerkunde. (Zs. f. d. Gewässerk. 5. 1903 p.365—85.)
- Miethe, A.**, Über Karreebodenformen auf Spitzbergen. (Zs. Ges. f. Erdk. 1912 p.241—44.)
- v. Mises, R.**, Kleine Schwingungen u. Turbulenz. (Jahresber. d. dt. Math.-Ver. Bd. 21. 1912 p.241—48.)
- Über d. gegenwärt. Krise der Mechanik. (Zs. f. angew. Math. u. Mechanik Bd. 1. 1921. p.425—31; Ders., i. Die Naturwiss. 10. 1922. p.25—29; s. a. Ders. i. Die Naturwiss. 7. 1919.)
- Möller, H. P.**, Rhythmische Fällungserscheinungen in pflanzl. Zellmembranen. (Kolloidchemische Beihefte Bd. XIV, H. 3/5. 1921. p.97—146.) (p.127 ff. über d. Liesegangschen Ringe u. Zonen.)
- Mortensen, H.**, Die Morphologie d. samländ. Steilküste. (= Veröff. Geogr. Inst. Univ. Königsberg H. III, Hamburg 1921.)
- Nansen, Fridtjof**, Spitzbergen. Leipzig 1921 Brockhaus. (Kap. 8: Oberflächenformen auf Spitzbergen.)
- Neumann, Rich.**, Ein Beitr. z. Kenntnis d. Schmelzformen d. Firns in d. Alpen. (Zs. f. Gletscherk. 3. 1908/09. p.306—08.)
- Noether, F.**, Üb. d. Entstehung e. turb. Flüssigkeitsbewegung. (Münchener S-B., math.-phys. Kl. 1913. H. 2 p.309—29.)
- Das Turbulenzproblem. (Zs. f. angew. Math. u. Mechanik. Bd. 1. 1921. H. 2 p.125—39; H. 3 p.218 f.)
- Nordenskjöld, O.**, Die Polarwelt u. ihre Nachbarländer. Leipzig u. Berlin 1909. (p.60—65: „Erdfluß u. ähnl. Erscheinungen“, m. 2 Abb.)
- Die schwed. Südpolarexped. u. ihre geogr. Tätigkt. (= Wiss. Ergebnisse d. schwed. Südpolarexped. 1901—03, Bd. I Lf. 1.) Stockholm 1911.
- Oberhoffer, P.**, Ursachen d. Riffelbildung auf Straßenbahnschienen. (Stahl u. Eisen 41. 1921. Nr. 33. p.1137—41.)

- Obst, E., Der östl. Abschnitt d. großen ostafr. Störungszone. (Mitt. geogr. Ges. Hamburg Bd. 27.1913.)
- Das abflußlose Rumpfschollenland im nordöstl. Deutsch-Ostafrika. Teil II: Grundzüge e. geogr. Landeskunde. Hamburg 1923.
- Odén, Sven, Allg. Einl. z. Chemie u. physikal. Chemie der Tone. (Bull. Geol. Inst. Upsala XV.1916.p.175—94.)
- Öttli, M., Hufeisendünen aus Schnee. (Naturwiss. Wochenschr. Jena. 32[NF 16]. 1917.p.593 f.; m. Abb.)
- Otto, Th., Der Darß u. Zingst. Ein Beitrag z. Entwicklungsgesch. d. vorpommerschen Küste. (13. Jber. Geogr. Ges. Greifswald 1911/12. Greifswald 1913.p.237—485; Taf. 16—26.)
- Owens, Experiments on the Settlement of Sand in running Water. (Geogr. Journal 1912.I,3.)
- Panzer, Wolfg., Talrichtung u. Gesteinsklüfte. (Pet. Mitt. 1923.p.153—57.)
- Partiot, Sur les sables de la Loire. (Ann. ponts et chauss. 1871 I p.233 ff.)
- Passarge, S., Physiologische Morphologie. (= S-A aus: Mitt. Geogr. Ges. Hambg. Bd. 26,2.) Hamburg 1912.
- Artikel „Atmosphäre (Geolog. Bedeutung)“. (Handwbt. d. Nat. Bd. I.1912. p.605—24.)
- Die Vorzeitformen d. dt. Mittelgebirgslandschaften. (Pet. Mitt. 1919.p.41—46.)
- Die Grundlagen der Landschaftskunde. Bd. III: Die Oberflächengestaltung der Erde. Hamburg 1920.
- Paulcke, W., Das Experiment in der Geologie. Festschrift. Karlsruhe 1912.
- Penck, Albr., Morphologie d. Erdoberfl., 2 Bde. Stuttgart 1894.
- Penck, Walter, Wesen u. Grundlagen d. morphol. Analyse. (Ber. math.-phys. Kl. Sächs. Ak. d. Wiss. Leipzig 1920. Bd. 72.p.65 ff.)
- Morphol. Analyse. (= Verhh. 20. Dt. Geogr.-Tag zu Leipzig. Berlin 1922. p.122—32.)
- Die morphol. Analyse. Ein Kapitel d. physikal. Geologie. (= Geogr. Abhh.) hrsg. v. A. Penck, 2. R. Heft 2.) Stuttgart 1924.
- Petersen, Eugen, „Rhythmus“. (= Abhh. Kgl. Ges. d. Wiss. Göttingen, phil.-hist. Kl., NF Bd. 16 Nr. 5. Berlin 1917.104 S.)
- Petzoldt, J., Zur Krisis des Kausalitätsbegriffs. (Die Naturwiss. 10. 1922.p.693—95.) [Zu Schottky, Ebda. 1921 u. Nernst, Ebda. 1922; vgl. Schottky, Ebda. 1922 p. 982.]
- Das allgemeinste Entwicklungsgesetz. München 1923 Rösl (= Philos. Reihe Bd. 57.)
- Philippson, A., Ein Beitrag zur Erosionstheorie. (Pet. Mitt. 1886 p.67—79.)
- Über die Typen der Küstenformen, insbes. der Schwemmlandküsten. (Festschrift f. Ferd. Freih. v. Richthofen. Berlin 1893.p.1—40.)
- Grundzüge d. allg. Geogr. II. Bd. 1. Hälfte: Morphologie. Leipzig 1923.
- Grundzüge d. allg. Geogr. II. Bd. 2. Hälfte: Morphologie (Schluß). Leipzig 1924.
- Poppen, H., Die Sandbänke an d. Küste d. Deutschen Bucht der Nordsee. Diss. Jena 1912. (= Ann. Hydr. 40.1912.p.273—302, 352—64, 406—20.)
- Prandtl, L., Flüssigkeitsbewegung. (Handwbt. d. Naturwiss. Bd. 4.1913. p.101—40.)
- Bemerkungen üb. d. Entstehung d. Turbulenz. (Phys. Zschr. 23.1922.Nr.1.) (Vgl. L. Schiller, ebda.)
- Prinz, G., Die Brandung am Ufer d. Gardasees. (Abrégé Bull. Soc. Hongroise de Géogr. Budapest 1907.p.30—32; = Földrajzi Közlemények, Bd. 35 p.89—96.)

- Ratzel, Fr., Die Erde u. d. Leben. 2 Bde. Leipzig u. Wien 1901 u. 1902.
- Rehbock, Th., Betrachtgn. üb. Abfluß, Stau- u. Walzenbildung bei fließ. Gewässern. Berlin 1917.
- Reichert, Fr., Die Penitentessneefelder im Gebiet zwischen Aconcagua u. Tupungato. (Zs. f. Gletscherk. 4. 1909/10. p. 343—50.)
- Rein, J., Bemerkungen üb. Veränderungen der Flußläufe, Stromstrich u. Begleiterscheinungen. (Pet. Mitt. 42. 1896. p. 129 ff.)
- Reynolds, Osborne, An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and the law of resistance in parallel channels. (Phil. Trans. Roy. Soc. 174. 1884. p. 935—82.)
- Richter, Ed., Geomorphol. Untersuchgn. in d. Hochalpen. (Pet. Mitt. Erg.-H. 132.) Gotha 1900.
- Romain, L. J., Ravins et têtes de ravins. Thèse. Fribourg (Suisse). Dijon 1908.
- Roux, W., Terminologie d. Entwicklungsmechanik d. Tiere u. Pflanzen. Leipzig 1912.
- Kausale u. konditionale Weltanschauung. Leipzig 1913.
- Rümelin, Th., Wie bewegt sich fließendes Wasser? Dresden 1913.
- Ryd, V. H., Die Reibung in der Atmosphäre. (Ann. Hydr. 46. 1918. p. 242—46; 48. 1920. p. 286—93.)
- Salomon, W., Die Bedeutung d. Solifluktion f. d. Erklärung deutscher Landschafts- u. Bodenformen. (Geol. Rundsch. 7. 1916. p. 30—41.)
- Entstehung v. Rillensteinen. (Zs. dt. Geol. Ges. Bd. 68. 1916. Monatsber. p. 21—26.)
- Grundzüge d. Geol. Hrsg. von ~ Bd. I, Teil 1: Innere Dynamik. Stuttgart 1922. Bd. II, Teil 2: Äußere Dynamik. Stuttgart 1924.
- Sandström, J. W., Über das Entstehen u. Verschwinden von Diskontinuitätsflächen in d. Atmosphäre. (Met. Zs. 1923. p. 37—39.)
- Sapper, K., Über Fließerde u. Strukturboden auf Spitzbergen. (Zs. Ges. f. Erdk. 1912. p. 259—70.)
- Erdfließen u. Strukturboden in polaren u. subpolaren Gebieten. (In: Berichte üb. d. Fortschritte d. Geol. Bd. 4. 1913. 16 S.) (Ferner in: Int. Mitt. f. Bodenkunde 1914; auch S.-A.) (Ferner in: Geol. Rundsch. IV, 2. 1913.)
- Über Abtragungsvorgänge in d. regenfeuchten Tropen u. ihre morphol. Wirkungen. (Geogr. Zs. 20. 1914.)
- Erdfließen. (Atti X. Congr. Int. Geogr. Rome 1913. p. 847—55. 1915.)
- Sauer, L., Die Erdpyramiden in den Alpen u. verwandte Bildungen. (Jahresber. Fr.-W.-Realgymnas. Stettin 1904. p. 3—12.)
- Schaefer, Clem. u. Heisen, Gg., Experim. Beitr. z. Strömung von Flüssigkeiten in Röhren. (Zs. f. Phys. 12. 1922. p. 165—76.)
- Scheu, E., Zur Morphol. d. schwäb.-fränk. Stufenlandschaft. Stuttgart 1909.
- Schiller, Ludw., Rauigkeit u. krit. Zahl. E. experim. Beitr. z. Turbulenzproblem. (Zs. f. Physik 3. 1920. Nr. 5. p. 412—16.)
- Experim. Untersuchgn. zum Turbulenzproblem. (Zs. f. angew. Math. u. Mechanik. 1. 1921. p. 436—44.)
- Experimentelle Feststellungen zum Turbulenzproblem. (Phys. Zschr. 23. 1922. Nr. 1; vgl. ebda. L. Prandtl!)
- Schmauß, A., Die Wahrscheinlichkeit einer Wettervorhersage. (Met. Zs. 36. 1919. p. 101 f.)
- Kolloidchemie u. Meteorologie. (Met. Zs. 37. 1920. p. 1—8; s. a. Ders. i. Zs. f. angew. Chemie 32. II. 1919. p. 811.)
- Ursache u. Wirkung in der Meteorologie. (Met. Zs. 38. 1921. p. 8—11.)
- Die erkenntnistheoret. Grenzen d. Wettervorhersage in unseren Breiten. (Met. Zs. 38. 1921. p. 149—51.)

- Schmitthenner, H., Die Oberflächengestaltung d. nördl. Schwarzwaldes. Diss. Heidelberg 1913.
- Die Entstehung der Stufenlandschaft. (Geogr. Zs. 26.1920.p.207—229.)
- Die Entstehung der Dellen u. ihre morphol. Bedeutung. (Zs. f. Geomorphol. I.1925.p.3—28, m. Abb.)
- Schober, Rich., Versuche üb. d. Reibungswiderstand zwischen fließ. Wasser u. benetztem Umfange. Borna-Leipzig 1915 Noske (= Dresdener TeH Diss. 1916).
- Schoklitsch, A., Über Schleppkraft u. Geschiebebewegung. Leipzig u. Berlin 1914.
- Über d. Bewegungsweise d. Wassers in offenen Gerinnen. (Wiener S-B., math.-nat. Kl. Abt. IIa, 129. Bd. 1920.H.9/10,p.895—917; mit 14 Textfig.)
- Schooneboom, C. G., Diffusion and Intertraction (Proc. Roy.-Soc. London (A) 101.1922.Nr.713.p.531—39.)
- Schoy, C., Das Problem des Büßerschnees. (Pet. Mitt. 1914.II.p.209—11, 266—69.)
- Schwarz, Riffelbildung auf Hauptbahngeleisen. (Centralbl. d. Bauverwaltung 1920.40. Jg.p.620f.) (Ausf. Ref. i. Organ f. d. Fortschr. d. Eisenbahnwesens 1921 p.265 f.)
- Schwinner, Rob., Vulkanismus u. Gebirgsbildung. Ein Versuch. (Zs. f. Vulkanol. V.1919/20.p.175—230.)
- Seeliger, R., Die Struktur des Windes. (Die Naturwiss. Berlin. 5.1917. p.749—56.)
- u. Bräuer, E., Methoden z. Untersuchg. d. Struktur d. Windes. (Met. Zs. 35.1918.p.30—41, 82—89, 124—32.)
- Semper, M., Die geolog. Studien Goethes. Beitr. z. Biogr. Goethes u. z. Gesch. u. Methodenlehre d. Geologie. Leipzig 1914.
- Sieber, K., Über Riffelbildungen an Straßenbahnschienen mit Betrachtgn. üb. d. Rollbewegungen d. Räder. („Elektrische Kraftbetriebe u. Bahnen“ 1908; s. a. Ders. i. Stahl u. Eisen 1910; Deutsche Straßenb. u. Kleinbahnztg. 1911 p.508.)
- Die Ursachen der Riffelbildung. („Elektr. Kraftbetriebe u. Bahnen“, Jg. 15. 1917.p.305—08.)
- Siedek, Rich., Die natürl. Normalprofile d. fließ. Gewässer. Wien 1902.
- Silbereisen, Bildung von Riffeln auf Fahrschienen. (Organ f. d. Fortschr. d. Eisenbahnwesens N. F. 57. Jg.p.116.1920.) (Notiz.)
- Sjuts, H., Über d. Bedeutung d. Verwitterung f. d. Umgestaltung d. Erdoberfläche. (Bonner Diss.) Lübecke 1907.
- Sölch, J., „Die Formung der Landoberfläche“. (Kende's Handbuch d. Geogr. I.1914.p.130—227.)
- Sokol, R., Die Flußterassen. (Geol. Rundsch. 12.1921.p.193—228; Lit.)
- Sokolów, N. A., Die Dünen. Bildung, Entwicklung u. innerer Bau. Dt. Ausgabe von A. Arzruni. Berlin 1894.
- Solger, F., Dünenbuch. (Kap. 1: Geologie der Dünen.) Stuttgart 1910.
- Studien üb. nordostdt. Inlanddünen. (= Forsch. z. dt. Landes- u. Volksk. XIX, 1.) Stuttgart 1910.
- Spethmann, Hans, Schneeschmelzkegel auf Island. (Zs. f. Gletscherk. 2. 1907/08.p.296—301.) (Anschließend p.301—03: E. Brückner über „Schneeschmelzkegel in den Alpen und Nieve Penitente“.)
- Entstehungsmöglichkeiten von Firnschalen. (Zs. f. Gletscherk. 4.1909/10. p.138—41.)

- Sprecher, F. W., Grundlawinenstudien. II. (Jahrb. Schweizer Alpenklub 1902. Bd. 37.p.219—43; 2 Taf. u. 2 Phot.) (Teil I in Bd. 35.)
- v. Staff, Hans, Wind u. Schnee. (Zs. dt. u. öst. Alpenver. 1906. Bd.37.p.45—56.)
- Sterzinger, Othmar, Zur Logik u. Naturphilosophie der Wahrscheinlichkeitslehre. Ein umfassender Lösungsversuch. Leipzig 1911 Xenienverl. (Zugl. Gießener Diss.)
- Stiný, J., Die Muren. Versuch e. Monogr. mit Berücksichtigg. d. Verhältnisse in d. Tiroler Alpen. Innsbruck 1910.
— Technische Geologie. Stuttgart 1922.
- Stoll, Otto, Zur Entstehung d. Strukturbodens in polaren Gebieten. (= Veröffentlich. d. Dt. Observatoriums Ebeltothafen-Spitzbergen, hsg. v. H. Hergesell, Lindenberg. Heft 7 p.3—14; mit 1 Taf. Braunschweig 1917 Vieweg.)
- Supan, Grundzüge d. phys. Erdkunde 6. Aufl. Leipzig 1916.
- Tarr, R. S. u. v. Engeln, O. D., Experimental Studies of Ice with Reference to Glacier Structure and Motion. (Zs. f. Gletsch. 9.1914/15. p.81—139.)
- v. Tein, M., Das Moselgebiet. (= Ergebnisse d. Untersuchung d. Hochwasser verhältnisse im dt. Rheingebiet. Heft VII.) Berlin 1905.
- Thomson, James, On the Origin of Windings of Rivers in Alluvial Plains. (Proc. Roy. Soc. Lo. XXV. 1876/77 p.5.)
— Experimental Demonstration in respect to the Origin of Windings of Rivers in Alluvial Plains. (Proc. Roy. Soc. Lo. XXVI.1877/78.)
- Thoroddsen, Th., Polygonboden und „thufur“ auf Island. (Pet. Mitt. 1913. II.p.253—55.)
- Toula, Frz., Schrämpfungsversuche. (Pet. Mitt. 1914 II.p.8—15, Taf. III—VIII, mit 24 Phot.)
- Tower, W. S., The development of cut-off meanders. (Bull. Am. Geogr. Soc. 36.1904.p.589—99.)
- Tschirwinsky, P. N., Schneedünen u. Schneebarchane in ihrer Beziehung zu äol. Schneeablagerungen im allgemeinen. (Zs. f. Gletscherk. 2. 1907/08 p.103—112.)
- Udden, J. A., The mechanical composition of wind deposits. (Augustana Library Publ. 1. 1898.)
- Uhlig, C., Vom Kilimandscharo zum Meru. (Zs. Ges. f. Erdk. Berlin 1904. p.632 ff.)
- Ule, W., Karreeboden. (Zs. Ges. f. Erdk. 1911 p.253—62.)
— Strukturboden in Norwegen. (Pet. Mitt. 1914.I.p.31.) (Notiz.)
— Polygonaler Strukturboden auf d. Hochland v. Norwegen. (Pet. Mitt. 1922. p.247f.)
- Verworn, M., Kausale u. konditionale Weltanschauung. 2. Aufl. Jena 1918 Fischer (1. Aufl. 1912.)
- Volz, W., Begriff des „Rhythmus“ in der Geographie. (Mitt. Ges. f. Erdk. Leipzig 1923—25, p.8—41, m. Abb.)
- Vujevič, Die Theiß. (= Penck's Geogr. Abhh. VII.4.1906.)
- Wagner, Georg, Die Landschaftsformen von Wttb. Franken mit besond. Berücksichtigg. d. Muschelkalkgebietes. (= Erdgeschichtl. u. landeskundl. Abhh. Tübingen H. 1.) Öhringen o. J. (1920) Rau.
- Wagner, Herm., Lehrb. d. Geogr. 10. Aufl. Bd. I, 2, Hannover 1922.
- Wallén, Axel, Les méandres des fleuves. (Geogr. Annaler 1920, Jg. II. p.263—65.)

- Walther, Johs., Das Gesetz der Wüstenbildung. 2. Aufl. Leipzig 1912. 4. Aufl. 1924.
- Wattmann, J., Ein Problem der Straße. (In: Jahrb. d. Urania f. d. J. 1918, Braunschweig 1918 Vieweg, p.96—120.)
- Weber, M., (Dresden), Untersuch. üb. d. Zus'hang d. Grundrißform u. d. Profilgestaltung d. Elbstromes. (Zs. f. Gewässererk. 1 1898.p.150—164, 321—37.)
- Wegener, Alfr., Studien über Luftwogen. (Beitr. z. Physik d. freien Atmosphäre. Bd. 2. Straßburg 1906—08.)
— Sind die Zyklonen Helmholtz'sche Luftwogen? (Met. Zs. 38. 1921. p.300—02.)
- Wentholt, L. R., Travaux d'amélioration des fleuves, canaux et nouvelles voies navigables en Hollande. (Assoc. perman. des congrès de navigation. Bull. Nr. 2. Juillet 1926.)
- Wentscher, Else, Geschichte d. Kausalproblems in d. neueren Philosophie. Preisschrift. Leipzig 1921.
- Werth, E., Fjorde, Fjärde u. Fjörden. (Zs. f. Gletscherk. 3. 1909.p.346—58.)
— Streitfragen z. Morphologie d. Küsten. (Mitt. Ferd. v. Richthofen-Tag 3. 1913. Berlin 1914.p.55—78.)
— Zur Oberflächengestaltung d. südschwed. Halbinsel. (Zs. f. Gletscherk. 8. 1913/14.p.343—48.)
— Das deutsch-ostafrikan. Küstenland. Berlin 1915. Bd. I. (p. 66ff. über Erdpyramiden.)
- Westman, J., Beob. üb. d. Wasseraustausch zw. d. Schneedecke u. d. Luft im mittelschwed. Tiefland. (Meddelanden fran Hydrogr. Byrån Nr. 5. Stockholm 1913.26S.)
- Wettstein, H., Die Strömungen des Festen, Flüssigen u. Gasförmigen u. ihre Bedeutung für Geologie, Astronomie, Klimatologie u. Meteorologie. Zürich 1880.
- White d'Alte Sellon, St. Pr., Die Wellenbildung auf d. Fahrfläche d. Schienen u. deren Ursache. (Annalen f. Gewerbe u. Bauwesen Bd. 74. 1914.p.189f.)
- Wichert, A., Obering., Riffelbildung durch Reibschwingungen. (Stahl u. Eisen. 41. Jg. 1921.p.1181—87.)
- Workman, William Hunter, A Study of Nieves Penitentes in the Himalaya. (Zs. f. Gletscherk. 2. 1907/08.p.22—28; 3. 1908/09.p.241—70.)
— A study of Nieve Penitente in Himalaya. Paper Nr. 2. (Reprinted from the „Zs. f. Gletscherk“. May 1909, with some additions.) London 1909 Spottiswoode. (27 S. u. 21 Taf.)
— The Hispar Glacier. (Geogr. Journ. 1910 p.105—32; mit 12 Abb. u. 1 K.)
— Features of Karakorum glaciers connected with pressure, especially of affluents. (Zs. f. Gletscherk. 8. 1913/14.p.65—103.)
— Nieve Penitente and allied formations in Himalaya, or surface-forms of Nève and Ice created or modelled by Melting. (Zs. f. Gletscherk. 8. 1913/14.p.289—330; mit Abb.)
— Physical characteristics of the Siachen Basin and Glacier System. (Geogr. Journ. 43. 1914.p.273—92; mit 9 Phot. auf 4 Taf.)
- Wråk, W., Sur quelques „Rasskars“ (couloirs d'éboulis) dans les escarpements des vallées glaciaires en Norvège. (Bull. Geol. Inst. Upsala XIII. 1916. p.287—98; mit Abb.)

- v. Zahn, G., Die zerstör. Arbeit d. Meeres an Steilküsten (nach Beob. in d. Bretagne u. Normandie). (Mitt. Geogr. Ges. Hamburg Bd. 24.1909. p.193—284.)
- Artikel „Flüsse“. (Handwrtb. d. Nat. Bd. 4. 1913. p.43—73.)
- Zell, E., Riffelbildung auf Straßenbahnschienen. (Stahl & Eisen 1913. p.1727—30.)
- Ziffer, E. A., Riffelbildung auf Schienenfahrflächen, Eisenschwellen u. Holzschwellen. (Mitt. d. Ver. f. d. Förderung d. Lokal- u. Straßenbahnwesens. 1913 p.179—202, 203—11.)
-

Personenregister.

- Adams 32.
Agassiz 177.
Ahlmann, H. W. 13. 16. 87—91. 95. 106.
134. 146. 153. 172. 199. 204. 211. 214.
217 f. 243 f.
Andersson, J. G. 290.
Andree, K. 16. 24. 163. 231. 236. 291.
Andrews, E. C. 215.
Arbenz 187. 190. 245. 261. 282 f. 308.
Archimedes 172.
Aristoteles 57.
Auerbach, F. 264. 268.
Ayrton, H. 173. 178. 184.
Banerji, S. K. 18.
Barclay 9. 28 f. 312.
Barkhausen 189. 227. 230. 232. 235 f.
Bartels, J. 218.
Baschin, O. 7. 36. 135 ff. 148. 160. 169.
171. 181. 184. 198. 207 f. 212. 216. 223.
227 f. 235.
Bauer, M. 281.
de Beaumont, B. 151. 186.
Becher, E. 172.
Behrmann 76. 135. 140. 181 f. 184. 186 f.
196. 198. 204. 207. 216.
Belgrand 72.
Bénard 119.
Bertololy 9. 14. 20—22. 151. 163. 172. 184.
Betz, A. 82. 275.
Beyer, O. 147. 152.
v. Bezold 293.
Bjerknes 273.
Blankenhorn, M. 283.
Blasius, H. 87. 188.
Bode, Rud. 249. 322.
Böhme, H. 217.
Boussinesq 154.
Brandt, B. 78. 197.
Braun, G. 72. 163. 179. 214. 286.
Bredig 231.
Brown, H. G. 137.
Brown, Rob. 266.
Brückner 108. 152.
Brunhes 145. 185. 215. 275. 294 f.
Burchard, O. 136.
Cairnes 78.
Calciati 94. 150. 212. 221. 296.
de Candolle 6. 8. 12. 17. 19. 30. 32. 38. 265.
Cayeux, L. 281.
Chaix, E. 295.
Chamberlin 150.
Le Chatelier 200. 320.
Chladni 13. 158.
Cholnoky 19. 28. 96. 164. 223. 238. 267.
Christen, T. 234.
Coffey, G. N. 32.
Cornish, V. 7 f. 12—22. 26—32. 44—47.
51—55. 87. 135. 160—165. 171. 233.
235. 258. 279. 284. 316.
Crammer 251. 281. 309.
Credner, W. 121.
Crugnola 153. 216.
Cvijić 148. 179.
Dahms, P. 24.
Darcy 80.
Darwin, Ch. R. 167. 187. 240.
Darwin, G. H. 7. 11. 16. 21. 164. 172 f. 184.
Daubrée 87.
Davis, W. M. 8. 66. 72 f. 141. 143. 150 f.
156. 169. 181. 198. 203. 208. 212. 214.
216—218. 241. 263. 307. 314.
Deecke 112. 243.
Dobrowolski 129.
Dodge 291.
Döll, A. 89.
v. Dormus 36 f.
Mc Dougal 32.
Dutton 192.
Eckert 144. 177. 245. 270. 283.
Einstein 193 f. 220.
Ekman 268. 270.
v. Engeln 199.
Engels, H. 17. 75. 80. 87. 90. 93. 94. 217.
222. 290. 292 f.

Escher, B. G. 283.
 Exner, F. M. 6. 17. 25. 97. 136. 160. 188.
 206. 212. 218. 221—225. 275 f. 279.
 Exner, Franz 169.
 Faber, E. 90.
 Fabre 95.
 Fargue 90.
 Fechner 320. 321.
 Fenneman 69.
 Fickeler, P. 282.
 Fischer, Th. 296.
 Fleury, E. 295.
 Forchheimer 233 ff.
 Forel, F. A. 10—15. 151. 160. 178. 211.
 Forel, O. L. 139.
 Foureau 275.
 Franklin, B. 57. 170. 227.
 Frauenfelder 87.
 Free 15. 18. 20. 23 f. 26. 32. 136. 147. 160.
 164. 183. 260. 268. 284. 310.
 Freundlich, H. 131.
 v. Frey, M. 237.
 Friedländer, J. 61.
 Frost 133. 137. 155 f. 181. 194. 197. 316.
 318.
 Früh, J. 99—102. 105. 108. 111. 136. 311.
 Galilei 149.
 Geinitz 295.
 Georgii, W. 271.
 Gibbs 268.
 Gilbert, G. C. 18.
 Girardon, H. 220.
 Glinka 158.
 Goerens 34. 35. 38.
 Goethe III, 25. 144. 149. 250.
 Götzingen 69. 78.
 Gradmann 244. 314.
 Graevell 81 f. 85.
 Gravelius 72. 144. 150 f. 215. 221.
 Gregory 168.
 Griggs, R. F. 222.
 Grubenmann 114.
 v. Grützner 230.
 Grund 244. 290. 308.
 Günther, S. 111. 145. 151 f. 154. 170 f.
 174—178. 186. 210 f. 231. 237. 244. 253.
 294. 303.
 Güßfeld 99.
 Häberle 147. 197. 246 f.
 Hagen, G. 97. 163.
 Hahmann, P. 7. 14—16. 22. 160. 164. 171.
 209. 265.

Halbfuß 15. 57. 270.
 Hamann, R. 133. 140. 209.
 Hamberg, A. 284.
 Hansen, A. 315.
 Hassert, K. 308.
 Hatschek 229.
 Hauthal 100—108. 159. 251.
 Hedin, Sven 9. 26 f. 32. 173. 282.
 Heim, Alb. 144. 177. 261. 281.
 Heim, Arn. 245. 308.
 Hellmann 105. 152.
 Helmholtz 7. 12. 48. 135. 137. 158. 160—
 165. 170—172. 181. 193 f. 205. 207 f.
 212. 228. 235. 271—274. 279.
 Henkel, L. 218.
 Heß, H. 112.
 Heßle, C. 80.
 Hettner 72. 132. 141—144. 148. 150. 213.
 216. 242. 294. 314.
 Hilgard 292.
 Hinks 164.
 Högbom, A. G. 145. 254.
 Högbom, B. 114—128. 130. 145 f. 200.
 241. 250. 260. 267. 285—290. 299.
 Högbom, J. 11. 21. 32. 209. 261.
 Hofmann, A. 223. 235.
 Honsell 88. 213.
 Hopf, L. 44. 83.
 Hunt, A. R. 14. 136.
 Huxley 185.
 Ichak 214.
 Jacob, Ch. 79.
 Jäger, Fr. 78. 99—108. 112. 159. 185. 305.
 309.
 Jaggard 66—70. 74. 151. 316.
 Jakowlew 129.
 Jasmund 76. 80. 87—91. 96 f. 232.
 Jefferson 250.
 Jessen, O. 140. 181. 184. 204. 238. 291.
 294.
 Johnson, D. W. 14. 58—65. 185. 187. 209.
 250.
 Jolles, C. A. 90.
 Jutson 168. 305 f.
 Kaiser, E. 21. 29. 147. 281. 304 f.
 Kammerer, P. 137. 139. 181 f. 198. 263.
 323.
 Kant 314.
 Kármán 207. 236. 275.
 Kassner, C. 104.
 Katzer 179.
 Kayser, Dr. ing., 34—39. 279.

- Kayser, E.** 144. 175. 208 f. 231. 244. 281.
 283. 293. 295. 299.
Keidel 99—101. 105. 107—109. 170. 184.
 189 f.
Keilhack, K. 32. 231.
Kesfler, P. 130. 147. 178. 196 f. 246 f. 251.
 282 f. 290. 302 f. 308.
King, H. 9. 15—18. 26 f. 32. 86. 158. 164.
 236. 269. 274.
Kittler 175. 177.
Klages, L. 249.
Klute 100. 102. 104 f. 109. 189. 300.
Köhler, Wolfg. 2 f. 31. 41. 62. 131. 134.
 186. 202. 249 f. 320. 322 f.
Köppen, W. 119. 121. 188.
Krebs, N. 73.
Krebs, W. 159.
Kreuter 80. 235.
Krümmler 15. 40—58. 160—165. 171. 207.
 210. 227 f. 231. 234. 313.
Kühn, F. 312.
Küster, E. 3. 7. 231. 250. 252. 310 f.
Kundt 13. 157.
Kurz, K. 293.
Lafontaine 196.
Lagally 294.
Lampa, A. 321.
Lane, A. C. 209.
v. Larisch-Moennich 42—58. 160 f. 165.
 171. 228.
Lehmann, F. W. P. 179. 296.
Lehmann, O. 69. 79. 155. 206. 212 f. 216.
Leibniz 320.
Liesegang 25. 54. 131. 211. 226. 229.
 250 f. 280. 293. 310 f. 313.
Linck 263.
Lippke 32. 79 f. 149.
v. Lóczy 96.
Lugeon 283 f.
Lyell, Ch. 173. 177.
Machatschek 72. 148. 172. 175. 179. 218.
 240. 245. 286. 299.
Märtens 34—38. 229.
Magnus, W. 123. 251.
de Martonne 71. 281.
Meinardus 113—125. 251. 288.
Meyer, Hans 99. 102—104. 107 f. 111.
Miethe, A. 116. 119—122.
Minard 97.
v. Mises, R. 82. 85.
Möller, H. P. 132. 310. 313.
Mortensen 181, 190. 237. 294. 296 f.
- Muncke** 160.
Nansen 32. 114. 117. 119. 125. 127. 251.
Nernst 131.
Neumann, R. 105.
v. Niedermayer, O. 127.
Noether, F. 82. 84.
Nordenskjöld 124 f. 284 f.
Oberhoffer 35.
Obst, E. 71 f. 78. 216.
Odell 185.
Odén, S. 115. 131.
Oettli 12. 28.
Ostwald, Wi. 123. 182. 187 f. 198. 205.
 229.
Otto, Th. 163. 259. 313.
Ovid 180.
Owens 18. 23. 86. 266. 317.
Panzer, W. 73. 243.
Páris 15. 42. 49—51.
Partiot 18. 88.
Passarge 72 f. 127. 141 f. 145. 150. 158.
 163. 181—185. 188. 241. 257. 267. 289.
 294.
Paulcke, W. 211. 317.
Penck, A. 76. 153. 207. 209. 213 ff. 218.
 240. 292.
Penck, W. 73. 141 f. 151. 156. 190. 198.
 289.
Peschel 154.
Petersen 36.
Petzoldt, J. 5. 320 f.
Philippi, E. 158.
Philippson 3. 17. 65. 68. 70. 72 f. 75—78.
 86. 98. 135. 141 f. 151. 153. 155 f. 168.
 172. 176. 179. 184—186. 198. 200—
 204. 207. 209. 216. 237—246. 255.—
 258. 279—282. 286—307.
Plateau 124.
Poppen, H. 238.
Prandtl 83. 85. 193 f. 218. 274.
Prelinger 280.
Prinz, G. 295.
Puppe 34.
Quincke 124.
Ratzel 175 f.
Rehbock 80—87. 220. 269. 275.
Reichert, F. 99. 112.
Rein, J. 154. 217. 221. 319.
Reynolds, O. 43 f. 81. 84.
Rhumbler, L. 139.
Richter, E. 299.
v. Richthofen 244.

- Roux, W. 198. 225. 250. 264. 321.
 Rühl 141. 150 f. 208. 216 ff.
 Rümelin 80. 211. 232—239. 315.
 Russell 170. 210.
 Ryd, V. H. 85.
 Salomon 243. 251. 257. 283. 290.
 Sander, E. 322.
 Sandström 212. 269 f.
 Sapper 106. 121—124. 241. 285, 288.
 317.
 Sauer 170. 174—177. 301.
 Schelling 139.
 Schen, E. 90.
 Scheuchzer 141.
 Schiller, L. 84.
 Schimper 137.
 Schmauß 136. 269. 280.
 Schmidt, Ad. 100.
 Schmitthenner 72. 289.
 Schnaß, F. 206.
 Schober, R. 80. 317.
 Schoklitsch 69. 82 f. 232. 234. 272.
 Schooneboom 300.
 Schopenhauer 183.
 Schott, G. 50. 52.
 Schoy 148. 151. 170. 189. 210.
 Schwarz 33 f. 39.
 Schwinner 192. 317 f.
 Seeliger 160. 228.
 Semper, M. 250. 314.
 Shaler 185.
 Sharma, R. K. 265.
 Sieber, K. 34—38.
 Siedek 74.
 Silbereisen 36.
 Simony 144. 177.
 Sjuts 142. 178. 244. 282. 301 f.
 Sölch 71. 80. 148. 196. 213 f. 240. 302.
 Sokol 210. 213 ff.
 Sokolow 11. 14—18. 24 f. 28. 32. 148. 153.
 157. 184 ff. 252—262. 266. 311. 313.
 Solger 11. 17. 26. 148. 163. 186. 200. 208.
 230. 237. 253. 258 f. 261 f. 291.
 Spethmann 99. 101 f. 109. 112.
 Sprecher, F. W. 287.
 v. Staff 28. 112. 258. 284.
 Stallo 320.
 Sterzinger 137.
 Stiny 154. 286 f.
 Stokes 161.
 Stoll 117. 119. 125. 128.
 Stutzer, O. 217.
 Supan 76—78. 90. 135. 142—145. 153.
 159. 179. 192. 210. 216. 291. 295.
 Tarr, R. S. 199.
 v. Tein 90. 206.
 Thomson, J. 222 f.
 Thorade 39.
 Thoroddsen 115—120. 260.
 Tounla, F. 211.
 Tower, W. S. 90. 95. 222.
 Trabert 192.
 Traube 267.
 Trey, F. 271.
 Tschirwinsky 32.
 Tveten, A. 106.
 Tyndall 226.
 Udden 15. 274.
 Uhlig 112.
 Ule 116—125. 251. 281. 288.
 Verworn 300. 315 f. 321.
 Volz, W. 270.
 Vujevic 97. 134. 218.
 Wagner, Gg. 90. 92.
 Wagner, Herm. 150. 174. 191 f. 214.
 Walther, J. S. 22. 27. 29. 32. 127. 146 f.
 185. 267. 283. 298. 311.
 Walzel, O. 317.
 Wattmann 33. 37.
 Weber, Gebr. 40. 170. 207. 221.
 Weber, M. 90. 92.
 Wegener, A. 183. 273. 275.
 Wegener, K. 119.
 Wentholt, L. R. 90.
 Wentscher, E. 183. 320.
 Werth, E. 152 f. 177. 285.
 Westman, J. 112.
 Westphal, R. 139.
 Wex 97.
 White d'Alte Sellon 35.
 Wichert 34 ff. 227.
 Wiemayer, Th. 139.
 Windelband 130.
 Wolff, C. Fr. 169.
 Workman 99—103. 109—112. 147. 151.
 168. 175. 252.
 Wråk, W. 288.
 v. Zahn 154. 244.
 Zell, E. 38.
 Ziffer, E. A. 33.

Sachregister.

- Abformung 2. 12 f. 156 ff. 272.
 Abrasion s. Küstenbuchten!
 Aggregatzustand 131 f.
 Analyse s. Kausalanalyse!
 Anlaufeld 53. 69. 233. 259. 310. 313.
 Ansatzkerne s. Hindernisse, kleine!
 Åsar 285.
 Auffrieren von Steinen etc. 23. 118. 267.
 Ausformung s. Selektion!
 Barchane (s. a. Dünen!) 26 ff. 87. 137. 148.
 153. 179. 252. 261. 311 ff.
 Bodenfluß s. Erdfließen!
 Buchten s. Küstenbuchten!
 Büßerschnee 98 ff. 148. 152. 159. 170. 176.
 179. 184 f. 189 f. 251. 271. 300 ff. 311.
 Deduktion (s. a. Kausalanalyse, s. a.
 Mechan. Erklär.) 140 f. 149 f. 156. 208 f.
 263. 271. 314 ff.
 Dellen s. Ursprungsmulden!
 Deltaformen 291 f.
 Diskontinuität s. Unstetigkeitsfläche!
 Dolinen (s. a. Wannen!) 148. 179. 203.
 244. 303 f. 308.
 Drumlin 215. 254.
 Dünen (s. a. Rippelmarken!) 3. 6 ff. 25 f.
 152 f. 160. 170 ff. 173. 179. 181 f. 184 f.
 186. 196. 200. 209. 230. 237. 253. 257.
 260 f. 284. 289. 310 f. 313. 320.
 Eis, fließendes 76 f., 145. 152. 199. 237.
 256 f. 294.
 Elektrizität 16. 269.
 Energieverwendung 213 ff.
 Entropie s. Stabilität!
 Entwicklungsprinzip 4. 122. 150. 167 ff.
 179. 216 ff. 274. 278. 305. 307 f.
 Erdfließen (s. a. Strukturboden!) 237.
 241. 251. 267. 285 ff. 288 ff. 323.
 Erdpyramiden 170. 173 ff. 178. 260. 270.
 282. 301.
 Erosion, rückschreitende 77 f. 144. 201.
 203. 299.
 Erosionstrichter s. Ursprungsmulden!
 Exogen (Begriff) 141 ff. 241 f.
 Experiment (Bedeutung) 66. 97. 222.
 316 f.
 Fältelung 210 f.
 Felsschüsseln (s. a. Dolinen, s. a.
 Wannen!) 159. 196. 246. 302 ff. 308.
 Finalität s. Stabilität!
 Firnschalen (s. a. Büßerschnee, s. a.
 Felsschalen!)
 Flattern der Fahnen 136. 194. 207. 235 f.
 275.
 Fließerde s. Erdfließen!
 Fließvorgang (s. a. Mäander!) 79 ff. 149 ff.
 190 ff. 201. 232 ff. 269. 272. 275. 286. 291.
 317. 319.
 Flußnetz 65 ff. 150 f. 153 ff. 156. 168. 188.
 190 f. 203. 209. 237 f. 242 f. 261. 281 f.
 289 f. bsd. 290 ff. 305. 309.
 Flußwindungen s. Mäander!
 Formenreihe (s. a. Übergangsformen!)
 101. 168 f. 178 ff. 202 ff. bsd. 307—313.
 Formtendenzen (s. a. Kymatologie!)
 132 ff. 264. 323 f.
 Furchen s. Rillen!
 Genetische Methode s. Entwicklungs-
 prinzip!
 Geographie 130.
 Geologie 130.
 Geschiebe (Bewegungsformen) 86 ff.
 188. 254 f.
 Gestalttheories. Selbstdifferenzierung!
 Gestaltungsgesetz s. Formtendenz u. s.
 Kymatologie!
 Gesteinswaben 147. 162. 158. 177. 185.
 246. 251. 302.
 Geysir 231.
 Gezeitentiefs s. Prielsysteme!
 Gleichgewicht s. Stabilität!
 Gletscher s. Eis, fließendes!
 Gravitation 110 f. 118. 141 ff. 219. 241.
 263 ff. 267. 276. 308. 316.
 Grundlawinen 286 f.

- Haftspannung (s. a. Reibung!) 199.
226 ff. 238.
- Häufung 137 f. 197 f.
- Helmholtzsche Wellen s. Helmholtz!
- Hindernisse, Theorie der kleinen ~ 4.
9 ff. 34. 40. 59. 63 f. 65 f. 82. 84. 103.
121 ff. 150 f. 154. 164. 167 ff. bsd. 172 ff.
177. 180. 181 f. 184. 187 f. 193. 204 f.
215 ff. 232. 250. 252 ff. 257. 260 f. 288.
299. 302. 305. 309 f.
- Hindernisformen 3. 9. 158. 174. 178. 186.
236. 253 ff.
- Hügelmoränen 110. 118. 147. 268. 301.
- Individuation 154 f.
- Intensitätsgang s. Verlaufskurve!
- Interaktion 300.
- Isostasie 192.
- Kare 298 f.
- Karren (s. a. Rillentypus!) 144. 159. 177.
179. 187. 240. 244 f. 261. 270. 281 ff.
290. 301 f. 308.
- Kausalanalyse. 140 f. 168. 314 ff.
- Kausalproblem 4 f. 156 f. 182 f. 200 f.
318 ff.
- Kesseltypus s. Nischentypus u. s. Stru-
deltöpfe!
- Klangfiguren 13. 157 f.
- Kolloidphysik 7. 25. 107. 113. 115. 131.
178. 211. 226. 229. 250 f. 280. 310 f. 313.
- Kraftbegriff 135. 183. 213 ff. 223. 323 f.
- Kreisförmige Gebilde 133 f. 264. 276.
278. 323 f.
- Küstenbuchten 64 f. 146. 153. 186. 204.
209. 237. 243 f. 294. 295 ff.
- Kymatologie 7. 36. 71. 85. 135 ff. 160.
164. 197 f. 206. 212. 235.
- Labilität 188. 274.
- Lichtenbergische Figuren 293.
- Liesegang'sche Ringe s. Liesegang u.
s. Kolloidphysik!
- Luftwogen s. Wolkenrippeln!
- Mäander 39. 85 ff. 134. 136. 160. 169. 172.
182. 201. 206 ff. 224 f. 252. 294. 309. 317.
319.
- Mathematik 315.
- Mechanistische Erklärungen 140 ff.
143 ff. 149 ff. 156 ff. 166 f. 168 f. 171. 177.
214. 221. 249 f. 273. 318 ff.
- Muren 286.
- Nischentypus 295 ff.
- Oberflächenspannung 133 f. 263 ff. 276.
278. 300.
- Pendelnde Bewegung 94. 212. 221 ff.
235. (237 f.) 319.
- Penitente s. Büßerschnee!
- Periodizität 43 ff. 138 f. 160 f. 164. 225 ff.
238. 248. 274 f.
- Perpetuum mobile 182. 184. 203. 214.
- Pfannen 168. 185. 305 ff. 309.
- Phase 248. 268 f. 277.
- Polarität 139. 182.
- Polygonboden s. Strukturboden!
- Prielsysteme 238. 290 ff. 294.
- Pulsationen 211 f. 232 ff. 236. 239.
- Quellnischen s. Ursprungsmulden!
- Raßkars s. Steinschlagrinnen!
- Reibschwingungen 227.
- Reibung, Theorie der ~ 1. 5. 6 f. 12. 16.
19. 30 f. 34 ff. 37 f. 41. 44 ff. 57 f. 79. 83 f.
88. 92 f. 95 f. 103 ff. 106 f. 109. 113. 114 ff.
131 f. 176. 192. 199. 215. 226. 264 ff. 273 f.
276. 304. 321 ff.
- Rhythmus (Begriff) 3. 71. 138 f. 209. 225.
249. 322.
- Riffeln s. Rippelmarken u. s. Schienen-
riffeln!
- Rillentypus (Rinnen-, Furchentypus) 71.
111. 153 f. 190 f. 251. 280 ff. 301 f. 308 f.
- Rinnensysteme, glaziale 152. 177. 256.
279. 285.
- Rippelmarken (Rippeltypus) 6 ff. 87.
109. 111 f. 151. 158. 159 ff. 163 ff. 170 ff.
173. 178. 181 f. 184. 208. 211. 227. 236.
265 f. 275. bsd. 279 f. 310. 313. 316 f.
- Rippung der Gehänge 246.
- Rundhöcker 145. 255.
- Runzelung s. Fältelung!
- Sandriffe 163.
- Schalentypus s. Felsschüsseln u. s.
Wannen!
- Schichtung 226. 251. 280.
- Schienenriffeln 33 ff. 227. 229. 279.
- Schüsseln s. Felsschüsseln u. s. Wannen!
- Schüttelversuche 118. 267.
- Schutzdecke 23. 91. 93. 110. 176 f.
- Seitenerosion (s. a. Mäander!) 134 f. 213 f.
223.
- Selbstdifferenzierung 1 ff. 41 f. 49. 61 f.
64. 66. 68. 74. 84. 85 ff. 94. 103 f. 106 f.
121 ff. 126. 161 f. 164. 169. 172 f. 176 f.
187 f. 199 f. 202 f. 208 f. 226 f. 229 f. 240.
241. 245 ff. bsd. 248 ff. 262 f. 270. 277.
285 f. 288. 296 f. 300. 302. 304. 312. 320 ff.
- Selbstregeneration 8. 97.

Selbstverstärkung 4. 140. 165. 171 f.
180 ff. 204 f. 213. 216. 220. 274.
Selektion (Ausformung) 36. 111 f. 143.
158 f. 163 f. 199 f. 209 f. 240 ff. 247 f.
296. 302.
Serie, Gesetz der ~ 137 f. 198.
Spannungen, innere 111. 114. 125 ff. 132.
248.
Spiegelschwankungen 223 f. 234 f.
Spiralformen 137. (195) 211. 294. 311.
Springquellen 231.
Sprungwelle 231.
Stabilität 5. 23 f. 30 f. 45. 47. 50 ff. 75. 86.
95 ff. 104. 114 ff. 126. 168. 186 ff. 193.
200 f. 212 ff. 263 ff. 268. 271 f. 276. 304.
305. 308. 312. 319 ff.
Staubfiguren 13. 157 f.
Steigerung s. Selbstverstärkung.
Steinringe usw. s. Strukturboden!
Steinschlaggrinnen 245 f. 287 f.
Störungen s. Hindernisse!
Stoff als Einteilungsprinzip 32. 129 ff.
Strandspitzen 58 ff. 153. 185 f. 209. 250.
295.
Strudeltöpfe 158. 185. 215. 246. bsd. 295.
303.
Strukturboden 113 ff. 185. 188. 200. 241.
250 f. 260. 267. 308.
Stufen, glaziale 256. 279.
Systeme, physikalische s. Selbstdiffe-
renzierung!
Taltrog, glazialer 76 f.
Texturboden 114. 125 ff.

Transponierbarkeit 132. 316.
Turbulenz s. Fließvorgang!
Übergangsformen (s. a. Formenreihe!)
8 f. 19. 26 f. 71. 114. 124 f. 168. 178 f.
244. 278. 301. 305. bsd. 307 ff.
Unstetigkeitsfläche 251. 268 ff. 271 ff.
311.
Ursprungsmulden(-trichter) 70. 207. 246.
286 ff. 289. 297. 299.
Vegetation, Rolle der ~ 174 f. 185 f. 257
— 262. 263.
Verlaufskurve 182. 195 ff. bsd. 198 ff.
205.
Verzweigungsformen (s. a. Flußnetz!)
290 ff.
Wabenverwitterung s. Gesteinswaben!
Wanderwellen 233 f.
Wannen (s. a. Felsschüsseln!) 147. 159.
244. 302 ff. 308.
Wasserwalzen 269.
Wasserwellen 6. 7. 31 f. 39 ff. 160 ff. 165.
170 f. 188. 193 f. 207 ff. 210 f. 227. 230.
270. 279. 312 f. 319.
Wechselwirkung s. Selbstverstärkung!
Wellenglättung 19. 29 f. 57 f. 268.
Windkorrasion 146 f. 185. 298.
Wirbel 20 f. 144. 164 f. 171 f. 183. 184 f.
207. 215. 236 f. 271 ff. 277. 295.
Wolkenrippeln 7. 270 ff. 277. 279. 284.
Zentrifugalkraft 134. 172. 216. 217 ff.
223. 225.
Zyklus s. Formenreihe!