

# Grundlagen und Geräte technischer Längenmessungen

Von

**Prof. Dr. G. Berndt**

Direktor des Instituts für Meßtechnik und Grundlagen des  
Austauschbaues an der Technischen Hochschule Dresden

Mit einem Anhang

von

**Dr. H. Schulz**

Privatdozent a. d. Techn. Hochschule  
Berlin

Zweite

vermehrte und verbesserte Auflage

Mit 581 Textabbildungen

**Berlin**

Verlag von Julius Springer

1929

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung  
in fremde Sprachen, vorbehalten.

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1929

Copyright 1929 by Julius Springer in Berlin.

**ISBN 978-3-642-50368-9**

**ISBN 978-3-642-50677-2 (eBook)**

**DOI 10.1007/978-3-642-50677-2**

## Vorwort.

Der heute fast auf allen Gebieten durchgeführte Austauschbau verlangt Werkstücke, die das vorgeschriebene Maß innerhalb sehr enger Grenzen innehalten. Zu ihrer Kontrolle — und somit auch zur Erreichung des Zieles einer völligen Austauschbarkeit — werden Meßgeräte gebraucht, die naturgemäß wesentlich genauer sein müssen als die zugelassenen Toleranzen der Werkstücke. Die Meßgeräte müssen nun ihrerseits durch andere kontrolliert und eingestellt werden, an deren Genauigkeit wieder entsprechend höhere Ansprüche zu stellen sind. So kommt es, daß die als letzte Normale in der Technik dienenden Endmaße ihre Größe bis auf wenige Zehntausendstel Millimeter innehalten und selbst auf mindestens Hunderttausendstel Millimeter gemessen werden müssen. Die Einheit des technischen Meßwesens ist dadurch heute das Tausendstel Millimeter, das Mikron oder My ( $\mu$ ), geworden und in die Fabriklaboratorien haben die wissenschaftlichen Meßmethoden, die früher auf wenige, besonders dafür eingerichtete Institute beschränkt waren, in immer weiterem Umfange Eingang gefunden. Namentlich in etwa den letzten zehn Jahren hat sich die industrielle Meßtechnik in ungeahntem Maße entwickelt. Eine große Reihe neuer Meßgeräte ist entstanden, die vor allem durch die Verwendung optischer Methoden (Lupe, Mikroskop und Fernrohr) und, für die feinsten Messungen, durch die Benutzung der Interferenz des Lichtes gekennzeichnet sind.

Einen Überblick über die wissenschaftlichen Grundlagen der Meßtechnik und über die für das technische Meßwesen geeigneten Geräte zu geben, war das Ziel der ersten, im Jahre 1921 erschienenen Auflage und ist auch — unverändert — das der jetzt vorliegenden geblieben.

Es wird deshalb gezeigt, wie erst nach Überwindung großer Schwierigkeiten eine allgemein anerkannte und wohlgegründete Maßeinheit, das Pariser Urmeter, geschaffen wurde, neben dem noch in einigen Ländern das Imperial Standard Yard besteht. Die beiden folgenden Abschnitte beschäftigen sich mit den Maßnormalen, den Strich- und Endmaßen, sowie ihrer Messung, wobei namentlich die interferentiellen Methoden, ihrer großen industriellen Bedeutung wegen, eine ausführliche Behandlung erfahren haben. Die zwei letzten Abschnitte befassen sich mit den für die Messung der einzelnen Größen nötigen Hilfsgeräten, die unterteilt sind in solche mit Maßangabe (wie Schieblehren u. ä., Fühlhebel, Schraublehren und Meßmaschinen) und in feste Lehren, denen noch ein Abschnitt über Lineale, Tuschier- und Anreißplatten angeschlossen ist.

In einem Anhang wird dann noch auf zwei Fragen eingegangen: die bei jeder Beobachtung unvermeidlichen physiologischen Fehler und ferner die Zurückführung des Meters auf die Wellenlänge des Lichtes, die notwendig ist, um die Längeneinheit zu sichern und sie von allen, jeder körperlichen Darstellung drohenden Zufälligkeiten unabhängig zu machen.

Durchweg war es das Bestreben, die verschiedenen Meßmethoden und -geräte auch kritisch zu würdigen. Ein großer Teil der dafür als Grundlage dienenden Arbeiten beruht auf eigenen Forschungen oder ist aus dem „Institut für Meß-

technik und Grundlagen des Austauschbaus“ hervorgegangen, das am 1. Oktober 1924 an der Technischen Hochschule Dresden gegründet wurde, aus der Erkenntnis heraus, daß eine wissenschaftliche Vertiefung und kritische Bearbeitung des technischen Meßwesens und der damit im Zusammenhange stehenden Fragen an einer besonders damit betrauten Stelle unbedingt notwendig ist. Daß auch die (auf viele Fachzeitschriften zerstreute) Literatur eingehend verarbeitet wurde, beweist wohl am besten das umfangreiche Literaturverzeichnis, auf das durch die eingeklammerten Zahlen verwiesen ist. Die Literatur wurde bis etwa Oktober 1928, gelegentlich auch noch darüber hinaus, berücksichtigt.

Bei dem starken Anwachsen des Stoffs ließ sich — trotz weitgehender Beschränkung — eine erhebliche Vermehrung des Umfanges gegenüber der ersten Auflage nicht vermeiden, zumal auch die Wiedergabe einer größeren Zahl von Abbildungen notwendig erschien. Die einzelnen Abschnitte sind durchweg neu bearbeitet und systematischer gestaltet; besonders gilt dies für das Kapitel „Feste Lehren“, bei denen die DI-Normen in weitem Maße berücksichtigt sind<sup>1</sup>. Aber auch sonst sind die vorgenommenen Umänderungen und Erweiterungen derart, daß die vorliegende Auflage im Grunde ein neues Werk darstellt.

Wenn auch die Meßtechnik ständig fortschreitet und durchaus noch nicht am Ende ihrer Entwicklung steht, so liegen doch ihre Grundlagen und die wichtigsten Anwendungen, sowie auch die dabei benutzten Geräte heute im wesentlichen fest. Trotzdem möchten wir es uns nicht versagen, den zur ersten Auflage ausgesprochenen Wunsch zu wiederholen, daß das vorliegende Werk mit-helfen möge zur kritischen Erziehung; dann wird auch die leider noch gelegentlich anzutreffende Unsitte der Angabe übertriebener und kaum innezuhaltender Genauigkeiten verschwinden, denen der Käufer nur deshalb zum Opfer fällt, weil er fast nie in der Lage ist, die Zahlen nachzuprüfen. Das, was die Technik braucht, muß selbstverständlich auch von den Meßwerkzeugen erfüllt, der „Genauigkeitsfimmel“ aber so scharf, wie nur immer möglich, bekämpft werden. Mit diesem Wunsch wenden wir uns nicht nur an die eigentlichen Meßtechniker, sondern an alle, die als Hersteller und Verbraucher mit der Industrie in Beziehung stehen, besonders auch an die studierende Jugend der Technischen Hoch- und Mittelschulen, denn sie ist vor allem dazu berufen, die bisher geleisteten Arbeiten auf den Gebieten der Meßtechnik und der mit ihr eng verbundenen Normung einmal möglichst restlos in der Praxis zur Geltung zu bringen.

Dresden und Berlin-Lichterfelde, Neujahr 1929.

**Berndt. Schulz.**

---

<sup>1</sup> Der Abdruck der Normenblätter wurde freundlicherweise vom Deutschen Normenausschuß gestattet, wofür ihm auch an dieser Stelle gedankt sei. Verbindlich für die Angaben bleiben stets die DIN-Blätter in ihrer jeweils letzten Ausgabe, die durch den Beuth-Verlag GmbH., Berlin S 14, Dresdener Str. 97 zu beziehen sind.

# Inhaltsverzeichnis.

## I. Die Entwicklung des Meßwesens.

	Seite
A. Einleitung . . . . .	1
Wichtigkeit des Meßwesens und einer gesicherten Maßeinheit für den Austauschbau	1
B. Die Entwicklung der Längenmaße . . . . .	2
Weg- und Längenmaße im Altertum. S. 2. — Schaffung von Prototypen. S. 3. — Sicherung des Meßwesens. S. 3.	
C. Die Entwicklung des metrischen Systems . . . . .	4
1. Frankreich . . . . .	4
Toise du châtelet. S. 4. — Toises du Pérou und du Nord. S. 5. — Toise du Pérou als Prototyp. S. 5. — Beschlüsse der Konstituierenden Versammlung. 1790/91. S. 6. — Gradmessung von Delambre und Méchain. S. 7. — Mètre des archives. S. 7. — Das Meter ist keine natürliche Einheit. S. 7. — Einführung des Meters in Frankreich. S. 7.	
2. Deutschland . . . . .	7
Die verschiedenen deutschen Maße. S. 7. — Preußisches Maßsystem. S. 8. — Sachsen, Westfalen. S. 9. — Einführung des Meters in Deutschland. S. 9.	
D. Die Meterkonvention . . . . .	9
Antrag v. Baeyer auf Schaffung einer europäischen Maß-Behörde. S. 9. — Inter- nationale Meterkonvention; Bureau International, Comité International, Confé- rence Générale des Poids et Mesures. S. 10. — Ausbreitung des metrischen Systems. S. 11.	
E. Das internationale Urmeter . . . . .	11
1. Die Herstellung des Urmeters . . . . .	11
Meßraum. S. 11. — Ausbildung als Strichmaß. S. 12. — Werkstoff. S. 13. Ge- schmolzener Quarz. S. 13. — Durchbiegung der neutralen Schicht. S. 13. — Besselsche Punkte. S. 14. — Querschnitt. S. 14. — Längenänderung bei ver- schiedenen Unterstützungen. S. 15. — Ausführung des Urmeters. S. 16.	
2. Das Urmeter . . . . .	16
Definition; Aufbewahrung. S. 16. — Ausdehnungskoeffizient. S. 16. — Normale des Bureau Intern. d. Poids et Mesures. S. 17. — Anscheinende Änderung des Meters. S. 17. — Zurückführung des Meters auf die Wellenlänge der roten Cad- miumlinie (bzw. der gelbgrünen Kryptonlinie). S. 17. — Deutsches Prototyp. S. 18. — Deutsches Endmaßprototyp. S. 18.	
F. Das technische Maßsystem . . . . .	18
Bezugstemperatur 0° des Urmeters. S. 18. — Ungeeignetheit von 0° für die Technik S. 19. — Bezugstemperatur 20° für technische Messungen. S. 19. — DIN 102: Bezugstemperatur. S. 20. — DIN 524: Normaltemperatur. S. 20. — Erläute- rungen zu DIN 102. S. 21. — Bezugstemperatur in anderen Ländern. S. 21.	
G. Das Zollsystem . . . . .	21
1. Das englische Zollsystem . . . . .	21
Älteste Definition des Zoll. S. 21. — Entwicklung bis 1824. S. 21. — Verlust des Prototyps 1834. S. 22. — Das neue Imperial Standard Yard. S. 22. — Konstanz des Imperial Standard Yard. S. 23. — Verhältnis zum Meter. S. 24. — Wert des Zoll bei 20°. S. 25. — DIN 890 bis 893: Umrechnung von Zoll in mm. S. 25.	
2. Das amerikanische Zollsystem . . . . .	25
Ältere Einheiten. S. 25. — Anschluß an das neue Imp. Standard Yard 1856. S. 26. — Zulassung des metrischen Systems 1866. S. 26. — Erklärung des Meters als Grundeinheit 1893. S. 26. — Wert des amerikanischen Zoll. S. 26. — Vor- schläge für die Zurückführung des englischen und des amerikanischen Zoll auf das Meter und die Lichtwellenlänge. S. 27.	

	Seite
H. Die staatliche Regelung des Meßwesens in Deutschland . . . . .	27
1. Maß- und Gewichtsordnung . . . . .	27
Aufgaben der Behörde. S. 27. — Maß- und Gewichtsordnung. S. 28.	
2. Die Eichordnung . . . . .	30
Eichordnung. S. 30. — Eichung und Beglaubigung. S. 30. — Eichung der Geräte für die Bezugstemperatur 20°. S. 30. — Besondere Bestimmungen für Längenmaße. S. 30. Fehlergrenzen. S. 31. — Behörden in anderen Staaten. S. 32.	
J. Die Entwicklung der technischen Messungen . . . . .	32
Bearbeitungsschwierigkeiten in früherer Zeit. S. 32. — Beginn des Austauschbaus für die Heeresausrüstung. S. 33. — Whitney. S. 33. — North. S. 33. — Austauschbau in europäischen Waffenfabriken. S. 34. — Austauschbau in anderen Industriezweigen. S. 34. — Einfluß der Entwicklung der Werkzeuge, Werkzeugmaschinen und Meßgeräte. S. 34. — Benutzung von Normallehren. S. 35. — Grenzlehren. S. 35. — Aufstellung von Toleranzsystemen. S. 35. — Gründung des DNA. S. 35. — Die DIN-Passungen. S. 35. — Beziehungen zwischen Normung und Meßtechnik. S. 36.	

## II. Strichmaße und ihre Messung.

A. Strichmaße . . . . .	36
1. Holz- und Gelenkmaßstäbe . . . . .	36
Vorteile der Strichmaße. S. 36. — Gelenkmaßstäbe. S. 36. — Holzmaßstäbe. S. 37. Keine $\frac{1}{2}$ -mm-Teilung. S. 37. Einfluß des Abstandes der Teilungs- von der Zeichnungsebene (Parallaxe). S. 37. — Einfluß von Temperatur und Feuchtigkeit. S. 38. Zelluloid und Elfenbein. S. 38.	
2. Stahlmaßstäbe . . . . .	38
Länge der mm-Teilung. S. 38. — DIN 866: Arbeitsmaßstäbe. S. 39. Bestimmung der Fehler. S. 40. — DIN 864: Vergleichsmaßstab. S. 41. — DIN 865: Prüfmaßstab. S. 42. — Auflagerung, günstigste Punkte. S. 43. — Unterstützung in mehreren Punkten. S. 45. — Beispiele für verschiedene Auflagerung. S. 45.	
3. Andere Werkstoffe . . . . .	46
Ausdehnung. S. 46. — Verwendung verschiedener Metalle. S. 47. — Invar und Indilatan. S. 48. — Hysteresis von Invar, Glas und geschm. Quarz. S. 48. — Glas und Quarz. S. 49. — Mittlerer Fehler. S. 49. — Mittlerer Einstellfehler. S. 50. — Herstellung. S. 50.	
4. Bandmaße . . . . .	50
Leinen. S. 50. — Stahl. S. 51. — Durchhang. S. 51. — Messung. S. 52.	
B. Komparatoren . . . . .	52
1. Visier-Instrumente . . . . .	52
Stangenzirkel. S. 52. — Kimme und Korn. S. 53. — Mikroskop. S. 53. — Okular-Schraubenmikrometer. S. 53. — Vergrößerung des Mikroskops. S. 54. — Okulare. S. 54. — Fokussierungsfehler. S. 55. — Okular-Spiralmikrometer. S. 55. — Okularmikrometer mit Skala auf schiefer Ebene. S. 56. — Strichplatte. S. 56.	
2. Messung von Strichmaßstäben . . . . .	56
Justierung der Mikroskope. S. 56. — Kippungsfehler. S. 57. — Vorsichtsmaßregeln bei der Messung. S. 58.	
3. Komparatoren . . . . .	58
Schema des Transversalkomparators. S. 58. — Komparatorsaal der PTR. S. 59. — Transversalkomparator der PTR. S. 60. — Messung auf dem Transversalkomparator. S. 60. — Schema des Longitudinalkomparators. S. 61. — Abbe'sches Prinzip. S. 61. — Brinellmikroskop. S. 63. — Universal-Projektor. S. 63. — Messung auf dem Longitudinalkomparator. S. 64. — Transversalkomparator zur Messung der Längenänderungen beim Härten. S. 64. — Ermittlung von Lochabständen. S. 64.	

## III. Endmaße und ihre Messung.

A. Endmaße . . . . .	64
1. Endmaße mit Kugel- und Zylinderflächen . . . . .	64
Kugelendmaße. S. 64. — Stahlkugeln als Endmaße. S. 65. — Abplattung von Kugelflächen. S. 65. — Abplattung von Zylinderflächen. S. 67.	
2. Die Entwicklung der Parallelendmaße . . . . .	68
Frühere Endmaße. S. 68. — Einfluß des Meßdrucks. S. 69. — Erste Endmaße von Johansson. S. 69. — Haftkräfte von Endmaßen. S. 69. — Ansprengen und Anschieben. S. 70. — Reinigung von Endmaßen. S. 70. — Zwischenschicht. S. 71.	

	Seite
3. Werkstoff und seine Behandlung . . . . .	73
Anforderungen an den Werkstoff. S. 73. — Änderung des Gefüges und der inneren Spannungen. S. 73. — Einfluß des Chromzusatzes. S. 74. — Zusammensetzung von Endmaßstähen. S. 74. — Einfluß des Siliziums und des Mangans. S. 75. — Bewährte Stähle. S. 75. — Einfluß der Form. S. 76. — Natürliche Alterung. S. 76. — Künstliche Alterung durch Anlassen. S. 76. — Künstliche Alterung durch andere Verfahren. S. 77. — Vorschriften für Künstliche Alterung. S. 77. — Beobachtete Längenänderungen. S. 78. — Härtung nur an den Enden. S. 78. — Nitrieren. S. 78. — Verchromen. S. 79. — Stellit. S. 79. — Quarz und Glas. S. 79. — Abnutzung von Endmaßen. S. 79. — Abnutzung von Lehren. S. 80. — Korrosion der Endmaße. S. 81. — Herstellung von Endmaßen. S. 81.	
4. Endmaßsätze . . . . .	82
Anordnung der Sätze. S. 82. — Zusammensetzung eines bestimmten Maßes. S. 82. — Sätze mit möglichst wenigen Endmaßen. S. 83. — Endmaße mit kreisförmigem Querschnitt. S. 84. — Stich- und Strichmaße aus Endmaßen. S. 84. — Temperaturschutz. S. 84. — Regeln für die Herstellungsgenauigkeit. S. 85. — Unterteilung der Fehler auf die einzelnen Dezimalen. S. 86. — Gebrauch der Endmaße. S. 86. — Auflage der Endmaße. S. 87. — Beispiele für verschiedene Auflagerung. S. 88. — Verbindung größerer Endmaße. S. 89.	
5. Zubehör und Verwendung von Endmaßen . . . . .	89
Rachenlehren aus Endmaßen. S. 89. — Klammern dafür. S. 90. — Auflagestühle. S. 90. — Halbzylinderschnäbel für Bohrungsmessungen. S. 91. — Messerschnäbel zum Messen von Nuten. S. 91. — Zentrier- und Anreißspitzen. S. 92. — Höhenreißer. S. 92. — Prüfung der Höhenlage und von Lochabständen. S. 93. — Endmaße an Werkzeugmaschinen. S. 94.	
6. Genauigkeit der Endmaße . . . . .	94
Frühere Genauigkeit. S. 94. — DIN 861. Begriffe. S. 94. — Genauigkeit. S. 96. — Gestaltung. S. 98. — Beschriftung. S. 101. — Werkstatt-Endmaße. S. 101.	
B. Messung der Endmaße durch Vergleich mit Strichmaßen . . . . .	101
Methode von Fizeau. S. 101. — Einfluß der Fokussierungsfehler. S. 102. — Anschiebezylinder. S. 102. — Angesprengte Strichendmasse. S. 104. — Vergleich nach der Lichtspaltmethode. S. 105. — Ebenheit und Parallelität. S. 105. — Optische Methoden zur Bestimmung der Parallelität. S. 105.	
C. Interferenzkomparatoren . . . . .	107
1. Interferenzen gleicher Dicke . . . . .	107
Lichtwelle, Elongation, Amplitude, Phase, Wellenlänge, Phasenwinkel, Fortpflanzungsgeschwindigkeit, Schwingungszahl. S. 107. — Brechung und Reflexion. S. 108. — Interferenzprinzip. S. 108. — Zusammensetzung von Wellen. S. 108. — Interferenzen am Keil. S. 109; bei senkrechtem Lichteinfall. S. 110. — Dunkle und helle Streifen. S. 111. — Änderung des Keilwinkels oder der Keildicke. S. 112. — Wandernde Interferenzen. S. 112. — Größe des Keilwinkels. S. 112. — Einfluß der Wellenlänge auf den Streifenabstand. S. 112. — Keil mit unregelmäßiger Begrenzung. S. 112. — Kugelflächen (Newtonsche Ringe). S. 113. — Prüfung der Ebenheit von Flächen. S. 113. — Beispiele von Meßflächen von Endmaßen. S. 114.	
2. Vergleich von Endmaßen mittels Interferenzen gleicher Dicke . . . . .	115
Prinzip des Vergleichs. S. 115. — Interferenzen bei Benutzung mehrerer Spektrallinien. S. 116. — Interferenzapparat zum Vergleich von Endmaßen. S. 117. — Ausführung der Messung. S. 118. — Bestimmung der Unparallelität. S. 120.	
3. Absolutmessung in Lichtwellenlängen . . . . .	120
Mißstände bei der Vergleichsmessung. S. 120. — Werte der Wellenlängen. S. 121. — Verwendung der einzelnen Spektrallinien. S. 122. — Einfluß der Breite der Spektrallinien. S. 123. — Prinzip der Messung. S. 124. — Ermittlung der Ordnungszahl durch Rechnung. S. 125. Zahlenbeispiel. S. 126. Vereinfachte Rechnung. S. 126. Tabelle der Sollbruchteile. S. 127. Tabelle der Wellenlängenverhältnisse. S. 130. Zahlenbeispiel. S. 130. Rechenschieber. S. 131. — Genauigkeit der Messung. S. 132.	
4. Korrekturen bei der Messung in Lichtwellenlängen. . . . .	132
Ausdehnung des Endmaßes. S. 132. — Abhängigkeit der Wellenlänge von der Luftdichte. S. 132. — Gesamtkorrektur. S. 134. — Genauigkeit für $b$ , $t$ , $e$ und ihre Messung. S. 134. — Bestimmung der Korrekturen durch Rechenschieber. S. 135. — Anschub-Korrektur. S. 136. — Bestimmung der Anschubkorrektur. S. 138. — Einfluß des Eigengewichts. S. 138. — Zahlenbeispiel. S. 139. — Eben-	

	Seite
heit. S. 139. — Parallelität aus der Lage der Interferenzen. S. 139. — Parallelität durch Drehung der Quarzplatte. S. 139. — Messung langer Endmaße. S. 140.	
5. Interferometer zur Messung in Lichtwellenlängen . . . . .	140
Absolut-Inko. S. 140. — Messung mit dem Absolut-Inko. S. 141. — Kompensationsplatte. S. 141. — Justierung. S. 142. — Vorsichtsmaßregeln bei der Messung. S. 142. — Vergleichsmessungen. S. 143.	
C. Weitere Interferenz-Meßmethoden . . . . .	143
Messung von Kugeln und Zylindern. S. 143. — Frühere Methode des Bureau of Standards. S. 143. — Interferenzfühlhebel. S. 144. — Entstehung der Interferenzen gleicher Neigung. S. 145. — Ausführung der Messung mit Interferenzen gleicher Neigung. S. 146. — Messung von Endmaßen. S. 147.	
7. Andere Verfahren . . . . .	147
Elektrische Schwingungen. S. 147.	
D. Die Genauigkeit technischer Messungen . . . . .	148
Ablesen und Messen. S. 148. — Ablesegenauigkeit. S. 148. — Empfindlichkeit. S. 148. — Instrumentengenauigkeit. S. 149. — Richtigkeit. S. 149. — Ablese- und Einstellkorrektion. S. 150. — Systematische und zufällige Fehler. S. 150. — Beobachtungsfehler. S. 150. — Einfluß der Temperatur und ihre Messung. S. 150. — Ausgleich von Temperaturunterschieden. S. 151. Beschleunigung des Ausgleichs. S. 152. Verzögerung des Ausgleichs. S. 153. — Verschiedenheit der Ausdehnungskoeffizienten. S. 153. — Meßdruck. S. 153. — Zusammenstellung der Fehler. S. 153. — GröÙte zu erreichende Genauigkeit. S. 154. — Anwendung auf Endmaße. S. 154. — Genauigkeitsfimmel. S. 155. — Herstellungsgenauigkeit und Kosten. S. 155. — Genauigkeit von Strichmaßen. S. 155. — Berechnung des Fehlers technischer Messungen. S. 155. — Ungenauigkeit von Meßgeräten. S. 156. Genauigkeit der Bearbeitung. S. 156.	

#### IV. Technische Meßgeräte mit Maßanzeige.

A. Meßgeräte mit Strichmaßstab . . . . .	157
1. Taster und Zirkel . . . . .	157
Zirkel. S. 157. — Taster. S. 158.	
2. Schieblehre und Nonius . . . . .	159
Stangenzirkel. S. 159. — Schieblehre. S. 159. Feinstellvorrichtung. S. 160. Form der Meßschnäbel. S. 160. — Nonius. S. 161. Schätzung der Bruchteile. S. 162. Hilfsstriche am Nonius. S. 162. — Teilungsfehler. S. 163. — Gesamtfehler. S. 163. — Führung des Schiebers. S. 164. — Ansprüche an die Schnäbel. S. 164. — Aufbiegung. S. 165. — Ergebnisse der Prüfung von Schieblehren. S. 165. — Ausführungsformen. S. 165. — DIN 862. S. 166. — Schieblehren für Sonderzwecke. S. 167. — Schabemuster. S. 167.	
3. Dickenmesser . . . . .	168
Dickenmesser. S. 168. — Bohrungsmesser. S. 168.	
4. Tiefenmaße . . . . .	169
Ausführungsformen. S. 169. — Fühlstiftlehren. S. 170.	
5. Höhenreißer . . . . .	171
Ausführungsformen. S. 171.	
6. Keillehren . . . . .	172
Für Rundteile. S. 172. — Für Bohrungen. S. 172. — Zum Sortieren von Stahlkugeln. S. 174.	
7. Meßräder . . . . .	174
Meßfehler. S. 174.	
B. Fühlhebel . . . . .	175
1. Einfache Fühlhebel . . . . .	175
Zehntelmaß. S. 175. — Für verschiedene Empfindlichkeiten und Meßbereiche. S. 176.	
2. Mehrfache Fühlhebel . . . . .	176
Fehler bei mehrfachen Fühlhebeln. S. 176. — Fehler bei Doppelfühlhebeln gleicher Übersetzung. S. 177. — Fehler bei Doppelfühlhebeln ungleicher Übersetzung. S. 177. — Fehler beim Vorschalten eines Hebels 1:1. S. 178. — Ausführung von Doppelfühlhebeln. S. 178.	
3. Meßuhren . . . . .	179
Ältere Ausführung. S. 179. — Ausführung mit Zahnstange. S. 179. — Fehler der Meßuhr. S. 180. — Ausführung mit Schnecke. S. 180. — Ausführungsformen. S. 181. — Mit Bandübertragung oder Reibungsrädern. S. 183.	

	Seite
4. Feinzeiger und Passameter . . . . .	184
Feinzeiger. S. 184. — Fühlhebel von Capstan. S. 184. — Passameter. S. 184.	
5. Fühlhebel mit Schneidenlagerung (Verkürzung des kleinen Hebelarms) . . . . .	185
Lagerung. S. 185. — Fühlhebel von Fuess. S. 186. — Minimeter. S. 186. — Mikrotast. S. 187.	
6. Sonderkonstruktionen . . . . .	188
Fühlhebel von Bauschinger und Martens. S. 188. — Torsionsfühlhebel. S. 189. — Meßkugellehre. S. 189.	
7. Minimeter und Mikrotast, Gestaltung . . . . .	189
Minimeter. S. 190. — Mikrotast. S. 191. — Als Tiefenmaß. S. 191. — Tischstative. S. 191. — Hilfstische zum Messen von Endmaßen. S. 192. — Gestell mit 2 Minimetern. S. 192. — Fühlhebel mit Stellbolzen. S. 192. — Gestell zum Messen von Kugeln. S. 193. — Messung von Drähten. S. 193. — Messung von Zylindern. S. 195. — Messung von Blechen. S. 195. — Fühlhebel mit rachenlehrenähnlichem Bügel. S. 195. — Reiterlehre. S. 196. — Meßtisch. S. 197. — Sonderausführungen. S. 197. — Meßhütchen. S. 197.	
8. Optische Fühlhebel (Verlängerung des großen Hebelarms) . . . . .	198
Lichtzeiger als langer Hebelarm. S. 198. — Mikroskopischer Fühlhebel (Göpel). S. 199. — Projektions-Fühlhebel (Eden). S. 200. — Optimeter (Zeiss). S. 201. — Fühlhebel von Sears. S. 202. — Anforderungen an den Spiegel. S. 203.	
9. Interferenz- und Libellenfühlhebel . . . . .	204
Interferenzfühlhebel. S. 204. — Röhrenlibelle. S. 204. Empfindlichkeit. S. 204. Fassung. S. 205. Justierung. S. 206. — Libellen-Fühlhebel. S. 207. — Kontrolle der im Maschinenbau gebrauchten Einrichtwaagen. S. 208. — Normung der Einrichtwaagen. S. 208. — Dosenlibelle. S. 208.	
10. Meßdose . . . . .	209
Übersetzung. S. 209. — Membran. S. 209. — Prestometer. S. 209. — Tolerimeter. S. 209.	
11. Innenfühlhebel, Konstruktionsgrundlagen . . . . .	210
Konstruktionsprinzipien. S. 210. — Zwei- und Dreipunktanlage. S. 211. — Einfluß der Verkipfung. S. 212.	
12. Innenfühlhebel, Ausführungen . . . . .	215
Unmittelbare Messung der Verschiebung des Meßbolzens. S. 215. — Unmittelbare Übertragung der Verschiebung der Tastbolzen auf den Meßbolzen. S. 215. Gerät der Soc. Gen. S. 216. — Übertragung durch Walze und schiefe Ebene (Innen-Mikrotast). S. 217. — Übertragung durch Hebel. S. 218. Passimeter. S. 218. Wagericht-Optimeter. S. 219. Innen-Minimeter. S. 219. Innen-Meßuhr. S. 220.	
13. Andere Verfahren zum Messen von Bohrungen . . . . .	220
Messung mit Keilen. S. 220. — Messung mit Endmaßen und Lehrdornen. S. 220. — Messung mit Stahlkugeln. S. 220. — Methode von Tomlinson. S. 221. — Messung durch Projektion. S. 222.	
14. Beispiele für die Verwendung der Fühlhebel . . . . .	222
Untersuchung von Werkzeugmaschinen. S. 222. — Fühlhebel zum Messen während der Bearbeitung. S. 222. — Fühlhebel an Werkzeugmaschinen. S. 225. — Fühlhebelanordnung zur Ermittlung großer Durchmesser. S. 225. — Kontrolle von Nocken. S. 225. — Bestimmung des Abstandes an Bohrungen. S. 225. — Lichtbild-Dickenmesser. S. 226. — Registrierende Fühlhebel. S. 226. — Bestimmung des Ausdehnungskoeffizienten (Zeiss). S. 227. — Bestimmung des Ausdehnungskoeffizienten (Gerdien und Jubitz). S. 228.	
C. Schraublehren . . . . .	229
1. Ausführung . . . . .	229
Prinzip der Schraublehre. S. 229. — Geschichtliche Entwicklung. S. 229. — Wahl der Steigung. S. 230. — Mit Nonius und Zahlenablesung. S. 230. — Mit Differentialgewinde. S. 230. — Mit verschiebbarem Meßbolzen. S. 231. — Mit Schnellverstellung. S. 231. — Einstellmaße. S. 231.	
2. Abnutzung und Meßdruck . . . . .	231
Verstellbarer Amboß. S. 231. — Nachstellung durch Verdrehen der Teiltrommel. S. 232. — Nachstellung durch Verdrehen und Verschieben der Teiltrommel. S. 233. — Nachstellung der Mutter. S. 233. — Mutter- und Spindelgewinde. S. 233. — Klemmvorrichtung. S. 234. — Reibungskupplung. S. 234. — Ratschenkupplung. S. 234. — Genauigkeit mit und ohne Gefühlsschraube. S. 234. — Meßdruck. S. 235. — Aufbiegung. S. 235. — Bügelform. S. 235. — Meßdruckanzeiger. S. 236. — Elektrischer Kontakt und Lichtspalt. S. 237. — Einfluß der Temperatur. S. 237.	

	Seite
3. Schraubenfehler und Parallelität der Meßflächen. . . . .	237
Fortschreitender Fehler. S. 237. — Innere Fehler. S. 237. — Periodische Fehler (Unparallelität der Meßflächen). S. 238. — Bestimmung der Schraubenfehler. S. 238. — Größe der Schraubenfehler. S. 239. — Ausgleich der Schraubenfehler. S. 240. — Ebenheit der Meßflächen. S. 241. — Bestimmung der Parallelität mit Autokollimationsfernrohr. S. 241. — Größe der Unparallelität. S. 242. — Bestimmung der Parallelität durch Interferenz. S. 242. — Bestimmung der Parallelität mit Stahlkugeln. S. 242. — Herstellung der Spindeln. S. 242. — DIN 863. S. 243.	
4. Ausführungsformen von Schraubenlehren für Außenmessung . . . . .	244
Übliche Formen. S. 244. — Mit größerer Trommel und für Toleranzmessungen. S. 244. — Für Sonderzwecke. S. 244. — Mit Meßeinsätzen. S. 245. — Stand-Schraublehre. S. 245. — Mit veränderlichem Meßbereich (Dickmesser und Schieblehren mit Schraublehre). S. 246. — Superschraublehre. S. 247. — Als verstellbare Rachenlehre. S. 248. — Als Tiefenmaß. S. 248. — Als Höhenreißer. S. 249. — Sphärometer. S. 249. — Bestimmung des Krümmungshalbmessers. S. 250.	
5. Innenschraublehren . . . . .	250
Ausführungsformen mit Bügel. S. 250. — Stichmaße. S. 251. — Für tiefe Bohrungen. S. 252.	
D. Meßmaschinen . . . . .	252
1. Endmaß-Meßmaschinen, Bett und Führung . . . . .	252
Ältere und neuere Meßmaschinen. S. 252. — Lagerung der Amboß- und Spindelträger. S. 254. — Schlittenführungen. S. 254. — Einfluß auf die Parallelität der Meßflächen. S. 255.	
2. Endmaß-Meßmaschinen, Spindelköpfe . . . . .	255
3 Arten der Ausführung. S. 255. — Meßmaschine von Whitworth. S. 257. — Meßmaschine von Reinecker. S. 257. — Meßmaschine der Fortunawerke. S. 257. — Wert des Schraubenfehlerausgleichs. S. 258. — Meßmaschine des NPhL.I. S. 258. Meßmaschine der Soc. Gen. S. 259. — Meßmaschine von Shaw. S. 260. — Meßmaschine von Mahr. S. 261. — Meßmaschine von Hommel. S. 261. — Meßmaschine des NPhL.II. S. 261.	
3. Endmaß-Meßmaschinen, Meßdruckanzeiger . . . . .	262
Fühlplatte. S. 262. — Fallkaliber. S. 262. — Mikroskopische Beobachtung. S. 263. — Doppelfühlhebel. S. 263. — Präzisionsfühlhebel. S. 264. — Libellenfühlhebel. S. 264. — Meßdose. S. 264. — Mikroskopischer Fühlhebel. S. 264. — Projektion des Zeigers. S. 265. — Kippspiegel. S. 265. — Elektrischer Kontakt. S. 266. — Bedingungen zur Erreichung größter Genauigkeit. S. 266. — Einfluß des Meßdrucks. S. 266.	
4. Endmaß-Meßmaschinen, Ausführungsformen . . . . .	267
Einfache Meßmaschinen. S. 267. — Meßmaschine der Hanson-Whitney Comp. S. 267. — Meßmaschine von Wickman. S. 268. — Registrierende Meßmaschine. S. 269.	
5. Strichmaß-Meßmaschinen . . . . .	270
Meßmaschine von Pratt und Whitney. S. 270. — Verkippungsfehler. S. 270. — Abbescher Dickenmesser. S. 271. — Meßmaschine zum Prüfen von Schraublehren. S. 272. — Meßmaschine zum Prüfen von Mikrometerspindeln. S. 273. — Sphärometer. S. 273. — Meßmaschine der Soc. Gen. S. 274. — Lagerung des Maßstabes. S. 275. — Innenmeßmaschine von Zeiss. S. 275. — Abbesches Prinzip bei nebeneinander liegendem Prüfling und Maßstab. S. 276. — Meßmaschine von Zeiss. S. 277.	
6. Auflageböcke . . . . .	277
Ausführungsformen. S. 277.	
7. Schraubenmeßmaschinen . . . . .	278
Zum Messen von Körpern. S. 278. — Zum Messen von Markenabständen. S. 279. — Koordinaten-Meßmaschinen. S. 281. — Brinell-Mikroskop. S. 281. — Teilmaschinen. S. 281. — Herstellung von Teilungen. S. 281. — Teilmaschine von Rowland. S. 282.	
<b>V. Feste Lehren (Meßgeräte ohne Maßanzeige).</b>	
A. Normallehren . . . . .	283
1. Blech- und Drahtlehren . . . . .	283
Feste Lehren als Grundlage des Austauschbaus. S. 283. — Draht- und Blechlehren. S. 283. — Tabelle der europäischen Blech- und Drahtlehren. S. 284. — Tabelle der amerikanischen Blech- und Drahtlehren. S. 286.	

	Seite
2. Normallehrdorn und -ring . . . . .	288
Mängel der Normallehren. S. 288. — Größe des Berührungsfehlers. S. 288. — Sitz beim Gebrauch von Normallehren. S. 289. — Herstellungsgenauigkeit der Normallehren und Einstellringe für Reibahlen. S. 289. — Einstellringe für Reibahlen. S. 290. — Baumaße der Normallehren und Einstellringe. S. 290. — Richtmaße. S. 290. — Beschriftung nach DIN 1813. S. 290.	
B. Grenzlehren. Grundsätzliche Betrachtungen . . . . .	291
1. Das Messen mit Grenzlehren . . . . .	291
Vorteile der Grenzlehren. S. 291. — Verwendung der Grenzlehren, Gut- und Ausschußseite. S. 291. — Einfluß der Meßfehler (Herstellungsgenauigkeit und Abnutzung) auf die Größe der Toleranzen und auf die Wirtschaftlichkeit. S. 292. — Aufbiegung der Rachenlehren. S. 293. — Maß der Rachenlehre. S. 293. — Bestimmung des Maßes der Rachenlehren. S. 294. — Gebrauch der Rachenlehren bei senkrechten Werkstücken. S. 294. — Grenzlehren zum Prüfen von Bohrungen. S. 294. — Berührungsfehler. S. 295. — Maß der Bohrungslehren. S. 295. — Definition von Unrundheit, Ungeradheit und Schlag. S. 296. — Einfluß der Unrundheit und der Konizität auf die Prüfung mit Rachenlehren. S. 296. — Einfluß der Unrundheit und der Konizität auf die Prüfung mit Bohrungslehren. S. 297. — Gleichdicke. S. 298. — Prüfung von Gleichdicken mittels Rachenlehren. S. 298. — Prüfung von Gleichdicken mittels Rachenlehren mit Stützfläche oder -nut. S. 299. — Prüfung von Gleichdicken mittels Fühlhebel und V-Nut (Reiterlehren). S. 299. — Prüfung von Gleichdicken mittels Fühlhebel mit Dreipunktanlage. S. 299. — Prüfung von Gleichdicken mittels Fühlhebel mit Zweipunktanlage und 2 Stützbolzen. S. 300. — Prüfung von Gleichdickbohrungen mittels Flachlehren. S. 300. — Prüfung von Gleichdickbohrungen mittels Fühlhebel. S. 300.	
2. Herstellungsgenauigkeit und Abnutzung der Grenzlehren . . . . .	300
Bedeutung der Herstellungsgenauigkeit. S. 300. — DIN 2057. Herstellungsgenauigkeit der Arbeitslehren. S. 301. — Lage und Größe der Herstellungsgenauigkeit und Abnutzung. S. 302. — DIN 2060. Abnutzung der Arbeitslehren. S. 303. — Beispiel: Lehren für $L$ , 60 mm Durchm. S. 303. — Arbeits- und Revisionslehren. S. 304. — Abnahmelehren. S. 305. — Herstellungsgenauigkeit der Abnahmelehren. S. 305. — Einfluß der Abnutzung auf den Charakter des Sitzes. S. 306. — Ebenheit der Meßflächen der Rachenlehren. S. 306. — Parallelität der Meßflächen der Rachenlehren. S. 307. — Unrundheit und Konizität der Bohrungslehren. S. 307. — Prüfung von Kugelendmaßen. S. 307.	
3. Prüflehren . . . . .	308
3 Meßscheiben oder Meßstäbe. S. 308. — Lehrenaussgabe. S. 308. — Prüfrachenlehren. S. 309. — Sollmaße der Prüflehren. S. 309. — Lage der Herstellungsgenauigkeit der Prüflehren. S. 309. — DIN 2058/59. Herstellungsgenauigkeit der Prüflehren. S. 310. — Beispiel: Lehren für $L$ , 60 mm Durchm. S. 311. — Schwierigkeiten bei der Kontrolle der Arbeits- mit den Prüflehren. S. 311. — Wärmeschutz. S. 312. — Grenzen des Gebrauchs der festen Lehren. S. 312. — Wirtschaftlichkeit verschiedener Meßverfahren. S. 312. — Passungsfühlgeräte. S. 313.	
4. Normung der Arbeits-, Abnahme- und Prüflehren . . . . .	313
Gründe für die Normung der Baumaße. S. 313. — DIN 1812. Kennzeichnung und Beschriftung der Prüflehren für Grenzarbeitslehren. S. 314. — DIN 1813 (Auszug), Kennzeichnung und Beschriftung der Normallehren. S. 315. — DIN 249. Kennzeichnung und Beschriftung der Grenzlehren. S. 316. — DIN 1811. Kennzeichnung und Beschriftung der Abnahmelehren. S. 318. — Schrupplehren (DIN 60, DIN KrG 122). S. 320. — Befestigung der Meßzapfen. S. 320.	
C. Ausführung der Grenzlehren . . . . .	321
1. Wellenlehren . . . . .	321
Formen für verschiedene Durchmesser und Herstellung. S. 321. — Nacharbeiten der Rachenlehren. S. 321. — Formen der Meßflächen. S. 321. — Nachstellbare Rachenlehren. S. 322. — Rachenlehren mit auswechselbaren Meßbacken. S. 323. — Rachenlehren für verschiedene Sitze. S. 324. — Rachenlehren für verschiedene Durchmesser und Sitze. S. 324. — Rachenlehren mit Vortaster. S. 326.	
2. Bohrungslehren . . . . .	326
Herstellung. S. 326. — Griffe der Lehrdorne. S. 327. — Formen der Meßzapfen. S. 327. — Bohrungslehren mit Vortaster. S. 328. — Nachstellbare Bohrungslehren. S. 328. — Verstellbare Bohrungslehren. S. 329. — Lehrenkombinationen. S. 329.	

D. Lineale, Tuschie- und Anreißplatten . . . . .	Seite 329
Anforderungen an Lineale und Platten. S. 329. — Prüfung der Parallelität. S. 330. — Lichtspalt- und Tuschiermethode. S. 330. — Bestimmung der Ebenheit mit Füllhebel, Spiegel und Fernrohr oder Libelle. S. 330. — Bestimmung der Ebenheit mit kommunizierenden Gefäßen. S. 331. — Bestimmung der Ebenheit mit Lineal und Endmaßen oder Innenfühlhebel. S. 331. Profil des Normallineals. S. 332. Durchbiegung durch Eigengewicht. S. 333. Verschiedene Unterstützungen S. 334. Durchbiegung durch Meßdruck. S. 334. — Durchhang gespannter Drähte. S. 335. — Fadenlineal. S. 335. — Bestimmung der Ebenheit von Platten. S. 336. — Bestimmung der Ebenheit von Führungen. S. 337. — DIN, Entwurf, Stahllineale. S. 338. — DIN, Entwurf, Platten und Tuschie-lineale. S. 338. — Kritik bei Messungen und Angeboten. S. 339.	
<b>Anhang von H. Schulz.</b>	
A. Physiologische Fehler . . . . .	340
Beobachtungsfehler durch den Bau des Auges. S. 340. — Einfluß der Leuchtdichte. S. 340. — Punktsehschärfe. S. 341. — Mittenschätzung. S. 341. — Zehntelschätzung. S. 342. — Noniensehschärfe. S. 343. — Günstigste Strichlänge. S. 343.	
B. Die Zurückführung des Meters auf die Wellenlänge des Lichtes . . .	344
Die Wellenlänge als Urmaß. S. 344. — Resultierende Amplitude. S. 344. — Sichtbarkeit der Interferenzen gleicher Dicke. S. 345. — Sichtbarkeit der Interferenzen gleicher Neigung. S. 345. — Feinstruktur der Spektrallinien. S. 346. — Wellenlängen-Normalen. S. 347. — Änderung der wirksamen Wellenlänge. S. 347. — Messung von Michelson und Benoît. S. 347. — Methode von Fabry und Perot. S. 350. — Brewstersche Interferenzen. S. 351. — Messung von Benoît, Fabry und Perot. S. 353. — Bestimmung der Länge und des Brechungsindex von durchsichtigen Körpern (Aragosche Interferenzen). S. 354. — Genauigkeit. S. 355.	
<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>356</b>

# I. Die Entwicklung des Meßwesens.

## A. Einleitung.

Unsere heutige industrielle Fertigung steht unter dem Zeichen der Massenerzeugung. Nur durch Ausschaltung der teuren Handarbeit und ihren Ersatz durch die billigere maschinelle Massenherstellung ist die Industrie in der Lage, auf dem Weltmarkt wettbewerbsfähig zu bleiben. Reine Massenfertigung — ohne weitere Ansprüche — kommt aber nur bei wenigen Teilen in Frage, wie z. B. bei Nägeln, Holzschrauben u. ä., d. h. bei solchen Teilen, die sich ihr Gegenstück jedesmal selbst erzeugen oder eines solchen überhaupt nicht weiter bedürfen. Von der weitaus überwiegenden Mehrzahl wird verlangt, daß sie sich mit dem betreffenden Gegenstück — wann und wo es auch hergestellt sei — ohne jedwede Nacharbeit paaren lassen. Die Zeiten sind vorbei, wo man jedem Schraubenbolzen seine zugehörige Mutter aufschraubte, da nur zwei ausgesuchte Stücke zueinander paßten. Austauschbarkeit wird heute fast von allen Teilen verlangt, ob es sich nun um Handräder, Werkzeuge, Schrauben, Spindeln oder selbst ganze Lokomotivkessel handelt. Somit kann die heutige Forderung schärfer als die nach austauschbarer Massenfertigung gefaßt werden.

Zu ihrer Durchführung gehört anscheinend nur zweierlei: einmal gute Maschinen, Vorrichtungen, Werkzeuge und Bearbeitungsverfahren, welche die Teile mit der nötigen Genauigkeit, also innerhalb der zulässigen Toleranz, und ferner auch wirtschaftlich herzustellen gestatten; und zum zweiten, Meßgeräte und -verfahren, welche die genaue und rasche Kontrolle der Werkstücke ermöglichen, d. h. feststellen, daß die zulässigen Abweichungen vom Sollwert, die sich häufig nur auf wenige Mikron<sup>1</sup> oder gar Bruchteile davon belaufen, nach keiner Seite hin überschritten sind.

Somit ist die Meßtechnik eine der Grundlagen für die Durchführbarkeit des Austauschbaues. Allein durch ihre Hilfe kann das Endziel erreicht werden, daß nicht nur die in demselben Betriebe gleichzeitig gefertigten Teile einer Zeichnungsnummer innerhalb ihrer zulässigen Toleranz bleiben, sondern daß auch die aus verschiedenen Zeiten und aus ganz verschiedenen Herstellungs-orten stammenden gegeneinander austauschbar sind. Alle dazu nötigen Messungen lassen sich nun im wesentlichen auf die von Längen und von Winkeln zurückführen, von denen hier, ihrer überwiegenden Bedeutung wegen, ausschließlich die ersteren behandelt werden sollen<sup>2</sup>, und auch das nur, soweit sie prinzipieller Natur sind<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> 1 Mikron (Zeichen  $\mu$ , gesprochen: My) =  $\frac{1}{1000}$  mm.

<sup>2</sup> Winkelmessungen sind näher behandelt in G. Berndt: Technische Winkelmessungen (Werkstattbücher, Heft 18). Berlin: Julius Springer 1924.

<sup>3</sup> Die Messungen besonderer Maschinenelemente sind behandelt in G. Berndt: Die Gewinde und 1. Nachtrag dazu. Berlin: Julius Springer 1925 und 1926. — G. Berndt: Zahnradmessungen. Erfurt: Gebr. Richters 1925.

Zur Durchführung dieser Messungen genügen aber geeignete Geräte und Verfahren allein nicht, vielmehr ist noch nötig, daß überall dasselbe Maß gebraucht wird.

Dafür sei ein einziges, aber um so sprechenderes Beispiel angeführt. Als in den Vereinigten Staaten das 1864 aufgestellte Sellers-Gewinde allgemein eingeführt war, stellte sich trotzdem heraus, daß Bolzen und Muttern nicht austauschbar waren. Die Erie-Bahn wie auch die Marine fanden nur zu bald, daß die Erzeugnisse verschiedener Werkstätten nicht zueinander paßten, und daß selbst Gewindelehringe, die zu verschiedenen Zeiten von Whitworth bezogen worden waren, durchaus unzulässige Unterschiede gegen einander zeigten. Die Firma Pratt & Whitney unternahm es, den Ursachen hierfür nachzuforschen. Sie ging „wie Diogenes mit der Laterne“ landauf, landab und suchte vor allem, die Maßstäbe der verschiedenen Firmen zusammenzubekommen. Dabei stellte sie fest, daß selbst von den als am zuverlässigsten geltenden Maßstäben auch nicht zwei miteinander übereinstimmten (daß ferner jede Meßmaschine andere Werte lieferte)<sup>1</sup>.

Somit gehört zur Durchführung des Austauschbaus auch noch ein gut begründetes, allseitig anerkanntes einheitliches Urmaß und ferner Sicherheit dafür, daß alle in der Technik benutzten Maßstäbe mit diesem übereinstimmen. Allgemein erkannt wurde dies wohl zuerst auf der internationalen Ausstellung von 1851.

## B. Die Entwicklung der Längenmaße.

Jede Messung besteht in einem Vergleich des zu messenden Stücks<sup>2</sup> mit einer Größe derselben Art, die als Einheit angenommen wird, indem man sieht, wie oft diese in jener enthalten ist. Ein solcher Vergleich erfolgte ursprünglich durch ein einfaches Urteil der Form: die Länge  $a$  ist größer oder kleiner als die Länge  $b$ ; später durch ein zahlenmäßiges Schätzen der Verhältnisse beider, z. B.: die Höhe  $a$  dieses Buches ist etwa  $1\frac{1}{2}$ mal so lang wie seine Breite  $b$ ; diese dient hier als willkürliche, für den gerade vorliegenden Fall gewählte Einheit. Genauer wird die Messung, wenn man die Einheit, etwa einen Holzstab, sie wiederholt um sich selbst verschiebend, an die zu messende Größe, z. B. einen Balken, anlegt und dadurch zahlenmäßig feststellt, wie oft sie darin enthalten ist, d. h. ermittelt, wie lang der Balken im Vergleich zu dem Holzstab ist. Eine solche von Fall zu Fall jedesmal neu gewählte Einheit konnte ganz willkürlich sein, wenn sie nur für die Dauer ihres Gebrauches die Bedingung der Unveränderlichkeit erfüllte.

Zuerst trat das Bedürfnis nach Messungen wohl bei der (häufig alljährlich wiederholten) Verteilung des gemeinsamen Feldbesitzes der Flurgenossenschaft auf. Die Messung geschah dabei so, daß man einen Fuß vor den anderen stellte, oder auch wohl durch Abschreiten. Die Einheit wurde also dem menschlichen Körper entnommen, was am bequemsten war, da er ja bei jeder Messung zugegen sein mußte. So entstanden die Einheiten: Fuß (griechisch: pus; lateinisch: pes; englisch: foot; französisch: pied); Schritt (gr.: bema haplun; lat.: gradus); Doppelschritt oder Fußspanne (gr.: bema diplun; lat.: passus) (der auch heute noch, z. B. beim Militär, als Einheit für rohere Messungen gebraucht wird). Aus diesen Maßen entstanden dann größere Wegeinheiten, wie die Wegstunde u. a.

Dieses Verfahren des Abschreitens, auf die alle die genannten Wegeinheiten zurückgehen, war aber bei Rohstoffen oder Werkstücken nicht anwendbar; es mußte sich deshalb neben jenem ein zweites Maßsystem mit zum Teil kleineren Einheiten entwickeln. Auch dieses ging wieder auf den menschlichen Körper zurück, wie die Namen seiner verschiedenen Einheiten beweisen. Wir finden dort: die Fingerbreite, auch als Querfinger, Daumen oder Zoll bezeichnet (gr.: daktylos; lat.: digitus; engl.: inch, frz.: pouce); die Handfläche oder Palme (gr.: palaiste; lat.: palmus); die Spanne (gr.: spithame); die Elle (gr.: pechys; angelsächsisch: gyrđ; engl.: yard; frz.: aune), ursprünglich die Länge des Unterarms vom Ell-

<sup>1</sup> Daß daneben noch andere Faktoren mitsprachen, die aus den bei den Gewinden vorliegenden besonderen Verhältnissen folgen, interessiert hier nicht.

<sup>2</sup> Daß das Wesen des Messens ein Vergleich ist, wurde bereits von dem Neuplatoniker Plotinos (205—270) gelehrt (9).

bogen bis zu den äußersten Fingerspitzen, also etwa 460 mm; um größere Abgaben zu erhalten, wurde sie bereits im Altertum (im ganzen Orient, einschließlich Ägyptens) auf etwa 525 mm erhöht<sup>1</sup>. Als größere Einheit gesellte sich dazu die Klaffer oder Armspanne (gr.: orgyia) (sie wurde später meist zu 6 Fuß gerechnet) (1).

Daneben tritt bei den Arabern des Altertums als kleinere Einheit das Gerstenkorn und das Maultierhaar auf. Das Korn, das erste und wichtigste Erzeugnis des primitiven Menschen, findet sich auch sonst häufig wieder<sup>2</sup>, so in der Verordnung Ottokars II. von Böhmen: „4 der Breite nach nebeneinander gelegte Gerstenkörner gelten gleich 1 Querfinger und 10 Querfinger gleich 1 Spanne“; ferner auch in der ersten Definition des englischen Zoll vom Jahre 1324.

Mit Ausnahme des Kornes waren alle Einheiten dem menschlichen Körper entnommen. Eine Gewähr für ihre stets gleiche Größe war aber damit nicht gegeben, da die Maße der einzelnen Menschen viel zu sehr voneinander abweichen. Man suchte sich deshalb, um wenigstens abnorme Größen auszuschließen, durch eine statistische Mittelwertbildung zu helfen, wie eine allerdings erst aus dem Mittelalter stammende Bestimmung von Jacob Köbel (Geometrye, Frankfurt 1584) beweist: „man soll 16 Mann, klein oder groß, wie die ungefährlich nacheinander aus der Kirche gehen, einen jeden vor den Anderen einen Schuh stellen lassen; dieselbige Länge werde und solle seyn ein gerecht und gemeyn Meßruthe<sup>3</sup>, damit man das Feld messen soll“ (8).

Als mit fortschreitender Kultur eine gewisse Arbeitsteilung einsetzte und, dadurch veranlaßt, Handel und Verkehr eine immer größere Bedeutung gewannen, waren derartige, weder zeitlich noch örtlich gleichbleibende Einheiten nicht mehr ausreichend. Es mußte deshalb zunächst innerhalb eines Stammes oder Staates eine für alle Angehörige gültige Einheit festgesetzt werden, an die, außer dem Anspruch einer zeitlichen Konstanz, auch die Möglichkeit des Ersatzes im Falle des Verlustes oder einer Beschädigung zu stellen war. Dieser Forderung wurde — allerdings nur bis zu einem gewissen Grade — dadurch zu genügen gesucht, daß man die vom menschlichen Körper entnommenen Maße in einem stofflichen Maßstab, einem Prototyp, verkörperte. Im Interesse der Wirtschaftlichkeit und zur möglichsten Beschränkung der Zahl der Prototypen war es ferner nötig, die verschiedenen Maße in bestimmte zahlenmäßige, möglichst einfache Beziehungen zueinander zu setzen. Hierbei hat man sich meist an die durch die Zahl der Mondumläufe im Jahre gegebene Zwölferrechnung angelehnt, die den Vorteil einer glatten Teilung bietet. Daneben tritt auch die Zahl 7 nach der Zahl der Wochentage auf (1 Mondumlauf gleich  $28 = 4 \times 7$  Tage), ferner die fortgesetzte Zweiteilung ( $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{8}$  usw.).

Mit der Aufnahme der internationalen Handelsbeziehungen erwies sich dann eine gegenseitige Abstimmung der verschiedenen nationalen Einheiten als notwendig. Häufig geschah dies dadurch, daß das kulturell rückständigere Volk die des weiter vorgeschrittenen annahm, wobei allerdings im Laufe der Zeit durch Verwilderung doch wieder Unterschiede auftraten. In anderen Fällen mußte das Zahlenverhältnis der nationalen Einheiten bestimmt werden, wie wir das heute noch zwischen dem Meter und dem englisch-amerikanischen Yard sehen.

In den historischen Zeiten hatte man schon durchweg die Wichtigkeit eines geordneten Maßsystems und seiner Aufrechterhaltung erkannt. Träger und Schützer desselben waren die damaligen Gelehrten, im alten Babylon und Ägypten also die Priester, die schon durch das Kalenderwesen zu sorgfältigen Messungen und Berechnungen gezwungen waren. Deshalb wurden die Prototypen auch im Tempel aufbewahrt, worauf Namen, wie heilige Elle und Sekel des Heiligtums hinweisen. Dies geschah auch noch vielfach im Mittelalter, so

<sup>1</sup> Die sächsische Elle war nur wenig größer, nämlich 566,38 mm, während die preußische Elle zu  $25\frac{1}{2}'' = 666,94$  mm (also rund  $\frac{2}{3}$  m) festgesetzt war.

<sup>2</sup> So ist das Weizenkorn die Grundlage des chinesischen Maßsystems; das angeblich von dem Kaiser Hoang-lin 2690 v. Chr. eingeführte Stimmrohr (Hoang-tschung) hatte eine Länge von 9 chinesischen Zoll oder 90 aneinandergereihten Weizenkörnern (5).

<sup>3</sup> Die Meßruthe wurde allerdings durchaus nicht immer gleich 16 Schuh genommen; man findet vielmehr Werte von 10 bis 18 Schuh.

waren in Frankfurt a. M., Köln und anderen Städten die Normalellen an den Kirchen angebracht (9). An anderen Stellen drückte eine starke Staatsautorität oder Königtum dem Meßwesen seinen Stempel auf; so wurden die Maßeinheiten Roms auf dem Kapitol, in den mittelalterlichen Städten auf dem Rathause<sup>1</sup>, in anderen Staaten im Königspalast niedergelegt; weiterhin sei an den königlichen Fuß (Karls des Großen) und an das königliche Gewicht erinnert. Auch einschneidende Änderungen wurden gelegentlich von den Trägern der Staatsgewalt vorgenommen; so verkürzte Heinrich I. von England im Jahre 1101 das dort schon vor der Eroberung durch die Normannen gebräuchliche gyrd von 39,6 auf 36 Zoll (in heutigem Maß), um es in Übereinstimmung mit der Länge seines Armes zu bringen.

Vereinzelt, so bei den Griechen, findet man auch schon ein gut ausgebildetes Verwaltungssystem, eine Art „Reichsanstalt für Maß und Gewicht“, die Kopien der Prototype an Behörden und Private abgab, um einen Vergleich der im Handel und Verkehr gebrauchten Maße mit den behördlichen Normalen zu ermöglichen und so richtiges Maß zu sichern. Ja, es wurden sogar auch schon die für die Ausfuhr von Wein bestimmten Amphoren durch behördlichen Stempel auf ihre Richtigkeit beglaubigt. Aus späterer Zeit sei aus dem 1278 von Rudolf von Habsburg verliehenen Stadtrecht von Colmar zitiert: „Über alle Maße und Gewichte für Silber, Gold und andere feile Dinge soll der Schultheiß und der Rat zwei biedere Bürger setzen, daß sie selbe überwachen, und wo bei Kauf und Verkauf unrechtes Maß und Gewicht gefunden wird, das werde als Diebstahl gebüßt“<sup>2</sup>.

Die babylonischen Maße<sup>3</sup> kamen durch die Handelsbeziehungen nach Persien, Ägypten, Phönizien und Griechenland<sup>4</sup>; auf den griechischen bauen auch die römischen Maße auf, die durch die Eroberungszüge der Römer weit verbreitet wurden, und von denen sich wieder viele der vor der Einführung des Meters im Abendlande gebräuchlich gewesenen ableiten<sup>5</sup>; die letzten Spuren des altbabylonischen Maßsystems hatten sich in den früheren Apothekergewichten erhalten.

## C. Die Entwicklung des metrischen Systems.

### 1. Frankreich.

Die körperlichen Darstellungen der Längeneinheiten bei den verschiedenen Völkern des Altertums erfüllten, vom heutigen Standpunkt aus betrachtet, die daran zu stellenden Ansprüche der Genauigkeit, der zeitlichen Konstanz und der Möglichkeit des Ersatzes nicht, wie schon die Unterschiede zwischen den verschiedenen auf uns gekommenen Maßstäben beweisen (1). Eine gesicherte, unveränderliche, stets reproduzierbare Einheit ist aber die Grundlage aller und somit auch der technischen Messungen, da bei Benutzung voneinander abweichender Maßstäbe selbstverständlich auch keine Austauschbarkeit der danach gefertigten Werkstücke zu erzielen ist. Die Schaffung eines brauchbaren Prototyps war indessen nur in jahrhundertelanger Entwicklung möglich. In Deutschland läßt sie sich bis auf Karl den Großen (siehe Abschnitt 2), in England über 9 Jahrhunderte zurückverfolgen (Näheres darüber siehe Abschnitt G 1). Seinen Ausgang hat jedoch das heutige Maßsystem von Frankreich genommen. Über seine älteren Einheiten, die mindestens bis ins 14. Jahrhundert zurückreichen, ist wenig bekannt<sup>6</sup>. Seit Philipp dem Langen (1321) versuchten die französischen Könige vergeblich die Einführung eines einheitlichen Maßes. Im 17. Jahrhundert finden wir die Toise (von 1,95 m Länge), die in 6 Fuß zu je 12 Zoll zu je 12 Linien eingeteilt wurde. Sie war ver-

<sup>1</sup> Gelegentlich wurden hier auch die Normalellen der Schneiderinnung zur Aufbewahrung übergeben (9).

<sup>2</sup> Damaschke, A.: Geschichte der Nationalökonomie.

<sup>3</sup> Über die Ableitung der babylonischen Elle siehe (2) und (6).

<sup>4</sup> Im einzelnen auf die Maße der alten Kulturvölker einzugehen fehlt es hier an Raum; es sei dazu auf (1, 2, 3, 4, 8) verwiesen.

<sup>5</sup> So ging auf den römischen Fuß das im Mittelalter gebräuchliche Maß zurück, das sich bis ins 19. Jahrhundert als Werkschuh und verdoppelt als Elle erhielt (7).

<sup>6</sup> Einige Angaben darüber findet man bei (5).

körpert durch einen Eisenstab mit 2 Vorsprüngen, also eine Art Rachenlehre, die am Fuß der Treppe an der Außenmauer des großen Châtelet zu Paris eingelassen war, damit jeder an ihm sein Maß nachprüfen konnte<sup>1</sup>. Dadurch war sie das einzige Maß, das sich innerhalb eines allerdings nur beschränkten Bezirks eine Art amtlicher Geltung verschaffte.

Die Genauigkeit derartiger Vergleiche wird man auf einige Zehntel Millimeter schätzen können, doch war die absolute Ungenauigkeit wesentlich größer, da die Länge des Prototyps durch die beim Gebrauch erfolgende Aufbiegung und Abnutzung ständig zunehmen mußte. Die dadurch verursachten Mißstände waren schließlich so unerträglich, daß man es im Jahre 1668 durch eine neue Toise gleicher Ausführung ersetzte, bei der aber der Abstand der beiden Vorsprünge um 5''' (11,3 mm) kleiner gewählt wurde, um wieder die ursprüngliche Länge darzustellen. Wie man zu dieser Korrektur gekommen, ist nicht ganz sicher; wahrscheinlich wählte man als neue Einheit die halbe Breite des äußeren Tores des Châtelet, die 12' betragen sollte.

Nach dieser neuen Toise wurde eine Reihe von Kopien hergestellt, darunter auch (1735 von Langlois) zwei, welche zum Vergleich der Basisstangen für die berühmten Gradmessungen in Peru und Lappland in den Jahren 1735 bis 1741 dienten, und die deshalb als Toise du Pérou und Toise du Nord bezeichnet wurden. Erstere bestand aus geschmiedetem und poliertem Eisen mit einem Querschnitt von  $40,1 \times 7,7 \text{ mm}^2$  und war zugleich als Strich- (oder richtiger als Punkt-) und als Endmaß ausgebildet (Abb. 1). Ihre Länge war also sowohl durch den Abstand der beiden Punkte  $P'$  und  $P''$  wie auch durch den der beiden Flächen  $E'$  und  $E''$  definiert.

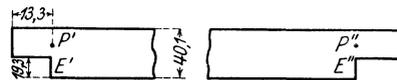


Abb. 1. Toise du Pérou.

Die beiden Toisen (du Pérou und du Nord) wurden mit Hilfe von Stangenzirkel und Lupe, wie auch durch das Gefühl miteinander verglichen und als gleich lang festgestellt. Die dabei erreichte Genauigkeit wird man für die Entfernung  $E'E''$  zu höchstens  $\frac{1}{100}$  bis  $\frac{2}{100}$  mm ansetzen können, da man beim Übergleiten mit dem Fingernagel noch Unterschiede von etwa  $\frac{1}{100}$  mm festzustellen vermag<sup>2</sup>.

Als infolge der inzwischen wiederum eingetretenen Änderungen der Châtelet-Toise ein neues Prototyp geschaffen werden mußte, konnte dafür nur die Toise du Pérou in Frage kommen, da bei der Toise du Nord die Gefahr vorlag, daß sie durch den auf der Rückreise erlittenen Schiffbruch ihre Länge geändert haben könnte. Sie wurde deshalb am 16. Mai 1766 durch Verordnung Ludwigs XV. als Maßeinheit proklamiert und hat als solche auch zur Bestimmung des Meters gedient. Auf Grund der früheren Erfahrungen setzte man sie aber nicht wieder den Mißhandlungen durch die öffentliche Benutzung und die Einflüsse der Witterung aus, sondern bewahrte sie im Kabinett der Akademie, später im Observatorium auf.

Nachdem noch in den Jahren 1821 bis 1831 verschiedene Kopien der Toise du Pérou hergestellt waren (darunter 1823 die eiserne „Pendel-Toise“ für Bessel), war sie für längere Zeit verschwunden und wurde erst 1854 in einem wenig guten Zustande, mit Rost bedeckt, aufgefunden, doch waren wenigstens ihre Enden unversehrt, so daß man ihre Länge ermitteln konnte<sup>3</sup> (8).

<sup>1</sup> Ein ähnliches Maß ist der aus der Zeit der Gotik stammende „Hüttenstab“ am Stefansdom in Wien, der in der Nähe seines Riesentores eingemauert ist und anscheinend zum Vergleich der Gebrauchsmaße beim Bau gedient hat (3); entsprechende Maße finden sich auch bei anderen Bauhütten.

<sup>2</sup> An Stahlkugeln will man durch Drehen zwischen den Fingern sogar einzelne Unrundenheiten oder Vorsprünge von  $2 \mu$  noch haben erkennen können (9).

<sup>3</sup> Über eine Kopie von Canivet siehe (7).

Man sollte nun meinen, daß in Frankreich — zumal bei dem zweihundertjährigen Bestehen der Toise — wenigstens seit dem Jahre 1766 ein einheitliches auf die Toise du Pérou zurückgehendes Längenmaß vorhanden gewesen wäre. Dem war aber nicht so, vielmehr herrschte auch gegen Ende des 18. Jahrhunderts noch ein geradezu babylonisches Gewirr im Meßwesen, da fast jede Landschaft ihre eigene Längeneinheit besaß. Die davon herrührenden Übelstände wurden vor allem in den Handelszentren empfunden. Auf Veranlassung verschiedener Städte reichte deshalb Tayllierand-Périgord, Bischof von Autun, der Konstituierenden Versammlung im Jahre 1790 ein Projekt für ein einheitliches Maß- und Gewichtswesen ein. Vor allem sollten die verschiedenen Maße abgeschafft werden, da sie zu Mißbräuchen und Betrügereien, besonders auch zu Bedrückungen bei der Steuereinzahlung, Veranlassung gäben (4).

Es muß jener Versammlung stets unvergessen bleiben, daß sie diesem Projekt sofort (am 8. Mai 1790) zustimmte, und daß sie ferner auch das Meßwesen auf eine sichere Grundlage zu stellen suchte, indem sie beschloß, für die Längeneinheit ein unveränderliches und jederzeit genau wiederherzustellendes „natürliches“ Maß zu nehmen. Sie verband damit die Hoffnung, daß die neue Einheit dadurch auch leicht internationale Anerkennung und Einführung finden würde. Ihre diesbezügliche Einladung an andere Staaten wurde aber von England abgelehnt und damit wohl die Hoffnung auf ein über die ganze Erde einheitliches Maßsystem für sehr lange Zeit, wenn nicht für immer, begraben.

Als natürliches Maß wurde zunächst die Länge des Sekundenpendels unter  $45^{\circ}$  geographischer Breite gewählt, ein Vorschlag, der bereits früher von verschiedenen Gelehrten gemacht worden war<sup>1</sup>.

In obige Längeneinheit wäre aber auch die Zeiteinheit eingegangen; um von ihr unabhängig zu werden, schlug die zweite von der Versammlung gewählte Kommission, zu der Borda, Lagrange und Laplace gehörten, am 19. März 1791 als natürliches Maß den zehnmillionsten Teil des durch die Pariser Sternwarte gehenden Erdmeridianquadranten vor<sup>2</sup>. Der größeren Sicherheit halber sollte außerdem noch die Länge des Sekundenpendels festgestellt werden, was dann auch später von Borda und Cassini ausgeführt wurde.

Nachdem sich die Nationalversammlung am 26., der König am 30. März 1791 mit dem neuen Vorschlag einverstanden erklärt hatte<sup>3</sup>, maßen Delambre

<sup>1</sup> Interessant ist übrigens, daß in demselben Jahre auch der amerikanische Staatssekretär Jefferson, in Erfüllung eines Kongreßbeschlusses zur Vorlage eines einheitlichen Münz-, Maß- und Gewichtssystems, eine natürliche Einheit, und zwar gleichfalls die Länge des Sekundenpendels unter  $45^{\circ}$  geographischer Breite, im Meeresniveau und bei mittlerer örtlicher Jahrestemperatur vorgeschlagen hatte. Dieses Pendel sollte jedoch kein mathematisches sein, sondern aus einer glatten Eisenstange bestehen, die um ihr eines Ende schwang und deren Länge zu 58,7238 englischen Zoll bestimmt wurde. Sie sollte in 5' von je 10 Unterteilungen geteilt werden (2).

<sup>2</sup> Damit näherte sie sich den früher von Cassini, Mouton (1670), Beccaria, Herschel und später (1861) von Wilhelm Weber gegebenen Anregungen, 1 Minute des Erdmeridians dezimal zu unterteilen bzw.  $10^{-7}$  der polaren Erdachse zu nehmen (6); das letztere Maß hätte etwa dem Fuß entsprochen. Zu der Zahl  $10^{-7}$  ist man auf folgende Weise gekommen: die Nationalversammlung hatte beschlossen, auch den Winkel dezimal zu unterteilen, und zwar sollte der rechte Winkel aus  $100^{\circ}$  zu je 100 Min. zu je 100 Sek. bestehen. Es würde dann einer Länge von 1000 m oder 1 km ein Gradbogen von 1 Min. entsprochen haben, so daß die Angabe der Entfernung zweier Orte in Kilometern zugleich ihren Winkelabstand in Minuten bedeutet hätte. Die Hundertteilung des Winkels hat sich aber gegenüber der Sexagesimalteilung damals nicht durchzusetzen vermocht und ist erst neuerdings wieder aufgenommen worden (Müller-Pouillet: Lehrbuch der Physik Bd. I, 11. Aufl. 1928).

<sup>3</sup> Dabei wurde auch eine ausländische Beteiligung abgelehnt, „damit man in Zukunft wisse, welcher Nation man die Idee und die Bestimmung eines natürlichen Grundmaßes zu verdanken habe“ (8a).

und Méchain in der Zeit von 1792 bis 1798 unter mancherlei Schwierigkeiten durch Triangulierung einen Bogen von  $9\frac{2}{3}^{\circ}$  zwischen Dünkirchen und Montjuich bei Barcelona. Jener Meridianbogen war gewählt, weil er zum größten Teil durch Frankreich läuft und auch angenähert symmetrisch zu der Breite von  $45^{\circ}$  liegt.

Zu den endgültigen Berechnungen wurde eine Reihe ausländischer Gelehrter hinzugezogen, von denen auch zwei, der Schweizer Tralles und der Holländer van Swinden, am 23. April 1799 den Bericht darüber erstatteten. Danach ergab sich die neue Längeneinheit, welche auf Vorschlag von Borda als „Meter“ bezeichnet wurde, zu  $36'' 11,296'''$  der Toise du Pérou bei  $13^{\circ}$  R. Dieser Definition entsprechend wurde von Fortin ein Endmaß aus (unreinem) Platin von  $25 \times 4,05 \text{ mm}^2$  Querschnitt hergestellt und mit der Toise du Pérou auf dem Komparator von Lenoir mittels Fühlhebels verglichen. Verschiedene Beobachtungen ergaben Übereinstimmung bis auf  $\frac{1}{200}'''$  (etwa  $\frac{1}{100}$  mm), welcher Unterschied als unmerklich (insensible) erklärt wurde und in der Tat den älteren Messungen gegenüber einen ziemlichen Fortschritt bedeutet. Durch Gesetz vom 10. Dezember 1799 wurde dieser Stab als *mètre vrai et définitif* erklärt und (am 22. Juni 1799) im französischen Staatsarchiv niedergelegt, wonach er den Namen *mètre des archives* führt. Eine Platinkopie davon wurde im Bureau des longitudes, später auf der Sternwarte aufbewahrt, die nach einer Messung aus dem Jahre 1856 um  $\frac{1}{1200}'''$  (etwa  $2 \mu$ ) länger war.

Damit war die Idee eines Naturmaßes zum erstenmal wirklich ausgeführt; seine Verkörperung in dem *mètre des archives* war aber weniger glücklich gelungen. Nicht nur sein Querschnitt war zu schwach und ungeeignet gewählt, so daß es sich leicht durchbog und damit seine Länge änderte (Näheres siehe Abschnitt E 1), sondern auch sein Werkstoff zu weich, so daß es bald Meßeindrücke aufwies. Dagegen stimmte aber seine Länge, trotzdem die Meßkunst zu jenen Zeiten weit hinter der heutigen, über wesentlich feinere Hilfsmittel verfügenden, zurückstand, doch zufällig bis auf 1 Zehntausendstel seiner Definition, da nach Messungen von Bessel die Länge des Meridianquadranten zu 10000856 m anzusetzen ist. Nach neueren Gradmessungen, die dafür 10001868 m ergaben, ist es um etwa  $\frac{1}{5}$  mm zu kurz ausgefallen.

Da nun jede neue Gradmessung, infolge der zahlreichen beträchtlichen Schwierigkeiten, immer wieder einen anderen Wert ergeben würde, so ist die Fiktion des Meters als natürliche Einheit nicht aufrechtzuerhalten. Das Meter wird also nicht durch seine ursprüngliche Definition als  $10^{-7}$  des Erdmeridianquadranten, sondern einzig und allein durch das Prototyp dargestellt.

Gegen das neue Maßsystem mit seiner (gleichfalls von Borda herrührenden) dezimalen Einteilung und den von van Swinden vorgeschlagenen, aus dem Griechischen und Lateinischen entnommenen Bezeichnungen erhob sich indessen von vornherein eine ziemlich starke Opposition, so daß das Meter sich zunächst nicht durchzusetzen vermochte. Der Widerstand ging so weit, daß Napoléon im Jahre 1812 als übliches Maß einen Fuß von  $\frac{1}{3}$  m zuließ, der in  $12''$  zu  $12'''$  geteilt wurde, und ferner eine Elle von  $\frac{12}{10}$  m, die auf der einen Seite in 120 cm, auf der anderen in  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{3}$ ,  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{12}$  und  $\frac{1}{16}$  geteilt war. Die wirkliche Einführung des Meters erfolgte erst durch das von Louis Philippe erlassene Gesetz vom 4. Juli 1837, das die Verordnung von 1812 aufhob und die Benutzung anderer als der metrischen Maße vom 1. Januar 1840 ab endgültig verbot. Noch weniger war natürlich damals an eine internationale Verbreitung zu denken gewesen, die erst durch die später aufkommenden Weltausstellungen gefördert wurde.

## 2. Deutschland.

War schon die Einführung eines einheitlichen Maßsystems in dem unter einem starken Königtum geeinigten Frankreich jahrhundertlang unmöglich

gewesen, so war dies in dem damals politisch zerrissenen und zerspaltenen Deutschland noch weniger zu erwarten<sup>1</sup>.

Aus jener Zeit stammt der Vers:

Jedes deutsche Ländchen hat sein eignes Quentchen,  
Eigne Maße hat fast jede deutsche Stadt (4).

Als Beispiel für die Unmenge der in der Öffentlichkeit benutzten Maße sei angeführt, daß im Anfang des 19. Jahrhunderts in Baden nicht weniger als 112 verschiedene Ellen in Gebrauch waren (2), und daß es selbst im Jahre 1869 in Deutschland noch nebeneinander gegen 40 Fußmaße von 250 bis 316 mm, gegen 40 Ellen von 547,3 bis 833 mm, über 40 Klafter von 1,897 bis 5,327 m und über 40 verschiedene Meilenmaße von 7363 bis 9870 m gab (2a). In anderen Staaten sah es nicht besser aus.

Erst zu Beginn des 19. Jahrhunderts gingen die einzelnen deutschen Staaten (Württemberg 1806, Bayern 1809, Baden 1810, Preußen 1816) daran, Ordnung in ihr Maß- und Gewichtssystem zu bringen, indem sie zunächst die Zahl der im öffentlichen Verkehr gebrauchten Einheiten verringerten und schließlich auf eine einzige beschränkten. Dabei behielt aber jeder Staat seine eigene Einheit bei, die — unter gleichem Namen — sich von den anderen nicht nur durch ihre Länge unterschied, sondern auch noch in verschiedener Weise unterteilt wurde. So hatte der Fuß (um einige Zahlen zu geben) folgende Werte in Millimetern:

Baden	Bayern	Österreich	Preußen	Sachsen	Württemberg	Schweiz
300,00	299,18592	316,10	313,8535	283,1901	286,4903	300,00.

Ihn teilten Baden, Württemberg und die Schweiz in 10'' zu je 10''', die übrigen Staaten dagegen in 12'' zu je 12'''.

Am besten gesichert war das preußische Maßsystem, das auf der Maß- und Gewichtsordnung vom 16. Mai 1816 beruhte, die ihrerseits auf die Arbeiten einer 1815 eingesetzten Kommission zurückging, welche den Fuß gleich 139,13 Pariser Linien festgesetzt hatte<sup>2</sup>.

Der Fuß wurde in 12'' zu 12''' geteilt, während als größere Einheit die Rute von 12' diente, die aber für Feldmessungen dezimal unterteilt wurde. Verkörpert war die preußische Einheit in von Pistor angefertigten Eisenstäben, die als Strichmaße ausgebildet waren.

Diese Normalen genügten aber den an sie zu stellenden Ansprüchen nicht, worauf zuerst Bessel hinwies (1), da die Temperatur, bei welcher sie die angegebene Länge aufweisen sollten, nicht festgelegt war (vermutlich 13° R, da diese auch für die Toise gilt (2)), und da ferner ihre Länge, des zu schwachen Querschnitts wegen, von der sich mit der Auflage ändernden Durchbiegung abhing; schon das Unterschieben eines Kartenblattes genügte, um sie um mehrere Tausendstel Linien zu ändern. Bessel stellte deshalb neue Normale aus Gußstahl her, und zwar in der Form von Endmaßen von 9 × 9''' Querschnitt, in deren Endflächen in Gold gefaßte Saphirkegel mit genau ebenen Endflächen unverrückbar eingesetzt sind. Bei den danach angefertigten Kopien wurden statt dessen konische Stahlstifte verwendet. Das Prototyp wurde mit der von Fortin 1823 in Form eines flachen Eisenstabes angefertigten Kopie der Toise du Pérou verglichen, die von Arago daran angeschlossen, deren Länge aber auf  $\frac{5}{1000}$ ''' (also etwa  $\frac{1}{100}$  mm) unsicher war. Danach ergab sich die Länge des preußischen Prototyps zu 417,38939 französische Linien, woraus der Wert von 1 preußischem Fuß zu 139,13''' folgte.

Der Besselsche Maßstab wurde durch Gesetz vom 10. April 1839 als preußische Einheit erklärt; er trägt die Aufschrift: „Urmaß der preußischen Längeneinheit 1837. Dieser Stab in der Wärme von 16,25° des hundertteiligen Thermometers in seiner Achse gemessen, ist 0,00063''' kürzer als 3 Fuß“. Zu seiner Sicherung war noch die Länge des Sekundenpendels zu 3'2''0,1621''' bestimmt.

<sup>1</sup> Die von den Römern mitgebrachten Maße waren bald verwildert. Auch die von Karl dem Großen geschaffene Ordnung hatte nur zu seinen Lebzeiten vorgehalten. Je schwächer die Gewalt der Kaiser im Mittelalter wurde, um so mehr verlotterten Maße und Gewichte. Das unter den Karolingern königliche Regal ging zunächst auf die Kirche und mit wachsender Macht der Fürsten auf diese über, so daß jede Herrschaft eigenes Maß und Gewicht hatte. Mit dem Aufkommen der Selbständigkeit der Städte regelten dann diese ihr Maß- und Gewichtswesen selbständig und schließlich setzte jede Zunft ihr besonderes Maß fest, so daß z. B. die Stadt Osnabrück neun verschiedene Ellen hatte (7).

<sup>2</sup> Der preußische Fuß war damit gleich dem rheinischen Fuß.

Von den übrigen Staaten sei erwähnt, daß Sachsen seit 1734 ein einheitliches Ellenmaß hatte. Im Jahre 1805 beantragten die Stände die Einführung eines auf einem natürlichen Urmaß gegründeten Maß- und Gewichtswesens, was aber erst durch das Gesetz vom 12. März 1858 und zwar nur teilweise geschah, indem der Leipziger Fuß (gleich 125,537 Pariser Linien) als Einheit erklärt wurde. Inzwischen war 1845 das Meter als Einheit bedingt angenommen, seine gesetzliche Einführung aber in Erwartung einer allgemeinen deutschen Maßreform vertagt (6).

In Benutzung war das metrische System in Westfalen während der Regierung von Jérôme.

Die erste Anregung zur Schaffung eines einheitlichen Maßsystems für ganz Deutschland ging von Bayern im Jahre 1860 aus. Auf seinen Antrag wählte der Bundestag in Frankfurt a. M. eine Kommission, die dafür das metrische System empfahl. Dem setzte Preußen, seines in sich geordneten Maßsystems wegen, zunächst Widerstand entgegen, den es erst 1865 aufgab<sup>1</sup> (5).

So kam es erst nach Gründung des Norddeutschen Bundes durch Beschluß vom 13. Mai und Gesetz vom 17. August 1868 zur Einführung des Meters, dem sich allmählich auch die süddeutschen Staaten (so Bayern am 29. April 1869) anschlossen. Nach der Reichsgründung wurde es dann durch das am 1. Januar 1872 in Kraft tretende Gesetz für ganz Deutschland obligatorisch. Als Längeneinheit diente eine 1817 durch Vermittlung Humboldts von Fortin gekaufte, Preußen gehörige Kopie des *mètre des archives*, ein Endmaß aus Platin von  $25,8 \times 5,65 \text{ mm}^2$  Querschnitt, dessen Länge nach einer 1863 in Paris (von Regnault, Le Vernier, Morin und Brix) wiederholten Vergleichung um  $3,01 \mu$  größer als das Original war. Die deutsche Einheit wurde definiert als die Entfernung der Mitten seiner ebenen und senkrecht zur Achse stehenden Endflächen bei  $0^\circ$ ; diese Bestimmung blieb bis 1884 in Kraft.

## D. Die Meterkonvention.

Inzwischen hatte auch eine große Zahl europäischer und außereuropäischer Staaten das metrische Maßsystem entweder gesetzlich vorgeschrieben [Näheres siehe (3)], oder zum mindesten zugelassen, so daß der Wunsch der Konstituierenden Versammlung von 1791, das Meter als internationale Einheit anerkannt zu sehen, sich im Laufe von 80 Jahren, soweit es überhaupt möglich war, erfüllt hatte. Damit trat aber auch eine Reihe von Schwierigkeiten auf. Die Schaffung der nationalen Prototypen, vor allem ihr erstmaliger Anschluß und ihre von Zeit zu Zeit unbedingt erforderliche Wiedervergleichung mit dem *mètre des archives* hing vollständig von dem guten Willen Frankreichs als Eigentümer desselben ab. Dazu kam, daß zwar die Ableitung des metrischen Systems und seine Einteilung mit großer Sachkunde und Gewissenhaftigkeit erfolgt (4), bei der körperlichen Darstellung des Urmeters aber (wie vorher erwähnt) weniger glücklich verfahren war, was zur Folge hatte, daß zwischen seinen verschiedenen Kopien Unterschiede bis zu  $\frac{1}{100}$  mm bestanden. Derartige Differenzen waren aber für die Wissenschaft — eine Industrie gab es ja vor 1870 in Deutschland kaum — untragbar. Deshalb stellte Generalleutnant v. Baeyer, der Direktor des Königlich Preussischen Geodätischen Instituts, das ein vitales Interesse an einer gesicherten Maßeinheit hatte, bereits im Jahre 1865 bei der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften den Antrag auf Errichtung einer europäischen Behörde, die gemeinsame Urmaße herstellen und aufbewahren, Kopien davon verabfolgen und in bestimmten Fristen miteinander vergleichen

<sup>1</sup> Überhaupt hatte das metrische System in Deutschland viele Gegner; so plädierte Karsten 1848 für die Einführung der halben Länge des Sekundenpendels als preussische Einheit (3).

sollte. Diesem Antrag trat die 1867 in Berlin tagende „Geodätische Konferenz für eine Gradmessung in Mitteleuropa“ entschieden bei<sup>1</sup>. Um einen glatten Anschluß an die früheren Maße zu erhalten, sollte ferner das neue Urmeter möglichst genau gleich dem *mètre des archives* sein.

Nachdem die französische Regierung und Gelehrten sich zunächst ablehnend verhalten hatten, berief aber jene doch, um sich die Führung dieser nicht aufzuhaltenden Bewegung zu sichern, eine Zusammenkunft von Gelehrten aller an dem metrischen System interessierten Länder zum 8. August 1870 nach Paris, auf der, infolge des inzwischen ausgebrochenen Krieges, nur 24 Staaten vertreten waren (Deutschland fehlte naturgemäß auch). Nach Friedensschluß trat am 24. September 1872 eine neue, diesmal von 30 Staaten beschickte Konferenz zusammen, die jenen Anträgen zustimmte. Nach mancherlei französischen Quertreibereien [Näheres siehe (4)] kam es erst durch das persönliche Eingreifen Bismarcks am 20. Mai 1875 zum Abschluß der internationalen Meterkonvention (I) (auf der von 20 Staaten beschickten *Conférence diplomatique du mètre*), die am 1. Januar 1876 in Kraft trat.

Nach dieser unterhalten die Vertragsstaaten auf gemeinsame Kosten, die nach der Bevölkerungszahl verteilt werden, in einem hierfür errichteten Gebäude in Paris ein wissenschaftliches und permanentes Institut, das (als neutrales Gebiet geltende) *Bureau International des Poids et Mesures* zur Ausführung der in dem v. Baeyerschen Antrag aufgestellten Forderungen<sup>2</sup>. Die Leitung und Aufsicht über dieses Institut führt ein ursprünglich aus 14, seit 1920 aus 18 Mitgliedern (6) (die sämtlich verschiedenen Staaten angehören müssen) und dem Direktor des Bureau bestehendes *Comité International des Poids et Mesures*, das alle 2 Jahre zusammentritt und seinerseits wieder unter der Autorität der *Conférence Générale des Poids et Mesures* steht, die von den Delegierten aller an dem Vertrag beteiligten Staaten gebildet wird, und die in der Regel alle 6 Jahre unter dem Vorsitz des jeweiligen Präsidenten der Pariser Akademie der Wissenschaften zusammenkommt. Sie erörtert die zweckdienlichen Maßnahmen zur Verbreitung und Vervollkommnung des metrischen Systems, sanktioniert die jeweils ausgeführten Fundamentalbestimmungen

für Maß und Gewicht und erneuert in geheimer Wahl das Komitee jeweils zur Hälfte; bei allen Abstimmungen hat jeder Staat 1 Stimme.

Den Metervertrag von 1875 hatten folgende Staaten unterschrieben: Argentinien, Belgien, Brasilien (erst 1920 ratifiziert), Dänemark, Deutschland, England mit Irland (1884 ratifiziert), Frankreich, Italien, Norwegen, Österreich, Peru, Portugal, Rußland, Schweden, Schweiz, Spanien, Türkei (wieder ausgetreten 1894), Ungarn, Venezuela (gestrichen 1906), Vereinigte Staaten. Später sind ihm noch beigetreten: Bulgarien (1911), Canada (1907), Chile (1908), Finnland (1921), Japan (1885), Irland (1926), Mexiko (1890), Polen (1925), Rumänien (1881), Serbien, Kroatien, Slovenien (1879), Siam (1912), Tschechoslowakei (1922), Uruguay (1908), so daß der Meterkonvention jetzt 31 Staaten angehören (1a). Damit

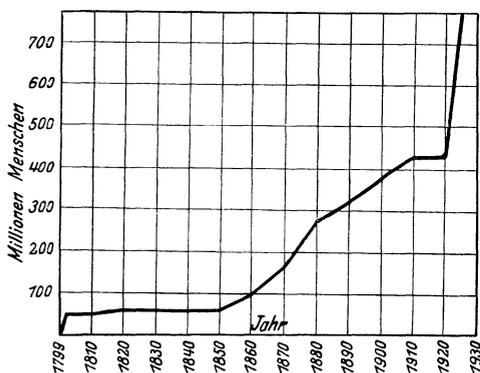


Abb. 2. Ausbreitung des metrischen Systems.

(1881), Serbien, Kroatien, Slovenien (1879), Siam (1912), Tschechoslowakei (1922), Uruguay (1908), so daß der Meterkonvention jetzt 31 Staaten angehören (1a). Damit

<sup>1</sup> Ähnliche Bestrebungen waren auch bei der Pariser Weltausstellung aufgetaucht.

<sup>2</sup> Neuerdings besteht das Bestreben, die Tätigkeit auch auf die Maßeinheiten der Wärme, des Lichtes und der Elektrizität, sowie auf die Bestimmung physikalischer Konstanten auszudehnen (5).

ist aber nicht ausgedrückt, daß das metrische System bei ihnen auch gesetzlich vorgeschrieben ist; dies geschah zum Teil erst wesentlich später oder gar nicht.

Über den Zeitpunkt der gesetzlichen Einführung und über die allmähliche Ausbreitung des metrischen Systems geben die nachfolgende Zusammenstellung und die Abb. 2 einen Überblick<sup>1</sup>, wonach es von 800 Millionen Menschen benutzt wird: 1799 Frankreich (einschließlich Mauritius und Seychellen); 1815 Luxemburg; 1816 Belgien, Holland und Kolonien; 1820 Guatemala; 1848 Chile; 1849 Spanien, Cuba, Philippinen, Puerto Rico; 1853 Columbien; 1861 Italien; 1862 Brasilien; 1863 Serbien; 1865 (1871) Ecuador; 1868 Deutschland, Bolivien; 1869 Peru; 1870 Portugal; 1871 Österreich, Tschechoslowakei; 1874 Ungarn; 1875 Schweiz; 1877 Argentinien; 1882 Norwegen; 1883 Rumänien; 1885 Schweden; 1886 Finnland; 1888 Bulgarien; 1894 Uruguay; 1895 Tunis, Mexiko; 1905 Portugal und Kolonien; 1907 Dänemark, Island; 1910 Costa Rica, Honduras, Nicaragua, San Salvador, Belgisch Kongo, Malta; 1912 Venezuela, Siam; 1913 Italienische Kolonien; 1918 Rußland; 1919 Polen; 1920 Griechenland, Haiti, Lettland; 1921 Japan; 1923 Marokko; 1924 Persien; 1926 Afghanistan, Estland, Palästina (1a).

Gesetzlich zugelassen ist das metrische System ferner in folgenden Staaten (1a, 2, 7): 1864 England und Irland; 1866 Vereinigte Staaten; 1871 Canada; 1873 Ägypten (bei den Behörden obligatorisch); 1899 Paraguay; 1908 China; 1920 Britisch-Indien; ferner Türkei (zum Teil obligatorisch).

Demnach kann man wohl mit Recht sagen, daß das metrische System, mit Ausnahme der in England, seinen Kolonien und den Vereinigten Staaten gebräuchlichen Maße, alle anderen allmählich verdrängt hat; auch in dem zuletzt genannten Lande wird es sehr vielfach und in immer steigendem Maße gebraucht. Von besonderer Bedeutung ist noch, daß hier das Meter als Fundamenteinheit gilt, von der das Yard abgeleitet wird (siehe Abschnitt G 2).

## E. Das internationale Urmeter.

### 1. Die Herstellung des Urmeters.

Das Bureau International des Poids et Mesures begann seine Tätigkeit am 1. Januar 1876 im Pavillon de Breteuil in Sèvres bei Paris. Da es sich um Messungen allergrößter Genauigkeit handelt und jeder Körper seine Länge mit der Temperatur ändert (bei Stahl für 1 m Länge und 1° C um 11,5  $\mu$ ), so mußte vor allem dafür gesorgt werden, daß die Temperatur in dem Meßraum nach Möglichkeit konstant ist und die örtlichen und zeitlichen Schwankungen auf ein Mindestmaß heruntergedrückt werden, zumal die einzelnen Geräte diesen Schwankungen mit verschiedener Geschwindigkeit folgen. Dadurch verbot sich die Aufstellung von Heizkörpern, ferner durften die Wände nicht durch die Schwankungen der Außentemperatur und vor allem nicht durch die Sonnenstrahlen getroffen werden. Deshalb wurde der Meßraum in die Mitte des Gebäudes gelegt und rings von Fluren umgeben (1). In ähnlicher Weise mußte auch der Fußboden isoliert sein, doch genügte hier ein etwa 1 m hoher Raum darunter; entsprechend wurde auch die Decke ausgebildet.

Die Wände müssen als Wärmespeicher dienen, also große Wärmekapazität und geringe Wärmeleitung besitzen. Da sich diese beiden Forderungen bei den üblichen Baustoffen ausschließen, wurden die Wände als Doppelwände mit Isolierschicht dazwischen ausgebildet (wofür man heute poröse Kieselgursteine oder den Thermosbau nehmen würde). Dabei dienen die Außen- und Innenwand als Wärmespeicher, wobei der inneren noch der Ausgleich der örtlichen Temperaturunterschiede zufällt, während die Isolierschicht den Eintritt der äußeren Temperaturschwankungen verhindert. Entsprechend ist der Fußboden zu gestalten, während die Ausbildung der Decke weniger wichtig ist.

<sup>1</sup> Angegeben ist das Erscheinungsjahr des Gesetzes, während die Einführung in der Regel erst mehrere Jahre später erfolgte.

Das Anbringen von Fenstern ist dabei natürlich nicht möglich; es mußte also die Beleuchtung durch Oberlicht erfolgen, und zwar durch aufgesetzte Kamine, die den Eintritt der Sonnenstrahlung ausschließen (auch künstliche Lichtquellen wären in derartigen Schächten unterzubringen, die nach unten hin durch zwei Glasplatten abgeschlossen werden, um den Eintritt der Wärmestrahlung nach Möglichkeit zu verhindern). Dadurch ist erreicht, daß bei geschlossenen Türen auch an Sommertagen die Temperatur um nicht mehr als  $\frac{1}{10}$  Grad schwankt.

Bei der guten Wärmeisolierung übt nun aber selbst die Anwesenheit des Beobachters einen merklichen Einfluß aus, gibt doch der menschliche Körper im Durchschnitt 3000 (im Ruhezustand 2400, bei höchstgesteigerter Tätigkeit bis 9000) kcal in 24 Stunden, also 125 kcal in der Stunde ab. Da nun das jedesmalige Temperaturngleichgewicht durch das Betreten oder das Verlassen des Raumes gestört werden würde (das selbstverständlich durch eine Art Schleuse mit Doppeltüren erfolgen muß, um nicht zuviel kältere oder wärmere Außenluft hereinzulassen), so wird der Beobachter während seiner Abwesenheit durch einen kleinen Ofen mit der gleichen Wärmeabgabe ersetzt (wozu man heute am besten eine elektrische Heizvorrichtung nehmen würde). Die Beobachtungsinstrumente ruhen auf Pfeilern, die auf den gewachsenen Boden herabgehen, während der Fußboden von den Mauern getragen wird und an den Pfeilern ausgespart ist, um die Übertragung von Erschütterungen darauf zu vermeiden<sup>1</sup>.

Unter der Leitung erster Fachleute wurden im Bureau die Hilfsmittel zur genauen Bestimmung von Längen (und Gewichten) ausgebildet und nach eingehendem Studium sämtlicher Fehlerquellen (wie sie bei Längenmessungen in erster Linie von der Temperatur herühren) das Prototyp des Meters (und des Kilogramms) hergestellt. Später wurden gelegentlich auch andere Gelehrte hinzugezogen, wenn die von ihnen ausgearbeiteten Methoden weitere Fortschritte zur Sicherung des metrischen Systems boten. Ferner sind auch in den letzten Jahren die Bedürfnisse der Technik in steigendem Maße berücksichtigt.

Auf Grund der wenig ermutigenden Erfahrungen, die man mit dem Endmaß beim mètre des archives gemacht hatte, beschloß man, das neue Urmeter durch ein Strichmaß darzustellen, da bei diesem (damals) die Messungen mit größerer Genauigkeit, auf rein optischem Wege (somit ohne die bei jeder mechanischen Messung vorliegende Gefahr der Beschädigung oder der Abnutzung) und auch in der neutralen Achse durchzuführen waren. Würde man heute noch einmal vor die Frage gestellt sein, so würde sie sicherlich zugunsten des Endmaßes entschieden werden, da man jetzt in der Lage ist, dieses gleichfalls ohne jede mechanische Berührung und zudem weit genauer als ein Strichmaß zu messen. Auch die besten mit ausgesuchten Diamanten gezogenen Striche sind nämlich keine von parallelen Geraden begrenzten Furchen, sondern bieten bei genügender Vergrößerung etwa ein Bild dar, wie es Abb. 155 wiedergibt. Dadurch hängt die Auffassung ihrer Schwerpunkte oder der Strichmitte sehr von der Beleuchtung ab, da die hellen Teile auf Kosten der dunkeln bevorzugt werden; sie ist ferner für verschiedene Beobachter verschieden und wechselt auch für denselben Beobachter im Laufe der Zeit. Die beste Übereinstimmung zwischen 2 Beobachtern kann man beim Urmeter zu etwa  $0,25 \mu$  (6), für den-

<sup>1</sup> Dieselben Gesichtspunkte wären auch bei der Einrichtung technischer Meßräume zu befolgen, weshalb im vorstehenden auch auf noch mögliche Verbesserungen hingewiesen ist. Lassen sich die Pfeiler nicht bis zum Erdboden durchführen, so kann man sich dadurch helfen, daß man auf zwei Trägern schwere Betonklötze aufbaut und den Fußboden um sie herum ausspart, wobei man die Fugen mit Filz oder ähnlichen Dämpfungsmitteln ausfüllt. Hingewiesen sei darauf, daß namentlich Eisenbetonbauten alle Erschütterungen gut übertragen, und zwar im Verhältnis der Hebelarme vergrößert, während sie durch Rabitz- und ähnliche Wände stark gedämpft werden.

selben Beobachter auf  $0,1 \mu$  (mittlerer Fehler einer größeren Beobachtungsreihe) annehmen. Demnach kann man die Genauigkeit eines Strichmaßes günstigenfalls zu  $0,2 \mu$  ansetzen<sup>1</sup>. Der Schwerpunkt kann ferner durch wiederholte in derselben Richtung erfolgende Reinigung bis zu  $0,8 \mu$  verschoben werden (2a). Demgegenüber kommt man durch interferentielle Messung von Endmaßen wesentlich weiter. Da diese aber seinerzeit noch nicht genügend ausgebildet war, so ist die Wahl eines Strichmaßes vom damaligen Standpunkte aus gut gewesen.

An den für das Urmeter zu wählenden Werkstoff ist nun eine Reihe von Ansprüchen zu stellen. Es muß vor allem aus einem einzigen Stück bestehen; dadurch scheidet der Bergkristall, der sonst eine Reihe von Vorzügen aufweist, aus. Vor allem hätte er die Forderung erfüllt, daß keine molekularen Umlagerungen und, dadurch veranlaßt, Längenänderungen auftreten, da bei ihm, worauf zuerst Kekulé in seinen Vorlesungen (1872/3) hingewiesen hatte (7), alle Moleküle zu einem einzigen stabilen Kristall angeordnet sind<sup>2</sup>. Vorausgesetzt ist allerdings dabei, daß durch das Schneiden und Polieren nicht Gefügestörungen hervorgerufen werden.

Weiterhin muß der Werkstoff wenig deformierbar, hart und elastisch, sowie widerstandsfähig gegen den Angriff der Atmosphärien sein; schließlich muß er noch eine gute Politur annehmen und das Ziehen feiner Striche zulassen. Allen diesen Forderungen — mit Ausnahme der Härte — genügte nach den bisherigen Erfahrungen das Platin; jene ließ sich aber durch Zusatz von Iridium beträchtlich steigern. Auf Grund der Untersuchungen von St. Claire-Deville wählte man deshalb für das neue Urmeter eine Legierung von 90% Platin und 10% Iridium, die sich im allgemeinen auch gut bewährt hat<sup>3</sup>.

An und für sich würde der (damals noch nicht bekannte) geschmolzene Quarz seiner geringen Ausdehnung wegen vielleicht noch geeigneter für die Verkörperung der Längeneinheit sein, doch lauten die Urteile darüber noch sehr widersprechend. So soll das daraus von Kaye (3) für England hergestellte Meter sich in weniger als zwei Jahren um  $5 \mu$  geändert haben (2), während von anderer Seite (4, 5) angegeben wird, daß in 12 Jahren keine merkliche Änderung eingetreten sei.

Die zweite wichtige Frage war die nach der Form. Wie zuerst 1826 Kater bemerkt und, nur wenig später, Bessel eingehend erörtert hat, hängt die Länge eines Stabes von der Art seiner Auflage und der dadurch bedingten Durchbiegung ab. Da nun zwei Flächen niemals so vollkommen eben sind, daß sie sich in allen ihren Punkten berühren (was auch bereits durch die kleinsten Staubteilchen verhindert werden würde), so ist die Länge bei (anscheinend) satter Auflage völlig unbestimmt, da sie ganz von der zufällig und ständig wechselnden Lage der tragenden Punkte abhängt. Um eine ganz bestimmte Länge zu erhalten, darf man den Stab nur in zwei Linien unterstützen, was praktisch etwa durch dünne Zylinder (Stricknadeln) geschieht (noch besser wäre Auflage in drei Punkten, von denen zwei in einer

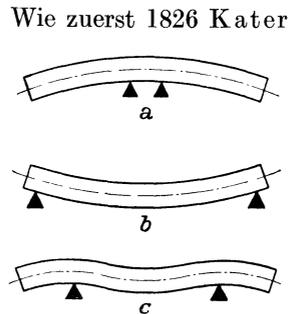


Abb. 3. Durchbiegung eines in verschiedenen Stellen unterstützten Stabes.

<sup>1</sup> Mit den heutigen besseren Strichen von etwa  $2 \mu$  Dicke, die eine 150- bis 200fache Vergrößerung vertragen (statt 50- bis 60fach), kann man auf  $0,1 \mu$  kommen (2a, 4a).

<sup>2</sup> Selbstverständlich müßte der Bergkristall völlig fehlerfrei sein, dürfte also keine Einschlüsse und keine Zwillingbildungen aufweisen. Er läßt sich übrigens auch mit ausgesuchten Diamanten gut teilen.

<sup>3</sup> Nach den letzten Messungen (siehe S. 17) ist es indessen doch nicht absolut sicher, ob nicht Änderungen auftreten.

zur Stabachse senkrechten Linie liegen). Ordnet man sie in der Mitte an (Abb. 3a), so erfahren, infolge der eintretenden Durchbiegung, die oberen Schichten eine Verlängerung, die unteren eine Verkürzung. Das Umgekehrte tritt bei Unterstützung an den Enden ein (Abb. 3b). Gleichgültig aber, wo die Unterstützung vorgenommen wird, stets behält die durch die Schwerpunkte der Querschnitte gehende (gestrichelt eingetragene) neutrale Schicht ihre Länge unverändert. Eine auf ihr angebrachte Teilung würde demnach bei jeder Auflagerung richtig bleiben. Deshalb ließ schon Kater (1826) die Enden der Stäbe bis auf diese herunterarbeiten, während die Unterteilungen in zylindrischen oder kegelförmigen bis auf die neutrale Schicht reichenden Bohrungen angebracht wurden.

Die Unveränderlichkeit der Länge gilt nun aber nur für die in der deformierten neutralen Schicht vorgenommene Messung; tatsächlich ermittelt man aber nicht die Länge des Kurvenbogens, sondern seine Horizontalprojektion. Der Unterschied  $\delta l$  zwischen beiden berechnet sich für die Gesamtlänge  $L$  (d. h. zwei unmittelbar an den Enden gelegene Striche) aus der Gleichung (8):

$$\delta l = -\frac{L^7}{360 \cdot \alpha^2} \cdot \left[ \frac{17}{28} - 6 \cdot \left(\frac{a}{L}\right) + 15 \cdot \left(\frac{a}{L}\right)^2 + 10 \cdot \left(\frac{a}{L}\right)^3 - 60 \cdot \left(\frac{a}{L}\right)^4 + 42 \cdot \left(\frac{a}{L}\right)^5 + 2 \cdot \left(\frac{a}{L}\right)^6 \right],$$

$$= -\frac{L^7}{360 \cdot \alpha^2} \cdot A,$$

in welcher bedeuten:

- $A$  eine Abkürzung für den Klammerausdruck;  
 $a$  den Abstand der Unterstützungen von den Enden;  
 $\alpha = \frac{2 \cdot E \cdot \lambda \cdot L}{G}$ , worin  
 $E$  der Elastizitätsmodul,  
 $\lambda$  das Trägheitsmoment des Querschnitts um seine wagerechte Mittelachse;  
 $G$  das Gewicht des Stabes, also  $G = L \cdot Q \cdot s$ , falls  
 $Q$  der Querschnitt und  
 $s$  das spezifische Gewicht ist.

Setzt man diese Werte ein, so wird:

$$\delta l = -\frac{L^5 \cdot G^2}{1440 \cdot E^2 \cdot \lambda^2} \cdot A = -\frac{L^7 \cdot Q^2 \cdot s^2}{1440 \cdot E^2 \cdot \lambda^2} \cdot A.$$

Die Änderung ist also proportional der 7. Potenz der Länge; damit sie einen möglichst kleinen Wert erhält, muß man, da ja  $s$  und  $E$  durch den Werkstoff gegeben sind, das Verhältnis  $\frac{Q}{\lambda}$  möglichst klein bzw. den Kehrwert  $\frac{\lambda}{Q}$  möglichst groß machen. Bei angenähert gleichen Werten von  $\frac{\lambda}{Q}$  wird man ferner mit Rücksicht auf den hohen Preis der Legierung ein möglichst geringes Gewicht,

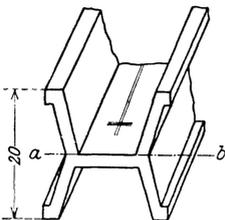


Abb. 4. Das Urmeter.

also möglichst kleines  $Q$ , zu erreichen suchen. Diese Bedingungen werden nach Untersuchungen von Tresca (1872) am besten durch den in Abb. 4 wiedergegebenen X-förmigen Querschnitt erfüllt, der deshalb auch für das neue Urmeter gewählt wurde. Er besitzt ferner den Vorteil, seiner großen Oberfläche wegen leicht die Temperatur der Umgebung anzunehmen. Der Querschnitt ist, bei einer Metalldicke von 3 mm, in einem Quadrat von 20 mm Kante enthalten. Er ist nicht völlig symmetrisch ausgebildet, sondern so gestaltet, daß der Querschnittsschwerpunkt in die Ebene  $ab$  der Teilung fällt, also genau in der halben Höhe liegt. Der Preis eines solchen Stabes stellte sich auf 10173 Frs.

Für verschiedene Querschnitte, Quadrat, glatte  $H$ -Form,  $H$ -Form mit Ecken und  $X$ -Form nach Abb. 4, gleicher Abmessungen, die alle in dem Quadrat von 20 mm Kante enthalten sind, ergeben sich folgende Werte (1):

Form	$Q$ mm <sup>2</sup>	$\lambda$ mm <sup>4</sup>	$\frac{\lambda}{Q}$
Quadrat . . . . .	400	13333	33,33
$H$ glatt . . . . .	152,31	3677	24,14
$H$ mit Ecken . . . . .	167,08	5522	33,05
$X$ . . . . .	150,92	5213	34,53

Daraus folgt, daß der  $X$ -förmige Querschnitt dem glatten  $H$ -förmigen bei etwa gleichem Gewicht doch in bezug auf  $\frac{\lambda}{Q}$  um rund 50% überlegen ist. Gegenüber dem  $H$ -Querschnitt mit Ecken beträgt dieser Gewinn zwar nur 5%, an Gewicht aber etwa 10%. In bezug auf das Quadrat ist die Ersparnis etwa 60%.

Für einen gegebenen Stab nimmt nun die Änderung  $\delta l$  einen Kleinstwert bei  $a = 0,22031 \cdot L$  oder fast genau  $a = \frac{2}{9} \cdot L$  an. Die bei der Unterstützung in diesen Punkten (die nach ihrem Entdecker als Besselsche Punkte bezeichnet werden) sich bildende Stabform ist schematisch in Abb. 3c wiedergegeben. Die hierbei eintretende Längenänderung  $\delta l_0$  berechnet sich zu

$$\delta l_0 = -0,000002612 \cdot \frac{L^7}{\alpha^2} = -0,000000653 \cdot \frac{L^5 \cdot G^2}{E^2 \cdot \lambda^2}.$$

Bei Unterstützung an den Enden ( $a = 0$ ) oder in der Mitte ( $a = \frac{1}{2} \cdot L$ ) würde dagegen sein:

$$\delta l_E = -0,0016865 \cdot \frac{L^7}{\alpha^2} \quad \text{bzw.} \quad \delta l_M = -0,0005587 \cdot \frac{L^7}{\alpha^2},$$

also ein 646- bzw. 212 mal größerer Wert: das Verhältnis  $\frac{\delta l_E}{\delta l_M}$  ist 3,02; bei Unterstützung an den Enden wird also der Fehler dreimal größer als bei Auflage in der Mitte.

Unter der Annahme  $s = 21,5$  und  $E = 17 \cdot 10^8$  g/cm<sup>2</sup> ergeben sich mit den vorher mitgeteilten Werten für das Urmeter, den glatten  $H$ -förmigen Querschnitt und das mètre des archives ( $Q = 25 \cdot 4,15 = 101,25$  mm<sup>2</sup>,  $\lambda = 138,4$  mm<sup>4</sup>), falls man bei diesem eine Teilung in der neutralen Schicht anbringen würde, folgende Werte in  $\mu$ :

Stab	$\delta l_0$	$\delta l_E$	$\delta l_M$
Urmeter . . . . .	-0,0009	-0,590	-0,196
$H$ -Form . . . . .	-0,0018	-1,154	-0,383
m. d. a. . . . .	-0,555	-358,17	-118,68

Selbst bei dem vorzüglich herausgesuchten Urmeter kann also durch die Art der Auflagerung die Länge bis um mehr als  $\frac{1}{2} \mu$  geändert werden, während bei Unterstützung in den Besselschen Punkten sowohl bei ihm wie bei der  $H$ -Form die Änderung weit innerhalb der Meßgenauigkeit liegt. Bei einem rechteckigen Stabe nach Art des mètre des archives hat aber die Auflagerung einen ganz außerordentlichen Einfluß, gehen doch die Änderungen über  $\frac{1}{3}$  mm hinaus, womit das früher ausgesprochene Urteil über seinen zu schwachen Querschnitt seine Begründung findet.

Die oben für  $\delta l$  angegebene Formel gilt nur für die an den Enden gelegenen Striche, wie sie beim Prototyp allein vorkommen. Für innerhalb der Stablänge in den Abständen  $a'$  und  $a''$  von den Stabenden gelegene Striche werden die Formeln wesentlich komplizierter (8): eine günstigste Unterstützung gibt es dabei überhaupt nur noch für den Fall  $a'$  und  $a'' < a$ , nicht mehr dagegen für die Fälle  $a'$  und  $a'' > a$  oder  $a' < a$ ,  $a'' > a$ .

Nachdem diese Vorfragen geklärt waren, erhielt die Firma Johnson. Mathey & Co. in London den Auftrag auf einen Guß von 250 kg reinem Platin-Iridium, und daraus 31 Meterstäbe von 102 cm Länge (und 3, später 40 Kilogrammstücke) herzustellen. Möglichst genau in dem Abstände von 1 m wurden

auf ihrer auf je 8 mm Länge polierten neutralen Schicht zwei Striche von 6 bis  $8 \mu$  Dicke und in etwa  $\frac{1}{2}$  mm Abstand von ihnen je zwei weitere Striche eingraviert, die die Zerstörung, welche das Material durch das Ziehen der Hauptstriche an seiner Oberfläche erleidet, beiderseits symmetrisch begrenzen, und die ferner auch zur Kontrolle der Mikrometerschrauben der Beobachtungsmikroskope dienen sollen. Sie werden von zwei symmetrisch zu ihrer Mitte in einem Abstände von 0,2 mm liegenden, etwas stärkeren Strichen begrenzt (siehe Abb. 4). Auf die zwischen ihnen gelegenen Stücke der Meßstriche wird bei der Beobachtung des Maßstabes eingestellt, damit die Bestimmung ihrer Entfernung genau in ihrer Achse erfolgen kann. Der durch das Eingravieren aufgeworfene Grat ist durch Abschleifen entfernt, nachdem die Striche provisorisch mit einem Kitt ausgefüllt waren. Die sämtlichen Stäbe wurden untereinander und mit dem mètre des archives verglichen. Derjenige Stab, dessen Länge mit diesem am genauesten übereinstimmte (es war der Stab Nr. 6) wurde von der ersten Generalkonferenz am 26. September 1889 als neues Urmeter erklärt. Er ist durch ein gotisches  $\mathfrak{M}$  bezeichnet.

## 2. Das Urmeter.

Definiert ist das Meter, die fundamentale Längeneinheit, als der Abstand der Achsen der beiden Striche auf dem im Bureau International des Poids et Mesures aufbewahrtem Prototyp bei der Temperatur des schmelzenden Eises. Man ist damit also vollständig von der früheren Definition abgegangen, welche das Meter als den zehnmillionsten Teil des Erdmeridianquadranten festgesetzt hatte, da sich danach sein Wert mit jeder neuen Gradmessung anders ergeben würde und damit auch alle anderen Maße zu ändern wären. Man verläßt sich bei der jetzigen Definition völlig auf die Unveränderlichkeit des Prototyps (wieweit dies berechtigt ist, wird später erörtert werden).

Das Urmeter wird, hermetisch in eine Büchse eingeschlossen, in einem Schrank im Kellerraum des Bureau International des Poids et Mesures aufbewahrt, in dem eine nahezu konstante Temperatur und Luftfeuchtigkeit herrscht. Er kann nur vermittels dreier Schlüssel geöffnet werden, von denen je einer in den Händen des Direktors des französischen Staatsarchivs, des Präsidenten des internationalen Komitees und des Direktors des Bureaus sich befindet. Die Generalkonferenz hat sich bei allen ihren bisherigen Tagungen von dem Vorhandensein und der Unversehrtheit des Urmeters überzeugt.

Da nun die Messungen nicht immer bei der vorgeschriebenen Bezugstemperatur ausgeführt werden, mußten auch die Ausdehnungskoeffizienten der verschiedenen Platin-Iridiumstäbe bestimmt werden, um von der Beobachtungsauf die Bezugstemperatur umrechnen zu können.

Für das Urmeter wird die Abhängigkeit seiner Länge  $L$  von der Temperatur  $T$  durch die Gleichung dargestellt:

$$L = 1 \text{ m} + (8,651 \cdot T + 0,00100 \cdot T^2) \mu,$$

wobei die Temperatur  $T$  auf das Wasserstoffthermometer bezogen ist.

Damit seine Länge auf  $0,1 \mu$  sicher ist, muß die Temperatur bis auf  $\frac{1}{100}^{\circ}$  bekannt und über die Meßlänge konstant sein, was mit den modernen Hilfsmitteln gerade noch zu erreichen ist.

Nach neueren Messungen (4a) haben sich nun für den Ausdehnungskoeffizienten die Werte 8,620 und 0,00177 ergeben. Da nun die meisten Beobachtungen bei etwa  $20^{\circ}$  angestellt sind, so würde dadurch bei der Umrechnung auf  $0^{\circ}$  ein Fehler von  $0,59 \mu$  entstanden sein. Unter diesen Verhältnissen wird man eben die Genauigkeit des Meters nur auf etwa  $0,5 \mu$  ansetzen können.

Die übrigen Platin-Iridiumstäbe wurden durch das Los an die Vertragsstaaten verteilt oder blieben im Besitz des Bureaus. Jede Kopie ist von zwei Thermometern aus verre durch von Thonnelot begleitet, die selbstverständlich an das

Wasserstoffthermometer angeschlossen sind. Als Hauptnormale dienen zu den wichtigsten Arbeiten des Bureaus zwei solcher Kopien, die die Bezeichnung 26 und  $T_3$  tragen. An diese sind vor allem die Gebrauchsnormalen sowie auch die nationalen Prototype bei ihrer periodisch wiederholten Vergleichung angeschlossen, so daß das Urmeter zu den laufenden Arbeiten nicht benutzt wird. Ihre anfängliche unveränderte gegenseitige Übereinstimmung, die sich im Laufe von mehr als 10 Jahren auf  $0,07 \mu$  belief, schien die Gewähr dafür zu geben, daß auch das Urmeter innerhalb dieser, völlig in dem Beobachtungsgrenzen liegenden Genauigkeit seine Länge beibehalten hatte.

In den letzten Jahren hat sich nun aber durch Vergleich mit einigen nationalen Kopien herausgestellt (3, 4a, 7, 8, 9), daß sich die Arbeitsnormalen des Bureaus zwischen 1892 und 1901 um  $0,38$  bzw.  $0,36 \mu$  verlängert haben<sup>1</sup>. Anscheinende Änderungen von  $-0,68$  bis  $+0,36 \mu$  wurden auch inzwischen an anderen nationalen Prototypen festgestellt (4a, 9). Diese scheinbaren Änderungen sind bisher unerklärt; man glaubt sie auf die stets nach den Enden hin erfolgte Entfernung des Staubes bzw. auf Änderungen der Kopien beim Transport zurückführen zu können (5a). Immerhin kann die Frage, ob nicht doch im Laufe der Zeit molekulare Umlagerungen eingetreten sind, noch nicht als entschieden angesehen werden. Daraus ergibt sich notwendig die Forderung, die nationalen Kopien erneut mit dem Urmeter zu vergleichen und auch den Anschluß des Meters an die Wellenlänge des Lichtes zu wiederholen, wozu die Arbeiten in Deutschland, England, Japan und in den Vereinigten Staaten im Gange sind (8, 9).

Zu welchem Ergebnis diese auch führen mögen, so zeigen jene Beobachtungen doch, daß es wohl nicht angebracht ist, sich unbedingt auf die Unveränderlichkeit eines körperlichen Maßstabes zu verlassen, wie es heute beim metrischen System der Fall ist, sondern daß man doch wieder versuchen muß, auf ein natürliches Maß für die Längeneinheit zurückzugehen. Nach dem heutigen Stande unserer Kenntnis, die sich auf zahlreiche sehr sorgfältige Arbeiten stützt, dürfte ein solches unveränderliches natürliches Maß in der Wellenlänge bestimmter Spektrallinien (unter genau bestimmten Bedingungen der Luftdichte, also des Luftdrucks, der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit) gegeben sein (Näheres siehe S. 344). Das Meter wäre dann zu definieren als die Zahl der Wellenlängen einer bestimmten Spektrallinie (etwa der roten Linie des Cadmiums unter genau festgelegten Erzeugungsbedingungen), die in dem Urmeter enthalten ist, wie dies auch ein bereits 1923 gestellter Antrag fordert (9), der nur als verfrüht zurückgestellt wurde. Es wäre weiterhin zu überlegen, ob man diesen Schritt nicht schon jetzt tun und den von Benoît, Fabry und Perot (2) gefundenen Wert nehmen sollte, wonach die Wellenlänge  $\lambda_R$  der roten Cadmiumlinie in trockener Luft bei  $15^\circ$  des Wasserstoffthermometers, 760 mm Luftdruck und normaler Schwere  $0,64386496 \mu$  ist<sup>2</sup>, woraus sich ergibt

$$1 \text{ m} = 1553164,13 \cdot \lambda_R^*.$$

<sup>1</sup> Dies ist insofern von großer Bedeutung, als auch der Anschluß des Meters an die Wellenlänge des Lichtes (siehe Anhang) mittels jener beiden Normalen erfolgt ist.

<sup>2</sup> Neuerdings ist vorgeschlagen, an Stelle der roten Cadmiumlinie die gelbgrüne des Kryptons mit der Wellenlänge  $0,56495924 \mu$  (bei  $20^\circ$ , 760 mm, 10 mm Dampfdruck) zu nehmen, da sie sehr einfach gebaut ist und bis 100 mm scharfe Interferenzen gibt; ihr Wert wäre im Interesse der Spektroskopiker so festzusetzen, daß die Wellenlänge der roten Cadmiumlinie ungeändert bleibt (6). Diesem Vorschlag hat auch das Comité in seiner letzten Sitzung (1927) im Prinzip zugestimmt; die rote Cadmiumlinie bleibt vorläufig als provisorischer Standard, bis die gelbgrüne Kryptonlinie an anderen Stellen nachgeprüft ist.

\* Nach Korrektion wegen Änderung der Gebrauchsnormalen ist

$$\lambda_R = 0,64384703 \mu, \quad 1 \text{ m} = 1553163,7 \cdot \lambda_R.$$

Dies wäre um so mehr zu empfehlen, als in der Technik heute bereits durchweg mit diesem Wert gerechnet wird und damit die Auswertung der die Grundlage aller technischen Messungen bildenden Parallelendmaße erfolgt (4). Dieser Gedanke wird auch von anderer Seite vertreten (1). Selbst durch den Anschluß des Urmeters an die Lichtwellenlänge ist z. Z. indessen seine Länge nur mit einer Genauigkeit von höchstens  $0,2 \mu$  definiert. Falls man aber umgekehrt die Wellenlänge als Einheit nimmt, würde damit die Genauigkeit in hohem Maße vergrößert sein.

Selbstverständlich braucht man für den praktischen Gebrauch immer eine Verkörperung des Meters. Dazu könnte das Urmeter bestehen bleiben, das dann aber nicht mehr die Definition des Meters verkörperte, sondern nur die Bedeutung eines Maßstabes hätte, dessen Korrektion gegen die Wellenlängen Definition durch die im Gange befindlichen Untersuchungen zu bestimmen wäre (9). Man hätte damit den Vorteil, keine der mit dem bisherigen Wert ausgeführten technischen Messungen umrechnen zu brauchen, und wäre ferner von allen etwa eingetretenen oder noch eintretenden Änderungen des Pariser Meters unabhängig. Ehe aber diese Lösung nicht allseitige Zustimmung gefunden hat, gilt seine Länge weiterhin als Definition des Meters. Für kürzere Maßstäbe eignet sich sehr gut kristallisierter Quarz, da sich seine Länge interferentiell (auf 2 Wegen; siehe Anhang) mit einer Genauigkeit von etwa  $0,005 \mu$  bestimmen läßt (5).

Von den Kopien erhielt Deutschland die Nr. 18, welche um  $1 \mu$  kleiner als das Urmeter ist, so daß seine Länge durch die Gleichung:

$$L = 1 \text{ m} - 1,0 \mu + (8,642 \cdot T + 0,001 \cdot T^2) \mu$$

gegeben ist. Nach einem Unfall, welchen es im Gebrauch erlitten hatte, wurde es erneut im Bureau mit dessen Normalen verglichen, wobei sich der etwas von dem früheren abweichende Wert ergab:

$$L = 1 \text{ m} - 1,72 \mu + (8,642 \cdot T + 0,001 \cdot T^2) \mu,$$

während eine nochmalige spätere Messung (10) lieferte:

$$L = 1 \text{ m} - 1,53 \mu + (8,642 \cdot T + 0,001 \cdot T^2) \mu.$$

Infolge der vorher angeführten Änderungen der Hauptnormalen des Bureaus ist es aber höchst zweifelhaft, ob sich wirklich das deutsche Prototyp um  $0,5 \mu$  geändert hat (9). Bis zur Klärung dieser ganzen Frage wird es deshalb richtiger sein, mit der ursprünglich bestimmten Korrektion von  $-1,0 \mu$  zu rechnen<sup>1</sup>.

Obwohl durch den Beschluß von 1889 das internationale Urmeter (sowie auch die nationalen Kopien) als Strichmaßstäbe festgesetzt waren, blieb es doch den einzelnen Staaten überlassen, neben diesen Endmaßstäbe zu erwerben, von denen auch 5, darunter Deutschland, Gebrauch machten. Sie wurden aus derselben Legierung und gleichfalls mit X-förmigem Querschnitt hergestellt, der aber hierfür völlig symmetrisch gehalten wurde, so daß die neutrale Schicht in die Mittelachse des wagerechten Verbindungssteiges fällt, in dem die Messung vorgenommen wird. Sie besitzen ferner möglichst planparallele, senkrecht zur Achse stehende Endflächen.

## F. Das technische Maßsystem.

Während das metrische Maßsystem als solches keiner Temperaturangabe bedarf, muß für die Maßstäbe eine Bezugstemperatur festgesetzt werden, da ihre Länge hiervon abhängt. Für das Urmeter wurde die Temperatur von  $0^{\circ}$  gewählt, da sie ohne große Schwierigkeiten und ohne daß eine Messung dazu

<sup>1</sup> Korrektion ist der Betrag, der zu dem Nennwert (in diesem Falle 1 m) algebraisch zu addieren ist, um den Istwert zu erhalten.

nötig ist, durch schmelzendes Eis jederzeit relativ leicht hergestellt werden kann. Die Einbettung des Stabes hierin bedeutet aber eine Erschwerung der Längenmessung, weshalb auch selbst im internationalen Bureau die Beobachtungen, wie vorher erwähnt, bei Zimmertemperatur angestellt und die Ergebnisse dann auf 0° umgerechnet werden.

Ganz ausgeschlossen ist aber die Durchführung der technischen Messungen bei 0°, da dafür alle Meßgeräte und jedes einzelne Werkstück hierauf abgekühlt werden müßten. Es wäre also jedesmal eine Umrechnung auf 0° nötig, was im Betriebe nicht durchführbar ist (ganz abgesehen von den vielen dabei auftretenden Rechenfehlern). Ferner würde noch bei Stücken aus verschiedenen Werkstoffen die Schwierigkeit auftreten, daß, wenn sie bei 0° gleiches Maß hätten, ihre Abmessungen bei der Gebrauchstemperatur voneinander abweichen würden. Diese Unterschiede sind durchaus zu beachten, da ein Meter aus Stahl bei 20° eine Länge von 1000,23 mm, ein solches aus Messing dagegen von 1000,36 mm haben würde. Beide würden sich also um 0,13 mm und selbst bei 100 mm Länge noch um 13  $\mu$  unterscheiden. Das sind aber Größen, welche bei einigermaßen genauen Ansprüchen durchaus nicht mehr zu vernachlässigen sind. Da Stahl der am meisten verwendete Werkstoff ist, so würden die Schwierigkeiten zwar fortfallen, wenn die Werkstücke mit Stahlmaßstäben gemessen würden. Nun ist aber noch zu berücksichtigen, daß auch die Ausdehnung des Stahles um etwa  $\pm 2 \mu$  um den Mittelwert von 11,5  $\mu$  für 1 m und 1° C schwanken kann, so daß sich dadurch bei 20° C Unterschiede von fast einem halben Zehntel mm auf 1 m ergeben können. Allerdings ist dieses Bedenken nicht so schwerwiegend, wenn der Betrieb seine Maße mit den Normalen bei durchschnittlich 18 bis 20° C vergleicht und daraus, unter Benutzung des mittleren Ausdehnungskoeffizienten von  $11,5 \cdot 10^{-6}$ , ihre Länge bei 0° berechnet, da dann die verschiedenen Stahlmaßstäbe bei der Gebrauchstemperatur miteinander übereinstimmen.

In der Technik kommt es in der Regel letzten Endes überhaupt nicht darauf an, das absolute Maß zahlenmäßig zu kennen, sondern nur darauf, unter Vermeidung aller Rechnungen zu wissen, ob die verschiedenen Stücke unter den gewöhnlichen äußeren Verhältnissen miteinander bis auf unwesentliche Abweichungen (Toleranzen) übereinstimmen (1). Unter diesen Umständen, aber nur unter diesen, ist es für die Industrie gänzlich gleichgültig, ob z. B. ein Maßstab bei 0° oder bei irgend einer anderen Temperatur genau die Länge von 1 m hat, wenn nur alle Betriebe dieselbe Bezugstemperatur angenommen haben.

Da nun aber in der Technik niemals bei 0° gemessen wird, so ist man hier von der Bezugstemperatur des schmelzenden Eises abgegangen. Schon früher hatte man hierfür eine der Raumtemperatur entsprechende Bezugstemperatur gewählt, die in den einzelnen Betrieben verschieden, aber fast immer zwischen 15 und 20° lag.

Mit dem Aufkommen des Vereinheitlichungsgedankens zwecks Durchführung des Austauschbaus, wie er in den Arbeiten des Deutschen Normenausschusses (DNA) seinen Ausdruck gefunden hat, erwies es sich vor allem als notwendig, eine einheitliche Bezugstemperatur für die gesamte Industrie festzulegen, da selbstverständlich nicht zwei Stücke übereinstimmen können, die mit verschiedenen langen Maßstäben gemessen sind. Man wählte dazu die Temperatur von 20°, da es leichter möglich ist, einen kühleren Raum durch Heizung darauf zu bringen, als durch Abkühlung eine tiefere Temperatur zu erreichen.

Mit der Wahl einer einheitlichen Bezugstemperatur ist Gewähr dafür gegeben, daß alle mit einem genauen Stahlmaßstab gemessenen Werkstücke aus Stahl nicht nur bei 20°, sondern auch bei allen anderen Temperaturen übereinstimmen, soweit man von dem Einfluß der Verschiedenheit der Ausdehnungskoeffizienten absehen kann. Für Werkstücke aus anderem Stoff, z. B. Messing, gilt dies in-

dessen nur für die gerade bei der Messung herrschende Temperatur, doch sind die Abweichungen bei nur geringem Unter- oder Überschreiten der Bezugstemperatur meist zu vernachlässigen, denn sie betragen für Messing bei solchen von  $\pm 5^\circ$  nur  $3,3 \mu$  auf 100 mm. Ist eine solche geringe Differenz ausnahmsweise nicht zulässig, so muß natürlich die Messung bei  $20^\circ$  ausgeführt werden. Es genügt aber stets diese Temperatur bis auf  $\pm 1^\circ$  innezuhalten, so daß gute Quecksilberthermometer immer ausreichend sind.

Bei der Bezugstemperatur von  $20^\circ$  ist ein technisches Meter genau so lang wie das Pariser Urmeter bei  $0^\circ$ . Würde man dieses dagegen auch auf  $20^\circ$  erwärmen, so würde es um  $8,635 \cdot 20 + 0,001 \cdot 20^2 = 173 \mu$  länger als das technische Meter sein.

Es muß deshalb zwischen den technischen und den in der Wissenschaft sowie im öffentlichen Handel und Verkehr gebrauchten Maßstäben unterschieden und darauf geachtet werden, ob sie die Bezeichnung  $20^\circ$  tragen oder keine Temperaturangabe enthalten. Somit bestehen zwei metrische Maßsysteme nebeneinander.

Niedergelegt sind die Bestimmungen für das technische Maßsystem in DIN 102 vom 15. Juli 1921, die lautet:

**Bezugstemperatur der Meßwerkzeuge und Werkstücke. DIN 102\***

Die Bezugstemperatur der Meßwerkzeuge und Werkstücke wird einheitlich festgesetzt auf

$20^\circ \text{C}$ .

Bezugstemperatur ist die Temperatur, bei welcher die Meßwerkzeuge und Werkstücke die vorgeschriebene Größe besitzen sollen.

Die auf  $20^\circ$  bezogenen Meßwerkzeuge müssen die dauerhaft angebrachte Bezeichnung  $20^\circ$  führen<sup>1</sup>.

Für die Meßwerkzeuge ist ein Werkstoff zu verwenden, dessen Ausdehnung durch Wärme dem Wert  $0,0115 \text{ mm}$  für  $1 \text{ m}$  und  $1^\circ \text{C}$  möglichst nahekommt.

Die Meßbehörden (Reichsanstalt für Maß und Gewicht<sup>2</sup>, Physikalisch-Technische Reichsanstalt) beglaubigen die Größen bei  $20^\circ \text{C}$  unter Angabe der Genauigkeit der Ergebnisse für diese Temperatur.

Ergänzt wird DIN 102 durch DIN 524 vom 1. August 1922, (die auch für die Messung von Gasen und Dämpfen gelten soll, und) die lautet:

**Normaltemperatur. DIN 524\***

Die Eigenschaften von Stoffen und Systemen sind möglichst bei einer bestimmten einheitlichen Temperatur zu messen oder für eine solche zu berechnen und anzugeben. Als Normaltemperatur gilt

$20^\circ \text{C}$ ,

sofern nicht besondere Gründe für die Wahl einer anderen Temperatur vorliegen.

Die Angaben der Meßgefäße, Meßgeräte und Meßwerkzeuge sind auf die gleiche Temperatur zu beziehen, wenn nicht besondere Gegenstände vorliegen.

Unberührt bleiben:

die Temperatur  $0^\circ$

in der Festlegung der Maßeinheiten „Meter“ und „Ohm“,  
der Druckeinheit „Atmosphäre“,  
sowie bei Barometerangaben;

die Temperatur  $4^\circ$

in der Festlegung der Maßeinheit „Liter“  
und für Wasser als Vergleichskörper bei Dichtebestimmungen.

Bezugstemperatur für Meßwerkzeuge und Werkstücke siehe DINORM 102.

<sup>1</sup> Dieser Satz soll evtl. gestrichen werden.

<sup>2</sup> Die Reichsanstalt für Maß und Gewicht ist inzwischen mit der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt verschmolzen und bildet deren erste Abteilung.

\* Abdruck der Normenblätter des Deutschen Normenausschusses. Verbindlich für die vorstehenden Angaben bleiben die Dinormen. Normenblätter sind durch den Beuth-Verlag G. m. b. H., Berlin S 14, Dresdener Straße 97 zu beziehen. (Dieser Hinweis gilt auch für alle weiteren, in diesem Buch abgedruckten Normenblätter.)

Die Angabe für den Werkstoff in DIN 102 ist aus folgendem Grunde geschehen: in der Praxis ist es nicht immer möglich, die Messungen bei genau 20° auszuführen, sondern man ist vielfach gezwungen, sie bei der gerade vorhandenen Raumtemperatur (etwa 17° oder 22°) vorzunehmen. Haben nun alle Stoffe eine Ausdehnung von 11,5  $\mu$  für 1 m und 1° C und läßt man hierin Abweichungen bis zu  $\pm 2\mu$  zu, so bewirkt eine Abweichung um  $\pm 3^\circ$  von der Bezugstemperatur nur einen Fehler von 6  $\mu$  auf 1 m, was fast stets zu vernachlässigen sein wird, während sich bei Benutzung anderer Werkstoffe mit wesentlich abweichenden Ausdehnungskoeffizienten recht erhebliche und wohl zu beachtende Unterschiede ergeben würden.

Die Bezugstemperatur 20° ist in Deutschland außer vom DNA und der in ihm vertretenen Industrie auch vom Ausschuß für Einheiten und Formelgrößen (AEF) und den Geodäten, ferner von den Normenausschüssen aller Industriestaaten angenommen, mit Ausnahme von England (16 $\frac{2}{3}$ °) und Frankreich (0°)<sup>1</sup>. Letzteres hatte vorgeschlagen, die Bezugstemperatur von 0° beizubehalten und den Ausdehnungskoeffizienten mit 11,5 · 10<sup>-6</sup> vorzuschreiben. Das ist aber nicht durchzuführen, da bei den verschiedenen Stahlsorten Werte von 9,5 bis 14 · 10<sup>-6</sup> vorkommen und dadurch bei einer Raumtemperatur von 20° bereits Unterschiede von 40 bis 50  $\mu$  für 1 m Länge auftreten können.

## G. Das Zollsystem.

### 1. Das englische Zollsystem.

Wie früher erwähnt, haben sich nur noch England und seine Kolonien sowie die Vereinigten Staaten nicht dem metrischen Maßsystem angeschlossen, sondern ihr eigenes, das Zollsystem, beibehalten. Als gesetzliche Einheit gilt bei ihnen das yard, das in 3 Fuß zu 12 Zoll zu 10 Linien eingeteilt wird<sup>2</sup>. Das metrische System ist aber auch bei ihnen zugelassen und wird in der Wissenschaft fast ausschließlich gebraucht. In den Vereinigten Staaten besteht außerdem noch eine mächtige Strömung, dieses gesetzlich an Stelle des Zollsystems zu setzen (13).

Da nun das Zollsystem auch noch — ganz abgesehen vom Export — vielfach in der Industrie gebraucht wird, namentlich bei Gewinden (Whitworth-, United States Standard-, Rohrgewinde), ist eine genaue Kenntnis desselben notwendig (2).

Die älteste bekannte Definition des Zoll<sup>3</sup> findet sich in dem Statut Eduards II. aus dem Jahre 1324: „Drei Gerstenkörner, rund und trocken, geben 1 Zoll und 12 Zoll geben 1 Fuß.“ Aus späteren Zeiten sind einige englische Maße erhalten geblieben, so ein in Fuß und zum Teil in Zoll geteiltes Endmaß von achteckigem Querschnitt aus der Zeit Heinrichs VII. (1457—1509) (das um 1,016 mm von dem heutigen Imperial Standard Yard abweicht) und ein viereckiger Messingstab aus der Zeit Elisabeths (1533—1603), der, obwohl zerbrochen und nur roh zusammengeflocht, nur um 254  $\mu$  sich von jenem unterscheidet (10).

Im Jahre 1724 stellte die Royal Society fest, daß die Länge der verschiedenen für Handel und Verkehr dienenden (wenn auch nicht gesetzlich anerkannten) Normalmaße, trotz der inzwischen erlassenen etwa 200 Gesetze, bis zu  $\frac{1}{25}$ “, also etwa 1 mm, voneinander abwichen. Die Länge der als am zuverlässigsten geltenden wurde von dem Mechaniker Graham auf einen Messingstab übertragen, der dann vom Schatzamt (exchequer) aufbewahrt wurde. Dieses Endmaß hatte aber weder ebene, noch zueinander parallele Endflächen. Auf Veranlassung eines Parlamentskomitees fertigte der Mechaniker Bird im Jahre 1760 zwei Kopien von 1 × 1“ Querschnitt hiervon, und zwar als Strichmaßstäbe an, die aber gleichfalls nie gesetzlich anerkannt wurden.

<sup>1</sup> In den Vereinigten Staaten war schon früher ein Teil der Industrie vorgegangen; so hatten z. B. die Hoke-Endmaße eine Bezugstemperatur von 20° (2).

<sup>2</sup> Als größere Einheiten werden gebraucht: 1 fathom = 2 yard; 1 rood (pole, perch) = 5 $\frac{1}{2}$  yard; 1 chain = 22 yard; 1 furlong = 220 yard; 1 mile = 1760 yard.

<sup>3</sup> Vorher dienten nach einer Verordnung König Edgars (958—975) die Maße von Winchester als Standard.

Im Jahre 1814 empfahl ein Komitee, den im Gewahrsam des Sprechers des Unterhauses befindlichen Birdschen Maßstab zum Normal zu erklären und ihn, um die Möglichkeit einer Reproduktion zu haben, an das Sekundenpendel anzuschließen. Erst 1824, also 500 Jahre nach der ersten Festsetzung, erfolgte unter Georg IV. eine gesetzliche und einigermaßen den zu stellenden Ansprüchen genügende Definition des yard, wonach jener 1760 von Bird angefertigte Maßstab als „standard beyond any question and doubt“ gelten sollte. Diese trat am 1. Januar 1826 in Kraft (3, 11). Die näheren Ausführungen dazu lauteten, daß die Strecke von 1 yard dargestellt würde durch die gerade Entfernung der Mitten der Punkte in den beiden Goldpflocken in dem geraden Messingstabe, der sich z. Z. im Gewahrsam des Sprechers des Unterhauses befände, und auf welchem die Worte „Standard Yard 1760“ eingraviert wären. Die so festgelegte Länge bei 62° F stellte das Imperial Standard Yard dar. Damit besaß England zum erstenmal ein gesetzlich anerkanntes Prototyp. Da es völlig willkürlich war und nicht auf ein natürliches Maß zurückging, mußte Vorsorge für eine Ersatzmöglichkeit getroffen werden. Der obigen Anregung entsprechend wurde seine Beziehung zu dem Pendel festgestellt, welches im Meeresniveau in der Breite von London im Vakuum Sekunden mittlerer Zeit gab, und dieses Verhältnis zu 36 : 39,13929 ermittelt.

Die Sicherung stellte sich sehr bald als notwendig heraus, denn bei dem Brande des Parlamentsgebäudes im Jahre 1834 ging dieses Normal zugrunde. Es wurde zwar unter den Trümmern wieder aufgefunden, aber in so stark beschädigten Zustande — u. a. war der eine Goldpflock ausgeschmolzen —, daß es auf keinen Fall mehr zu brauchen war. Es hätte aber auch sonst unbedingt ersetzt werden müssen, da seine Punktmarken durch das Einsetzen der Stangenzirkel (mit denen das Maß jeweils abgenommen wurde) völlig verdorben waren. Darauf weist auch die Klage von Whitworth (12) aus dem Jahre 1856 hin, daß die von der Regierung gelieferten Standards höchstens zur Kontrolle der im Stoffhandel benötigten Maßstäbe zu brauchen wären. Leider stellte sich nun auch heraus, daß die seinerzeit ermittelte Zahlenbeziehung zum Sekundenpendel nicht zutraf. So blieb für die Anfertigung des neuen Prototyps nichts anderes übrig, als auf 5 genaue Kopien und besonders auf die 1832 für die Royal Astronomical Society angefertigte zurückzugreifen, die sorgfältig mit dem alten Imperial Standard Yard verglichen war.

Die Ausführung wurde von Baily begonnen, nach seinem 1844 erfolgten Tode von Sheepshanks fortgesetzt und, da auch dieser darüber starb, von Airy beendet. Nach vielen Vorversuchen hatte ersterer als Werkstoff eine

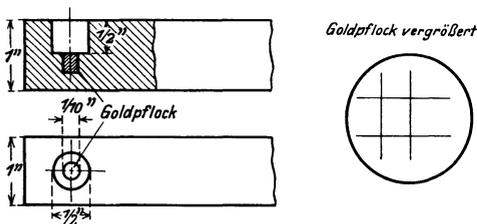


Abb. 5. Das Imperial Standard Yard.

Bronze aus 16 Teilen Kupfer,  $2\frac{1}{2}$  Teilen Zinn und 1 Teil Zink gewählt, aus der 1845 ein Stab von 38'' Länge und  $1 \times 1''$  Querschnitt hergestellt wurde. Nahe seinen Enden wurden 2 Bohrungen von  $\frac{1}{2}''$  Durchmesser angebracht, die bis zur neutralen Schicht reichten, und in zwei tiefergehende Bohrungen von kleinerem Durchmesser 2 Goldpflocke von

$\frac{1}{10}''$  Durchmesser fest so eingesetzt, daß ihre Oberflächen mit der neutralen Schicht abschnitten (Abb. 5). Auf jene wurden 2 Querstriche eingraviert, von denen der eine zur Begrenzung des yard, der andere zur Begrenzung eines Hilfsintervalls diente (zwecks Ausmessung der Mikrometer der Beobachtungsmikroskope) und ferner zwei Längsstriche, um die Einstellung auf die Strich-

mitte zu sichern. Der Abstand der beiden Hauptstriche wurde möglichst genau gleich dem Mittel der Längen der 5 Kopien gemacht.

Dieser Stab wurde durch die Parlamentsakte vom 30. Juli 1855 zum neuen Imperial Standard Yard (bei 62° F) erklärt. Er wird im Handelsamt (Board of Trade) bei möglichst konstanter Temperatur aufbewahrt und ruht auf 8 gleich weit voneinander abstehenden Rollen, auf die die Last durch Hebel gleichmäßig verteilt wird. Zu laufenden Arbeiten dient eine Reihe von Kopien, bei denen aber nicht ihre Korrektion gegen das Imperial Standard Yard, sondern die Temperatur angegeben ist, bei der sie mit ihm übereinstimmen. Je eine solche Kopie befindet sich in der Münze, der Sternwarte in Greenwich, dem National Physical Laboratory und in der Royal Society, während eine weitere in der Wartehalle des Parlamentsgebäudes (seit 1872 auf dem zweiten Absatz der von dort zu den Ausschußzimmern führenden öffentlichen Treppe) eingemauert wurde.

Wir finden darin einen Anklang an das frühere Vorgehen in Frankreich, wonach jeder in der Lage sein sollte, seinen Maßstab mit dem frei zugänglichen Normal vergleichen zu können. Daß man auch sonst aus den früheren Erfahrungen wenig gelernt hatte, beweist der Umstand, daß das Arbeitsamt zu gleichem Zweck 1876 an der Granitmauer der Nordseite des Trafalgarsquare eine Bronzetafel mit Endmaßen von 1', 2', 3' und 9 verschiedenen Unterteilungen anbringen ließ (5), die allen Beschädigungen und Änderungen durch Abnutzung und Witterungseinflüssen ausgesetzt waren.

Durch die Weights and Measures Act von 1878 ist festgesetzt, daß die sämtlichen Kopien (mit Ausnahme der eingemauerten PC 4) alle 10 Jahre untereinander und alle 20 Jahre mit dem Imperial Standard Yard verglichen werden. Das Ergebnis dieser Messungen ist nachstehend zusammengestellt, wobei die Abweichungen der einzelnen Maßstäbe gegen Nr. 1 in  $10^{-6}$  Zoll ( $0,0254 \mu$ ) angegeben sind (9, 10):

Maßstab	1922	1912	1902	1892	1886	1876	1853
PC 2	— 19	— 23	— 24	+ 6		+ 36	— 21
PC 3	— 61	— 49	— 96	+ 55		+ 57	— 23
PC 5	— 23	— 43	— 85	+ 70		— 33	— 55
PC 6	— 217	— 215	— 192		— 3		
PC 4	— 90						+ 7

Wie man sieht, stimmen die Ergebnisse der beiden letzten Messungen untereinander (der größte Unterschied ist  $2 \cdot 10^{-5}$  Zoll =  $0,51 \mu$ , liegt also ungefähr innerhalb der Meßgenauigkeit) und merkwürdigerweise auch mit den ersten Messungen von 1853 (größter Unterschied  $4 \cdot 10^{-5}$  Zoll =  $1 \mu$ ) gut überein, dagegen zeigen die Beobachtungen von 1876 und die von 1902 bedeutend größere Abweichungen, bis  $12 \cdot 10^{-5}$  Zoll ( $3 \mu$ ), die selbst die Unterschiede des eingemauerten Stabes PC 4 übertreffen, bei dem die Messung weniger zuverlässig ist, da seine eine Marke beschädigt ist. Der später angefertigte Stab PC 6 hat sich seit der ersten Messung, vor 36 Jahren, anscheinend sogar um  $22 \cdot 10^{-5}$  Zoll, also um  $5,5 \mu$  geändert, während er in den letzten 10 Jahren gut konstant geblieben ist. Es ist schwer zu entscheiden, ob die gefundenen Abweichungen nur auf Meßfehler zurückzuführen sind, wie sie bei der unglücklichen Wahl der Temperatur leicht auftreten können, oder ob daneben auch noch Längenänderungen eingetreten sind, die bei der ternären Legierung wohl zu befürchten wären, und die deshalb nicht als glücklich bezeichnet werden kann. So lassen die in den Jahren 1876 und 1888 erfolgten Vergleiche zwischen den amerikanischen Kopien und dem Imperial Standard Yard (4), ebenso die zwischen dem Urmeter und jenen (die Schwankungen bis zu  $4 \mu$  ergaben; siehe S. 26) (6) doch recht starke Zweifel an der Konstanz des Imperial Standard Yard aufsteigen.

Man ersieht aus allem, daß das englische Imperial Standard Yard eine noch größere Unsicherheit besitzt als das Urmeter. Auch bei ihm würde es sich deshalb empfehlen, den für das Meter empfohlenen Weg einzuschlagen, nämlich seine Länge durch die in ihm enthaltene Zahl der Lichtwellenlängen zu definieren. Damit würde dann auch das Verhältnis vom Yard zum Meter ein für allemal festliegen<sup>1</sup>.

Obwohl das metrische Maßsystem seit 1864 in England zugelassen war, bestimmte doch die Weights and Measures Act von 1897, daß nur die englischen Maßeinheiten als un-

<sup>1</sup> Dies wird auch von anderer Seite empfohlen (1).

abhängige Standards gelten, während das Meter durch eine Verhältniszahl zum Yard festgelegt wurde. Es sollte gerechnet werden:

$$1 \text{ m} = 39,37079 \text{ Zoll},$$

woraus folgt:

$$1 \text{ Zoll} = 25,399541 \text{ mm}.$$

Im März 1907 wurde auch das Meter als unabhängige Einheit erklärt; sie wird verkörpert durch eine Kopie des Urmeters. In den *Equivalents of Metric and Imperial Weights and Measures* wurde dann auf Grund der von Benoît und Chaney in den Jahren 1895/96 durchgeführten Messungen als gesetzlicher Umrechnungsfaktor festgesetzt:

$$1 \text{ m} = 39,370113 \text{ Zoll},$$

woraus folgt:

$$1 \text{ Zoll} = 25,399978 \text{ mm}$$

(gegenüber dem früher angenommenen Wert besteht also ein Unterschied von  $0,437 \mu$  für das Zoll und von  $15,932 \mu$  für das yard).

Diese Umrechnungszahl wird aber nur für Handelszwecke verwendet, während das National Physical Laboratory mit der jeweils zuletzt bestimmten rechnet; dafür galt auf Grund der 1924 abgeschlossenen Messungen (7,8):

$$1 \text{ m} = 39,370137 \text{ Zoll},$$

woraus folgt:

$$1 \text{ Zoll} = 25,399962 \text{ mm}$$

und gilt zur Zeit auf Grund der letzten Messung von 1927 (7a, 10a):

$$1 \text{ m} = 39,370147 \text{ Zoll},$$

woraus folgt:

$$1 \text{ Zoll} = 25,399956 \text{ mm}.$$

Gegenüber der zweiten Messung von 1895 (und der dritten von 1924) beträgt der Unterschied nur  $0,022 (0,006) \mu$  für den Zoll und  $0,79 (0,22) \mu$  für das yard (ob hier ein wirklicher Unterschied vorliegt, ist fraglich, da er fast genau der bei den Arbeitsnormalen des internationalen Bureaus beobachteten (bisher unerklärten) Änderung entspricht (siehe S. 17).

Um von den sich mit jeder Messung ändernden Ergebnissen unabhängig zu sein, wird in Deutschland durchweg mit dem (für Handelszwecke gültigen) Wert gerechnet

$$1 \text{ Zoll} = 25,399978 \text{ mm}.$$

Bei dem Vergleich von Zoll- und metrischen Maßen ist aber noch zu beachten, daß die englischen Maße eine Bezugstemperatur von  $62^{\circ} \text{ F} = 16\frac{2}{3}^{\circ} \text{ C}$ , die metrischen dagegen von  $20^{\circ} \text{ C}$  haben (bzw. von  $0^{\circ}$  im wissenschaftlichen Maßsystem); d. h., daß  $1''$  bei  $16\frac{2}{3}^{\circ}$  die Länge von  $25,399978 \text{ mm}$  eines bei  $20^{\circ}$  (bzw. bei  $0^{\circ}$ ) richtigen Maßstabes hat. Erfolgt nun der Vergleich des Zolls mit dem metrischen Maß (im technischen Maßsystem) für beide bei derselben Temperatur, so muß die Verschiedenheit der Bezugstemperaturen berücksichtigt werden. Der Maßstab mit der Bezugstemperatur  $20^{\circ}$  habe bei dieser die Länge  $L$  und den Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$ , dann ist seine Länge  $L_t$  bei  $t^{\circ}$  gegeben durch:

$$L_t = L \cdot [1 + \alpha \cdot (t - 20)].$$

Entsprechend ist die Länge  $l_t$  des anderen Maßes bei derselben Temperatur  $t$  und mit demselben Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$ , falls  $l$  seine Länge bei der Bezugstemperatur  $16\frac{2}{3}^{\circ}$  ist, gegeben durch:

$$l_t = l \cdot [1 + \alpha \cdot (t - 16\frac{2}{3})].$$

Sollen nun beide bei der Meßtemperatur  $t$  gleiche Länge haben, also  $L_t = l_t$  sein, so folgt

$$\begin{aligned} L \cdot [1 + \alpha \cdot (t - 20)] &= l \cdot [1 + \alpha \cdot (t - 16\frac{2}{3})], \\ L &= l \frac{1 + \alpha \cdot (t - 16\frac{2}{3})}{1 + \alpha \cdot (t - 20)}, \\ &= l \cdot [1 + \alpha \cdot (t - 16\frac{2}{3})] \cdot [1 - \alpha \cdot (t - 20)], \\ &= l \cdot [1 + \alpha \cdot (20 - 16\frac{2}{3})], \\ &= l \cdot (1 + 3\frac{1}{3} \cdot \alpha). \end{aligned}$$

Für einen solchen bei beliebiger Temperatur vorgenommenen Vergleich des Zolls mit dem Meter darf also nicht gerechnet werden:  $1'' = 25,399978$  mm, sondern

$$1'' = 25,399978 \cdot (1 + 3^{1/3} \cdot \alpha).$$

Hierin ist nach DIN 102 für alle technischen Maße zu setzen:  $\alpha = 11,5 \cdot 10^{-6}$ . Damit ergibt sich

$$1 \text{ Zoll} = 25,40095 \text{ mm},$$

wofür man mit fast stets ausreichender Genauigkeit nehmen kann:

$$1 \text{ Zoll} = 25,401 \text{ mm},$$

während für Überschlagsrechnungen die Annahme:  $1'' = 25,4$  mm genügt.

Mit dem Wert:  $1'' = 25,40095$  mm ist in DIN 890 bis 893 (vom Mai 1924) eine Reihe von Umrechnungen zusammengestellt. Dabei gibt:

DIN 890, Blatt 1: im wesentlichen den obigen Gang der Überlegung,

Blatt 2 bis 5: die Millimeterwerte für  $1/64$  bis  $72''$ ,

DIN 891: die Millimeterwerte für  $1'$  bis  $50'$ ,

DIN 892: die Millimeterwerte für  $0,001''$  bis  $0,999''$ ,

DIN 893: die Zollwerte für  $0,001$  bis  $9,999$  mm.

Diese Tabellen gelten aber nur für den Fall, daß die beiden Maße aus Stahl mit dem gleichen Ausdehnungskoeffizienten  $11,5 \cdot 10^{-6}$  bestehen. Besitzt nun aber das Maß  $L$  den Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$ , das Maß  $l$  den Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha'$ , so lauten die entsprechenden Gleichungen:

$$\begin{aligned} L &= l \cdot [1 + \alpha' \cdot (t - 16^2/3)] \cdot [1 - \alpha \cdot (t - 20)], \\ &= l \cdot [1 + (t - 16^2/3) \cdot (\alpha' - \alpha) + 3^{1/3} \cdot \alpha]. \end{aligned}$$

Für  $1''$  wäre also zu rechnen

$$L = 25,399978 \cdot [1 + (t - 16^2/3) \cdot (\alpha' - \alpha) + 3^{1/3} \cdot \alpha],$$

so daß sein Wert von der Meßtemperatur abhängt. Ist dieser nun aber für einen bestimmten Werkstoff, z. B. Stahl, bereits bekannt, wie durch DIN 890 bis 893, so kann man sich die Rechnung dadurch vereinfachen, daß man nur noch die an jenen Tabellenwerten anzubringende Korrektur  $K$  bestimmt. Zieht man den Tabellenwert  $l \cdot (1 + 3^{1/3} \cdot \alpha)$  von der vorletzten Gleichung ab, so wird

$$\begin{aligned} K &= l \cdot (t - 16^2/3) \cdot (\alpha' - \alpha) \\ &= l \cdot (t - 16^2/3) \cdot (\alpha' - 11,5 \cdot 10^{-6}). \end{aligned}$$

Beide Gleichungen vereinfachen sich, wenn die Messung bei  $t = 20^0$  ausgeführt wird; für diesen Fall ergibt sich

$$\begin{aligned} L &= l \cdot (1 + 3^{1/3} \cdot \alpha'), \\ K &= 3^{1/3} \cdot l \cdot (\alpha' - 11,5 \cdot 10^{-6}). \end{aligned}$$

Die Größe  $K$  ist zu den Zahlen der DIN 890 bis 892 hinzuzurechnen, um den Wert eines Zollmaßes aus beliebigem Werkstoff bei der Bezugstemperatur von  $20^0$  zu erhalten.

## 2. Das amerikanische Zollsystem.

In den heutigen Vereinigten Staaten von Nordamerika bestand anfänglich (wie in Deutschland) kein einheitliches Maßsystem, vielmehr benutzte jeder Bundesstaat andere mehr oder minder authentische Kopien der englischen Standards, die von den ersten Einwanderern mitgebracht waren. Da nun diese schon beträchtliche Unterschiede gegeneinander aufwiesen, ist es nicht weiter verwunderlich, daß die Normalen der einzelnen Bundesstaaten recht beträchtlich voneinander abwichen. Die Verfassung der Vereinigten Staaten bestimmte deshalb, daß der Kongreß Einheiten für Maß und Gewicht festsetzen sollte. Trotz verschiedentlich wiederholter Botschaften der Präsidenten kam aber der Kongreß nicht über Anregungen und allenfalls Kommissionsbeschlüsse hinaus (so z. B. 1821, daß das englische yard von 1601 auf einen Platinstab kopiert werden sollte (2a)).

Im Jahre 1830 verlangte nun der Senat einen Vergleich der in den wichtigsten Zollämtern gebrauchten Maße und Gewichte. Um die dabei gefundenen Mißstände abzustellen, ging das Schatzdepartement, ohne Autorisation des Kongresses, selbständig vor und setzte

als Einheit der Länge das yard von 36'' und als seine Verkörperung den Abstand des 27. bis 63. Zoll auf einem 82'' langen Maßstabe fest, der von Troughton in London für die Coast Survey hergestellt und 1813 nach Amerika gebracht war, und den man für identisch mit dem englischen Standard hielt, obwohl er nie unmittelbar damit verglichen war. Dieser diente bis 1856 als Einheit, wurde aber nie gesetzlich anerkannt. Eine praktische Anerkennung lag indessen in dem Kongreßbeschuß von 1836, daß alle Zollämter mit ihm entsprechenden Normalen auszurüsten wären. Zur Durchführung dieses Beschlusses wurde das Office of Weights and Measures gegründet. Bei der Wahl des Troughtonschen Maßstabes war man sich klar darüber, daß er nur als (evtl. zu korrigierende) Kopie des englischen Normalens anzusehen sei, während dieses die eigentliche Verkörperung des yard bedeuten sollte.

Dementsprechend dient seit 1856 als Einheit die Kopie Nr. 11 des (neuen) englischen Imperial Standard Yard, die im Bureau der Coast Survey in Washington aufbewahrt wird. Sie ist 1876 und 1888 wiederum mit jenem verglichen worden und stimmt mit ihm, nicht wie ursprünglich angegeben, bei 61,79° F, sondern bei 62,25° F überein (ist also diesem gegenüber zu kurz) (2, 3). Der Unterschied der beiden Messungen ist  $0,46^\circ \text{ F} = 0,26^\circ \text{ C}$  und, unter Annahme eines Ausdehnungskoeffizienten von  $18 \cdot 10^{-6}$  gleich  $4,3 \mu^1$ .

Durch Gesetz vom 28. Juli 1866 wurde das metrische System in den Vereinigten Staaten zugelassen und dabei festgesetzt, daß

$$1 \text{ m} = 39,37 \text{ Zoll}$$

gerechnet werden sollte. Als Standard diente ein 1805 aus Frankreich bezogener, 1799 (mit 14 anderen) dort angefertigter Eisenstab (das sogenannte Komitee-Meter) von  $29 \times 9 \text{ mm}^2$  Querschnitt, das als Endmaß ausgebildet war und mit dem mètre des archives auf  $10^{-6}$  toise (etwa  $2 \mu$ ) übereinstimmen sollte. An dieses wurden bis 1890 alle Messungen angeschlossen, in welchem Jahre die Vereinigten Staaten zwei Kopien (Nr. 21 und 27) des Urmeters erhielten, von denen die Kopie Nr. 27 als amerikanisches Prototyp erklärt wurde (4). Sie hat bei den 1903 und 1922/23 vorgenommenen Vergleichen mit dem Meter-Prototyp keine die Beobachtungsfehler übersteigenden Abweichungen gezeigt, wenn man die inzwischen an den Arbeitsnormalen des internationalen Bureaus bemerkten Änderungen berücksichtigt.

In dem vom Schatzsekretär am 5. April 1893 gebilligten Bulletin Nr. 26 der Coast and Geodetic Survey, das vom Bureau of Standards bei seiner Gründung übernommen und 1903 ausdrücklich bestätigt wurde, ist dann festgesetzt, daß „in Zukunft die internationalen Prototype des Meter und Kilogramm als Grundnormale zu betrachten und die bisherigen Einheiten yard und Pfund von diesen in Übereinstimmung mit dem Gesetz vom 28. Juli 1866 abzuleiten seien“ (1, 5). Diese Ableitung sollte nach der Mendenhall Order vom 5. April 1893, also durch die bereits früher festgelegte Beziehung

$$1 \text{ yard} = \frac{3600}{3937} \text{ m}$$

geschehen.

Da ein vom Kongreß erlassenes Gesetz nicht existiert, so ist es schwer zu sagen, was nun eigentlich die amerikanische Längeneinheit ist. Bei dem großen Einfluß, welchen das Bureau of Standards als höchste wissenschaftliche Anstalt besonders auch auf dem Gebiete des Meßwesens besitzt, wird man indessen seine Bestimmungen als maßgebend ansehen müssen, wonach die eigentliche Einheit das Meter und das yard durch die Beziehung

$$1 \text{ yard} = \frac{3600}{3937} \text{ m}$$

definiert ist, woraus folgt

$$1 \text{ Zoll} = 25,400\,050\,8 \text{ mm}.$$

Diese Auffassung ist auch durch einen Schriftwechsel der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt mit dem Bureau of Standards (6) und durch dessen neueste Veröffentlichungen (8) bestätigt. Demnach ist der amerikanische Zoll um  $0,073 \mu$  und das amerikanische yard um  $2,63 \mu$  größer als die betreffenden englischen Maße, also um einen Betrag, der weit über die Meßunsicherheit hinausgeht.

<sup>1</sup> Der Vergleich des ursprünglichen durch den Troughtonschen Maßstab dargestellten Normalens mit dem neuen lehrte, daß jenes um  $0,87 \cdot 10^{-3}$  Zoll (etwa  $22 \mu$ ) zu lang gewesen war.

Da nun aber die amerikanische Industrie die Bezugstemperatur  $20^{\circ}\text{C}$  ( $68^{\circ}\text{F}$ ) angenommen hat, während in England  $16\frac{2}{3}^{\circ}\text{C}$  ( $62^{\circ}\text{F}$ ) gilt, so ist der technische amerikanische Zoll um  $0,9\mu$  kleiner als der englische. Immerhin laufen auch in Amerika die beiden Bezugstemperaturen von  $20^{\circ}$  und  $16\frac{2}{3}^{\circ}$  zum Teil noch nebeneinander her; es muß deshalb darauf geachtet werden, welche von beiden verlangt wird. Für die letztere würde bei Stahl gelten

$$1'' = 25,400\,051 \cdot (1 + 3\frac{1}{3} \cdot \alpha) = 25,401\,025\text{ mm},$$

während für die Bezugstemperatur  $20^{\circ}$  gilt

$$1'' = 25,400\,051\text{ mm},$$

oder mit genügender Annäherung

$$1'' = 25,400\text{ mm}.$$

Der Unterschied zwischen dem englischen Zoll von 25,399 978 mm und dem amerikanischen von 25,400 051 mm ist aber bei der heutigen Genauigkeit der technischen Messungen nicht tragbar. Es wird deshalb vom Bureau of Standards vorgeschlagen (1), sowohl das englische wie das amerikanische Maßsystem auf das metrische zurückzuführen und dabei, um möglichst einfache Beziehungen zu erhalten,

$$1'' = 25,400\,000\text{ mm}$$

festzusetzen, woraus folgen würde

$$1\text{ yard} = 0,914\,400\text{ m}.$$

Die Wahl dieses abgerundeten, zwischen den englischen und amerikanischen Zahlen liegenden Wertes hätte den Vorteil, daß man mit einem Wechselrad von 254 oder 127 Zähnen bei metrischen und Zoll-Leitspindeln beide Teilungen und Gewinde genau herstellen könnte. Dem Umrechnungsfaktor  $1'' = 25,4\text{ mm}$  hat auch die Internationale Normenkonferenz im April 1926 in New York zugestimmt. Definiert man dann noch das Meter durch die Festsetzung

$$1\text{ m} = 1553164,13 \cdot \lambda_R,$$

wo  $\lambda_R$  die Wellenlänge der roten Cadmiumlinie bei  $15^{\circ}$  des Wasserstoffthermometers, 760 mm Barometerstand und in trockener Luft ist, so würde damit das yard definiert sein durch

$$1\text{ yard} = 1420213,28 \cdot \lambda_R.$$

Zur völligen Beseitigung der jetzigen Schwierigkeiten und Zweifel wäre allerdings noch nötig, daß auch die englische Industrie die Bezugstemperatur von  $20^{\circ}\text{C}$  ( $68^{\circ}\text{F}$ ) übernehme, wie dies die amerikanische bereits getan hat. England hat vorläufig in Aussicht gestellt, der Definition:  $1'' = 25,4\text{ mm}$  vielleicht zuzustimmen, sobald das Meter und das yard in Wellenlängen definiert sind.

In den Vereinigten Staaten besteht übrigens eine starke Strömung für die alleinige Einführung des metrischen Systems. So ist dem Kongreß im Jahre 1926 ein Gesetzentwurf vorgelegt (7), nach dem vom 1. Januar 1935 ab nur noch metrische Einheiten im öffentlichen Handel und Verkehr gebraucht werden dürfen. Der Entwurf gestattet den Fabrikanten, die bisher bei ihnen gebräuchlichen Zollmaße beizubehalten, doch sollen geschäftliche Abmachungen nur auf Grundlage der metrischen Maße erfolgen dürfen. Die Aussichten für die Behandlung oder gar Annahme dieses Gesetzentwurfes sind aber bis jetzt außerordentlich gering.

## H. Die staatliche Regelung des Meßwesens in Deutschland.

### 1. Maß- und Gewichtsordnung.

Durch die Meterkonvention war ein von der Mehrzahl der Staaten anerkanntes Prototyp auf gesicherter Grundlage für das Meßwesen geschaffen. Damit war aber noch keine Gewähr gegeben, daß auch die an den verschiedenen öffentlichen Gebrauchsstellen benutzten Maßstäbe richtiges Maß hatten. Dafür zu sorgen, der Verwilderung und ferner dem Betrug durch falsches Maß vorzubeugen, mußte und konnte nur Aufgabe des Staates sein. Dazu war nötig, die Maße vor Ingebrauchnahme und auch nachher von Zeit zu Zeit (um unabsichtliche oder böswillige Änderungen aufzudecken) mit dem Prototyp auf geeignete Weise zu

vergleichen. Selbstverständlich ging es nicht an, diese Aufgabe der Überwachung der vielen in der Industrie und im Verkehr gebrauchten Maße einem internationalen Institut zu übertragen, das seinen Sitz im Auslande hat, vielmehr mußten dazu in den einzelnen Staaten Behörden geschaffen werden, die in ihrem Bereich selbständig, unter Anschluß an das Bureau International des Poids et Mesures, damit betraut wurden. In Deutschland ist sie der heutigen Abteilung I der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt übertragen, die, 1816 von Preußen als Normal-Eichungs-Kommission begründet, späterhin vom Norddeutschen Bund durch Gesetz vom 16. Februar 1869 hiermit beauftragt, seit 1871 oberste Reichsbehörde für alle damit zusammenhängenden Fragen ist. Seit dem Jahre 1919 führte sie den Namen Reichsanstalt für Maß und Gewicht bis zu ihrer 1923 aus verwaltungstechnischen Gründen erfolgten Verschmelzung mit der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt.

Die für die Regelung des Maß- und Gewichtswesens in Deutschland heute gültigen Bestimmungen sind niedergelegt in der Maß- und Gewichtsordnung vom 30. Mai 1908, die am 1. April 1912 in Kraft trat (2), und in der Eichordnung für das Deutsche Reich vom 8. November 1911, für die ein Neudruck aus dem Jahre 1923 vorliegt (1, 3, 4), der auch die bis zum 24. September 1923 erlassenen Änderungen und Ergänzungen erhält, während für spätere Nachträge auf die jeweiligen Veröffentlichungen im Reichsgesetzblatt verwiesen werden muß.

Die für das technische Meßwesen wichtigsten Bestimmungen der Maß- und Gewichtsordnung lauten:

§ 1. Die Grundlagen des Maßes (und Gewichtes) sind das Meter (und das Kilogramm).

Das Meter ist der Abstand zwischen den Endstrichen des internationalen Meterprototyps bei der Temperatur des schmelzenden Eises.

(Das Kilogramm ist die Masse des internationalen Kilogrammprototyps).

Hiermit ist also nur die Definition des Meterprototyps wiederholt. Bei der Einführung des metrischen Systems durch das Gesetz vom 13. August 1868 war das *mètre des archives* als Prototyp erklärt; die obige Festsetzung erfolgte erst durch Gesetz vom 26. April 1893, in dem allerdings die unbedingt notwendige Temperaturangabe fehlte.

§ 2. Als deutsches Urmaß gilt derjenige mit dem Prototyp für das Meter verglichene Maßstab aus Platin-Iridium, welcher durch die internationale Generalkonferenz für Maß und Gewicht dem Deutschen Reich als nationales Prototyp überwiesen worden ist. Es wird in der Kaiserlichen Normal-Eichungs-Kommission aufbewahrt.

Die Aufbewahrung erfolgt in einem feuersicheren, eingemauerten Schrank in dem Gebäude der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt bei fast konstanter Temperatur und einer Feuchtigkeit von 50%, die alle 6 Wochen kontrolliert werden. Der Schrank kann nur mittels zweier in verschiedenen Händen befindlicher Schlüssel geöffnet werden.

Ebenso wenig wie die Arbeiten in dem internationalen Bureau mit dem Prototyp selbst ausgeführt werden, geschieht dies auch in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt mit dem nationalen Prototyp. Dafür dienen vielmehr an dieses angeschlossene Normalen, deren wichtigste ein von Repsold 1878 geteilter Stahlstab und ein von Reichel hergestellter Bronzestab, beide von trogförmigem Querschnitt (U-Form) sind. Die Striche sind auf Platin- bzw. Platin-Iridium-Pflocken und -Einlagen gezogen. Für Endmaßvergleichen sind andere, als Endmaße ausgebildete und selbstverständlich gleichfalls an das nationale Prototyp angeschlossene Arbeitsnormalen vorhanden.

Die Physikalisch-Technische Reichsanstalt sowie auch Bayern besitzen noch je eine weitere Kopie des internationalen Urmeters, die aber gesetzlich nicht als nationale Prototypen gelten.

§ 6. Zum Messen (und Wägen) im öffentlichen Verkehr, sofern dadurch der Umfang von Leistungen bestimmt werden soll, dürfen nur geeichte Maße (Gewichte und Waagen) angewendet und bereit gehalten werden. Zum öffentlichen Verkehr gehört der Handelsverkehr auch dann, wenn er in nicht offenen Verkaufsstellen stattfindet.

Auch zur Ermittlung des Arbeitslohnes in fabrikmäßigen Betrieben dürfen nur geeichte Maße (Gewichte und Waagen) angewendet und bereit gehalten werden.

Häufig findet sich in den Arbeitsordnungen der Fabriken die Bestimmung, daß Ausschußwerkstücke, also solche, die nicht innerhalb der angegebenen Toleranzen liegen, nicht bezahlt werden. Die Feststellung, ob die Toleranzgrenzen inne gehalten sind, erfolgt durch Grenzlehren oder sonstige geeignete Meßgeräte, die somit auch entscheidend für die Festsetzung des Arbeitslohnes sind. Es besteht aber doch insofern ein Unterschied gegenüber den gebräuchlichen Maßen, als diese die Menge (Quantität) ermitteln, während es sich bei den genannten technischen Messungen vorwiegend um eine Güte-(Qualitäts-)Prüfung handelt. Deshalb sind auch die hierfür benötigten Meßgeräte ausdrücklich vom Eichzwang ausgenommen. Dies ist besonders wichtig, da nach § 20 die Physikalisch-Technische Reichsanstalt besondere Vorschriften über Material, Gestalt usw. der eichpflichtigen Meßgeräte erlassen kann, denen dann auch diese Meßgeräte unterworfen wären.

Für besondere, namentlich Exportzwecke können auf Beschluß des Bundesrates ausnahmsweise auch nicht auf dem metrischen Maß beruhende Meßgeräte zur Eichung zugelassen werden.

§ 10. Die Eichung besteht in der vorschriftsmäßigen Prüfung und Stempelung der Meßgeräte durch die zuständige Behörde; sie ist entweder Neueichung oder Nacheichung.

§ 11. Die dem eichpflichtigen Verkehr dienenden Meßgeräte sind innerhalb bestimmter Fristen zur Nacheichung zu bringen. Die Fristen, innerhalb derer die Nacheichung vorzunehmen und zu wiederholen ist, betragen bei

a) den Längenmaßen (usw.) zwei Jahre.

Die Frist beginnt mit dem Ablauf desjenigen Kalenderjahres, in welchem die letzte Eichung vorgenommen ist.

Nach § 12 ist der Bundesrat mit Genehmigung des Reichstages ermächtigt, einzelne Arten von Gegenständen von der Verpflichtung zur Neueichung oder Nacheichung auszunehmen oder die Fristen für die Nacheichung abzuändern oder zu ergänzen. Für die Längenmaße ist das bisher nicht geschehen.

§ 14. Zur Eichung sind nur zugelassen:

diejenigen Längenmaße, welche dem Meter oder seinem ganzen Vielfachen, oder seiner Hälfte sowie fünften oder seinem zehnten Teil entsprechen.

Demnach können z. B. Maßstäbe von 1500 oder 250 mm Länge nicht geeicht werden.

Nach § 19 unterliegt der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt nicht nur die gesamte Überwachung des Eichwesens, sie gibt vielmehr auch die Bedingungen für die Zulassung zur Eichung an. Dies geschieht durch den Erlaß der Eichordnung, deren erste das Datum des 16. Juli 1869 trägt, während die zur Zeit gültige, wie eingangs erwähnt, vom 8. September 1911 stammt (wozu die inzwischen veröffentlichten Änderungen und Ergänzungen kommen).

Die Genauigkeit  $q$  der Gebrauchsnormalen der Eichämter beträgt  $\pm \frac{4}{10}$ , die ihrer Kontrollnormalen  $\pm \frac{1}{10}$  der Eichfehlergrenzen. Für die Hauptnormalen sind keine bestimmten Fehlergrenzen vorgeschrieben; sie werden vielmehr unmittelbar mit dem Prototyp auf  $\pm \frac{1}{20}$  der Fehlergrenzen der Kontrollnormalen verglichen, das seinerseits von Zeit zu Zeit an das internationale Urmetern angeschlossen wird.

§ 20. Sämtliche Eichbehörden haben sich bei der Eichung der vom Bundesrat festzusetzenden Stempel und Jahreszeichen zu bedienen.

Bei der Nacheichung ist das Jahreszeichen allein anzuwenden, soweit nicht von der Kaiserlichen Normal-Eichungs-Kommission für einzelne Gegenstände abweichende Bestimmungen getroffen werden oder der gänzliche Fortfall der Stempelung zugelassen wird.

Das Stempelzeichen besteht aus einem gewundenen Bande, dem die Buchstaben DR (Deutsches Reich), in Bayern KB (Königreich Bayern) eingeschrieben sind. Präzisionsmaße werden durch einen hinter die beiden Buchstaben gesetzten 8strahligen Stern gekennzeichnet.

Das Jahreszeichen besteht aus den beiden letzten Ziffern der Jahreszahl in einer Umrahmung, die dem Mittelschild des Reichsadlers gleicht.

Meßgeräte, bei denen das Stempel- oder das Jahreszeichen fehlt oder undeutlich geworden ist, oder bei denen nach Ausweis des Jahreszeichens das Stempelzeichen ungültig geworden ist, gelten als ungeeicht und nicht verkehrsfähig.

## 2. Die Eichordnung.

Auf Grund des § 19 hat dann die Physikalisch-Technische Reichsanstalt die Eichordnung vom 8. September 1911 erlassen, während die Verkehrsfehlergrenzen erst am 18. Dezember desselben Jahres festgelegt wurden. Sie enthält zunächst einige allgemeine Vorschriften, von denen die wichtigsten nachstehend aufgeführt werden.

§ 7. Als richtig im Sinne der Eichordnung gelten die Meßgeräte, die von den Eichnormalen oder den mit den Eichnormalen festzustellenden Sollgrößen im Mehr oder Minder höchstens um die in den besonderen Vorschriften festgesetzten Fehlergrenzen (Eichfehlergrenzen) abweichen.

Die in den besonderen Vorschriften aufgestellten Fehlergrenzen gelten für die Neueichung. Für die Nacheichung gelten die Verkehrsfehlergrenzen (§ 13 der Maß- und Gewichtsordnung), soweit nicht Gegenteiliges bestimmt ist.

§ 8. Meßgeräte, deren Sollgröße durch die Temperatur bestimmt wird, müssen bei der Temperatur des schmelzenden Eises (Normaltemperatur) richtig sein, oder sie müssen, wenn die besonderen Vorschriften Ausnahmen zulassen, an ersichtlicher Stelle die deutliche Angabe der Temperatur tragen, bei der sie richtig sein sollen.

Hiernach war eine Eichung von Längenmaßen nur für die Bezugstemperatur 0° möglich und für die gesamten technischen Meßgeräte mit der Bezugstemperatur 20° ausgeschlossen. Sie konnten allerdings beglaubigt werden, d. h. auf Antrag bestimmte die Physikalisch-Technische Reichsanstalt zahlenmäßig die vorhandenen Abweichungen vom Sollwert (während durch die Eichzeichen nur angegeben wird, daß diese die zugelassenen Fehlergrenzen nicht überschreiten). Eine derartige Beglaubigung ist aber wegen des größeren Aufwandes an Geräten, Beobachtungs- und Berechnungszeit wesentlich teurer und bietet auch für den Benutzer nicht die Bequemlichkeit wie die Eichung. Während er aus dem Eichzeichen sofort sieht, daß sein Maßstab innerhalb der Eichfehlergrenzen richtig ist, kann er aus dem für die Beglaubigung verwendeten Zeichen PTR nur sehen, daß eine solche vorgenommen ist, weiß aber nicht, welche Größe die Abweichungen haben (ob sie nicht u. U. sogar über die Eichfehlergrenzen hinausgehen), sondern muß dazu erst den Prüfschein einsehen.

Von seiten der Industrie wurde deshalb bald nach Festlegung der Bezugstemperatur von 20° darauf gedrängt, daß die Eichung auch für Meßgeräte mit dieser zugelassen werden sollte, was nach § 8 der Eichordnung durchaus möglich war. Dieser Forderung ist durch die Verordnung vom 5. März 1925 (1) stattgegeben, die am 20. des gleichen Monats in Kraft trat. Danach sind für die Eichung auch Längen- und Dickenmaße zulässig, die bei 20° richtig sind. Sie müssen unbedingt an ersichtlicher Stelle die deutliche und dauerhaft aufgebraachte Bezeichnung „20°“ tragen.

Eingefügt wurde diese Ergänzung aber nicht in die vorstehenden allgemeinen, sondern in die besonderen Vorschriften für die Längen- und Dickenmaße, die zum Teil die Vorschriften der Maß- und Gewichts- wie auch die der Eichordnung etwas einengen, und die in ihren hauptsächlichen Bestimmungen für die Maßstäbe und Bandmaße lauten:

### A. Maßstäbe und Bandmaße.

#### Zulässige Maßgrößen.

§ 13. Zulässig sind Maße von

50, 40, 30, 25, 20, 15, 10 m,  
9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1 m,  
0,5, 0,2, 0,1 m.

Präzisionsmaße sind nur von 5 m abwärts zulässig.

Einteilungen sind zulässig nach ganzen und halben Metern sowie nach Zehnteln, Hundertsteln und Tausendsteln dieser beiden Maßlängen.

Zulässig sind Maße, die bei 20° richtig sind.

**Material.**

§ 14. Zulässig sind:

Metall für Maße jeder Länge; Elfenbein, Knochen und anderes Material von ähnlicher Festigkeit und Beständigkeit für Maße von 10 m abwärts; Holz für Maße von 10 bis einschließlich 0,5 m; Hartholz auch für kleinere Maße. Für Präzisionsmaße ist nur Metall zulässig.

**Gestalt und Einrichtung.**

§ 15. 1. Zulässig sind Endmaße und Strichmaße sowie Maße, die an einem Ende wie Endmaße, am anderen wie Strichmaße begrenzt sind, und zwar

aus einem Stück bestehende Maße: von 10 bis einschließlich 0,1 m,

aus mehreren gelenkartig verbundenen Stücken bestehende (zusammenlegbare) Maße: von 10 bis einschließlich 0,5 m,

Bandmaße von 50 bis einschließlich 0,5 m.

Präzisionsmaße dürfen nur aus einem Stück bestehen.

2. Endmaße bis einschließlich 0,5 m abwärts, die nicht ohnehin aus Metall bestehen, müssen an den Enden durch metallne Beschläge geschützt sein.

3. Strichmaße dürfen durch Striche, Punkte, Stifte, Löcher und dergleichen begrenzt sein. Einteilungsmarken dürfen wie die Endmarken der Strichmaße ausgeführt sein.

4. Bandmaße mit Endringen, deren Mittelpunkte oder Begrenzungsflächen in unzweideutig bezeichneter Weise die Enden des Maßes bilden, sind zulässig.

5. Zusammenlegbare Maße dürfen keinen Handgriff haben. Der Zusammenhang der einzelnen Teile sowie ihre ordnungsgemäße Lage müssen durch geeignete Vorrichtungen gesichert sein.

**Bezeichnung.**

§ 16. 1. gibt als zulässige Bezeichnung für die Gesamtlänge: m, dm, cm, mm (in der Abkürzung oder auch ausgeschrieben) an.

2. Maße, die für 20° C berichtigt sind, müssen an ersichtlicher Stelle die deutlich und dauerhaft aufgebrachte Aufschrift „20°“ tragen.

3. Die Bezifferung der Unterabteilungen darf nach: m, dm, cm oder mm ausgeführt und den Ziffern diese Abkürzungen beigelegt sein.

5. Bei Maßen aus Nickelstahl muß der Nickelgehalt angegeben und außerdem vermerkt sein, daß das Material getempert ist.

**Fehlergrenzen.**

§ 17. Die Fehlergrenzen betragen für die Gesamtlänge

Art des Maßstabes	Länge in m	Fehlergrenze in mm
aus Metall . . . . .	10 bis einschl. 7	3
	6 „ „ 4	2
	3 „ „ 2	1
	1	0,5
	0,5, 0,2, 0,1	0,25
aus anderem Material . . . . .	10 bis einschl. 7	6
	6 „ „ 4	4
	3 und 2	2
	1	1
	0,5	0,5
Bandmaße . . . . .	0,2 und 0,1	0,25
	50 und 40	8
	30 bis einschl. 20	6
	15	4
	10 bis einschl. 7	3
Präzisionsmaßstäbe . . . . .	6 „ „ 4	2
	3 und 2	1
	1	0,75
	0,5	0,5
	5 und 4	0,4
	3 „ 2	0,2
	1	0,1
	0,5, 0,2, 0,1	0,05

Die Fehlergrenzen gelten bei Auflagerung der Maße auf wagerechter Unterlage.

Für die Einteilung gelten folgende Fehlergrenzen:

1. für den Abstand irgend einer Einteilungsmarke:

bei Maßen über 3 m Länge: von dem ihr nächsten Ende der Maßlänge: der halbe Fehler der Gesamtlänge;

bei Maßen von 3 m und weniger: von den beiden Enden der Maßlänge: der ganze Fehler der Gesamtlänge;

2. für den Unterschied der Längen benachbarter cm und halber cm: 0,5 mm, bei Präzisionsmaßen 0,2 mm;

für den Unterschied der Längen benachbarter mm oder halber mm: 0,1 mm.

Die Verkehrsfehlergrenzen sind nach der Verordnung vom 18. Dezember 1911 doppelt so groß, mit Ausnahme der Präzisionsmaße, die bei der Neueichung dieselben Fehlergrenzen wie bei der Neueichung innezuhalten haben.

Für Dickenmaße (Kluppmäße) sind gleichfalls besondere Bestimmungen aufgestellt.

Die vorstehend für Maßstäbe, Band- (und Klupp-) Maße angegebenen Fehlergrenzen sind zum Teil recht weit und stellen, selbst bei den Genauigkeitsmaßstäben, durchaus nicht die Grenze dar, die bei sorgfältiger Herstellung erreicht werden kann, und die auch die Technik vielfach für ihre Zwecke verlangen muß. Sie hat deshalb besondere Normenblätter über die Genauigkeit ihrer Meßgeräte aufgestellt, auf die bei den einzelnen Geräten näher eingegangen werden wird.

Die Sicherung des Maß- und Gewichtswesens erfolgt in anderen Staaten in ähnlicher Weise wie in Deutschland, wobei die frühere Normal-Eichungs-Kommission wie die Physikalisch-Technische Reichsanstalt vielfach als Vorbilder gedient haben. Ihre Aufgaben werden z. B. in Österreich durch die Normal-Eichungs-Kommission, in England durch das dem Board of Trade unterstehende Standards Department und das National Physical Laboratory in Teddington, in Amerika durch das National Bureau of Standards in Washington, in der Schweiz durch das Eidgenössische Amt für Maß und Gewicht, in Italien durch das Laboratorio Centrale Metrico, in Rußland durch die Zentralkammer für Maß und Gewicht erfüllt.

## J. Die Entwicklung der technischen Messungen.

In den ältesten Zeiten der Technik, als noch im Handwerksbetrieb jedes Stück einzeln oder auch nur einmal hergestellt wurde, kam es auf die genaue Innehaltung der Abmessungen in der Regel nicht an. Mußten die Maße bestimmter Teile zueinander abgestimmt sein, etwa die Durchmesser einer Achse und ihres Lagers, so wurden sie gepaßt, d. h. so lange nachgearbeitet, bis sie dem Gefühl nach gut zueinander paßten. Von den Schwierigkeiten, die dabei zu überwinden waren, gibt wohl am besten ein Brief von James Watt an seinen Freund Boulton aus dem Jahre 1769 eine Vorstellung, in dem er ihm voller Freude mitteilt, daß es ihm nunmehr gelungen wäre, die Zylinder so genau auszubohren, daß es auch an der schlechtesten Stelle kaum noch möglich sei, zwischen Kolben und Zylinderwand ein Halbkronenstück zu bringen. Die großen Fortschritte, die hierin liegen, erkennt man erst, wenn man weiß, daß er vorher den Kolben mit Papier, Kitt und selbst mit seinem alten Hut hatte dichten müssen (17, 20). Anfangs hatte sich Watt sogar mit geschmiedeten Zylindern behelfen müssen, da es nicht möglich war, selbst unter Berücksichtigung der damaligen bescheidenen Ansprüche, gleichmäßige Bohrungen herzustellen. Auch nach Einführung der Bohrmaschine war die Genauigkeit eine recht mäßige. Reynolds berichtet, daß die Unrundheit bei einem großen Zylinder nur die Dicke eines kleinen Fingers ausmachte (12).

Daß unter diesen Umständen Maße genügten, welche auf mehrere Millimeter unsicher waren, ist wohl einleuchtend. In der Präzisionsmechanik wurde allerdings auch damals bereits wesentlich genauere Arbeit geleistet, wie vor allem die alten astronomischen Instrumente beweisen, doch handelt es sich hierbei gewissermaßen um technische Kunstwerke.

Nicht geringere Schwierigkeiten wie die Herstellung bereitete damals (und auch später) das Messen, waren doch kaum die einfachsten Geräte weiter verbreitet (11)<sup>1</sup>.

Der Beginn des technischen Meßwesens setzt erst mit dem Aufkommen des Austauschbaus ein, bei dem verlangt wird, daß beliebig herausgegriffene Einzel-

<sup>1</sup> Die älteste deutsche Drahtlehre von 1695 findet sich im Museum zu Guben.

teile zueinander passen, wobei diese Forderung ursprünglich nur auf die in demselben Betriebe gefertigten erstreckt wurde.

Das Bedürfnis hiernach trat zuerst bei der Heeresrüstung auf, da es hier unumgänglich notwendig ist, daß zum mindesten jedes Geschöß in jedes Gewehr oder Geschütz paßt. Bei den Musketen paßte sich automatisch die Bleikugel dem jeweiligen Laufdurchmesser an; bei den Stein- oder Gußeisenkugeln der Geschütze mußte man aber doch darauf achten, daß die Kaliber der einzelnen Röhre möglichst einander gleich waren. Deshalb finden wir Geschützmaßstäbe bereits im 16. Jahrhundert.

Später trat dazu die Forderung, beschädigte Teile der Feuerwaffen ohne jede Nacharbeit gegen solche aus dem Reservelager austauschen zu können, da es nur so möglich war, die Kampfkraft der Truppe aufrecht zu erhalten; mußte doch andernfalls eine große Menge von vollständigen Ersatzwaffen ständig mitgeführt und die beschädigten zum Arsenal in der Heimat zurückgesandt werden, damit sie dort wieder instand gesetzt wurden. Einen Hinweis auf die dadurch bewirkten Schwierigkeiten gibt die Tatsache, daß in den englischen Arsenalen im Jahre 1812 nicht weniger als 200000 Flinten auf Reparatur warteten (15).

Deshalb finden wir auch die ersten Versuche zur Austauschfabrikation in einer Waffenfabrik, und zwar bereits im Jahre 1715 in Frankreich (5), die aber nicht zum Ziele führten, da die Unkosten zu groß wurden. Erst 70 Jahre später erhalten wir wieder Kenntnis von einem solchen Versuch<sup>1</sup> durch einen Brief Jeffersons, des amerikanischen Gesandten in Paris, vom 30. Mai 1785 an John Jay. Er berichtet darin, daß es ihm möglich gewesen sei, mit beliebig aus 50 Satz herausgenommenen Teilen ein Gewehrschloß zusammenzusetzen (18). Die bei der Herstellung benutzten Meßgeräte hielt der Erfinder Le Blanc geheim. Es gelang Jefferson indessen nicht, die Vereinigten Staaten dafür zu interessieren, und so gerieten auch jene Versuche ebenso wie zwei spätere auf europäischem Boden (1811 Bodmer in St. Blasien und 1829 Roanne) wieder völlig in Vergessenheit.

Unabhängig hiervon waren sie aber inzwischen in den Vereinigten Staaten aufgenommen und, was wichtiger, auch praktisch durchgeführt. Hier hatte nämlich der Kongreß im Jahre 1798 die Errichtung von Waffenfabriken geplant. Eli Whitney<sup>2</sup> erbot sich zur Übernahme dieser Aufgabe und erhielt auch eine Bestellung auf 10000 Musketen, wovon 4000 im Laufe eines Jahres, der Rest in 2 Jahren geliefert werden sollte. Trotzdem sich die Erledigung dieses Auftrages infolge verschiedener Schwierigkeiten 8 Jahre hinauszog, war man mit Whitney und seinen Leistungen sehr zufrieden. Das ist wohl besonders darauf zurückzuführen, daß er die einzelnen Teile in Serien von 100 oder 1000 Stück fertigte und dadurch Austauschbarkeit erzielte. Da die Herstellung nach Feillehren erfolgte, so war natürlich die erreichte Genauigkeit keine allzu hohe. Es wird nämlich angegeben, daß der Bolzen in der Ladekammer des Gewehrs noch bewegt werden konnte, wenn ein Stück Papier, und zwar von der damals gebräuchlichen dicken, etwa unserem Packpapier entsprechenden Sorte, dazwischen gebracht wurde, während dies bei 2 Stück Papier allerdings nicht mehr möglich war (15). Trotzdem war der von Whitney erzielte Fortschritt so bedeutend — gab doch der Staatssekretär des Kriegs-Departements im Jahre 1822 an, daß Whitneys Verbesserungen für die Regierung eine jährliche Ersparnis von 25000 Dollar bedeuteten (4) —, daß seine Werkstätten in New Haven ein Wallfahrtsort nicht nur für Techniker und Industrielle, sondern auch für andere Reisende wurden (21).

Im Jahre 1799 hatte auch S. North einen Regierungsauftrag auf 500 Pistolen erhalten, in dem allerdings von Austauschbarkeit noch nichts erwähnt wird. Er begann aber bald, vielleicht beeinflusst durch Whitney, in ähnlicher Weise wie dieser zu fabrizieren. Das Prinzip der Arbeitsteilung und damit der

<sup>1</sup> Schon vorher, im Jahre 1764 hatte Fournier die Füße der Drucktypen im Buchdruckereigewerbe genormt (13).

<sup>2</sup> Eli Whitney wurde am 8. Dezember 1765 in Westboro Mass. geboren und auf der Yale University zum Lehrer ausgebildet. Im Jahre 1792 kam er in die Südstaaten und er fand dort den Baumwollentkerner, den er in jedem kleinsten Teil selbst herstellte. Dadurch wurde er der Schöpfer der Baumwollindustrie. Whitney starb am 8. Januar 1825 in New Haven (8).

Beginn des Austauschbaus findet sich zuerst in einem Brief aus dem Jahre 1808 an das Marine-Ministerium klar ausgedrückt. Nach einem anderen Brief war die austauschbare Fertigung im Jahre 1815 in seinen Werkstätten völlig durchgeführt (wobei bereits Grenzlehren benutzt worden sein sollen), so daß auch North wesentlich zur Einführung dieses Fertigungsverfahrens beigetragen hat (16). In einem späteren Regierungsauftrage aus dem Jahre 1831 über 20000 Pistolen wird auch die Austauschbarkeit ausdrücklich mit den Worten verlangt: Die einzelnen Teile der Pistolen müssen so genau zueinander passen, daß jeder Teil einer Pistole auf jede andere Waffe eines Vorrates von 20000 Stück passen muß.

Allmählich folgten andere amerikanische Waffenfabriken nach, so 1819 die in Harpers Ferry. Im Jahre 1828 findet sich in einem an Colt erteilten Staatsauftrag auf Gewehre die Vorschrift, daß die Einzelteile nicht nur untereinander, sondern auch mit den in den Staatswerkstätten hergestellten austauschbar sein müßten, und seit 1845 wurden ganze Gewehre nach diesem System hergestellt (6).

Die in Amerika erzielten Fortschritte waren so bedeutend, daß sich die europäischen Waffenfabriken zur Einführung dieses Systems entschlossen. Das geschah zuerst 1858 in England in der Gewehrfabrik Enfield, wozu die nötigen Maschinen von Whitney besorgt wurden. Deutschland folgte erst 1872 [obwohl Ansätze zum Austauschbau bereits 1825 in der Gewehrfabrik Neiße gemacht worden waren (7)], als das Zündnadelgewehr durch das Modell 1871 ersetzt werden sollte, und zwar auf Grund der bei einer Studienreise nach Nordamerika gewonnenen Einblicke. Dazu wurden nicht nur vollständige Fabrikeinrichtungen zur maschinenfertigen Gewehrherstellung für die Fabriken Spandau, Erfurt und Danzig in Amerika bestellt, sondern auch amerikanische Fachleute und Arbeiter verpflichtet (5, 6)<sup>1</sup>.

Es ist wohl selbstverständlich, daß inzwischen auch andere Industriezweige den wirtschaftlichen Nutzen des Austauschbaus erkannt und ihn deshalb eingeführt hatten. So finden wir ihn bereits 1808 in der Fabrik von Bentham und Brunel bei der gänzlich maschinellen Herstellung von Flaschenzugblöcken; 1830 im Großuhren-, 1848 im Turmuhrenbau<sup>2</sup>, seit 1850 im Textilgewebe, seit 1856 bei Nähmaschinen, bei denen häufiger eine Auswechslung von Teilen notwendig ist. Aus demselben Grunde dehnte er sich auch auf die Verkehrsmittel und die landwirtschaftlichen Maschinen aus.

Da die Durchführung des Austauschbaus in erster Linie von der Güte und Leistungsfähigkeit der Bearbeitungsmaschinen abhängt, so sind wesentliche Fortschritte hierin auch immer Antriebe zur weiteren Ausbreitung desselben gewesen. Als solche seien genannt die 1840 erfolgte Einführung des von Whitney und North (bereits 1820) erfundenen Fräasers und die seit etwa 1870 aufkommenden Rundschleifmaschinen, die ihrerseits als vollwertige Bearbeitungsmaschinen erst durch die in den sechziger Jahren eingeführten künstlichen Schmirgelscheiben mit Kautschuk- oder mineralischer Bindung ermöglicht wurden (6).

In etwa demselben Maße wurde der Aufschwung des Austauschbaus aber auch durch die Fortschritte auf dem Gebiete des Meßwesens bewirkt. Hier wäre in erster Linie die Einführung der Schraublehre Anfang der 70er Jahre zu nennen.

Die eigentliche Blüte des Austauschbaus datiert indessen erst seit der Einführung der festen Lehren und besonders der Grenzlehren.

<sup>1</sup> Verschlüsse und andere Teile wurden im Grusonwerk, Magdeburg, austauschbar hergestellt (10).

<sup>2</sup> Um 1800 hatte bereits Breguet eine Art Serien- und Austauschbau bei seinen Chronometern durchgeführt, indem er die einzelnen Teile so genau herstellte, daß sie ohne weiteres ausgetauscht werden konnten, wodurch die Reparaturen ganz wesentlich erleichtert wurden (9).

Lochlehren sollen schon frühzeitig für die Kontrolle von Gewehren und Geschützrohren gebraucht worden sein (6) (woher der Name Kaliberdorn rührt). Aus dem Jahre 1820 wird von der Verwendung von Flachlehren in deutschen und englischen Gewehr- sowie in englischen Maschinenfabriken berichtet. Im Maschinenbau sollen Whitworth und Bodmer um 1840 die ersten Lehren benutzt haben<sup>1</sup>, während sich ein vollständiger Lehrensatz 1842 in der amerikanischen Waffenfabrik Springfield findet. Rachenlehren wurden erst seit etwa 1860 (von Brown und Sharpe) gebaut. Immer handelt es sich indessen hierbei noch um Normallehren.

Eine Fabrikation, bei der man sich bemüht, jedes Werkstück der (Normal-) Lehre möglichst genau anzupassen, ist viel zu teuer und unwirtschaftlich, da die Kosten mit dem verlangten Genauigkeitsgrad etwa nach einer Hyperbel oder Exponentialfunktion anwachsen. Nun fallen auch die nach derartigen Normallehren zu verschiedenen Zeiten gefertigten Stücke infolge der Abweichungen der Lehren voneinander und der gefühlsmäßigen Passung durchaus nicht gleich aus, sondern zeigen gegeneinander Abweichungen, ohne daß doch dadurch ihr Verwendungszweck in Frage gestellt wurde, wie die Erfahrung lehrte. Man sah, daß jedes Werkstück um gewisse Beträge von seinem Sollwert abweichen, also ein bestimmtes Größt- und Kleinstmaß haben durfte. Innerhalb ihres Unterschiedes (der Toleranz) mußten aber die Abmessungen bleiben, damit die Verwendungsmöglichkeit gewährleistet war. Somit kam es nur darauf an, die Innehaltung der Toleranz zu prüfen, also zu sehen, daß das Größtmaß nicht über-, das Kleinstmaß nicht unterschritten wurde. Man bedurfte also je zweier Lehren, die die beiden Grenzmaße darstellen, und die deshalb als Grenzlehren bezeichnet werden.

Sie kamen indessen erst später auf, denn die Angabe, daß Whitney und auch andere Waffenfabriken (6) um 1800 bereits hiernach gearbeitet haben sollen, dürfte wohl kaum den Tatsachen entsprechen. Bohrungsgrenzlehren, also Rundmaße mit bestimmtem Über- und Untermaß, wurden von Whitworth 1857 benutzt, doch stimmten die einzelnen Lehren wenig untereinander überein. Grensrachenlehren (mit Prüf-Meßscheibe) wurden 1882 von Pratt und Whitney gebaut; sie dienten aber nur zur Kontrolle roher Rundeisenteile für den Eisenbahnwagenbau. Die älteste Veröffentlichung über Grenzlehren im Maschinenbau findet sich in einer 1885 erschienenen Gebrauchsanweisung für Rundschleifmaschinen (6).

Einen Aufschwung nahm der Gebrauch von Lehren durch die Weltausstellung in Philadelphia (1876), auf der allerdings nur Normallehren zu sehen waren. So kann man den Beginn des allgemeinen Arbeitens mit ihnen auf die Mitte der achtziger Jahre, den des Arbeitens nach Grenzlehren auf Mitte der neunziger Jahre ansetzen. Da um diese Zeit auch die Maßeinheit durch das Pariser Urmeter gesichert war, ohne die ja jede Messung gewissermaßen in der Luft schwebt, so waren von jenem Zeitpunkt ab alle Bedingungen zur schnellen und erfolgreichen Ausbreitung des Austauschbaus gegeben.

Er entwickelte sich zunächst naturgemäß nur innerhalb jedes einzelnen Betriebes, in dem auf Grund der jeweiligen Einzelerfahrungen Toleranzen aufgestellt wurden. Ihre Größen waren deshalb von Betrieb zu Betrieb andere (s. z. B. 19), auch entbehrten die gewählten Abmaße fast durchweg der inneren Systematik.

Die Aufstellung eines für die gesamte Industrie einheitlichen Systems wurde erst durch die Anforderungen des Weltkriegs gefördert, die den Anlaß zur Gründung des heutigen Deutschen Normenausschusses (DNA) im Mai 1917 gaben.

Sein Werk, über das das in jedem Frühjahr und Herbst erscheinende Normblattverzeichnis Auskunft gibt, liegt in z. Z. etwa 2000 Normenblättern vor. Nachdem die grundlegende Frage der Bezugstemperatur (in DIN 102 und 524) geklärt war, konnte er sich vor allem der Frage der Passungen der Rundteile zuwenden. Die deutschen Toleranzen und Abmaße sind durchweg einheitlich in Paßeinheiten (PE) aufgebaut, wobei  $1 \text{ PE} = 5 \cdot \sqrt[3]{D} \mu$  gewählt ist (dabei ist der Durchmesser  $D$  in mm einzusetzen). In den beiden Systemen der Einheitsbohrung und der Einheitswelle sind mehrere Gütegrade für die verschiedenen Fertigungs-

<sup>1</sup> Seit dieser Zeit werden auch Längenmaße in England fabrikmäßig hergestellt, während Deutschland darin etwas später folgte.

gebiete vorgesehen: Edel-, Fein-, Schlicht- und Grobpassung, die sich durch die Größe der zulässigen Toleranzen (in PE angegeben) unterscheiden und 5, 10, 3 bzw. 4 verschiedene Sitze enthalten. Im einzelnen auf das DIN-Passungssystem einzugehen, ist hier nicht möglich, es muß dazu auf die darüber vorliegende Literatur verwiesen werden (14, 22). Dasselbe gilt auch für die volkswirtschaftliche Bedeutung der Normung; die durch sie erzielten jährlichen Ersparnisse können auf die Größenordnung von 1 Milliarde geschätzt werden (2, 3).

In ähnlicher Weise ist man auch im Auslande vorgegangen, wobei die DI-Normen von Österreich, Belgien, Norwegen, Holland und Italien übernommen wurden. Auch die Passungssysteme der übrigen Länder unterscheiden sich — trotz zum Teil anderen systematischen Aufbaus — doch so wenig von dem deutschen, daß in den meisten Fällen praktische Austauschbarkeit besteht (1).

Durch die ganzen Normungsarbeiten und vor allem die Passungen, also das Arbeiten nach Toleranzen, hat das gesamte technische Meßwesen eine besondere Bedeutung erlangt. Ohne genaue Meßgeräte und -methoden ist die Innehaltung der Toleranzen, die sich bei den schärfsten Anforderungen nur auf wenige  $\mu$  belaufen, nicht zu gewährleisten. Es muß aber betont werden, daß auch das beste Gerät nichts nützt, wenn es nicht sachgemäß bedient wird. Zum Messen gehört neben der Beherrschung der wissenschaftlichen Grundlagen eine große Erfahrung und Übung, sowie kritischer Blick.

Durch die von ihm gestellten Ansprüche hat der Austauschbau sehr zur Entwicklung der Meßtechnik beigetragen. In den Jahren 1920 bis 1923 setzte ein fast sprunghaftes Fortschreiten derselben ein. Es entstand eine große Reihe von Instrumenten, die vor allem durch die starke Verwendung optischer Hilfsmittel gekennzeichnet sind. Heute verfügt die Technik über eine große Zahl von Geräten, die allen vernünftigerweise zu stellenden Ansprüchen genügen.

## II. Strichmaße und ihre Messung.

### A. Strichmaße.

#### 1. Holz- und Gelenkmaßstäbe.

In der Technik ist es nur in den wenigsten Fällen möglich, die Abmessungen von Werkstücken unmittelbar durch Anlegen von Maßstäben zu bestimmen; sie bedarf meist noch gewisser Hilfsmittel, der Meßgeräte, um die Maße der Prüflinge mit den Maßstäben vergleichen zu können. Auf jeden Fall bilden diese aber die Grundlage aller Messungen. Wie bei den Prototypen können sie als Strich- oder als Endmaße ausgebildet werden.

Damit die Strichmaße möglichst vielseitig verwendbar sind, dürfen sie nicht nur, wie das Urmeter, eine einzige Länge darstellen, sondern müssen noch eine Unterteilung, im allgemeinen in cm und mm, besitzen. Da man die Länge mit ihnen durch einfaches Anlegen bestimmen kann, so tritt bei ihrer Benutzung irgend ein Meßdruck nicht auf; auch eine Abnutzung oder Beschädigung ist bei sachgemäßer Verwendung nicht zu befürchten. Deshalb braucht man auch bei der Wahl des Werkstoffes hierauf keine Rücksicht zu nehmen, sondern kann einen solchen wählen, der die Gewähr einer (praktisch genügenden) Unveränderlichkeit bietet (z. B. ungehärteten, spannungsfreien Stahl). Darin liegen gewisse Vorteile, die die Strichmaße den Endmaßen gegenüber aufweisen.

Die früher fast allgemein gebrauchte und auch roheste Form ist der Holzmaßstab, den man, wenn es sich um Längen von mehr als 300 bis 500 mm handelt, mit Gelenken versieht und dadurch zusammenklappbar macht. Nach der Eichordnung beträgt der Fehler bei 1 m langen Stäben für die Gesamtlänge 1 mm, die Verkehrsfehlergrenze sogar 2 mm. Ebenso groß darf auch der Fehler des Abstandes einer Einteilungsmarke von irgend einem Ende sein, während der Unterschied benachbarter cm oder mm 0,5 bzw. 0,1 mm nicht übersteigen darf.

Von den meisten Gelenkmaßstäben werden die Fehler der Gesamtlänge nicht erreicht, selbst wenn man berücksichtigt, daß sie durch das Spiel in den

Gelenken beim Auseinanderziehen um etwa 0,5 mm geändert werden kann. Dagegen werden die übrigen Fehlergrößen selten innegehalten. Die Hauptschuld hieran haben aber nicht etwa die Gelenke, die bei sorgfältiger Herstellung nur Abweichungen bis 0,2 mm (beim Auseinanderziehen allerdings bis 0,4 mm) geben, sondern die Enden. Die Gelenkmaßstäbe sind hier nämlich nicht als Strich-, sondern als Endmaße ausgebildet, da die Maßstriche 0 und 1000 mm durch die Kanten der zum Schutz angebrachten Metallecken ersetzt sind. Diese lassen sich aber bei der durch den billigen Preis notwendigen Massenfertigung nicht mit der nötigen Sorgfalt aufbringen. Aus diesem Grunde zeigen das erste und das letzte mm Fehler bis zu etwa  $\pm \frac{1}{3}$  mm. Deshalb empfiehlt es sich — wenn man nicht aus besonderen Gründen gezwungen ist, das Ende auf eine Unterlage aufzustützen, um etwa die Höhe eines Punktes über dieser zu bestimmen —, nicht von dem Nullpunkt, sondern von dem Maßstrich 10 oder 100 mm aus zu messen, ihn also an beiden Seiten als Strichmaßstab zu benutzen. Mit einem guten Gelenkmaßstab wird man auf  $\frac{1}{4}$  bis  $\frac{1}{2}$  mm genau messen können, während man in der Werkstatt die Fehler wohl doppelt so groß wird ansetzen müssen (1). Dabei wird man ihn möglichst glatt auflegen, während Unterstützung in der Mitte oder an den Enden sehr große Fehler (bei Holzmaßstäben von 1 m bis etwa 10 mm, bei Stahl-Gelenkmaßstäben bis 400 mm) verursacht. Muß man ihn frei halten, so unterstützt man ihn in den Besselschen Punkten, also in 210 und 790 mm<sup>1</sup>.

Gelenkmaßstäbe aus Stahl besitzen meist eine genauere Teilung und festere Gelenke, aber auch sie leiden darunter, daß sie an den Enden abgeschnitten sind. Die Verschiedenheit der Ausdehnungskoeffizienten der einzelnen Werkstoffe spielt bei den hier stets vorliegenden relativ rohen Zwecken keine Rolle, so daß man auch andere Stoffe, z. B. Aluminium nehmen könnte, das als nicht rostend und weniger zerbrechlich dem Stahl gegenüber gewisse Vorteile besitzt (9).

Der starre Holzmaßstab mit  $\frac{1}{1}$ - und leider auch mit  $\frac{1}{2}$ -mm-Teilung findet sich häufiger auf dem Zeichentisch; die  $\frac{1}{2}$ -mm-Teilung ist für das unbewaffnete Auge völlig unbrauchbar und bedeutet nur eine Erschwerung der Ablesung. Vor allem ist eine Schätzung der Zehntel des Intervalls, die man zur Ausnutzung der Teilung stets vornehmen sollte, damit nicht mehr möglich. Der kleinste Winkel, unter dem man 2 Striche noch getrennt wahrnehmen kann, der Sehwinkel  $\varphi$ , beträgt etwa 50 sek (Näheres siehe S. 341). Folglich ist die Größe  $a$  ihres Abstandes in der deutlichen Schweite  $L = 250$  mm:

$$a = L \cdot \operatorname{tg} \varphi = 0,06 \text{ mm.}$$

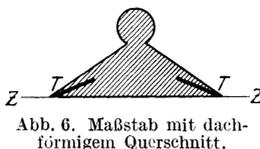


Abb. 6. Maßstab mit dachförmigem Querschnitt.

Demnach muß das Intervall der Teilung mindestens eine Größe von  $10 \cdot 0,06 = 0,6$  mm besitzen, was von der  $\frac{1}{2}$ -mm-Teilung nicht erfüllt ist. Diese erfordert also stets die Benutzung einer Lupe.

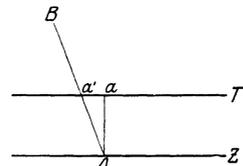


Abb. 7. Parallaxe bei geneigter Blickrichtung.

Sehr empfehlenswert sind Maßstäbe mit dachförmigem Querschnitt (Abb. 6), da bei diesen Zeichnungsebene  $Z$  und Teilungsebene  $T$  sehr nahe zusammenfallen. Dabei müssen die Striche selbstverständlich bis zum Rande gehen, die Teilung also als Kantenteilung ausgebildet sein. Liegen nämlich  $T$  und  $Z$  in einem gewissen Abstände von einander, wie in Abb. 7, so ergibt sich bei schiefer Blickrichtung  $BA$  gegenüber senkrechter ein Fehler vom Betrage  $aa'$ , die sogenannte

<sup>1</sup> Man kann in den Besselschen Punkten unterstützen, da der Abstand der auf der Oberfläche befindlichen Teilung von der neutralen Schicht hier praktisch keine Rolle spielt.

Parallaxe, deren Größe von der Blickrichtung abhängt und proportional dem Abstände von  $T$  und  $Z$  ist. Ferner wird auch die Genauigkeit des Erkennens des Zusammenfallens eines Striches der Zeichnung mit einem Strich des Maßstabes wesentlich besser, wenn der Abstand zwischen  $T$  und  $Z$  wieder kleiner als 50 sek, also unbedingt kleiner als  $\frac{1}{10}$  mm ist (4). Das zeigt sich auch darin, daß der mittlere Fehler<sup>1</sup> bei der Messung eines Intervalls von 1 mm bei abgeschragten Maßstäben nach Abb. 6 nur 6 bis  $9 \mu$  gegenüber  $30 \mu$  bei einem solchen mit 1,5 mm dicker Kante beträgt (5).

Da diese Maßstäbe aus einem Stück bestehen, ferner auch an ihren beiden Enden als Strichmaße hergestellt und somit die Hauptfehlerquellen der Gelenkmaßstäbe ausgeschaltet sind, so kann man ihre Genauigkeit zu 0,1 bis 0,2 mm ansetzen, vorausgesetzt allerdings, daß sie aus einem gut trockenen, nicht „arbeitenden“ Holze bestehen. Die Temperatur braucht auch hier nicht berücksichtigt zu werden, da ihr Einfluß unterhalb der Ablesegenauigkeit bleibt. Die Ausdehnungskoeffizienten sind in der Faserrichtung für

Buchsbaum	Mahagoni	Ahorn	Nußbaum
2,6	3,6	6,4	6,6 · 10 <sup>-6</sup>

und erreichen bei anderen Hölzern Höchstwerte von  $11 \cdot 10^{-6}$ , während sie in der Querrichtung Werte von 43 bis  $64 \cdot 10^{-6}$  aufweisen (2).

Viel stärker ist der Einfluß der Schwankungen der Luftfeuchtigkeit auf die Länge des Holzes. Man schützt sie dagegen durch einen mehrfachen Überzug mit einem guten Lack (vor allem Schellack, evtl. nach vorheriger Behandlung mit Leinöl)<sup>2</sup>, andernfalls kann die Änderung 0,1 bis 0,7 mm auf 1 m betragen (3,10). Da man sich aber durch Wahl eines geeigneten Holzes leicht der unteren Grenze nähern kann, so braucht die Luftfeuchtigkeit, namentlich bei lackierten Maßstäben, nicht berücksichtigt zu werden. In bezug auf die Längenänderung ordnen sich die verschiedenen Hölzer wie folgt:

Fichte	Ahorn	Linde	Kiefer	Buche	Mahagoni	Eiche	Pappel
0,01	0,02	0,03	0,04	0,04	0,06	0,06	0,07 %

Danach dürfte wohl Ahorn das geeignetste Holz für Maßstäbe sein. Auch gegen die Anbringung der Teilung auf Zelluloid (8) liegen trotz seines großen Ausdehnungskoeffizienten von 74 bis  $109 \cdot 10^{-6}$ , keine Bedenken vor, während Elfenbein gänzlich ungeeignet ist, da seine Länge sehr stark von der Luftfeuchtigkeit abhängt; auch wurde z. B. im Laufe von 80 Jahren eine Schrumpfung um 2,36 mm auf 1 m beobachtet (6).

Die Teilung wird auf Holzmaßstäben durch Aufdrucken hergestellt, wodurch sich eine verhältnismäßig hohe Genauigkeit erreichen läßt.

## 2. Stahlmaßstäbe.

Es ist übrigens durchaus nicht nötig, daß sich die Teilung über die ganze Länge des Maßstabes erstreckt, vielmehr würde eine Unterteilung für die ersten 10 bis 50 mm völlig genügen. Wie man trotzdem die Messung bis auf  $\frac{1}{10}$  mm (und Schätzung auf  $\frac{1}{100}$  mm) ausführen kann, lehren die in Abb. 8 wiedergegebenen Beispiele (7). Da die Einteilung aber heute entweder auf völlig automatisch arbeitenden Maschinen oder bis zu  $\frac{1}{3}$  m Länge nach photomechanischen Verfahren (5) durch Kopieren eines Diapositivs einer nur einmal anzufertigenden Originalteilung und nachfolgendes Ätzen geschieht, so ist der durch die kürzere Teilung bedingte Preisunterschied so gering, daß er gegenüber den sonstigen Vorteilen einer vollständigen Teilung nicht ins Gewicht fällt.

<sup>1</sup> Über mittleren Fehler s. S. 49.

<sup>2</sup> Tränken mit Paraffin hat sich im allgemeinen nicht bewährt (7), soll aber bei Sperrholz von Vorteil sein (1a).

Für den Werkstattgebrauch empfehlen sich, vor allem wegen ihres mit dem der Werkstücke übereinstimmenden Ausdehnungskoeffizienten, Stahlmaßstäbe, die bis 300 mm Länge meist einen Querschnitt von  $1 \times 30 \text{ mm}^2$  haben. Sie wurden zuerst um 1850 von der Firma Brown und Sharpe auf den Markt gebracht. Für größere Längen (bis 5 m ausgeführt) muß man, der größeren Durchbiegung wegen, stärkere Querschnitte von  $5 \times 25$  bis  $14 \times 70 \text{ mm}^2$  wählen (3). Zum Zweck größerer Steifigkeit nimmt man gelegentlich auch wohl  $\square$ -förmigen Querschnitt mit der Teilung auf der oberen wahren Fläche. Die Anforderungen an die Genauigkeit sind in DIN 866, Entwurf vom April 1928, festgelegt:

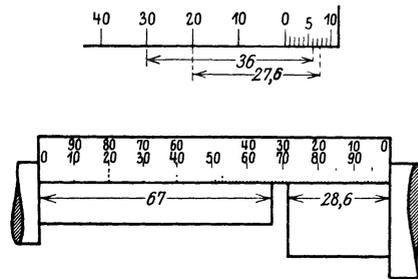


Abb. 8. Messung mit einem nur an einem Ende in mm geteilten Maßstabe.

#### Strichmaßstäbe. Arbeitsmaßstäbe. DIN 866 (Entwurf).

Werkstoff: Ungehärteter Stahl, möglichst mit einer Ausdehnung von  $11,5 \cdot 10^{-6}$  bei  $20^\circ \text{C}$ .

Querschnitt: Rechtecke, beliebiger Abmessungen.

Teilung: Die Teilstriche liegen an der Kante auf einer Breitseite des Maßstabes. Wird der Maßstab von vorn, gegen die geteilte Kante gesehen, so liegt Null am linken Ende des Maßstabes. Die Zahlenbeschriftung soll, so gesehen, aufrecht stehen.

I. Qualität: Beiderseits etwa 10 mm oder mehr überragende Enden<sup>1</sup>. Richtlinie für Strichstärke: 0,08 bis 0,12 mm.

II. Qualität: Mitte des Nullstriches liegt in der Ebene des Stirnendes des Maßstabes. Das andere Ende überragt die Teilung um etwa 10 mm oder mehr. Richtlinie für Strichstärke: 0,12 bis 0,2 mm.

Die die Teilungskante bildenden beiden Flächen des Maßstabes sollen innerhalb der Grenzen  $\pm (0,01 + \text{Maßstablänge}/20\,000)$  mm für I und  $\pm (0,02 + \text{Maßstablänge}/10\,000)$  mm für II eben sein, wenn der Maßstab mit seiner der Teilung entgegengesetzten Fläche auf einer Ebene aufliegt. Die Fläche, auf der die Teilung gerissen ist, ist hierbei nur auf die Breite in Betracht zu ziehen, die von der Teilung beansprucht wird, jedoch tritt für diese Breite die weitere Bedingung hinzu, daß auch die Unterschiede der Abstände beliebiger Punkte von jener Auflagerebene innerhalb der genannten Grenzen liegen.

Auflagerung: Auf ebener Fläche.

Zulässige Fehlergrenzen<sup>2</sup> der Abstände  $L$  der Teilstrichmitten von Nullstrichmitte bei  $20^\circ \text{C}$ :

$$\text{Arbeitsmaßstäbe I: } \pm \left( 0,02 + \frac{L}{50\,000} \right) \text{ mm,}$$

$$\text{Arbeitsmaßstäbe II: } \pm \left( 0,05 + \frac{L}{20\,000} \right) \text{ mm.}$$

Da die Maßstäbe II am Nullende als Endmaße ausgestaltet werden, so müssen sie hier sorgfältig abgeschliffen werden, damit nicht durch diese Ausbildung größere Fehler (wie bei den Gelenkmaßstäben) entstehen (deshalb ist auch bei den Maßstäben I und denen höherer Genauigkeit nach DIN 864 und 865 die Ausbildung als Endmaß nicht zulässig); so wurden früher von verschie-

<sup>1</sup> Für die normale Ausführung der Arbeitsmaßstäbe I ist zur Erhaltung der Genauigkeit (Verstoßung der Kanten usw.) auch der Teilungsbeginn durch das überragende Stabende geschützt. Fälle, in denen auch für diese Genauigkeit mit Null abschneidende Maßstäbe gefordert werden, sind Sonderausführungen, die besonderer Vereinbarung zwischen Verbraucher und Lieferer unterliegen.

<sup>2</sup> Die für größere Arbeiten zulässigen größeren Fehlergrenzen  $\pm \left( 0,1 + \frac{L}{10\,000} \right)$  mm und  $\pm \left( 0,2 + \frac{L}{5\,000} \right)$  mm sind nicht genannt.

denen Seiten an den Enden Fehler von  $60\ \mu$  aber auch bis  $130\ \mu$ , gefunden (1, 3), die im wesentlichen davon herrührten. An den übrigen Teilstrichen betrogen sie dagegen nur 20 bis  $25\ \mu$ , so daß man also bei den Arbeitsmaßstäben I ruhig die Schätzungen bis auf  $\frac{1}{20}$  mm ausführen kann. Da aber die meisten Beobachter, namentlich in der Werkstatt, doch nur auf  $\frac{1}{10}$  mm zu schätzen vermögen, so sind die Festsetzungen für beide Genauigkeitsgrade völlig ausreichend.

Durch die Bestimmungen der DIN 866 bekommt der Nullstrich eine größere Bedeutung als die übrigen, so daß die Messungen möglichst immer von ihm aus auszuführen sind, da dann der Meßfehler höchstens  $a + \frac{L}{b}$  betragen kann. Würde man dagegen von einem anderen Strich (1) ausgehen und bis zu einem Strich (2) messen, so könnte sich der Fehler im ungünstigsten Falle auf  $2 \cdot a + (L_1 + L_2)/b$  belaufen. Dieser Übelstand würde vor allem bei Maßstäben mit nicht durchgehender Teilung (wie in Abb. 8) auftreten, die aber in der Technik kaum vorkommen.

Bestimmungen für die zulässigen Abweichungen eines Intervalls, wie sie in der Eichordnung aufgestellt sind, wurden hier nicht erlassen, da man ja stets vom Nullstrich aus messen wird.

In dem Normblatt sind noch Vorschriften für die Strichdicke aufgestellt, obwohl sie von geringerer Bedeutung ist als die Strichgüte (möglichst gerade, scharfkantige, nicht zackige; symmetrisch gestaltete und an den Enden sich nicht verbreiternde Striche), weshalb diese für die genaueren Maßstäbe festgelegt ist. Die Strichgüte ist vor allem abhängig vom Gefüge des Stahls (siehe S. 163). Die Strichdicken sind so festgesetzt, daß sich eine möglichst gute Ablesbarkeit ergibt; feinere Striche sind zwar leichter sauber herzustellen als stärkere, dieser Vorteil wird aber durch die schlechtere Ablesbarkeit mehr als aufgewogen.

Um die Fehler der Maßstäbe zu bestimmen, vergleicht man sie mit einem Präzisionsmaßstab<sup>1</sup> und ermittelt die Abweichungen in der gegenseitigen Lage ihrer Striche mittels eines Mikroskops mit schwacher Vergrößerung (für Gelenkmaßstäbe ist dagegen Schätzung auf  $\frac{1}{10}$  mm völlig ausreichend). Da für die Arbeitsmaßstäbe eine Meßgenauigkeit von etwa 5 bzw.  $10\ \mu$  ausreicht, so brauchen die Schraubenfehler (bei der Bewegung der Einstellmarke oder des Mikroskopes) in der Regel nicht berücksichtigt zu werden, wohl aber ist das Intervall der Mikrometerteilung für die benutzte Vergrößerung zu bestimmen, indem man mehrere Millimeter des Präzisionsmaßstabes damit ausmißt. Bei der Verschiebung des ganzen Mikroskops mittels Mikrometerschraube ist dies nicht nötig, doch muß dann die Schlittenführung sehr gut sein (siehe S. 57).

Damit bei der Messung die Fokussierung über die ganze Länge erhalten bleibt, sind die Vorschriften für die Ebenheit und Parallelität der Teilungsfläche in bezug auf die Auflagerebene erlassen. Die Vorschriften für die Ebenheit der die Teilungskante enthaltenden Hochfläche waren notwendig, damit beim Anlegen an den Präzisionsmaßstab die Achsen der beiden Teilungen parallel (und nicht geneigt) zueinander verlaufen. Aus demselben Grunde müssen ähnliche Vorschriften auch für diese aufgestellt werden. Sie werden in Vergleichsmaßstäbe (DIN 864, S. 41) für die allerhöchsten Ansprüche und in Prüfmaßstäbe (DIN 865, S. 42), für die meisten technischen Ansprüche ausreichend, Entwürfe vom April 1928, unterschieden.

Die in DIN 864 festgelegten Vorschriften schließen sich im wesentlichen an die bei der Ausführung des Prototyps beobachteten Gesichtspunkte an. Die Vorschriften für Querschnitt und Auflagerung kommen nur für Längen über 200 mm in Betracht, da ja die von der Durchbiegung herrührende Längenänderung proportional der 7. Potenz der Länge ist. Selbstverständlich sind die als Richtlinien aufgestellten Fehlergrenzen enger als in der Eichordnung gehalten.

Die Bestimmung der Korrekturen überläßt man am besten einer Behörde, da ein Fabriklaboratorium wohl kaum über die dazu nötigen Einrichtungen (geeichter Maßstab, Komparator, Temperaturbäder, erschütterungsfreie Aufstellung) verfügen wird [nähere Angaben hierzu findet man bei (6, 8)].

Eine Ausführungsform von Vergleichsmaßstäben mit H-förmigem Querschnitt (und Einlage) ist in Abb. 9 wiedergegeben.

<sup>1</sup> Über die Herstellung eines solchen aus Endmaßen siehe S. 84.

**Strichmaßstäbe. Vergleichsmaßstab. DIN 864 (Entwurf).**

Werkstoff: Ungehärteter Stahl von  $(11,5 \pm 1,5) \cdot 10^{-6}$  Ausdehnung bei  $20^\circ \text{C}$  oder Werkstoffe derselben Ausdehnung. Für Sonderzwecke sind auch andere Werkstoffe zulässig, z. B. Messing, Bronze, Glas u. dgl. Vernicklung oder Einlagen von Nickel u. dgl., die mit dem Stab fest verbunden sind, sind zur Erzielung besserer Striche zulässig.

Querschnitt: H-, U- oder X-förmig, mit einer in der neutralen Ebene liegenden Fläche<sup>1</sup>.

Teilung: Liegt in der Mitte der in der neutralen Ebene liegenden Fläche<sup>2</sup>. Der Maßstab muß die beiden Endstriche der Teilung beiderseits um etwa 10 mm oder mehr überragen. Symmetrisch zur Mittellinie des Maßstabes sind 2 parallele Längsstriche durch die Teilung zu legen, deren Abstand etwa 0,3 mm ist. Das Teilungsintervall kann Dezimeter, halbes Dezimeter, Vierteldezimeter, Zentimeter oder Millimeter sein. Der Nullstrich liegt bei Betrachtung der aufrecht stehenden Zahlenbeschriftung am linken Ende des Maßstabes. Von Null nach links kann ein weiteres Teilungsintervall mit feinerer Unterteilung vorgefügt werden.

Die beiden Ränder jedes Teilstriches müssen scharfkantig, gerade und parallel sein, zum mindesten auf dem Raume zwischen den beiden Längsstrichen. Die Neigung der Fläche der Strichfurche zu der Maßstabebene soll an beiden Rändern des Striches die gleiche sein. Die Teilstriche sollen unter sich gleich stark und parallel sein; sie sollen rechtwinklig zur Mittellinie des Maßstabes stehen. Als Richtlinie für die Strichstärke gilt: 3 bis  $7 \mu$ .

Auf die Breite zwischen den Längsstrichen soll die Teilungsfläche, bezogen auf eine durch die Auflagerung gelegte Ebene, so parallel zu letzterer und so eben sein, daß die größten Unterschiede der Abstände beliebiger Punkte der Teilungsfläche von jener Ebene die Grenzen  $\pm (0,005 + \text{Maßstablänge}/50000)$  mm nicht überschreiten.

Auflagerung: In den Besselschen Punkten, die ungefähr auf  $\frac{2}{9}$  und  $\frac{7}{9}$  der Länge des Maßstabes liegen, derart, daß elastische und thermische Bewegungen des Maßstabes nicht behindert sind (Rollen oder dgl.).

Maßdefinition: Das Maß wird durch den Abstand zweier Teilstriche dargestellt, der der Abstand der Mittellinien beider Teilstriche ist, gemessen auf der Mittellinie zwischen den beiden Längsstrichen. Die Mittellinie eines Teilstriches ist die Linie, die die Abstände seiner Ränder halbiert.

Der Abstand  $L$  eines Teilstriches von dem Nullstrich muß bei  $20^\circ \text{C}$  innerhalb der vorgeschriebenen Grenzen mit seinem Sollwert übereinstimmen.

Zulässige Fehlergrenzen<sup>3</sup> der Abstände  $L$  der Teilstriche vom Nullstrich:

$$\pm \left( 0,005 + \frac{L}{200000} \right) \text{ mm.}$$

Erhöhung der Meßsicherheit durch Bestimmung der Fehler und deren Berücksichtigung bei der Messung.

<sup>1</sup> Bis 200 mm ist auch voller rechteckiger Querschnitt zulässig.

<sup>2</sup> Bei Maßstäben bis 200 mm, die vollen rechteckigen Querschnitt haben: in der Mitte der Oberfläche.

<sup>3</sup> Noch höhere Genauigkeiten: Urmaßstäbe  $\pm (0,002 + L/500000)$  mm wurden nicht genormt.

Die Prüfung der Prüfmaßstäbe nach DIN 865 kann man unter Umständen im Fabriklaboratorium durch Anschluß an Endmaße mittels geeigneter Komparatoren vornehmen.

Eine allerdings nicht der DIN 865 entsprechende Ausführungsform eines genauen Meterstabes ist in Abb. 10 wiedergegeben. Neben dem die Teilung tragenden mittleren Streifen

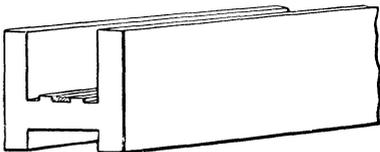


Abb. 9. Vergleichsmaßstab.

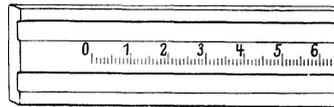


Abb. 10. Genauer Maßstab

sind zwei durch schmale Nuten davon getrennte gleich hohe Streifen stehen geblieben, die als Führung bei der optischen Planbearbeitung und zum Ausprobieren der günstigsten Stellung sowie der Belastung des Teildiamanten dienen. Um die bei der Messung häufig

**Strichmaßstäbe. Prüfmaßstab. DIN 865 (Entwurf).**

Werkstoff: Ungehärteter Stahl von  $(11,5 \pm 1,5) \cdot 10^{-6}$  Ausdehnung bei  $20^\circ \text{C}$  oder Werkstoffe ähnlicher Ausdehnung. Für Sonderzwecke sind auch andere Werkstoffe zulässig, z. B. Messing, Bronze, Glas u. dgl.

Querschnitt: Quadrat oder Rechteck.

Mindestabmessungen des Querschnitts		
Länge des Strichmaßes mm	Höhe mm	Breite mm
bis 500	15	15
über 500 bis 1000	20	20
über 1000 bis 2000	25	25

Verwendung größerer Breiten ist freigestellt.

Teilung: Die Teilstriche liegen an der Kante auf einer Breitseite des Maßstabes. Der Maßstab muß die beiden Endstriche der Teilung beiderseits um etwa 10 mm oder mehr überragen. Das Teilungsintervall kann Dezimeter, halbes Dezimeter, Vierteldezimeter, Zentimeter oder Millimeter sein. Bei Prüfmaßstäben, die zum Prüfen von Arbeitsmaßstäben durch Aneinanderlegen und Vergleichen der Teilung dienen, liegt der Nullstrich, von der Mitte des Maßstabes gegen die geteilte Kante zu gesehen, am linken Ende des Maßstabes. Die Zahlenbeschriftung soll, so gesehen, aufrecht stehen. Von Null nach links kann ein weiteres Teilungsintervall mit feinerer Unterteilung vorgefügt werden.

Die beiden Ränder eines jeden Teilstriches müssen scharfkantig, gerade und parallel sein, besonders an der Kante und deren Nachbarschaft. Die Neigung der Fläche der Strichfurche zu der Maßstabebene soll an beiden Rändern des Striches die gleiche sein. Die Teilstriche sollen unter sich gleich stark und parallel sein; sie sollen rechtwinklig zur Maßstabkante stehen. Als Richtlinie für die Strichstärke gilt: 20 bis  $40 \mu$ .

Die die Teilungskante bildenden beiden Flächen des Maßstabes sollen innerhalb der Grenzen  $\pm \left( 0,005 + \frac{\text{Maßstablänge}}{50000} \right)$  mm eben sein, wenn der Maßstab mit einer der Teilung entgegengesetzten Fläche auf einer Ebene aufliegt. Die Fläche, auf der die Teilung gerissen ist, ist hierbei nur auf die Breite in Betracht zu ziehen, die von der Teilung beansprucht wird, jedoch tritt für diese Breite die weitere Bedingung hinzu, daß auch die Unterschiede der Abstände beliebiger Punkte von jener Auflagerebene innerhalb der genannten Grenzen liegen.

Auflagerung: Auf ebener Fläche, die in bezug auf Ebenheit den Vorschriften der Norm für Genauigkeitsgrad II zum mindesten entsprechen muß [siehe S. 338; für diese ist vorgeschrieben  $\pm \left( 10 + \frac{L}{100} \mu \right)$ ].

Maßdefinition: Das Maß wird durch den Abstand zweier Teilstriche dargestellt, der der Abstand der Mittellinien beider Teilstriche ist, gemessen an der Maßstabkante. Die Mittellinie eines Teilstriches ist die Linie, die die Abstände seiner Ränder halbiert.

Der Abstand  $L$  eines beliebigen Teilstriches von dem Nullstrich muß bei  $20^\circ \text{C}$  innerhalb der vorgeschriebenen Grenzen mit seinem Sollwert übereinstimmen.

Zulässige Fehlergrenzen der Abstände  $L$  der Teilstriche vom Nullstrich:

$$\pm \left( 0,01 + \frac{L}{100000} \right) \text{ mm.}$$

auftretenden Änderungen der Strichauffassung herabzudrücken, definiert man die Begrenzungen der einzelnen cm und mm auch wohl nicht durch einen einzigen, sondern durch drei um je  $100 \mu$  voneinander abstehende Striche (4).

Die Bestimmungen der DIN 865 (Prüfmaßstäbe) unterscheiden sich außer in der Festlegung der Fehlergrenzen hauptsächlich dadurch von DIN 864 (Vergleichsmaßstäbe), daß die Auflagerung auf einer Ebene, statt in den Besselschen Punkten, vorgeschrieben ist. Dabei liegt hier die Teilung, im Gegensatz zu den Vergleichsmaßstäben, nicht in der neutralen Schicht, sondern auf der oberen Fläche des Quadrats oder Rechtecks.

Infolge der Drehung der Querschnitte behält nun diese, auch auf der Kurve gemessen, ihre Länge nicht bei, sondern erleidet je nach der Lage der Unterstützungspunkte eine Verlängerung oder Verkürzung (siehe Abb. 3). Dadurch ist zu der für die neutrale Schicht geltenden Korrektur

$$\delta l' = -\frac{L^7}{360 \cdot \alpha^2} \cdot \left[ \frac{17}{28} - 6 \cdot \left(\frac{a}{L}\right) + 15 \cdot \left(\frac{a}{L}\right)^2 + 10 \cdot \left(\frac{a}{L}\right)^3 - 60 \cdot \left(\frac{a}{L}\right)^4 + 42 \cdot \left(\frac{a}{L}\right)^5 + 2 \cdot \left(\frac{a}{L}\right)^6 \right]$$

noch die Korrektur

$$\delta l'' = -\frac{1}{12} \cdot \frac{L^3 \cdot h}{\alpha} \cdot \left[ 1 - 6 \cdot \left(\frac{a}{L}\right) + 6 \cdot \left(\frac{a}{L}\right)^2 \right]$$

hinzuzufügen. In diesen Gleichungen bedeutet wieder:

$L$  die Länge des Maßstabes,

$h$  seine Höhe,

$a$  den Abstand der Unterstützungspunkte von den Enden,

$$\alpha = 2 \cdot E \cdot \lambda \cdot \frac{L}{G},$$

$E$  den Elastizitätsmodul,

$\lambda$  das Trägheitsmoment des Querschnitts um seine horizontale Mittelachse,

$G$  das Gewicht (= Querschnitt  $Q \times$  spezifisches Gewicht  $s$ ).

Diese Formeln gelten aber nur für die an den Enden gelegenen Striche, also nur für die Gesamtlänge, während sie für irgend welche andere Unterteile wesentlich komplizierter werden (8).

Nun wird  $\delta l'$  allein ein Minimum für  $\frac{a}{L} = 0,22031$  (Unterstützung in den Besselschen Punkten). Ebenso läßt sich auch  $\delta l''$  allein zu einem Minimum machen, und zwar wird  $\delta l'' = 0$  für  $\frac{a}{L} = 0,2113$ . Diese Punkte werden als die günstigsten Punkte bezeichnet. Demgemäß ist es nicht möglich, für die Summe  $\delta l' + \delta l''$  eine Unterstützung anzugeben, bei der sie unter allen Umständen einen Kleinstwert erreicht, da  $\delta l'$  eine Funktion von  $\frac{L^7}{\alpha^2}$ ,  $\delta l''$  dagegen von  $L^3 \cdot \frac{h}{\alpha}$  ist. Nun ändern sich aber  $\delta l'$  und  $\delta l''$  mit Änderung der Unterstützung (also der Größe  $a$ ) sehr stark, und zwar besonders  $\delta l'$  (siehe Abb. 11 und 12; hierin sind als Abszissen die Größen  $\frac{a}{L}$ , als Ordinaten die Größen  $-\frac{L^7}{\alpha^2} \cdot 10^{-7}$  bzw.  $\frac{L^3 \cdot h}{\alpha} \cdot 10^{-3}$ , und zwar erstere in logarithmischem Maßstab aufgetragen).

Da es nun nicht gut angeht, für jeden Maßstab in Abhängigkeit von  $L$ ,  $h$  und  $\alpha$  eine andere Unterstützung zu wählen, so muß untersucht werden, welche bei den in der Technik gewöhnlich vorliegenden Verhältnissen am besten geeignet ist.

Bei Unterstützung in den Besselschen Punkten ( $a = 0,22031 \cdot L$ ) wird

$$\delta l'_1 = -0,000\,002\,612 \cdot \frac{L^7}{\alpha^2} = -0,000\,000\,653 \cdot \frac{L^7 \cdot Q^2 \cdot s^2}{E^2 \cdot \lambda^2},$$

$$\delta l''_1 = +0,002\,553\,3 \cdot L^3 \cdot \frac{h}{\alpha} = +0,001\,276\,7 \cdot \frac{L^3 \cdot h \cdot Q \cdot s}{E \cdot \lambda}.$$

Beide heben sich gegenseitig auf, falls

$$\frac{L^4 \cdot Q \cdot s}{E \cdot \lambda \cdot h} = \frac{12767}{6,53} = 1955$$

ist. Für Stahlmaßstäbe ist nun  $s = 7,8$ ;  $E = 2 \cdot 10^9$  g/cm<sup>2</sup>. Damit wird

$$\frac{L^4 \cdot Q}{\lambda \cdot h} = 501,3 \cdot 10^9.$$

Bei rechteckigem Querschnitt der Breite  $b$  ist

$$Q = b \cdot h, \quad \lambda = \frac{b \cdot h^3}{12},$$

und es wird

$$\frac{L^4}{h^3} = 41,8 \cdot 10^9.$$

Bei einer Höhe  $h = 20$  mm würde sich daraus ergeben  $L$  etwa  $7\frac{1}{2}$  m und bei  $h = 25$  mm sogar  $L$  etwa 15 m, falls sich die beiden Längenänderungen gerade aufheben sollen. Das sind aber Längen, die nur ausnahmsweise in Frage kommen. Da man im Maschinenbau im allgemeinen  $L$  zu höchstens 3 m ansetzen kann, würde das Glied  $\delta l_1'$  überwiegen.

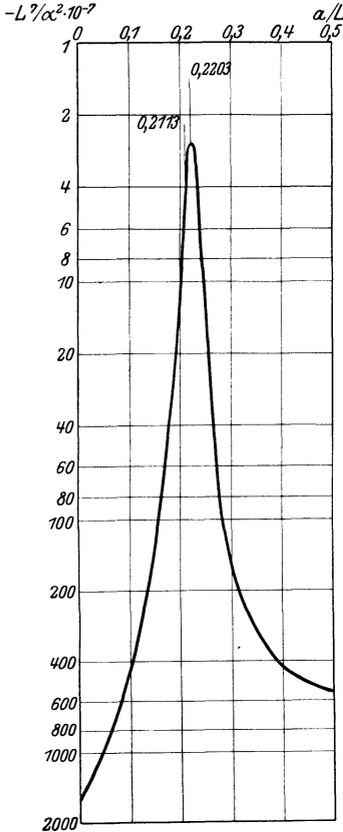


Abb. 11. Änderung der Länge der Horizontalprojektion der neutralen Schicht mit der Unterstüzung.

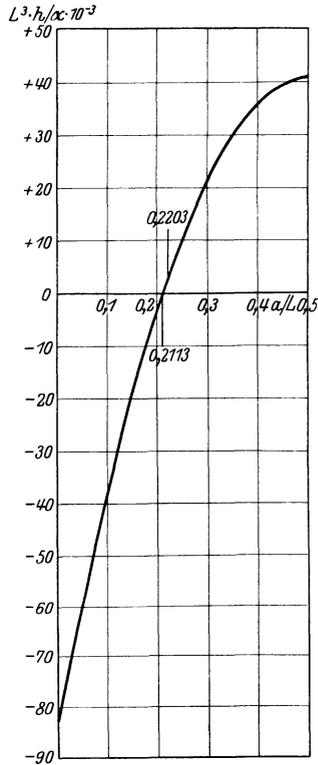


Abb. 12. Änderung der Länge der Teilungsebene mit der Unterstüzung.

Bei Unterstüzung in den günstigsten Punkten ( $a = 0,2113 \cdot L$ ) wird nun

$$\delta l_2' = -0,000\,004\,606 \cdot \frac{L^7}{\alpha^2} = -0,000\,001\,151 \cdot \frac{L^7 \cdot Q^2 \cdot s^2}{E^2 \cdot \lambda^2},$$

$$\delta l_2'' = 0.$$

Da der schon an und für sich geringe Einfluß von  $\delta l'$ , der Längenänderung der neutralen Schicht, gegenüber der Auflage in den Besselschen Punkten nur etwa verdoppelt wird, andererseits der Einfluß der Drehung der Querschnitte völlig verschwindet, so wird man bei allen auf der oberen Fläche geteilten Maßstäben die Auflage in den günstigsten Punkten vorziehen, falls sie nicht auf einer so guten Ebene erfolgt, daß keine Durchbiegung auftreten kann, welche bei den für die betreffenden Maßstäbe vorgesehenen Fehlergrenzen noch in Betracht kommende Fehler verursacht.

Für die Zwischenintervalle gibt es im allgemeinen keine Unterstüzung mehr, die die Längenänderung zu einem Minimum macht. Selbst in den Fällen, wo dies möglich, würde aber auch die Unterstüzung noch von der Lage des Intervalls abhängen. Deshalb ist es am

besten, durch Unterstützung in den günstigsten Punkten bzw. Auflagerung auf Ebene dafür zu sorgen, daß die Änderung der Gesamtlänge möglichst klein wird, und die Korrekturen der verschiedenen Teilungsstriche bei dieser Auflage zu bestimmen.

Bei genügend steifem Querschnitt und kleiner Länge (bis 200 mm) sind die Durchbiegungen in jedem Fall so gering, daß die Auflage gleichgültig ist.

Für die Prüfmaßstäbe ist quadratischer oder rechteckiger Querschnitt vorgeschrieben. Für diesen ist das Trägheitsmoment  $\lambda = \frac{b \cdot h^3}{12}$  ( $b$  die Breite). Damit wird  $\delta l'$  proportional  $\frac{1}{h^4}$ ,  $\delta l''$  proportional  $\frac{1}{h}$ , während die Breite  $b$  überhaupt keine Rolle spielt. Demnach muß man also für große Höhe sorgen, da das bei Unterstützung in den günstigsten Punkten allein übrigbleibende Glied  $\delta l'_2$  mit ihrer 4. Potenz abnimmt. Ganz allgemein muß, wie beim Prototyp, das Verhältnis  $\frac{\lambda}{Q}$  möglichst groß werden, weshalb auch für die Vergleichsmaßstäbe X-, H- oder U-förmiger Querschnitt vorgeschrieben ist.

In England zieht man im allgemeinen (nach Airy) Unterstützung in mehreren ( $n$ ) gleichweit voneinander abstehenden Punkten vor, und zwar ist dann, um  $\delta l'' = 0$  zu machen, ihr gegenseitiger Abstand

$$b = \frac{L}{\sqrt{n^2 - 1}}$$

zu nehmen. Für  $n = 2$  folgt daraus  $b = 0,57733 \cdot L$  und somit

$$a = \frac{1}{2} \cdot 0,422666 \cdot L = 0,2113 \cdot L,$$

also, wie selbstverständlich, die günstigsten Punkte.

Während das Verhältnis der Änderungen der Länge der neutralen Schicht bei Unterstützung an den Enden und in der Mitte

$$\frac{\delta l'_E}{\delta l'_M} = 3,02$$

war, ergibt sich für die hinzukommende Änderung der oben liegenden Teilungsschicht

$$\delta l''_E = -0,0833 \cdot L^3 \cdot \frac{h}{\alpha} = -0,04167 \cdot \frac{L^3 \cdot h \cdot Q \cdot s}{E \cdot \lambda},$$

$$\delta l''_M = +0,0417 \cdot L^3 \cdot \frac{h}{\alpha} = +0,0208 \cdot \frac{L^3 \cdot h \cdot Q \cdot s}{E \cdot \lambda}$$

und somit

$$\frac{\delta l''_E}{\delta l''_M} = -2,$$

was auch unmittelbar aus der Formel auf S. 43 folgt.

Nachstehend seien einige Zahlenwerte angegeben, zunächst für einen Vergleichsmaßstab mit Teilung auf der neutralen Schicht, von glattem H-förmigem Querschnitt, der in einem Quadrat von 20 mm Kante enthalten ist, wie er schon auf S. 15 betrachtet war. Die dort für Platin-Iridium ( $s = 21,5$ ;  $E = 17 \cdot 10^9$  g/cm<sup>2</sup>) mitgeteilten Werte werden bei Stahl ( $s = 7,8$ ;  $E = 2 \cdot 10^9$  g/cm<sup>2</sup>)

$$\frac{7,8^2 \cdot 1,7^2}{21,5^2 \cdot 2^2} = 0,095 \text{ mal kleiner.}$$

Damit wird  $\delta l'$  (in  $\mu$ ) für 1 m Länge bei Unterstützung in:

Besselschen Punkten	— 0,0002,
Enden . . . . .	— 0,1102,
Mitte . . . . .	— 0,036.

Hier ist also der Einfluß der Auflagerung wohl stets zu vernachlässigen. Für größere Längen gilt das aber nicht mehr, da die Zahlen bei einem 2-m-Stab bereits 128 mal größer werden.

Für einen Prüfmaßstab aus Stahl mit Teilung auf der oberen Fläche, von 1 m Länge und mit der Höhe  $h = 20$  mm (nach DIN 865) wird bei Unterstützung in:

	$\delta l'$ $\mu$	$\delta l''$ $\mu$	$\delta l' + \delta l''$ $\mu$
Besselschen Punkten . . . . .	- 0,000 09	+ 0,299	+ 0,3
Günstigsten Punkten . . . . .	- 0,000 16	$\pm$ 0,000	$\pm$ 0,0
Enden . . . . .	- 0,057 7	- 9,751	- 9,8
Mitte . . . . .	- 0,019 1	+ 4,875	+ 4,9

$L = 1$  m,  
 $h = 20$  mm.

Für ein Maß von  $\frac{1}{2}$  m würden die Werte von  $\delta l'$  128mal kleiner sein, also praktisch völlig verschwinden, während sich die von  $\delta l''$  nur auf  $\frac{1}{8}$  verringern, also bei Unterstützung an den Enden oder in der Mitte immer noch Fehler von  $-1,2$  bzw.  $+0,6 \mu$  hervorrufen.

Für einen Prüfmaßstab aus Stahl von 2 m Länge und 25 mm Höhe würden dagegen die Werte von  $\delta l'$  52,5mal größer, die von  $\delta l''$  dagegen nur 6,4mal größer, es würde also gelten für Unterstützung in:

	$\delta l'$ $\mu$	$\delta l''$ $\mu$	$\delta l' + \delta l''$ $\mu$
Besselschen Punkten . . . . .	- 0,0047	+ 1,914	+ 1,9
Günstigsten Punkten . . . . .	- 0,0084	$\pm$ 0,000	$\pm$ 0,0
Enden . . . . .	- 3,029	- 62,41	- 65,4
Mitte . . . . .	- 1,003	+ 31,20	+ 30,2

$L = 2$  m,  
 $h = 25$  mm.

Um dauernde Durchbiegungen zu vermeiden, wird man bei der Aufbewahrung stets eine volle Auflage zu erreichen suchen und dabei zweckmäßig die Maßstäbe hochkant stellen.

Als weiteres Beispiel sei noch ein Maßstab in der Ausführung des mètre des archives, aber mit Teilung auf der oberen Fläche, betrachtet. Für diesen würde sich ergeben bei Unterstützung in:

	$\delta l'$ $\mu$	$\delta l''$ $\mu$	$\delta l' + \delta l''$ $\mu$
Besselschen Punkten . . . . .	- 0,555	+ 4,279	+ 4,2
Günstigsten Punkten . . . . .	- 0,978	$\pm$ 0,000	- 1,0
Enden . . . . .	- 358,17	- 156,096	- 514,3
Mitte . . . . .	- 118,68	+ 78,048	- 40,6

Hier wären die Fehler nicht völlig zum Verschwinden zu bringen und würden sich bei Unterstützung an den Enden auf mehr als  $\frac{1}{2}$  mm belaufen.

Frei von den durch die Drehung der Endquerschnitte bewirkten Fehlern wird man nach einem Vorschlage von F. E. Neumann, wenn man die geteilte Fläche senkrecht stellt und die Teilung in der Mitte der Teilungsfläche (also in der neutralen Achse) abliest (9).

Bei der Benutzung unten aufstehender oder senkrecht hängender Maßstäbe ist darauf zu achten, daß durch das Eigengewicht  $G$  eine Verkürzung bzw. Verlängerung  $\delta l$  vom Betrage

$$\delta l = \frac{1}{2} \frac{L \cdot G}{E \cdot Q} = \frac{1}{2} \frac{L^2 \cdot s}{E}$$

erfolgt. Meist ist sie zu vernachlässigen, da sie bei einem Meter aus Stahl nur  $0,2 \mu$  ausmacht, was auch experimentell bestätigt ist (2). Völlig unabhängig davon wird man, wenn man den Stab in der Mitte (selbstverständlich zwangsfrei) faßt.

### 3. Andere Werkstoffe.

Daß in DIN 864, 865 und 866 hauptsächlich Stahl als Werkstoff für die Maßstäbe vorgeschrieben ist, hat seinen Grund darin, daß er am besten die Forderung erfüllt, daß seine Ausdehnung gleich der der meist verwendeten

Werkstoffe ist. Die übrigen Metalle und etwa sonst noch für Maßstäbe in Betracht kommende Werkstoffe zeigen folgende Ausdehnungen in  $\mu$  für 1<sup>o</sup> je Meter (bei 20<sup>o</sup>):

Al	Ag	Messing	Bronze	Cu	Zn	Fe	Gußeisen
23,8	19,7	18,4	17,5	16,5	16,5	11,5	10,4
					Quarz		
Ni	Pt	Invar	Indilatan	-Achse	-Achse geschmolzen		Glas
10,8	9,3	0—2	ca. 0,4	14,2	7,8	0,4	4—11,5

Die angegebenen Zahlen stellen aber nur mittlere Werte dar. So muß man bei Stahl mit Ausdehnungen von 10,5 bis mindestens 14, je nach der Zusammensetzung, der mechanischen Bearbeitung und der Wärmebehandlung rechnen (z. B. haben die nicht rostenden Stähle V 3 M und V 2 A Ausdehnungen von 10,6 und 16,0), und sind bei Handelsnickel mit 94 bis 99% Nickel solche von 12,9 bis 13,5 beobachtet (20).

Von den Metallen wurden benutzt: Zink, Messing, Bronze, Stahl, Nickel und Nickelstahl (besonders mit 36% Ni: Invar und Indilatan). Zink ist gänzlich ungeeignet, da es im Laufe der Zeit molekulare Umlagerungen erleidet und damit seine Länge ändert. Messing [das allerdings seines Zinkgehaltes wegen auch nicht ganz frei davon ist, und dessen Instabilität damit anwächst (26); am stabilsten ist die Legierung 80% Kupfer, 20% Zink (20b)], sowie Bronze sind für die Feinmechanik von Bedeutung, weil ihre Ausdehnung besser mit der der hier vorzugsweise verarbeiteten Werkstoffe in Einklang ist. Da sich auf ihnen feine Striche nur schlecht ziehen lassen, bringt man sie auf Pflöcken oder auf (in schwalbenschwanzförmige Nuten eingehämmerten oder besser eingewalzten) Einlagen aus Silber oder Platin an. Silber wäre vorzuziehen, da seine Ausdehnung besser mit der des Messings und der Bronze übereinstimmt, so daß durch Temperaturänderungen kein Loslösen der Einlage von dem Maßstab zu befürchten bleibt. Unangenehm ist, daß Silber in schwefelwasserstoffhaltiger Luft anläuft. Einigen Schutz dagegen bietet Aufbewahrung in luftdicht verschlossenen Messingbüchsen, die zweckmäßig noch einige Streifen mit Bleiazetatlösung getränkten Filtrierpapiers enthalten. Da jene Gefahr auf Grund der vorliegenden Erfahrungen (6) aber verschwindend gering ist, zieht man Platin seiner Beständigkeit gegen die Atmosphären wegen vor; immerhin bleibt zu beachten, daß sich nach größeren Temperaturzyklen die Länge ändert (9a).

Auf Gußstahl lassen sich bei nötiger Sorgfalt sehr gute Teilungen herstellen (16); häufig zieht man dagegen auch vor, sie auf besonderen Einlagen auszuführen, wofür nach Obigem hauptsächlich Platin und Nickel in Frage kommen, wobei das letztere seines geringeren Preises wegen meist verwendet wird<sup>1</sup>. Neuerdings werden auch Stellitpflöcke eingesetzt, auf denen sich nur 1  $\mu$  dicke Striche ziehen lassen sollen, die auch bei 1000facher Vergrößerung völlig gerade und scharf erscheinen (11) (siehe dazu S. 50). Nach den DI-Normen ist auch blanke oder matte Vernicklung zulässig, doch ist es unter Umständen nicht ausgeschlossen, daß die galvanisch niedergeschlagenen Schichten, infolge ihrer inneren Spannungen, ihre Länge im Laufe der Zeit ändern. Reinnickel ist selten genügend porenfrei, um gute Striche zu liefern. Es hätte den Vorteil, daß seine Ausdehnung nur wenig von der des Eisens abweicht, daß sein Elastizitätsmodul hoch ist (etwa  $2,2 \cdot 10^6$  kg/cm<sup>2</sup>), daß es von Wasser und feuchter Luft nicht angegriffen wird, und daß es auch gut polierfähig ist. Es scheint sehr gut beständig zu sein (9a), haben sich doch in 5 Jahren nur Änderungen von 0,1  $\mu$  auf 1 m, also innerhalb der Beobachtungsfehler ergeben (10, 15a); von anderer Seite sind aber auch Verlängerungen bis 1,0  $\mu$  festgestellt (26). Seines hohen Korrosionswiderstandes wegen wäre auch der 57- bis 58proz. Nickelstahl geeignet, der noch

<sup>1</sup> Über ein geeignetes Verfahren zur Herstellung brauchbarer Striche auf Nickel siehe (5).

den Vorteil bietet, genau dieselbe Ausdehnung wie Stahl zu haben; er nimmt gleichfalls eine gute Politur an und läßt das Ziehen feiner Striche zu. Somit wäre er ein ideales Material für die technischen Strichmaßstäbe, wenn nicht die Befürchtung vorläge, daß er, wie die meisten Nickellegierungen, seine Länge im Laufe der Zeit änderte<sup>1</sup>. Deshalb ist die Industrie bisher nur zögernd an seine Verwendung herangegangen. Auch über die Bewahrung des nichtrostenden Stahles V 3 M liegen bisher keine genügenden Erfahrungen vor.

Der Gebrauch von Maßstäben aus dem 1899 von Guillaume erfundenen Invar<sup>2</sup> oder aus Indilatan, für die man wegen ihrer geringen Ausdehnung von höchstens  $2 \cdot 10^{-6}$  eine Zeit lang eine gewisse Vorliebe hatte<sup>3</sup>, ist gerade deshalb für die Technik ausgeschlossen, da man sonst bei jeder Messung eine Umrechnung auf die Länge bei der Bezugstemperatur vornehmen müßte, was noch eine sehr genaue Temperaturmessung voraussetzen würde. Ferner zeigt aber auch Invar die unangenehme Eigenschaft, seine Länge ständig, und zwar exponentiell abnehmend, mit der Zeit zu ändern (26); so wurden Änderungen von  $30 \mu$  auf 1 m in 2000, und von 31 bis  $84 \mu$  in 10000 Tagen beobachtet (4, 9a, 21, 22, 23); diese sind um so größer, je rascher die Abkühlung erfolgt war [durch 100stündiges Erhitzen auf  $100^\circ$  lassen sich die Stäbe aber alle in denselben Zustand überführen (9a, 26)]. Durch eine geeignete Wärmebehandlung (künstliche Alterung) läßt sich die Längenänderung stark herabsetzen, z. B. zeigte derselbe Stahl nach dem Ausglühen nur noch eine solche von  $10 \mu$  auf 1 m in 1000 Tagen. Als erprobtes Alterungsverfahren, wie es für Uhrendel bewährt ist, wird empfohlen: Erhitzung auf  $180^\circ$ , dann täglich langsames Heruntergehen mit der Temperatur unter gleichzeitigen Erschütterungen, was sich über mehrere Wochen erstrecken muß (18). Bei gut gealterten Stäben kann man in den ersten 20 Jahren mit einer Änderung von etwa  $10^{-6}$  der Länge (also  $1 \mu$  auf 1 m) je Jahr später mit der Hälfte dieses Wertes rechnen (15a, 19). Da sich diese Änderungen aber fortschreitend addieren, so kommt Invar für Präzisionsmaßstäbe nicht in Frage, wenn auch die Änderungen auf Grund besonderer Versuche berechnet werden können (7, 24). Zurückgeführt werden diese Erscheinungen auf Umwandlungen des Eisenkarbids; sie lassen sich sehr weitgehend verringern, wenn man den bei der Herstellung zu vermeidenden Kohlenstoff, statt an Eisen, an Chrom bindet (8, 9, 9a, 26)<sup>4</sup>, dann bleibt die Instabilität unter  $\frac{1}{2} \cdot 10^{-6}$  der Länge. Auf den chromhaltigen Nickelstählen ist aber die Politur weniger gut und fallen die Teilstriche nicht so sauber aus wie bei den gewöhnlichen, so daß man mit Einstellfehlern von 0,3 bis  $0,4 \mu$  rechnen muß (9). Nach neueren Anschauungen (1) sind die Anomalien der Ausdehnung des Invars dadurch bedingt, daß es kein homogenes Gefüge ist, sondern aus zwei Phasen besteht.

Durch die im Nickelstahl vor sich gehenden Umwandlungen und ihre Beeinflussung durch die Temperaturbehandlung, sowie auch durch die sonstigen Legierungsbestandteile (20a) wird auch die Ausdehnung geändert und kann sich z. B. von 1,1 auf  $2 \cdot 10^{-6}$  ändern (9a, 14, 15). Sie hängt ferner von der Geschwindigkeit der Temperaturänderung ab (2). Infolgedessen nimmt Invar nach einem thermischen Kreisprozeß nicht sofort seine ursprüngliche Länge wieder an, sondern nähert sich ihr nur asymptotisch.

Dieselbe Eigenschaft der thermischen Hysteresis zeigen auch die verschiedenen Glassorten. Sie wurden früher wenig benutzt, da ihre mittlere Ausdehnung mit  $8 \cdot 10^{-6}$  zu sehr von der des Stahles ( $11,5 \cdot 10^{-6}$ ) abweicht. Neuerdings werden aber vielfach Maßstäbe aus Glas mit einer Ausdehnung  $10,6 \cdot 10^{-6}$  hergestellt, die praktisch mit der des Stahles zusammenfällt. Sie haben den Vorteil, das Ziehen feiner Striche zuzulassen, nicht zu rosten und in durchfallendem Licht beobachtet werden zu können<sup>5</sup>. Aus den vorstehend angegebenen Gründen müssen sie indessen vor starken Temperaturschwankungen geschützt werden.

<sup>1</sup> An einem Meterstab aus 43proz. Nickelstahl (der angenähert die Ausdehnung des Platins hat) ist eine Verkürzung um  $1,1 \mu$  beobachtet (21, 22, 23, 25, 26), während von anderer Seite ein Stahl mit 43,7% Nickel als beständig angegeben wird (9a).

<sup>2</sup> Der Name ist von Marc Thury vorgeschlagen (9a).

<sup>3</sup> Durch geeignete mechanische und thermische Behandlung kann man bei Drähten, die unter bestimmter Spannung gesetzt werden, auf den Wert 0 kommen (9a).

<sup>4</sup> Die Instabilität ist proportional dem Kohlenstoffgehalt; sie wird durch Zusatz von Mangan oder Kupfer verkleinert, während Chrom durch Bildung von Chromkarbid eine spezifische Wirkung ausübt (9a).

<sup>5</sup> Eine geeignete Vorrichtung zur Beobachtung von Glasteilungen in durchfallendem Licht bei Beleuchtung von oben ist in (17) beschrieben.

Nach Erwärmen um  $t^0$  und Wiederabkühlung haben sie nicht die ursprüngliche Länge  $L$ , sondern eine Länge

$$L' = L \cdot (1 + a \cdot t + b \cdot t^2) = L \cdot (1 + H \cdot t),$$

in welcher  $H = a + b \cdot t$  der sogenannte Hysteresiskoeffizient ist. Er hat für einige Gläser, Invar und geschmolzenen Quarz folgende Werte:

Jenaer Thermometerglas 59 <sup>III</sup> . . . . .	(27 - 0,08 · t) · 10 <sup>-9</sup>
Jenaer Thermometerglas 16 <sup>III</sup> . . . . .	(34 + 0,16 · t) · 10 <sup>-9</sup>
Französisches Thermometerglas . . . . .	(53 + 0,05 · t) · 10 <sup>-9</sup>
Invar . . . . .	- 81 · 10 <sup>-9</sup> bei 0 bis 25 <sup>0</sup>
	- 162 · 10 <sup>-9</sup> bei 0 bis 50 <sup>0</sup>
Quarzglas, ausgeglüht (10) . . . . .	0,0 bei 0 bis 50 <sup>0</sup>

Bei Temperaturschwankungen von  $\pm 10^0$  würde also die durch die Hysteresis verursachte Längenänderung bei den Jenaer Gläsern nur  $\pm 0,3 \mu$  auf 1 m betragen. Bei den Gläsern mit der Ausdehnung  $10,6 \cdot 10^{-6}$  ist sie allerdings etwa 10mal größer, doch ist sie trotzdem nicht störend, da sie exponentiell abklingt, und deshalb ihr Hauptbetrag in verhältnismäßig kurzer Zeit verschwunden ist.

Voraussetzung für die Benutzung von Glasmaßstäben ist indessen, daß sie (zwecks Ausgleich der inneren Spannungen) gut gekühlt sind, da sonst sprunghafte Änderungen von einigen  $\mu$ , selbst innerhalb eines cm-Intervalles, auftreten. Außerdem ist zu beachten, daß man lange Glasmaßstäbe nicht dauernd auf zwei Unterlagen liegen lassen darf (wie es während der Messung zur Ausschaltung der Durchbiegungsfehler notwendig ist), da sie sich sonst allmählich dauernd deformieren. Zur Aufbewahrung empfiehlt sich eine Unterlage von Samt.

Gänzlich frei von zeitlichen Änderungen und thermischen Nachwirkungen ist innerhalb der im Laboratorium vorkommenden Temperaturschwankungen der kristallisierte Quarz<sup>1</sup>, der sich den Gläsern gegenüber noch durch größere Härte auszeichnet. Auch von der Abweichung seiner Ausdehnung gegenüber dem Stahl kann man dadurch völlig unabhängig werden, daß man die Stäbe unter  $40\frac{1}{2}^0$  gegen seine kristallographische Hauptachse herausschneidet (3). In dieser Richtung beträgt nämlich die Ausdehnung des Quarzes  $11,5 \cdot 10^{-6}$ . In bezug auf Stahl hat aber Quarz (und auch Glas) den Nachteil der Zerbrechlichkeit und geringerer Wärmeleitung, so daß man etwas länger warten muß, bis er die Temperatur der Umgebung angenommen hat, doch wiegt dies die sonstigen Vorteile des Quarzes nicht auf, so daß es eigentlich verwunderlich ist, daß er nicht mehr für (kürzere) Präzisionsmaßstäbe verwendet wird.

Geschmolzener Quarz mit der Ausdehnung  $0,4 \cdot 10^{-6}$  ist dagegen aus denselben Gründen wie Invar und ferner seiner starken inneren Spannungen wegen völlig ungeeignet (über seine zeitliche Beständigkeit siehe S. 13).

Bei der Besprechung der verschiedenen Werkstoffe ist schon darauf hingewiesen, daß sie sich (bei zeitlicher Konstanz und geeigneter Ausdehnung) gut polieren und das Ziehen feiner Striche zulassen müssen. Ein Maß für die Strichgüte gibt der Fehler, der bei mehrfachen Einstellungen auf denselben Strich begangen wird. Man könnte als Maß dafür etwa die größte gegen das arithmetische Mittel aus den einzelnen Beobachtungen auftretende  $\pm$  Abweichung nehmen; sie würde den extremen Fehler darstellen. Zweckmäßiger ist es indessen bei einer größeren Zahl von Beobachtungen, den mittleren Fehler anzugeben, der sich folgendermaßen berechnet. Es seien nebenstehende Beobachtungen gemacht:

Ablesung mm	$\delta$ $\mu$	$\delta^2$
7,2321	- 0,2	0,04
10	+ 0,9	0,81
28	- 0,9	0,81
22	- 0,3	0,09
29	- 1,0	1,00
21	- 0,2	0,04
10	+ 0,9	0,81
10	+ 0,9	0,81
Mittel 7,2319		$\Sigma \delta^2$ 4,41

<sup>1</sup> Nach Erhitzung über den Umwandlungspunkt (bei 350<sup>0</sup>) sind allerdings Längenänderungen von 1,5% beobachtet (12).

Man bildet die Differenzen:  $\delta = \text{Mittel} - \text{Beobachtung}$  und, um von ihrem Vorzeichen unabhängig zu werden, ihr Quadrat. Nach Gauß bezeichnet man dann als mittleren Fehler einer Beobachtung die Größe

$$f = \pm \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{n-1}},$$

worin  $n$  die Zahl der Beobachtungen ist, und als mittleren Fehler des arithmetischen Mittelwertes die Größe

$$F = \frac{f}{\sqrt{n}} = \pm \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{n \cdot (n-1)}}.$$

Für obiges Beispiel ist

$$f = \pm \sqrt{\frac{4,41}{7}} = \pm 0,8 \mu, \quad F = \pm \sqrt{\frac{4,41}{8 \cdot 7}} = \pm 0,3 \mu.$$

Daneben findet man gelegentlich auch den wahrscheinlichen Fehler angegeben, der rund gleich  $\frac{2}{3}$  des mittleren Fehlers gesetzt werden kann.

Der mittlere Einstellfehler beträgt nun (11, 13) für Striche auf Stahl:  $\pm 0,35 \mu$ , bei ausgesuchten Strichen  $\pm 0,14 \mu$ , bei vernickeltem Stahl  $\pm 0,20 \mu$ ; bei Reinickel  $\pm 0,10 \mu$ ; bei Messing  $\pm 0,18 \mu$ ; bei Silber  $\pm 0,10 \mu$ ; bei Stellite  $\pm 0,25 \mu$ . Demnach wären Nickel und Silber am besten, denen aber auch Stahl bei sehr sorgfältiger Teilung nicht nachsteht. Nach Messungen im Bureau International des Poids et Mesures kann man den Einstellfehler eines sehr guten Beobachters (im Mittel aus 150 Einstellungen) zu  $\pm 0,08 \mu$  angeben, was sich auch praktisch mit den obigen Zahlen deckt.

Die Herstellung von Präzisionsmaßstäben erfolgt auf Teilmaschinen, und zwar am besten durch Kopieren eines genau gemessenen Maßstabes unter Berücksichtigung seiner Korrekturen (Näheres siehe S. 281). Noch genauer ist die interferometrische Messung der jeweiligen Verschiebung des Maßstabes unter dem Reißerwerk. Damit ist zu erreichen, daß die Teilungsfehler kleiner als die Einstellfehler von  $0,25 \mu$  bleiben, vorausgesetzt allerdings, daß das Reißerwerk sehr gut ausgebildet ist.

#### 4. Bandmaße.

Im allgemeinen wird man im Maschinenbau mit Maßstäben aus einem Stück auskommen. Über die zulässige größte Länge sind in DIN 864 bis 866 keine Festsetzungen getroffen (allerdings sind bei den Prüfmaßstäben die Querschnitte nur für Längen bis 2 m festgelegt), während die Eichordnung sie auf 10 m beschränkt. Aber Maßstäbe von 3 m Länge sind im allgemeinen schon schwer zu handhaben, auch erfordert ihre Auflage und ihr Temperatenausgleich besondere Aufmerksamkeit. Man wird deshalb bei wesentlich größeren Längen, wie sie z. B. im Schiffsbau vorkommen, zu leichteren Maßen greifen, wie sie in der Gestalt von Bandmaßen vorliegen, die im aufgerollten Zustande auch nur geringen Raum beanspruchen.

Ursprünglich wurden sie aus Pergament hergestellt, wie Stücke aus dem 17. Jahrhundert beweisen. Dann nahm man Leinen, auf das die Teilungen (nach vorherigem Streichen) aufgedruckt werden. An und für sich könnte man dabei dieselbe Genauigkeit wie bei Holzmaßstäben erreichen (auf gleiche Länge bezogen). Nun ändert aber Leinen seine Länge mit der Luftfeuchtigkeit in viel stärkerem Maße als Holz. Ein gewisser Schutz dagegen läßt sich gleichfalls durch Lackierung erzielen. Ferner hängt aber auch die Länge sehr stark von dem ausgeübten Zug ab. Bei einem Querschnitt von  $1,5 \text{ mm}^2$  kann man etwa mit Verlängerungen von 3 mm je m und kg rechnen (hieraus sind die Werte für andere Querschnitte und Kräfte leicht nach dem Hookeschen Gesetz zu berechnen, das für Leinen allerdings nur sehr angenähert gilt). Wesentlich günstiger sind die Verhältnisse bei Leinenbandmaßen mit Drahteinlage, bei denen die Änderungen durch den beim Messen ausgeübten Zug, gute Ausführung vorausgesetzt, vernachlässigt werden können. Im allgemeinen wird man die in der Eichordnung angegebenen Fehlergrenzen annehmen können. Bei den geschilderten Mißständen würde es auch keinen Zweck haben, wesentlich größere Genauigkeiten anstreben zu wollen, die sonst herstellungstechnisch kaum sehr große Schwierigkeiten bereiten würden.

Für genauere Messungen kommen nur Stahlbandmaße in Frage (Abb. 13), und zwar entweder aus gehärtetem weißpoliertem Uhrfederbandstahl mit der Ausdehnung  $(11,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-6}$  oder auch aus nichtrostendem Stahl V 3 M mit der Ausdehnung  $10,6 \cdot 10^{-6}$  (bei dessen Benutzung aber sehr große Vorsicht geboten ist), während Invar und In-dilatan ihrer zu kleinen Ausdehnung wegen nicht geeignet sind (dasselbe gilt auch für Messing oder Bronze, die einige Zeit benutzt wurden). Der Querschnitt ist rechteckig von  $16$  bis  $28 \times 0,2$  bis  $0,6$  mm<sup>2</sup>, bei Präzisionsmeßbändern  $10$  bis  $20 \times 0,3$  bis  $0,4$  mm<sup>2</sup>, mit leicht gerundeten Kanten. Die Teilung erfolgt durch Aufdrucken und Ätzen von Strichen, bei größeren Längen und namentlich bei nicht blanken Werkstoffen durch Körnung, die den Vorteil bietet, im Dunkeln leicht erkennbar zu sein. Dabei werden nur die dm bezeichnet, während die cm und mm mit Hilfe eines kleinen leichten Maßstabes bestimmt werden, der am Bandmaß befestigt wird. Der Nullpunkt befindet sich entweder auf dem Stahlband oder wird von einer bestimmten Stelle des Endringes angegeben<sup>1</sup>.



Abb. 13. Bandmaß.

Um keinen zu großen Durchhang zu bekommen, wird man das Bandmaß, wenn möglich, satt aufliegen lassen. Da aber nach dem Abrollen doch immer eine gewisse Krümmungstendenz besteht, sollte man es indessen auch hierbei stets unter einen gewissen Zug setzen, wozu sich die bei geodätischen Messungen angenommene Spannung  $P$  von  $10$  kg empfiehlt, die mittels einer Federwaage ausgeübt wird [in Amerika ist die Spannung bis  $30$  m  $4,5$  kg, bei mehr als  $30$  m  $9$  kg, bei geodätischen Bandmaßen  $15$  kg (4)]. Sie ist nur mit einer einzigen Marke für  $10$  kg versehen. Läßt man hierbei einen Fehler von  $\pm 0,1$  kg zu, so kann dieser bei einem Bandmaß von  $11 \times 0,4$  mm<sup>2</sup> Querschnitt unter der Annahme eines Elastizitätsmoduls von  $2 \cdot 10^6$  kg/cm<sup>2</sup> \* einen Fehler  $\delta l'$  bewirken, der sich nach dem Hooke'schen Gesetz berechnet zu

$$\delta l' = \frac{L \cdot 0,1}{1,1 \cdot 0,04 \cdot 2 \cdot 10^6} = 1,14 \cdot L \mu \quad (L \text{ in m}),$$

also für  $L = 50$  m:  $\delta l' = 57 \mu$ .

Bei kleineren Längen verringert sich der Fehler proportional der Länge. Er ist fast stets gegenüber den durch die Temperatur verursachten Ungenauigkeiten zu vernachlässigen, bewirkt doch bereits  $1^\circ$  bei  $L = 50$  m eine Änderung um  $575 \mu$ , also vom 10fachen Betrage.

Häufig ist es aber nicht möglich, das Bandmaß satt aufzulegen, es muß vielmehr frei gespannt werden. Dabei erleidet es einen Durchhang

$$d = \frac{L \cdot G}{8 \cdot P} = \frac{s \cdot L^2 \cdot Q}{8 \cdot P}$$

und dadurch bei seiner Messung in der Horizontalprojektion eine Verkürzung

$$\delta l'' = \frac{8 \cdot d^2}{3 \cdot L} = \frac{L \cdot G^2}{24 \cdot P^2} = \frac{L^3 \cdot Q^2 \cdot s^2}{24 \cdot P^2},$$

wobei wieder  $G$  das Gewicht,  $Q$  den Querschnitt und  $s$  das spezifische Gewicht bedeuten (bei der Rechnung ist die Kettenlinie durch einen Parabelbogen ersetzt).

Für  $Q = 11 \times 0,4$  mm<sup>2</sup>,  $P = 10$  kg und  $s = 7,8$  wird  $d = 0,43 \cdot L^2$  mm (falls  $L$  in m eingesetzt wird), während Versuche  $d = 0,416 \cdot L^2$  ergeben haben (1), und

$$\delta l'' = 0,49 \cdot L^3 \mu \quad (L \text{ in m}),$$

während die Versuche den Wert  $\delta l'' = 0,46 \cdot L^3 \mu$  gezeitigt hatten. Bei einer Länge von  $L = 50$  m wird also (unter Benutzung der Versuchswerte)  $d = 1040$  mm und  $\delta l'' = 57,50$  mm.

Diese Änderungen sind aber leicht zu bestimmen und in Rechnung zu setzen.

<sup>1</sup> Für die im Vermessungswesen gebrauchten Meßbänder sind nach DIN, E, Verm 8, folgende Vorschriften in Aussicht genommen: Länge  $20$  m; Breite  $20$  mm; Dicke  $0,4$  mm; Bezeichnung durch Löcher oder Messingniete; Bezugstemperatur  $20^\circ$ ; Endringe  $33$  mm Durchmesser, der eine einfach, der andere doppelt drehbar; Werkstoff: Flußstahl von  $170$  bis  $190$  kg/mm<sup>2</sup> Festigkeit,  $5$  bis  $3\%$  Dehnung und mit der Ausdehnung  $11,5 \cdot 10^{-6}$  (5).

\* Dieser Wert gilt recht gut für ein auf der Unterlage aufliegendes Bandmaß, während man bei senkrecht freihängendem besser mit einer um etwa  $10\%$  kleineren Zahl rechnet.

Da nun aber der Zug  $P$  um den Betrag  $dP = \pm 0,1$  kg schwanken kann, so wird dadurch auch die Korrektur  $\delta l''$  beeinflusst. Ihre Unsicherheit berechnet sich zu

$$d\delta l'' = \frac{L^3 \cdot Q^2 \cdot s^2 \cdot 2 \cdot P^{-3} \cdot dP}{24} = \delta l'' \cdot 2 \cdot \frac{dP}{P} = 0,02 \delta l'',$$

beträgt also 2% der Korrektur  $\delta l''$  und somit bei dem betrachteten Bandmaß von 50 m Länge 1,15 mm. Sie bewirkt bei freihängendem Bandmaß den größten Fehler.

Zu der durch die Durchbiegung bewirkten Änderung von  $\delta l''$  kommt noch die durch die mögliche Schwankung von  $P$  verursachte Unsicherheit  $\delta l'$  im Betrage von  $57 \mu$ , oder, da man bei einem hängenden Bande  $E$  um 10% kleiner ansetzen muß, von  $62,5 \mu$  hinzu.

Die eigentlichen Teilungsfehler sind bei guten Bandmaßen sehr gering<sup>1</sup>, so wurden bei 10 m Länge solche von 0,03 bis 0,5 mm beobachtet, während die Eichordnung hier 3 mm zuläßt, mit denen man allerdings bei den üblichen Meßbändern, wie schon erwähnt, auch wird rechnen müssen [in Amerika ist die Fehlergrenze 2 mm auf 25 m (4)].

Statt der Bandmaße verwendet man gelegentlich auch Stahldrähte; dabei hat man auch daran gedacht, ihre Länge durch Messung ihres elektrischen Widerstandes zu bestimmen, um damit vor allem die Temperaturfehler auszuschalten. Dieses Verfahren hat sich aber bisher nicht bewährt (2), während neuere Versuche Erfolg versprechende Ergebnisse gezeigt haben sollen.

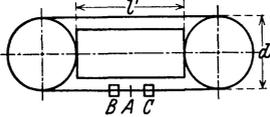


Abb. 14. Messung von Bandmaßen.

Bandmaße werden gelegentlich auch zur Bestimmung des Durchmessers großer Räder, wie sie z. B. bei Turbinen vorkommen, verwendet.

Die Messung der Bandmaße läßt man am besten behördlich vornehmen [bei den besten Bandmaßen beträgt der Meßfehler weniger als  $1 \cdot 10^{-6}$ , also  $50 \mu$  auf 50 m (4)]. Selbst kann man sie ausführen, indem man sie um zwei Scheiben von gleichem Durchmesser  $d$  so legt, daß ihre Enden bei A (Abb. 14) zusammenstoßen, wozu man sie bei B und C in entsprechender Weise klemmt, und ein Stichmaß der Länge  $l$  zwischen die Scheiben paßt; dabei ist das Bandmaß durch ein Gewicht zu spannen (3). Seine Länge  $L$  folgt dann aus

$$L = (d + 2 \cdot \delta) \cdot \pi + 2 \cdot d + 2 \cdot l,$$

falls  $\delta$  die Dicke des Bandmaßes ist.

## B. Komparatoren.

### 1. Visier-Instrumente.

Das früher, z. B. beim Vergleich der Toisen, gebräuchliche Verfahren, die Gleichheit der Länge von Maßstäben durch das Gefühl zu prüfen, genügt selbstverständlich bei den heutigen Genauigkeitsansprüchen nicht mehr und ist für

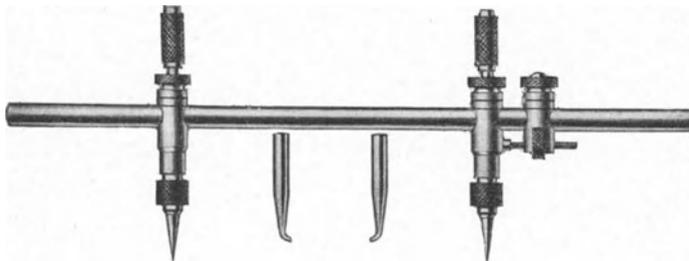


Abb. 15. Stangenzirkel.

Strichmaße überhaupt nicht verwendbar. Hierfür benutzte man ursprünglich den Stangenzirkel (Abb. 15), eine Stange mit zwei senkrecht zu ihr stehenden Spitzen, von denen

<sup>1</sup> Eine Forderung von  $\pm 1,25 \mu$  auf 3,5 m und von  $\pm 2,5 \mu$  bei größeren Längen, wie sie von einer Seite aufgestellt wird (3), ist aber viel zu weitgehend.

mindestens die eine (wohl auch durch eine Schraube fein) verstellbar ist. Da durch das Aufsetzen der Spitzen aber die Teilung leicht verdorben wird, ersetzt man die körperlichen Spitzen durch einen Lichtstrahl und brachte statt ihrer Visiere („Absehen“) an (Abb. 16). Sie bestehen aus einer kleinen kreis- oder spaltförmigen Öffnung *A* und einem über einen Ausschnitt gespannten, zu den Teilstrichen parallelen Faden *B*. Bei dieser Beobachtung tritt nun aber die vom Zielen her bekannte Schwierigkeit auf, daß es nicht möglich ist, die 3 in verschiedenen Entfernungen vom Auge befindlichen Gegenstände, Kimme,

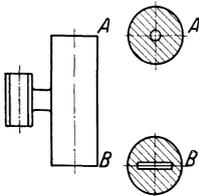


Abb. 16. Visiervorrichtung.

Korn und Ziel (in diesem Falle den Teilungsstrich), gleichzeitig deutlich zu sehen, da man nur zeitlich nacheinander darauf zu akkommodieren vermag, bzw. von mindestens zwei von ihnen unscharfe Bilder (Zerstreuungskreise) erhält. Darunter leidet nicht nur die Genauigkeit, vielmehr treten auch

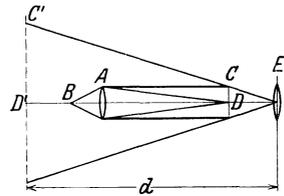


Abb. 17. Optisches Zielgerät.

noch systematische Fehler auf, da die Zerstreuungskreise beim Auge nicht symmetrisch zur Visierlinie (Linie zwischen Objekt und Mitte der Augenpupille) liegen. Diese von Unregelmäßigkeiten des Auges (besonders seiner Linse) herührenden Abweichungen sind individuell und auch für dasselbe Auge mit der Entfernung verschieden. Weitere Fehler können noch durch einseitige Beleuchtung verursacht werden. Alle diese Schwierigkeiten verschwinden, wenn man das Korn durch eine Linse (Objektiv) *A* ersetzt (Abb. 17), welche ein Bild des Striches *B* in einer bestimmten Ebene *C* entwirft, die etwa durch die Fläche einer Glasplatte gebildet wird, auf der sich eine Strichmarke *D* befindet (Strichplatte). Die ganze Vorrichtung *AC* wird so verschoben, daß das Bild von *B* auf die Marke *D* fällt. Um dies Zusammenfallen besser erkennen zu können, betrachtet man das Bild von *B* und die Marke *D* zusammen noch durch eine vergrößernde Lupe (Okular) *E*, die von der Strichplatte *C* (mit der Marke *D*) ein virtuelles Bild *C'* (mit *D'*) in einem Abstände *d* entwirft, der für das normalsichtige Auge 250 mm beträgt. Das ganze optische System *AE* bildet ein Mikroskop; es wurde zuerst von Troughton 1798 in die Meßkunde eingeführt (1). Die Kimme wird hier durch die Marke *D*, das Korn durch den Mittelpunkt des Objektivs *A* gebildet. Bei dieser optischen Visierung liegen das Ziel, dargestellt durch das vom Objektiv *A* auf der Strichplatte *C* entworfene Bild des Striches *B*, und die Marke *D* in einer Ebene und können also zugleich deutlich gesehen werden. Fällt das Bild von *B* nicht auf *D*, sondern seitlich davon, so müßte man, um die Koinzidenz zu erreichen, das ganze

Mikroskop parallel zu sich verschieben. Wegen der dabei auftretenden Fehler (siehe weiter unten) läßt man es bei den eigentlichen Komparatoren fest stehen und bewegt nur die Strichplatte *C* mittels einer Mikrometerschraube (Näheres siehe S. 229). Die Ausführung eines solchen Okular-Schraubenmikrometers ist in Abb. 18 wiedergegeben [es wurde zuerst gebaut von William Gascoigne (um 1640) und von Auzout (um 1666)].

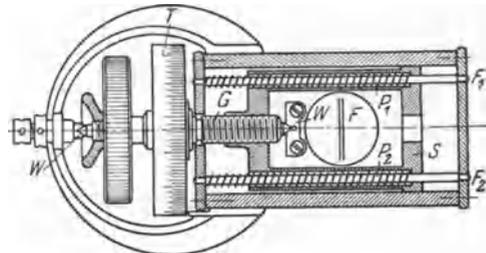


Abb. 18. Okular-Schraubenmikrometer.

Die Strichplatte *F* ist in einem entsprechend durchbrochenen Schlitten *S* gelagert, der auf 2 Führungen *F*<sub>1</sub> und *F*<sub>2</sub> gleiten kann und mittels der Schraube *G*

längs verschoben wird, die sich gegen 2 feste Widerlager  $W W$  stützt. Durch die Spiralfedern  $P_1 P_2$  wird die in dem Schlitten  $S$  befindliche Mutter immer in demselben Sinne gegen die Gewindegänge der Spindel  $G$  gedrückt und damit der „tote Gang“ aufgehoben. Die Verschiebung ist proportional dem Drehwinkel, der an der Trommel  $T$  abgelesen wird, die meist in 100 Teile geteilt ist, deren Zehntel geschätzt oder mittels Nonius abgelesen werden können. Durch geeignete Wahl der Steigung der Spindel und der optischen Vergrößerung läßt es sich stets erreichen, daß ein Trommelteil einen runden Wert, etwa  $1 \mu$  Objektgröße, bedeutet.

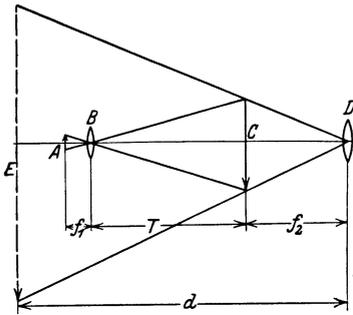


Abb. 19. Vergrößerung des Mikroskops.

Beim Mikroskop befindet sich das Objekt  $A$  (Abb. 19) sehr nahe dem Brennpunkt des Objektivs  $B$ , so daß man den Abstand  $AB$  mit genügender Annäherung gleich der Objektivbrennweite  $f_1$  setzen kann. Die Entfernung des Bildes  $C$  vom Objektiv  $B$  sei  $T$  (die Tubuslänge)<sup>1</sup>. Die Vergrößerung des Objektivs ist  $v_1 = \frac{C}{A} = \frac{T}{f_1}$  (wobei  $A$  und  $C$  die Größen des Objektes und seines Bildes bedeuten sollen). Nun liegt die Bildebene  $C$  sehr nahe dem Brennpunkt des Okulars  $D$ , so daß der Abstand  $CD$  gleich der Okularbrennweite  $f_2$  angenommen werden kann. Die Okularvergrößerung ist  $v_2 = \frac{E}{C} = \frac{d}{f_2}$  ( $d$  die normale Sehweite, 250 mm). Folglich ist die Gesamtvergrößerung des Mikroskops  $V = v_1 \cdot v_2 = \frac{T \cdot d}{f_1 \cdot f_2}$ .

Soll nun 1 Skalenteil  $p$  gleich  $1 \mu$  sein, so muß eine ganze Umdrehung ( $U = 100 \cdot p$ ) einer Objektgröße von  $\frac{1}{10}$  mm entsprechen oder tatsächlich  $\frac{v_1}{10}$  mm sein. Um eine normale Steigung von 0,5 oder 1 mm für die Spindel benutzen zu können, wird man also  $v_1 = 5$  oder 10 wählen müssen. Ist  $v_1 = 10$ , und fordert man eine Gesamtvergrößerung  $V = 60$ , so folgt daraus,  $v_2 = \frac{V}{v_1} = 6$ . Ist ferner die Tubuslänge  $T$  zu etwa 200 mm gegeben, so sind damit auch die Objektiv- und die Okularbrennweite  $f_1$  und  $f_2$  vorgeschrieben. In dem betrachteten Beispiel würde sich ergeben  $f_1 = \frac{T}{v_1} = 20$  mm und  $f_2 = \frac{d}{v_2} = 41,7$  mm. Die genaue Abstimmung des Skalenwertes läßt sich durch entsprechende Wahl von  $T$  erreichen.

Da der Skalenwert von der Okularvergrößerung  $v_2$  gänzlich unabhängig ist, kann man diese beliebig wählen und somit anscheinend auch das Okular austauschen. Nun muß dieses aber, genau so wie das Objektiv, zur Beseitigung der Abbildungsfehler aus mehreren Linsen bestehen. Dabei sind 2 Fälle möglich: entweder befindet sich die Strichplatte völlig außerhalb der Linsenkombinationen wie bei dem Ramsdenschen Okular (Abb. 20 a) oder aber zwischen ihnen wie bei dem von Huygens (Abb. 20 b). Eine Auswechslung des Okulars ist somit nur in dem ersten Fall möglich.

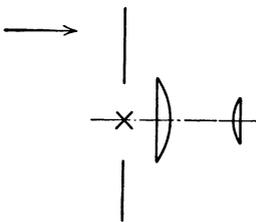


Abb. 20 a. Ramsdensches Okular.

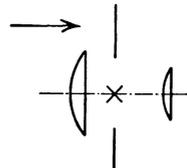


Abb. 20 b. Huygensches Okular.

Das Mikroskop muß nun so eingestellt werden, daß das Bild des Objektes  $A$

<sup>1</sup> Streng ist die Tubuslänge  $T$  der Abstand des hinteren Brennpunktes des Objektivs vom vorderen des Okulars; für die hier nur angenähert wiedergegebenen Ableitungen genügt aber die obige Festsetzung.

(Abb. 19) in die Ebene der Strichplatte  $C$  fällt; ob diese Bedingung erfüllt ist, kann man natürlich nur erkennen, wenn man die Marke  $D$  auf der Strichplatte scharf sieht. Man muß also zunächst das Okular  $E$  so verschieben, bis dies der Fall ist. Bei dem Ramsdenschen Okular geschieht dies durch Längsbewegung des ganzen Okulars, bei dem Huygensschen darf man dagegen nur die dem Auge zugewandte Linse verschieben, da andernfalls ja die Strichplatte mit verschoben und damit auch der Abstand vom Objektiv (also die Größe  $T$ ), somit die Objektivvergrößerung  $v_1$  und damit auch der Wert des Trommelteils geändert werden würde. Die Einstellung des Okulars bzw. der Augenlinse ist für jeden Beobachter gesondert vorzunehmen, da die Entfernung  $d$ , in der das Bild entstehen soll, vom Bau des Auges abhängt (Brillenträger behalten dabei zweckmäßig ihre Brille auf). Darauf wird das Mikroskop als Ganzes verschoben, bis auch das Objekt scharf erscheint; ob dies der Fall ist, d. h. das Bild von  $A$  wirklich auf der Strichplatte  $C$  liegt, erkennt man daran, daß sich bei seitlichen Bewegungen des Kopfes der Abstand zwischen dem Bilde von  $A$  und der Marke  $D$  auf der Strichplatte nicht ändern, d. h. keine Parallaxe (siehe Abb. 7) auftreten darf. Sie verschwindet nur, wenn Gegenstand (hier das Bild von  $A$ ) und Teilung (Marke  $D$ ) in einer Ebene liegen. Die so gefundene Einstellung des ganzen Mikroskopes ist für alle Beobachter dieselbe, da sie durch die Brennweite  $f_1$  des Objektivs und die Tubuslänge  $T$  allein bedingt ist, so daß der Beobachter nur das Okular bzw. die Augenlinse einzustellen hat.

Der Wert der Trommelteilung ändert sich mit der Brennweite  $f_1$  des Objektivs; aber auch sonst darf man sich nicht auf die Justierung des Herstellers verlassen (zumal ja diese aus irgendwelchen Ursachen geändert sein kann). Man muß sie deshalb durch Ausmessung eines bekannten Intervalls bestimmen. Führt man dies für verschiedene Stellen der Meßschraube durch, so kann man zugleich die Schraubenfehler ermitteln. Voraussetzung ist selbstverständlich auch hierzu Scharfeinstellung des Mikroskops. Ist bei der Brennweite  $f$  um den Betrag  $df$  falsch eingestellt, so ergibt sich der Fehler  $ds$  des Intervalls  $s$  (2, 3) nach Abb. 21 zu

$$\frac{ds}{s} = \frac{df}{f}.$$

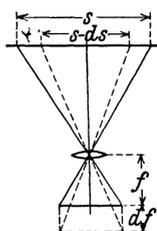


Abb. 21. Fokussierungsfehler.

Für  $df = 0,1$  mm wird bei  $f = 10$  bzw.  $50$  mm  $\frac{ds}{s} = 0,01$  bzw.  $0,002$ . Selbst bei  $f = 50$  mm und  $s = 0,1$  mm würde der Fehler noch  $0,2 \mu$  betragen. Um ihn möglichst klein zu halten, muß man also große Brennweite und kleine Intervallgröße nehmen<sup>1</sup>.

Bei einem Wert von 1 Trommelteil gleich  $1 \mu$  kann man mit einer Umdrehung nur eine Strecke von  $1/10$  mm ausmessen (mehrere Umdrehungen vermeidet man möglichst, um von den fortschreitenden Schraubenfehlern unabhängig zu werden). Um auch größere Intervalle zu überbrücken, hat man neuerdings die Mikrometerschraube durch eine Strichplatte mit einer archimedischen Spirale von sehr großer Genauigkeit in der Gesamtsteigung sowie in den inneren und den periodischen Fehlern der Steigung ersetzt, die derart in Glas und gehärtetem Stahl gelagert ist, daß durch die notwendige Drehung die Meßgenauigkeit nicht beeinflußt wird (4). Indessen wird man auch bei ihr für genauere Messungen die Fehler bestimmen müssen. Das Gesichtsfeld des Mikroskopes mit dieser Ablesung ist in Abb. 22 wiedergegeben. Man erblickt die senkrechten, durch große Ziffern gekennzeichneten Striche des Maßstabes. Durch einen Rändelknopf wird die Spiralplatte so weit gedreht, bis eine ihrer Doppelkurven den

<sup>1</sup> Die angegebene Formel gilt nur, wenn die Eintrittspupille im Objektiv liegt, andernfalls tritt an die Stelle von  $\frac{df}{f}$  der Ausdruck  $\frac{da}{a}$ , in dem  $a$  den Abstand der Eintrittspupille vom Prüfling bedeutet. Der Fehler verschwindet somit nur bei telezentrischem Strahlengang.

entsprechenden Maßstabstrich symmetrisch einschließt. An einem (in der wagerechten Mittelachse liegenden) Rechen werden die  $\frac{1}{10}$  mm beobachtet, während man die  $\frac{1}{100}$  und  $\frac{1}{1000}$  mm unter

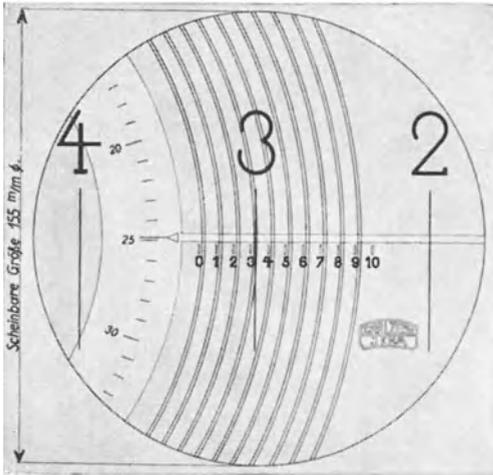


Abb. 22. Strichplatte mit archimedischer Spirale.

nächstgelegenen Maßstabstrich einschließt. Man liest dann die  $\frac{1}{1}$  und  $\frac{1}{10}$  mm auf der (senkrechten) Hauptteilung, die  $\frac{1}{100}$  und  $\frac{1}{1000}$  mm unter Schätzung der  $\frac{1}{10}$   $\mu$  auf der wagerechten Skala ab (160). In Abb. 23 würde sich ergeben: 7,5623 mm.

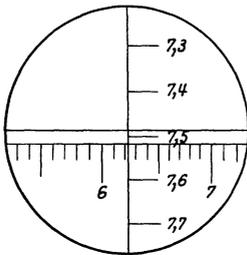


Abb. 23. Strichplatte mit Keilverschiebung.

Rechnet man mit einer Dicke der Striche von 6 bis 8  $\mu$ , so erscheinen sie bei 60- bis 80facher Vergrößerung etwa  $\frac{1}{2}$  mm breit, weshalb auch eine wesentliche Steigerung der Vergrößerung keine Vorteile bietet (auf Stellit soll es, wie früher erwähnt, möglich sein, Striche von 1  $\mu$  Breite zu ziehen, die 1000-fache Vergrößerung ver-

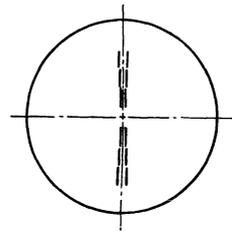


Abb. 24. Strichplatte mit verschiedenen Strichpaaren.

tragen). Wegen der unregelmäßigen Begrenzung der Striche (siehe Abb. 155) ist aber die Einstellung eines Fadens auf den Schwerpunkt des Striches schwierig und hängt von der individuellen Auffassung ab. Man versieht deshalb die Strichplatte mit 2 Strichen (wie es auch bei den Ablesungen nach Abb. 22 und 23 der Fall ist), deren Abstand etwa gleich der dreifachen Strichstärke ist, und schließt den Maßstabstrich symmetrisch zwischen ihnen ein. Hat man Maßstäbe mit verschieden breiten Strichen zu untersuchen, so sieht man auf der Strichplatte mehrere Doppelstriche mit verschiedenen Abständen vor, wie in Abb. 24.

## 2. Messung von Strichmaßstäben.

Beim Vergleich zweier Maßstäbe in bezug auf ihre Gesamtlänge muß man sie nacheinander unter zwei in dem benötigten Abstand aufgestellte Mikroskope bringen. Diese müssen genau senkrecht zur Teilungsebene des Maßstabes stehen, um scharfe Bilder über das ganze Gesichtsfeld zu liefern. Dies kontrolliert

man dadurch, daß sich der Faden in seiner Mittelstellung genau mit seinem an einer genügend großen Quecksilberfläche gespiegelten Bilde deckt.

Unter den Mikroskopen befinden sich auf einem Tisch parallel zueinander die beiden zu vergleichenden Maßstäbe, die bei Teilung in der neutralen Schicht in den Besselschen, bei Teilung auf der Oberfläche in den günstigsten Punkten unterstützt werden (soweit nicht Auflagerung auf eine Ebene genügt). Prinzipiell erscheint es gleichgültig, ob man nacheinander auf die beiden Maßstäbe durch Verschiebung der beiden starr miteinander verbundenen Mikroskope oder durch

Bewegen des Tisches einstellt. Indessen weist das erstere Verfahren doch eine Reihe von Nachteilen auf; bei der Bewegung des die Mikroskope tragenden Wagens kann nämlich, wenn sie nicht völlig zwangfrei erfolgt, durch Verbiegung oder Verdrehung eine Neigung der beiden Mikroskopachsen gegeneinander auftreten, wodurch Fehler bis zu  $0,4 \mu$  beobachtet sind (3). Dieselben Bedenken bestehen auch gegen eine andere Konstruktion (2), bei der die Mikroskope nicht verschoben, sondern nur um ihre Tragstange so weit gedreht werden, daß man die beiden Maßstäbe nacheinander sieht, die so aufgestellt sind, daß ihre Teilungsflächen senkrecht zu den jeweiligen Mikroskopachsen stehen. Ist das Mikroskop im Abstände  $D$  (Abb. 25) von der Teilung befestigt und kippt es bei seiner Verschiebung in der Meßrichtung um den kleinen Winkel  $\varphi$ , so tritt dadurch ein Meßfehler  $f = D \cdot \operatorname{tg} \varphi = D \cdot \varphi$  auf (eine Kippung des Mikroskopes senkrecht zur Meßrichtung verursacht dagegen keinen Fehler, falls man stets in der Maßstabachse mißt).

Soll  $f < 0,1 \mu$  sein, so muß bei  $D = 100 \text{ mm}$ ,  $\varphi < 1 \cdot 10^{-6}$ , also kleiner als  $\frac{1}{3}$  sek bleiben. Bezeichnet man die Länge der Schlittenführung des Mikroskops mit  $L$ , ihre Unebenheit mit  $u$ , so ist  $\varphi = \frac{u}{L}$  und  $f = \frac{u \cdot D}{L}$ . Bei langen Schlittenführungen wird also der Einfluß der Unebenheiten im Verhältnis  $\frac{D}{L}$  ver-

mindert. Da jene aber aus räumlichen Gründen meist nicht ausführbar sind und man im allgemeinen nur etwa  $L = D$  machen kann, so müßte auch die Schlittenführung auf  $0,1 \mu$  eben sein, was praktisch kaum zu erreichen ist. Man muß deshalb die Parallelität der beiden Mikroskope ständig kontrollieren; dies geschieht mit Hilfe zweier senkrecht zu den Mikroskopachsen stehender Autokollimationsfernrohre (Abb. 26), die mit ihnen starr verbunden sind (1). Sie werden nach der vorher geschilderten Senkrechteinstellung der Mikroskope so justiert, daß das Bild des Fadenkreuzes  $F'$  des einen Fernrohrs, das durch die Lampe  $L'$  beleuchtet wird, sich genau mit dem Fadenkreuz  $F''$  des anderen deckt.

Wegen der Umständlichkeit dieser Einrichtung zieht man es vor, die Mikroskope unbeweglich stehen zu lassen, wodurch man zugleich den Vorteil hat, sie auf kräftigen Pfeilern aufstellen zu können, und die Maßstäbe mit ihrem Wagen darunterzuführen. Kippt dieser in der Bewegungsrichtung oder senkrecht dazu um den Winkel  $\varphi$  (Abb. 27), so ermittelt man nicht die wahre Maßstablänge  $L$ , sondern ihre Projektion  $L'$ . Der dadurch bewirkte Fehler ist  $f = L - L' = L \cdot (1 - \cos \varphi) = \frac{1}{2} \cdot L \cdot \varphi^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{h^2}{L}$ , wenn  $h$  die Seiten- oder Höhenverschiebung seines einen Endes bedeutet. Damit der Fehler bei einem Maßstabe von 1 m Länge kleiner als  $0,1 \mu$  bleibt, muß  $\varphi < \sqrt{2 \cdot 10^{-7}}$ , also  $< 4,5 \cdot 10^{-4}$

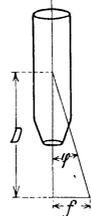


Abb. 25. Fehler durch Kippung des Mikroskops.

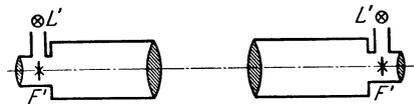


Abb. 26. Autokollimationsfernrohre zur Kontrolle der Parallelstellung der Mikroskope.

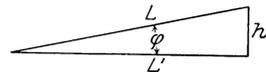


Abb. 27. Fehler durch Kippung des Maßstabes.

oder  $< 93$  sek, das ist rund  $1\frac{1}{2}$  Min., und  $h < \sqrt{0,2}$ , also  $< 0,45$  mm sein; für kleinere Längen muß  $h$  proportional  $\sqrt{L}$  kleiner bleiben (und darf demnach bei einem 10 cm langen Maßstab 0,14 mm nicht überschreiten). Innerhalb des angegebenen Betrages müssen die Stäbe auch parallel zueinander liegen. Diese Bedingungen sind aber unverhältnismäßig leichter innezuhalten als die bei verschiebbaren Mikroskopen aufgestellte Forderung.

Auch eine allmähliche Änderung des Abstandes der Mikroskope durch kleine Verkippen der Pfeiler würde keine Rolle spielen, da die während der kurzen Zeit der Beobachtung etwa eintretenden Veränderungen völlig zu vernachlässigen sind; sie werden noch weiter herabgesetzt, wenn die Beobachtungen an den beiden Enden von 2 Beobachtern gleichzeitig ausgeführt werden, wodurch auch etwaige Verlagerungen durch Erschütterungen unschädlich gemacht sind. Viel wichtiger ist, daß die Temperatur während der Messung bis auf etwa  $\frac{1}{100}^{\circ}$  konstant bleibt, und daß namentlich alle Teile gegen Bestrahlung geschützt sind, da diese Verbiegungen und Verlagerungen hervorruft. Deshalb werden die kleinen zur Beleuchtung der Striche dienenden Lampen nur für den Augenblick der Beobachtung eingeschaltet. Um auch von der verschiedenen Schwerpunktauffassung der beiden Beobachter infolge etwaiger kleiner Unsymmetrien der Striche und der Beleuchtung unabhängig zu werden, wechseln sie ihre Plätze und werden ferner die beiden Seiten der Maßstäbe vertauscht. Die Ablesungen erfolgen dabei in der Reihenfolge: Maßstab I, II, II, I. Da jeder Strich von beiden Beobachtern eingestellt wird, so erfordert jede Messung 16 und infolge des Umdrehens der Maßstäbe 32 Beobachtungen.

Wie früher erwähnt, wird bei der Beobachtung als Strich die Linie des tiefsten Schattens angesehen; ihr Ort hängt jedoch von der Beleuchtung ab. So führt schief auffallendes Licht zu ganz falschen Einstellungen, da hierbei die eine Kante dunkel, die andere hell erscheint und ferner unter Umständen Farbsäume auftreten. Selbst bei senkrechter Beleuchtung kommt dann aber noch eine verschiedene Auffassung des Strichschwerpunkts hinzu, die noch dazu mit der Zeit wechselt und sich vor allem bei Ermüdung stark ändert. Die dadurch verursachten Fehler sind um so größer, je breiter und tiefer der Strich und je stärker seine Kanten abgerundet sind. Weitere Fehler können beim

Vergleich von Maßstäben mit verschiedenen dicken Strichen auftreten, wenn die Doppelfäden in den beiden Mikroskopen ungleiche Abstände haben. Sie lassen sich durch Beobachten von beiden Seiten des Komparators aus ausschalten (4).

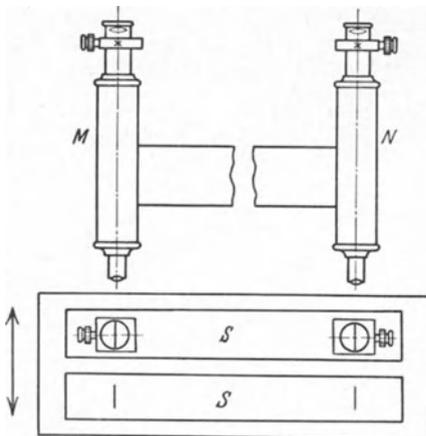


Abb. 28. Schema des Transversalkomparators.

### 3. Komparatoren.

Die Verschiebung der Maßstäbe kann nun entweder durch Bewegung des Wagens senkrecht zu oder in ihrer Achse erfolgen. Danach unterscheidet man Transversal- und Longitudinalkomparatoren. Für die Vergleichung der Gesamtlängen, wie sie z. B. beim Anschluß der nationalen Kopien an das Urmeter allein in Frage kam, werden fast ausschließlich die ersteren verwendet, die schematisch in Abb. 28 dargestellt sind (Mikroskope  $MN$ ; Bewegung der beiden Maßstäbe  $SS$  senkrecht zur Achse); da bei ihnen

der eine Maßstab gegen den anderen vertauscht wird, so arbeiten sie nach dem Substitutionsverfahren.

Als Beispiel für einen in jeder Hinsicht sorgfältig durchkonstruierten Transversalkomparator sei der der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt beschrieben (3), als derjenigen Behörde, welcher für Deutschland die Aufgaben des Bureau International des Poids et Mesures und ferner die Überwachung des gesamten Eichwesens obliegen.

Er steht in einem zum Schutz gegen Temperaturschwankungen und gegen Störungen durch Winddruck mitten im Gebäude gelegenen Saal mit doppelten Mauern, die wie zwei Glocken übereinandergreifen. Aus demselben Grunde besitzt dieser Raum keine Fenster

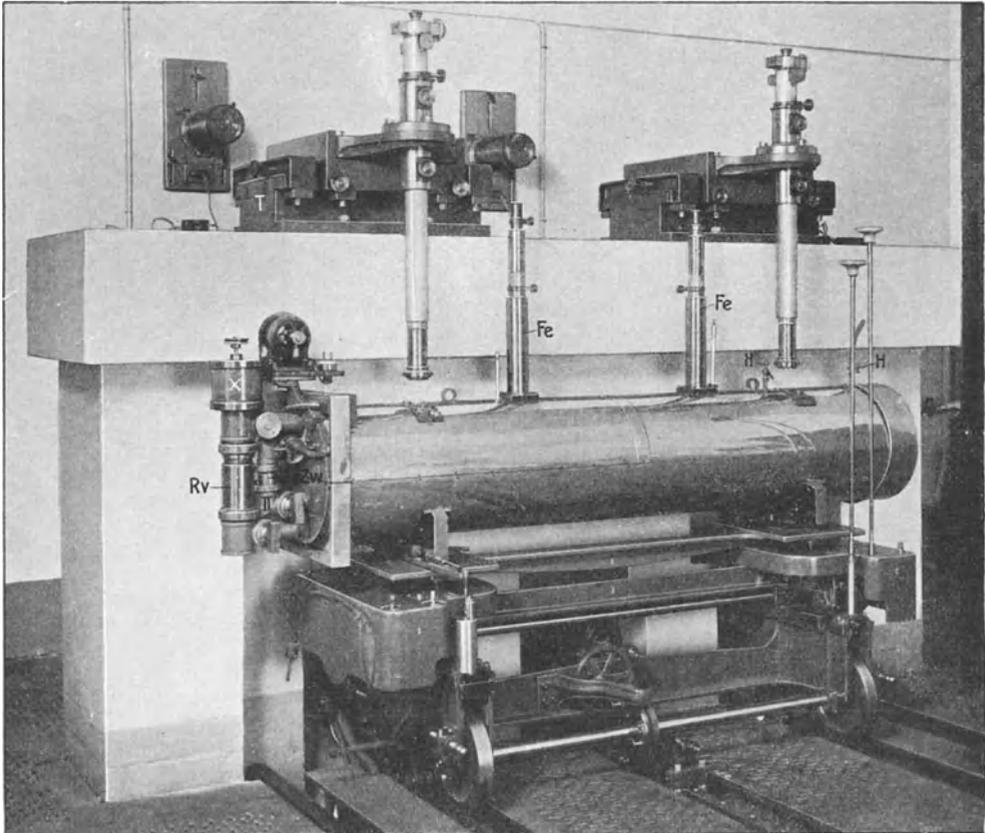


Abb. 29. Transversalkomparator der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt.

und ist auch von den ihn umgebenden Fluren aus nur durch zwei einander gegenüberliegende Doppeltüren zugänglich. Die inneren Umfassungswänden ruhen auf den Rändern eines riesigen wannenförmigen Betonklotzes, der auf einer starken Sandschüttung aufliegt und selbst mit trockenem Sande gefüllt ist; auf diesen sind die beiden Mikroskopfeiler aufgemauert. Die in Verbindung mit dem übrigen Gebäude stehende Außenmauer ist besonders fundamantiert; in ihr ist der durchlöcherter eiserne Fußboden befestigt, der noch 85 cm über dem Erdboden liegt. Durch diese Anordnung sind nicht nur Störungen durch Erschütterungen völlig ausgeschlossen, auch die Temperaturschwankungen sind so weit verringert, daß die im Laufe eines Tages erfolgenden an der Beobachtungsgrenze liegen, während die Jahrestemperatur sich zwischen 5 und 17° bewegt. Um auch Messungen bei höheren Temperaturen ausführen zu können, läßt sich der Raum durch vier unter dem Fußboden stehende regulierbare Gasöfen heizen; durch gute Luftführung ist dabei erreicht, daß die Temperaturunterschiede zwischen Fußboden und Decke nicht mehr als 0,2 bis 0,3° betragen (für die Anordnung eines technischen Meßraums siehe S. 11).

Die gemauerten Mikroskopfeiler haben einen Querschnitt von  $50 \times 30$  cm und sind oben mit einer schweren Sandsteinplatte abgedeckt (Abb. 29), auf der eine schwere Gußeisenplatte durch vier Schrauben gehalten wird. Auf dieser ruhen die nach allen Richtungen hin justierbaren Schlitten mit den Mikroskopen, deren Achsen damit senkrecht zu den Maßstäben gestellt werden können. Die Mikroskoprohre sind 70 cm lang bei 5 cm Durchmesser und 5 mm Wandstärke. Die Objektive haben eine Brennweite von 120 mm und liefern mit den zugehörigen Okularen Vergrößerungen von 35 bis 70 (an anderen Stellen werden auch Teleobjektive verwendet, die den Vorteil kürzerer Rohrlängen bieten). Die zu vergleichenden Maßstäbe liegen in einem Trog, der auf einem elektrisch oder von Hand antriebenen Wagen herangefahren wird, der, um jederzeit eine präzise Rückkehr (auf 0,1 bis 0,2 mm) in die gewünschte Lage zu gewährleisten, durch eine Mittelschiene geführt wird. Mitten im Raum befindet sich eine Drehscheibe, deren Achse ähnlich der eines Theodoliten ausgebildet ist, und die gestattet, den Trog um 180 oder auch um  $90^\circ$  zu drehen, um ihn seitlich herausfahren zu können.

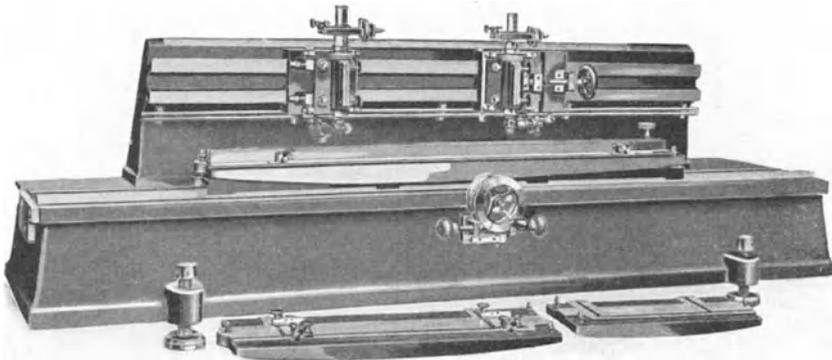


Abb. 30. Einfacher Transversalkomparator.

Zwecks Erreichung einer guten Temperaturkonstanz ist der Trog als Luftbad gestaltet; er besteht aus zwei Halbzyllindern mit Wänden aus Messing, deren Zwischenraum mit Wasser gefüllt ist, das durch Wechselstrom elektrisch geheizt wird, wobei isoliert eingeführte Messingrohre die eine, die Wände die andere Elektrode bilden und das Wasser als Heizwiderstand dient. Hierdurch und durch die außerdem noch vorgesehene Rührung wird eine außerordentlich gleichmäßige Temperaturverteilung erzielt, die noch durch zwei Thermometer *Fe* kontrolliert wird. Die Beobachtung erfolgt durch zwei Durchbrechungen der oberen Trogwand, die durch dünne Glimmerblättchen verschlossen sind. Im ganzen befinden sich zwei derartige Komparatoren in dem Raum, von denen der in Abb. 29 wiedergegebene zur Messung von 1-m-Stäben, der andere für solche bis zu 4 m Länge dient.

Prinzipiell sind alle Transversalkomparatoren in gleicher Weise ausgeführt, nur können sie für gewöhnliche Zwecke entsprechend einfacher gehalten werden. Um ferner nicht auf Maßstäbe bestimmter Länge beschränkt zu sein, ordnet man die Mikroskope wie in Abb. 30 so an, daß sie auf die jeweils benötigte Entfernung eingestellt werden können.



Abb. 31. Messung auf dem Transversalkomparator.

Sehr zweckmäßig ist es, wenn, wie beim Prototyp, auf den Normalmaßstäben noch zwei Hilfsintervalle *ab* und *cd* von genau bekannter Länge, etwa 1 mm, vorgesehen sind. Die zu vergleichenden Maßstäbe werden dann so angeordnet, daß die Striche *x*, *y* des gesuchten Maßstabes innerhalb der Hilfsintervalle liegen (Abb. 31).

Die Länge des Normals sei durch den Abstand *ac* dargestellt. Ist der Skalenwert des Okular-Schraubenmikrometers bekannt, so ermittelt man nur die Abstände  $x - a$  und  $y - c$ , dann ist die gesuchte Länge

$$xy = ac - (x - a) + (y - c).$$

Ist dagegen der Skalenwert nicht bekannt, so muß man außerdem noch die Hilfsintervalle *ab* und *cd* ausmessen; dann ist (5)

$$xy = ac - \frac{x - a}{b - a} \cdot ab + \frac{y - c}{d - c} \cdot cd.$$

Die kleinste mit dem Transversalkomparator zu vergleichende Länge ist durch den Abstand bedingt, auf den sich die beiden Mikroskope  $MN$  in Abb. 28 nähern lassen. Deshalb verwendet man zum Vergleich der Unterteilungen, wie dies z. B. bei den Vergleichs- und den Prüfmaßstäben nach DIN 864 und 865 nötig ist, Longitudinalkomparatoren, bei denen also die Maßstäbe in ihrer Achse verschoben werden. Dabei können sie entweder parallel zueinander

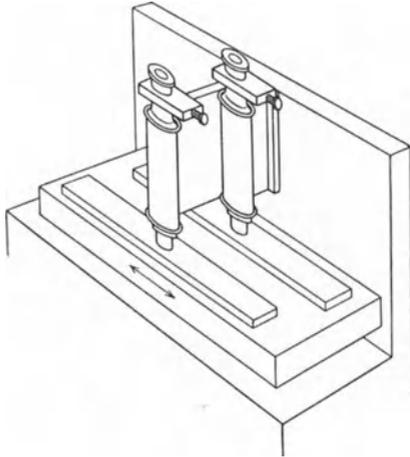


Abb. 32. Schema des Longitudinalkomparators.

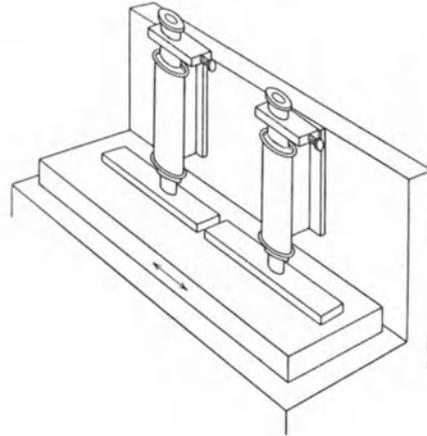


Abb. 33. Schema des Longitudinalkomparators.

(Abb. 32) oder hintereinander (Abb. 33) angeordnet sein. Wie man aus den Abbildungen ersieht, werden dabei die beiden Mikroskope gleichzeitig auf je einen Strich der beiden verschiedenen Maßstäbe (und nicht auf 2 Striche desselben Maßstabes) eingestellt. Zur Vermeidung der Kippungsfehler 1. Ordnung läßt man auch hier die Mikroskope fest stehen und verschiebt den Schlitten. Auch dann sind aber die beiden Anordnungen nicht einander gleichwertig.

Erleidet bei paralleler Lage der beiden Maßstäbe  $AB$  und  $a'b'$  (Abb. 34) der Schlitten eine Kippung um den Winkel  $\varphi$ , so geht im Prinzip  $AB$  in die Lage  $A'B'$ ,  $a'b'$  dagegen in die Lage  $a''b''$  über. Während der Maßstab  $AB$  dadurch in seiner Projektion gemessen wird und somit nur ein Fehler vom Betrage  $\frac{1}{2} \cdot L \cdot \varphi^2$ ,

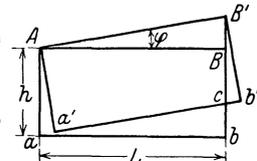


Abb. 34. Kippfehler bei Ausführung nach Abb. 32.

also von der 2. Ordnung, auftritt, wird  $a'b'$  um die Projektion des Stückes  $c'b'$ , also die Projektion von  $h \cdot \varphi$ , und unter Vernachlässigung von Größen 2. Ordnung um  $f = h \cdot \varphi$  zu groß gemessen; es tritt also hier ein Fehler 1. Ordnung auf. Bei einer Schlittenführung mit der Unebenheit  $u$  und von der Länge  $L$  wird wieder

$$f = \frac{u \cdot h}{L}. \text{ Für } h = 25 \text{ mm, } L = 200 \text{ mm}$$

$$\text{würde } f = \frac{1}{8} \cdot u, \text{ es müßte also die}$$

Schlittenführung auf  $0,8 \mu$  eben sein, damit  $f$  nicht  $0,1 \mu$  übersteigt. Praktisch einfacher ist es dagegen, die beiden Maßstäbe  $AB$  und  $a'b'$  (Abb. 35) entsprechend Abb. 33 hintereinander zu legen, so daß ihre Achsen fluchten; erfolgt bei der Verschiebung des Schlittens eine Kippung um den Winkel  $\varphi$ , so tritt bei beiden Maßstäben nur ein Fehler 2. Ordnung der Größe  $\frac{1}{2} \cdot L \cdot \varphi^2$  auf. Man muß also nach einem von Abbe 1890 auf dem Naturforschertag in Bremen aufgestellten

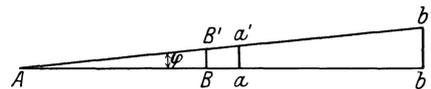


Abb. 35. Kippfehler bei Ausführung nach Abb. 33.

Grundsatz, der danach den Namen des Abbeschen Prinzips führt, zur Vermeidung der Fehler 1. Ordnung die bekannte und die unbekannte Länge in einer Achse hintereinander anordnen (1), während bei paralleler Lage beider durch die Kippung Fehler 1. Ordnung bewirkt werden. Dieses Prinzip sollte deshalb bei allen Meßgeräten verwirklicht werden.

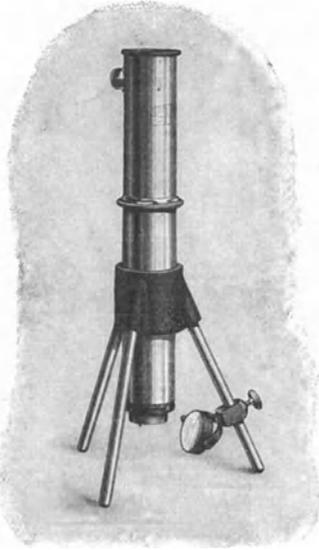


Abb. 36. Mikroskop mit Okularskala.

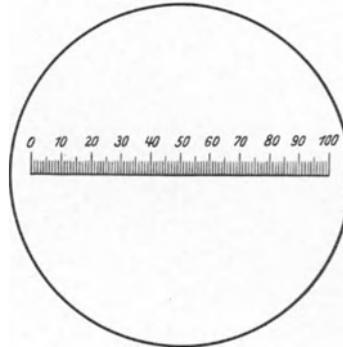


Abb. 37. Gesichtsfeld für Abb. 36.

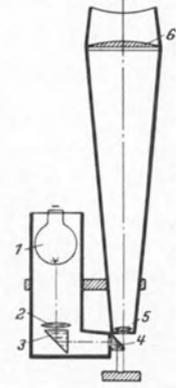


Abb. 38. Universalprojektor.

Allerdings beansprucht seine Durchführung Schlitten und Führungen von mindestens der doppelten Meßlänge. Wie sich diese unbequeme Forderung vermeiden

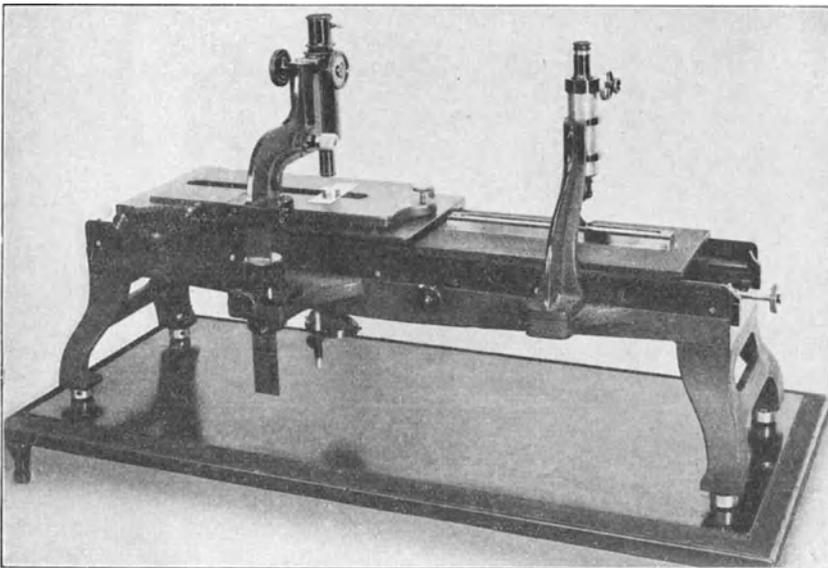


Abb. 39. Longitudinalkomparator.

und die notwendige Erstreckung durch eine besondere optische Anordnung auf die einfache Prüflänge herabsetzen läßt, soll später bei den Meßmaschinen auseinandergesetzt werden (siehe S. 276).

Bei paralleler Anordnung der beiden Maßstäbe wird der Kippungsfehler um so kleiner, je enger sie aneinander liegen. Er verschwindet völlig, wenn man beide Teilungen zugleich im Mikroskop sieht, wobei man dann auch nur ein Mikroskop braucht. Diese Anordnung ist z. B. bei durchsichtigen Prüflingen zu ermöglichen, indem man sie auf das Normalmaß so auflegt, daß beide ihre Teilungen einander zuwenden.

Als eine Abart dieser Ausführung kann man auch die Mikroskope mit Okularskala ansehen (Abb. 36 und 37), die gewissermaßen durch das Objektiv auf dem Prüfling abgebildet wird, bzw. bei denen das Objektiv ein Bild des Prüflings auf der Okularskala entwirft. Sie werden zur Bestimmung der Brinellhärte meist so ausgeführt, daß ein Skalenteil gleich  $10\ \mu$  Objektgröße ist, wobei man die  $\frac{1}{10}\ \mu$  noch schätzen kann.

Der Wert des Skalenteils hängt, wie beim Okularschraubenmikrometer, von dem benutzten Objektiv ab und muß, wie bei jenen angegeben, bestimmt werden.

Dasselbe Prinzip ist auch bei dem Universalprojektor (Abb. 38) benutzt. Das von einer Punktlichtlampe 1 kommende Licht wird durch den Kondensator 2 mittels der Prismen 3 und 4 auf den Prüfling geworfen, der dadurch reflexfrei beleuchtet wird. Von ihm entwirft das Objektiv 5 ein 10-fach vergrößertes Bild auf der mit mm-Teilung versehenen Strichplatte (die auch gegen eine photographische Kassette ausgewechselt werden kann), so daß hier mittels der plankonvexen Linse 6 die  $\frac{1}{10}$  mm abgelesen und die  $\frac{1}{100}$  mm geschätzt werden können (6).



Abb. 41. Messung auf dem Longitudinalkomparator.

Zwei Ausführungsformen von Longitudinalkomparatoren sind in Abb. 39 und 40 wiedergegeben [bezüglich einer ähnlichen Form siehe (4)]. Bei kleinen Körpern kann man die Mikroskope so nahe zusammenbringen, daß man durch beide zugleich mit beiden Augen beobachten kann, wobei man es so einrichtet, daß die Marken ihrer beiden Strichplatten miteinander verschmelzen und dadurch eine bequeme Beobachtung ermöglichen (2)<sup>1</sup>.

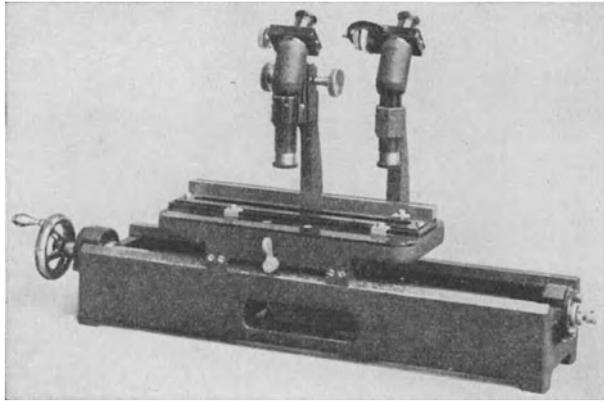


Abb. 40. Longitudinalkomparator.

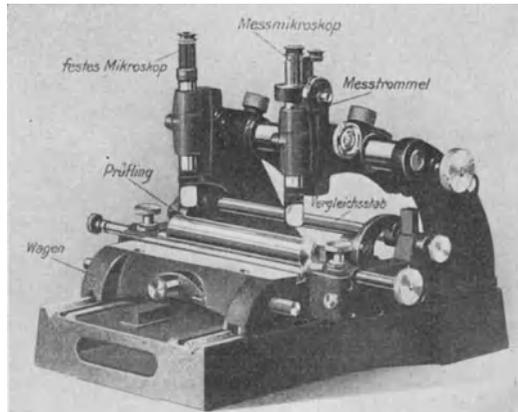


Abb. 42. Transversalkomparator zum Messen der Längenänderungen beim Härten.

<sup>1</sup> Verwendet ist dieses Prinzip bei der sogenannten Mikroskopmeßmaschine zum Prüfen von Typen und Prägestempeln (7).

Die Messung auf dem Longitudinalkomparator erfolgt im Prinzip derart, daß man (Abb. 41) die Abstände der das Intervall  $bd$  begrenzenden Striche des Prüflings von den Strichen  $ac$  des entsprechenden Intervalls des Normals ermittelt. Sind  $r_1$  und  $r_2$  die Reduktionsfaktoren der beiden Okularmikrometer, so ist

$$bd = ac - (b - a) \cdot r_1 + (d - c) \cdot r_2.$$

Auch hier wird man zur Erhöhung der Genauigkeit die Beobachtungen entsprechend wie beim Transversalkomparator vornehmen, vor allem auch die beiden Maßstäbe miteinander vertauschen.

Komparatoren werden in der Technik selten gebraucht, da man die Prüfung genauer Maßstäbe aus den früher erörterten Gründen besser behördlich vornehmen läßt und im übrigen alle Messungen nach Möglichkeit auf Endmaße zurückführt.



Abb. 43.  
Dorn zum  
Messen von  
Lochabständen.

Zum Messen der beim Härten und Anlassen auftretenden Längenänderungen hatte die Firma Zeiss einen Transversalkomparator konstruiert (Abb. 42), der aber nicht mehr gebaut wird. Die beiden Mikroskope werden auf je einen Strich des Vergleichsmaßstabes eingestellt, der sich in gleiche Höhe mit dem Prüfling schwingen läßt, und letzterer in seiner Achse verschoben, bis seine linke Marke auf das Fadenzentrum des Mikroskopes fällt. Dann wird mit dem Okularmikrometer des rechten Mikroskops der Abstand zwischen den rechten Marken auf dem Vergleichsmaßstab und dem Prüfling ermittelt. Da es nur auf die Differenz der Messungen vor und nach dem Härten usw. ankommt, braucht der Vergleichsmaßstab nicht genau zu sein.

Eine besondere Schwierigkeit bereitet die Ermittlung von Lochabständen, da ihre Ränder selten genügend scharf für die mikroskopische Einstellung sind. Ihren Mittelpunkt kann man dadurch kennzeichnen, daß man schlanke Konen hineinsteckt, auf deren Stirnfläche ein sehr kleiner, genau zu ihrer Achse laufender Kreis eingraviert ist (Abb. 43). Die Abstände ihrer Mittelpunkte lassen sich dann leicht mittels Longitudinalkomparators bestimmen.

### III. Endmaße und ihre Messung.

#### A. Endmaße.

##### 1. Endmaße mit Kugel- und Zylinderflächen.

Gegenüber den Strichmaßen bieten die Endmaße den Vorteil, daß Ablesefehler völlig ausgeschlossen sind, ihre Genauigkeit wesentlich höher ist (so daß die Berücksichtigung ihrer Korrekturen in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle unnötig ist), und daß sie sowohl für die technischen Messungen wie für die Kontrolle der in der Technik gebrauchten Meßgeräte wesentlich geeigneter sind. Demgegenüber steht der Nachteil, daß sie nur ein einziges Maß darstellen, während auf einem in mm geteilten Meterstabe, bei Schätzung der  $\frac{1}{10}$  mm, 10000 Maße vereinigt sind.

Die Endmaße waren ursprünglich Zylinder aus gehärtetem Stahl mit kugelförmigen Enden, deren Mittelpunkte in die Zylindermitte fielen, die also einen zylindrischen Ausschnitt aus einer Kugel darstellten. Diese Form bietet den Vorteil, daß ihr Maß unabhängig von der Lage ist, da der Abstand zweier paralleler Tangenten stets gleich dem Durchmesser ist (Abb. 44).

Fallen die Mittelpunkte der beiden Kugelflächen nicht genau zusammen, sondern liegen sie im Abstande  $E$  voneinander (Abb. 45), so bestimmt man bei senkrechter Stellung die Länge

$$L = R_1 + R_2 + E,$$

bei der um den Winkel  $\varphi$  geneigten Lage dagegen die Länge

$$L' = R_1 + R_2 + E \cdot \cos \varphi,$$

so daß der Meßfehler wird

$$f = L - L' = E \cdot (1 - \cos \varphi) = \frac{1}{2} \cdot E \cdot \varphi^2.$$

Damit  $f < 0,1 \mu$  bleibt, muß bei  $\varphi = 1^\circ (2^\circ)$   $E < 0,7 (0,2)$  mm sein; was bei sorgfältiger Herstellung leicht innezuhalten ist.

Ihre Hauptverwendung finden die Kugelmaße heute noch als Grenzlehren bei Bohrungen über 260 mm Durchmesser (siehe S. 294), gelegentlich auch als Einstellmaße für größere Schraublehren (wofür sie indessen besser durch Parallelendmaße ersetzt werden sollten).

Als kleinere Endmaße kann man auch Stahlkugeln nehmen, die heute von den Kugellagerfabriken in recht guter Ausführung geliefert werden. Man kann bei ausgesuchten Kugeln mit Fehlern im Durchmesser und in der Rundheit von etwa  $\frac{3}{4}$  bis  $1 \mu$  rechnen (gelegentlich sind indessen auch kleine Erhöhungen von  $2,5 \mu$  beobachtet), während früher Fehler bis zu  $\pm 13,5 \mu$  bemerkt worden sind (13).

Nach neueren Messungen (12) beträgt bei

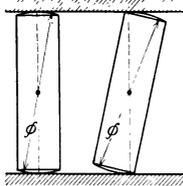


Abb. 44. Kugelendmaß; Unabhängigkeit der Länge von der Neigung.

Kugeldurchmesser mm	der größte Durchmesserunterschied der einzelnen Kugel $\mu$	der mittlere Durchmesserunterschied der einzelnen Kugel $\mu$
3,0	0,83	0,25
6,0	0,89	0,59
9,0	2,20	1,12
12,7	1,64	0,79

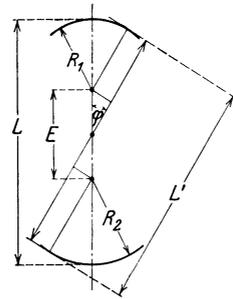


Abb. 45. Endmaß mit exzentrischen Kugelflächen.

was die vorstehenden Angaben durchaus bestätigt.

Aus Stahlkugeln hat man gelegentlich auch größere Endmaße (durch Zusammenfügen in geeigneten Röhren) hergestellt.

Nun ist aber zu beachten, daß durch den stets vorhandenen Meßdruck bei den von gekrümmten Flächen begrenzten Körpern nicht nur die elastische nach dem Hookeschen Gesetz zu berechnende Zusammendrückung, sondern auch eine Deformation der Flächen erfolgt, wodurch eine Annäherung der Körper aneinander eintritt (1, 4, 14). Für die Größe dieser Abplattung gilt nach Heinrich Hertz (6):

$$M = \frac{1}{\mu} \cdot \sqrt[3]{\frac{9 \cdot P^2 \cdot (\vartheta_1 + \vartheta_2)^2 \cdot (\varrho'_1 + \varrho''_1 + \varrho'_2 + \varrho''_2)}{512}}$$

und für die Halbachsen  $a$  und  $b$  der Abplattungseellipse

$$a = \mu \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot P \cdot (\vartheta_1 + \vartheta_2)}{8 \cdot (\varrho'_1 + \varrho''_1 + \varrho'_2 + \varrho''_2)}}, \quad b = r \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot P \cdot (\vartheta_1 + \vartheta_2)}{8 \cdot (\varrho'_1 + \varrho''_1 + \varrho'_2 + \varrho''_2)'}}$$

wobei die Indizes 1 und 2 sich auf die beiden Körper beziehen und bedeuten:

$P$  den Druck in kg,

$\varrho'$  und  $\varrho''$ , die beiden Hauptkrümmungen in  $\frac{1}{\text{cm}}$  (die stets senkrecht zueinander stehen);

ist  $R$  der Krümmungshalbmesser,  $D$  der Durchmesser, so ist  $\varrho = \frac{1}{R} = \frac{2}{D}$ .

$\varrho$  ist positiv, wenn der Krümmungsmittelpunkt im Innern des Körpers liegt (also bei konvexen Flächen);

$\vartheta$  den Elastizitätskoeffizienten, der mit dem in der Technik üblichen Elastizitätsmodul  $E$  (in  $\text{kg/cm}^2$ ) und dem Poissonschen Verhältnis  $m$  (Einschnürung: Dehnung) in der Beziehung steht

$$\vartheta = \frac{4}{E} \cdot (1 - m^2).$$

Die Faktoren  $\mu$  und  $\nu$  sind transzendente Funktionen eines Hilfswinkels  $\tau$ , der sich aus der Beziehung

$$\cos \tau = \frac{A - B}{A + B}$$

berechnet, worin

$$2 \cdot (A + B) = \varrho'_1 + \varrho''_1 + \varrho'_2 + \varrho''_2,$$

$$2 \cdot (A - B) = \sqrt{(\varrho'_1 - \varrho''_1)^2 + 2 \cdot (\varrho'_1 - \varrho''_1) \cdot (\varrho'_2 - \varrho''_2) \cdot \cos 2\omega + (\varrho'_2 - \varrho''_2)^2}$$

ist und  $\omega$  den Winkel zwischen den Hauptkrümmungen  $\varrho'_1$  und  $\varrho'_2$  bezeichnet. Die Werte von  $\mu$  und  $\nu$  kann man für verschiedene Winkel  $\tau$  aus folgender Tabelle entnehmen:

$\tau$ :	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0°
$\mu$ : 1,0000	1,1278	1,2835	1,4858	1,7542	2,1357	2,7307	3,7779	6,6120	$\infty$	
$\nu$ : 1,0000	0,8927	0,8017	0,7171	0,6407	0,5673	0,4930	0,4079	0,3186	0,0000	

Für die Meßtechnik interessiert nun vor allem der Fall der gegenseitigen Berührung von Kugeln, bei denen also  $\varrho'_1 = \varrho''_1$ ,  $\varrho'_2 = \varrho''_2$  ist und somit  $\mu = \nu = 1$  wird (dabei kann auch die eine Kugel eine Ebene mit  $\varrho = 0$ ,  $R = \infty$  sein<sup>1</sup>; die Abplattungsfigur ist dann ein Kreis. Dafür wird

$$M = \sqrt[3]{\frac{9 \cdot P^2 (\vartheta_1 + \vartheta_2)^2 \cdot (\varrho_1 + \varrho_2)}{16^2}},$$

$$a = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot P \cdot (\vartheta_1 + \vartheta_2)}{16 \cdot (\varrho_1 + \varrho_2)}}.$$

Für den in der Technik vorzugsweise gebrauchten Werkstoff Stahl kann man im Mittel nehmen

$$E = 2 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2, \quad m = 0,29,$$

womit wird

$$M = 0,7785 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt[3]{P^2 \cdot (\varrho_1 + \varrho_2)} \text{ cm},$$

$$a = 88,2340 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt[3]{\frac{P}{(\varrho_1 + \varrho_2)}} \text{ cm},$$

woraus die Beziehungen für zwei gleiche Kugeln ( $\varrho_1 = \varrho_2$ ) oder für Kugel gegen Ebene ( $\varrho_2 = 0$ ) leicht abzuleiten sind.

Bei Beachtung der Grundlagen der Hertzschen Theorie, die vor allem voraussetzt, daß die Drucke so gering sind, daß die Spannungen innerhalb der Elastizitätsgrenze bleiben, hatte eine kritische Untersuchung ergeben (2, 11a), daß die Formeln die Beobachtungen richtig darstellen. Andere Untersuchungen (5, 7, 8, 9, 11, 11a) hatten aber zu dem Ergebnis geführt, daß zwar die funktionelle Abhängigkeit der Abplattung von  $P$  und  $R$  richtig dargestellt wird, daß aber der Zahlenfaktor um 16% zu verringern sei<sup>2</sup>. Neuere sehr sorgfältige Versuche (2a, 3) haben das erstere Ergebnis vollinhaltlich bestätigt, andererseits aber gezeigt, das der aus der Hertzschen Theorie folgende Zahlenfaktor nur um 9,5% zu verkleinern ist<sup>3</sup>. Setzt man statt der Krümmungen  $\varrho$  die Durchmesser  $D$ ,

<sup>1</sup> Handelt es sich um die Abplattung von Kugel gegen Zylinder oder torische Flächen (wie z. B. bei Kugellagern), so ist mit den oben gegebenen Formeln zu rechnen.

<sup>2</sup> Die Verkleinerung beträgt bei Stahl gegen Glas 7,4 bis 4,3% (11a, 11b), bei Bronze 22% (6a, 11a), bei Glas 21% (11a); auch bei Invar hat sich ein kleinerer Wert als der theoretische ergeben (5a).

<sup>3</sup> Dies steht auch in Übereinstimmung damit, daß sich die Stoßzeit zwischen 2 Kugeln um 10 bis 15% kleiner als nach der Hertzschen Theorie ergibt (10). Im übrigen hängt die Zahl 9,5% naturgemäß von den für  $E$  und  $m$  gewählten Werten ab. So ergibt sich bei

$$E = 2,2 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2, \quad m = 0,3$$

die Abweichung von  $M$  zu  $-3,24\%$ .

und zwar in mm ein, so wird damit

$$M = 1,9123 \cdot \sqrt[3]{P^2 \cdot \left(\frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2}\right)} \mu, \quad a = 29,0476 \cdot \sqrt[3]{\frac{P}{\left(\frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2}\right)}} \mu.$$

Für den Fall zweier gleicher Kugeln wird

$$M' = 2,4093 \cdot \sqrt[3]{\frac{P^2}{D}} \mu, \quad a' = 23,055 \cdot \sqrt[3]{P \cdot D} \mu$$

und für den Fall der Kugel zwischen zwei Ebenen

$$M'' = 3,8246 \cdot \sqrt[3]{\frac{P^2}{D}} \mu, \quad a'' = 29,0476 \cdot \sqrt[3]{P \cdot D} \mu.$$

Damit ergeben sich folgende Werte für  $M$  bei  $P = 1$  kg (in  $\mu$ ):

D mm	Abplattung	
	2 Kugeln	Kugel zwischen 2 Ebenen
0,5	3,1	4,8
1	2,5	3,8
2	2,0	3,0
5	1,5	2,2
10	1,2	1,8
20	0,9	1,4
50	0,7	1,0
100	0,5	0,8
200	0,4	0,6
500	0,3	0,5
1000	0,2	0,4

Für größere Drucke wachsen sie proportional  $P^{\frac{2}{3}}$ , sind also für

$$P = \begin{matrix} 0,25 & 0,5 & 2 & 3 & \text{kg} \\ 0,3969 & 0,6300 & 1,5874 & 2,0801 & \text{mal größer.} \end{matrix}$$

Im Anschluß hieran sei auch die Abplattung von Körpern behandelt, die von Zylinderflächen begrenzt werden, wie sie z. B. bei Lehrdornen, Flachlehren, Meßscheiben und Meßstäben auftreten, und wie sie auch gelegentlich als Endmaße verwendet werden (diese dürfen nur um die Zylinderachse, aber nicht senkrecht dazu gekippt werden, wenn der Abstand zweier paralleler Tangentialebenen richtig gemessen werden soll). Es sind hier zwei Fälle zu unterscheiden, je nachdem ob die sich berührenden Zylinder in gekreuzter oder paralleler Stellung zueinander liegen (Zylinderachsen senkrecht oder parallel zueinander), wobei der letztere Fall auch den des Zylinders zwischen zwei Ebenen einschließt.

Für den Fall gekreuzter Zylinder ist nach H. Hertz die Abplattung

$$M = \frac{0,2600}{\mu} \cdot \sqrt[3]{P^2 \cdot (\vartheta_1 + \vartheta_2)^2 \cdot (\varrho_1 + \varrho_2)} \text{ cm},$$

während die Druckfigur eine Ellipse mit den Halbachsen

$$a = \mu \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot P \cdot (\vartheta_1 + \vartheta_2)}{8 \cdot (\varrho_1 + \varrho_2)}}, \quad b = \nu \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot P \cdot (\vartheta_1 + \vartheta_2)}{8 \cdot (\varrho_1 + \varrho_2)}} \text{ cm}$$

ist. Für Stahl wird

$$M = \frac{0,7003 \cdot 10^{-4}}{\mu} \cdot \sqrt[3]{P^2 \cdot (\varrho_1 + \varrho_2)} \text{ cm}.$$

Für zwei gleiche Zylinder ist  $\mu = \nu = 1$  und wird die Druckfigur ein Kreis, so daß in diesem Sonderfall für Stahl gilt

$$M = 0,7785 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt[3]{P^2 \cdot \varrho} \text{ cm}, \quad a = b = 88,2340 \cdot \sqrt[3]{\frac{P}{\varrho}} \text{ cm}.$$

Dies sind dieselben Formeln wie bei zwei gleichen Stahlkugeln. Nach den letzten Versuchen (2a, 3) muß nun auch bei gekreuzten Zylindern der Zahlenfaktor um 9,5% verkleinert werden, so daß schließlich folgende Gleichungen gelten:

$$M' = 2,4093 \cdot \sqrt[3]{\frac{P^2}{D}} \mu, \quad a = 23,055 \cdot \sqrt[3]{P \cdot D} \mu \quad (D \text{ in mm, } P \text{ in kg})$$

(die Zahlenwerte sind aus der 2. Spalte der vorher mitgeteilten Tabelle zu entnehmen).

Der Fall zweier paralleler Zylinder läßt sich durch die von H. Hertz gegebene Theorie nicht mehr erfassen, da sich für die Abplattung der Wert 0 ergibt, was sicher nicht zutrifft, und ferner für die große Halbachse der Wert Unendlich. Das liegt daran, daß in diesem Falle  $a$  (und damit auch  $M$ ) noch von der Länge der zur Berührung gelangenden Zylinderteile abhängen. Hier blieb somit nur die Möglichkeit, die Frage durch Versuche zu klären. Sie haben für die Abplattung von Zylindern aus Stahl zwischen zwei Stahlebenen zu dem Ergebnis geführt:

$$M = 0,034 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{P}{L} \cdot \sqrt[3]{\varrho} \text{ cm}.$$

Sie ist also proportional dem Druck auf die Längeneinheit. Ist der Zylinder länger als der Durchmesser  $d$  der Meßflächen, so ist  $L = d$ , ist er aber kleiner als  $d$ , so ist für  $L$  die Zylinderlänge einzusetzen.

Ersetzt man wieder die Krümmung durch den Zylinderdurchmesser  $D$  (in mm) und rechnet man auch  $L$  in mm, so wird

$$M = 0,923 \cdot \frac{P}{L} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{D}} \mu.$$

Die Werte für eine spezifische Belastung  $P' = \frac{P}{L} = 1 \text{ kg/mm}$  sind in nachfolgender Tabelle aufgeführt (für andere Werte von  $P'$  wachsen sie proportional  $P'$ ):

$D = 0,1$	0,2	0,5	1	2	5	mm
$M = 1,99$	1,57	1,15	0,92	0,73	0,54	$\mu$
$D = 10$	20	50	100	200	500	1000 mm
$M = 0,43$	0,34	0,25	0,20	0,16	0,12	0,09 $\mu$

Bei Meßflächen von 6 mm Durchmesser, wie sie bei Schraublehren häufig vorkommen, oder von 8 mm, wie man sie bei Meßmaschinen findet, wird die Abplattung bei einem Meßdruck von 1 kg 6- bzw. 8mal kleiner, vorausgesetzt, daß die Prüflinge über die Meßflächen hinausragen.

Für die Abplattung bei parallelen Zylindern fehlen noch entsprechende Untersuchungen. Man kann diesen Fall aber stets dadurch vermeiden, daß man die beiden Zylinder so anordnet, daß ihre Achsen senkrecht zueinander zu liegen kommen. Vielfach führt man derartige Maße deshalb so aus, daß ihre beiden halbzylinderförmigen Enden gekreuzt zueinander stehen.

## 2. Die Entwicklung der Parallelendmaße.

Neben den Kugel- und Zylinderendmaßen waren früher auch schon zylindrische Endmaße mit ebenen Endflächen in Gebrauch. Damit sie ein bestimmtes Maß darstellen, müssen ihre Endflächen möglichst gut eben und parallel zueinander sein. Für Längen von 0,5 bis 2,5 mm wurden auch prismatische Endmaße benutzt, die mit einem Griff versehen waren und als Flachkaliber bezeichnet wurden (16). Die hierbei erreichte Genauigkeit be-

trug aber wohl nur einige bis höchstens  $1 \mu$ , entsprach also nicht den heute unbedingt nötigen Anforderungen. Ausnahmsweise wurde auch wohl schon eine größere Genauigkeit erzielt. So hat Whitworth (18) einen Satz von  $0,01''$  bis  $0,1''$  in Abstufungen von  $\frac{1}{10\,000}''$  (also etwa  $2,5 \mu$ ) durch Anschluß an Strichmaßkopien des Prototyps hergestellt, der durch Kgl. Order of Council 1881 als Board of Trade Standard anerkannt wurde.

Die Ansichten darüber, was vorzuziehen ist, ob punktförmige Berührung, wie bei Kugelflächen, strichförmige, wie bei Zylindern, oder völliges Anschmiegen, wie bei ebenen Flächen, waren geteilt, doch dürften letztere am günstigsten sein, da sie den Meßdruck am besten aufnehmen, keine zusätzliche Abplattung erleiden und auch einer geringeren Abnutzung unterworfen sind. Bei den Parallelendmaßen ist nur zu beachten, daß sie durch den Meßdruck  $P$  eine Zusammendrückung erfahren, die sich nach dem Hookeschen Gesetz zu

$$\delta l = \frac{L \cdot P}{E \cdot Q}$$

berechnet ( $L$  die Länge,  $E$  der Elastizitätsmodul,  $Q$  der Querschnitt). Sind die Querschnitte von Endmaß und Werkstück gleich, so ist die Abplattung für beide gleich groß und fällt also fort. Bei den gebräuchlichen Endmaßquerschnitten von rund  $300 \text{ mm}^2$  beträgt die Verkürzung bei  $1 \text{ m}$  Länge und  $1 \text{ kg}$  Meßdruck nur  $0,17 \mu$ . Die Differenz der Abplattungen ist also nur bei Werkstücken von wesentlich geringerem Querschnitt zu beachten.

Nun besteht für die Endmaße der eingangs erwähnte prinzipielle Nachteil, daß sie immer nur ein einziges Maß darstellen, daß man also für jede vorkommende Größe ein besonderes Endmaß benötigt. Dieser Einwand wird aber hinfällig, wenn es gelingt, die Endmaße so genau herzustellen, daß der Wert einer Kombination praktisch genau gleich der Summe der Einzelwerte ist.

Diese Aufgabe wurde zuerst von Johansson, damals Inspektor der Waffenfabrik in Eskilstuna (Schweden), gelöst. Er beobachtete, daß sich die Arbeiter nach Einführung des Austauschbaus und des dazu nötigen Toleranzverfahrens kleine Stahlprismen als Lehren anfertigten, um die geforderte Genauigkeit zu erreichen. Um nun nicht für jede Arbeit ein neues Prisma zu brauchen, strebte er, zusammensetzbare Endmaße in dem vorher genannten Sinne herzustellen. Er suchte dazu einen geeigneten Stahl aus und schuf ferner auch heute noch geheim gehaltene Verfahren zum Planschleifen und Polieren sowie zum Messen. Die Herstellungsgenauigkeiten (Toleranzen) wählte er so, daß sie proportional der Länge waren (progressive Toleranz). Die ersten 1897 auf den Markt gekommenen Endmaße waren aber nur rohe Vorläufer der heutigen. Erst nach 9 Jahren fortgesetzter unermüdlicher Arbeit war die Aufgabe nahezu restlos gelöst, doch dauerte es noch weitere 5 Jahre (bis 1911), ehe die Endmaße auch fabrikationsmäßig hergestellt werden konnten (7).

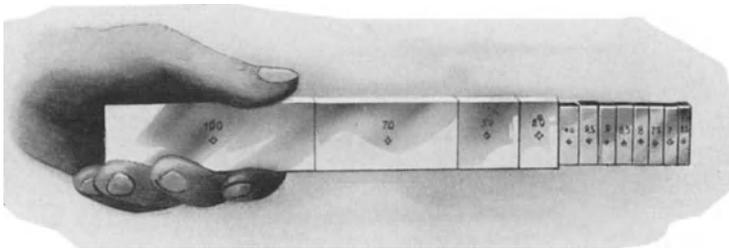


Abb. 46. Angesprengte Endmaße.

Die Endflächen der heute von einer Reihe von Firmen hergestellten Endmaße sind so genau eben, daß sie beim Aneinanderbringen (Ansprengen oder Anschieben) außerordentlich fest aneinander haften, und daß eine Zugkraft von  $5$  bis  $20 \text{ kg/cm}^2$  (6, 10a), nach neueren Angaben sogar von  $33 \text{ kg/cm}^2$  (3) nötig ist, um sie wieder zu trennen [dabei beträgt der Anfangswert der Haftkraft nur etwa  $\frac{1}{3}$  von dem nach 1 Stunde erreichten (10b)]. Man kann das Haften z. B. dadurch vorführen, daß man mehrere aneinandergesprengte Endmaße freitragend halten kann (Abb. 46), ohne daß sie auseinanderfallen. Das Anein-

anderhaften rührt nicht, wie schon Tyndall 1875 festgestellt hatte, vom Luftdruck her, da dieser, wegen nicht vollständiger Berührung der Flächen, nur 200 bis 500 g/cm<sup>2</sup> ausmacht (1).

Bei den heutigen Endmaßen unterscheidet man zwischen „Ansprenge“ und „Anschieben“. Im ersteren Falle saugt sich das Endmaß beim Aufsetzen auf eine ebene Fläche gewissermaßen von selbst an (freiwilliges Anspringen); dies tritt nur bei (stärkeren) Endmaßen mit vorzüglicher Hochglanzpolitur ein. Bei weniger sorgfältig bearbeiteten (mit Übergang von Hochglanz- zu Strichpolitur, Abb. 47), sowie bei verbogenen (unter 2,5 mm Dicke) muß man dagegen durch Andrücken oder Überschieben gewissermaßen die in den Zwischenräumen zwischen den Unebenheiten vorhandenen winzigen Luftpolster entfernen. Haftet dann das Endmaß dauernd mit seiner ganzen Fläche (sind also z. B. durch eine Quarzplatte hindurch keine Interferenzen oder gelblich-bräunlichen Flecke zu sehen),



Abb. 47. Endmaß mit Strichpolitur (stark vergrößert).

so bezeichnet man den Vorgang als Anschieben.

Die Endmaße mit Hochglanzpolitur bieten zweifelsohne meßtechnisch sehr große Vorteile, da ihr Maß (siehe weiter unten) sehr genau, bis auf wenige Tausendstel  $\mu$  ( $m\mu$ ) definiert ist. Dafür haben sie aber den Nachteil, daß sie (infolge ihrer relativ weichen Oberflächenschicht) beim Zusammenbringen mit Meß-

flächen an Stücken aus anderem, weniger geeigneten Stahl (also z. B. beim Gebrauch in der Meßmaschine oder in Schraublehren) leichter zerkratzt werden und sich dadurch nach kurzem Gebrauch im Betriebe in ihrem Verhalten dem der Endmaße mit weniger sorgfältiger, sogenannter Strichpolitur nähern. Sie kommen deshalb im wesentlichen nur für allerfeinste meßtechnische Arbeiten in Frage,

Um gutes Zusammenhaften zu erreichen, müssen die Endmaße sehr sorgfältig gereinigt werden (8). Da sie nach Gebrauch, der Rostgefahr wegen, stets (mit säurefreiem Vaseline) eingefettet werden müssen, wird das Fett zunächst durch Waschen mit rückstandsfreiem Leichtbenzin oder dergleichen entfernt [es wird auch eine Mischung von Alkohol, Äther und Ammoniak empfohlen (14a)], wodurch auch die bei großer Luftfeuchtigkeit sich bildenden (anormalen) Wasserhäute vorübergehend entfernt werden sollen (13). Benzol (und Alkohol) sind dafür nicht zu empfehlen. Dann wird trocken gerieben, wofür früher meist alte Leinwand benutzt wurde, die aber stets seifenhaltig ist und dadurch Schichten zurückläßt, die das Ansprenge stören. Auch bei dem von manchen Seiten benutzten Baumwollflanell ist diese Gefahr nicht gänzlich ausgeschlossen. Am besten ist gute, gereinigte, langfaserige Augenwatte. Ein nochmaliges Überfahren mit weichem reinen Waschleder ist nicht zu empfehlen, da dieses stets gerbsäurehaltig ist. Etwa zurückgebliebene Fasern oder abgelagerte Staubteilchen werden mit einem weichen trockenen Marderhaarpinsel oder einem Wattebausch beseitigt. Dann werden die Endmaße sofort aufeinander, bzw. auf die zur Messung benötigte Quarz- oder Stahlplatte gesetzt.

Bei allen Manipulationen sind die Endmaße niemals mit den Händen, sondern nur mit fettfreien Pinzetten anzufassen, um jeden Niederschlag von Feuchtigkeit (von den Händen oder durch Anathmen) zu vermeiden, falls es sich um Messungen höchster Genauigkeit handelt; evtl. sind noch Gummihandschuhe dabei anzuziehen.

Die Anschauungen über die das Haften bewirkenden Kräfte waren und sind geteilt. Ursprünglich nahm man an, daß reine trockene Endmaße nicht aneinander haften, sondern daß dies durch Molekularkräfte einer dünnen Zwischenschicht bewirkt wird, und empfahl deshalb, einen Tropfen Alkohol oder Petroläther auf den Meßflächen verdunsten zu lassen (10a, 11), wodurch sich nur eine Zwischenschicht von höchstens  $0,025 \mu$  bilden sollte (12); sie blieb so gut konstant, daß die Differenzen bei wiederholtem Ansprenge  $0,01 \mu$  nicht überstiegen (10a). Nach anderen Beobachtungen (1) sollten indessen verdunstende Flüssigkeiten nur sehr geringe Haftkräfte ausüben. Dasselbe gilt für viskose Öle, wie Vaseline- und Schmieröl, bei denen die Dicke der Zwischenschicht zu 10 bis  $15 m\mu$  ermittelt wurde (14a), während leicht flüssiges und Terpentinöl sich besser bewährt haben [Zwischenschicht  $5 m\mu$  (14a)].

Ebenso wurde auch empfohlen, die Endmaße nach dem Reinigen leicht über den Handrücken zu ziehen oder anzuhauchen, um auf diese Weise die nötige Flüssigkeits- oder kondensierte Dampfschicht zu erzeugen; ihre Dicke ist aber wesentlich größer als bei dem obigen Verfahren, nämlich zu  $0,075 \mu$  ermittelt (11). Diese Vorschriften erklären sich dadurch, daß zu jener Zeit nur Endmaße mit relativ grober Strichpolitur existierten; es ist ohne weiteres zuzugeben, daß sich nicht hochglanzpolierte Endmaße nach dem zuletzt geschilderten Verfahren leichter anschieben lassen, da dann die feinen, selbst unter stark vergrößerten Mikroskopen kaum sichtbaren Polierrisse ausgefüllt werden, was auch durch Versuche bestätigt wurde (14a).

Heute ist die Güte der Politur eine derartige, daß man, wie vorher erwähnt, die Endmaße nach dem Reinigen ohne jedwedes künstliches Zwischenmittel sofort ansprengen kann: dies ist auch nötig, um eine einwandfreie Maßdefinition zu ermöglichen. Damit ist allerdings noch nicht gesagt, daß nicht doch noch irgend eine (hydrodynamische) molekulare Zwischenschicht vorhanden ist, etwa eine adsorbierte verdichtete Schicht von Luft oder Wasserdampf, vielleicht auch von Kohlenwasserstoffen, da diese bekanntlich nur außerordentlich schwer, wenn überhaupt, zu entfernen ist. Einige Forscher stehen indessen auf dem Standpunkt (13), daß jene Zwischenschichten beim Ansprenge, also bei Maßen mit hochglanzpolierten Flächen, durch die auftretenden Molekularkräfte des Stahls in seine Poren verdrängt werden und somit das Haften durch jene verursacht wird; zum mindesten werden aber auch in diesem Falle die Molekularkräfte der Oberflächenschicht mitwirken. Stärkere Feuchtigkeitsschichten, wie sie bei hoher Luftfeuchtigkeit auftreten, und dickere Fettschichten, wie sie bei der Benutzung nicht völlig reinen Benzins oder unsauberer Putztücher entstehen, hindern dagegen das Ansprenge auf jeden Fall.

Für die entscheidende Rolle der Oberflächenschicht sprechen vor allem die Ergebnisse neuerer sehr sorgfältiger Versuche (14). Sie zeigten nämlich, daß, wenn das Reinigen mit vorher wiederholt mit Äther extrahierter und dadurch völlig entfetteter Watte, sonst aber in der gleichen Weise wie früher vorgenommen wird, auch Maße mit bester Hochglanzpolitur auf keine Weise angesprengt oder angeschoben werden können, während dies beim Gebrauch nicht extrahierter Watte sofort eintritt. Dasselbe zeigte sich, wenn die auf übliche Weise gereinigten Endmaße auf einige Stunden in ein Vakuum von etwa 10 mm Quecksilbersäule gesetzt wurden. Durch leichtes Andrücken der mit extrahierter Watte gereinigten Maße ließen sie sich der Quarzplatte so weit nähern, daß, wie sonst bei den angesprengten, alle Interferenzerscheinungen zwischen Endmaß und Platte verschwanden und sie auch das durch die verminderte Reflexion charakterisierte Aussehen der angesprengten Endmaße annahmen: beim Nachlassen des Drucks lösten sie sich aber sofort wieder ab; dieses Verhalten sei als „Aufsetzen“ bezeichnet.

Aus diesen Versuchen muß man notwendig den Schluß ziehen, daß beim Reinigen mit nicht extrahierter Watte noch irgend etwas (höchstwahrscheinlich Fett) auf die Meßfläche gebracht und dadurch eine molekulare Oberflächenschicht gebildet wird, (die im Vakuum verdunstet, und) die durch ihre Molekularkräfte das Haften bewirkt; sie vermag sehr wohl die beobachteten Kräfte zu übertragen, da sie erst durch einen Druck von  $7000 \text{ kg/cm}^2$  oder einen Zug von  $17 \text{ kg/cm}^2$  zerstört wird (8a, 10, 19). Erforderlich ist zum Ansprenge, daß sich eine zusammenhängende Schicht bildet und sie nicht etwa beim Reinigen zerrissen wird. Notwendig ist ferner, daß nur die Molekularkräfte jener Schicht auf die Oberfläche des Stahls, nicht aber diejenigen in Wirksamkeit treten, welche den Zusammenhang der Schicht selbst bewirken, daß also die Schicht höchstens molekulare Dicke an jeder Fläche hat. Darum ist auch bei größeren Unebenheiten oder dickeren Schichten kein einwandfreies Haften mehr zu erreichen [diese können das Maß um mehrere Zehntel  $\mu$  ändern (10a)].

Eine Erklärung für die Wirkung der molekularen Fettschicht bietet vielleicht die Vorstellung, daß die Haftkräfte durch dielektrische Polarisation oder auch durch eine Gleichrichtung der Moleküle (14a) in ihr entstehen (während zur Kaltschweißung — durch hohen Druck — eine so weitgehende Annäherung notwendig ist, daß die Raumgitter ausgetauscht werden). Bei dickeren Schichten tritt zwar auch jene Polarisation ein, sie bleibt aber auf die beiden anhaftenden molekularen Schichten beschränkt, während die mittleren Teile unbeeinflusst sind und dadurch, im Gegensatz zu jenen, bei Beanspruchung leicht zerrissen oder abgeschert werden können. Daraus würde folgen, daß die Zwischenschicht höchstens eine Dicke vom Doppelten des Halbmessers der molekularen Wirkungssphäre, also von etwa  $5 m\mu$  haben kann.

Für das Auftreten der Zwischenschicht sprechen auch die Versuche, daß sich ein Tropfen von Paraffinöl von  $5 \cdot 10^{-6} \text{ g}$  auf einer gut polierten Fläche bis zu einer Dicke von  $5 m\mu$  ausbreitet, ein Wert, der gleichfalls dem Halbmesser der molekularen Wirkungssphäre entspricht; bei weniger sorgfältig hergestellten Flächen beträgt die Dicke  $17 m\mu$ , da das Öl noch die feinen Polierrisse auszufüllen hat (9, 14a, 15). Auf guten Flächen erreichen Vaselin- und Schmieröl angenähert dieselben Werte (7 bis  $8 m\mu$ ), wenn auch der größeren Viskosität wegen erst nach längerer Zeit (10, 14a). Ebenso führten auch unmittelbare Messungen der Zwischenschicht zwischen 2 Endmaßen auf einen Wert von etwa derselben Größe (10, 13, 14a) (siehe aber Abschnitt C 4). Für die Zwischenschicht dürfte schließlich auch sprechen, daß der elektrische Widerstand einer Anspengstelle noch ebenso groß ist wie der einer Stahlstange gleichen Querschnitts von 10 cm Länge (5); allerdings hatte die Politur dabei noch nicht die heutige hohe Vollendung. Demnach dürfte es aber doch falsch sein, das Aneinanderhaften völlig oder zum überwiegenden Teil auf Kräfte des Kristallraumgitters des Werkstoffs zurückzuführen (4).

Da sich die molekulare Zwischenschicht bei der üblichen Reinigungsmethode stets von selbst bildet, soll man die Endmaße, wie oben ausgeführt, nach dem Reinigen ohne weitere Manipulationen ansprengen (nur bei guter Politur möglich) oder anschieben, da man bei aufgebrachtten Flüssigkeitstropfen, Fettschichten oder Anhauchen u. ä. die Menge nicht festlegen und damit zu unzulässig dicken (übermolekularen) Schichten kommen kann<sup>1</sup>. Das gilt aber nur für Präzisionsmessungen, vor allem nach dem Interferenzverfahren; im praktischen Betriebe, wo es sich um das Ansprenge an Meßflächen aus Stahl irgendwelcher Meßgeräte handelt, soll man zur Vermeidung der Beschädigungsgefahr für eine leichte Fettschicht sorgen, wofür sich Talg (Ziehen über den Handrücken) am besten bewährt hat, während sich sonstige tierische und mineralische Fette als gänzlich ungeeignet erwiesen haben. Legt man nicht hochglanz-

<sup>1</sup> Für den Einfluß verschiedener Fette, Reinigungsmittel usw. auf das Haften und die sich durch die Messung ergebende Länge sei auf die demnächst erscheinende Arbeit von E. Kaube (Diss. Techn. Hochsch. Dresden) verwiesen.

polierte Endmaße einfach aufeinander, so bleiben Luftpolster von etwa  $\frac{1}{4}$  bis  $1\frac{1}{2}\mu$  dazwischen, die bei zerkratzten Oberflächen bis auf  $3\mu$  anwachsen können (17). Da sich Endmaße auch noch ansprengen lassen, wenn sie bis zu  $0,3\mu$  konkav oder konvex sind, so erklärt sich auch die gelegentlich gemachte Beobachtung, daß die Endmaßkombination kleiner als die Summe der Einzelmaße ist (2).

### 3. Werkstoff und seine Behandlung.

An den für Endmaße geeigneten Werkstoff ist eine Reihe von Anforderungen zu stellen. Er muß homogen sein und vor allem geeignete Ausdehnung, also die des Stahls, haben, damit man bei den Messungen möglichst unabhängig von der Temperatur wird. Ferner muß er beständig sein, große Härte, hohen Widerstand gegen Abnutzung und Korrosion besitzen und sich schließlich auch noch gut bearbeiten und polieren lassen, da von letzterem die Dicke der Ansprengschicht abhängt. Diesen Anforderungen genügt anscheinend nur Stahl, und zwar im gehärteten Zustande: deshalb scheidet auch die nichtrostenden Stähle aus, da sie keine genügende Härte annehmen. Die gute Härtung erfordert einen Stahl von mindestens 0,9% Kohlenstoff. Dabei geht das sonst aus Perlit und Zementit bestehende Gefüge in den für den gehärteten Stahl charakteristischen Martensit über. Da dieser ein kleineres spezifisches Gewicht hat, so muß beim Härten stets eine Volumenzunahme eintreten<sup>1</sup>; Kohlenstoffstähle, die ihre Länge beim Härten nicht ändern, gibt es nicht (41). Die Anschauungen über die Natur des Martensits sind noch geteilt (18, 29); auf jeden Fall ist er aber ein metastabiles Gebilde, daß sich allmählich in ein stabiles umzuwandeln strebt (28); diese Gefügeänderungen sind mit Volumen- und somit auch mit Längenänderungen verbunden, für deren Größe auf S. 76 einige Zahlen gegeben werden. Sie lassen sich unter geeigneten Umständen durch die dabei auftretenden Wärmetönungen über einen Monat verfolgen (8, 39b), die im wesentlichen von innerer Arbeit herrühren (8, 8a, 8b), durch Beobachtung der elektrischen Leitfähigkeit sogar über 24 Jahre (2). Als zweite Ursache für die Änderungen sieht man die inneren Spannungen an, die sich beim Abschrecken infolge der verschieden schnellen Abkühlung der Rand- und der Kernschichten bilden. Diese können indessen nur elastische Spannungen sein, denn sobald sie die Elastizitätsgrenze überschreiten, erfolgt eine bleibende Deformation. Im Gleichgewichtszustande müßten sich also die elastischen Zug- und Druckspannungen gerade aufheben, und es läge somit kein Grund zu einer Änderung ihrer Größe und Verteilung vor. Nun ist aber die völlige Erreichung ihres Gleichgewichtes durch die innere Reibung behindert, es kann sich, wie bei zähen Flüssigkeiten, erst sehr allmählich einstellen; infolgedessen wird es durch jede äußere Störung, wie z. B. Temperaturschwankungen, beeinflußt, die die Größe der inneren Reibung ändern. Insofern kann also auch ein Ausgleich der inneren Spannungen im Laufe der Zeit eintreten, der zu Längenänderungen, und infolge anderer Verteilung vor allem zu einer Deformation der Flächen führt (10, 32a), was sich auch bei dünneren Endmaßen (bis zu etwa 5 mm Dicke) durch die beim Lagern auftretende Krümmung zeigt. Ferner begünstigen die inneren Spannungen auch die Umwandlung des beim Abschrecken noch zurückgebliebenen (Rest-) Austenits in Martensit, die gleichfalls mit Längenänderungen verbunden ist (21).

Die aus den angegebenen Ursachen eintretende zeitliche Änderung ist nun für die Meßtechnik untragbar; man muß deshalb sehen, ein möglichst bestän-

<sup>1</sup> Einige Zahlenangaben dafür bei (20a).

diges Gefüge, bzw. ein solches zu erhalten, dessen Änderungen nur von unmerklichen Längenänderungen begleitet werden, und ferner versuchen, die inneren Spannungen möglichst zu verringern. Ersteres erzielt man durch entsprechende Legierung, namentlich hat sich sonst ein geringer Chromzusatz gut bewährt (20a), da die sich dann bildenden Chromkarbide beständiger als das Eisenkarbid (der Zementit) sind (15c); indessen hängt die Längenänderung durchaus nicht allein vom Chromgehalt ab (10)<sup>1</sup>. Die chromhaltigen Stähle besitzen ferner den Vorteil, schon bei gelinderem Abschrecken (in Öl statt in Wasser) eine genügende Härte (20a, 54) und somit nur geringere innere Spannungen anzunehmen, so daß man auch die zweite aufgestellte Forderung damit erfüllt. Der Chromzusatz verringert ferner auch bei richtiger Gefügeausbildung die Korrosion und die Abnutzung, läßt aber im allgemeinen eine nicht so gute Politur zu (15c). Nun kommt es bei den für Endmaße (und Lehren) benutzten Stählen weniger darauf an, daß sie beim Härten keine Längenänderungen erleiden (das hätte nur einen sekundären Einfluß auf die inneren Spannungen), als vielmehr darauf, daß sie nachher möglichst beständig sind, und daß sie auch eine gute Politur annehmen, was von der chemischen Zusammensetzung, dem Gefüge und auch dem Sauerstoffgehalt abhängt (10a). Diese Gesichtspunkte sind für eine Kritik der nachstehend wiedergegebenen Stähle zu beachten, die im Auslande für Endmaße verwendet bzw. vorgeschlagen sind (Angaben der einzelnen Elemente in %):

Nr.	Autor	C	Cr	Mn	Si	Ni	W	P	S	Abschrecken	Lit.
1	Johansson	1,19	1,23	0,11	0,24	0,39		0,026	0,012	Von 850° durch Öl in Wasser	(23, 53a)
2	Johansson	1,26		0,21	0,24			0,028	0,024	Von 850° in Öl	(10, 22)
3	Bur. of Stand.	1,20	0,30	0,20				0,025	0,025		(35, 51)
4	" " "	bis1,50 1,00	bis0,40 1,00	bis0,30 0,25	0,15	max.		< 0,03	< 0,03		(23)
5	" " "	bis1,25 1,00	bis1,50 1,47	bis0,50 0,29	bis0,25 0,21	0,2					(10, 59)
6	In Amerika vorgeschla- gen: a)	0,85	0,00							Von 955°	(5)
	b)	bis1,10	bis 0,5								
	c)	1,10	1,40				0,5				
	d)	0,90	0,50	1,25							
	e)	0,99	1,47	0,35							
	f)	0,20		0,90						(10)	
	g)	bis0,30 0,85		bis1,10 1,50	0,10			< 0,020	< 0,020		(1)
	h)	bis0,95 0,85	0,40	bis1,75 1,00	bis0,20 0,10			< 0,020	< 0,020		
		bis0,95	bis0,55	bis1,20	bis0,20						(50)
7	Pratt und Whitney	1,41	0,35	0,40	0,20	0,13		0,017	0,018		(10)
8	Guillaume	1	7								(15b)
9	"	1,9	13								
10	"	2,4	14,4								
11	"	0,7	5,2				18,3				

<sup>1</sup> Durch geeignete Wahl des Verhältnisses des Kohlenstoff- zum Chromgehalt (z. B. 1,5 : 10%) läßt sich erreichen, daß beim Abschrecken keine Volumänderungen auftreten (15b) [während sich bei schwächerem Kohlenstoffgehalt eine Verringerung und bei stärkerem eine Vergrößerung des Volumens zeigt (20a)], und daß man auch eine geeignete Ausdehnung von  $11 \cdot 10^{-6}$  erhält (54).

Die Angabe für den von Johansson verwendeten Stahl Nr. 1 ist einer Analyse des Bureau of Standards entnommen; der Nickelgehalt dürfte versehentlich hineingekommen sein, da er die Korrosion nicht merklich verhindert. Nach anderen Untersuchungen (siehe Nr. 2) enthält dagegen jener Stahl kein Chrom. Der für das Bureau of Standards aufgeführte Stahl Nr. 3 soll angeblich von Johansson verwendet werden und wird ferner bei Pratt und Whitney verarbeitet (39), weist dort aber noch 0,13% Nickel auf (siehe Nr. 7). Später hat das Bureau of Standards den Stahl Nr. 4 als idealen empfohlen und führt auch laut Analyse Nr. 5 die von ihm selbst hergestellten Endmaße danach aus. Die in Amerika vorgeschlagenen Stähle Nr. 6d und e sind für Gewindelehren bestimmt; dabei ist Nr. 6e ein Einsatzstahl; nach den Versuchen des Bureau of Standards hat sich dagegen Einsatzhärtung nicht bewährt, vor allem wird der Stahl infolge seines weichen Kernes durch Druck leicht deformiert (1a). Bei dem Stahl Nr. 6f soll es möglich sein, die durch das Abschrecken von 955° bewirkte Längenänderung durch Anlassen auf 260° praktisch wieder rückgängig zu machen. Stahl Nr. 8 hat gehärtet und ungehärtet die Ausdehnung 11,0, Stahl Nr. 9 die Ausdehnung 10,5  $\mu$  auf 1 m und 1° C, Stahl Nr. 10 ist der Stahl CCR von Imphy, Stahl Nr. 11 ein Lufthärter. Die Mehrzahl der angeführten Stähle hat einen Kohlenstoffgehalt von etwa 1%<sup>1</sup>.

Die von deutschen Firmen für Endmaße verwendeten Stähle weisen folgende Zusammensetzungen in % auf (10)<sup>2</sup>:

Nr.	C	Cr	Mn	Si	Ni	W	P	S	Bemerkungen
I	0,96	0,00	0,30	0,31			0,022	0,022	Früher benutzt; jetzt wie Nr. II
II	1,03	0,00	0,32	0,17			0,031	0,024	
III	1,11	0,00	0,22	0,17	Spur		0,014	0,028	
IV	1,12	0,00	0,33	0,24			0,027	0,054	
V	1,25	0,00	0,33	0,22			0,031	0,060	
VI	1,30	0,18	0,33	0,25			0,023	0,054	
VII	1,07	1,11	0,25	0,12	0,30		0,022	0,018	
VIII	1,35	1,32	0,42	0,25			0,021	0,035	
IX	1,46	1,37	0,23	0,13			0,021	0,026	
X	1,20	2,25	0,22	0,28	0,35		0,017	0,021	

Da die Verunreinigungen von Schwefel und Phosphor innerhalb der üblichen Grenzen liegen und auch die Gehalte an Mangan und Silizium keine größeren Schwankungen aufweisen, können die Stähle in 4 Gruppen geteilt werden; Nr. I bis V ohne, Nr. VI mit sehr geringem, Nr. VII bis IX mit ausreichendem und Nr. X mit übermäßigem Chromzusatz. Der Kohlenstoffgehalt ist stets übereutektoid, geht aber wohl bei Nr. VI, VIII und IX etwas zu hoch. Der Nickelgehalt bei Nr. VII und X ist wohl ohne Bedeutung. Im übrigen entsprechen die Stähle in ihrer Zusammensetzung den im Auslande gebräuchlichen.

Wenig beachtet ist bis jetzt der Einfluß des Mangan- und des Siliziumgehaltes. Da beide die Härteribildung begünstigen (29a) und somit auch die Volumenänderungen beim Härten fördern, sollte man ihre prozentualen Mengen so gering als mit der Stahlherstellung verträglich halten. Versuche zeigten, daß die Instabilität hiermit zunahm (10); danach empfiehlt es sich, den Siliziumgehalt unter 0,15% und den Manganengehalt unter 0,20% zu halten, wie dies etwa von den Stählen Nr. III und IX erfüllt wird.

Im übrigen ist bei der Auswahl der Stähle nicht nur ihre chemische Zusammensetzung, sondern auch ihr Gefüge zu berücksichtigen. Ferner ist nicht nur auf ihre Beständigkeit, sondern auch auf gute Polierfähigkeit sowie großen Abnutzungs- und Korrosionswiderstand zu achten. Danach haben sich etwa folgende Stähle recht gut bewährt (10):

Stahl	C	Cr	Mn	Si	P	S	Abschrecken von
A	1,00		0,36	0,15	0,025	0,016	770° in Wasser
B	1,10	1,50	0,31	0,22	0,018	0,018	830° in Öl

<sup>1</sup> Angaben über die Vor- und Nachteile verschiedener Stähle, worüber die Ansichten noch sehr weit auseinandergehen, findet man bei (1a und 17).

<sup>2</sup> Auf der Werkstoffschau in Berlin (Oktober 1927) waren folgende Stähle für Lehren angegeben: a) 1,1% C; b) 0,9% C, 0,5 bis 1,5% W; c) 0,9% C, 1% Mn, 0,5% Cr; d) 1% C, 1% Cr, 1% Mn, 1,5% W; e) Einsatzstähle.

die etwa den Stählen Nr. 6a, I und II bzw. Nr. 4, 5 und VII entsprechen, und die sich vielleicht durch eine Erniedrigung des Mangan- und des Siliziumgehaltes noch verbessern ließen.

Ferner spielt auch die Form der Endmaße eine Rolle; nach (10) ist am günstigsten ein Zylinder mit an den Meßflächen stark abgerundeten Kanten, der sich dem zur Vermeidung innerer Spannungen idealen Fall der Kugel (19, 41) am weitesten nähert [der Einfluß der Form zeigt sich auch darin, daß sich Kugellageringringe bei der Alterung ganz anders verhalten als Endmaße (10)].

Daß die gehärteten Stähle nicht beständig sind, ist bereits 1888 von Pratt und Whitney beobachtet worden. Dabei sind die Längenänderungen sehr verschieden, so wurden früher solche von  $-5$  bis  $-22 \mu$  in 1 Jahre, von  $-39$  bis  $-64 \mu$  in 2 Jahren (33) und von  $-42$  bis  $-65 \mu$  in  $2\frac{1}{2}$  Jahren (52), von anderer Seite von  $-1,7$  bis  $-38,5 \mu$  in  $1\frac{1}{2}$  Jahren (25) beobachtet (alle Angaben auf 100 mm Länge umgerechnet); noch stärker waren die Änderungen, wenn die Endmaße größeren Temperaturschwankungen ausgesetzt waren. Dadurch erlebten die Benutzer recht unangenehme Enttäuschungen; selbst bei ausgesuchten Stahlsorten wurden noch Verkürzungen um 1 bis  $3 \mu$ , gelegentlich aber auch um  $12 \mu$  in 3 bis 5 Monaten, um  $20 \mu$  in 21 Monaten und bis  $34 \mu$  in  $2\frac{1}{2}$  Jahren bemerkt (10, 46, 50); dabei trat stets eine im Laufe der Zeit geringer werdende Zusammenziehung ein, während Lufthärter sich ausdehnten (42) [für eine ausführliche Zusammenstellung der Literatur siehe (10)]. Deshalb machte die Physikalisch-Technische Reichsanstalt früher auch bei ihren Prüfungen den Vorbehalt, daß die mitgeteilten Ergebnisse nicht für die Dauer verbürgt werden könnten, da Gegenstände aus gehärtetem Stahl noch längere Zeit nach ihrer Herstellung fortschreitenden Gestaltsänderungen unterworfen seien (52a).

Für die praktische Verwendung mußte man suchen, diese „natürliche Alterung“, also die Gefügeumwandlung und den Ausgleich der inneren Spannungen, die erst in 30 bis 40 Jahren ihr Ende erreicht haben würden (50) [in 24 Jahren haben sich 40% des Martensits in Perlit verwandelt (2)], durch eine geeignete Behandlung („künstliche Alterung“) vor der endgültigen Fertigstellung derart zu beschleunigen, daß die dann noch eintretenden Längenänderungen so gering bleiben, daß sie praktisch nicht mehr stören. Da nun die Gefügeumwandlungen bei höheren Temperaturen rascher verlaufen und gleichzeitig auch die innere Reibung verringert wird, sich also die Spannungen schneller dem wirklichen Gleichgewichtszustande nähern, so wird man die Endmaße vor der Fertigstellung einer entsprechenden Wärmebehandlung unterziehen. Eine einstündige Erwärmung auf  $100^{\circ}$  hat z. B. dieselbe Wirkung wie ein Lagernlassen bei Zimmer-temperatur innerhalb von 6 Monaten (42).

Zur vollständigen Überführung des Martensits in das stabile Gefüge braucht man Temperaturen von  $100$  bis  $400^{\circ}$ , wobei aber die Zeiten bei den tieferen Temperaturen für die Praxis zu groß werden (11). In Übereinstimmung damit werden deshalb von anderer Seite (34) Temperaturen von  $250$  bis  $300^{\circ}$  dafür angegeben. Ebenso sind auch zum völligen Ausgleich der inneren Spannungen höhere Temperaturen erwünscht, die erst bei  $600^{\circ}$  auf einen nicht mehr störenden Betrag (von  $1 \text{ kg/cm}^2$ ) zurückgehen (38). Bei den zur völligen Alterung nötigen Temperaturen tritt nun aber bereits eine nicht mehr zulässige Abnahme der Härte ein. Bei zweistündigem Anlassen macht sich die erste Härteabnahme bei  $130^{\circ}$  bemerkbar, während ein nennenswerter Abfall indessen erst bei  $260^{\circ}$  einsetzt. Bei einer Temperatur von  $180^{\circ}$  war eine Steigerung der Anlaßzeit über 4 Stunden hinaus ohne weiteren Einfluß auf die Härte (15, 20a). Nach neueren Versuchen (10) kann man bei fünf-stündigem Erhitzen auf die nachfolgenden Temperaturen etwa mit folgenden Härteabnahmen rechnen:

120	130	150	200	300 <sup>o</sup>
1,5	2	4	6	7 %

Bei den chromlegierten Stählen ist die Härteabnahme geringer.

Demnach ist man also zu einem Kompromiß gezwungen; man darf Anlaßtemperatur und -dauer nur so hoch wählen, daß die dabei bleibende Härte noch auf alle Fälle genügt, und muß die dann noch nicht beseitigten Gefügeänderungen und Spannungen mit in Kauf nehmen.

So hatten sich praktisch die folgenden Verfahren herausgebildet:

Zeit	Temperatur	Weitere Behandlung	Literatur
100 Stunden	100°		(15 a)
300—400 „	100°		(26)
10 „	150°		(25, 42)
12 „	150°	6 Monate lagern	
4 Wochen	150°	3 „ „	
100 Stunden	200°		(26)
	260°		(1)

Die zuletzt genannte Temperatur dürfte aber entschieden zu hoch sein, da dabei ein bereits merkbarer Härteabfall auftritt.

Neben dem Verfahren der reinen Temperaturerhöhung, die auch durch Wirbelströme erfolgen kann (10), sind noch andere im Gebrauch; so tauchten früher Pratt und Whitney 30mal abwechselnd in kochendes und in Eiswasser und ließen dann ablagern, das Bureau of Standards 80mal je etwa 5 Minuten lang in Öl von 200° und in Eiswasser (12); von anderen Seiten wurde auch intermittierende Erwärmung (1 $\alpha$ ), Eintauchen in Kohlendioxid oder in flüssige Luft, Ablagernlassen in einem vorbeifließenden Bach oder Einbringen in ein magnetisches Wechselfeld empfohlen<sup>1</sup> (56). Für das letztere Verfahren ist kein Grund einzusehen, es wirkt nur durch die dabei eintretende Erwärmung (25), während das davor genannte weiter nichts als eine natürliche Alterung darstellt. Die Wechselbäder wirken im allgemeinen allein durch die hohe Temperatur, während das kalte Bad nur eine Verzögerung bedeutet. Immerhin erreicht man durch 30 Wechsel einen Ausgleich, der bei natürlicher Alterung erst in einem Jahre auftreten würde (50). Bei einigen Werkstoffen hat sich indessen auch eine Wechselbäderbehandlung als günstig erwiesen (10). Das Eintauchen in flüssige Luft hätte nur den Vorteil, die Umwandlung des Rest-Austenits in Martensit zu befördern (21) [für eine eingehendere Literaturzusammenstellung siehe (10)].

Nach sehr eingehenden Untersuchungen von Weber (50) erreicht man in 20 bis 500 Stunden Erwärmen auf 100 bis 120° einen konstanten Zustand. Bei höheren Temperaturen wäre auch schon eine geringere Zeit dafür ausreichend (z. B. würden bei 150° 10 Stunden genügen), da hier die Umwandlungen und Spannungsausgleiche rascher erfolgen, doch setzen dann unter Umständen weitere nicht gewünschte Änderungen ein. Deshalb empfiehlt er 25 Stunden Anlassen auf 120°, wodurch die Härte nur um 4 bis 6% abnimmt. Ergänzt werden diese Ergebnisse durch Beobachtungen von Cahn (10), aus denen sich als am günstigsten eine fünf- bis achtstündige Erwärmung auf 120° bei Kohlenstoffstählen und auf 150° bei chromhaltigen Stählen ergeben hat, während bei längeren Zeiten bereits wieder unerwünschte Längenänderungen auftreten können. Erhitzungstemperatur und -dauer sind also bis zum gewissen Grade durch die Stahlsorte bedingt; die kleinsten Längenänderungen ergaben sich bei etwa 1% Kohlenstoff und 1,5% Chrom (wie bereits auf S. 75 erwähnt).

Eine Bestätigung dieser Ergebnisse liefern neuere metallographische Untersuchungen (5 a, 20, 29 b, 49 a, 48, 49), wonach durch 14stündiges Erhitzen auf 95 bis 100° der Martensit sich unter Zusammenziehung (von maximal 0,12% beim eutektoiden Kohlenstoffgehalt) in eine andere Modifikation ( $\zeta$ -Eisen nach Hahnemann,  $\alpha$ -Martensit nach Honda) umwandelt, der sich durch seine beim Ätzen dunkel werdenden Nadeln (gegenüber den hellen des gewöhnlichen Martensits) unterscheidet. Jener soll dann weiteren Erwärmungen bis 200° gegenüber beständig sein. Nun ist nach dem Abschrecken neben dem Martensit<sup>2</sup>, wie erwähnt, immer noch Austenit ( $\gamma$ -Eisen) vorhanden, seine Umwandlung in das  $\zeta$ -Eisen erfolgt erst bei 235° (20) bis 260° (1, 42, 48) und zwar unter Ausdehnung, während der Zerfall des  $\zeta$ -Eisens in Ferrit + Perlit bzw. Zementit + Perlit (unter Kontraktion) erst bei 275 bis 300° einsetzt [diese Umwandlungen sind auch durch magnetische Versuche bestätigt (10 b), wenn ihnen auch teilweise eine andere Deutung gegeben ist (20 b, 28 a)]. Mit jeder Umwandlung ist auch eine

<sup>1</sup> Unabhängig davon ist ein magnetisches Wechselfeld notwendig zum Entmagnetisieren der beim Aufspannen auf die magnetischen Spannplatten der Schleifmaschinen magnetisch gewordenen Endmaße, da sie sonst kleine Stahlteilchen anziehen, die die Meßflächen beim Anspannen zerkratzen.

<sup>2</sup> Dabei findet sich der  $\alpha$ -Martensit in den äußeren Schichten, der gewöhnliche im Kern (21 a).

Änderung des Ausdehnungskoeffizienten verbunden [er erreicht ein Maximum nach 10stündigem Anlassen bei  $100^{\circ}$  (15b)].

Aus den mitgeteilten Untersuchungen kann man den Schluß ziehen, daß sich ein etwa 5- bis 10stündiges Anlassen auf  $120$  bis  $150^{\circ}$  als künstliche Alterung empfiehlt, da dann die inneren Spannungen zum größten Teil ausgeglichen sind und die Gefügeumwandlung des gewöhnlichen Martensits beendet ist. Das Gefüge eines richtig gealterten Stahls weist fein verteilten Martensit oder kugliges Karbid in einer feinkörnigen perlitischen Grundmasse auf (10). Die Versuche zeigten ferner, daß die bei der künstlichen Alterung auftretenden Längenänderungen ungefähr proportional der Länge [doch traten auch gelegentliche Ausnahmen auf (32a)] und bei völlig durchgehärteten Stücken unabhängig vom Querschnitt sind.

Eine absolute Gewähr für die Beständigkeit der Endmaße ist indessen auch durch eine künstliche Alterung noch nicht gegeben, weshalb sich eine von Zeit zu Zeit zu wiederholende Neubestimmung ihrer Länge empfiehlt, was auch der Abnutzung wegen nötig ist.

So wurden an einem nur wenig benutzten künstlich gealterten älteren Satz Verkürzungen von  $0,6 \mu$  in 1 Jahr und von  $2,0 \mu$  in 6 Jahren (auf 100 mm Länge) beobachtet, die proportional der Länge waren und mit der Zeit anscheinend asymptotisch verliefen (3), in einem anderen Falle sogar von  $6 \mu$  auf 100 mm in 10 Jahren. Im Bureau of Standards sind früher in einem Jahr Änderungen von  $-5$  bis  $+5 \mu$  auf 100 mm beobachtet (34), die im allgemeinen auch mit der Zeit exponentiell abnahmen. Dagegen ließen sich an einem Endmaßsatz aus neuerer Zeit nach 7 Monaten keine die Beobachtungsfehler übersteigenden Längenänderungen feststellen (4), während von anderer Seite (32 a, 33 a) Verlängerungen um  $0,6$  bis  $1,2 \mu$  in 4 bis 5 Jahren beobachtet sind, die dann gleichfalls geringer wurden. Nach absichtlich herbeigeführten Temperaturschwankungen zwischen  $0$  und  $50^{\circ}$  zeigten sich Änderungen von  $0,00$  bis  $0,61 \mu$  (bei Hartmetall von  $0,39 \mu$ ). Bei guten Stählen, die jeweils in der für sie günstigsten Weise künstlich gealtert waren, beliefen sich die Änderungen auf höchstens  $0,01 \mu$  (10).

Das verschiedene Vorzeichen der Längenänderungen soll von der Art der Durchhärtung abhängen, indem Stücke mit martensitisch-troostitischem Gefüge eine Verkürzung, solche mit troostitisch-sorbitischem eine Verlängerung erleiden (27).

Bei dieser Sachlage ist es verständlich, daß man nach einem für die Endmaße besser geeigneten Stoff, bzw. nach einem anderen Härungsverfahren gesucht hat.

Bei langen Endmaßen geht man so vor, daß man nur die Enden auf 3 bis 6 mm härtet (53), da sich der ungehärtete Stahl als sehr beständig erwiesen hat. Allerdings besteht die Gefahr, daß sich der weiche Stahl leicht verbiegt. Eine für die Endhärtung geeignete Vorrichtung ist in Abb. 48 wiedergegeben (6, 32, 43, 60). Das Endmaß taucht mit einem angeklebten Stahlstab in Quecksilber, das zur Stromzuführung dient. Oben wird auf das Endmaß ein Graphitblock nach Zwischenlegung von Zinnfolie aufgedrückt, darauf liegen lose weitere Graphitplatten, auf die sich die obere Elektrode legt. Beim Stromdurchgang (700 Amp. auf 1 bis 2 Min.) gerät das dünne mittlere

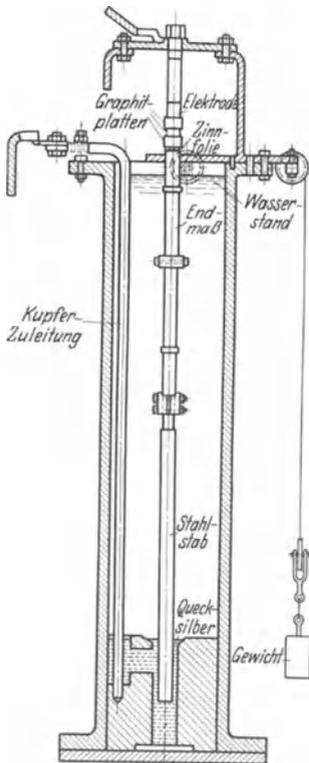


Abb. 48. Vorrichtung zum Härten langer Endmaße an den Enden.

Graphitstück in Glut und erhitzt dadurch das obere Stabende. Sobald dieses die Härtungstemperatur erreicht hat, wird das Gewicht gelüftet, das bisher das Endmaß gegen die obere Elektrode gedrückt hat, und dieses fällt in das ihn umgebende Wasserbad. Das geschilderte Verfahren ist aber nur für längere Endmaße geeignet.

Nach den bisherigen Erfahrungen haben sich auch nitrierte Endmaße in bezug auf ihre Beständigkeit gut bewährt (10), bei denen gleichfalls nur die Meßflächen gehärtet sind.

Dies geschieht hier durch Glühen (bestimmter legierter Stähle) in Ammoniak bei etwa 500°, wobei sich eine sehr harte aus Eisennitriden bestehende Schicht bildet (14a). Der Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, daß ein Abschrecken nicht nötig ist, und daß infolgedessen spannungsfreie Stücke auch keine Deformationen erleiden, sondern nur eine Dickenänderung bis etwa 20  $\mu$  (bei  $\frac{1}{2}$  bis 1 mm starken Nitrierschichten) auftritt (14). Die Brinellhärte nitrierter Schichten ist um 6 bis 15% größer als die im Einsatz zementierter (16) und beträgt über 900 (14b). Sie lassen sich aber leider nicht so gut polieren wie die sonst verwendeten gehärteten Stähle (10), auch ist ihr Korrosionswiderstand geringer (16a).

Sehr harte Schichten (Härte etwa gleich der des Korunds) liefert ferner galvanisch niedergeschlagenes Chrom, das auch einen außerordentlich hohen Korrosionswiderstand aufweist (7, 36). Das gilt aber nur, wenn die Chromschicht völlig porenfrei ist, weshalb man den Stahl vorher (verkupfern und) vernickeln soll; von anderer Seite wird jedoch unmittelbare Verchromung vorgezogen. Bisher war es indessen nur schwer möglich, genügend dicke festhaftende Schichten zu erhalten, die nicht bei der Endbearbeitung des Maßpolierens abblätterten. Ferner geben auch die Chromschichten nicht eine so gute Politur wie ausgewählte gehärtete Stähle, zeigen aber einen 5mal größeren Verschleißwiderstand (13).

Eine weitere Möglichkeit zur Erzielung harter Meßflächen beruht auf dem Aufschmelzen von Stellite (einer Legierung von 60 bis 75% Kobalt, 15 bis 20% Chrom und 2,5 bis 5% Wolfram), Akrit (ähnliche Zusammensetzung) oder entsprechender Hartmetalle. Kleinere Endmaße hat man auch völlig daraus hergestellt. Stellite hat eine außerordentlich große Härte (so daß es nur durch Schleifen bearbeitet werden kann), gegenüber gehärteten Stählen etwa 3mal kleinere Abnutzung und größeren Korrosionswiderstand (13, 24). Seine Ausdehnung beträgt, je nach der Zusammensetzung, zwischen 10,8 und  $15,6 \cdot 10^{-6}$  (45), so daß sich eine geeignete Legierung mit der Ausdehnung  $11,5 \cdot 10^{-6}$  leicht finden läßt. Störend sind die häufig auftretenden Poren, ferner ist Stellite nicht frei von Gußspannungen, so daß sich kleinere Endmaße daraus recht beträchtlich deformieren (3). Auch bei Endmaßen mit aufgeschweißten Hartmetallflächen hat sich gezeigt, daß sie nicht unveränderlich bleiben (10), so daß sie für genaue Messungen nicht in Frage kommen (was indessen ihre Verwendung für andere Zwecke nicht ausschließt, zumal sie auch eine gute Politur annehmen). Da sich Stellite weder stempeln, noch sauber ätzen läßt, müssen alle Bezeichnungen mit dem Sandstrahlgebläse aufgebracht werden.

Frei von allen bisher betrachteten Übelständen ist der kristallisierte Quarz, der ja als Kristall keine selbsttätigen Änderungen mehr erleidet. Die gewünschte Ausdehnung erhält man, wenn man das Endmaß so herauschneidet, daß seine Achse mit der Kristallachse einen Winkel von  $40\frac{1}{2}^\circ$  bildet (5). Bei Temperaturänderungen bleiben indessen die Meßflächen nicht eben; die Deformationen betragen für 1° C bei 100 mm Länge  $\pm 0,1 \mu$  und bei 10 mm Länge immer noch  $\pm 0,02 \mu$ , so daß diese Endmaße nur bei einer von 20° wenig abweichenden Temperatur hergestellt und gebraucht werden können. Besser legt man deshalb die Meßfläche senkrecht zur Kristallachse und berücksichtigt die Verschiedenheit der Ausdehnung von Quarz und Stahl. Da diese nur  $2,7 \cdot 10^{-6}$  ausmacht, so bewirkt sie für Maße von 10 mm Länge bei Meßtemperaturen von 15 bis 25° nur Abweichungen von  $\pm 0,14 \mu$ , die fast stets vernachlässigt werden können. Dasselbe gilt hinsichtlich der noch kleineren Unterschiede der Ausdehnungen der verschiedenen Quarzkristalle (9). Da der kristallisierte Quarz spannungsfrei ist, verziehen sich auch daraus hergestellte dünne Endmaße (im Gegensatz zu solchen aus Stahl) nicht (3), sie eignen sich deshalb sehr gut zu Prototypen für Unterteile des Meters (33b).

Geschmolzener Quarz kommt seiner völlig abweichenden Ausdehnung und seiner inneren Spannungen wegen nicht in Frage. Dagegen wäre gut gekühltes spannungsfreies Glas mit einer Ausdehnung von  $11,5 \cdot 10^{-6}$  zu verwenden, wie dies auch gelegentlich für kleinere Endmaße bis etwa 25 mm Länge geschieht. Glas hatte schon Steinheil (47), und zwar für 1 m lange Endmaße genommen; sie endeten in Kugelkalotten, an welche ebene Flächen von etwa 7 mm Durchmesser angeschliffen waren. Quarz und Glas haben auch den Vorteil, daß man ihrer Durchsichtigkeit wegen sehen kann, ob sich zwei Stücke gut aneinander angesprengt haben oder nicht. Für die Werkstatt werden aber Endmaße aus Quarz oder Glas ihrer größeren Zerbrechlichkeit, ihrer schlechten Wärmeleitfähigkeit und ihres höheren Preises wegen ausgeschlossen bleiben, zumal auch Quarz empfindlich gegen den Angriff von Alkalien ist, so daß sie nur für Sonderzwecke im Laboratorium in Frage kommen.

Welcher Werkstoff der Abnutzung den größten Widerstand entgegengesetzt, läßt sich nur schwer allgemein gültig angeben, da die vorkommenden Verhältnisse zu verschiedenartig sind (z. B. die Meßflächen trocken oder eingefettet); bei unsauberen Werkstücken muß man auch mit der Wirkung von Stahlspänen, Schmirgel usw. rechnen. Dieser letztere Fall, der eigentlich einer Prüfung auf Bearbeitbarkeit entspricht, und für den sich die Stahlsorte als ziemlich gleich-

gültig erwiesen hat (13, 31), kann bei den Endmaßen ausgeschlossen werden. Im übrigen muß man bedenken, daß der Abnutzungswiderstand nicht nur mit der Härte, sondern auch mit der Zähigkeit wächst, wodurch sich erklärt, daß weichere Werkstücke eine geringere Abnutzung zeigen können als härtere. Bekannt ist ja, daß sich gerade in den weicheren Werkstoff kleine abgerissene Späne, mineralische Staubteilchen usw. leicht einbetten, der dadurch als Schleifscheibe auf den härteren wirkt (siehe auch 1 a).

Über die Abnutzung von Parallelendmaßen liegen leider nur wenige Angaben vor. Durch 100maliges Ansprengegen war weder bei solchen aus Kohlenstoff-Chromstahl, noch bei nitrierten Endmaßen eine die Meßfehler (von  $0,05 \mu$ ) übersteigende Abnutzung zu bemerken. Bei 180maligem Zusammensetzen von 22 Flächen ergab sich eine Abnutzung von  $0,75 \mu$  für die Kombination, also je Fläche und Ansprengegen von  $0,2 m\mu$  (31), nach anderen Versuchen (39 a) gleichfalls nur von  $0,15$  bis  $0,25 m\mu$ . Aus den dabei gemachten Erfahrungen kann geschlossen werden, daß es sich bei sachgemäßer Benutzung von Endmaßen gar nicht um eine eigentliche Abnutzung, sondern mehr um ein Glätten der ganz feinen Unebenheiten handelt. Deshalb beobachtet man nach den ersten Ansprengegenen zwar eine geringe Abnahme der Länge, während weiterhin das Maß praktisch konstant bleibt, da die Verringerung durch das Glätten asymptotisch abnimmt. Diese erste Glättung erfolgt nun bereits bei dem Hersteller durch die Kontrolle des Maßes, so daß der Benutzer hierunter im allgemeinen nicht mehr zu leiden hat.

Im übrigen lassen sich Schlüsse auf das für Endmaße in bezug auf Abnutzung geeignete Material aus Versuchen an Rachenlehren und Lehdornen ziehen. Bei ersteren wurde so verfahren, daß sie über eine sich langsam drehende Welle hin- und hergeschoben wurden. Dabei ergaben sich folgende Verhältnisse:

Versuchsreihe	Welle	Auflagedruck	Zahl der Verschiebungen	Werkstoff		Lit.
				Stellit	Stahl	
I	gehärtet	$\frac{1}{2}$ Eigengewicht	300000	600000	$2,5 \mu$	$4 \mu$
		1,25 kg	200000			
		2,5 „	100000			
	ungehärtet	1,25 „	200000		$4,5 \mu$	$5,5 \mu$
II	gehärtet	$\frac{1}{2}$ Eigengewicht	500000	500000	0	0
		2 kg	500000		$11,5 \mu$	$30,5 \mu$
	ungehärtet	$\frac{1}{2}$ Eigengewicht	500000	500000	0	0
		1 kg	500000		$5,5 \mu$	4
	Schmirgelscheibe	$\frac{1}{2}$ Eigengewicht	25000		8	$\sim 110$

Danach ist also bei geringem Druck zwischen Stellit und Stahl kein die Meßfehler (von etwa  $\pm 0,5 \mu$ ) übersteigender Unterschied in bezug auf die Lebensdauer zu erkennen. Bei kräftiger Reibung ist die Abnutzung auf gehärteten Wellen für Stahl etwa doppelt so groß als für Stellit, auf ungehärteten Werkstücken dagegen für beide praktisch einander gleich. Weiterhin lehren die Versuche mit der Schmirgelscheibe, daß der Bearbeitungswiderstand des Stellits etwa 15mal höher als der des Stahls ist. Im übrigen verlief die Abnutzung durchweg recht gut proportional der Anzahl der Verschiebungen.

Für Lehdorne hat sich ergeben, daß eine Abnutzung um  $2,54 \mu$  nach Lehrgang der folgenden Zahl von Löchern eintrat (59):

Werkstoff der Lehren	Durchmesser	
	0,75''	0,375''
Stahl mit 1,1% C . . . . .	3870	1970
„ „ 1,0% C; 1,4% Cr . . . . .	2870	850

Noch stärker war die Überlegenheit des Kohlenstoffstahls gegenüber Schnellstahl (der eine etwa 5mal stärkere Abnutzung aufwies). Bei Reibung von Metall auf Metall hatten feilweiche Stähle einen zwei- bis dreimal größeren Abnutzungswiderstand als im feilharten Zustande; zwischen verschiedenen Stahlsorten waren die Unterschiede nur gering, auch bei Gegenwart von Schleifmitteln. Trotzdem empfehlen sich feilweiche Lehren nicht, da sie leicht beschädigt und deformiert werden; in Sonderfällen soll Gußeisen ein guter Ersatz sein (1b).

Die geringste Abnutzung zeigten Chrom- und Nitrierschichten (13); so wiesen verchromte Lehren bei gleitender Reibung ohne Schleifmittel einen 5mal, nach anderen Angaben 2- bis 25mal, mit Schmirgel einen um 30 bis 50% höheren Abnutzungswiderstand auf als gehärteter Stahl (7, 13, 37). Ferner wurden die Kosten noch dadurch verringert, daß die abgenutzten Lehren nur abgeschliffen und neu verchromt zu werden brauchten. Im allgemeinen ist die Abnutzung bei Paarung mit Werkstücken aus Gußeisen am größten (13).

Nun ist aber zu beachten, daß in demselben Maße wie der Abnutzungswiderstand steigt, auch die Bearbeitung schwieriger wird und dementsprechend sich der Preis erhöht. Bei der Prüfung ungehärteter Werkstücke wird es deshalb keinen Zweck haben, für Lehren und Endmaße Stellit zu verwenden. Da ferner für Endmaße der Abnutzungswiderstand stets ausreichend ist, wird man hier den Werkstoff in erster Linie unter dem Gesichtspunkt der Beständigkeit auswählen.

Schließlich ist auch noch der Widerstand der Werkstoffe gegen den Angriff durch feuchte Luft, Hautschweiß und in der Werkstatt auch durch Seifenwasser zu beachten. Gegenüber der Luftfeuchtigkeit und dem Hautschweiß, der eine sehr starke Korrosionswirkung ausüben kann, verhalten sich die einzelnen Stähle sehr verschieden, und sind die chromhaltigen Stähle durchaus nicht immer die widerstandsfähigsten; es kommt dabei auch auf das Gefüge an. Seifenwasser übt eine sehr geringe Wirkung aus, kann aber die Politur der Meßflächen trotzdem erheblich beschädigen. Am besten hat sich in bezug auf den Korrosionswiderstand ein Stahl mit etwa 1,5% Chrom (siehe S. 75) erwiesen (10).

Ferner ist selbstverständlich darauf zu achten, daß das zum Schutz verwendete Fett wirklich säurefrei ist, und daß zur Behandlung des Holzes der Aufbewahrungskästen nur Stoffe verwendet werden, die auf die Meßflächen nicht korrodierend einwirken.

Die Herstellung der Endmaße erfolgt vielfach noch von Hand durch Abziehen auf einer gut eben bearbeiteten Gußplatte. Da hierbei die Innehaltung des Mittenmaßes bis auf etwa  $0,1\mu$  und auch der Ebenheit und Parallelität der Meßflächen bis auf etwa den gleichen Betrag gefordert wird (Näheres siehe S. 96), so ist bei diesem Verfahren eine außerordentliche Handfertigkeit des Arbeiters nötig. Man ist deshalb an verschiedenen Stellen zur maschinellen Fertigung übergegangen und hat damit sehr gute Erfolge erzielt. Am ausführllichsten ist das bei Pratt und Whitney angewandte Verfahren bekannt (39). Die Vorrichtung zum Maßpolieren (to lap) besteht aus 2 Scheiben aus Grauguß, die möglichst gut eben geschliffen sind, von denen die untere feststeht, die obere sich frei bewegen, aber nicht drehen kann. Zwischen beide werden die auf 25 bis  $30\mu$  vorgeschliffenen Endmaße gelegt. Um ihnen eine Bewegung erteilen zu können, befinden sie sich in einer Art Käfig, einer Scheibe mit 24 Löchern, deren jedes ein Endmaß lose aufnimmt; der Scheibe wird eine Art Planetenbewegung erteilt. Das Schleifen erfolgt mit Türkischrot.

Beim ersten Maßpolieren wird es nicht möglich sein, die oberen Flächen der Endmaße parallel zu ihren unteren zu erhalten. Es wird deshalb nach einer gewissen Zeit jedes Maß in das am anderen Ende des betreffenden Durchmesser befindliche Loch gebracht und dieses Verfahren wiederholt (gelegentlich auch durch Versetzen um  $90^\circ$ ) durchgeführt. So erreicht man allmählich, daß die obere Gußplatte sich parallel zur unteren stellt und damit auch die Meßflächen genau parallel zueinander werden. Nachdem dies erzielt ist, wird die Länge der Endmaße festgestellt. Man weiß dann erfahrungsgemäß, wie lange die Maschine noch laufen muß, um den überschießenden Betrag abzarbeiten<sup>1</sup>.

Das Verfahren ist aber nur für kürzere Endmaße geeignet, da längere bei der Bewegung kippen würden. Zur Herstellung dieser empfiehlt sich das nachfolgende, im National Physical Laboratory ausgearbeitete Verfahren (30, 32, 44). Ein Stab (Abb. 49) wird in 2 Fassungen *R* und *S* aufgenommen, die auf einer gemeinsamen Grundplatte an der Wand befestigt sind, und in diesen justiert, bis eine an seiner sauber geschliffenen Mantelfläche angebrachte empfindliche Libelle *D* einspielt. Dann steht die Stabachse genau senkrecht. Darauf wird der Block *E* und die auf seiner Ringfläche *F* aufliegende Planparallelplatte *G* mittels einer zweiten Libelle so justiert, daß ihre Flächen genau wagerecht zu liegen kommen; *G* kann auf dem Ring *F* in ihrer eigenen Ebene gedreht werden. Darauf kommt der eigentliche, gleichfalls planparallele Schleifblock *H*. Durch Drehen von *G* und *H* wird die untere Fläche des Endmaßes eben und senkrecht zur Stabachse maßpoliert. Ebenso wird die zweite Fläche nach Umdrehen des Stabes hergestellt.

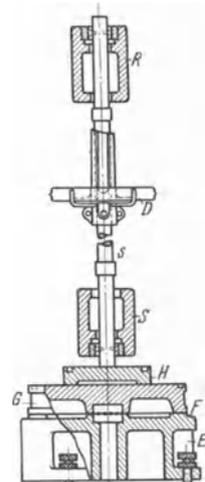


Abb. 49. Herstellung langer Endmaße.

<sup>1</sup> Für ein ähnliches Verfahren des National Physical Laboratory siehe (30, 44, 55, 58).

### 4. Endmaßsätze.

Für die Endmaße hat sich im Laufe der Zeit fast allgemein der rechteckige Querschnitt von  $9 \times 30 \text{ mm}^2$  bis  $10 \text{ mm}$  Länge und von  $9 \times 35$  für größere Maße herausgebildet. Da es zunächst das Bestreben sein mußte, jedes gewünschte Maß aus möglichst wenigen Stücken zusammensetzen zu können, um von den zu befürchtenden Maßschwankungen beim Anspannen oder Anschieben nach Mög-

lichkeit unabhängig zu werden, so ordnet man die Endmaße etwa in Sätzen (I) mit dezimaler Abstufung an (Abb. 50)<sup>1</sup>:



Abb. 50. Rechteckige Endmaße.

1,001	1,002	....	1,009	mm	}	(I)
1,01	1,02	....	1,09	„		
1,1	1,2	....	1,9	„		
1	2	....	9	„		
10	20	....	90	„		
100				„		

Fehlt der Tausendstel-Satz, so gibt man wohl noch das Maß  $1,005$  zu, um halbe Hundertstel  $\text{mm}$  messen zu können, gelegentlich auch noch ein Endmaß  $0,5 \text{ mm}$ . Es wäre wohl möglich, einen Satz

$0,1 \quad 0,2 \quad \dots \quad 0,9 \text{ mm}$

anzufertigen, doch bietet sowohl die Herstellung wie auch das Anspannen so dünner Endmaße größere Schwierigkeiten. Sie kommen im übrigen nur für die Feinmechanik und die Uhrmacherei in Frage, wo man unter Umständen noch Abstufung in  $\frac{1}{100} \text{ mm}$  vornehmen wird.

Je nach dem Zweck und den zur Verfügung stehenden Mitteln werden auch andere Anordnungen gewählt, z. B. (II):

:	1,001	1,002		....	1,009	mm	}	(II)	
	1,01	1,02		....	1,49	„			
	1,0	1,5	2,0	2,5	....	25			„
	50	75	100						„

Braucht man z. B. das Maß  $76,783 \text{ mm}$ , so geht man zur Wahl der zu seiner Zusammensetzung benötigten Einzelmaße am besten subtraktiv vor, indem man jedesmal versucht, die zuletzt auftretende Dezimalstelle zum Verschwinden zu bringen, wobei immer nur ein Endmaß aus jeder Dezimalreihe benutzt wird, um mit einer möglichst kleinen Zahl auszukommen. Das Verfahren unter Benutzung der beiden Sätze I und II ist nachstehend wiedergegeben:

Satz I	Satz II
76,783	76,783
1,003	1,003
-----	-----
75,78	75,78
1,08	1,28
-----	-----
74,7	74,5
1,7	24,5
-----	-----
73	50
3	
-----	
70	

<sup>1</sup> Gelegentlich findet man auch feinere Abstufungen, z. B. nach  $0,5$  und  $0,25 \mu$ ; Johanson soll sogar einen Satz in der Abstufung  $0,025 \mu$  hergestellt haben (siehe dazu S. 154) (I).

Demnach benutzt man die folgenden Maße:

Satz I	Satz II
70	
3	50
1,7	24,5
1,08	1,28
<u>1,003</u>	<u>1,003</u>
76,783	76,783

In diesem Falle bietet der Satz II den Vorteil, mit nur 4 Stücken gegenüber 5 Maßen bei Satz I auskommen zu können. Von 2 mm ab kann man in beiden Fällen in Stufen von je 1  $\mu$  bis 200 mm fortschreiten, hat also in dem Satz nahezu 200000 um je 1  $\mu$  abgestufte Maße.

Zur Erreichung des Maßes 40,997 mm müßte man bei Satz I folgendermaßen vorgehen:

40,997
<u>1,007</u>
39,99
<u>1,09</u>
38,9
<u>1,9</u>
37
<u>7</u>
30

Man würde also 5 Maße benötigen. Diese Zahl läßt sich aber verringern, wenn man noch über einen Ergänzungssatz

$$1, 1 - 0,001, 1 - 0,002 \dots 1 - 0,009 \text{ mm}$$

$$1 - 0,01, 1 - 0,02 \dots 1 - 0,09 \text{ ,,}$$

verfügt. In dem obigen Beispiel brauchte man dann nur die 2 Maße 40 und (1-0,003) mm. Besondere Vorteile bieten diese Minussätze noch bei der Bestimmung kleiner Maße, die gegenüber einem runden Wert ein Untermaß von nur wenigen  $\frac{1}{100}$  oder  $\frac{1}{1000}$  mm haben.

Vielfach ist es bei dem Satz II auch möglich, ein bestimmtes Maß mit der gleichen Zahl von Stücken auf mehrfache Weise zusammenzustellen; so läßt sich z. B. das Maß 63,71 mm wie folgt erhalten:

50	50	50	50	25
11,5	11,5	11,0	10,5	24,5
1,2	1,0	1,5	2,0	13,0
<u>1,01</u>	<u>1,21</u>	<u>1,21</u>	<u>1,21</u>	<u>1,21</u>
63,71	63,71	63,71	63,71	63,71

Des hohen Preises der Endmaße wegen wird man gelegentlich auch darauf sehen, mit einer möglichst geringen Zahl von Endmaßen im Satz auszukommen, wie man dies z. B. bei Gewichtsstücken macht. Bei diesen findet man innerhalb jeder Zehnerreihe in der Regel die Maße:

a) 1 2 2 5,

gelegentlich auch

b) 1 2 3 5.

Am vorteilhaftesten ist indessen die Anordnung

c) 1 2 4 7 (2).

Die anderen Maße werden daraus wie folgt erhalten:

Gewünschtes Maß:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
bei a) aus . . .	1	2	2+1	2+2	5	5+1	5+2	5+2+1	5+2+2
„ b) „ . . .	1	2	3	3+1	5	5+1	5+2	5+3	5+3+1
„ c) „ . . .	1	2	2+1	4	4+1	4+2	7	7+1	7+2

Bei der Anordnung c) kommt man also in jeder Zehnerreihe mit stets 2 Maßen aus, wobei nur der erste oder zweite Block jeder Reihe mit zu Hilfe genommen werden muß. Für die Zusammensetzung eines beliebigen Maßes kann aber dadurch die Zahl der benötigten Stücke im ungünstigsten Falle von 5 auf 10 Einzelmaße steigen.

Für Zollmaße werden entsprechende Abstufungen wie bei den metrischen Endmaßen gewählt.

Neben den rechteckigen Endmaßen sind auch solche mit kreisförmigem Querschnitt (sogenannte zylindrische Endmaße) im Gebrauch. Sie erhalten meist einen Durchmesser von 20 mm (unter 100 mm Länge auch wohl nur 14 mm). An den Enden werden sie in der Regel kegelig auf einen Durchmesser von 9 mm abgesetzt (Abb. 51). Sie werden in Stufen von 10 oder gar 25 mm geliefert, während man für die kleineren Maße die rechteckigen zu Hilfe nimmt. Diese zylindrischen Endmaße werden auch vielfach zum Einstellen von Meßmaschinen benutzt, deren Spindeln einen Meßbereich von 25 mm (gelegentlich auch von 10 mm) haben. Da hierbei aber die Schraubenfehler der Mikrometer mit in die Messung eingehen, ist man heute von der Verwendung jener Endmaße abgekommen und wählt vielmehr das Vergleichsmaß möglichst so, daß es dem zu prüfenden auf wenige  $\frac{1}{100}$  mm nahekommt, da innerhalb dieser kleinen Strecken die Schraubenfehler zu vernachlässigen sind.

Da sich ferner die zylindrischen Endmaße auch nur sehr schwer ansprengen lassen, so haben sie heute eigentlich kaum noch eine Existenzberechtigung, zumal man jetzt in der Lage ist, rechteckige Endmaße bis 3 m Länge herzustellen.

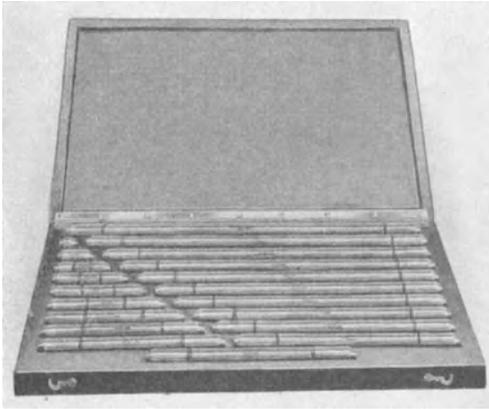


Abb. 51. Endmaße mit kreisförmigem Querschnitt.

Für manche Zwecke ist es empfehlenswert, die eine Meßfläche nach einem Zylinder abzurunden, da man sich dann, durch Zwischenfügen von Parallelendmaßen zwischen zwei solche Spezialstücke, zum Messen von Bohrungen geeignete Maßstäbe (Stichmaße) beliebiger Länge herstellen kann<sup>1</sup>. Auch Strichmaßstäbe (z. B. als Vergleichsmaße für Komparatormessungen) lassen sich aus End-

maßen herstellen, wenn man noch über 2 Sonderstücke verfügt, bei denen auf einer zu den Meßflächen senkrechten Fläche ein für mikroskopische Beobachtung geeigneter Strich angebracht ist. Man legt ihn so, daß bei aneinandergesprengten Stücken der Abstand der Striche möglichst genau 1 mm beträgt (wobei der Abstand jedes Striches von seiner Meßfläche gleichgültig ist). Kennt man noch die Korrektur dieses 1-mm-Strichmaßes, so verfügt man mit diesen beiden Stücken und einem Endmaßsatz über eine ganze Reihe sehr genauer Strichmaße.

Da nun die Endmaße ihre Länge mit der Temperatur ändern (um je 1,15  $\mu$  auf 100 mm und 1°), so darf man sie nicht unmittelbar mit der Hand anfassen. Ist dies beim Ansprengen nicht zu vermeiden, so hat man genügend lange Zeit zu warten, bis sie sich wieder abgekühlt haben (Näheres siehe S. 152). Um den Temperatenausgleich zu beschleunigen, legt man sie zweckmäßig auf den Prüfling oder das Meßgerät. Während des Messens faßt man sie mit einer Holzklammer (Abb. 52) und schützt sie auch noch gegen die Strahlung der Hand

<sup>1</sup> Zum Messen von Brüchen braucht man zum Teil Holzmaßstäbe, deren Enden in derartige Zylinder oder Schneiden auslaufen; sie werden an den beiden Enden gekreuzt zueinander angeordnet, so daß man diese Endmaße bequem aneinander ansetzen kann. Bei der starken Abhängigkeit der Länge des Holzes von der Feuchtigkeit (die sich auch bei lackierten Maßstäben nach Verletzung der Lackschicht bemerkbar macht) ist hiermit keine große Genauigkeit zu erreichen.

durch Überziehen eines Asbesthandschuhes. Längere Maße versieht man auch wohl mit einem Hartgummimantel; da aber dabei die Gefahr besteht, daß sie darunter rosten, jener auch durch seine Spannungen das Maß beeinflussen kann, ferner der Wärmeausgleich mit der Umgebung verhindert wird, so benutzt man zum Anfassen besser aufklappbare, entsprechend ausgesparte Holzstücke (Abb. 53).

Das Anfassen mit den Händen läßt sich auch beim Herausnehmen aus den Aufbewahrungskästen vermeiden, wenn man die Endmaße darin hochkant anordnet (wobei lange Endmaße in den günstigsten Punkten unterstützt werden), da man sie dann bequem mit Pinzetten fassen kann. Diese Anordnung (3) bietet zugleich den Vorteil, daß die Meßflächen geschützt sind, die Maße nur an den Seiten gefaßt werden, und daß sie auch bei geöffnetem Kasten nicht durcheinanderfallen können.

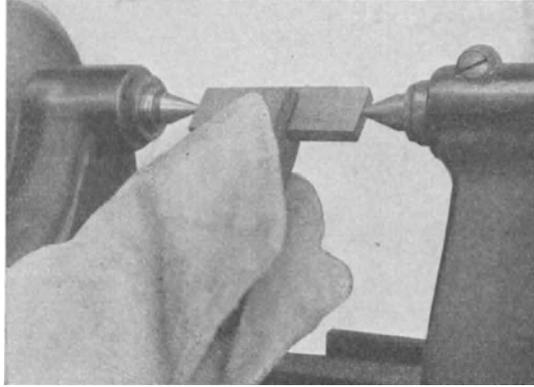


Abb. 52. Holzklammer und Asbesthandschuh zum Anfassen von Endmaßen.

Nun lassen sich auch Endmaße nicht absolut genau herstellen, vielmehr muß ihnen eine gewisse Herstellungsgenauigkeit zugebilligt werden. Johansson arbeitet, wie erwähnt, mit progressiver Toleranz, d. h. die zulässigen Abweichungen vom Sollwert wachsen proportional der Länge. Hatte somit das Endmaß der Länge  $m \cdot L$  die Toleranz  $m \cdot t$  und das der Länge  $n \cdot L$  die Toleranz  $n \cdot t$ , so hatte ihre Kombination  $(m \cdot L + n \cdot L)$  die Toleranz  $(m \cdot t + n \cdot t)$ . Ferner besaß auch das Endmaß der Länge  $(m + n) \cdot L$  die Toleranz  $(m + n) \cdot t$ , also dieselbe wie die Kombination  $(m \cdot L + n \cdot L)$ . Dieses Verfahren ist aber nicht streng durchzuführen, da die Herstellungsgenauigkeit keine reine Funktion der Länge ist; sie setzt sich prinzipiell aus 2 Gliedern zusammen, von denen das erste den reinen Beobachtungsfehler und die Ungenauigkeit der Meßmethode bzw. des -geräts enthält und also ein im wesentlichen von der Länge unabhängiges konstantes Glied  $a$  darstellt. Das zweite Glied berücksichtigt die Unsicherheit der Kenntnis der Temperatur und des Ausdehnungskoeffizienten, die für beide proportional der Länge ist; hierzu gehört ferner noch die der Werkstatt zu gebende und gleichfalls proportional der Länge anzusetzende Toleranz. Insgesamt kann man also die Herstellungsgenauigkeit gleich  $a + b \cdot L$  setzen. Damit ergeben sich folgende Verhältnisse:

Maß	Herstellungsgenauigkeit
$m \cdot L$	$a + b \cdot m \cdot L$
$n \cdot L$	$a + b \cdot n \cdot L$
Kombination: $m \cdot L + n \cdot L$	$2 \cdot a + b \cdot (m \cdot L + n \cdot L)$

Dagegen besitzt das Einzelmaß  $(m + n) \cdot L$  die Herstellungsgenauigkeit  $a + b \cdot (m + n) \cdot L$ . Wird das betreffende Maß aus  $p$  Einzelstücken zusammengesetzt, so ist die größtmögliche Abweichung um  $(p - 1) \cdot a$  höher als bei einem



Abb. 53. Holzklammer für lange Endmaße.

Einzelmaß der gleichen Länge. Die progressive Toleranz ist also nur innezuhalten, wenn man das erste Glied gegenüber  $b \cdot (m + n) \cdot L$  vernachlässigen kann, was aber im allgemeinen nicht der Fall ist.

Um eine größere Genauigkeit zu erzielen, also das Anwachsen des Fehlers mit der Zahl der Stücke in der Kombination zu vermeiden, wählt man bei der Zusammenstellung der Endmaße zu Sätzen die Stücke so aus, daß sich ihre Fehler gleichmäßig auf die einzelnen Dezimalreihen unterteilen (2). Handelt es sich z. B. um einen in folgender Weise abgestuften Satz, so würde man die Fehler etwa in der nachstehenden Art verteilen:

Gruppe	Stufung	Größtzulässige Abweichung
1	$\frac{1}{1000}$	$+ \frac{1}{3} \cdot (a + b \cdot L)$
2	$\frac{1}{100}$	$- \frac{1}{3} \cdot (a + b \cdot L)$
3	$\frac{1}{10}$	$+ \frac{3}{3} \cdot (a + b \cdot L)$
4	$\frac{1}{1}$	$- \frac{2}{3} \cdot (a + b \cdot L)$
5	10	$+ \frac{2}{3} \cdot (a + b \cdot L)$
6	100	$- \frac{3}{3} \cdot (a + b \cdot L)$

Bei einem anderen Satz müßte man natürlich die Fehlerverteilung entsprechend variieren, um sämtliche einzelnen Endmaße verwenden zu können.

Würde man die Unterteilung nicht vornehmen, so würde man beim Zusammensetzen von 6 Endmaßen im ungünstigsten Falle eine Abweichung um

$$\pm [6 \cdot a + b \cdot (L_1 + L_2 \dots + L_6)]$$

erhalten. Bei der vorgenommenen Verteilung könnte sich aber höchstens ein Fehler von

$$+ [2 \cdot a + b \cdot (\frac{1}{3} \cdot L_1 + \frac{3}{3} \cdot L_3 + \frac{2}{3} \cdot L_5 - \frac{1}{3} \cdot L_4 - \frac{2}{3} \cdot L_6)]$$

bzw. von

$$- [2 \cdot a + b \cdot (\frac{1}{3} \cdot L_2 + \frac{2}{3} \cdot L_4 + \frac{3}{3} \cdot L_6 - \frac{2}{3} \cdot L_3 - \frac{1}{3} \cdot L_5)]$$

ergeben, wenn nämlich jeweils die Gruppe mit der negativen (bzw. die mit der positiven) Herstellungsgenauigkeit an der für die Zusammensetzung ungünstigen Grenze läge. Es wird also der konstante Fehler von  $6 \cdot a$  auf  $2 \cdot a$  und ferner auch der von der Länge abhängige bedeutend verkleinert. Dies gilt um so mehr, als nicht gerade die oberen bzw. unteren Grenzen in jeder Gruppe gleichzeitig vorhanden sein werden. Nimmt man z. B. an, daß die Gruppe 1 und 6 an der oberen, 2 und 5 an der unteren, 3 und 4 im mittleren Bereich liegen, so wird der Fehler der Kombination nur  $+ b \cdot (\frac{1}{3} \cdot L_1 - \frac{1}{3} \cdot L_2 + \frac{5}{6} \cdot L_3 - \frac{1}{2} \cdot L_4 + \frac{1}{3} \cdot L_5 - \frac{2}{3} \cdot L_6)$ . Daraus folgt, daß der mögliche Fehler bei der Kombination einer größeren Zahl von Maßen geringer ist als bei der Verwendung einer kleineren Zahl. Allerdings tritt dabei eine größere Zahl von Anspengstellen auf; da deren Maß aber bei sorgfältigem Ansprenge nur um sehr geringe Beträge schwankt, so wird der Vorteil überwiegen<sup>1</sup>. In diesem Umstand liegt auch die innere Berechtigung für die früher erwähnte Wahl möglichst weniger Stücke in jeder Dezimalreihe. Dem steht gegenüber, daß das sorgfältigere Ansprenge einer größeren Zahl von Endmaßen unter Umständen längere Zeit erfordert.

Um ferner den Einfluß kleiner örtlicher Unebenheiten der Meßflächen (besonders bei gebrauchten Maßen) auszuschalten und damit die Kenntnis der tatsächlichen Länge eines Endmaßes zu erhöhen, empfiehlt es sich, die Endmaße stets mit denselben Flächen aneinander anzusprengen. Man definiert dabei als obere Meßfläche (bis 5 mm) diejenige mit der Maßbezeichnung bzw. (bei Endmaßen über 5 mm) die bei Betrachtung ihrer Beschriftung rechts liegende. Man sprengt dann die Endmaße stets mit der oberen Meßfläche des einen an die untere des anderen an, wobei man noch darauf achtet, daß die Mittenachsen der Endmaße möglichst in eine Gerade fallen. Ebenso werden auch die Meßflächen der Endmaße an die der Meßgeräte angesprengt (3). Beim Gebrauch an Meßmaschinen und dergleichen werden die Endmaße unter sanftem Drehen an die gut gereinigten Meßflächen angeschoben. Werkstücke werden indessen zweckmäßiger schwach eingefettet, um die Meßflächen nicht zu zerkratzen. Um die Endmaße auch sonst möglichst zu schonen, empfiehlt es sich, für die an den beiden Enden befindlichen Stücke, wenn möglich, stets dieselben beiden

<sup>1</sup> Die Dicke der Zwischenschicht wird in das Maß eingerechnet, so daß nur ihre Abweichung von dem dafür angenommenen Wert zu beachten ist (siehe S. 94).

Maße zu verwenden, so daß man nur bei diesen mit einer Abnutzung zu rechnen und nur ihre Korrekturen von Zeit zu Zeit wieder zu ermitteln braucht. Die Trennung der Endmaße nach dem Gebrauch erfolgt durch Abschieben, nicht durch Auseinanderreißen.

Da sich die Endmaße mit kreisförmigem Querschnitt nur schwer (wenn überhaupt) ansprengen lassen, so werden sie in die Meßgeräte nacheinander eingefügt und für gute Flächenberührung durch leichtes Drehen der einzelnen Maße um ihre Achse gesorgt. Daß die Endmaße, welche ja gewissermaßen die Urmaße der Fabriken darstellen, sehr sorgfältig zu behandeln sind, bedarf wohl keiner besonderen Begründung; vor allem wäre noch darauf hinzuweisen, daß sie vor starken Temperaturänderungen und Bestrahlungen sowie vor magnetischen Feldern (also der Nähe von Dynamos und Elektromotoren) zu schützen sind.

Endmaßkombinationen geringer Längen tragen sich, wie früher erwähnt, selbst. Bei größeren Längen, vor allem bei den Endmaßen mit kreisförmigem Querschnitt, ist aber, der Größe der Biegungsbeanspruchungen wegen, eine Stützung notwendig. Da die Endmaße stets in ihrer neutralen Achse gemessen werden, so erscheint hierzu zunächst die Unterstützung in den Besselschen Punkten am vorteilhaftesten. Dabei würden aber Drehungen der Endquerschnitte eintreten und die beiden Meßflächen nicht einander parallel bleiben. Bei punktförmiger Anlage genau in der neutralen Achse wäre dies ohne Bedeutung; diese ist aber praktisch nur selten durchzuführen (es wäre z. B. durch Zwischenlegen von Kugeln möglich), zumal dann auch der spezifische Meßdruck sehr groß wird. Deshalb fühlt man meist zwischen ebenen Flächen ein.

Für die Längenänderung  $\delta l''$  der oberen Schicht eines Maßes gilt die Gleichung (siehe S. 43)

$$\delta l'' = -\frac{1}{12} \cdot \frac{L^3 \cdot h}{\alpha} \cdot \left[ 1 - 6 \cdot \left( \frac{a}{L} \right) + 6 \cdot \left( \frac{a}{L} \right)^2 \right],$$

worin bedeuten:  $L$  die Länge,  $h$  die Höhe,  $a$  den Abstand der Unterstützungspunkte von den Enden und  $\alpha = 2 \cdot E \cdot \lambda \cdot \frac{L}{G}$ , wobei ist:  $E$  der Elastizitätsmodul,  $\lambda$  das Trägheitsmoment des Querschnitts um seine Mittelachse,  $G$  das Gewicht. Aus Abb. 54 folgt der Drehwinkel  $\varphi$  einer Meßfläche zu:

$$\varphi = \frac{\frac{1}{2} \delta l''}{\frac{1}{2} \cdot h} = -\frac{1}{12} \cdot \frac{L^3}{\alpha} \cdot \left[ 1 - 6 \cdot \left( \frac{a}{L} \right) + 6 \cdot \left( \frac{a}{L} \right)^2 \right].$$

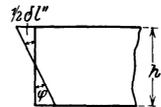


Abb. 54. Drehungen der Meßfläche.

Man sieht, daß  $\varphi$  zusammen mit  $\delta l''$  gleich 0 wird für  $a = 0,2113 \cdot L$ , also Unterstützung in den günstigsten Punkten die für Endmaße geeignetste ist. Die hierbei auftretende Längenänderung ist (s. S. 44 und 43)

$$\delta l''_G = -0,000\,001\,151 \cdot \frac{L^7 \cdot Q^2 \cdot s^2}{E^2 \cdot \lambda^2}.$$

Bei Unterstützung in den Besselschen Punkten wäre dagegen

$$\delta l''_B = -0,000\,000\,653 \cdot \frac{L^7 \cdot Q^2 \cdot s^2}{E^2 \cdot \lambda^2}$$

und

$$\delta l''_B = +0,001\,276\,7 \cdot \frac{L^3 \cdot h \cdot Q \cdot s}{E \cdot \lambda},$$

$$\varphi = +0,001\,276\,7 \cdot \frac{L^3 \cdot Q \cdot s}{E \cdot \lambda}.$$

Bei Unterstützung an den Enden oder in der Mitte würde sich ergeben

$$\delta l'_E = -0,000\,421\,6 \cdot \frac{L^7 \cdot Q^2 \cdot s^2}{E^2 \cdot \lambda^2},$$

$$\delta l'_M = -0,000\,139\,7 \cdot \frac{L^7 \cdot Q^2 \cdot s^2}{E^2 \cdot \lambda^2},$$

$$\delta l''_E = -0,041\,67 \cdot \frac{L^3 \cdot h \cdot Q \cdot s}{E \cdot \lambda},$$

$$\delta l''_M = +0,020\,83 \cdot \frac{L^3 \cdot h \cdot Q \cdot s}{E \cdot \lambda},$$

$$\varphi_E = -0,041\,67 \cdot \frac{L^3 \cdot Q \cdot s}{E \cdot \lambda},$$

$$\varphi_M = +0,020\,83 \cdot \frac{L^3 \cdot Q \cdot s}{E \cdot \lambda}.$$

Für rechteckigen Querschnitt ist  $\lambda = b \cdot \frac{h^3}{12}$ , für kreisförmigen  $\lambda = \pi \cdot \frac{r^4}{4} = \pi \cdot \frac{d^4}{64}$  (wobei  $h = d$  zu setzen ist). Die ersteren haben fast stets einen Querschnitt von  $9 \times 35 \text{ mm}^2$ , die letzteren einen Durchmesser von  $d = 20 \text{ mm}$ . Da nun  $\delta l'$  proportional  $\frac{1}{h^4}$ ,  $\varphi$  proportional  $\frac{1}{h^2}$  ist und beide unabhängig von der Breite  $b$  sind, wird man die rechteckigen Endmaße hochkant stellen. Nun hat sich aber gezeigt, daß sich die langen (nur an den Enden gehärteten) Endmaße bei Hochkantlage leicht über ihre Breitseite krümmen, wodurch die Parallelität (in seitlicher Richtung) gestört wird. Deshalb ist es unter Umständen besser, sie auf die Breitseite zu stützen, da dann bei Unterstützung in den günstigsten Punkten die Meßflächen (in jeder Richtung) senkrecht zur Achse und damit parallel zueinander stehen, und lieber das hierbei etwa 230mal größere  $\delta l'$  der neutralen Achse zu berücksichtigen.

Für die größten heute herstellbaren Maße von  $L = 3 \text{ m}$  ergibt sich mit  $s = 7,8$  und  $E = 2 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2$ ,  $Q = 9 \times 35 \text{ mm}^2$  bzw.  $d = 20 \text{ mm}$ :

#### Rechteckiger Querschnitt.

Unterstützung in	Auflage auf Breitseite			Auflage auf Schmalseite		
	$\delta l'$	$\delta l''$	$\varphi$	$\delta l'$	$\delta l''$	$\varphi$
Besselsche Punkte . .	- 4,77 $\mu$	+ 17,92 $\mu$	+ 411'' $\sim 7'$	- 0,02 $\mu$	+ 4,60 $\mu$	- 27,1'' $\sim 1/2'$
Günstigste Punkte . .	- 8,40,,	$\pm 0,00,,$	$\pm 0''$	- 0,04,,	$\pm 0,00,,$	$\pm 0,0''$
Enden . . .	- 3078	„ - 585	„ - 13403'' $\sim 3,7^0$	- 13,46,,	- 150,2	„ - 885'' $\sim 15'$
Mitte . . .	- 1020	„ + 292,5	„ + 6702'' $\sim 1,9^0$	- 4,46,,	+ 75,1	„ + 442'' $\sim 7 1/2'$

#### Kreisförmiger Querschnitt.

Unterstützung in	$\delta l'$	$\delta l''$	$\varphi$
Besselsche Punkte . . . . .	- 0,35 $\mu$	- 10,75 $\mu$	- 111'' $\sim 2'$
Günstigste Punkte . . . . .	- 0,61,,	$\pm 0,00$ „	$\pm 0,0''$
Enden . . . . .	- 224,4,,	- 351	„ - 3619'' $\sim 1^0$
Mitte . . . . .	- 74,4	„ + 175,5	„ + 1809'' $\sim 1/2^0$

Bei auf der Schmalseite stehendem rechteckigen Querschnitt sind die Werte für  $\delta l'$  228,7-, für  $\delta l''$  3,89-, für  $\varphi$  15,1mal kleiner als bei Auflage auf der Breitseite (diese wären mit 0,004 37, 0,257 bzw. 0,066 12 zu multiplizieren).

Bei einem Maße von 1 m Länge wären die Werte von  $\delta l'$  2187-, die von  $\delta l''$  und  $\varphi$  27mal kleiner. Aus alledem folgt, daß man stets in den günstigsten Punkten unterstützen soll. Zylindrische Endmaße erhalten daher an diesen Stellen häufig Bunde, mit denen sie auf geeignete Stützen gelegt werden.

Während nun kleinere Endmaße bis etwa 100 mm Länge sich durch die Molekularkräfte frei tragen, muß man, wie bereits erwähnt, Kombinationen aus größeren Endmaßen zusammenhalten, da sie sonst auseinanderfallen. Früher ging man dabei so vor, daß man über die Endmaße an der Zusammenstoßstelle entsprechend geformte Hülsen legte und diese anzog. Dabei tritt aber leicht ein Verkippen der Endmaße und ein Voneinanderlösen ein. Vorzuziehen ist deshalb die Konstruktion der Hommelwerke (Abb. 55, links). Die Endmaße tragen in der Nähe ihrer Enden Durchbohrungen; nachdem 2 Endmaße zusammengesprengt sind, werden die beiden Halteklammern daneben gestellt und durch diese und ein Loch die Schraubenverbindung gesteckt, während in die zweite Bohrung ein in der Mitte kugelig geformter Bolzen kommt; dann werden die beiden Druckschrauben der Halter gleichmäßig angezogen. Durch das Spiel und die Elastizität der Halter sowie die allseitige Beweglichkeit der Kugelbolzen sind alle seitlich trennend wirkenden Kräfte vermieden.

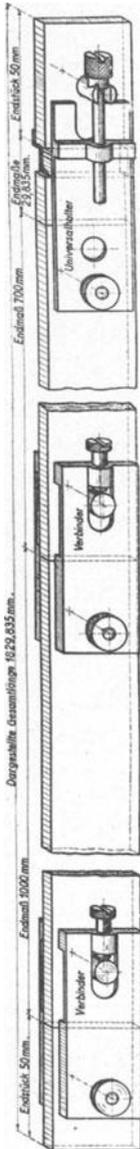


Abb. 55. Verbindung größerer Endmaße.

Ist man gezwungen, zur Erzielung eines bestimmten Maßes noch Endmaße ohne Bohrung zu verwenden, so fügt man sie zwischen 2 Endmaße mit Bohrungen ein (Abb. 55, rechts) und stellt die Verbindung unter Benutzung von Universalhaltern und Kugelbolzen her, in deren Schlitze sich die Zugschrauben einlegen. Im übrigen wird man dafür sorgen, daß die Einzelmaße soweit als möglich symmetrisch verteilt sind<sup>1</sup>.

Damit die langen und teuren Endmaße möglichst geschont werden, läßt man ihre Meßflächen nie mit den zu kontrollierenden Werkstücken usw. zur Berührung kommen, sondern bringt an die beiden Enden stets je ein 50-mm-Maß, so daß im Falle der Beschädigung nur diese nacharbeiten bzw. zu ersetzen sind. Mitgeliefert wird stets ein solches Paar Parallelendmaße, sowie ein zweites, bei denen je eine Meßfläche zylindrisch gestaltet ist, so daß man sich auf diese Weise die früher erwähnten Stichmaße zum Messen von Bohrungen herstellen kann (Abb. 56).

Für Endmaße mit kreisförmigem Querschnitt fehlt bisher eine entsprechende Konstruktion, diese muß man deshalb stets Stück für Stück innerhalb der Meßflächen des Geräts aneinanderfügen, wobei jedes einzelne in den günstigsten Punkten unterstützt wird. Eine ähnliche Verbindung, wie bei den rechteckigen Endmaßen beschrieben, könnte man vielleicht dadurch erreichen, daß man den Schrauben- und den Kugelbolzen an (kugelig beweglichen) Bundens anordnet. Eine andere Möglichkeit für ihre Verbindung zeigt Abb. 57, bei der die Endmaße durchbohrt sind und durch Gewindebolzen und Mutter zusammengehalten werden. Man verliert aber dabei gerade den besten Teil der Meßfläche und kann auch nicht in der neutralen Achse messen. Da die Maße mit kreisförmigem Querschnitt auch sonst den rechteckigen Endmaßen in vieler Hinsicht unterlegen sind und diese jetzt, wie erwähnt, bis zu 3 m Länge hergestellt werden, sollte man die zylindrischen Endmaße nach Möglichkeit vermeiden.

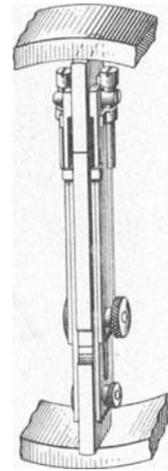


Abb. 56. Verbindung größerer Endmaße (für Bohrungs-messungen).

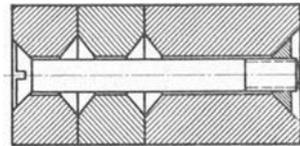


Abb. 57. Aus Kreisscheiben zusammengesetztes Endmaß.

## 5. Zubehör und Verwendung von Endmaßen.

Nach vorstehenden Ausführungen scheint es, als wenn man Endmaße nur zur Bestimmung des Abstandes paralleler Flächen und, unter Benutzung der Stücke mit zylindrischen Meßflächen, evtl. noch zur Kontrolle von Bohrungen verwenden

<sup>1</sup> Für die Bestimmung der Lage der günstigsten Punkte bei Endmaßkombinationen siehe (4).

könnte. Sie lassen sich aber durch Hinzunahme verschiedener Teile in vielfacher Weise verwendbar machen. — Will man z. B. die Dicke eines Körpers messen,

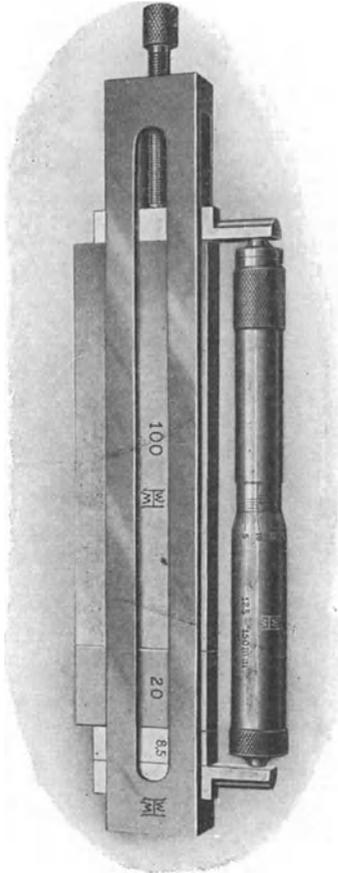


Abb. 58. Klammer für Endmaße.

so sprengt man an die entsprechend zusammengesetzten Endmaße zwei Stücke mit einer ebenen Fläche an, die über die Endmaße vorragen, und baut so eine Art Rachenlehre (1), die, wie Abb. 58 zeigt, auch ganz besonders zum Einstellen von Innenfühllehnen, -mikrometern und ähnlichem geeignet ist (für die Ausbildung der Meßschnäbel zur Herstellung von Grensrachenlehren siehe S. 325). Durch die hierbei oder bei der Messung auftretenden Kräfte würden aber die Schenkel abgedrückt werden; man muß deshalb den Zusammenhalt durch entsprechende Klammern sichern, die man in verschiedenen Größen vorrätig hält, um unnötig lange Schrauben daran zu vermeiden. Bei den größeren Klammern sieht man auch eine Schnellverstellung der Spindel vor. Eine Erleichterung ergibt sich dadurch, daß man ein verschiebbares Zwischenstück einfügt, das durch Bolzen und Mutter gehalten wird (Abb. 59). Die über die Klammer vorstehende Schraube ist bei der Ausführung nach Abb. 60 vermieden. Mittels der großen, oben auf dem Halter sichtbaren Kordelschraube werden die Teile zunächst grob festgeklemmt und dann durch die kleinere im Rahmen liegende Schraube angezogen (1).

Stets muß man darauf achten, daß die Endmaße nicht auf der unteren Begrenzung der Klammer bzw. auf dem Zwischenstück unmittelbar aufliegen, oder daß die Spindel auf das Endmaß selbst drückt, weil dadurch die Meßflächen beschädigt werden würden. Man bringt deshalb hier besondere Zwischenstücke an, die auf einer Seite endmaßmäßig poliert sind, während die andere nur geschliffen ist. Sehr zweckmäßig sind kleine Auflagestühle nach Abb. 61, da diese eine vielseitige Verwendung zulassen, z. B. wenn man Endmaße auf eine Anreißplatte aufsetzen will. Man legt dann den Auflagestuhl mit den beiden kleineren Flächen auf diese und kann ihn so besser verschieben. Bei Schnäbeln braucht

so sprengt man an die entsprechend zusammengesetzten Endmaße zwei Stücke mit einer ebenen Fläche an, die über die Endmaße vorragen, und baut so eine Art Rachenlehre (1), die, wie Abb. 58 zeigt, auch ganz besonders zum Einstellen von Innenfühllehnen, -mikrometern und ähnlichem geeignet ist (für die Ausbildung der Meßschnäbel zur Herstellung von Grensrachenlehren siehe S. 325). Durch die hierbei oder bei der Messung auftretenden Kräfte würden aber die Schenkel abgedrückt werden; man muß deshalb den Zusammenhalt durch entsprechende Klammern sichern, die man in verschiedenen Größen vorrätig hält, um unnötig lange Schrauben daran zu vermeiden. Bei den größeren Klammern sieht man auch eine Schnellverstellung der Spindel vor. Eine Erleichterung ergibt sich dadurch, daß man ein verschiebbares Zwischenstück einfügt, das durch Bolzen und Mutter gehalten wird (Abb. 59). Die über die Klammer vorstehende Schraube ist bei der Ausführung nach Abb. 60 vermieden. Mittels der großen, oben auf dem Halter sichtbaren Kordelschraube werden die Teile zunächst grob festgeklemmt und dann durch die kleinere im Rahmen liegende Schraube angezogen (1).

Stets muß man darauf achten, daß die Endmaße nicht auf der unteren Begrenzung der Klammer bzw. auf dem Zwischenstück unmittelbar aufliegen, oder daß die Spindel auf das Endmaß selbst drückt, weil dadurch die Meßflächen beschädigt werden würden. Man bringt deshalb hier besondere Zwischenstücke an, die auf einer Seite endmaßmäßig poliert sind, während die andere nur geschliffen ist. Sehr zweckmäßig sind kleine Auflagestühle nach Abb. 61, da diese eine vielseitige Verwendung zulassen, z. B. wenn man Endmaße auf eine Anreißplatte aufsetzen will. Man legt dann den Auflagestuhl mit den beiden kleineren Flächen auf diese und kann ihn so besser verschieben. Bei Schnäbeln braucht

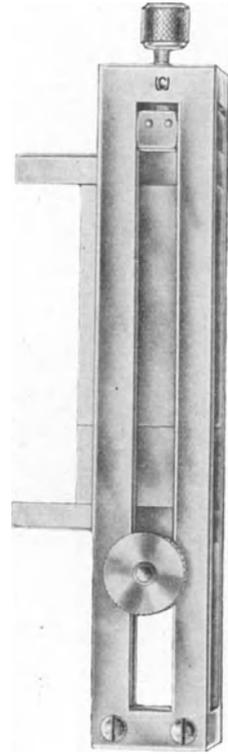


Abb. 59. Klammer für Endmaße.

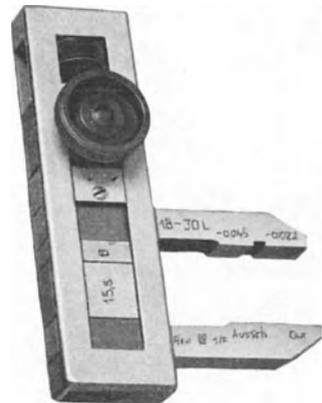


Abb. 60. Klammer für Endmaße.

so sprengt man an die entsprechend zusammengesetzten Endmaße zwei Stücke mit einer ebenen Fläche an, die über die Endmaße vorragen, und baut so eine Art Rachenlehre (1), die, wie Abb. 58 zeigt, auch ganz besonders zum Einstellen von Innenfühllehnen, -mikrometern und ähnlichem geeignet ist (für die Ausbildung der Meßschnäbel zur Herstellung von Grensrachenlehren siehe S. 325). Durch die hierbei oder bei der Messung auftretenden Kräfte würden aber die Schenkel abgedrückt werden; man muß deshalb den Zusammenhalt durch entsprechende Klammern sichern, die man in verschiedenen Größen vorrätig hält, um unnötig lange Schrauben daran zu vermeiden. Bei den größeren Klammern sieht man auch eine Schnellverstellung der Spindel vor. Eine Erleichterung ergibt sich dadurch, daß man ein verschiebbares Zwischenstück einfügt, das durch Bolzen und Mutter gehalten wird (Abb. 59). Die über die Klammer vorstehende Schraube ist bei der Ausführung nach Abb. 60 vermieden. Mittels der großen, oben auf dem Halter sichtbaren Kordelschraube werden die Teile zunächst grob festgeklemmt und dann durch die kleinere im Rahmen liegende Schraube angezogen (1).

man keine Zwischenstücke, da ihre nicht zur Anlage an die Endmaße kommenden Flächen nur geschliffen sind.

Derartige Rachenlehren mit vorstehenden Schnäbeln kann man auch aus großen Endmaßen nach Abb. 55 zusammenbauen. Hierbei kann man nun nicht die Halter nach Abb. 58 bis 60 verwenden. Um die Schnäbel zu halten, benutzt man zwei durchbohrte Stücke von

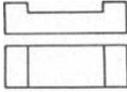


Abb. 61. Auflagestuhl.

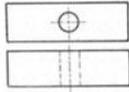


Abb. 62. Durchbohrtes Zwischenstück.

etwa 15 mm Dicke (Abb. 62), die man auf die Schnäbel auflegt. Die Entfernung von der Bohrung des Endmaßes und der jenes Hilfsstückes wählt man so, daß dieselben Klammern wie in Abb. 55 benutzt werden können.

Meist rundet man die Schnäbel auf der einen Seite zylindrisch ab wie in Abb. 58 und hat dann den Vorteil, damit auch Bohrungen messen zu können (Abb. 63). Die Dicke der Halbzylinder wählt man zu 2,5; 5 oder 10 mm. Um tiefe Bohrungen zu messen, muß man natürlich den Schnäbeln die nötige Länge geben.

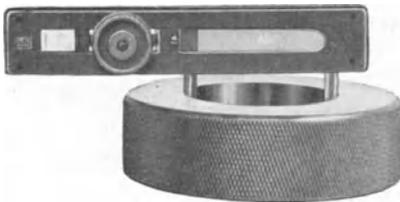


Abb. 63. Endmaßkombination zum Messen von Bohrungen.

Handelt es sich um die Messung von Eindrehungen oder ähnlichem, so nimmt man Messerschnäbel, bei denen die Messerkante die genaue Fortsetzung der an die Endmaße angesprengten ebenen Fläche bildet (Abb. 64). Verwendet man auf der einen Seite dieser Rachenlehre einen Planschnabel, so kann man auch die Konzentrität der Eindrehungen prüfen.

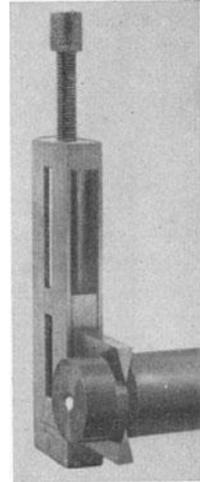


Abb. 64. Endmaßkombination zum Messen von Eindrehungen.

Da die Schneiden der Messerschnäbel eine gewisse Breite haben, ist bei abgerundeten Nuten evtl. eine Korrektur  $\delta$  anzubringen. Sie berechnet sich nach Abb. 65 aus:

$$(R - \delta)^2 + \frac{b^2}{4} = R^2,$$

$$\delta^2 - 2 \cdot R \cdot \delta + \frac{b^2}{4} = 0,$$

$$\delta = R - \sqrt{R^2 - \frac{b^2}{4}} = \frac{b^2}{8 \cdot R}.$$

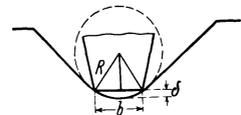


Abb. 65. Korrektur bei der Messung von Eindrehungen.

Die Eindrehungen müssen naturgemäß so verlaufen (vor allem am oberen Rande so breit sein), daß die Schnäbel nirgends seitlich anstoßen.

Sowohl bei der Verwendung der halbzylindrischen wie der Messerschnäbel ist darauf zu achten, daß sie nicht windschief, sondern parallel zueinander liegen. Dies prüft man durch Auflegen auf 4 gleiche Endmaße. Bequemer sind die Auflagestühle nach Abb. 61, die so groß gehalten sind, daß der Halter in ihre Aus-



Abb. 66. Zentrierspitze.

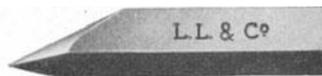


Abb. 67. Anreißspitze.

sparung hineingeht. Die Schnäbel werden dabei gegen die beiden kurzen Flächen gedrückt und liegen damit parallel. Die eine Flachseite der Schnäbel muß dazu mit der nötigen Genauigkeit angefertigt sein.

Häufig gibt man den Endmaßen auch 2 Zentrierspitzen nach Abb. 66 bei, die man genau so wie die Schnäbel ansprengt, worauf das Ganze durch einen Halter zusammengefaßt wird; auf diese Weise erhält man einen sehr genauen Zirkel. Außerdem findet man meist auch



Abb. 68. Höhenreißer aus Endmaßen.

eine Anreißspitze (Abb. 67). Zu ihrer Verwendung baut man sich aus den Endmaßen einen Höhenreißer; dazu braucht man dann noch einen Fuß, dem man zweckmäßig ein genaues rundes Maß gibt. Entweder geht man dabei so vor, daß man das untere Endstück des Halters mit in das Maß einschließt (Abb. 68), wozu dieses endmaßmäßig bearbeitet sein muß, oder man bildet ihn nach Abb. 69 aus, wobei der Teil *T* nur auf seiner oberen Fläche, an die die Endmaße angesprengt werden, endmaßmäßig ausgeführt ist. Sie werden dann durch einen Halter nach Abb. 58 bis 60 mit dem Fuß zusammengefaßt. Muß die Anreißspitze, der Form des Werkstückes wegen, weiter vorstehen, so sprengt man sie nicht unmittelbar an die Endmaße an; auf diese kommt vielmehr zunächst ein langes Endmaß (Parallelstück) (Abb. 70), das durch den Halter an seinem einen Ende mit den Endmaßen verbunden wird. An sein anderes Ende sprengt man die Anreißspitze an und hält beide durch einen kurzen Halter zusammen, wobei man die maß-

polierten Flächen wieder durch Zwischenstücke schützt. Für Höhen, die kleiner als das Maß des Fußes sind, baut man auf den Auf-  
lagestühlen (Abb. 61) auf, die man mit den kleinen Flächen auf die Anreißplatte legt. Da man hierbei den Halter nicht anbringen kann, muß man Auflagestuhl, Endmaße und Anreißspitze von Hand zusammenhalten. Damit lassen sich auch treppen-

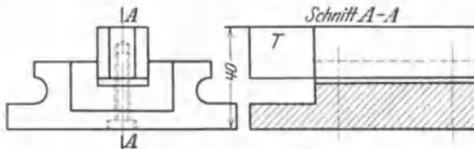


Abb. 69. Fuß für Höhenreißer.

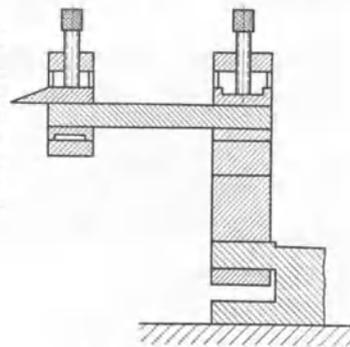


Abb. 70. Höhenreißer mit weit ausladender Spitze.

förmige Absätze herstellen. Die in Abb. 69 gezeigte Form des Fußes ist noch aus 2 Teilen so zusammengesetzt, daß nach etwaiger Abnutzung die Entfernung zwischen der unteren und der oberen Auflagefläche nachgestellt werden kann.

Im allgemeinen muß man indessen sagen, daß die Herstellung von Höhenreißern aus Endmaßen nicht viel Zweck hat, da man beim Anreißern höchstens mit einer Genauigkeit von  $\frac{1}{10}$  mm rechnen kann, die auch auf andere Weise bequem zu erreichen ist.

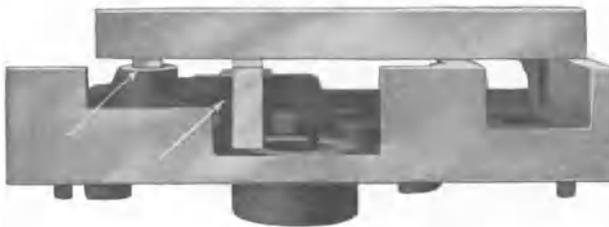


Abb. 71. Prüfung der Höhe von Ansätzen.



Abb. 72. Prüfung des Abstandes der Bohrungsachsen.

Die Endmaße bilden heute gewissermaßen die Fabriknormale, an die alle anderen Maße angeschlossen werden, und finden deshalb in erster Linie im Meßlaboratorium Verwendung. Sie dienen hier zum Einstellen von Fühlhebeln, Meßmaschinen, zur Kontrolle von Schraublehren und aller anderen Meßgeräte, namentlich der festen Lehren.

Sie finden aber auch weiterhin Anwendung im Werkzeug- und Vorrichtungsbau, bei der Kontrolle von Schablonen, Matrizen, Bohr- und Fräsvorrichtungen

sowie von austauschbaren Teilen. Einige Beispiele dafür seien nachfolgend gegeben<sup>1</sup>:

In Abb. 71 wird untersucht, ob verschiedene Ansätze in den vorgeschriebenen Höhen liegen. Man bringt auf die einzelnen Ansätze Endmaße, die ihren Höhenunterschieden

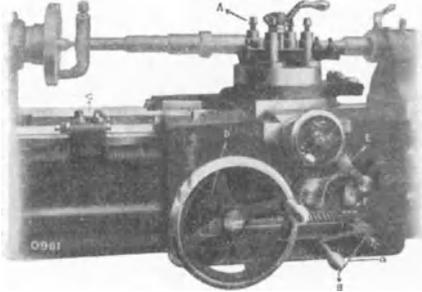


Abb. 73. Endmaße an der Drehbank.

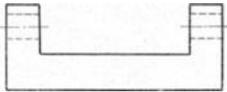


Abb. 74. Spezialendmaß für Werkzeugmaschinen.

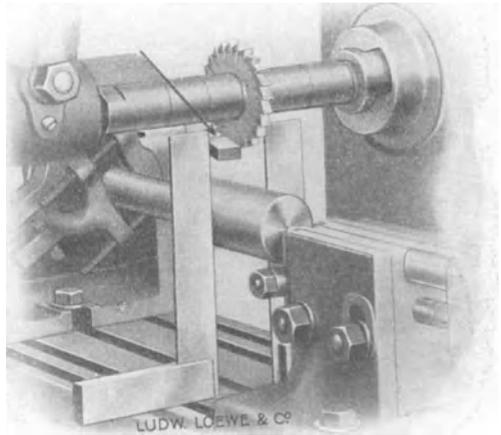


Abb. 75. Endmaß bei der Einstellung eines Nutenfräasers.

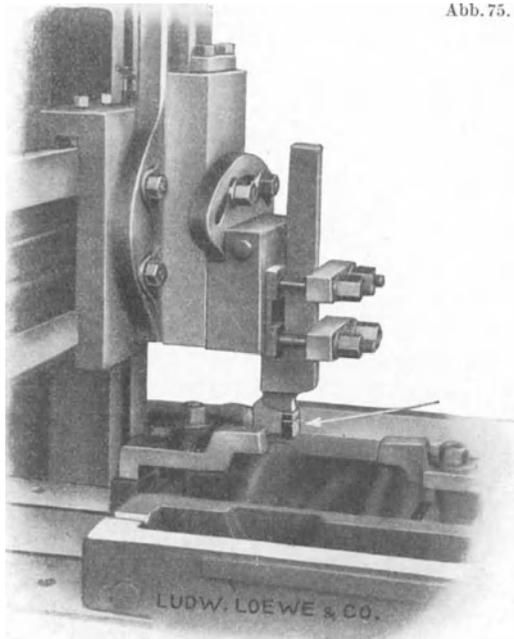


Abb. 76. Endmaße an der Hobelmaschine.

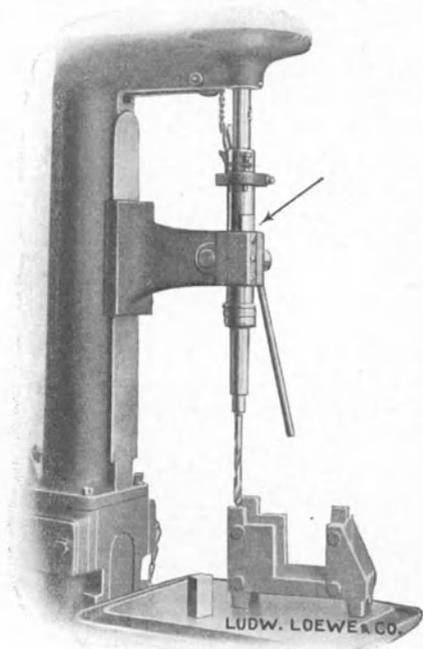


Abb. 77. Endmaß an der Bohrmaschine.

gegen die Ausgangsfläche (in der Abbildung rechts) entsprechen, und sieht, ob das Lineal überall aufliegt. Dieses ist so stark zu wählen, daß seine Durchbiegung vernachlässigt werden kann.

<sup>1</sup> Für die Anwendung der Endmaße zur Bestimmung der Ebenheit von Linealen, Touchier- und Anreißplatten siehe Abschnitt V D.

Die Kontrolle des gegenseitigen Abstandes von Bohrungen erfolgt durch Abfühlen der Entfernungen eingesteckter Dorne mittels Endmaße (Abb. 72).

Ausgezeichnete Verwendung können die Endmaße auch an Werkzeugmaschinen zur Einstellung der Werkzeuge finden, ein Verfahren, das leider noch viel zu wenig angewandt wird, so daß auch dafür einige Beispiele gegeben werden sollen. Während man beim Drehen von Wellen den Durchmesser leicht mittels Rachenlehren oder auf andere Weise kontrollieren kann, macht die Bestimmung der Längen bei Stufenwellen größere Schwierigkeiten. Zweckmäßig geht man dabei so vor, daß man gegen einen Anschlag des Supportes den einzelnen Längen entsprechende Endmaße (oder Endmaßkombinationen) legt und zum Schluß einen am Bett festzustellenden Anschlag dagegen schiebt. Man nimmt dann das erste Endmaß heraus und dreht so, lange, bis der Support gegen die liegen gebliebenen stößt, worauf man in entsprechender Weise auch die übrigen Absätze bearbeitet. Besonders vorteilhaft ist dieses Verfahren bei Drehbänken mit selbstauslösender Fallschnecke (Abb. 73). Sehr bequem ist dabei die in Abb. 74 wiedergegebene Form der Endmaße, die einfach durch Drehung um einen durch alle gesteckten Draht herausgeschwungen werden, wobei sie nicht herausfallen können. Dies bietet noch den Vorteil, daß man bei Massenanfertigung die Endmaße für das nächste Stück sofort wieder in der richtigen Reihenfolge an ihren Platz bringen kann.

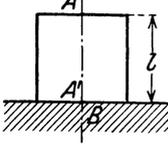
Abb. 75 zeigt die Verwendung von Endmaßen zum Einstellen von Nutenfräsern, Abb. 76 an der Hobelmaschine, Abb. 77 an der Bohrmaschine, die wohl ohne weitere Erklärung verständlich sind.

## 6. Genauigkeit der Endmaße.

Während man früher an Endmaßen ziemliche Fehler fand (es wurden  $+4$  bis  $-7,5 \mu$  bei 150 bis 375 mm Länge beobachtet), ist ihre Genauigkeit im Laufe der Zeit immer mehr gesteigert worden, so daß man bald auf  $10^{-5}$  der Länge, d. h.  $1 \mu$  auf 100 mm kam (3). Diese Beziehung ist aber nicht unbegrenzt nach unten hin durchzuführen, so daß man bei 1 mm Länge nicht etwa mit einer Genauigkeit von  $0,01 \mu$  rechnen darf. Wie früher auseinandergesetzt, darf man nämlich die Genauigkeit nicht proportional  $L$ , sondern muß sie zu  $a + b \cdot L$  ansetzen. Bei den kleineren Endmaßen überwiegt das Glied  $a$ , während es bei größeren vernachlässigt werden darf.

Nun muß aber auch verlangt werden, daß die Länge des Endmaßes an jeder Stelle zwischen seinen Meßflächen (mit einer bestimmten Toleranz) innegehalten wird. Dazu wird man am besten das Maß in der Mitte (das Mittenmaß) feststellen und dann noch Abweichungen in der Ebenheit und der Parallelität der Meßflächen zulassen. Hierfür durfte früher im allgemeinen mit  $\pm 0,25 \mu$  gerechnet werden (4). Bei den besten heutigen Endmaßen liegen die Maß- und auch die Gestaltsfehler unter  $0,03 \mu$ .

In Deutschland sind die Endmaße durch DIN 861 genormt; diese lautet:

<b>Parallelendmaße.</b>		<b>DIN 861.</b>
Begriffe, Genauigkeit, Gestaltung.		
Begriffe.		
	<p>Länge (Abb. 78): Als Länge <math>l</math> eines Endmaßes mit den parallelen, ebenen Meßflächen (<math>A</math> und <math>A'</math>) gilt der Abstand der einen Fläche (<math>A</math>) von einer an die zweite Fläche (<math>A'</math>) nach sorgfältiger Reinigung ohne besonderes Zwischenmittel angesprengten oder angeschobenen Fläche (<math>B</math>) eines Körpers aus gleichem Werkstoff und mit gleicher Oberflächenbeschaffenheit. Diese Definition entspricht dem Meßdruck Null.</p> <p>Unter „angesprengt“ wird das freiwillige Anspringen und dauernde Haften, unter „angeschoben“ das dauernde Haften auf der ganzen Fläche verstanden.</p> <p>Erläuterung: Unter der Länge <math>l</math> ist also nicht der Abstand der beiden Flächen <math>A</math> und <math>A'</math> verstanden, sondern der Abstand von <math>A</math> zu der gleich gerichteten Fläche <math>B</math>. Die Begründung dafür liegt darin, daß man bei jeder Messung immer von 2 nach der gleichen Richtung weisenden Flächen ausgehen muß. Am besten wird dies verständlich, wenn man ein schematisches, stark</p>	
<p>Abb. 78. Länge eines Endmaßes.</p>		

vergrößertes Beispiel betrachtet. Würde man z. B. die Messung nach Abb. 79 a vornehmen, so würden die Meßstifte auf beiden Seiten um etwa ein Stück  $\delta$  in das Endmaß (zum mindesten stets in die vorhandene Oberflächenschicht) eindringen, und man würde also um das Stück  $2 \cdot \delta$  zu klein messen. Führt man die Messung dagegen nach Abb. 79 b an zwei nach der gleichen Seite weisenden Flächen aus, so heben sich die beiden Fehler  $\delta$  auf, vorausgesetzt, daß es sich um gleichen Werkstoff und um gleiche Oberflächenbeschaffenheit handelt; diese Messung ist also so, als wenn kein Meßdruck vorhanden wäre; insofern entspricht die angenommene Definition dem Meßdruck 0. Mit diesem könnte man aber die Messung nach Abb. 79 a nicht ausführen, da dann stets Schichten variabler Dicke zwischen Endmaß und Meßstift bleiben würden (15).

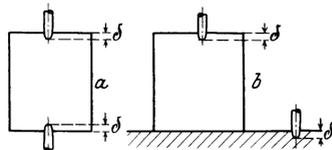


Abb. 79. Messung an a) entgegengesetzten, b) gleichgerichteten Flächen.

Die obige Definition der Länge  $l$  hat ferner den Vorteil, daß sie noch die Abweichungen von der geometrischen Länge mit einschließt, die durch eine etwaige Zwischenschicht zwischen  $A'$  und  $B$  und ferner auch durch eine Kompression der Oberflächenschichten beim Ansprengegen bzw. Anschieben hervorgerufen werden. Dies ist insofern von Bedeutung, als beim praktischen Gebrauch die Endmaße stets mit ihrer einen Fläche an eine andere Meßfläche, sei es eines zweiten Endmaßes, sei es z. B. einer Meßmaschine, angebracht werden. Somit gehen also diese Abweichungen von der geometrischen Länge in die Messungen nicht ein, sondern höchstens ihre Schwankungen. Dazu kommt aber bei den praktischen Messungen noch, daß auch bei einem Endmaß seine zweite Meßfläche in Berührung mit der des benutzten Meßgerätes steht. Die hier auftretenden Verhältnisse, die noch dazu verschieden sind, je nachdem ob es sich um eine ebene Meßfläche handelt (wie bei den meisten Meßmaschinen) oder um punktförmige Berührung (wie vielfach bei Fühlhebeln), lassen sich durch die obige Definition natürlich nicht mit erfassen. Sie sind aber auch praktisch ohne Bedeutung, da sie im allgemeinen unter  $0,1 \mu$  liegen, wie man daraus schließen kann, daß sich folgende Unterschiede zwischen angesprengten bzw. angeschobenen und aufgesetzten Endmaßen (siehe S. 71) ergeben haben: bei Strichpolitur (also geringem Haften) —  $0,035 \mu$ , bei Hochglanzpolitur (gutem Haften) —  $0,085$  bis  $-0,111 \mu$  (2).

Mittenmaß (Abb. 80):  $m$  ist die Länge des Lotes vom Mittelpunkt der Meßfläche  $A$  auf die an die andere Meßfläche  $A'$  angesprengte (angeschobene) Ebene  $B$ .

Erläuterung: Bei der Definition der Länge  $l$  ist ein ideales Endmaß mit völlig ebenen und parallelen Meßflächen  $A$  und  $A'$  vorausgesetzt. Nun treten aber praktisch stets Abweichungen von der Ebenheit und Parallelität auf. Man muß deshalb die Länge  $l$  an einer bestimmten Stelle ermitteln. Zu diesem Zweck ist der Begriff des Mittenmaßes eingeführt.

Nun könnte aber noch ein Zweifel darüber sein, welche Meßfläche,  $A$  oder  $A'$ , man als obere nimmt, da dies von Fall zu Fall wechseln wird, wodurch man zwei verschiedene Mittenmaße  $m$  oder  $m'$  erhalten würde. Diese Schwierigkeit umgeht man, wenn man als obere Meßfläche stets die auf S. 86 angegebene nimmt, d. h. die beschriftete bzw. diejenige, die rechts von der aufrecht stehenden Schrift liegt. Im übrigen ist aber auch der Unterschied zwischen  $m$  und  $m'$  praktisch bedeutungslos. Bilden die beiden Meßflächen  $A$  und  $A'$  den Winkel  $\varphi$  miteinander, so ist

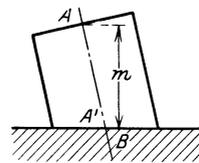


Abb. 80. Mittenmaß des Endmaßes.

$$m' - m = m \cdot (1 - \cos \varphi) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \varphi^2.$$

Der ungünstigste Fall tritt bei den größten Endmaßen ein. Für ein solches mit  $m = 3000$  mm ist nach der unten folgenden Tabelle die zulässige Unparallelität  $\pm 1,2 \mu$ , also bei einer Breite der Meßfläche von 9 mm (diese ist gewählt, um die ungünstigsten Verhältnisse zu haben):

$$\varphi = \frac{1,2 \cdot 10^{-3}}{4,5} = 2,7 \cdot 10^{-4}$$

und somit

$$m' - m = \frac{1}{2} \cdot 7,3 \cdot 10^{-8} \cdot 3 \cdot 10^6 = 0,11 \mu,$$

was bei diesem großen Maß (bei dem  $m$  um  $\pm 15,2 \mu$  schwanken darf) völlig zu vernachlässigen ist. Ganz entsprechend liegen die Verhältnisse bei den anderen Längen.

Maß an beliebiger Stelle der Meßfläche (Abb. 81):  $b$  ( $b_1, b_2$ ) ist die Länge des Lotes von einem beliebigen Punkte der Meßfläche  $A$  auf die an die andere Meßfläche  $A'$  angesprengte (angeschobene) Ebene  $B$ .

Größte Abweichung des Maßes an beliebiger Stelle der Meßfläche gegenüber ihrem Mittenmaß:  $f$  ( $f_1, f_2$ ) ist der Unterschied des Abstandes  $b$  eines beliebigen Punktes der Meßfläche  $A$  gegenüber dem Mittenmaß, also gegenüber dem Abstände  $m$  des Mittelpunktes derselben von der an die andere Meßfläche  $A'$  angesprengten (angeschobenen) Ebene  $B$ .

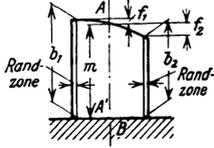


Abb. 81. Maß an beliebiger Stelle der Meßfläche.

Bei der Prüfung braucht außer  $m$  nur eine der beiden Größen  $f$  oder  $b$  gemessen zu werden, da sie durch die Beziehung  $b = m + f$  verbunden sind.

Erläuterung: Die Größe  $f$  stellt die Abweichungen der wirklichen Meßfläche von der durch ihre Mitte parallel zu  $B$  gelegten idealen Ebene dar, enthält also die Unebenheit und die Unparallelität, und kann positiv oder negativ sein.

Beschaffenheit der Meßflächen: Die Meßflächen der Endmaße rechteckigen Querschnitts müssen bei richtigem Aneinandersetzen der oben gegebenen Definition des „Ansprengens“ oder „Anschiebens“ genügen. Für Endmaße anderen als rechteckigen Querschnitts und ferner für Maße niedriger Genauigkeitsgrade, als sie nachstehend aufgeführt sind, werden Vorschriften für das Haften nicht gemacht; sie bleiben jeweiliger Vereinbarung mit dem Lieferer überlassen.

Die Summe aus den Abweichungen der Meßfläche von Ebenheit und Parallelität ist in der Bestimmung der Extreme von  $f$  bereits enthalten.

Randzone: Ein 1 mm vom Rande aus einsetzender Abfall ist zulässig und bleibt bei den Prüfungen außer Betracht.

Erläuterung: Diese Bestimmung ist notwendig, da es praktisch unmöglich ist, einen Abfall an den Kanten und einen allmählichen Übergang der Prismenflächen ineinander zu vermeiden [dieser wirkt sich auch günstig auf die Stabilität aus (siehe S. 76)].

Dünne Maße: Maße von weniger als 6 mm Dicke sind beim Prüfen an ein ebenes Stück von mindestens 12 mm Dicke anzusprenge oder anzuschieben.

Erläuterung: Bei dünnen Stücken treten infolge der nicht ausgeglichenen inneren Spannungen elastische Deformationen auf, die sich in Krümmungen der Meßflächen äußern. Diese verschwinden aber, wenn man das Endmaß an ein genügend dickes Stück ansprengt (siehe Abb. 112).

#### Genauigkeit.

Bei graphischer Auftragung folgen die Richtstrahlen, innerhalb deren die zugelassenen Abweichungen des Mittenmaßes liegen, aus den Gleichungen:

für Genauigkeitsgrad I:  $\Delta m = \pm \left( 0,2 + \frac{\text{Solllänge}}{200000} \right) \mu$ ,

„ „ II:  $\Delta m = \pm \left( 0,5 + \frac{\text{Solllänge}}{100000} \right) \mu$ .

Grenzen der zulässigen Abweichungen in  $\mu$  ( $1 \mu = 1/1000 \text{ mm}$ ).

Länge des Endmaßes $l$ mm	Genauigkeitsgrad I		Genauigkeitsgrad II	
	Mittenmaß $\Delta m$ $\pm$	Größte Abweichung des Maßes an beliebiger Stelle der Meßfläche gegenüber ihrem Mittenmaß $f \pm$	Mittenmaß $\Delta m$ $\pm$	Größte Abweichung des Maßes an beliebiger Stelle der Meßfläche gegenüber ihrem Mittenmaß $f \pm$
0,1	0,20	0,20	0,5	0,35
10	0,25	0,20	0,6	0,35
20	0,30	0,20	0,7	0,35
30	0,35	0,25	0,8	0,4
40	0,40	0,25	0,9	0,4
50	0,45	0,25	1,0	0,4
60	0,50	0,25	1,1	0,4
70	0,55	0,25	1,2	0,4
80	0,60	0,25	1,3	0,4
90	0,65	0,25	1,4	0,4

Fortsetzung der Tabelle von S 96.

Länge des Endmaßes $l$ mm	Genauigkeitsgrad I		Genauigkeitsgrad II	
	Mitten- maß $\Delta m$ $\pm$	Größte Abweichung des Maßes an beliebiger Stelle der Meßfläche gegenüber ihrem Mittenmaß $f \pm$	Mitten- maß $\Delta m$ $\pm$	Größte Abweichung des Maßes an beliebiger Stelle der Meßfläche gegenüber ihrem Mittenmaß $f \pm$
100	0,7	0,3	1,5	0,5
150	0,9	0,3	2,0	0,5
200	1,2	0,3	2,5	0,5
300	1,7	0,3	3,5	0,6
400	2,2	0,4	4,5	0,6
500	2,7	0,4	5,5	0,7
600	3,2	0,4	6,5	0,8
700	3,7	0,5	7,5	0,8
800	4,2	0,5	8,5	0,9
900	4,7	0,5	9,5	1,0
1000	5,2	0,6	10,5	1,0
1500	7,7	0,7	15,5	1,3
2000	10,2	0,9	20,5	1,7
3000	15,2	1,2	30,5	2,3

Für Endmaße mit Zwischenlängen gelten die Werte der nächst kleineren Stufe.

Erläuterung: In vorstehender Tabelle sind die zulässigen  $\Delta m$  und  $f$  so festgesetzt, wie sie für die Praxis zur Kontrolle der Lehren und sonstiger Geräte notwendig sind. Ist eine darüber hinausgehende Genauigkeit ganz ausnahmsweise erforderlich, so sollte man nicht engere Garantien verlangen, sondern die vorhandenen Abweichungen bestimmen und als Korrekturen berücksichtigen. In einem solchen Falle sollte man vor allem Wert auf gute Meßflächen (in bezug auf Ebenheit und Parallelität) legen und weniger auf die genaue Innehaltung des Maßes, da sich dann die doch zu beachtenden Korrekturen des Maßes wesentlich genauer ermitteln lassen.

Die Tabelle ist nach unten auf 0,1 mm als das kleinste ausführbare Endmaß, nach oben auf 3 m beschränkt, da die Stahlwerke aus herstellungstechnischen Gründen keine wesentlich längeren Stangen liefern.

Niedere Genauigkeitsgrade, wie sie zur Verwendung in der Werkstatt völlig ausreichend sind, sind nicht genormt.

Die typographischen Endmaße werden nach Genauigkeitsgrad II ausgeführt (1).

Bezugstemperatur: 20° C.

Meßschnäbel: Bei einem Meßschnabel, der in bestimmter Lage seiner Flächen zueinander ein Maß verkörpert, ist das zulässige Abmaß von diesem mit  $\Delta b = \pm (\Delta m + f)$  in der gleichen Genauigkeit einzuhalten, wie es einem Endmaß gleicher Meßlänge in dem betreffenden, vereinbarten Genauigkeitsgrade entspricht. Zwei zusammengesetzte Meßschnäbel haben die gleiche Maßgenauigkeit wie zwei zusammengeschobene Meßschnäbel, entsprechende Endmaße.

Erläuterung: Diese Ausführungen sollen sagen, daß für einen Meßschnabel, soweit er ein bestimmtes Maß darstellt (wie z. B. ein Plan- oder ein Halbzylinderschnabel) sinngemäß die Festsetzungen für Endmaße gelten. Zwei Schnäbel zusammen verhalten sich genau so wie 2 Endmaße, d. h. ihre Fehler addieren sich. Der Krümmungshalbmesser an sich ist nicht wesentlich, da die Schnäbel doch immer zum Ausmessen von Bohrungen mit größerem Halbmesser benutzt werden. Ihr Maß  $m$  ist gegeben durch den senkrechten Abstand ihres am weitesten von der ebenen Fläche entfernten Punktes, gemessen in ihrer halben Länge. Fast immer wird für Meßschnäbel der Genauigkeitsgrad II ausreichen.

Für andere Schnäbel, wie solche mit Messerschneiden, Zentrier- und Anreißspitzen, sind keine Vorschriften gegeben, da sie kein allgemeines Interesse haben oder für Zwecke nachgeordneter Genauigkeit gebraucht werden.

Anwendungsgebiete der verschiedenen Genauigkeitsgrade:

Genauigkeitsgrad I: Als Einstellmaße für Meßmaschinen, Fühlhebel und sonstige Prüfmeßgeräte aller Art, zur Kontrolle von Prüfmaßen, Prüflehren, Edelpassungslehren usw.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Prüflehren für Rachenlehren sind Meßscheiben oder Meßstäbe mit Zylinderflächen,

Genauigkeitsgrad II: Zur Prüfung von Arbeitslehren (Feinpassung usw.), zum Prüfen und Einstellen von Arbeitsmeßgeräten, für Arbeitsmaße (Edel- und Feinpassung), zur Anwendung im Vorrichtungsbau usw.<sup>1</sup>

Niedere Genauigkeitsgrade (die nicht genormt sind): Für Zwecke geringerer Genauigkeitsanforderungen, für Arbeitsmaße, zur Verwendung im Vorrichtungsbau, zum Anreißen, zum Einstellen von Werkzeugmaschinen usw.

Erläuterung: Die Anwendungsgebiete sind so ausgewählt, daß die garantierte Genauigkeit der Endmaße stets ausreicht.

#### Gestaltung.

a) Endmaße mit rechteckigem Querschnitt: Die Endmaße bis einschließlich 10 mm Nennmaß haben den Querschnitt  $30 \times 9$  mm, die Endmaße über 10 mm Nennmaß haben den Querschnitt  $35 \times 9$  mm. Die Querschnittsabmessungen sind Größtmaße; die zulässigen Abweichungen sind negativ.

Länge des Endmaßes $l$ mm	Grenzen der zulässigen Abweichungen der Querschnittsabmessungen in mm für	
	Genauigkeitsgrad I	Genauigkeitsgrad II
0,1	0,10	0,20
500	0,15	0,25
1000	0,20	0,30
2000	0,25	0,40
3000	0,30	0,50

Für Endmaße mit Zwischenlängen gelten die Werte der nächst kleineren Stufe.

Denkt man sich auf der an einer beliebigen der beiden Meßflächen angesprengten Ebene zwei konaxiale, parallele, rechtwinklige Prismen mit den zulässigen größten und kleinsten Querschnittsmaßen errichtet (Abb. 82), so muß das an jene Ebene angesprengte Endmaß so eingebracht werden können, daß jeder Punkt der Außenflächen des Endmaßes in dem zwischen den beiden Hüllprismen liegenden Zwischenraum bleibt.

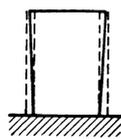


Abb. 82.  
Gestaltsfehler  
rechteckiger  
Endmaße.

Erläuterung: Der Querschnitt der Maße ist so gewählt, daß sich sehr angenähert der gleiche Querschnitt für zylindrische (siehe unten) und für rechteckige Endmaße ergibt. Nun ist für zylindrische Endmaße von 20 mm Durchmesser  $Q = 314,16$  mm<sup>2</sup>. Damit dieser Wert auch bei den rechteckigen Endmaßen bei der allgemein eingeführten Höhe  $h = 9$  mm vorhanden ist<sup>2</sup>, muß die Breite  $b = \frac{Q}{9} = 35$  mm sein; bei den rechteckigen

Endmaßen unter 10 mm Länge ist indessen aus herstellungstechnischen Gründen hiervon abgegangen, zumal ihrer kurzen Länge wegen die elastische Verkürzung durch den Meßdruck auch beim Querschnitt  $9 \times 30$  mm<sup>2</sup> stets zu vernachlässigen ist.

Die Toleranz für den Querschnitt hat sich aus folgender Überlegung ergeben: Man verlangt beim Genauigkeitsgrad I, daß sich für ein 1-m-Endmaß bei einem (praktisch allerdings nicht vorkommenden) Meßdruck von 10 kg kein größerer Unterschied in der elastischen Verkürzung als  $0,05 \mu$  ergibt. Nun ist die Verkürzung

$$\delta l = \frac{l \cdot P}{E \cdot Q} = \frac{100 \cdot 10}{2 \cdot 10^6 \cdot 3,14} = 16 \cdot 10^{-5} \text{ cm,}$$

und

$$d \delta l = \frac{l \cdot P}{E \cdot Q^2} \cdot dQ = \delta l \cdot \frac{dQ}{Q}$$

oder

$$100 \cdot \frac{dQ}{Q} = 100 \cdot \frac{d \delta l}{\delta l} = \frac{100 \cdot 0,5 \cdot 10^{-5}}{16 \cdot 10^{-5}} \sim 3.$$

Nun ist ferner

$$Q = b \cdot h$$

$$dQ = h \cdot db + b \cdot dh = (h + b) \cdot ds,$$

<sup>1</sup> Prüflöhren für Rachenlehren sind Meßscheiben oder Meßstäbe mit Zylinderflächen.

<sup>2</sup> Diese ist notwendig, um Beschädigungen der Meßflächen der Meßmaschinen zu vermeiden, die meist einen Durchmesser von 8 mm haben.

wenn man  $db = dh = ds$  setzt, und somit

$$ds = \frac{dQ}{(h+b)} \sim \frac{10}{44} \sim 0,2 \text{ mm.}$$

Entsprechend der größeren Herstellungsgenauigkeit der kleineren und der geringeren Herstellungsgenauigkeit der größeren Endmaße sind dann die Werte für  $ds$  abgestuft und für den Genauigkeitsgrad II 100 bis 50% größere Werte angesetzt.

Die zulässigen Abweichungen sind nur negativ (also nach dem Prinzip der Einheitswelle) gewählt, damit die Endmaße auf jeden Fall in die Halter hineingehen.

Sehr schwer war es, alle die anderen Angaben in bezug auf Ebenheit, Parallelität und Senkrechtstellung der Seitenflächen zu den Meßflächen in eine knapp gehaltene Forderung zusammenzufassen. Die Einschließung des wirklichen Endmaßes in die beiden in der DL-Norm näher erläuterten konaxialen Prismen dürfte eine recht glückliche Lösung dieser Schwierigkeit darstellen.

Praktisch könnte man zur Kontrolle der zulässigen Größtform so vorgehen, daß man auf eine größere Platte 2 rechte Winkel und senkrecht zu ihrer Ebene zwei andere rechte Winkel in den beiden größt zulässigen Entfernungen aufstellt und sieht, ob sich das Endmaß dazwischen bringen läßt. Für die allgemeine Prüfung muß man die Abstände der Prismenflächen voneinander sowie die von ihnen eingeschlossenen Winkel in verschiedenen zu den Meßflächen parallelen Querschnitten bestimmen und sehen, ob das Endmaß zeichnerisch vollständig zwischen die beiden aufgezeichneten Hüllprismen zu liegen kommt (die vorher angegebene Prüfung für die Größtform fällt dann natürlich weg).

Meßschnäbel. Der Abstand der beiden größeren der Seitenflächen der Schnäbel soll innerhalb der Grenzen 9,00 und 8,95 mm bleiben.

Zwei auf der an der Haftfläche des Schnabels anliegenden Ebene senkrecht orientierte, unter sich parallele Ebenen, die an den beiden größeren Seitenflächen des Schnabels anliegen und möglichst parallel zu ihnen verlaufen, sollen einen Abstand haben, der die Grenzen 9,00 und 8,95 mm nicht überschreitet (Abb. 83).

Erläuterung: Bei den Meßschnäbeln ist somit nur der Abstand der beiden größeren Seitenflächen festgelegt. Seine Toleranz durfte nur gleich der Hälfte der bei Endmaßen entsprechender Größe gestatteten gewählt werden, um bei ihren größeren Längen (wie sie für Löcher bis etwa 100 mm Tiefe erforderlich sind), ein Verkreuzen nach Möglichkeit zu verhindern; dasselbe gilt auch für weniger tiefe Löcher, um nicht jedesmal gezwungen zu sein, die Schnäbel auszurichten.

Die sonstigen Forderungen bezüglich Ebenheit, Parallelität und Senkrechtstellung ihrer größeren Seitenflächen zu der angeschobenen Ebene sind entsprechend wie bei den Endmaßen gefaßt, nur treten hier an Stelle der Hüllprismen 2 zueinander parallele Ebenen. Die Prüfung erfolgt entsprechend wie bei den Endmaßen.

Endmaßhalter mit unter sich an den Enden fest verbundenen Seitenwangen sollen einen Abstand der Seitenwangen haben, der innerhalb der Grenzen 9,05 und 9,10 mm liegt. Auf die ganze Länge der Halter muß sich ein entsprechend langes rechtwinkliges Prisma, das eine Abmessung in der kleinen Querschnittsachse von 9,05 mm hat, einführen lassen.

Erläuterung: Bei den Endmaßhaltern steht die untere Stirnfläche fest und ist die obere Druckfläche genügend gelenkig beweglich, so daß die eingebrachten Endmaßkombinationen sicher gehalten werden. Da infolge der zulässigen Abweichungen der Seitenfläche der Endmaße von der Senkrechten zu ihren Meßflächen die Querabmessungen einer Kombination über das für das einzelne Endmaß gültige Größtmaß von 9,00 mm hinausgehen können, so ist das Kleinstmaß des Abstandes der Seitenwangen zu 9,05 mm angesetzt. Sollten bei längeren Endmaßkombinationen größere Abweichungen auftreten, so werden sie durch die Elastizität der Halterwangen ausgeglichen, zumal ja auch noch für ihren Abstand eine Toleranz von + 0,05 mm zugelassen ist. Die Prüfung erfolgt dadurch, daß sich ein rechtwinkliges Prisma von der für den betreffenden Halter möglichen Größtlänge und 9,05 mm Dicke muß einführen lassen, während ein größeres Prisma von 9,10 mm Dicke an keiner Stelle hineingehen darf, wobei die Halterwangen gegen seitliches Ausweichen zu schützen sind.

b) Endmaße mit rundem vollem Querschnitt: Der Endmaßkörper soll einen Durchmesser haben, der innerhalb der Grenzen von 20,0 und 19,5 mm liegt. Denkt man sich auf die an einer beliebigen der beiden Meßflächen angeschobenen Ebene zwei

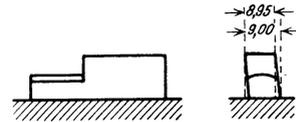


Abb. 83. Gestaltsfehler der Meßschnäbel.

konaxiale senkrechte Zylinder mit dem zulässigen größten und kleinsten Durchmesser errichtet (Abb. 82), so muß das an jene Ebene angeschobene Endmaß so eingebracht werden können, daß jeder Punkt seines Außenmantels in dem zwischen den beiden Hüllzylindern befindlichen Zwischenraum bleibt.

An den günstigsten Auflagepunkten<sup>1</sup> des Endmaßes wird zweckmäßig zur Lagerung und Führung des Endmaßes je ein Bund vorgesehen, dessen Durchmesser in den Grenzen von 21,00 und 20,99 mm liegt. Aus Herstellungsgründen kann je ein weiterer Bund gleichen Durchmessers nahe den beiden Enden des Endmaßes vorhanden sein.

Diese Vorschriften gelten nur für runde volle Endmaße von mindestens 100 mm Länge, nicht jedoch für kurze runde Endmaße und nicht für runde Einstellmaße für Mikrometer usw.

Erläuterung: Läßt man auch bei den Endmaßen mit rundem Querschnitt eine Querschnittsverminderung um 5% zu, wie etwa bei den rechteckigen Endmaßen des Genauigkeitsgrades II, so bestimmt sich das zulässige Untermaß des Durchmessers  $D$  aus

$$Q = \pi \cdot \frac{D^2}{4},$$

$$dQ = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot D \cdot dD,$$

$$100 \cdot \frac{dQ}{Q} = 200 \cdot \frac{dD}{D}$$

oder

$$dD = 5 \cdot \frac{D}{200} = 0,5 \text{ mm}.$$

Da diese Toleranz leicht einzuhalten ist, kann sie auch für größere Längen gewählt werden.

Bezüglich der Ausführung des Mantels sind sinngemäß die Vorschriften für rechteckige Endmaße übernommen. Die Prüfung erfolgt für die Größtform allein so, daß man sieht, ob sich das Endmaß in ein auf der angeschobenen Fläche senkrecht stehendes Rohr einbringen läßt, dessen Innendurchmesser gleich dem zulässigen Größtmaß ist. Für die allgemeine Prüfung muß man aus der Gradlinigkeit der Mantellinien und dem Durchmesser an verschiedenen Stellen zeichnerisch feststellen, daß alle Punkte zwischen den beiden Hüllzylindern bleiben (wobei dann die besondere Kontrolle der Größtform überflüssig ist).

Während man kleinere Endmaße mittels Klammern in der Hand hält, muß man größere geeignet auflegen, was nach den früheren Ausführungen in den günstigsten Punkten zu geschehen hat, da dann die Meßflächen parallel zueinander und senkrecht zur Achse stehen. Um jene Punkte zu kennzeichnen, ist die Anbringung von Bunden vorgeschlagen, denen man einen Durchmesser von 21 mm gibt, weil sich kleinere Absätze als 0,5 mm nicht empfehlen. Da man diese kurzen Bunde leicht genau herstellen kann, ist nur eine Toleranz von  $-0,01$  mm gegeben. Man hat damit den Vorteil einer sehr genauen Führung, die sich auf die ganze Länge nicht erzielen läßt.

Die Bunde an den Enden sind zugelassen, um eine sichere Führung bei der Herstellung zu haben.

Da die Meßflächen der Meßmaschinen meist 8 mm Durchmesser haben, mußten die Endmaße mit rundem Querschnitt mindestens 9 mm Durchmesser erhalten, um nicht jene Meßflächen zu beschädigen. Ein Absetzen auf diesen Durchmesser, wie es durch kegligen Übergang geschieht, ist aber nicht vorgeschrieben, zumal der volle Querschnitt bei 20 mm Durchmesser doch gewisse Vorteile bietet.

c) Endmaße mit anderem Querschnitt: Bei Endmaßen anderer Querschnitte soll der Flächeninhalt des Querschnitts des Endmaßkörpers  $315 \text{ mm}^2$  nicht überschreiten. Die zulässige Abweichung ist negativ; sie kann bis 5% bei Genauigkeitsgrad I und bis 8% bei Genauigkeitsgrad II betragen. Im übrigen gelten für ihre Gestaltung sinngemäß die vorher für rechteckige Endmaße angegebenen Vorschriften.

Erläuterung: Es können ruhig 8% zugelassen werden, da sich, wie früher erwähnt, bei einem Meßdruck von 1 kg eine Länge von 1 m nur um  $0,16 \mu$  ändert.

<sup>1</sup> Die günstigsten Punkte liegen um  $0,2113 \cdot l$  ( $l$  die Endmaßlänge) von den beiden Enden entfernt. Bei Unterstützung in ihnen stehen die Meßflächen senkrecht zu der ihre Mittelpunkte verbindenden Geraden (der Achse des Endmaßes im undeformierten Zustand).

Man hat sich in Deutschland dahin entschieden, mit der Genauigkeit nicht unter

$$(0,2 + 5 \cdot 10^{-3} \cdot L) \mu \quad (L \text{ in mm})$$

herunterzugehen, obwohl eine größere Genauigkeit durch Aussuchen ohne weiteres zu erreichen wäre. Gegenüber ausländischen, anscheinend genaueren Anpreisungen ist immer eine gewisse Vorsicht geboten, da diese sich meist stillschweigend nur auf das Mittenmaß beziehen, während erhebliche Gestaltsfehler  $f$  vorhanden sein können. Dazu kommt noch, daß selbst die angegebenen Genauigkeiten, auch unter Beschränkung auf das Mittenmaß, häufig nur auf dem Papier stehen, da als Abweichung nur der Unterschied zwischen dem beobachteten Wert und dem Sollmaß angegeben wird, ohne zu berücksichtigen, daß dazu noch die Beobachtungsfehler, die Fehler der Methode und des Meßgerätes, sowie die unvermeidlichen Einflüsse von Temperatur und Ausdehnungskoeffizient hinzukommen können. Gelegentlich sind sogar die angebotenen (angeblichen) Garantien von der Größenordnung der Meßfehler oder gar kleiner.

Für alle praktisch vorkommenden Fälle reicht auch die in DIN 861 angegebene Genauigkeit aus. Wie schon früher erwähnt, soll man im Notfalle die mit der nötigen Sorgfalt bestimmten Korrekturen in Rechnung setzen (siehe auch Abschnitt III D).

Für die Beschriftung der Endmaße ist in DIN 1813 festgesetzt (6), daß sie bis 5 mm auf der Meßfläche, bei größeren Endmaßen auf einer Seitenfläche erfolgt; sie enthält von oben nach unten: die Firma, das Maß in mm, 1 oder 2 wagerechte Striche zur Angabe des Genauigkeitsgrades und die Bezugstemperatur  $20^0$  (Abb. 84). Nach dem Einätzen der Beschriftung müssen die Endmaße sehr sorgfältig gereinigt werden, da sich sonst dünne Rostschichten bilden, die das Maß bis zu etwa  $5 \mu$  fälschen können.

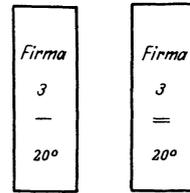


Abb. 84. Beschriftung der Endmaße.

Für den nicht genormten Gütegrad III nimmt man etwa die links unten stehenden Querschnitte.

Für ihre Genauigkeit wird man mit den rechts unten stehenden Werten rechnen können, die aus der Richtlinie  $(1 + 20 \cdot 10^{-3} \cdot L) \mu$  folgen, und die für das Mittenmaß  $m$  doppelt, für den Gestaltsfehler  $f$  5 mal so groß als beim Genauigkeitsgrad II sind,

Länge mm	Querschnitt mm <sup>2</sup>	Länge mm	$m$ $\pm \mu$	$f$ $\pm \mu$
bis 20	$8 \times 20$	bis 50	2	2
> 20 „ 40	$15 \times 20$	> 50 „ 100	3	2
> 40 „ 65	$20 \times 25$	> 100 „ 200	5	2
> 65 „ 100	$20 \times 30$	> 200 „ 300	7	3
		> 300 „ 400	9	3
		> 400 „ 500	11	3

## B. Messung der Endmaße durch Vergleich mit Strichmaßen.

Ursprünglich bestand die einzige Möglichkeit zur Messung der Endmaße in ihrem Vergleich mit einem Strichmaß mittels Komparators. Hierbei tritt nun eine Schwierigkeit dadurch auf, daß die obere Kante der Meßflächen, auf die man das Mikroskop allein einstellen kann, niemals eine geometrisch scharfe Linie ist, sondern mit Abrundung in die Seitenfläche übergeht. Nur bei sehr guter Bearbeitung ist es so möglich, die Länge des Endmaßes bis auf Bruchteile von  $1 \mu$  zu bestimmen (8b). Es bleibt aber der Übelstand, daß man die Länge des Endmaßes in seiner oberen Fläche und nicht in seiner neutralen Achse ermittelt. Nach einem Vorschlage von Fizeau kann man die geschilderten Mißstände dadurch vermeiden, daß man der Meßfläche  $f$  in Höhe der neutralen Achse eine feine Spitze oder Schneide  $S$  nähert (Abb. 85) und den Faden des Beobachtungsmikroskopes auf die Mitte zwischen  $S$  und seinem Spiegelbilde  $S'$

einstellt, die nach den Spiegelgesetzen mit der Fläche  $f$  zusammenfällt. Dieses Verfahren ist später dadurch verbessert, daß man über die Meßfläche 2 senkrechte feine Fäden  $F$  und  $F'$  (Abb. 86) und senkrecht über sie einen dritten

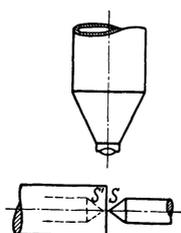


Abb. 85. Messung von Endmaßen nach Fizeau.

Faden  $F''$  spannt, dessen zwischen  $F$  und  $F'$  gelegener Teil an die Stelle der Spitze  $S$  tritt.

Diese Methode leidet aber an einem prinzipiellen Fehler; sie setzt nämlich voraus, daß die beiden Lichtlinien, bzw. die Schneidebenen  $ss$  (Abb. 87) genau in der Bildebene auf der Strichplatte abgebildet werden, das Mikroskop also sehr gut fokussiert ist. Ist dieses nun aber auf die Ebene  $E_1E_1$  oder  $E_2E_2$  eingestellt, so tritt an Stelle der Lichtlinie die kleine Fläche  $p_1q_1$  bzw.  $p_2q_2$ ,

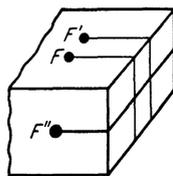


Abb. 86. Messung von Endmaßen nach der verbesserten Fizeauschen Methode.

die in dieser Ebene durch die begrenzenden Strahlen herausgeschnitten wird. Sie werden gebildet durch den längs der Meßfläche verlaufenden Strahl  $tt$  und den äußersten noch die Eintrittspupille  $o_1o_2$  des Objektivs durchsetzenden Strahl  $s_1$  (bzw.  $s_2$ ), der durch Reflexion im Punkte  $s$  entsteht (das gilt auch für gekrümmte Flächen, z. B. Zylinder, da man ein kleines Stück der gekrümmten Fläche durch seine durch  $s$  gelegte Tangentialebene ersetzt denken kann). Den Faden

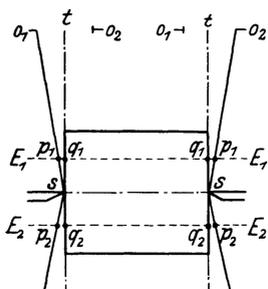


Abb. 87. Fehler der Fizeauschen Methode.

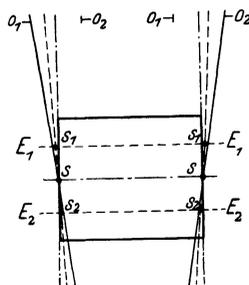


Abb. 88. Fehler der Fizeauschen Methode.

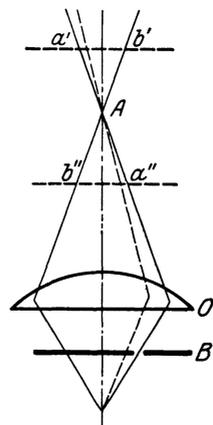


Abb. 89. Einfluß der Fokussierung auf die Messung.

des Mikroskopes stellt man dann auf den Schwerpunkt der Flächen  $p_1q_1$  bzw.  $p_2q_2$  ein. Die Schwerlinie des Kegels mit  $s$  als Spitze und der aus  $o_1o_2$  herausgeschnittenen Halbkreisfläche als Basis liegt auf der Linie  $s_2s_1$  (Abb. 88). Durch die Einstellung auf  $s_1$  bzw.  $s_2$  mißt man also bei Hebung des Mikroskopes zu groß, bei Senkung zu klein (3).

Die richtige Fokussierung kann man nach Cornu bei aplanatischen Objektiven daran erkennen, daß man eine Spaltblende  $B$  vor dem Objektiv  $O$  verschiebt (Abb. 89). Dabei bleibt das Bild nur dann unbeweglich stehen, wenn es sich in der Bildebene  $A$  befindet, während es sich andernfalls von  $a'$  nach  $b'$  oder von  $a''$  nach  $b''$  hin verschiebt.

Nun hängt aber die Lage der Einstellebene noch von der Neigung der in das Mikroskop eintretenden Strahlen ab, da sich die sphärische Aberration der optischen Teile nicht zugleich für alle Strahlen beheben läßt. Deshalb wird man die Ungenauigkeit optischer Messungen von Endmaßen etwa 5mal größer als bei Strichmaßen, also zu etwa  $\pm 1 \mu$  ansetzen können, doch sind auch Abweichungen bis zu  $3,5 \mu$  beobachtet (2).

Man hat deshalb diese Methode völlig aufgegeben und führt den Vergleich mit einem Strichmaß unter Zuhilfenahme von Anschiebezylindern durch. Man legt gegen die Meßflächen des Endmaßes 2 Zylinder (Abb. 90), die je eine Marke

tragen, sichert den Anlagedruck durch Gewichte, Hebel oder gespannte Gummischnüre und ermittelt die Länge  $L + A + B$  auf einem geeigneten Komparator in derselben Weise wie beim Vergleich von Strichmaßstäben miteinander. Dann bringt man die beiden Zylinder in unmittelbare Berührung und ermittelt so die Größe  $A + B$ . Bezeichnet man die an der Berührungsfläche je zweier Stücke auftretender Abweichungen von der geometrischen Länge  $L$  mit  $Z$ , so ermittelt man streng genommen in den beiden Fällen die Längen  $L + A + B + 2 \cdot Z$  bzw.  $A + B + Z$ , so daß also die Differenz die Größe  $L + Z$  ergibt, die nach DIN 861 als Länge des Endmaßes gilt.



Abb. 90. Messung von Endmaßen mit Anschiebezylindern.

So einfach diese Methode erscheint, so erfordert doch auch sie, um zuverlässige Ergebnisse zu liefern, eine Reihe von Vorsichtsmaßnahmen. Fallen nämlich die Achsen der beiden Zylinder und des Endmaßes nicht genau in dieselbe Gerade, so mißt man die einzelnen Strecken  $L, A, B$  in der Projektion, was indessen nur Fehler zweiter Ordnung ergibt. Ein weiterer Fehler  $\delta\lambda$  erster Ordnung rührt aber daher, daß sich die Endflächen von Maß und Zylindern nur in einer (mehr oder minder tief eindringenden) Kante außerhalb der neutralen Achse berühren. Nach Abb. 91 ist

$$\delta\lambda = \frac{1}{2} \cdot d \cdot \varphi.$$

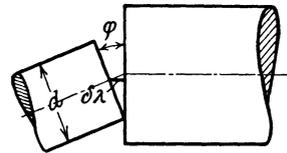


Abb. 91. Fehler bei Nichtparallelität der Flächen von Endmaß und Zylinder.

Da der Fehler auf beiden Seiten auftritt, so ist der Gesamtfehler

$$\delta l = d \cdot \varphi.$$

Derselbe Fehler ergibt sich auch, wenn zwar die Achsen in eine Gerade fallen, die Meßflächen aber nicht senkrecht zur Achse liegen. Da er mit dem Durchmesser  $d$  der Zylinder wächst, empfiehlt es sich, sie an den Enden auf 1 bis 2 mm abzusetzen. Damit  $\delta l$  kleiner als  $0,1 \mu$  wird, darf  $\varphi$  bei verschiedenen Durchmessern folgende Werte nicht überschreiten:

$d =$	1	2	5	mm
$\varphi <$	$10 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	
	$\sim 20$	10	4	Sek.

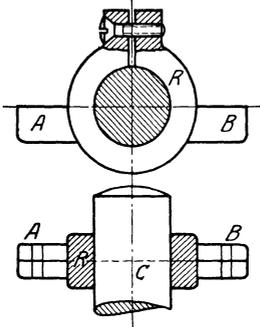


Abb. 92. Messung von Endmaßen mit Anschiebezylindern nach Pérard.

Zu klein darf man  $d$  aber nicht wählen, da sonst der spezifische Meßdruck unzulässig groß wird.

Um diesen Fehler zu vermeiden, hat man die Enden der Anschiebezylinder kugelförmig gestaltet und sie ferner so ausgebildet, daß sich die Einstellmarken in ihrer neutralen Achse befinden. Dazu legt man um sie einen Ring  $R$  (Abb. 92) mit zwei seitlichen Fortsätzen  $A$  und  $B$ , deren Oberflächen in der neutralen Schicht liegen, und justiert sie so, daß die Verlängerungen der Marken durch den Kugelmittelpunkt  $C$  gehen (8). Die Zylinder selbst werden mit zwei auf genau

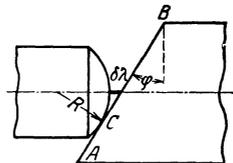


Abb. 93. Fehler durch schiefe Meßflächen.

gleichen Durchmesser abgedrehten Ringen in einem sauber gearbeiteten V-Prisma aufgenommen oder justierbar aufgehängt. Auch bei dieser Methode ist indessen Voraussetzung, daß die Meßflächen senkrecht zur Achse des Endmaßes stehen. Bildet die Fläche  $AB$  (Abb. 93) indessen damit den Winkel  $\varphi$ , so daß die Berührung der Kugelfläche in  $C$  erfolgt, so tritt auf jeder Seite ein Meßfehler der Größe

$$\delta\lambda = \frac{R}{\cos\varphi} - R = R \left( \frac{1}{1 - \frac{1}{2} \cdot \varphi^2} - 1 \right) = \frac{1}{2} R \cdot \varphi^2$$

und ein Gesamtfehler

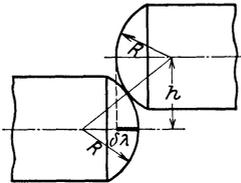
$$\delta l' = R \cdot \varphi^2 = \frac{1}{2} \cdot D \cdot \varphi^2$$

auf, der also mit wachsendem Krümmungshalbmesser zunimmt. Damit der Fehler  $\delta l'$  nicht  $0,1 \mu$  übersteigt, muß für

$$\begin{array}{rcc} D = & 1 & 10 & 100 \text{ mm} \\ \varphi < & 14 \cdot 10^{-3} & 4,5 \cdot 10^{-3} & 1,4 \cdot 10^{-3} \\ & \sim 50 & 15 & 5 \quad \text{Min.} \end{array}$$

sein.

Ferner ergibt sich ein zu kleiner Wert für die Strecke  $A + B$ , wenn die Achsen der beiden Anschiebezylinder nicht zusammenfallen, und zwar berechnet sich der Fehler  $\delta l'' = \delta \lambda$  nach Abb. 94 aus



$$2 \cdot R \cdot \cos \varphi = R + (R - \delta \lambda),$$

$$\delta l'' = 2 \cdot R \cdot (1 - \cos \varphi) = R \cdot \varphi^2 = \frac{h^2}{4 \cdot R} = \frac{h^2}{2 \cdot D}.$$

Demnach nimmt der Fehler  $\delta l''$  mit wachsendem Durchmesser ab. Damit er kleiner als  $0,1 \mu$  bleibt, muß für

$$\begin{array}{rcc} D = & 1 & 10 & 100 \text{ mm} \\ h < \sim & 15 & 45 & 140 \mu \end{array}$$

Abb. 94. Fehler durch Nicht-zusammenfallen der Achsen.

sein. Da die Beschränkung der Fehler  $\delta l'$  und  $\delta l''$  entgegengesetzte Forderungen in bezug auf die Größe des Durchmessers stellt, wird man zweckmäßig einen mittleren Wert wählen. Zu beachten ist noch, daß die Abplattung der Kugelflächen in den beiden Fällen verschieden ist, da sich das eine Mal Kugel und Ebene, das andere Mal 2 Kugeln berühren. Die Differenz der beiden Abplattungen ist nach den auf S. 65 gegebenen Formeln zu berechnen. Frei davon wird man, wenn man bei Bestimmung der Länge  $A + B$  nicht die Kugeln in unmittelbare Berührung bringt, sondern ein kleines Endmaß bekannter Länge dazwischen legt. Dabei fällt auch der von den verschiedenen Höhen der Achsen herrührende Fehler  $\delta l''$  fort (wofür aber ein weiterer Fehler  $\delta l'$  hinzukommen kann).

Nachdem es gelungen ist, die Endmaße so genau herzustellen, daß sie aneinander angesprengt werden können, benutzt man an Stelle der Anschiebezylinder besser Endmaße, die auf der oberen Fläche mit je einem Strich versehen sind. Damit ist das Endmaß in einen Strichmaßstab verwandelt und läßt sich mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,2 \mu$  messen (8a). Zweckmäßig wählt man die Höhe der angesprengten Hilfsendmaße nur halb so groß wie die des Prüflings, damit die Striche in seine neutrale Achse fallen.

Ohne Hilfsendmaße kommt man aus, wenn man nach Airy auf drei zu messenden Endmaßen nahe ihrer Mitte je einen Strich zieht. Sind ihre Abstände von den Enden  $a'$  und  $a''$ ;  $b'$  und  $b''$ ;  $c'$  und  $c''$  und legt man bei der Messung je 2 Endmaße, ohne sie umzudrehen, aneinander, so kann man die Strecken

$$\begin{array}{l} a' + b'' = A, \\ a' + c'' = B, \\ b' + c'' = C, \\ b' + a'' = D, \\ c' + a'' = E, \\ c' + b'' = F \end{array}$$

bestimmen. Aus diesen Gleichungen folgen die einzelnen Längen zu:

$$\begin{array}{l} L' = a' + a'' = B - C + D = E - F + A, \\ L'' = b' + b'' = D - E + F = A - B + C, \\ L''' = c' + c'' = F - A + B = C - D + E. \end{array}$$

Die Genauigkeit leidet aber darunter, daß sich jetzt jedes Maß als algebraische Summe aus drei Messungen ergibt, weshalb man den Fehler auf mindestens  $0,5 \mu$  ansetzen muß.

Will man Endmaße an das Prototyp anschließen, wie das früher stets geschehen mußte, so geht man zweckmäßig so vor, daß man ein Endmaß von 990 mm und zwei möglichst gleiche von 10 mm herstellt, was bequem bis auf  $0,02 \mu$  zu erreichen ist. Auf einer Seitenfläche der letzteren bringt man ungefähr in der Mitte je einen zur mikroskopischen Beobachtung geeigneten Strich an.

Ihre im übrigen unbekanntenen Entfernungen von den Meßflächen seien  $a, b, c, d$ . Nach Abb. 95 ermittelt man die Länge

$$l + b + c.$$

Dann dreht man die kleinen Endmaße um und findet jetzt

$$l + a + d.$$

Das Mittel aus beiden ist

$$L = l + \frac{1}{2} \cdot (a + b) + \frac{1}{2} \cdot (c + d)$$

oder, da  $a + b = c + d = \lambda$ ,

$$L = l + \lambda.$$

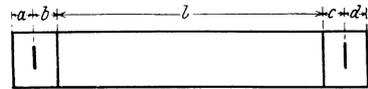


Abb. 95. Anschluß von Endmaßen an das Prototyp.

Es stellt also das Maß  $l$  mit einem angesprengten Hilfsmaß  $\lambda$  ein Endmaß von 1 m dar, dessen genaue Länge so durch Vergleich mit dem Prototyp bestimmt ist. Mit diesem Endmaß kann man dann mittels geeigneter Geräte (Fühlhebel, Interferenzverfahren) 2 gleiche Endmaße von 500 mm, mit diesem 5 unter sich gleiche Endmaße von 100 mm Länge usw. vergleichen (7).

Endmaße miteinander kann man auch mittels eines auf das größere Maß aufgelegten Haarlineals nach der Lichtspaltmethode vergleichen, wobei man unter Berücksichtigung der Abweichung der Linealkante von der Geraden eine Genauigkeit von  $2 \mu$  zu erreichen vermag (s. S. 330). Besser ist es, das Lineal über die ganz schwach eingefetteten Endmaße zu ziehen, wobei auf dem größeren eine helle Marke bleibt; es lassen sich so Unterschiede von  $0,25 \mu$  feststellen (6).

Die geschilderten Methoden haben heute, mit Ausnahme der letzten vielleicht, im wesentlichen nur noch historisches Interesse. Wir besitzen jetzt in dem schon von Babinet (1794 bis 1872) dafür vorgeschlagenen Interferenzverfahren wesentlich genauere und einfachere Mittel; diese sollen im nächsten Abschnitt eingehend behandelt werden.

Nun wird von den Endmaßen nicht nur die Innehaltung eines bestimmten (Mitten-)Maßes gefordert, sondern es werden auch gewisse Ansprüche bezüglich der Ebenheit und der Parallelität seiner Meßflächen gestellt. Für die Prüfung der Ebenheit bestand früher nur die Beobachtung des Lichtspaltes unter einem aufgelegten genauen Haarlineal. Besser ist schon das Durchschieben unter einem guten Fühlhebel (siehe weiter unten), wobei man auf eine Genauigkeit von etwa  $0,2 \mu$  kommen kann. Bei den heutigen Anforderungen ist aber auch hierfür die interferometrische Methode die einzig geeignete.

Das gilt auch für die Feststellung der Parallelitätsfehler. Da aber hierfür die Interferenzmethode nur bei kürzeren Stücken bis etwa 100 mm geeignet ist, so mußten daneben noch andere Methoden ausgebildet werden. Auch hier könnte man, ähnlich wie für die Prüfung der Ebenheit, so vorgehen, daß man die Länge des Maßes an verschiedenen Punkten, vor allem in der Mitte und in der Nähe der Ränder ermittelt (etwa mittels Fühlhebels), wodurch man zugleich die Summe der Abweichungen von der Ebenheit und der Parallelität erhält; so hat man früher Abweichungen bis  $3,6 \mu$  gefunden (9), während heute nach DIN 861 eine wesentlich höhere Genauigkeit gefordert und auch erfüllt wird.

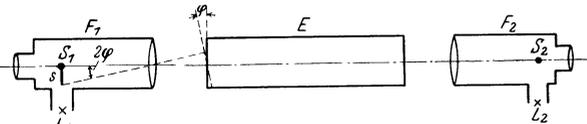


Abb. 96. Prüfung der Parallelität der Meßflächen mit 2 Fernrohren.

Sehr gut sind zur Bestimmung der Parallelität gewisse optische Methoden, wie sie zuerst von Galatzin (4) angegeben sind. Eine moderne Form dieses Verfahrens ist in Abb. 96 wiedergegeben (1). Zwei Autokollimationsfernrohre  $F_1$

und  $F_2$  haben in den beiden verdeckten Hälften ihres Gesichtsfeldes je einen Strich  $S_1$  und  $S_2$ , die von den Lampen  $L_1$  und  $L_2$  beleuchtet werden; in der freien Hälfte je einen Doppelfaden, der durch Okular-Schraubenmikrometer verschoben werden kann. In der Nullstellung sind die Fernrohre so eingerichtet, daß die Bilder der Fäden  $S_1$  und  $S_2$  genau zwischen die Doppelstriche des anderen Fernrohres fallen. Man bringt jetzt das Endmaß  $E$  dazwischen und justiert es so, daß z. B. das an seiner rechten Fläche reflektierte Bild von  $S_2$  auf den Doppelfaden von  $F_2$  fällt (lange Endmaße sind dabei in den günstigsten Punkten zu unterstützen). Eine etwaige Unparallelität der beiden Meßflächen macht sich dann dadurch bemerkbar, daß man den Doppelfaden im Fernrohr  $F_1$  um ein Stück  $s$  verschieben muß, um das reflektierte Bild von  $S_1$  wieder darin einzuschließen. Bei einer Brennweite  $f$  ist der Winkel  $\varphi$  zwischen den beiden Meß-

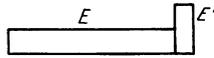
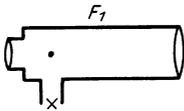


Abb. 97. Prüfung der Parallelität der Meßflächen mit 1 Fernrohr.

9 mm bedeutet dies eine Unparallelität um rund  $0,05 \mu$ , bei 35 mm Kante um  $0,18 \mu$ . Um die Abweichung in dieser Richtung zu erhalten, hat man nur beide Fernrohre um  $90^\circ$  um ihre Achse zu drehen. Da man nun aber leicht eine Meß-

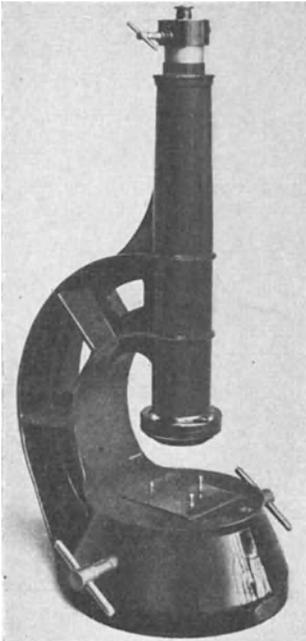


Abb. 98. Autokollimationsfernrohr zur Prüfung der Parallelität zweier Flächen.

genauigkeit von 0,2 Trommelteilen erhalten kann, so ist diese Messung außerordentlich genau. Zweckmäßig begnügt man sich in bezug auf die rechte Meßfläche nicht mit der angegebenen Justierung des Endmaßes, sondern ermittelt auch in dem Fernrohr  $F_2$  die Lage des reflektierten Fadenbildes mit seinem Okular-Schraubenmikrometer, da man sie so durch Wiederholung der Ablesungen und Mittelbildung genauer bestimmen kann. Mit Hilfe des an dem Endmaß vorbeigegangenen Lichtes kann man auch die unverändert gebliebenen Stellungen der beiden Fernrohre kontrollieren. Da man dabei die Objektive nur in bestimmten Randzonen ausnutzt, müssen sie frei von Zonenfehlern sein. Man kann auch mit einem Autokollimationsfernrohr  $F_1$  auskommen (Abb. 97), wenn man an die rechte Meßfläche von  $E$  ein kleines (überragendes) sehr gut ebenes Endmaß  $E'$  ansprengt und zugleich die von diesem und von der linken Meßfläche von  $E$  reflektierten Fadenbilder mittels des Fernrohres beobachtet (1).

flächen gegeben durch  $\varphi = \frac{1}{2} \cdot \frac{s}{f}$ . Kann

man  $s$  auf 1 Trommelteil des Mikrometers genau messen (also bei einer Steigung von  $0,5 \text{ mm}$  auf  $5 \mu$ ) und ist  $f = 500 \text{ mm}$ , so wird  $\varphi = 5 \cdot 10^{-6}$ , also rund 1 Sek. Bei einer Kantenlänge der Meßfläche von

9 mm bedeutet dies eine Unparallelität um rund  $0,05 \mu$ , bei 35 mm Kante um  $0,18 \mu$ . Um die Abweichung in dieser Richtung zu erhalten, hat man nur beide Fernrohre um  $90^\circ$  um ihre Achse zu drehen. Da man nun aber leicht eine Meß-

genauigkeit von 0,2 Trommelteilen erhalten kann, so ist diese Messung außerordentlich genau. Zweckmäßig begnügt man sich in bezug auf die rechte Meßfläche nicht mit der angegebenen Justierung des Endmaßes, sondern ermittelt auch in dem Fernrohr  $F_2$  die Lage des reflektierten Fadenbildes mit seinem Okular-Schraubenmikrometer, da man sie so durch Wiederholung der Ablesungen und Mittelbildung genauer bestimmen kann. Mit Hilfe des an dem Endmaß vorbeigegangenen Lichtes kann man auch die unverändert gebliebenen Stellungen der beiden Fernrohre kontrollieren. Da man dabei die Objektive nur in bestimmten Randzonen ausnutzt, müssen sie frei von Zonenfehlern sein. Man kann auch mit einem Autokollimationsfernrohr  $F_1$  auskommen (Abb. 97), wenn man an die rechte Meßfläche von  $E$  ein kleines (überragendes) sehr gut ebenes Endmaß  $E'$  ansprengt und zugleich die von diesem und von der linken Meßfläche von  $E$  reflektierten Fadenbilder mittels des Fernrohres beobachtet (1).

Ist man bereits im Besitz eines Stückes mit genau parallelen Flächen, so kann man gleichfalls mit einem Fernrohr auskommen, das man zweckmäßig senkrecht anordnet (Abb. 98). Man legt das Normalstück auf eine genaue Planplatte (die man sorgfältig vom Staub reinigt) oder auf drei kleine Kugeln, stellt das Okularmikrometer auf das von ihrer oberen Fläche reflektierte Fadenbild ein, vertauscht

das Normal gegen den Prüfling und bestimmt die Abweichung des von ihm reflektierten Fadenbildes gegen die vorherige Einstellung [dieses Verfahren ist dem früher benutzten vorzuziehen, bei dem man Kollimator und Fernrohr unter gleichem Winkel gegen die zu prüfende Fläche geneigt aufstellte (5), und bei der man auch ein Normal brauchte]. Unab-

hängig von dem Normal wird man, wenn man den Prüfling auf einer Unterlage dreht, die genau senkrecht zur Fernrohrachse ausgerichtet ist; durch Messung der beiden äußersten Stellungen des reflektierten Fadenbildes wird dabei die Meßgenauigkeit verdoppelt. In dieser Weise geht z. B. das National Physical Laboratory vor, das aber dabei die Verschiebung des Bildes eines Spinnfadens mikroskopisch beobachtet (6). Dabei soll sich die Einstellung auf  $2,5 \mu$  ausführen lassen, wodurch man gleichfalls auf eine Genauigkeit von  $\frac{1}{4}$  Sek. kommt.

Über die Prüfung der richtigen Lage und der Form der Seitenflächen rechteckiger oder des Mantels zylindrischer Endmaße ist bereits in den Erläuterungen zu DIN 861 das Nötige gesagt.

## C. Interferenzkomparatoren.

### 1. Interferenzen gleicher Dicke.

Weitaus die genauesten Messungen an von ebenen, parallelen Flächen begrenzten Körpern, also an Parallelendmaßen, gibt die Benutzung der Interferenz des Lichtes, die zugleich auch die Bestimmung der Abweichungen von der Ebenheit und der Parallelität gestattet.

Nach unseren Vorstellungen besteht das Licht in (elastischen oder elektromagnetischen) Schwingungen eines hypothetischen, den ganzen Weltraum wie auch die Zwischenräume zwischen den Molekülen der Körper erfüllenden Stoffes, des Lichtäthers. Alle Theorien, auf die hier näher einzugehen sich erübrigt, führen auf eine reine Sinusschwingung als Form der Lichtwelle. Pflanzte sich

das Licht in der Richtung  $x$  (Abb. 99) fort, so vollführen die einzelnen Teilchen senkrecht dazu (also in Richtung  $y$ ) Hin- und Herbewegungen (Transversalschwingungen) und wird der geometrische Ort der Lage der einzelnen Teilchen zu einer bestimmten Zeit durch die Sinuslinie

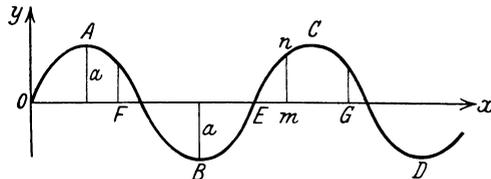


Abb. 99. Sinuswelle.

$OABCD$  dargestellt. Der jeweilige Abstand der Teilchen von der durch die Fortpflanzungsrichtung  $Ox$  gegebenen Ruhelage, also z. B. die Strecke  $y = mn$ , bezeichnet man als Elongation, die größte Elongation  $a$  als Amplitude. Ihrem Quadrat ist die Lichtstärke oder Intensität proportional.

Der Schwingungszustand an irgend einem Punkte, z. B.  $A$  oder  $n$ , ist die Phase. Man sieht, daß sie sich nach einer stets gleichen Strecke  $OE = AC = FG = BD$  oder ihrem ganzzahligen Vielfachen wiederholt. Diese Größe, also der Abstand zweier benachbarter phasengleicher Punkte, ist die Wellenlänge  $\lambda$ . Im Sonderfalle ist sie auch gleich dem Abstand zweier Wellenberge ( $A$  und  $C$ ) oder zweier Wellentäler ( $B$  und  $D$ ) oder zweier gleichartiger Knoten ( $O$  und  $E$ ). Eine gewisse Erleichterung für die folgenden Betrachtungen bietet noch der Phasenwinkel, den man dadurch erhält, daß man der Wellenlänge  $\lambda$  den Winkel  $2 \cdot \pi$  zuordnet. Der Schwingungszustand eines Punktes in der Entfernung  $x$  ist dann durch den Phasenwinkel  $\delta = 2 \cdot \pi \cdot \frac{x}{\lambda}$  gekennzeichnet. Bei einer Sinuslinie hat  $\delta$  für alle Werte  $x' = (p \cdot \lambda + x)$  stets denselben Wert (wobei  $p$  eine ganze Zahl ist).

Zwischen der Fortpflanzungsgeschwindigkeit  $v$  (im Vakuum 300 000 km/sek), der Schwingungszahl  $\nu$  und der Wellenlänge  $\lambda$  besteht die Beziehung

$$v = \nu \cdot \lambda \quad (1)$$

Dabei ist die Schwingungszahl  $\nu$  stets konstant, unabhängig von dem Mittel, in dem das Licht sich fortpflanzt, dagegen ändern sich die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten  $v$ , und zwar verhalten sich diese umgekehrt wie die Bre-

chungsindizes  $n$ . Fällt auf die Trennungsfläche  $FF$  zweier Mittel (Abb. 100) ein Strahl  $EO$  unter dem Winkel  $\varphi_1$  gegen das Einfallslot  $OL$  im Mittel 1 auf, so wird er beim Übertritt in das Mittel 2 in die Richtung  $OG$  gebrochen, die mit dem Einfallslot den Winkel  $\varphi_2$  bildet. Dabei gilt nach dem Snelliusschen Brechungsgesetz die Beziehung

$$n_1 \cdot \sin \varphi_1 = n_2 \cdot \sin \varphi_2, \quad (2)$$

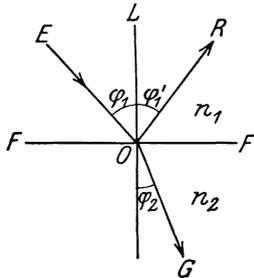


Abb. 100. Reflexion und Brechung des Lichts.

wo  $n_1$  und  $n_2$  die Brechungsindizes der beiden Mittel sind. Ist das Mittel 1 das Vakuum, für das man nach Übereinkunft  $n_1 = 1$  festgesetzt hat, so erhält man die bekanntere Form

$$n_2 = \frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2}. \quad (3)$$

Im allgemeinen Falle ist nun

$$\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad (4)$$

oder

$$n_1 \cdot v_1 = n_2 \cdot v_2.$$

Bezeichnen  $s_1$  und  $s_2$  die in den beiden Mitteln in gleichen Zeiten zurückgelegten Wege (geometrische Weglängen), so gilt auch

$$n_1 \cdot s_1 = n_2 \cdot s_2.$$

Beim Vergleich von Phasen (als den Schwingungszuständen nach einer bestimmten Zeit) ist demnach nicht mit den geometrischen Weglängen ( $s$ ), sondern mit den optischen Weglängen ( $n \cdot s$ ) zu rechnen.

Gleichzeitig erfolgt an der Trennungsfläche  $FF$  auch eine Reflexion derart, daß

$$\varphi_1 = -\varphi'_1, \quad (5)$$

der Einfallswinkel gleich dem Reflexionswinkel ist.

Da sich nun nach Gleichung (1) die Wellenlängen wie die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten verhalten, so gilt auch die Beziehung

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (6)$$

die später gebraucht werden wird.

Das Interferenzprinzip sagt nun aus, daß sich beim Zusammentreffen zweier von demselben Punkt einer Lichtquelle ausgegangener (kohärenter) Wellenzüge die Elongationen algebraisch addieren. Bei nicht kohärenten, also von verschiedenen Punkten stammenden Wellen ändern sich Amplitude und Phase fortwährend unregelmäßig und äußerst schnell (in weniger als  $10^{-8}$  Sek), so daß nur eine Mischerscheinung zustande kommt, die im Durchschnitt eine Intensität liefert, die gleich der Summe der Einzelintensitäten ist. Bei kohärenten Wellen erfolgen aber die Wechsel in Amplitude und Phase für die beiden Wellenzüge in stets gleicher Weise, so daß sie nicht störend in Erscheinung treten.

In Abb. 101a mögen die punktierte und die strichpunktierte Sinuslinie zwei kohärente Wellen gleicher Phase, aber verschiedener Amplituden  $a_1$  und  $a_2$  darstellen; die Phasen sind gleich, da im Anfangspunkt die Elongationen beider Wellen gleich 0 sind und sich beide im gleichen (positiven) Sinne ändern. Führt man die Addition der Elongationen Punkt für Punkt durch, wie dies durch die Pfeile an einer Stelle gekennzeichnet ist, so erhält man die resultierende ausgezogene Welle gleicher Phase, aber größerer Amplitude  $A = a_1 + a_2$ . Haben die beiden kohärenten Wellen eine Phasenverschiebung gegeneinander,

wie in Abb. 101 b, so führt die in gleicher Weise anzustellende Konstruktion auf eine resultierende, in der Phase gegen beide verschobene Welle.

Einfacher kommt man in diesem Falle zum Ziel, wenn man die Amplituden  $a_1$  und  $a_2$  nach dem Parallelogramm der Wege unter Berücksichtigung der Phasenwinkel  $\delta_1$  und  $\delta_2$  zusammensetzt, wie dies in Abb. 102 durchgeführt ist. Man erhält dann die Amplitude  $A$  und die Phasenverschiebung  $\Delta$  der resultierenden Welle durch Länge und Richtung der Diagonale des Parallelogramms und kann beide auch rechnerisch ermitteln. Der größeren Anschaulichkeit wegen sei im folgenden aber die Sinuslinie selbst betrachtet.

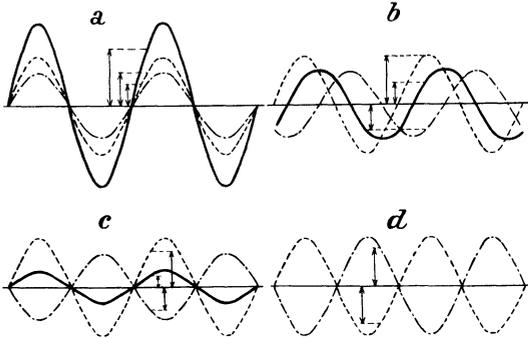


Abb. 101. Entstehung der Interferenzen.

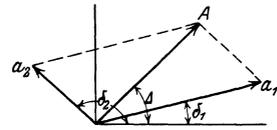


Abb. 102. Zusammensetzung von Schwingungen.

Im Falle der Abb. 101 c zweier Wellen ungleicher Amplitude mit einer Phasenverschiebung von  $\frac{1}{2} \cdot \lambda$  geht die algebraische Addition der Elongationen durchweg in eine Subtraktion über, und die Amplitude der resultierenden Welle ist gleich der Differenz der Amplituden der Einzelwellen, während sie in der Phase mit der größeren übereinstimmt. Sind schließlich noch die Amplituden in diesem Falle einander gleich (Abb. 101 d), so wird die resultierende Amplitude gleich 0, und die Schwingungen heben sich gegenseitig auf. Populär gibt man das Ergebnis dieser Betrachtungen so ausdrücken: Licht + Licht gibt nicht immer vermehrte Helligkeit, sondern unter gewissen Umständen auch verminderte Helligkeit und im Extremfalle völlige Dunkelheit. Diese tritt stets bei Interferenz zweier Wellen gleicher Amplitude mit einer Phasendifferenz von  $\frac{1}{2} \cdot \lambda$  ein, während man die größte Helligkeit bei der Phasendifferenz 0 erhält. Diese Verhältnisse wiederholen sich, wie leicht ersichtlich, für die Phasendifferenzen  $(2 \cdot p + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$  bzw.  $p \cdot \lambda$  (wobei  $p$  wieder eine ganze Zahl bedeuten soll).

Für die Meßtechnik haben nun die an einem Keil auftretenden Interferenzen eine besondere Bedeutung. Zur Erleichterung späterer Überlegungen sei angenommen, daß in Abb. 103 a der Keil aus einem Mittel mit dem Brechungsindex  $n$  besteht, während das Licht aus dem Vakuum einfällt, für das hier mit genügender Annäherung praktisch Luft gesetzt werden kann. Es sei ferner einfarbiges (monochromatisches) Licht, also solches einer einzigen bestimmten Wellenlänge, vorausgesetzt, wie man es für diese Zwecke

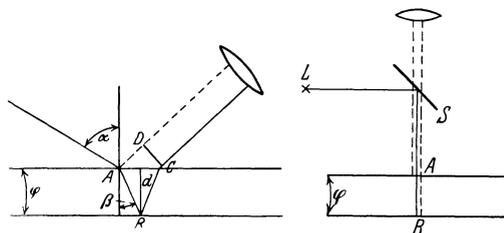


Abb. 103 a.

Abb. 103 b.

Abb. 103 a und b. Entstehung der Interferenzen am Keil.

genügend genau durch Vorsetzen eines Filters erhält (da im weißen Licht alle möglichen verschiedenen Wellenlängen enthalten sind, würde hier jede Wellenlänge ihre eigene Interferenzerscheinung erzeugen, die sich alle übereinander lagern und dadurch das Bild verwirren).

Beim Auftreffen auf die Keiltrennungsfläche wird nun stets ein Teil des Lichtes reflektiert, während der Rest in das andere Medium hineingebrochen wird. Es sei nur der jeweils interessierende Anteil betrachtet. Da ferner der Keilwinkel  $\varphi$ , wie später nachgewiesen werden wird, höchstens 1 Min. beträgt (er ist in den Abbildungen der Deutlichkeit halber stark übertrieben gezeichnet), so kann man die auf den beiden Keilflächen errichteten Lote als praktisch parallel zueinander annehmen (ihr Längenunterschied innerhalb des Keils würde nur  $\frac{1}{2} \cdot d \cdot \varphi^2$  oder rund  $\frac{1}{2} \cdot 10^{-7} \cdot d$  betragen).

Der unter dem Einfallswinkel  $\alpha$  auffallende Strahl wird bei  $A$  zum Teil reflektiert, zum anderen Teil unter dem Winkel  $\beta$  in den Keil hineingebrochen, bei  $B$  reflektiert und tritt bei  $C$  (unter Vernachlässigung des kleinen Keilwinkels) parallel zu dem bei  $A$  reflektierten Anteil aus. Diese beiden Strahlen werden nun durch eine Linse, z. B. die des Auges, vereinigt und interferieren miteinander. Dabei wird der Ort der Interferenzerscheinung an die obere Begrenzung des Keils verlegt. Fällt man von  $C$  auf den in  $A$  reflektierten Strahl das Lot  $CD$ , so ist der Gangunterschied der beiden interferierenden Strahlen

$$\begin{aligned} g' &= n \cdot AB + n \cdot BC - AD \\ &= 2 \cdot n \cdot \frac{d}{\cos \beta} - 2 \cdot d \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \sin \alpha \\ &= 2 \cdot n \cdot \frac{d}{\cos \beta} - 2 \cdot n \cdot d \cdot \frac{\sin^2 \beta}{\cos \beta} \\ &= 2 \cdot n \cdot d \cdot \cos \beta. \end{aligned}$$

Diese Größe  $g'$  stellt aber noch nicht den gesamten Gangunterschied dar. Die Reflexion bei  $A$  erfolgt nämlich an der Trennungsfläche Vakuum—Medium, die bei  $B$  dagegen an der Trennungsfläche Medium—Vakuum. Bei der Reflexion, die am Übergang vom optisch dichteren zum optisch dünneren Mittel erfolgt, tritt nun eine plötzliche Änderung der Phase (ein Phasensprung) der Größe  $\frac{\lambda}{2}$  auf. Somit ist der gesamte Gangunterschied

$$g = 2 \cdot n \cdot d \cdot \cos \beta + \frac{\lambda}{2}.$$

Besonders einfach werden die Verhältnisse bei senkrechtem Lichteinfall auf den Keil (Abb. 103 b), da dann  $\beta = 0$  und somit der Gangunterschied  $g$  unabhängig von  $\beta$  (und auch von dem Einfallswinkel  $\alpha$ ) wird. Nehmen wir nun einen Luftkeil an, für den zunächst mit genügender Annäherung  $n = 1$  gesetzt werden kann, so wird der Gangunterschied

$$g = 2 \cdot d + \frac{\lambda}{2}.$$

Diesen Strahlengang erreicht man z. B. dadurch, daß man die von der unendlich weit entfernten Lichtquelle  $L$  (praktisch: die sich im Brennpunkt einer Linse befindet, aus der die Strahlen parallel austreten) kommenden Strahlen durch einen unbelegten Spiegel  $S$  senkrecht auf die obere Keilfläche wirft. Die in  $A$  und  $B$  reflektierten Strahlen sind der Deutlichkeit halber nebeneinander gezeichnet; ferner ist wieder die von dem sehr kleinen Keilwinkel herrührende Unparallelität vernachlässigt.

Nun tritt Dunkelheit ein, wenn

$$g = (2 \cdot p + 1) \cdot \frac{\lambda}{2},$$

also

$$2 \cdot d + \frac{\lambda}{2} = (2 \cdot p + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

oder

$$d = p \cdot \frac{\lambda}{2},$$

$$d = 0, \quad 1 \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad 2 \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad \dots \quad p \cdot \frac{\lambda}{2}$$

oder

$$d = 0, \quad 2 \cdot \frac{\lambda}{4}, \quad 4 \cdot \frac{\lambda}{4}, \quad \dots \quad 2 \cdot p \cdot \frac{\lambda}{4}$$

ist. Die Orte größter Helligkeit sind dagegen durch die Beziehung

$$2 \cdot d' + \frac{\lambda}{2} = p \cdot \lambda,$$

$$d' = (2 \cdot p - 1) \cdot \frac{\lambda}{4}$$

oder

$$d' = 1 \cdot \frac{\lambda}{4}, \quad 3 \cdot \frac{\lambda}{4}, \quad \dots \quad (2 \cdot p - 1) \cdot \frac{\lambda}{4}$$

gegeben.

Der Dickenunterschied  $a$  zweier benachbarter Minima folgt aus

$$a = d_{p+1} - d_p = (p+1) \cdot \frac{\lambda}{2} - p \cdot \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda}{2}.$$

Ebenso ergibt sich der Dickenunterschied zweier benachbarter Maxima zu

$$a' = d'_{p+1} - d'_p = (2 \cdot p + 2 - 1) \cdot \frac{\lambda}{4} - (2 \cdot p - 1) \cdot \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda}{2} = a.$$

Der Dickenunterschied eines Minimums vom nächsten Maximum ist

$$a'' = d_p - d'_p = [2 \cdot p - (2 \cdot p - 1)] \cdot \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda}{4} = \frac{a}{2}.$$

Nimmt nun die Dicke, wie bei einem von 2 Ebenen begrenzten Keil, regelmäßig

zu, so wird man gleichweit voneinander abstehende dunkle Streifen (die am Keilscheitel beginnen) und symmetrisch zwischen ihnen die hellsten Stellen erhalten (Abb. 104a). Die Größe  $p$  in der Beziehung  $d = p \cdot \frac{\lambda}{2}$

bezeichnet man als die Ordnungszahl der dunklen Streifen, wobei der am Keilscheitel auftretende die Ordnungszahl 0 bekommt. Der Streifen der Ordnungszahl  $p$  zeigt an, daß die Keildicke an dieser Stelle den Wert  $p \cdot \frac{\lambda}{2}$  hat. Die

dunkeln Interferenzstreifen entsprechen somit gewisser-

maßen den die Orte gleicher Höhe bezeichnenden Schichtenlinien der Landkarten, und zwar gilt dies nicht nur für den von Ebenen eingeschlossenen Keil,

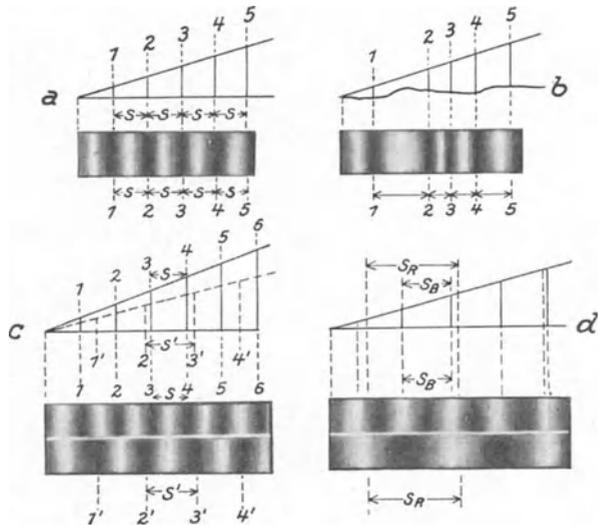


Abb. 104. Interferenzen am Keil.

sondern auch für beliebige Formen der ihn begrenzenden beiden Flächen, wie aus der Ableitung der obigen Formeln sofort folgt. Deshalb bezeichnet man diese Streifen auch als Interferenzen gleicher Dicke.

Verkleinert man den Keilwinkel wie in Abb. 104c, so müssen die Interferenzstreifen weiter auseinanderrücken, da die Dicke erst in größeren Abständen um jeweils  $\frac{\lambda}{2}$  wächst. Bei unbekannter Lage des Keilscheitels kann man ihn infolgedessen dadurch bestimmen, daß man auf die obere Platte drückt und beobachtet, nach welcher Richtung die Streifen wandern; der Keilscheitel liegt dann entgegengesetzt zur Wanderungsrichtung. Dabei ist angenommen, daß der Keilscheitel wirklich vorhanden ist, so daß der Druck eine Drehung um ihn bewirkt. Meist ist aber jene Voraussetzung nicht erfüllt, dann bewirkt Druck auf die obere Platte eine Parallelverschiebung. Da dadurch der Abstand zwischen den beiden Keilflächen verkleinert wird, so müssen auch in diesem Falle die Streifen vom Scheitel wegwandern. Rein gedächtnismäßig kann man sich dies so merken, daß man die Interferenzstreifen als kleine Stäbchen zwischen den Keilflächen auffaßt, die bei Druck auf die obere Keilfläche nach der freien Seite des Keils hin ausweichen müssen, um nicht zerdrückt zu werden. Beobachtet man bei Parallelverschiebung der oberen Platte die an einer feststehenden Marke vorbeiwandernden Streifen, so kann man damit sehr genau die vorgenommene Verschiebung messen, da sich die Keildicke immer, wenn ein auf die Marke fallender dunkler Streifen durch den nächsten ersetzt ist, um  $\frac{\lambda}{2}$  geändert hat (wandernde Interferenzen). Dieses Verfahren ist z. B. sehr geeignet, um die Ausdehnung eines Körpers zu bestimmen, indem man die Interferenzen zwischen der oberen Fläche des Körpers und einer unverändert aufgestellten oberen Keilfläche beobachtet und die bei Erwärmung des Körpers an einer auf ihr angebrachten Marke vorbeiwandernden Streifen zählt.

Den Zusammenhang zwischen dem Streifenabstand  $s$  und dem Keilwinkel  $\varphi$  kann man aus der Beziehung bestimmen, daß die Dicke von einem zum nächsten Streifen um  $\frac{\lambda}{2}$  wächst, daß somit

$$\sin \varphi = \frac{\frac{1}{2} \cdot \lambda}{s}$$

ist. Hat man z. B. bei Beobachtung mit dem Lichte der grünen Heliumlinie ( $\lambda = 0,502 \mu$ ) einen Streifenabstand von 1 mm, so ist  $\varphi \sim 50$  Sek. Da man für die Beobachtungen Streifenabstände von 2 bis 3 mm benutzt, so beträgt also der Keilwinkel  $\varphi$  nur etwa  $\frac{1}{2}$  bis  $\frac{1}{4}$  Min.

Bei gegebenem Keilwinkel rücken die Streifen ferner um so weiter auseinander, je größer die Wellenlänge wird, wie sofort aus der letzten Gleichung folgt; man wird also bei rotem Licht einen größeren Streifenabstand  $s_R$  beobachten als bei grünem, während er bei blauem noch kleiner wird ( $s_B$ ) (Abb. 104d, in der die hellen Streifen gekennzeichnet sind).

Es sei nun der Fall betrachtet, daß die untere Keilbegrenzung keine Ebene ist (Abb. 104b). Die entstehende Interferenzerscheinung läßt sich konstruieren, wenn man bedenkt, daß bei spitzerem Winkel zwischen oberer und unterer Keilbegrenzung die Streifen weiter auseinander rücken und bei paralleler Lage beider überhaupt verschwinden. Umgekehrt ist ungleichmäßiger Streifenabstand immer ein Beweis dafür, daß die geprüfte Fläche uneben ist, wobei selbstverständlich vorausgesetzt ist, daß die obere Keilfläche eben ist. So kann man umgekehrt aus dem Streifenbild auch rückwärts die Gestalt der Prüffläche ermitteln.

Bisher war immer angenommen, daß die Keilscheitellinie senkrecht zur Zeichnungsebene liegt. Ist das nicht der Fall, wie bei einer hierzu geneigten ebenen (rechteckigen) Prüffläche, so verlaufen die hellen und dunkeln Interferenzstreifen, die ja stets parallel zur Keilkante liegen, geneigt zu den Flächenkanten (Abb. 114, links unten).

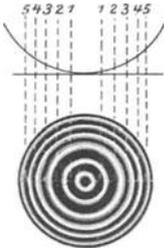


Abb. 105.  
Interferenzen bei einer Kugelfläche.

Von besonderem Interesse ist noch der Fall der Kugelfläche (Abb. 105). Hier sind die Orte gleicher Schichtdicke zum Mittelpunkt konzentrische Kreise (Newtonsche Ringe). Der Halbmesser  $\varrho$  der Kreise berechnet sich nach Abb. 106 aus

$$(R - d)^2 + \varrho^2 = R^2,$$

$$\varrho^2 = 2 \cdot R \cdot d - d^2,$$

$$\varrho \sim \sqrt{2 \cdot R \cdot d} \sim \sqrt{R \cdot p \cdot \lambda},$$

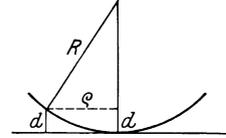


Abb. 106. Interferenzen bei Kugelflächen.

da für die dunklen Ringe gilt:  $d = \frac{1}{2} \cdot p \cdot \lambda$ . Es wächst also der Abstand vom Mittelpunkt mit der Quadratwurzel aus der Ordnungszahl, so daß die Ringe nach dem Rande hin enger werden.

Ob die geprüfte Fläche konkav oder konvex ist, kann man wieder durch Druck auf die obere Fläche erkennen. Nach den früheren Ausführungen müssen die Ringe bei konvexen Flächen nach außen, bei konkaven nach innen hin wandern.

In der Optik findet dieses Verfahren ausgedehnte Anwendung zur Prüfung der Gestalt und des Halbmessers von Linsen, indem man ein Probeglas (meist aus Quarz) von der vorgeschriebenen (aber entgegengesetzten) Krümmung auf die Linse legt. Bei vollkommener Übereinstimmung beider Flächen dürfen keine Interferenzen auftreten. Bei einem vorhandenen Unterschied rücken die Ringe um so enger aneinander, je größer jener ist.

Will man auf diese Weise die Ebenheit von Endmaßflächen untersuchen, so darf man die obere Keilfläche, die meist durch die ebene Fläche einer Quarz- oder Glasplatte gebildet wird<sup>1</sup>, nicht unmittelbar auflegen, sondern hält sie besser in einem kleinen Abstände davon, da sich sonst selbst unebene Flächen unter Umständen so vollkommen an die Planplatte ansaugen, daß zwischen beiden keine Interferenzen auftreten und der Prüfling völlig eben erscheint. Den notwendigen Abstand erhält man leicht durch Unterlegen von Metallfolie auf der einen Seite.

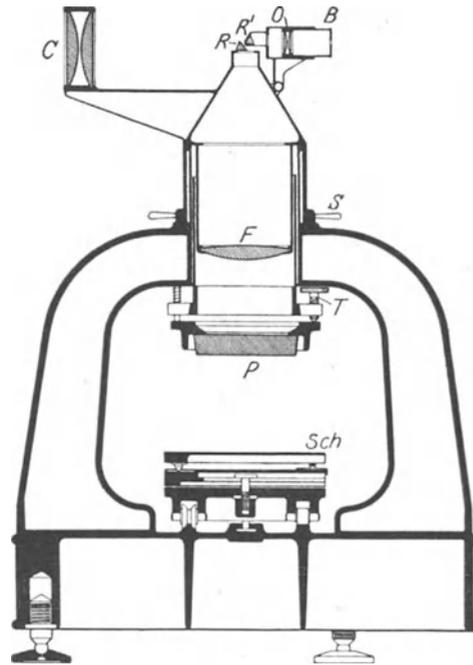


Abb. 107. Interferenzapparat zur Untersuchung von Planflächen.

Meist wird die Prüfung auf Ebenheit zugleich mit der auf Parallelität und Maßhaltigkeit verbunden. Hier soll zunächst ein Apparat beschrieben werden, der auch zur Untersuchung größerer Flächen auf Ebenheit geeignet ist (Abb. 107). Das durch den Kondensator

<sup>1</sup> Die obere Keilfläche kann vorteilhaft durch eine dünne, plane, spiegelnde Metallmembran ersetzt werden, die bis auf wenige  $\frac{1}{100} \mu$  eben und infolge ihrer geringen Dicke (von etwa  $1 \mu$ ) durchsichtig ist (1 b).

sator *C* auffallende Licht wird durch das Prisma *R* auf das Objektiv *F* geworfen, wonach es als Parallelstrahlenbündel die zwangfrei am Rande gefaßte und durch ihre Dicke gegen Durchbiegung geschützte Planplatte *P* durchsetzt. Der Prüfling wird auf den nach allen Richtungen hin justierbaren Tisch *Sch* gesetzt und ihm die Planplatte mittels der Schraube *S* bis auf etwa 1 mm genähert. Man justiert sie mittels der Schrauben *T* angenähert parallel zur Oberfläche des Prüflings und kann dann durch die Blende *B* und das Prisma *R* die Interferenzen beobachten, wobei das Objektiv *F* gewissermaßen als Lupe wirkt [das Okular *O* ist für andere Beobachtungen, nämlich die der Interferenzen gleicher Neigung (siehe S. 145) vorgesehen]. Die Interferenzen lassen sich auch durch eine vor *B* gesetzte Kamera photographisch festhalten. Damit das von der oberen Fläche von *P* reflektierte Licht nicht stört, ist die Platte mit einem Winkel von etwa 45 Min. schwach keilförmig gehalten.

Als Lichtquelle empfiehlt sich ihrer großen Helligkeit wegen eine Quarzquecksilberlampe, aus deren Spektrum mittels Monochromators oder geeigneter Filter (2) eine einzelne Spektrallinie ausgesondert wird. Zur visuellen Beobachtung empfiehlt sich die grüne Linie ( $\lambda = 0,546 \mu$ ), zur Photographie die violette Linie ( $\lambda = 0,436 \mu$ ). Der Apparat gestattet die Feststellung von Krümmungen bis zu 9 km Halbmesser und damit von Höhenunterschieden zwischen Rand und Mitte von  $1,4 m\mu$  bei 10 mm Breite (1a, 3).

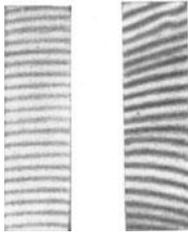


Abb. 108. Abb. 109.  
Abb. 108 und 109. Interferenzen an einer guten und einer weniger guten Endmaßfläche.

Einige mit diesen und ähnlichen Apparaten an Meßflächen von Endmaßen erhaltene Interferenzfiguren sind in den Abb. 108 bis 113 wiedergegeben.

Abb. 108 ist eine gute Fläche, da die Streifen nur Krümmungen von etwa  $\frac{1}{10}$  Streifenbreite entsprechend  $\frac{1}{20} \lambda = 0,02 \mu$  haben. Die Abb. 109 weist dagegen auf eine stärkere Krümmung hin, die Streifen fallen unten bis auf 1, oben sogar bis auf 1,5 Streifenbreiten, also  $0,3 \mu$ , ab. Abb. 110a und b geben zwei ganz schlechte Flächen wieder. Abb. 111 zeigt von unten nach oben verlaufende

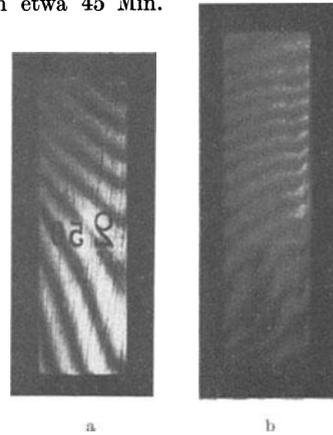


Abb. 110. Interferenzen an schlechten Endmaßflächen.

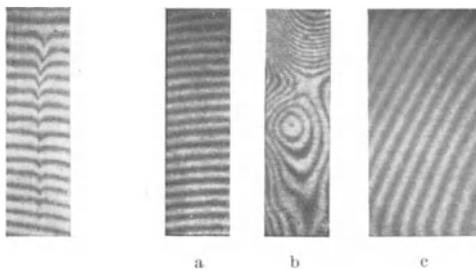


Abb. 111. Interferenzen an einem Endmaß mit Härteriß.

Abb. 112. Interferenzen an dünnen Endmaßen aus Stahl und Quarz.

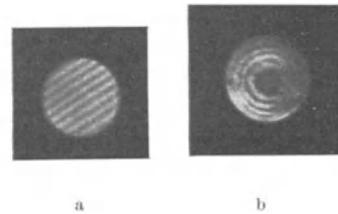


Abb. 113. Interferenzen an kreisförmigen Endmaßflächen.

Zacken, die von einem vorher nicht bemerkten Härteriß herrühren. Die Genauigkeit, mit der man vorhandene Abweichungen zu bestimmen vermag, beträgt 0,01 bis  $0,02 \mu$ , da man die Abweichung der Streifen von der Geraden auf  $\frac{1}{20}$  bis  $\frac{1}{10}$  Streifenbreite schätzen kann.

Abb. 112b zeigt die Meßfläche eines dünnen Endmaßes von 0,5 mm Dicke, die danach eine völlig unregelmäßig Gestalt aufweist. Diese rührt aber nur von den noch vorhandenen inneren Spannungen her, denn nach dem Ansprennen der anderen Meßfläche an ein dickeres ebenes Stück ist die Fläche auf Grund

der Abb. 112a als praktisch gut zu bezeichnen. Die schräge Lage der Streifen ist ohne Bedeutung, wenn sie nur untereinander parallel und äquidistant bleiben, da jene nur von der zufälligen Lage der oberen Keiffläche abhängt. In jener Beziehung ist Quarz besser, wie die Abb. 112c beweist, die an einem Quarzendaß von 1 mm Dicke erhalten wurde, das unmittelbar vor der Aufnahme absichtlich mehrere Stunden lang durchgebogen war.

Schließlich zeigen Abb. 113a und b noch die Interferenzerscheinungen an 2 Meßflächen mit Kreisquerschnitt, von denen die erstere sehr gut, die zweite dagegen eine starke (konkave) Wölbung aufweist, und zwar beträgt der Höhenunterschied von Rand und Mitte, den 6 Streifenbreiten entsprechend, etwa  $1,5 \mu$  (1).

## 2. Vergleich von Endmaßen mittels Interferenzen gleicher Dicke.

Nun lassen sich aber die Interferenzen gleicher Dicke auch zur Bestimmung der Länge eines Endmaßes (vor allem seines Mittenmaßes) benutzen. Dies geschah ursprünglich durch Vergleich eines Endmaßes mit einem bekannten Normal, dessen Länge auf andere Weise (meist behördlich) bestimmt war, während man heute die Endmaße unmittelbar in Lichtwellenlängen auswertet. Da jenes Verfahren indessen auch heute noch vielfach Verwendung findet, z. B. bei längeren Endmaßen, so soll es als das historisch ältere zunächst besprochen werden (1, 2, 3, 4, 6).

Man sprengt dazu auf eine Quarzplatte die beiden zu vergleichenden Endmaße an, von denen in Abb. 114 das vordere ausgezogen, das dahinter stehende (größere) gestrichelt gezeichnet ist. Ihre oberen Meßflächen denke man sich bis zum Schnitt mit der Keiffläche verlängert. Dadurch entstehen 2 Keile, in die die auftretenden Interferenzstreifen durch senkrechte Linien eingetragen sind (und zwar für das vordere ausgezogen, für das hintere gestrichelt). Besser erkennt man die Interferenzerscheinungen an der unten rechts wiedergegebenen Aufsicht (in der zunächst die Meßflächen der Endmaße als einander parallel angenommen sind), wobei man bemerkt, daß die Streifen auf den beiden Endmaßen gegeneinander versetzt sind. Die Entfernung der beiden Keilscheitel in Streifenbreiten sei  $S$ ; diese ist also der Abstand der Streifen 0. Ordnung auf den beiden Endmaßen, die auch gleich der Entfernung der  $p$ -Streifen ist. Man hätte also nur nötig, den Abstand zweier Streifen gleicher Ordnungszahl in Streifenbreiten ( $S$ ) auszuzählen, woraus sich dann der Dickenunterschied zu  $S \cdot \frac{\lambda}{2}$  berechnet. In dem dargestellten Falle ist  $S = 0,7$ , also der Unterschied  $\delta$  der beiden Endmaße:  $\delta = 0,7 \cdot 0,25 = 0,175 \mu$ , falls die Beobachtung im Licht der grünen Heliumlinie erfolgte ( $\lambda = 0,502 \mu$ ).

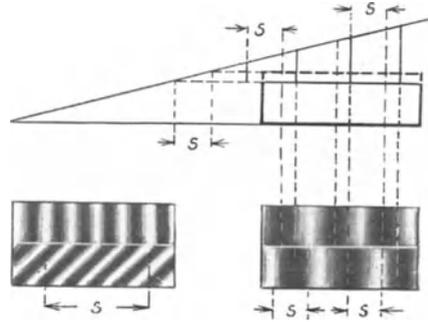
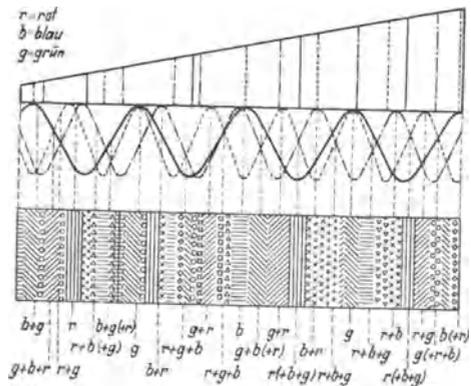


Abb. 114. Vergleich von Endmaßen.

Sind die Meßflächen nicht parallel zueinander, ist z. B. die Fläche des vorderen Endmaßes senkrecht zur Zeichnungsebene geneigt, so verlaufen die Streifen, wie erwähnt, geneigt zu seiner kurzen Kante (Abb. 114, links unten). Dann zählt man den Abstand in Streifenbreiten  $S$  in der Mitte. Würde die Unparallelität in Richtung der Längskante liegen, so würde der Streifenabstand auf den beiden Endmaßen verschieden groß sein. In diesem Falle würde man von dem mittleren Streifen des einen Endmaßes ausgehen, während die Zählung auf dem anderen Endmaß erfolgt. Man erhält so im Prinzip den Unterschied der Mittenmaße (Näheres siehe weiter unten).

Nun ergibt sich aber eine Schwierigkeit bei der Durchführung dieses anscheinend sehr einfachen Verfahrens dadurch, daß man die Ordnungszahlen der Streifen nicht kennt, daß man also nicht weiß, welcher Streifen des einen Endmaßes zu einem bestimmten des anderen Endmaßes gehört, da ja die Streifen alle das gleiche Aussehen haben. Es ist also noch nötig, die Streifen gleicher



Ordnungszahl auf beiden Endmaßen in irgend einer Weise zu kennzeichnen. Dies geschieht dadurch, daß man nicht wie bisher das (einfarbige) Licht einer einzigen Spektrallinie, sondern gleichzeitig das mehrerer Linien benutzt.

Es sei z. B. angenommen (Abb. 115), daß eine Lichtquelle 3 Spektrallinien aussendet, eine rote (ausgezogen), eine grüne (strichpunktiert) und eine blaue (punktiert). Die diesen 3 Farben entsprechenden hellen Interferenzstreifen sind in dem Keil als senkrechte, ausgezogene, strichpunktierte und punktierte Linien eingetragen. Wie früher abgeleitet, liegen die blauen Interferenzmaxima näher aneinander und am Keilscheitel als die grünen und diese wieder näher als die roten.

Abb. 115. Interferenzen am Keil bei 3 Spektrallinien.

Unter dem Keil ist ferner der Intensitätsverlauf der Interferenzen der drei verschiedenen Farben gezeichnet, der durch Sinuslinien dargestellt wird, deren nach unten gerichtete Maxima an den Stellen der hellen Interferenzlinien und deren Minima in der Mitte dazwischen, an der unteren Keilfläche anliegend, dargestellt sind. An jeder einzelnen Stelle tritt nun eine Mischung der Farben ein, wobei auch ihre Intensitäten zu beachten sind. Bei der ersten punktierten senkrechten Linie haben Blau und Grün nahezu gleiche (maximale) Intensität, während sie für Rot gleich Null ist; das Ergebnis der Mischung von Blau und Grün ist ein kräftiges Blaugrün. An der zweiten punktierten Linie haben Blau und Rot gleiche mittlere Intensität, Grün eine etwas stärkere; ihre Mischung liefert ein etwas grünstichiges Orange. Bei der dritten punktierten Linie finden wir Rot und Grün von gleicher mittlerer Intensität und ganz wenig Blau, die sich zu nahezu Weiß mischen. An der vierten punktierten Linie erhalten wir dagegen fast reines Rot, da Grün und Blau nur sehr schwach sind. So kann man für jede Stelle des Keils die entstehende Mischfarbe leicht konstruieren (dabei ist zu beachten, daß es sich hier nicht um die Mischung von Malerfarben, also von Pigmenten, sondern um die farbiger Lichter handelt, daß also die Gesetze der additiven und nicht die der subtraktiven Farbenmischung gelten).

Betrachtet man nun z. B. die verschiedenen Orangestreifen, so werden sie jedesmal von andersfarbigen Streifen begrenzt, wie aus nachfolgender Aufstellung hervorgeht<sup>1</sup>:

Nr. des Orangestreifens	Reihenfolge der Streifen von links nach rechts					
1	Grün $\backslash\backslash\backslash$	Hellgrün ○	Orange (stark) $///$	Gelb □	Rot $   $	
2	Hellgrün ○	Gelb □	„ ( „ ) $///$	„ □	Hellblau △	
3	Blau $\equiv$	Grün $\backslash\backslash\backslash$	„ ( „ ) $///$	Rot $   $	Rosa ×	
4	Rosa ×	Violett +	„ (schw.) $///$	Grün $\equiv$	Blau $\equiv$	
5	„ ×	Rot $   $	„ (stark) $///$	Hellgrün ○	Grün $\backslash\backslash\backslash$	

Zieht man also je 1 oder besser 2 links und rechts benachbarte Streifen hinzu, so kommt für die 5 betrachteten Kombinationen mit Orange in der Mitte niemals wieder dieselbe Reihenfolge vor<sup>2</sup> (vorausgesetzt, daß die Wellenlängen der benutzten Spektrallinien in keinem ohne Rest aufgehenden Verhältnis zueinander stehen). Dadurch ist ein an einer bestimmten Keildicke auftretender Orangestreifen von einem an anderer Stelle beobach-

<sup>1</sup> Außerdem bedeutet noch: ◇ blaugrün, ∇ hellviolett.

<sup>2</sup> Leider ließ sich die Konstruktion der Mischfarben nicht genau der Natur entsprechend durchführen, für die Verdeutlichung der hier auftretenden Vorgänge spielt dies aber keine Rolle.

teten, eine andere Keildicke bezeichnenden, genau zu unterscheiden. Dasselbe gilt naturgemäß auch für jeden andersfarbigen Streifen.

Die gleichzeitige Benutzung mehrerer Spektrallinien liefert durch die Farbenfolge der benachbarten Streifen gewissermaßen eine Individualisierung der einzelnen Streifen verschiedener Ordnungszahl, so daß die gleicher Ordnungszahl auf den beiden Endmaßen durch die Zuhilfenahme der Farbenfolge ihrer zwei beiderseitigen Nachbarn leicht einander zugeordnet werden können.

Um die Größe  $S$  in Abb. 114 zu bestimmen, hat man also zunächst auf beiden Endmaßen die beiden (im übrigen beliebig zu wählenden) gleichgefärbten Streifen zu suchen, an die sich beim Fortschreiten nach links und rechts auf beiden Meßflächen die gleichen Farben anreihen. Auf diese beiden gewählten Streifen stellt man 2 Fäden eines Okularmikrometers ein (dessen Schrauben nur zur Bewegung, nicht zum Messen dienen) und ermittelt dann ihren Abstand in Streifenbreiten einer bestimmten Spektrallinie, wozu man am besten die grüne Heliumlinie nimmt, da bei dieser einer Streifenbreite eine Dickenänderung von genau  $0,25 \mu$  entspricht.

Das geschilderte Verfahren der gleichzeitigen Benutzung des Lichtes

mehrerer Spektrallinien ist von Kösters ausgearbeitet, der auch ein dafür geeignetes Interferometer angegeben hat, das in Abb. 116 im Schnitt wiedergegeben ist. Als Lichtquelle dient ein mit Helium unter einigen mm Druck gefülltes Geißlerrohr, das mit einem kleinen Induktorium oder besser mit auf 5000 Volt transformierten Wechselstrom (über einen Glühlampenwiderstand im Primärkreis) gespeist wird. Das Licht durchsetzt zunächst ein Methylviolettfilter, um die alle anderen an Intensität weit überragende gelbe Heliumlinie geeignet abzuschwächen. Die Strahlen werden durch den Kondensator am Ort der Blende vereinigt, die im Brennpunkt des linken Objektivs steht, das sie demgemäß als Parallelbündel verlassen. Sie fallen dann auf eine Prismenkombination, die gewissermaßen den Spiegel  $S$  der Abb. 103b ersetzt, und die aus drei rechtwinkligen Prismen besteht; die zusammenstoßenden Hypotenusenflächen sind halbdurchlässig versilbert. An der Hypotenusenfläche des oberen Prismas werden die Strahlen senkrecht nach unten totalreflektiert, durchsetzen (zur Hälfte) die versilberte Prismenfläche, dann eine mit der unteren Prismenfläche durch einen Tropfen Paraffinöl verkittete, gleichfalls halbdurchlässig versilberte (oder vernickelte) Planplatte (die die genau ebene obere Fläche des Luftkeils bildet) und treffen auf die beiden zu vergleichenden Endmaße  $N$  (Normal) und  $P$  (Prüfling), die auf eine ebene Quarzplatte angesprengt sind, so daß zwischen ihr und den unteren Meßflächen der Endmaße keine Interferenzen wahrzunehmen sind und diese sich also völlig an jene angeschmiegt haben, was bei Betrachtung von unten her zu erkennen ist. Bei Endmaßen aus gleichem Werkstoff und mit gleicher Oberflächenbeschaffenheit sind die durch das Ansprengen an die Quarzplatte etwa bewirkten Änderungen ihrer Länge bei Hochglanzpolitur völlig, bei Strichpolitur praktisch einander gleich (Unterschiede im letzteren Falle von der Größenordnung  $\frac{1}{100} \mu$ ).

Die Quarzplatte läßt sich mittels dreier Fußschrauben justieren und so der gewünschte Keilwinkel zwischen den oberen Meßflächen der Endmaße und der Planfläche einstellen. Die günstigste Entfernung zwischen beiden wird durch Verstellung des die Optik aufnehmenden (geknickten) Rohres erhalten.

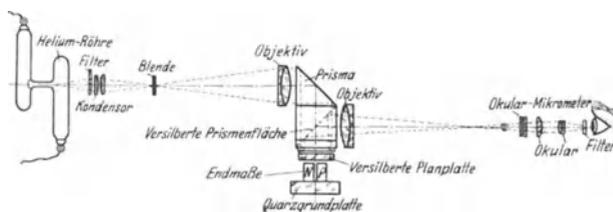


Abb. 116. Interferometer.

Die auftretenden Strahlen werden zum Teil an der halbdurchlässigen versilberten Planplatte, zum anderen Teil an den beiden Endmaßen reflektiert, beide Teile zusammen an der halbdurchlässig versilberten Trennungsfäche der Prismenkombination seitlich abgelenkt und durch das rechte Objektiv vereinigt. Die so erzeugte (virtuelle) Interferenzerscheinung wird mittels eines kleinen Fernrohres beobachtet, das aus dem nicht bezeichneten Objektiv und dem Okular besteht. Dieses ist nötig, um das vorher besprochene Okularmikrometer anbringen zu können, das mit 2 Bewegungsschrauben ausgerüstet ist, um 2 Fäden auf die beiden (in dem vorher erörterten Sinne) gleichgefärbten Streifen einstellen zu können.

Nachdem dies geschehen, schaltet man vor das Auge ein Grünfilter (in Abb. 116 ganz rechts), welches nur das Licht der grünen Heliumlinie hindurchläßt, und erhält dann an Stelle der farbigen die üblichen hellen und dunkeln Interferenzstreifen. In ihren Streifenbreiten zählt man den Abstand der beiden Fäden unter Schätzung der  $\frac{1}{10}$ - bis  $\frac{1}{20}$ -Streifenbreiten aus.

Die Aufgabe des Anschlusses des Prüflings an das Normal wäre damit gelöst, wenn die Meßflächen der beiden Endmaße völlig parallel wären. Da dies aber in Wirklichkeit nie zutrifft, so muß untersucht werden, wie sich die Verhältnisse dadurch ändern. In Abb. 117

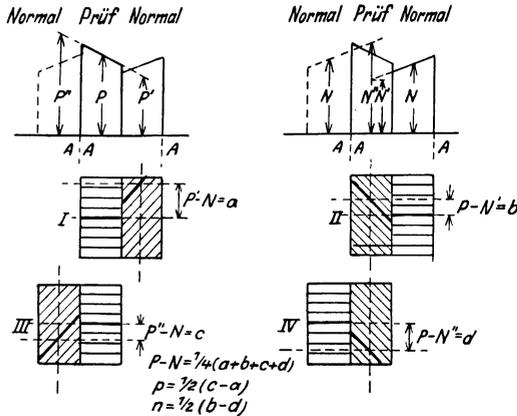


Abb. 117. Ausführung des Vergleichs von Endmaßen.

sind die Endmaße mit übertriebener Unparallelität im Schnitt wiedergegeben. Es sei zunächst die Anordnung links oben betrachtet, bei der das Normal  $N$  rechts von dem Prüfling  $P$  steht. Mit Hilfe der Fußschrauben justiert man die Quarzplatte zunächst so, daß die Streifen parallel zur kurzen Kante des Prüflings liegen, daß seine Kante also, in Richtung senkrecht zur Zeichnung, parallel zur Keilscheitellinie verläuft, während beide in der Zeichnungsebene einen kleinen Winkel von etwa  $\frac{1}{2}$  Min. einschließen. Auf dem Normal werden dann die Streifen in allgemeinen geneigt zu seiner kurzen Kante liegen (Teilbild I). Man stellt nun die Fäden des Okularmikrometers auf den mittleren Streifen des Prüflings und auf den gleichgefärbten Streifen des Normals und zählt auf diesem in seiner mittleren

Längsrichtung (durch den senkrechten Strich angedeutet) die Streifenbreiten im grünen Licht zwischen den beiden Fäden (in der Abb. 3,1). Durch den auf den Prüfling eingestellten Faden wird gewissermaßen seine Meßfläche bis zum Normal hin verlängert, also sein Mittenmaß auf die Mitte des Normals mit der Größe  $P'$  projiziert; hier hat dieses sein Mittenmaß  $N$ . Man ermittelt also die Größe  $P' - N = a$ . Welches der beiden Maße,  $P'$  oder  $N$ , das größere ist, und damit das Vorzeichen von  $a$ , erkennt man nach den früheren Erläuterungen an dem Wanderungssinn der Interferenzen bei Druck auf die obere Planplatte. Nach Abb. 114 ist das Maß das größere, bei welchem der charakteristische (gleich gefärbte) Streifen voranwandert. Da nach der Schnittzeichnung  $N$  größer als  $P'$  ist, so ist  $a = -3,1$ .

Nun justiert man die Quarzplatte so, daß die Streifen parallel zur kurzen Kante des Normals zu liegen kommen (Teilbild II), und ermittelt durch Abzählen des Abstandes zweier gleichgefärbter Streifen (auf der Längsmittellinie von  $P$ ) die Größe  $P - N' = b$ , wobei  $N'$  die Projektion von  $N$  auf die Mitte von  $P$  ist. In der Zeichnung ist  $b = +1,6$ .

Darauf setzt man das Normal, ohne es zu drehen, auf die linke Seite von  $P$ , so daß die beiden vorher äußeren Seiten jetzt die inneren werden. Hierbei verfährt man nun analog wie vorher (Teilbilder III und IV) und ermittelt so die Größen  $P'' - N = c$  und  $P - N'' = d$ . Nach den Abbildungen ist  $c = +1,2$  und  $d = -2,6$  (wobei die Vorzeichen, wie vorher angegeben, aus dem Wanderungssinn zu bestimmen wären).

Nun ist

$$\begin{aligned}
 a + b + c + d &= (P' - N) + (P - N') + (P'' - N) + (P - N'') \\
 &= 2 \cdot P - 2 \cdot N + (P' + P'') + (N' + N'') \\
 &= 4 \cdot P - 4 \cdot N,
 \end{aligned}$$

da  $P' + P'' = 2 \cdot P$  und  $N' + N'' = 2 \cdot N$  ist. Demnach wird der Unterschied der Mittenmaße des Prüflings und des Normals

$$\delta' = P - N = \frac{1}{4} \cdot (a + b + c + d).$$

Voraussetzung ist dabei, daß die Endmaße stets unmittelbar aneinander stehen und man immer in der Längsmittellinie mißt. Geringe Abweichungen hiervon sind aber bedeutungslos, da die Unparallelität der Meßflächen bei guten Endmaßen stets nur sehr gering ist, so daß ein kleines Herausgehen aus dem Mittelpunkt der Meßflächen keinen in Betracht kommenden Fehler bewirkt.

$\delta'$  gibt den Unterschied der Mittenmaße in Streifenbreiten; um ihn in  $\mu$  zu erhalten, muß man noch mit  $\frac{\lambda}{2}$  multiplizieren; somit wird

$$\delta = \frac{1}{4} \cdot (a + b + c + d) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

oder, da die Beobachtung im Licht der grünen Heliumlinie gemacht ist ( $\lambda = 0,502 \mu$ ),

$$\delta = \frac{1}{16} \cdot (a + b + c + d) \mu$$

und in obigem Beispiel also

$$\delta = \frac{1}{16} \cdot (-3,1 + 1,6 + 1,2 - 2,6) = -0,18 \mu.$$

Um die Korrektur (die Abweichung des Prüflings vom Sollwert) zu erhalten, muß noch die des Normals bekannt sein; betrug sie in vorliegendem Fall  $+0,09 \mu$ , so wird die Korrektur des Prüflings  $K = -0,18 + 0,09 = -0,09 \mu$ .

Im Prinzip würden übrigens 2 Messungen (*I* und *III* oder *II* und *IV*) genügen, da aus diesen folgt

$$\begin{aligned} a + c &= (P' - N) + (P'' - N) \\ &= 2 \cdot P - 2 \cdot N \\ \delta &= \frac{1}{2} \cdot (a + c) \cdot \frac{\lambda}{2} = \frac{1}{8} \cdot (a + c) \mu \\ &= \frac{1}{8} \cdot (-3,1 + 1,2) = -0,24 \mu, \end{aligned}$$

bzw.

$$\begin{aligned} b + d &= (P - N') + (P - N'') \\ &= 2 \cdot P - 2 \cdot N \\ \delta &= \frac{1}{2} \cdot (b + d) \cdot \frac{\lambda}{2} = \frac{1}{8} \cdot (b + d) \mu \\ &= \frac{1}{8} \cdot (1,6 - 2,6) = -0,13 \mu. \end{aligned}$$

Durch die Mittelbildung aus allen 4 Messungen wird aber die Genauigkeit erhöht (die bei der letzten Rechnung gefundenen Unterschiede rühren daher, daß die Zeichnung mit einer gewissen Willkür angefertigt ist).

Um das Umsetzen des Normals zu vermeiden, kann man von vornherein zu beiden Seiten des Prüflings zwei Normale  $N_1$  und  $N_2$  ansprengen (5). Bei Ausführung der Messungen *I* und *III* erhält man dann

$$\begin{aligned} a &= P' - N_1, & c &= P'' - N_2, \\ \text{somit wird} & & & \\ a + c &= (P' - N_1) + (P'' - N_2) \\ &= 2 \cdot P - (N_1 + N_2), \\ \delta &= P - \frac{1}{2} \cdot (N_1 + N_2) = \frac{1}{2} \cdot (a + c) \cdot \frac{\lambda}{2} \\ &= \frac{1}{8} \cdot (a + c) \mu. \end{aligned}$$

Die Temperatur braucht bei den Messungen nicht berücksichtigt zu werden, da die in Berührung miteinander stehenden Endmaße bald gleiche Temperatur

annehmen, namentlich wenn man sie noch mit einem Luftstrom von Zimmertemperatur anbläst (etwa durch einen Föhnapparat). Dagegen darf man sich nicht allzuweit von der Bezugstemperatur  $20^0$  entfernen, da jedes Grad Unterschied hiergegen — wegen der möglichen Verschiedenheit der Ausdehnungskoeffizienten um  $\pm 2 \cdot 10^{-6}$  — eine Unsicherheit von  $\pm 0,2 \mu$  auf 100 mm bewirken kann.

Die obigen Messungen gestatten auch noch, die Unparallelität, also die Abweichung der größten und kleinsten Endmaßlänge  $b$  vom Mittenmaß  $m$ , in Richtung der kurzen Kante zu ermitteln. Nach Abb. 117 ist

$$\begin{aligned} 2 \cdot p &= \frac{1}{2} \cdot (P'' - P') \\ &= \frac{1}{2} \cdot [(P'' - N) - (P' - N)] \\ &= \frac{1}{2} \cdot (c - a) \cdot \frac{\lambda}{2} = \frac{1}{8} \cdot (c - a) \mu, \end{aligned}$$

in obigem Beispiel

$$\begin{aligned} 2 \cdot p &= \frac{1}{8} \cdot (1,2 + 3,1) = 0,54 \mu \\ p &= \pm 0,27 \mu *. \end{aligned}$$

Auf die Bestimmung der Parallelität in der Längsrichtung wird weiter unten eingegangen werden. Im übrigen hat sich meist gezeigt, daß die Parallelität in dieser Richtung besser eingehalten wird als in der Querrichtung.

Analog folgt die Unparallelität des Normals zu

$$\begin{aligned} 2 \cdot n &= \frac{1}{2} \cdot (N'' - N') \\ &= \frac{1}{2} \cdot [(P - N'') - (P - N')] \\ &= \frac{1}{2} \cdot (b - d) \cdot \frac{\lambda}{2} = \frac{1}{8} \cdot (b - d) \mu \\ &= \frac{1}{8} \cdot (1,6 + 2,6) = 0,53 \mu, \\ n &= \pm 0,27 \mu. \end{aligned}$$

Da bei der Ermittlung des Abstandes der charakteristischen Streifen mit einem Fehler von 0,1 bis  $0,2 \cdot S$  zu rechnen ist, so gilt dies auch für die Ermittlung von  $\delta$ ,  $p$  und  $n$ ; im ungünstigsten Falle, wenn man nämlich stets zu groß oder zu klein schätzt, wird man diese Größen also mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,03$  bis  $\pm 0,05 \mu$  ermitteln.

### 3. Absolutmessung in Lichtwellenlängen.

Nun konnten die Normale früher nur an Strichmaße angeschlossen werden. Da das Prototyp aber auf höchstens  $0,2 \mu$  sicher ist, so mußte man beim Vergleich der Endmaßnormalen mit den Arbeitsnormalen der Landesbehörden mit einem Fehler von  $1 \mu$ , unter günstigen Umständen vielleicht von  $0,5 \mu$  rechnen. Dadurch war auch die Garantie für die an die Normalen angeschlossenen Endmaße gegeben. Die Genauigkeit läßt sich aber nun wesentlich steigern, wenn man die Normalendmaße nicht mehr an Strichmaße anschließt, sondern ihre Längen unmittelbar in Wellenlängen auswertet.

Weil als Maßstab gewissermaßen hierbei die Wellenlänge dient, muß diese natürlich sehr genau bekannt sein. Da auf 1 m rund  $2 \cdot 10^6$  Wellenlängen des grünen Lichtes kommen, so muß, wenn das Meter dadurch auf  $0,1 \mu$  bestimmt

\* Um keine Mißverständnisse aufkommen zu lassen, sei nochmals daran erinnert, daß es sich in dem Zahlenbeispiel nicht um eine tatsächlich ausgeführte Messung handelt, sondern daß die Zahlen der willkürlichen Abb. 117 entnommen sind.

werden soll, die Wellenlänge auf  $0,5 \cdot 10^{-7} \mu$  sicher gemessen werden können. Dies ist möglich, falls das Urmeter mit jener Genauigkeit definiert ist, was, wie wir wissen, nicht der Fall ist. Gerade für die Endmaßmessung der Technik wäre es deshalb sehr wichtig, wenn das Meter nicht mehr durch das Prototyp, sondern durch die Zahl der in ihm enthaltenen Wellenlängen einer bestimmten Spektrallinie definiert werden würde, wie dies bereits auf S. 17 ausgeführt wurde. Deshalb wäre es für die Stetigkeit der technischen Messungen am besten, wenn der von Benoit, Fabry und Perot gefundene Wert, wonach

$$1 \text{ m} = 1\,553\,164,13 \cdot \lambda_R$$

( $\lambda_R$  die Wellenlänge der roten Cadmiumlinie bei  $15^\circ$  des Wasserstoffthermometers, 760 mm Barometerstand und in trockener Luft), bzw.

$$1 \text{ m} = 1\,770\,039,20 \cdot \lambda_{gg}$$

( $\lambda_{gg}$  die Wellenlänge der gelbgrünen Kryptonlinie bei  $20^\circ$ , 760 mm Barometerstand und 10 mm Druck des Wasserdampfes) ist, als Definition des Meters angenommen würde. Die Technik rechnet heute bereits mit dieser Zahl. Sollte sich nun bei den im Gang befindlichen Neubestimmungen ein etwas anderer Wert ergeben, so wären die jetzt angegebenen Längen alle mit dem Verhältnis des alten zu dem neuen Meterwert zu multiplizieren. Die dadurch bewirkte Änderung wird zwar bei der Mehrzahl der Endmaße zu vernachlässigen sein, muß aber doch für sorgfältige Messungen beachtet werden. Da die Technik der ganzen Welt mit der obigen Zahl rechnet, so ist im übrigen die innere Übereinstimmung der Endmaße von der Genauigkeit des Urmeters völlig unabhängig.

Da nun die rote Cadmiumlinie nicht gut zur Auswertung von Endmaßen geeignet ist (die Cadmiumlampen sind schwierig in ihrem Betrieb) und auch allein hierfür nicht ausreichen würde, so sind eine Reihe anderer Wellenlängen hieran angeschlossen. Als Grundlage für die Endmaßmessung gelten heute meist die folgenden Wellenlängen der Heliumlinien bei  $15^\circ$  des Wasserstoffthermometers, 760 mm Barometerstand und in trockener Luft, denen noch die Wellenlängen einiger Linien des Cadmiums, des Quecksilbers und des Neons beigelegt sind:

Stoff	Farbe	Wellenlänge	Literatur
Helium . . . . .	Rot	0,667 814 9	(12)
		0,667 815 2	(7b)
	Gelb	0,587 561 8	(12)
		0,587 562 3	(7b)
	Grün	0,501 567 5	(12)
		0,501 567 9	(7b)
	Grünblau	0,492 192 9	(12)
Blau	0,471 314 3	(12)	
Violett	0,447 147 7	(12)	
Cadmium <sup>1</sup> . . . . .	Rot	0,643 846 96	(8, 11)
	Grün	0,508 582 30	(13)
		0,508 582 22	(8)
		0,508 582 24	(7b)
	Blau	0,479 991 39	(13)
Quecksilber . . . . .	Gelb	0,576 959 96	(7b)
	Grün	0,546 074 02	(1)
		0,546 074 30	(7b)
Neon . . . . .	Grün	0,540 056 35	(8)

<sup>1</sup> Nach S. 17 wäre korrigiert Rot: 0,643 847 03. Die Cadmiumlinien sind mit der Michelson-Lampe beobachtet. Mit der Hamy-Lampe wurden noch erhalten (7b): Grün: 0,515 465 89; Blau: 0,466 235 13.

Aus den zuerst genannten folgen die Wellenlängen unter den für die technischen Messungen geeigneteren Bedingungen von 20° des Wasserstoffthermometers, 760 mm Barometerstand und einem Druck des Wasserdampfes in der Luft von 10 mm (entsprechend einer Luftfeuchtigkeit von 58%) (4, 8), denen noch einige Kryptonlinien (8, 10) angefügt sind, zu:

Stoff	Farbe	Wellenlänge
Helium . . . . .	Rot	0,667 818 4 = $\lambda_1$
	Gelb	0,587 564 9 = $\lambda_2$
	Grün	0,501 570 2 = $\lambda_3$
	Grünblau	0,492 195 5 = $\lambda_4$
	Blau	0,471 316 8 = $\lambda_5$
	Violett	0,447 150 1 = $\lambda_6$
Krypton . . . . .	Rot	0,645 632 41 = $\lambda'_1$
	Gelb	0,587 094 63
	Gelbgrün	0,564 959 24 = $\lambda'_2$
	Violett	0,450 237 90 = $\lambda'_3$
Cadmium . . . . .	Rot	0,643 850 33
	Grün	0,508 584 90
	Blau	0,479 993 93
Neon . . . . .	Grün	0,540 059 19 = $\lambda'_4$

(wie die Umrechnung auszuführen ist, wird weiter unten erklärt werden). Natürlich steht nichts im Wege, auch andere genau bekannte Spektrallinien zu nehmen, falls sie einfach gebaut sind und nicht etwa aus mehreren Komponenten bestehen. Brauchbar sind in dieser Beziehung bis etwa 20 mm die Heliumlinien mit Ausnahme der gelben 0,588, die Tripletstruktur aufweist und deshalb nur für Messungen bis zu 10 mm benutzt werden darf. Für größere Längen macht sich die Änderung der Selbstumkehr und damit der Wellenlänge mit den Erregungsbedingungen und der Stromrichtung bemerkbar (9a). Die rote Cadmiumlinie kann unter bestimmten Bedingungen Selbstumkehr zeigen; da diese aber (in der Michelson-Lampe) völlig symmetrisch ist, so bleibt dadurch für bestimmte Erregungsbedingungen die Wellenlänge des Schwerpunktes bis 140 mm Weglänge ungeändert (7c), was aber von anderer Seite nicht bestätigt wurde (1a). Über die anderen Cadmiumlinien sind die Ansichten noch geteilt. Ihrer komplizierten Struktur wegen scheidet die grüne Kryptonlinie ( $\lambda = 0,557 \mu$ ) aus und ist die (lichtstarke) gelbe ( $\lambda = 0,587 \mu$ ) mit einer gewissen Vorsicht zu verwenden, da die Angaben über ihre Struktur noch einander widersprechen (3, 8a, 10), während die übrigen genannten einfach gebaut sind, auch keine Unsymmetrie und Selbstumkehr zeigen (10, 12). Ganz besonders gilt dies für die gelbgrüne Kryptonlinie 0,565 (die indessen nur bei größerer Dispersion von der ihr sehr naheliegenden grünen Linie 0,557 getrennt werden kann), mit der man Interferenzen bis zu Gangunterschieden von 100 mm erhält. Durch geeignete Anordnung der Apparate läßt sich diese Länge noch verdoppeln (siehe S. 141). Eine weitere Erhöhung des Gangunterschiedes wird durch Abkühlen des Rohres erreicht (10), so daß man dann auf 200 bis 250 mm Länge kommt<sup>1</sup>. Von den Neonlinien kann unmittelbar nur die vorher angegebene grüne ( $\lambda = 0,540$ ) gebraucht werden, da sie nur einen, nicht störenden schwachen Trabanten hat, während die roten und gelben Neonlinien infolge stärkerer Trabanten unsymmetrische Selbstumkehr zeigen (3). Gänzlich ungeeignet sind die meisten Quecksilberlinien (gelb 0,57906638, blau 0,49160686, blau

<sup>1</sup> Bedingungen: Kapillare von 1 mm Durchmesser, Beobachtung in Längsrichtung von der Kathodenseite aus; 550 Volt Gleichstrom, 19 mAmp Stromstärke (7c).

0,43583250; Angaben bei 15°, 760 mm und trockener Luft) und die Linien des Xenons (7b) ihres sehr komplizierten Baues wegen.

Unter Umständen lassen sich indessen auch komplexe Linien verwenden, wenn man entsprechende Korrekturen für die Änderung der wirksamen Wellenlänge mit der Weglänge anbringt (7a). Nach eingehenden Untersuchungen von Pérard (7b) sind die Korrekturen bis zu folgenden Weglängen zu vernachlässigen:

Stoff	Farbe	$\lambda$	Quer <sup>1</sup>	Längs <sup>1</sup>
Helium . . . . .	Rot	0,668	35 mm	20 mm
	Gelb	0,588	10 „	0 „
	Grün	0,502	35 „	20 „
	Violett	0,447	15 „	5 „
Krypton . . . . .	Gelb	0,587	70 mm	
Cadmium . . . . .	Rot	0,643	60 „	
	Grün	0,513	100 „	
		0,509	100 „	<sup>2</sup>
Quecksilber . . . . .	Gelb	0,577	45 „	
	Grün	0,546	20 „	
Neon . . . . .	Rot	0,64022440 <sup>3</sup>	35 mm	
		0,64022460 <sup>3</sup>		15 mm
	Rot	0,60961630 <sup>3</sup>	35 „	
		0,60961600 <sup>3</sup>		15 „
	Orange	0,59448330 <sup>3</sup>	25 „	
		0,59448300 <sup>3</sup>		25 „
	Gelb	0,58818945 <sup>3</sup>	40 „	
		0,58818910 <sup>3</sup>		30 „
	0,58524883 <sup>3</sup>	80 „		
	0,58524840 <sup>3</sup>		25 „	

Daß man nicht Interferenzen für beliebig hohe Gangunterschiede erhält, ist darin begründet, daß auch die Spektrallinien nicht streng homogen sind, sondern eine gewisse Breite haben. Kommt ihrem Schwerpunkt die Wellenlänge  $\lambda$  zu, so ihren Rändern bei symmetrischer Verteilung die Wellenlänge  $\lambda \pm d\lambda$ . Die Interferenzen löschen sich nun aus, wenn die Minima der Wellenlänge  $\lambda + d\lambda$  auf die Maxima der anderen  $\lambda - d\lambda$  fallen, d. h. wenn

$$2 \cdot p \cdot \frac{(\lambda + d\lambda)}{2} = (2 \cdot p + 1) \cdot \frac{\lambda - d\lambda}{2}$$

ist, woraus folgt

$$p = \frac{1}{4} \cdot \frac{\lambda - d\lambda}{d\lambda} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\lambda}{d\lambda}$$

oder

$$d\lambda = \frac{1}{4} \cdot \frac{\lambda}{p}$$

Nun gilt bei der Länge  $L$  die Beziehung

$$L = \frac{1}{2} \cdot p \cdot \lambda,$$

also wird

$$d\lambda = \frac{1}{8} \cdot \frac{\lambda^2}{L}$$

Nehmen wir  $L = 25 \text{ mm} = 25 \cdot 10^3 \mu$ ,  $\lambda = 0,5 \mu$ , so wird

$$d\lambda = \frac{1}{8} \cdot \frac{0,25}{25 \cdot 10^3} \sim 10^{-6} \mu$$

und

$$p \sim 10^5.$$

<sup>1</sup> Quer: Beobachtung senkrecht; Längs: in Richtung der Kapillare der Geißlerröhre.

<sup>2</sup> Mit Michelson-Lampe; Hamy-Lampe hierfür unbrauchbar; die beiden anderen Linien mit Hamy-Lampe.

<sup>3</sup>  $\lambda$  für 15°, 760 mm, trockne Luft.

Für Längen von 100 mm kommt man auf Werte von  $d\lambda \sim 3 \cdot 10^{-7} \mu$ . Das setzt also sehr scharfe Linien (solche sehr geringer Breite) voraus, wie sie beim Krypton auftreten, dessen grüne Linie eine Halbbreite von  $3 \cdot 10^{-7} \mu$  hat (5).

Die Durchführung der Auswertung eines Endmaßes in Wellenlängen sei zunächst im Prinzip an Hand der Abb. 118 erläutert. Das zu prüfende Endmaß wird jetzt allein an die Quarzplatte angesprengt. Um das Mittenmaß gemäß der Definition von DIN 861 nach Abb. 80 zu erhalten, müßte die Quarzplatte senkrecht zu den einfallenden Strahlen justiert werden. Wäre sie gegen diese Lage unter einem Winkel  $\varphi$  geneigt, so würde man bei der Messung einen Fehler von  $\frac{1}{2} \cdot L \cdot \varphi^2$  begehen. Wird als größtes Endmaß  $L = 100 \text{ mm}$  angenommen, so müßte, damit der Fehler kleiner als  $1 \text{ m}\mu$  bleibt,

$$\varphi < \sqrt{2 \cdot 0,001 \cdot 10^{-5}} < 1,4 \cdot 10^{-4} < \frac{1}{2} \text{ Min.}$$

sein. Somit können Neigungen von  $\frac{1}{2}$  Min. unberücksichtigt bleiben. Deshalb kann man, was zweckmäßiger, die obere Keilfläche senkrecht zu den Strahlen justieren und der Quarzplatte die kleine Neigung von  $\frac{1}{3}$  bis  $\frac{1}{2}$  Min. geben, die zur Bildung des Luftkeils notwendig ist.

Nun denke man sich die obere Meßfläche wieder bis zum Schnitt mit dem Keil verlängert. Dann ist die Aufgabe darauf zurückgeführt, den Höhenabstand  $d$  der beiden Keilscheitel durch die Zahl der zwischen ihnen befindlichen Streifen zu bestimmen. Entfallen auf die Strecke  $s$   $p'$  Streifen, so ist

$$d = p' \cdot \frac{\lambda}{2}.$$

Nun sind aber die Keilscheitel in Wirklichkeit gar nicht vorhanden. Man könnte deshalb wieder daran denken, wie beim Vergleich zweier Endmaße statt des Abstandes der beiden  $O$ .-Streifen den der  $p$ .-Streifen auf der Quarzplatte und auf dem Endmaß zu bestimmen. Dies scheidet aber hier an der zu großen Zahl von dazwischen liegenden Streifen, würden doch die gleicher Ordnungszahl bei einem nur 1 mm dicken Endmaß bereits um 4000 Streifenbreiten (im grünen Licht), bei einem 10 mm dicken um 40000 Streifen auseinanderliegen. Es wäre also nicht möglich, diese zu zählen. Aus demselben Grunde würden auch die charakteristischen gleichgefärbten Streifen, die man bei Verwendung des ganzen Heliumspektrums erhalten würde, nicht mehr gleichzeitig auf der Quarzplatte und auf dem Endmaß sichtbar sein, da sie bei einem Streifenabstand von 1 oder 2 mm beim 1-mm-Endmaß um 4 bzw. 8 m, beim 10-mm-Endmaß um 40 bzw. 80 m auseinanderliegen würden.

Man muß deshalb in anderer Weise vorgehen. Die Strecke  $s$  setzt sich aus einer ganzen Zahl  $p_1$  und einem überschießenden Bruchteil  $\varepsilon_1$  von Streifenbreiten zusammen. Die ganze Zahl  $p_1$  ist nach den vorstehenden Ausführungen nicht auszuzählen, dagegen kann man  $\varepsilon_1$ , die Verschiebung der Streifen auf dem Endmaß gegen die auf der Quarzplatte, zwischen irgend zwei beliebigen Streifen ermitteln. Nach Abb. 118 muß man dazu von dem Streifen auf der Quarzplatte im Sinne wachsender Ordnungszahlen, also vom Keilscheitel weg, zu dem benachbarten Streifen auf dem Endmaß gehen. Nach den früheren

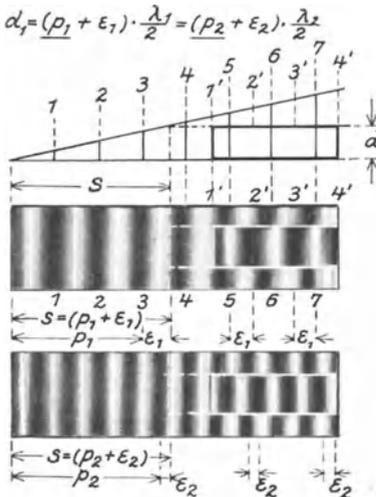


Abb. 118. Absolutmessung von Endmaßen.

Ausführungen ermittelt man die Lage des Keilscheitels durch den Wanderungssinn der Interferenzstreifen beim Drücken auf die obere Keiffläche. Man muß demnach im Wanderungssinn von der Quarzplatte zum Endmaß gehen.

Bei der Messung ist noch darauf zu achten, daß eine Streifenbreite von Mitte des einen dunkeln zur Mitte des nächsten dunkeln Streifens zählt, was wegen der Breite der Streifen und ihres verwaschenen Aussehens gewisse Schwierigkeiten bei der Schätzung macht. Anfänger schätzen häufig die Größe  $a'$  in Bruchteilen von  $A'$  (Abb. 119), statt des richtigen Abstandes  $a$  in Bruchteilen von  $A$ , als Wert von  $\varepsilon_1$  (der Pfeil soll den Wanderungssinn der Interferenzen andeuten). Genauer wird die Beobachtung noch, wenn man die Größen  $A$  und  $a$  mittels eines mikrometrisch verschiebbaren, parallel zu den Streifen gestellten Drahtes mißt (9), was leicht auf je 0,02 mm auszuführen ist (sehr geübte Beobachter können auch wohl auf  $1/50$  Streifenbreite schätzen).

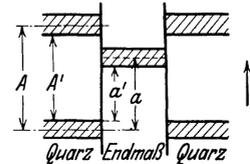


Abb. 119. Streifenbreite.

Stehen die Streifen auf dem Endmaß nicht parallel zu denen auf der Quarzplatte, so muß man wieder den Abstand  $a$  auf der senkrechten Mittellinie ermitteln. Ebenso ist auch die Messung in der Nähe des Mittelpunktes der Meßfläche auszuführen, um wirklich des Mittenmaß zu erhalten.

In der Beziehung

$$d = (p_1 + \varepsilon_1) \cdot \frac{\lambda_1}{2}$$

sind bekannt:  $\varepsilon_1$  durch Beobachtung und  $\lambda_1$  aus der früher gegebenen Tabelle; es bleiben somit noch 2 Unbekannte:  $d$  und  $p_1$ . Um sie zu bestimmen, wiederholt man den Versuch mit dem Licht einer anderen Spektrallinie der Wellenlänge  $\lambda_2$ . Hierbei gilt

$$d = (p_2 + \varepsilon_2) \cdot \frac{\lambda_2}{2} .$$

In diesen beiden Gleichungen treten aber noch 3 Unbekannte auf:  $d$ ,  $p_1$  und  $p_2$ . Wenn man auch noch die Interferenzen anderer Spektrallinien nacheinander hinzuziehen würde (zweckmäßig verwendet man mindestens 4 Linien), stets würde man 1 Unbekannte mehr haben, als Gleichungen vorhanden sind.

Die Lösung der Aufgabe ist nun dadurch möglich, daß man weiß, daß die Größen  $p_1 p_2 \dots$  ihrer Definition nach ganze Zahlen sind, und daß ferner die Dicke des Endmaßes angenähert bekannt ist; man kann sie (mit einem sehr guten Schraubenmikrometer z. B.) auf  $\pm 2\mu$  bestimmen; dadurch kennt man zwei Grenzen, zwischen denen  $d$  liegt. Durch Division derselben durch  $\frac{\lambda}{2}$  erhält man zwei äußerste Werte für  $p_1$ . Man nimmt nun der Reihe nach alle dazwischen liegenden ganzen Zahlen für  $p_1$  an und berechnet mit diesen die Größe  $p_i + \varepsilon_i$  ( $i = 2, 3, 4 \dots$ ) aus der Beziehung:

$$(p_1 + \varepsilon_1) \cdot \frac{\lambda_1}{2} = (p_i + \varepsilon_i) \cdot \frac{\lambda_i}{2} .$$

Von den verschiedenen erhaltenen Werten ist derjenige der richtige, dessen überschießender Bruchteil  $\varepsilon_i$  mit dem beobachteten  $\varepsilon_i$  (stets für dasselbe  $p_1$ ) übereinstimmt. Dadurch sind auch die Werte von  $p_1$  und  $p_i$  bekannt, so daß man jetzt die Endmaßdicke  $d$  aus den Gleichungen

$$d = (p_1 + \varepsilon_1) \cdot \frac{\lambda_1}{2} , \quad d = (p_2 + \varepsilon_2) \cdot \frac{\lambda_2}{2} , \dots$$

berechnen kann, wobei man für  $\varepsilon_1, \varepsilon_2 \dots$  die beobachteten Werte einsetzt.

Zum besseren Verständnis dieser Annäherungsrechnung sei ein Zahlenbeispiel durchgeführt (bei dem die Rechnung allerdings nur bis auf  $1/100 \mu$  erstreckt ist). Es soll ein Endmaß von 1,400 mm Sollwert gemessen werden; durch Vergleich mit einem bereits vorhandenen bekannten mittels Fühlhebels ergab sich, daß es höchstens um  $\pm 1 \mu$  davon abwich. Bei Beobachtung der Interferenzen mit der roten, gelben, grünen und violetten Heliumlinie ( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_6$ ) ergaben sich folgende Bruchteile von Streifenbreiten für die Verschiebung der Streifen auf dem Endmaß gegen die auf der Quarzplatte:

	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_6$
1. Beobachtung . . . . .	0,25	0,80	0,85	0,20
2. „ „ . . . . .	0,30	0,90	0,95	0,25
Mittel . . . . .	0,28	0,85	0,90	0,23

$p_1$  berechnet sich aus:  $p_1 \sim \frac{d}{\lambda_1} \sim \frac{1,399}{2} \sim \frac{1,399}{2}$  bis  $\frac{1,401}{2}$  zu 4190 bis 4196. Damit ist  $p_1 + \varepsilon_1$

gleich 4190,28 bis 4196,28. Die mit siebenstelligen Logarithmen auszuführende Rechnung liefert für die übrigen  $p_i + \varepsilon_i$  folgende Werte:

$p_1 + \varepsilon_1$	$p_2 + \varepsilon_2$	$p_3 + \varepsilon_3$	$p_6 + \varepsilon_6$
4190,28	4762,65	5579,21	6258,23*
4191,28	4763,79*	5580,54	6259,72
<b>4192,28</b>	<b>4764,92</b>	<b>5581,87</b>	<b>6261,21</b>
4193,28	4766,06	5583,21	6262,71
4194,28	4767,20	5584,54	6264,20
4195,28	4768,33	5585,87*	6265,69
4196,28	4769,47	5587,20	6267,19
Beobachtet: ,28	,85	,90	,23

Innerhalb der Beobachtungsgenauigkeit stimmen gleichzeitig bei allen 4 Wellenlängen die beobachteten mit den berechneten Bruchteilen  $\varepsilon_i$  nur bei den fett gedruckten überein. Hätte man nur mit 2 Spektrallinien gearbeitet, so würden auch die mit \* versehenen Stellen dieser Forderung genügt haben (aus diesem Grunde kann man sich nicht nur auf die Beobachtung mit 2 Spektrallinien beschränken).

Somit hat sich für das Endmaß ergeben:

$$p_1 = 4192, \quad p_2 = 4764, \quad p_3 = 5581, \quad p_6 = 6261.$$

Mit den beobachteten  $\varepsilon_i$  wird:

$$p_1 + \varepsilon_1 = 4192,28, \quad p_2 + \varepsilon_2 = 4764,85, \quad p_3 + \varepsilon_3 = 5581,90, \quad p_6 + \varepsilon_6 = 6261,23.$$

Damit berechnet sich  $d$  nach der Formel:

$$d = (p_i + \varepsilon_i) \cdot \frac{\lambda_i}{2}$$

$$\text{zu:} \quad 1,39984 \quad 1,39983 \quad 1,39986 \quad 1,39985 \text{ mm,}$$

und ist seine Korrektion

$$- 0,16 \quad - 0,17 \quad - 0,14 \quad - 0,15 \mu,$$

im Mittel  $- 0,16 \mu$ .

Einfacher und schneller läßt sich diese Rechnung auf Grund der folgenden Überlegung durchführen<sup>1</sup>:

Das Maß der genauen Dicke  $d$  (in dem betrachteten Beispiel also von 1,40000 mm) würde sich ergeben aus der Beziehung

$$d = (p'_i + \varepsilon'_i) \cdot \frac{\lambda_i}{2},$$

wo  $\varepsilon'_i$  die bei ihm auftretenden Abstände zwischen den Streifen auf der Quarzplatte und dem Endmaß, die sogenannten Sollbruchteile, sind. Das wirklich gemessene Endmaß weist nun diesem gegenüber eine positive oder negative Korrektion

<sup>1</sup> Für ein anderes, aber umständlicheres Verfahren siehe (7a).

tion  $c$  auf, so daß dafür gilt

$$d + c = (p_i + \varepsilon_i) \cdot \frac{\lambda_i}{2},$$

worin  $\varepsilon_i$  die beobachteten Bruchteile sind. Man kann sich gewissermaßen auf das genaue Endmaß  $d$  ein sehr kleines Endmaß  $c$  aufgesetzt oder von ihm abgenommen denken, derart, daß  $d + c$  das Maß des Prüflings darstellt. Durch Subtraktion ergibt sich

$$\begin{aligned} c &= [(p_i - p'_i) + (\varepsilon_i - \varepsilon'_i)] \cdot \frac{\lambda_i}{2} \\ &= [m_i + (\varepsilon_i - \varepsilon'_i)] \cdot \frac{\lambda_i}{2} \end{aligned}$$

oder

$$-c = [-m_i + (\varepsilon'_i - \varepsilon_i)] \cdot \frac{\lambda_i}{2}$$

(worin  $m_i$  wieder eine ganze Zahl ist), je nachdem, ob  $c$  positiv oder negativ ist. Die Größe  $m_i$  muß nun wieder auf dem Wege des Probierens wie vorher bestimmt werden, was jetzt aber leichter auszuführen, da  $m_i$  eine kleine (ganze) Zahl ist.

Zunächst berechnet man sich ein für allemal die überschießenden Bruchteile  $\varepsilon_i$  für die in den Endmaßsätzen vorhandenen Maße und stellt sie sich in einer Tabelle zusammen (4), wie sie nachstehend für Helium wiedergegeben ist:

Sollbruchteile für die Längen  $d$  mm bei 20° C in Luft von 760 mm  
Barometerstand und 10,0 mm Wasserdampfdruck.

$d$	Rot	Gelb	Grün	Blaugrün	Blau	Violett
0,5	,413	,940	,739	,713	,715	,386
1,000	,826	,879	,478	,426	,430	,771
1,001	,821	,283	,465	,489	,674	,244
1,002	,816	,687	,453	,553	,917	,717
1,003	,811	,091	,440	,616	,161	,189
1,004	,805	,495	,428	,680	,404	,662
1,005	,800	,899	,415	,743	,647	,135
1,006	,795	,303	,403	,807	,891	,608
1,007	,790	,706	,390	,870	,134	,080
1,008	,785	,110	,378	,933	,378	,553
1,009	,780	,514	,365	,997	,621	,026
1,01	,774	,918	,353	,060	,865	,499
1,02	,723	,957	,227	,695	,299	,226
1,03	,617	,996	,102	,329	,733	,954
1,04	,619	,034	,977	,963	,168	,682
1,05	,567	,073	,852	,597	,602	,410
1,06	,516	,112	,726	,232	,036	,137
1,07	,464	,151	,601	,866	,470	,865
1,08	,412	,190	,476	,500	,905	,593
1,09	,360	,228	,351	,134	,339	,320
1,10	,309	,267	,225	,769	,773	,048
1,11	,257	,306	,100	,403	,208	,776
1,12	,205	,345	,975	,037	,642	,504
1,13	,153	,384	,850	,671	,076	,231
1,14	,102	,422	,725	,306	,511	,959
1,15	,050	,461	,599	,940	,945	,687
1,16	,998	,500	,474	,574	,379	,415
1,17	,947	,539	,349	,208	,813	,142
1,18	,895	,578	,224	,843	,248	,870
1,19	,843	,616	,098	,477	,682	,598

Fortsetzung der Tabelle von S. 127.

<i>d</i>	Rot	Gelb	Grün	Blaugrün	Blau	Violett
1,20	,791	,655	,973	,111	,116	,325
1,21	,740	,694	,848	,745	,551	,053
1,22	,688	,733	,723	,380	,985	,781
1,23	,636	,772	,598	,014	,419	,509
1,24	,584	,810	,472	,648	,854	,236
1,25	,532	,849	,347	,283	,288	,964
1,26	,481	,888	,222	,917	,722	,692
1,27	,429	,927	,097	,551	,157	,419
1,28	,377	,966	,971	,185	,591	,147
1,29	,326	,004	,846	,820	,025	,875
1,30	,274	,043	,721	,454	,459	,603
1,31	,222	,082	,596	,088	,894	,330
1,32	,171	,121	,471	,722	,328	,058
1,33	,119	,159	,345	,357	,762	,786
1,34	,067	,198	,220	,991	,197	,513
1,35	,015	,237	,095	,625	,631	,241
1,36	,964	,276	,970	,259	,065	,969
1,37	,912	,315	,844	,894	,500	,697
1,38	,860	,353	,719	,528	,934	,424
1,39	,808	,392	,594	,162	,368	,152
1,40	,757	,431	,469	,796	,802	,880
1,41	,705	,470	,344	,431	,237	,608
1,42	,653	,509	,218	,065	,671	,335
1,43	,601	,547	,093	,699	,105	,063
1,44	,550	,586	,968	,333	,540	,791
1,45	,498	,625	,843	,968	,974	,518
1,46	,446	,664	,717	,602	,408	,246
1,47	,394	,703	,592	,236	,843	,974
1,48	,343	,741	,467	,871	,277	,702
1,49	,291	,780	,342	,505	,711	,429
1,5	,239	,819	,217	,139	,145	,157
1,6	,722	,207	,964	,482	,489	,434
1,7	,204	,595	,712	,824	,832	,711
1,8	,687	,983	,460	,167	,175	,988
1,9	,170	,371	,208	,509	,518	,265
2	,652	,759	,955	,852	,861	,542
2,5	,065	,698	,694	,565	,576	,927
3	,478	,638	,433	,278	,291	,313
3,5	,891	,578	,172	,991	,006	,699
4	,305	,517	,911	,704	,721	,084
4,5	,718	,457	,650	,417	,436	,470
5	,131	,396	,389	,130	,152	,855
5,5	,544	,336	,127	,843	,867	,240
6	,957	,276	,866	,556	,582	,626
6,5	,370	,215	,605	,269	,297	,011
7	,783	,155	,344	,982	,012	,397
7,5	,196	,095	,083	,695	,727	,782
8	,609	,034	,822	,408	,443	,168
8,5	,022	,974	,561	,121	,158	,553
9	,435	,914	,300	,834	,873	,939
9,5	,848	,853	,038	,547	,588	,324
10	,261	,793	,777	,260	,303	,710
10,5	,674	,733	,516	,973	,018	,096
11	,088	,672	,255	,686	,734	,481
11,5	,501	,612	,994	,399	,449	,867
12	,914	,552	,733	,112	,164	,252
12,5	,327	,491	,472	,825	,879	,638

Fortsetzung der Tabelle von S. 128.

$d$	Rot	Gelb	Grün	Blaugrün	Blau	Violett
13	,740	,431	,210	,538	,594	,023
13,5	,153	,371	,949	,251	,309	,409
14	,566	,310	,688	,964	,025	,794
14,5	,979	,250	,427	,677	,740	,180
15	,392	,189	,186	,390	,455	,565
15,5	,805	,129	,905	,103	,170	,951
16	,218	,069	,644	,816	,885	,336
16,5	,631	,008	,382	,529	,600	,722
17	,044	,948	,121	,242	,316	,107
17,5	,457	,888	,860	,955	,031	,493
18	,870	,827	,599	,668	,746	,878
18,5	,284	,767	,338	,381	,461	,264
19	,697	,707	,077	,094	,176	,649
19,5	,110	,646	,816	,807	,891	,035
20	,52	,59	,55	,52	,61	,42
20,5	,94	,53	,29	,23	,32	,81
21	,35	,46	,03	,95	,04	,20
21,5	,76	,40	,77	,66	,75	,58
22	,17	,34	,51	,37	,47	,96
22,5	,59	,28	,25	,08	,18	,35
23	,00	,22	,99	,80	,90	,73
23,5	,41	,16	,73	,51	,61	,12
24	,83	,10	,46	,22	,33	,50
24,5	,24	,04	,20	,94	,04	,89
25	,65	,98	,94	,65	,76	,28
30	,78	,38	,33	,78	,91	,13
40	,05	,17	,11	,04	,21	,84
50	,31	,96	,89	,30	,52	,55

Die Berechnung der Tabelle führt man am besten so aus, daß man die Größen  $\frac{1}{\lambda}$  bestimmt; sie ergeben sich für die verschiedenen Linien zu:

Stoff	Farbe	$\frac{1}{\lambda}$ 2
Helium . . . . .	Rot	2994,826138
	Gelb	3403,879299
	Grün	3987,477725
	Grünblau	4063,426013
	Blau	4243,430321
	Violett	4472,771002
Krypton . . . . .	Rot	3097,737922
	Gelb	3406,605849
	Gelbgrün	3540,078396
	Blau	4442,096056
Neon . . . . .	Grün	3703,29778

Will man die Sollbruchteile für irgend eine andere Länge  $L$  haben, so multipliziert man vorstehende Zahlen mit  $L$ , dann geben die Stellen hinter dem Komma die Sollbruchteile an.

Nun kann man die Größen  $\varepsilon_i - \varepsilon'_i$  bzw.  $\varepsilon'_i - \varepsilon_i$  leicht berechnen. Es war

	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_6$	
Beobachtet $\varepsilon_i$	0,28	0,85	0,90	0,23	
Soll . . . $\varepsilon'_i$	0,76	0,43	0,47	0,88	
$\delta = \varepsilon_i - \varepsilon'_i$	0,52	0,42	0,43	0,35	(c positiv)
$\delta' = \varepsilon'_i - \varepsilon_i$	0,48	0,58	0,57	0,65	(c negativ)

Bei der Subtraktion wird, wenn sie nicht auszuführen ist, zu dem Minuendus eine ganze Streifenbreite hinzugenommen, was ohne weiteres möglich, da ja die ganze Zahl  $m_i$  unbestimmt gelassen ist. Die berechneten Differenzen  $\delta = \varepsilon_i - \varepsilon'_i$  und  $\delta' = \varepsilon'_i - \varepsilon_i$  stellen gewissermaßen die Bruchteile dar, die man für das Endmaß der Dicke  $c$  beobachtet hätte, das man auf das genaue Maß aufgesetzt bzw. von ihm abgenommen hat, damit beide zusammen die Länge des Prüflings ergeben. Zur Berechnung schreibt man die Gleichungen in der Form

$$\begin{aligned} (m_1 + \delta_1) \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_2} &= m_2 + \delta_2 \\ (m_1 + \delta_1) \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_3} &= m_3 + \delta_3 \\ (m_1 + \delta_1) \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_4} &= m_4 + \delta_4 \\ &\dots \dots \dots \end{aligned}$$

Für die Heliumlinien haben die Größen  $\frac{\lambda_1}{\lambda_i}$  folgende Werte:

$\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$	$\frac{\lambda_1}{\lambda_3}$	$\frac{\lambda_1}{\lambda_4}$	$\frac{\lambda_1}{\lambda_5}$	$\frac{\lambda_1}{\lambda_6}$
1,137	1,331	1,357	1,417	1,494;

für die drei brauchbaren Krypton- und für die eine Neonlinie:

$\frac{\lambda'_1}{\lambda'_2}$	$\frac{\lambda'_1}{\lambda'_3}$	$\frac{\lambda'_1}{\lambda'_4}$
1,143	1,434	1,196

Aus der Vormessung (mit dem Fühlhebel) ist nun bekannt, daß  $c$  zwischen den Grenzen  $\pm 1\mu$ , also  $m_1$  zwischen den Grenzen  $\pm \frac{1}{\lambda_1} \sim \pm 3$  liegt. Damit wird

$m_1 + \delta_1 = -2,48; -1,48; -0,48; +0,52; +1,52; +2,52$ . Mit diesen Zahlen berechnet man auf Grund der letzten Formeln die Größen  $m_2 + \delta_2, m_3 + \delta_3 \dots$

	$m_1 + \delta_1$	$m_2 + \delta_2$	$m_3 + \delta_3$	$m_6 + \delta_6$
Beobachtet . . .	-,48	,58	,57	,65
Berechnet . . .	-2,48	2,82	3,30	3,70*
	-1,48	1,68	1,98	2,21
	-0,48	0,55	0,64	0,72
	+0,52	0,59	0,69	0,78
	+1,52	1,72	2,02	2,27*
	+2,52	2,88	3,36	3,76
Beobachtet . . .	+,52	,42	,43	,35

Wie man sieht, stimmen nur die mit  $m_1 + \delta_1 = -0,48$  berechneten Werte in ihren überschießenden Bruchteilen mit den sich aus der Beobachtung ergebenden überein (Beobachtung mit nur 2 Wellenlängen wäre wieder nicht aus-

reichend gewesen, wie die bei  $m_6 + \delta_6$  mit \* versehenen Zahlen beweisen). Die Größe  $c$  berechnet sich somit aus

$$\begin{array}{cccc} -0,48 \cdot \frac{\lambda_1}{2} & -0,58 \cdot \frac{\lambda_2}{2} & -0,57 \cdot \frac{\lambda_3}{2} & -0,65 \cdot \frac{\lambda_6}{2} \\ \text{zu} & -0,16 & -0,17 & -0,14 & -0,15 \mu, \\ \text{im Mittel zu} & & -0,16 \mu, & & \end{array}$$

Die Zahlen stimmen natürlich mit den vorher gefundenen überein. Hat man einmal die Sollwerttabelle für die verschiedenen Endmaße, sowie die Verhältnisse  $\frac{\lambda_1}{\lambda_i}$ , so kann man die Rechnung mittels Rechenschiebers in wenigen Minuten durchführen [ein ähnliches Verfahren ist bei (6) beschrieben].

Sie läßt sich noch durch Benutzung eines Nomogramms nach Kösters (4) weiter vereinfachen (Abb. 120). Auf der untersten Reihe sind die Korrekturen

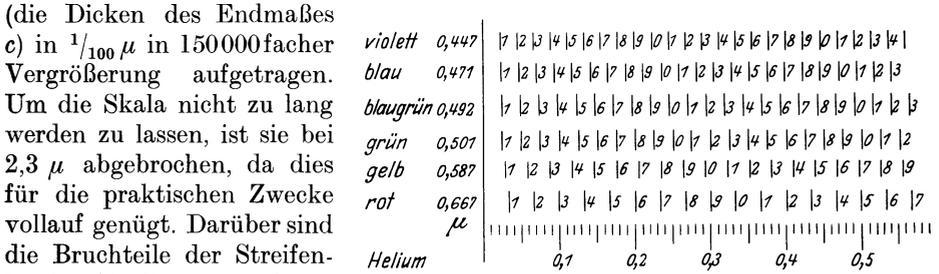


Abb. 120. Rechenschieber zur Ermittlung der Maßkorrektion.

Beispiel entspricht einer Streifenbreite im grünen Heliumlicht ( $\lambda = 0,502 \mu$ ) eine Dicke von  $0,251 \mu$ ; folglich steht über dem Teil  $0,251 \mu$  in der untersten Reihe in der Zeile der grünen Linie die Zahl 1,0; ebenso findet man über  $0,334$  in der untersten Reihe in der Zeile der roten Linie die Ziffer 1,0, da eine Streifenbreite im roten Heliumlicht einer Dicke von  $\frac{\lambda}{2} = 0,334 \mu$  entspricht. Angegeben sind nur die Zehntel-Streifenbreiten unter Weglassung der Zahlen vor dem Komma, so daß z. B. die erste Zahl 7 in irgend einer der 6 Wellenlängenreihen  $0,7$  Streifenbreiten bedeutet, die erste Null  $1,0$  Streifenbreiten, die darauffolgende 4:  $1,4$  Streifenbreiten usw.

Man verfährt nun so, daß man in dem Nomogramm nacheinander den Schieber mit seinem Strich in der Skala der roten Linie auf die berechneten Differenzen  $0,52$   $1,52$  . . .  $0,48$   $1,48$  . . . einstellt und sieht, ob die in den Skalen der anderen Spektrallinien dabei abgelesenen Bruchteile mit den berechneten  $\delta$  bzw.  $\delta'$  übereinstimmen. Findet man an einer Stelle des Nomogramms damit praktisch identische Werte, so kann man auf der untersten Reihe sofort die Korrektion  $c$  ablesen. Diese Bestimmung läßt sich noch wesentlich schneller als die zuletzt angegebene Rechnung ausführen. Der größeren Genauigkeit wegen geht man so vor, daß man in dem betrachteten Beispiel den Schieber in der Skala der roten, der gelben, der grünen und der violetten Linie nacheinander auf die gefundenen Bruchteile  $0,48$   $0,58$   $0,57$   $0,65$  einstellt und für jede Stellung auf der untersten Reihe die ihnen entsprechenden Korrekturen  $-0,16$   $-0,17$   $-0,14$   $-0,15$  abliest, die natürlich auch wieder mit den berechneten identisch sind, und aus ihnen das Mittel  $c = -0,16 \mu$  berechnet<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Für genauere Messungen nimmt man zweckmäßig einen Rechenschieber in größerem Maßstabe.

Die Größe  $c$  berechnete sich aus der Gleichung

$$\begin{aligned} c &= [(p_i + \varepsilon_i) - (p'_i + \varepsilon'_i)] \cdot \frac{\lambda_i}{2} \\ &= (p_i + \varepsilon_i) \cdot \frac{\lambda_i}{2} - d. \end{aligned}$$

Folglich ist der Fehler  $dc$  von  $c$  gegeben durch

$$\begin{aligned} dc &= \frac{1}{2} \cdot \lambda_i \cdot d\varepsilon_i + \frac{1}{2} \cdot (p_i + \varepsilon_i) \cdot d\lambda_i \\ &\sim \frac{1}{2} \cdot \lambda_i \cdot d\varepsilon_i + \left(\frac{d}{\lambda_i}\right) \cdot d\lambda_i. \end{aligned}$$

Mißt man die Größen  $a$  und  $A$  (siehe S. 125) auf je 0,02 mm, so wird bei  $A = 3$  mm  $d\varepsilon_i$  maximal 0,0014;  $d\lambda_i$  kann man zu  $1 \cdot 10^{-7} \mu$  ansetzen. Damit wird für ein Maß von  $d = 25$  mm

$$dc = 0,0035 + 0,005 \mu = 8,5 \text{ m}\mu$$

(falls man  $\lambda = 0,5 \mu$  nimmt). Benutzt man zur Bestimmung von  $c$  6 verschiedene Wellenlängen, so wird der mittlere Fehler des Mittelwertes (siehe S. 49) rund  $4 \text{ m}\mu$ .

#### 4. Korrekturen bei der Messung in Lichtwellenlängen.

Die so erhaltene Zahl  $c$  stellt aber noch nicht die wirkliche Korrektur dar. Es soll doch die Länge  $d_0$  des Endmaßes bei  $20^\circ$  ermittelt werden. Sind nun aber die Beobachtungen bei der Temperatur  $t$  ausgeführt, so hat man die Länge  $d_t$  ermittelt, die mit  $d_0$  durch die Beziehung verbunden ist

$$d_t = d_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (t - 20)],$$

wo  $\alpha$  der Ausdehnungskoeffizient des Stahles,  $11,5 \cdot 10^{-6}$ , ist. Es ergibt sich also eine Korrektur

$$\begin{aligned} c_1 &= d_0 - d_t = -d_0 \cdot \alpha \cdot (t - 20) \\ &= -d_0 \cdot \alpha \cdot \delta t = -d_0 \cdot 11,5 \cdot 10^{-6} \cdot \delta t, \end{aligned}$$

falls man  $t - 20 = \delta t$  setzt (auf Vorzeichen achten!). Bei genaueren Messungen ist der Ausdehnungskoeffizient des betreffenden Maßes zu bestimmen und der dabei gefundene Wert von  $\alpha$  einzusetzen. Seine Beobachtung geschieht durch interferentielle Messung des Maßes bei zwei verschiedenen Temperaturen. Es genügt dazu, die Abstände der Streifen (für verschiedene Wellenlängen) auf dem Endmaß gegen die auf der Quarzplatte bei diesen beiden Temperaturen zu ermitteln und daraus, analog wie vorher angegeben, den Längenzuwachs zu berechnen [Näheres siehe bei (10)].

Eine zweite Korrektur rührt daher, daß nach den Ausführungen auf S. 108 die Wellenlänge  $\lambda$  nicht konstant ist, sondern von der Luftdichte abhängt, die ihrerseits eine Funktion der Temperatur  $t$ , des Luftdrucks  $b$  und des Drucks  $e$  des Wasserdampfes in der Luft ist. Es sei die Wellenlänge bei  $t = 20^\circ$ ,  $b = 760$  mm,  $e = 10$  mm mit  $\lambda_{20}$ , die Wellenlänge bei dem Zustand  $t$ ,  $b$ ,  $e$  mit  $\lambda$  bezeichnet. Es war die Korrektur  $c$  berechnet aus:

$$c = (p + \varepsilon) \cdot \frac{\lambda_{20}}{2} - (p' + \varepsilon') \cdot \frac{\lambda}{2}.$$

Nun war aber das Endmaß in Wirklichkeit mit der Wellenlänge  $\lambda$  (unter den Bedingungen  $t$ ,  $b$ ,  $e$ ) gemessen. Folglich bestimmt sich die tatsächliche

Korrektion  $C$  aus:

$$\begin{aligned} C &= (p + \varepsilon) \cdot \frac{\lambda}{2} - (p' + \varepsilon') \cdot \frac{\lambda_{20}}{2} \\ &= (p + \varepsilon) \cdot \frac{\lambda}{2} - (p' + \varepsilon') \cdot \frac{\lambda_{20}}{2} + (p + \varepsilon) \cdot \frac{\lambda_{20}}{2} - (p + \varepsilon) \cdot \frac{\lambda_{20}}{2} \\ &= [(p - p') + (\varepsilon - \varepsilon')] \cdot \frac{\lambda_{20}}{2} + (p + \varepsilon) \cdot \left( \frac{\lambda}{2} - \frac{\lambda_{20}}{2} \right) \\ &= c + (p + \varepsilon) \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot \left( 1 - \frac{\lambda_{20}}{\lambda} \right). \end{aligned}$$

Setzt man die dieserhalb an  $c$  einzubringende Korrektion  $C - c = c_2$ , so wird

$$c_2 = (d + c) \cdot \left( 1 - \frac{\lambda_{20}}{\lambda} \right),$$

wofür man mit vollauf genügender Genauigkeit schreiben darf

$$c_2 = d \cdot \left( 1 - \frac{\lambda_{20}}{\lambda} \right).$$

Das Verhältnis  $\frac{\lambda_{20}}{\lambda}$  kann man auf Grund des früher abgeleiteten Satzes ermitteln, daß die Wellenlängen umgekehrt proportional den Brechungsindizes  $n$  sind. Erfahrungsgemäß verhalten sich die Größen  $(n - 1)$  wie die Luftdichten, folgen also dem Boyle-Mariotteschen und dem Gay-Lussacschen Gesetz, und ergibt sich der um 1 verringerte Brechungsindex eines Gemisches (wie hier aus trockener Luft und Wasserdampf) durch Addition der Größen  $(n - 1)$  für die einzelnen Komponenten. Bezeichnet man die Brechungsindizes der trockenen Luft und des Wasserdampfes für den Normalzustand  $0^0$ , 760 mm mit  $n_0$  bzw.  $\nu_0$ , die entsprechenden Größen für den Zustand  $t$ ,  $b - e^*$  bzw.  $e$  mit  $n$  und  $\nu$ , so ist also

$$n - 1 = (n_0 - 1) \cdot \frac{b - e}{760} \cdot \frac{1}{1 + \beta \cdot t} + (\nu_0 - 1) \cdot \frac{e}{760} \cdot \frac{1}{1 + \beta \cdot t},$$

wo  $\beta$ , der Ausdehnungskoeffizient der Luft, gleich  $\frac{1}{273} = 0,00367$  ist. Daraus folgt

$$n = 1 + \frac{n_0 - 1}{1 + \beta \cdot t} \cdot \frac{b}{760} + \frac{\nu_0 - n_0}{1 + \beta \cdot t} \cdot \frac{e}{760}.$$

Eigentlich müßte man nun die Brechungsindizes und damit die Korrekturen für jede benutzte Linie einzeln berechnen. Ihre Werte unterscheiden sich aber so wenig voneinander (etwa  $\pm 3 \cdot 10^{-6}$  vom Mittel), daß es genügt, die Rechnung für eine mittlere Wellenlänge auszuführen, für die hier die der grünen Heliumlinie ( $\lambda = 0,502 \mu$ ) genommen sei.

Da die Gleichung für  $c_2$  sich in der Form schreiben läßt

$$c_2 = d \cdot \left( 1 - \frac{n}{n_{20}} \right),$$

so kommt es nur auf das Verhältnis  $\frac{n}{n_{20}}$  an. Aus der für  $n$  entwickelten Gleichung folgt für  $n_{20}$  mit  $dn_0 = \pm 3 \cdot 10^{-6}$  (und  $t = 20^0$ ,  $b = 760$  mm,  $e = 10$  mm)  $dn_{20} = 2,74 \cdot 10^{-6}$ . Wählt man bei  $n$  die Werte  $t = 17^0$ ,  $b = 790$  mm,  $e = 5$  mm, so wird  $dn = 2,91 \cdot 10^{-6}$ . Damit wird der Fehler von  $\frac{n}{n_{20}}$  gleich  $1,7 \cdot 10^{-7}$  und somit der der Korrektion  $c_2$  bei  $d = 25$  mm  $dc_2 = 4,2 \mu\mu$ . Bei kürzeren Endmaßen und kleineren Abweichungen von den Normalbedingungen ist er entsprechend geringer. Dadurch, daß man für  $n_0$  einen Wert nimmt, der in

\* Der Gesamtdruck des Luft-Wasserdampfes ist  $b$ , folglich ist der Druck der trockenen Luft gleich  $b - e$ .

der Mitte zwischen dem größten und kleinsten in Betracht kommenden liegt, hebt sich dieser Fehler bei der Mittelwertbildung praktisch fort, so daß man ihn nur zu etwa  $\pm 1 \mu$  anzusetzen braucht.

Für den Brechungsindex trockener Luft im Normalzustande gilt (8, 14)

$$(n_0 - 1) \cdot 10^6 = 288,02 + \frac{1,478}{\lambda^2} + \frac{0,0316}{\lambda^4},$$

woraus für  $\lambda = 0,50157 \mu$  folgt

$$n_0 = 1,000\,294\,4 \cdot *$$

Ferner ist

$$n_0 = 1,000\,250\,1.$$

Damit wird

$$\frac{\lambda_{20}}{\lambda} = \frac{1 + \frac{0,000\,294\,4}{1 + \beta \cdot t} \cdot \frac{b}{760} - \frac{0,000\,044\,3}{1 + \beta \cdot t} \cdot \frac{e}{760}}{1 + \frac{0,000\,294\,4}{1 + \beta \cdot 20} - \frac{0,000\,044\,3}{1 + \beta \cdot 20} \cdot \frac{10}{760}} \quad (1)$$

$$= 1 - 273,7 \cdot 10^{-6} + \frac{0,3873 \cdot 10^{-6}}{1 + 0,00367 \cdot t} \cdot b - \frac{0,0583 \cdot 10^{-6}}{1 + 0,00367 \cdot t} \cdot e,$$

also wird

$$c_2 = d \cdot \left(1 - \frac{\lambda_{20}}{\lambda}\right) = \left(273,7 - \frac{0,3873}{1 + 0,00367 \cdot t} \cdot b + \frac{0,0583}{1 + 0,00367 \cdot t} \cdot e\right) \cdot 10^{-6} \cdot d.$$

Setzt man  $b = 760 + \delta b$ ,  $t = 20 + \delta t$ ,  $e = 10 + \delta e$ , so wird

$$\begin{aligned} c_2 &= \{273,7 - 0,3873 \cdot (760 + \delta b) : [1 + 0,00367 \cdot (20 + \delta t)] \\ &\quad + 0,0583 \cdot (10 + \delta e) : [1 + 0,00367 \cdot (20 + \delta t)]\} \cdot 10^{-6} \cdot d \\ &= (-0,361 \cdot \delta b + 0,938 \cdot \delta t + 0,054 \cdot \delta e) \cdot 10^{-6} \cdot d. \end{aligned} \quad (2)$$

Somit wird die Gesamtkorrektur<sup>1</sup>

$$c' = c_1 + c_2 = (-0,36 \cdot \delta b - 10,56 \cdot \delta t + 0,05 \cdot \delta e) \cdot 10^{-6} \cdot d \quad (3)$$

(bei von  $11,5 \cdot 10^{-6}$  abweichendem Ausdehnungskoeffizienten ändert sich natürlich auch das zweite Glied entsprechend). Sie ist bei Barometerständen über 760 mm und bei Temperaturen über  $20^\circ$  negativ, bei Dampfdrücken über 10 mm positiv.

Rechnet man bei der Bestimmung der einzelnen Größen mit folgenden Fehlern:  $d\delta b = \pm 0,2$  mm,  $d\delta t = \pm 0,02^\circ$ ,  $d\delta e = \pm 0,5$  mm,  $d\alpha = \pm 0,2 \cdot 10^{-6}$ , dazu eine Meßtemperatur von  $20 \pm 3^\circ$ , so wird der Gesamtfehler von  $c'$  bei einem Maß von  $d = 25$  mm:

$$\begin{aligned} dc' &= (0,36 \cdot 0,2 + 10,56 \cdot 0,02 + 0,05 \cdot 0,5 + 0,2 \cdot 3) \cdot 25 \cdot 10^{-6} \text{ mm,} \\ &= (0,072 + 0,2112 + 0,025 + 0,6) \cdot 25 \cdot 10^{-6} \text{ mm,} \\ &= 23,7 \text{ m}\mu. \end{aligned}$$

Den wahrscheinlichen Fehler wird man somit zu  $16 \text{ m}\mu$  ansetzen dürfen. Nimmt man dazu noch den Fehler von  $c$  mit  $\pm 4 \text{ m}\mu$  und den Einfluß des Fehlers von  $n_0$  mit  $\pm 1 \text{ m}\mu$ , so kommt man insgesamt auf einen Meßfehler von  $\pm 20 \text{ m}\mu$ . Unter günstigeren Bedingungen kann man natürlich den Fehler weiter herunterdrücken und dann wohl auf  $\pm 10 \text{ m}\mu$  kommen, während ein Fehler von etwa  $\pm 5 \text{ m}\mu$  nur ganz ausnahmsweise, in einem besonders hierfür eingerichteten Laboratorium, zu erreichen sein wird.

Hat man den Ausdehnungskoeffizienten nicht bestimmt, sondern rechnet man mit dem mittleren Wert  $11,5 \cdot 10^{-6}$ , so muß man beachten, daß der tatsächliche Wert um etwa  $\pm 2 \cdot 10^{-6}$  davon abweichen kann. Um obige Genauigkeit zu erreichen, darf man sich dann um nicht mehr als  $\pm 0,3^\circ$  bzw.  $\pm 0,1^\circ$  von der Bezugstemperatur von  $20^\circ$  entfernen.

Die Korrektionsformeln (2) und (3) dürfen übrigens nur bei kleinen Werten von  $\delta t$ ,  $\delta b$  und  $\delta e$  gebraucht werden; für Messungen höchster Präzision ist stets mit der Formel (1) zu rechnen<sup>2</sup>.

\* Aus neueren Beobachtungen (12) folgt:  $n_0 = 1,0002948$ ; die Rechnung mit diesem Wert führt aber zu genau dem gleichen Ergebnis.

<sup>1</sup> Die Korrektur  $c_2$  fällt fort, falls man die Beobachtungen im Vakuum ausführt.

<sup>2</sup> Die Korrektur für die Änderung des Kohlensäuregehaltes (Änderung ihres Partialdruckes um  $\delta p$ ) berechnet sich zu  $-0,19 \cdot \delta p \cdot d \cdot 10^{-6}$  mm. Eine Verdoppelung des normalen Kohlensäuregehaltes würde bei einem Endmaß von 25 mm somit einen Fehler von  $1,1 \text{ m}\mu$  bewirken.

Die Genauigkeit der Messung ist also vor allem durch die der Temperaturbestimmung (und im letzteren Falle durch die Größe der Beobachtungstemperatur selbst) beschränkt.

Nach Vorstehendem genügt zur Bestimmung von  $b$  ein gewöhnliches Barometer, an dessen Ablesung, falls nötig, die Standkorrektion (der Betrag, um den es gegenüber einem Normalinstrument bei  $20^{\circ}$  abweicht) und seine Temperaturkorrektion (der Betrag, um den es bei irgend einer von  $20^{\circ}$  verschiedenen Temperatur von seiner Angabe bei  $20^{\circ}$  bei gleichem Luftdruck abweicht) anzubringen ist.

Zur Bestimmung der Temperatur bedient man sich behördlich geeichter in  $1/10^{\circ}$  geteilter Thermometer, an denen die  $1/100^{\circ}$  zu schätzen sind. Das Thermometer setzt man in die mit Quecksilber gefüllte Bohrung eines Stückes aus weichem Stahl gleicher Form und Größe wie das Endmaß und bläst bei der Messung beide durch einen Luftstrom an, damit sie gleiche Temperatur annehmen. Sehr gut ist auch, das Thermometer in die Bohrung eines Kupferklotzes zu stecken, den man an das Endmaß anlegt. Besser ist noch Messung der Endmaß-Temperatur durch ein geeignetes, eventuell mehrfaches Thermoelement (aus Kupfer-Konstantan), das mittels Spiegels- oder Schleifengalvanometers beobachtet wird und selbstverständlich zu eichen ist. Seine „warmen“ Lötstellen werden an das Endmaß angeklemt, die „kalten“ zusammen mit einem geeichten Quecksilberthermometer in eine Bohrung des Tisches gesteckt, auf dem die Quarzplatte mit den Endmaßen ruht (9). Besser ist es wohl noch, die kalten Lötstellen und das Thermometer in ein Reagenzglas mit Petroleum zu bringen, das in einem mit Öl gefüllten Dewargefäß steht. Statt dessen könnte man auch das Thermoelement in eine Bohrung eines entsprechenden Stahlklotzes einführen.

Die Mindesteintauchtiefe muß dann  $e \sim 4 \cdot \sqrt{t}$  sein, um eine Genauigkeit von  $1/10^{\circ}$  zu erreichen, wobei  $t$  der Unterschied der Temperaturen der beiden Lötstellen ist (2). Daraus ergeben sich folgende Mindesteintauchtiefen  $e$  für verschiedene Werte von  $t$ :

$t = 1$	2	3	4	5 <sup>0</sup>
$e = 4$	6	7	8	9 mm.

Bei längeren Endmaßen sind am geeignetsten Widerstandsthermometer, die sich in ihrer Form möglichst der der Endmaße anpassen, und mit denen man eine Genauigkeit von etwa  $1/1000^{\circ}$  erhalten kann, während man bei Thermoelementen infolge der Notwendigkeit der Beobachtung der Temperatur seiner kalten Lötstelle mittels Quecksilberthermometers nicht über  $2/100^{\circ}$  kommt.

Für die Feuchtigkeit genügt ein (bei 100% geeichtes) Haarhygrometer, dessen Ablesung der relativen Feuchtigkeit  $f$  man in Dampfdruck  $e$  auf Grund der Beziehung

$$f = 100 \cdot \frac{e}{E}, \quad e = \frac{f \cdot E}{100}$$

umrechnet, worin  $E$  den Dampfdruck bei Sättigung bedeutet, den man für verschiedene Temperaturen aus nachfolgender Aufstellung entnehmen kann:

$t$	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25 <sup>0</sup>
$E$	12,8	13,6	14,5	15,5	16,5	17,5	18,7	19,8	21,1	22,4	23,8

In der Regel wird man die durch  $e$  bedingte Korrektion vernachlässigen können.

Für die durch  $\delta b$ ,  $\delta t$  und  $\delta e$  bedingten Korrekturen legt man sich am besten Tabellen an, die diese für die üblichen Endmaßgrößen enthalten. Dann ist ihre Bestimmung sehr rasch auszuführen. Im übrigen ist auch hierfür von Kösters ein Nomogramm in Form eines Rechenschiebers angegeben, der die Korrekturen in  $10^{-6}$  für ein Endmaß von 1 mm zu ermitteln gestattet, so daß man die abgelesenen Werte nur noch mit  $d$  zu multiplizieren hat (Abb. 121). Er enthält auf dem festen Teil als Argument die Temperatur, auf der beweg-

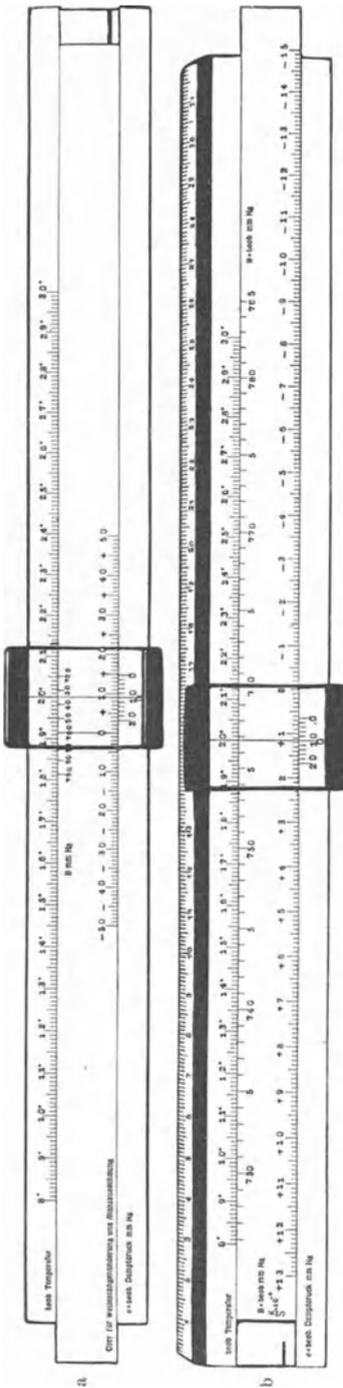


Abb. 121. Rechenschieber zur Ermittlung der Korrekturen für  $b$ ,  $t$ ,  $e$ .

lichen Zunge oben den Druck, unten die Korrekturen, ferner auf dem unteren festen Teil den Dampfdruck. Man stellt die bewegliche Nullmarke auf die beobachtete Temperatur, sodann den beobachteten Barometerstand durch Verschieben der Zunge auf die Nullmarke. Alsdann liest man gegenüber dem beobachteten Dampfdruck die Korrekturen  $\frac{c_2}{d}$  ab. Die Gesamtkorrektur  $\frac{c}{d}$  (also einschließlich der durch die Ausdehnung des Endmaßes bewirkten) wird auf der Rückseite in ähnlicher Weise bestimmt. Diese Werte sind dann, wie angegeben, noch mit  $d$  zu multiplizieren, um  $c_2$  bzw.  $c$  zu erhalten.

Mißt man die Endmaße, wie es in der Regel geschieht, gegen eine Quarzplatte angesprengt oder angeschoben (was den Vorteil bietet, durch die Platte hindurch die Güte des Ansprengens beobachten zu können), so kommt noch eine weitere Korrektur  $c''$  hinzu, die daher rührt, daß das Ansprengen oder Anschieben an eine Quarz- und an eine Stahlplatte in etwas verschiedener Weise erfolgt, und daß auch bei der Reflexion an der Quarzplatte gegenüber der an der Meßfläche des Endmaßes aus Stahl ein Phasensprung auftritt, der naturgemäß bei der Messung gegen eine Stahlplatte verschwindet. Die Messung müßte eigentlich gegen diese geschehen, da ja nach DIN 861 die Länge eines Endmaßes definiert ist als der Abstand seiner oberen Meßfläche gegen eine an seine untere angesprengte Fläche aus gleichem Werkstoff und von gleicher Oberflächenbeschaffenheit. Aus den oben angegebenen Gründen zieht man aber die Messung gegen eine Quarzplatte vor, die auch weniger leicht als die Stahlplatte zerkratzt wird, und bringt an der Messung die Anschubkorrektur  $c''$  an, die man für einen Endmaßsatz nur einmal zu bestimmen braucht, vorausgesetzt natürlich, daß alle seine Maße aus dem gleichen Werkstoff bestehen und dieselbe Oberflächenbeschaffenheit aufweisen.

Die Anschubkorrektur setzt sich aus 3 Gliedern zusammen (4, 9):

1. Dem optischen Phasensprung, der je nach der Politur der Stahlfläche um  $0,02 \mu$  schwanken kann (d. h. die Reflexionsfläche des Quarzes liegt bis zu  $0,02 \mu$  über der des Stahles).

2. Dem Eindringen des Lichtes in die mehr oder minder rauhen Flächen, was bei Strichpolitur  $0,04$  bis  $0,08 \mu$  ausmachen soll, während es bei hochglanzpolierten Flächen sich nahe  $0,00 \mu$  heruntergeht. Dabei handelt es sich weniger um

ein eigentliches Eindringen des Lichtes als darum, daß man bei ungenügender Politur eine andere optische als mechanische Oberfläche hat. Hierzu sind ferner die Unterschiede zu rechnen, die von einem verschiedenen Abstand der unteren

Meßfläche von der idealen Fläche der Quarz- oder Stahlplatte herrühren können, dadurch, daß sich z. B. einmal die Gipfel der Unebenheiten beider aufeinander oder aber die Gipfel der einen in die Täler der anderen legen. Schließlich wirkt auch noch die Form der Oberfläche ein, da bei gewölbten Flächen durch das Ansprengen die Flächen etwas deformiert werden. All dies zeigt sich z. B. daran, daß bei Strichpolitur eine Stahlkugel von 5 mm Durchmesser unter einem Druck von 250 g (Optimeter) um  $0,05 \mu$  tiefer eindringt als bei Hochglanzpolitur (9a). Für 1. und 2. zusammen ergab sich bei strichpolierten Maßen  $0,073 \mu$  für  $\lambda = 0,546 \mu$  (grüne Quecksilberlinie), während der Verlauf mit der Wellenlänge aus Abb. 122 folgt, so daß mit einem Wert für die mittlere Wellenlänge gerechnet werden kann.

3. Der Kompression der oberen Molekularschichten durch die Haftkräfte (und das Eigengewicht), abzüglich der Dicke der Zwischenschicht, bei den angesprengten oder angeschobenen Maßen, die bei Strichpolitur zu  $-0,06 \mu$  gefunden wurde (7a), so daß die Gesamtkorrektur bis auf  $0,01$  oder  $0,00 \mu$  heruntergebracht werden kann. Es handelt sich dabei zum Teil um die hydrodynamischen Schichten auf den Oberflächen; zum anderen Teil muß man auch bedenken, daß die Oberfläche des Stahls nicht diskontinuierlich gegen Luft absetzt, sondern daß man sie als eine Legierung von Stahl und Luft mit sehr rasch nach außen hin auf 100 % Luft wachsender Konzentration ansehen muß. Aus diesen drei Gründen weisen mechanische und interferentielle Messungen Unterschiede von  $+0,05$  bis  $0,08 \mu$  auf (5a, 15).

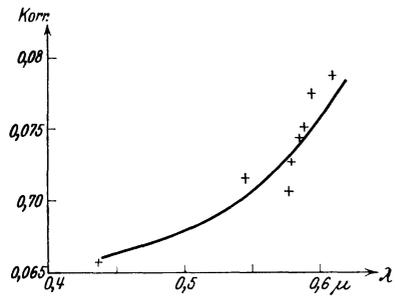


Abb. 122. Phasensprung und Eindringen des Lichts bei Endmaßen mit Strichpolitur.

Bezeichnet man die gegen eine Quarz- und eine Stahlplatte gemessenen Längen mit  $l_q$  und  $l_s$ , den eigentlichen optischen Phasensprung mit  $P$ , die Eindringtiefe (in dem oben definierten Sinne) bei Quarz mit  $E_q$ , beim Endmaß mit  $E_s$ , bei der Stahlplatte mit  $E'_s$  (sie ist von  $E_s$  verschieden wegen der oben angegebenen Art der Auflage), die Kompression der Oberflächenschichten von Quarz und Stahl bei Messung gegen Quarz mit  $K_q$  und  $K_s$  bei der Messung gegen die Stahlplatte mit  $K'_s$  (die von  $K_s$  wegen der verschiedenen Größe der Haftkräfte abweicht), so gelten also die Beziehungen

$$l_q + P + E_s - E_q + K_q + K_s = l_s + E_s - E'_s + 2 \cdot K'_s,$$

so daß die Korrektur wird

$$c'' = l_s - l_q = P + (E'_s - E_q) + (K_q + K_s - 2 \cdot K'_s).$$

Hierin ist das Glied  $E'_s - E_q$  stets positiv, bei guter Politur im Grenzfalle 0, im allgemeinen aber stets klein, so daß es, namentlich bei hochglanzpolierten Massen, in erster Annäherung vernachlässigt werden kann. Da nun die Größe  $K_q + K_s - 2 \cdot K'_s$  stark von der Politur und der Weichheit der Oberflächenschicht abhängt, so läßt sich von vornherein nicht sagen, ob sie positiv oder negativ wird. Je nachdem kann  $c''$  größere oder kleinere Werte annehmen. Erfahrungsgemäß schwankt  $c''$  von  $0,00$  bis  $0,08 \mu$  (3), während man früher dafür (als es noch keine hochglanzpolierten Maße gab) den konstanten Wert  $0,08 \mu$  annahm (6). Für eine Reihe von Endmaßen ergaben sich, nach abnehmender Güte der Politur geordnet, folgende Anschubkorrekturen:

$$+ 42, \quad 40, \quad 21, \quad 41, \quad 48 \text{ m}\mu,$$

während von anderer Seite gefunden sind:

$$+ 8, \quad 15, \quad 80 \text{ m}\mu.$$

Wurden die Maße in dem auf S. 71 definierten Sinne aufgesetzt, so waren die Werte für die beiden ersten Polituren:  $+ 41$  bzw.  $15 \text{ m}\mu$  (10)<sup>1</sup>. Man ersieht daraus, daß man von vornherein

<sup>1</sup> Die Differenz zwischen aufgesetzten und angesprengten Endmaßen sank mit abnehmender Güte der Politur von etwa  $100$  bis  $35 \text{ m}\mu$ .

aus der Güte der Politur nicht auf die Größe der Anschubkorrektion schließen kann, da sie zu sehr von der Weichheit der Oberflächenschichten und damit von der Verschiedenheit der Haftkräfte an Quarz und an Stahl abhängt.

Falls es nicht auf äußerste Genauigkeit ankommt, kann man mit einem mittleren Wert  $c'' = +0,04 \mu$  rechnen, wodurch dann aber eine Unsicherheit von  $\pm 0,04 \mu$  in den Wert des Endmaßes hineinkommt.

Aus den oben angegebenen Gründen zieht man es in Deutschland vor, die Messungen gegen eine Quarzplatte vorzunehmen und die Anschubkorrektion für den Endmaßsatz zu bestimmen, was auf verschiedene Weise geschehen kann:

1. Man mißt ein Maß (von etwa 5 bis 10 mm) des Satzes einmal an die (für behördliche Prüfungen mitzuliefernde) Stahlplatte von etwa  $40 \times 35 \times 12$  mm aus gleichem Werkstoff und von gleicher Oberflächenbeschaffenheit, zum anderen an die Quarzplatte angesprengt; die Anschubkorrektion ist der Unterschied der Mittel aus mehreren solchen Bestimmungen.

2. Man ermittelt die Länge eines kurzen Endmaßes aus demselben Werkstoff und von der gleichen Oberflächenbeschaffenheit mit kreisförmigem Querschnitt, das einmal an die obere Meßfläche des Endmaßes und dann an die Quarzplatte angesprengt wird; auch hier ist die Anschubkorrektion der Unterschied der beiden Meßergebnisse.

3. Man mißt 2 Maße der Längen  $L_1$  und  $L_2$  zunächst einzeln, dann aneinander angesprengt, also die Kombination  $L_1 + L_2$ , jedesmal gegen die Quarzplatte. Ergeben die Messungen die Werte  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_{12}$ , so gelten die Beziehungen

$$M_1 = L_1 - c'',$$

$$M_2 = L_2 - c'',$$

$$M_{12} = L_1 + L_2 - c'',$$

aus denen folgt

$$M_1 + M_2 - M_{12} = -c'';$$

auch hier wird man natürlich die jeweiligen Mittel aus mehreren Messungen einsetzen. Diese Methode hat den Vorteil, daß man keine weiteren Hilfsmittel, sondern nur 2 Maße desselben Satzes braucht, da diese ja aus gleichem Werkstoff bestehen und dieselbe Oberflächenbeschaffenheit haben.

Wie vorher erwähnt, läßt sich bei Stahl die Güte des Ansprengens nicht kontrollieren, also nicht feststellen, ob das Endmaß mit der ganzen Fläche haftet oder nicht, während man bei einer Quarzplatte von der Rückseite aus beobachten kann, daß auch nicht an einzelnen Stellen Interferenzfarben auftreten (also keine Luftschicht zwischen Endmaß und Platte vorhanden ist), und daß auch keine Flecke da sind, wie sie bei nicht tadellos gereinigten Maßen oder durch Zerreißen der Molekularschicht erscheinen, wodurch sich ein um etwa  $10 m\mu$  größeres Maß ergibt (10). Achtet man auf völlig gleichmäßige Anlage, so kann man bei Messung gegen Quarz das konstante Glied  $a$  des Meßfehlers  $a + b \cdot L$  (siehe S. 85) zu günstigstenfalls  $5 m\mu$  (bei einem 25-m-Endmaß) ansetzen. Bei der Messung gegen eine Stahlplatte muß man dagegen für das Glied  $a$  mit etwa  $\pm 20 m\mu$  rechnen, so daß man die Anschubkorrektion nur auf etwa  $\pm 0,02 \mu$  genau bestimmen kann. Nur bei Endmaßen mit ganz vorzüglicher Hochglanzpolitur ist es auch bei Messung gegen die Stahlplatte möglich, eine Genauigkeit von etwa  $5 m\mu$  zu erreichen (13), so daß für diese die Unsicherheit der Anschubkorrektion auf  $\pm 0,01 \mu$  sinkt. Im Auslande wird vielfach nur gegen die Stahlplatte gemessen (7), wodurch aber die Meßgenauigkeit nicht wesentlich erhöht wird.

Bei längeren Endmaßen ist (bei Messung in senkrechter Stellung) ferner die Kompression durch das Eigengewicht zu beachten, die sich nach dem Hooke'schen Gesetz zu  $\delta = \frac{1}{2} \cdot \frac{L^2 \cdot s}{E}$  berechnet ( $L$  die Länge,  $s$  das spez. Gewicht,  $E$  der Elastizitätsmodul). Für ein Maß von  $L = 200$  mm wird  $\delta = 8 m\mu$ . Diese Korrektion darf somit nur für Maße unter 50 mm vernachlässigt werden, da sie hier unter  $0,5 m\mu$  bleibt.

Bei dem oben betrachteten Beispiele des Endmaßes von 1,4 mm war:

$$b = 756,5 \text{ mm}, \quad t = 20,40^\circ, \quad f = 50\%, \quad \text{demnach } e = 9 \text{ mm},$$

$$\delta b = -3,5 \text{ mm}, \quad \delta t = +0,40^\circ, \quad \delta e = -1 \text{ mm};$$

die von ihnen herrührenden Korrekturen werden:

$$+ 0,002 \mu \qquad - 0,006 \mu \qquad 0,000 \mu.$$

Damit wird die Gesamtkorrektur des Endmaßes

$$- 0,16 + 0,002 - 0,006 - 0,000 + 0,04 = - 0,12 \mu,$$

es war also um  $0,12 \mu$  zu kurz.

Die Ebenheit des Endmaßes wird, wie früher angegeben, aus der Abweichung der Streifen von der Geraden bestimmt, wobei ein 1 mm vom Rande aus einsetzender Abfall unberücksichtigt bleibt. Haben sie z. B. eine Form, wie in Abb. 123, so beträgt die größte Krümmung 0,3 Streifenbreiten, was bei der grünen Heliumlinie  $0,075 \mu$  ausmacht, so daß die Unebenheit  $\pm 0,04 \mu$  beträgt. Die beste bisher erreichte Ebenheit ist derart, daß die Abweichungen von der idealen Ebene kleiner als  $\frac{1}{50}$  Streifenbreite, also kleiner als  $5 m\mu$  sind; diese Platte bestand aus geschmolzenem Quarz und hatte bei 4 bis 5 cm Dicke den beträchtlichen Durchmesser von 25 bis 28 cm (11).

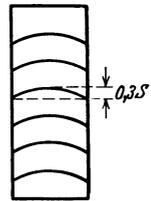


Abb. 123. Bestimmung der Unebenheit.

Größere Abweichungen von der Parallelität kann man dadurch feststellen, daß man die Quarzplatte genau parallel zur oberen Platte justiert, was sich daran zeigt, daß die Interferenzstreifen immer weiter auseinanderrücken und schließlich verschwinden. Man ermittelt dann die Zahl der auf dem Endmaß noch sichtbaren Streifen. Beobachtet man z. B. gerade an ihren beiden Rändern einen dunkeln Streifen, so ist der Höhenunterschied ihrer Ränder 1 Streifenbreite und somit  $0,25 \mu$ . Dieses Verfahren versagt aber, wenn auf dem Endmaß nur 1 dunkler Streifen sichtbar bleibt, weil man dann nicht weiß, wie groß die Streifenbreite ist.

Besser geht man deshalb so vor, daß man die Verschiebungen  $a$  und  $b$  (Abb. 124a) der beiden äußersten Streifen auf dem Endmaß gegen die entsprechenden auf der Quarzplatte beobachtet: sie sind z. B. 0,3 und 1,2 Streifenbreiten (wobei man darauf achten muß, ob eventuell eine Verschiebung um mehr als 1 ganze Streifenbreite vorliegt). Dann ist das eine Ende des Endmaßes um  $1,2 - 0,3 = 0,9$  Streifenbreiten oder um  $0,225 \mu$  höher als das andere. Die Unparallelität in der Längsrichtung ist demnach  $\pm 0,11 \mu$ . Liegen die Streifen auf dem Endmaß schräg zu seiner kurzen Kante, so muß man die Beobachtung wieder in der mittleren Längslinie ausführen (Abb. 124b). Ebenso verfährt man, nachdem die Streifen parallel zur Längskante gestellt sind; statt dessen kann man bei schrägliegenden Streifen auch den Abstand  $c$  ihrer Endpunkte in Streifenbreiten ermitteln. Nach Abb. 124b ist er 1,6 Streifenbreiten, oder  $0,40 \mu$ , also die Unparallelität in der Querrichtung  $\pm 0,20 \mu$ . Somit ist der gesamte Gestaltsfehler im ungünstigsten Falle:

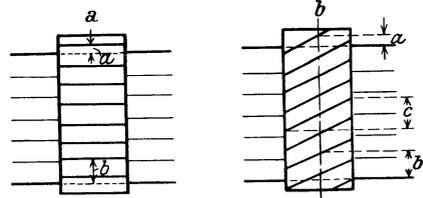
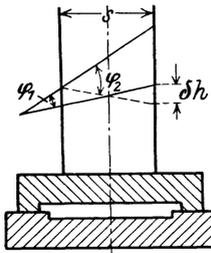


Abb. 124. Bestimmung der Unparallelität.

$0,04 + 0,11 + 0,20 \mu = \pm 0,35 \mu$ .

Im National Physical Laboratory geht man so vor, daß man den Prüfling mit der planparallelen Quarzplatte dreht, die so justiert ist, daß ihre obere Fläche bei der Drehung stets senkrecht zur Strahlenrichtung bleibt (Abb. 125). Beobachtet man bei der Drehung zwischen zwei im Abstände  $s$  befindlichen Marken die Größt- und die Kleinstzahlen  $m$  und  $n$  von

Streifen, so ergibt sich der in diesen beiden Fällen vorhandene Keilwinkel aus



$$\varphi_1 = \frac{m \cdot \lambda}{s}$$

$$\varphi_2 = \frac{n \cdot \lambda}{s}$$

somit ist die Unparallelität

$$\frac{1}{2} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) = \frac{1}{2} \cdot (m - n) \cdot \frac{\lambda}{s}$$

bzw. der Höhenunterschied

$$\delta h = \frac{1}{2} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) \cdot s = \frac{1}{2} \cdot (m - n) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

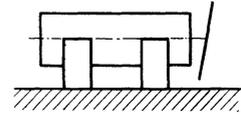


Abb. 126. Bestimmung der senkrechten Lage der Meßfläche zur Achse.

Abb. 125. Bestimmung der Unparallelität.

In gleicher Weise kann man auch bei zylindrischen Endmaßen feststellen, ob ihre Meßflächen senkrecht zur Achse liegen (1, 5), indem man sie in 2V-Prismen aufnimmt (Abb. 126) und darin dreht; die Berechnung gestaltet sich genau so wie vorher. Voraussetzung dazu ist allerdings, daß die Mantellinien des Zylinders innerhalb der nötigen Genauigkeit gerade sind.

Wie vorher erwähnt, kommt man (gegen eine Stahlplatte) mit Helium bis zu Längen von etwa 25 mm, mit Krypton bis zu solchen von etwa 125 mm und durch geeignete Anordnung (siehe Abschnitt 5) bis 50 bzw. 250 mm. Für größere Längen, z. B. 300 mm, verfährt man so, daß man an die Quarzplatte nebeneinander das 300-mm- und ein vorher gemessenes 200-mm-Endmaß ansprengt und nun ihren Unterschied in Wellenlängen auswertet.

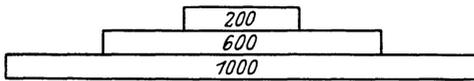


Abb. 127. Messung langer Endmaße durch Interferenz.

Noch besser ist es, die beiden Endmaße, z. B. 600 und 200 mm, nach Abb. 127 nebeneinander zu legen und mit 2 Interferenzapparaten von bei-

den Seiten gleichzeitig die Unterschiede von je ~200 mm zu messen. An das 600-mm-Endmaß wird dann analog ein solches von 1000 mm angeschlossen, ein Verfahren, das in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt zur Auswertung des Meter-Prototyps in Lichtwellenlängen verwendet wurde (9a, 13).

### 5. Interferometer zur Messung in Lichtwellenlängen.

Die Absolutbestimmung könnte man mit dem in Abb. 116 gezeigten Apparat ausführen, wenn man das Licht der Heliumröhre noch durch einen Monochromator zerlegt,

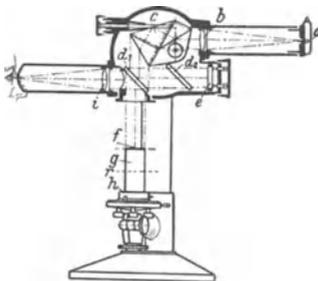


Abb. 128. Absolut-Interferometer, Schnitt.

so daß man die von den verschiedenen Spektrallinien erzeugten Interferenzen einzeln nacheinander beobachten kann, oder durch ein vor das Auge gesetztes Filter die einzelnen Farben

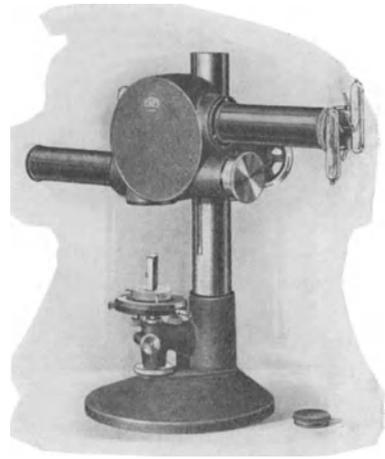


Abb. 129. Absolut-Interferometer, Ansicht.

aussondert. Speziell dafür eingerichtet ist der in Abb. 128 und 129 wiedergegebene Apparat, der noch den Vorteil bietet, Endmaße von zweifach größerer Länge als mit dem früheren messen zu können (1). Die Lichtquelle beleuchtet

den Spalt  $a$ , der sich im Brennpunkt des Objektivs  $b$  befindet; die es verlassenden Parallelstrahlen durchsetzen das Prisma konstanter Ablenkung; durch die Schraube  $c$  kann man es so drehen, daß es nacheinander die einzelnen Spektrallinien senkrecht nach unten auf die Glasplatte  $d_1$  wirft. Der von ihm reflektierte Teil wird nach Passieren der Glasplatte  $d_2$  von dem Spiegel  $e$  zurückgeworfen, durchsetzt  $d_2$  und  $d_1$  und wird durch das Objektiv  $i$  am Ort der kreis- oder spaltförmigen Blende (links) vereinigt. Der von  $d_1$  durchgelassene Teil fällt senkrecht auf das Endmaß  $g$  und die Quarzplatte  $h$ , wird hier und dann an  $d_1$  reflektiert und gelangt so gleichfalls zur Blende.

Die ganze Anordnung kann man so auffassen, als wenn der Spiegel  $d_1$  die Ebene  $e$  in  $r$  virtuell abbildet. Diese Referenzebene  $r$  ist dann die obere Begrenzungsfläche  $s$  des Keils (Abb. 130). Auch hier wäre wieder der Streifenabstand zwischen den beiden Keilscheiteln zu bestimmen, was genau so wie früher dadurch ausgeführt wird, daß man die Verschiebungen  $\varepsilon$  zwischen zwei beliebigen Streifen auf der Quarzplatte und auf dem Endmaß mißt und die ganze Zahl  $p$  von Streifenbreiten in der früher besprochenen Weise durch Beobachtung mit verschiedenen Wellenlängen ermittelt. Auch in diesem Falle muß man zur Bestimmung von  $\varepsilon$  von dem Streifen auf der Quarzplatte zu dem auf dem Endmaß in der

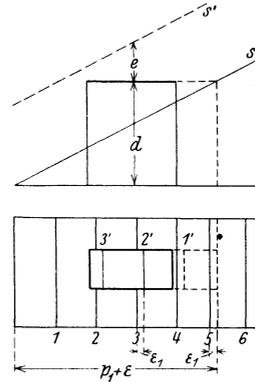


Abb. 130. Absolutmessung von Endmaßen.

Richtung von dem Scheitel des mit ersterer gebildeten Keils weggehen, also wiederum im Wanderungssinn der Streifen bei Druck auf das die Optik tragende Rohr. Dadurch wird nämlich der Abstand zwischen  $s$  und der Quarzplatte verringert, der zwischen  $s$  und dem Endmaß vergrößert; die Streifen wandern also auf der Quarzplatte von ihrem Scheitel weg, auf dem Endmaß zu seinem Scheitel hin, also beide in der Abb. 130 nach rechts.

Würde man, wie bei der früheren Anordnung, die obere Keilfläche nach  $s'$  legen, so hätten die vom Quarz kommenden Strahlen den Weg  $2 \cdot (d + e)$ , die vom Endmaß kommenden dagegen nur den Weg  $2 \cdot e$  zurückzulegen. Man wäre also auf  $d = 25$  mm beschränkt, da auf diese Strecke (bei Vernachlässigung von  $e$ ) bereits 100000 Wellenlängen entfallen. Durch Verlegung der Referenzebene nach  $s$  werden aber beide Wege nur halb so groß (und gleich), man kann also die Länge des Endmaßes gegen früher verdoppeln.

Wird nun die reflektierende Ebene von der oberen Fläche von  $d_1$  (Abb. 128) gebildet, so durchsetzen die zum Spiegel  $e$  gehenden und von dort zurückkommenden Strahlen die Platte  $d_1$  nur einmal; die nach unten gehenden und von dort zurückkommenden dagegen dreimal. Es würde also ein Gangunterschied von  $2 \cdot n \cdot$  Glasweg oder, bei einer Glasdicke von 5 mm und einer Plattenneigung von  $45^\circ$  gegen die Strahlenrichtung, von  $2 \cdot 1,5 \cdot 5 \cdot \sqrt{2} \sim 21$  mm vorhanden sein. Somit wäre es nicht möglich, die Interferenzen niedriger Ordnungszahl zu erhalten, und man würde eine Strecke von rund 20 mm von der auszunutzenden Meßlänge verlieren. Um das zu vermeiden, ist in den Strahlengang noch die zweite Platte  $d_2$  gleicher Dicke und aus demselben Glase, also mit gleichem Brechungsindex  $n$  (die beide durch Zerschneiden einer Platte hergestellt werden) eingeschaltet. Jetzt durchsetzen die beiden Strahlenanteile diese beiden Glasplatten in genau gleicher Weise (viermal), so daß ihre geometrischen und damit auch ihre optischen Weglängen einander gleich sind und man somit auch die Interferenzen geringer Ordnungszahl erhält<sup>1</sup>.

Damit das Mittenmaß des Endmaßes (und nicht etwa seine Länge in schräger Richtung) gemessen wird, muß, wie früher abgeleitet, die Quarzplatte und mit genügender Genauigkeit die Referenzebene  $s$  senkrecht zur Strahlenrichtung stehen. Es sei zunächst angenommen, daß die Fläche  $d_1$  zu der Richtung  $S$ : Mitte der Blende — Mitte des Objektivs  $i$  genau unter

<sup>1</sup> Die Verwendung nur einer Platte hat den Vorteil, daß man durch ihre keilförmige Ausföhrung (Keilwinkel etwa  $6'$ ) eine gewisse Achromatisierung der Interferenzstreifen erhält, derart, daß die Streifenbreite für die verschiedenen Wellenlängen praktisch konstant bleibt (13).

$45^\circ$  liege (Abb. 132). Ein senkrecht zu  $S$  darauf fallender Strahl wird dann in diese Richtung  $S$  (nach rechts) reflektiert und von dem Spiegel  $e$ , falls er senkrecht zu  $S$  steht, in Richtung  $S$  zurückgeworfen. Nach den Reflexionsgesetzen steht dann auch die Referenzebene  $s$  senkrecht zu den nach unten durch  $d_1$  weitergehenden Strahlen. Zur Erfüllung der obigen Bedingung ist also nur nötig, den Spiegel  $e$  senkrecht zu  $S$  auszurichten. Um dies auszuführen, setzt man an Stelle der Blende ein Gaußsches Okular mit Fadenkreuz; bei diesem

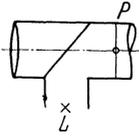


Abb. 131. Gaußsches Okular.

befindet sich zwischen der Linse und der Strichplatte  $P$  (Abb. 131) eine unter  $45^\circ$  stehende Glasplatte, durch die das Licht der Lampe  $L$  auf  $P$  geworfen und damit das Fadenkreuz beleuchtet wird. Dieses muß nun mit seinem von  $e$  zurückgeworfenen Bilde zusammenfallen, wenn  $e$  senkrecht zu  $S$  steht (damit man Fadenkreuz und Spiegelbild zugleich deutlich sieht, muß sich  $P$  im Brennpunkt des Objektivs befinden, da nur dann die von  $P$  ausgehenden Strahlen das letztere als Parallelbündel verlassen und nach der Reflexion wieder am Orte, von  $P$  vereinigt werden). Die Justierung von  $e$  wird mittels dreier Schrauben bewirkt. Dann reguliert man noch die Quarzplatte  $h$  mit dem aufgesetzten Endmaß  $g$  (Abb. 128) mittels dreier Schrauben so, daß das von ihr reflektierte Fadenkreuz gleichfalls sich mit dem auf  $P$  deckt. Schneller als durch Aufsuchen des verhältnismäßig lichtschwachen, von der Quarzplatte  $h$  reflektierten Fadenkreuzes kommt man auf folgende Weise zum Ziel: Man erregt die Geißleröhre und sieht dann im allgemeinen zwei Spektren, von denen das eine durch Reflexion von dem (justierten) Spiegel  $e$ , das andere durch Reflexion von der Quarzplatte  $h$  herrührt. Durch Betätigung der Fußschrauben  $m$  ihres Tisches bringt man die verschiedenfarbigen Spaltbilder zunächst parallel zueinander und darauf zur vollkommenen Deckung. Dann steht die Quarzplatte  $h$  gleichfalls senkrecht zur Achse des Beobachtungsrohres. Diese Justierung hat indessen nur den Zweck, das Auffinden der Interferenzen nachher zu erleichtern.

Dazu entfernt man das Gaußsche Okular, setzt die Blende wieder ein, erregt das Heliumrohr und gibt dann durch die Fußschrauben der Quarzplatte die notwendige Neigung, um die Interferenzstreifen in der gewünschten Lage und Abstand zu erhalten. Die verschiedenen Spektrallinien bringt man durch Drehen des Prismas nacheinander zur Wirkung, wobei man es so lange dreht, bis die Intensität möglichst groß wird. Man kann auch vorher durch Drehen des Prismas die verschiedenfarbigen Spaltbilder auf das Fadenkreuz des Gaußschen Okulars einstellen und sich die dazu nötigen Stellungen des Prismas durch Ablesung an der Schraube  $c$  merken.

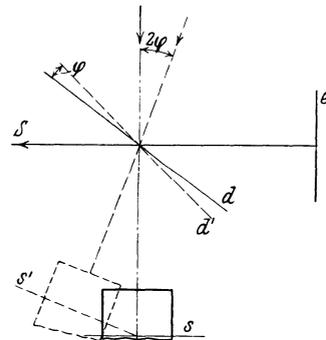


Abb. 132. Justierung des Interferometers.

Steht nun die Platte  $d$  nicht unter  $45^\circ$ , sondern unter dem Winkel  $45 + \varphi$  zu  $S$  (Abb. 132), so würde man genau wie vorher den Spiegel  $e$  senkrecht zu  $S$  justieren. Damit nun das von dem Heliumrohr kommende Licht auf den Spiegel fällt, muß man das Prisma so drehen, daß die Strahlen mit dem Spiegel  $d$  einen Winkel von  $45 + 2\varphi$  bilden; in dieser Richtung gehen sie auch weiter nach unten. Damit sie jetzt vom Endmaß in gleicher Richtung zurückgeworfen werden, muß auch diesem eine Neigung von  $2\cdot\varphi$  gegen die frühere gegeben werden; die von ihm zurückgeworfenen Strahlen werden dann wieder von  $d$  in Richtung  $S$  reflektiert. Somit stehen also Endmaß  $g$  und Referenzebene  $s$  jetzt wieder senkrecht zu den auf fallenden Strahlen, da auch  $s$  durch den Spiegel  $d$  in einer Lage abgebildet wird, die mit der früher betrachteten gleichfalls den Winkel  $2\cdot\varphi$  bildet. Die genaue  $45^\circ$ -Stellung von  $d$  spielt also keine Rolle, nur müssen die beiden Platten  $d_1$  und  $d_2$  parallel zueinander sein, da sonst die Wege der von  $e$  und von  $g$  bzw.  $h$  kommenden Strahlen verschieden sind. Ihre richtige Justierung erkennt man daran, daß sich beim Übergang zu anderen Wellenlängen die Lage der Interferenzstreifen (etwa in bezug auf das Fadenkreuz) in keiner Stellung ändern darf.

Damit man die Messungen in der Mitte der Endmaßfläche ausführen kann, ist auf dem Spiegel  $e$  und damit auch auf der Referenzebene  $r$  ein Fadenkreuz angebracht, das man durch die Blende erblickt. Man bringt das Endmaß in eine solche Stellung, daß der Schnittpunkt des Fadenkreuzes auf dem Mittelpunkt seiner Meßfläche liegt, und daß ferner seine Kanten parallel zu den Fäden verlaufen.

Die untere Fläche der Quarzplatte ist noch durch Mattieren oder besser durch Einfetten optisch unwirksam zu machen, damit sich die sonst zwischen ihr und der Referenzebene etwa entstehenden Interferenzstreifen nicht den von

der oberen Fläche herrührenden überlagern, wodurch Streifenverschiebungen bis zu  $\frac{1}{4} \cdot \lambda$  (etwa  $0,13 \mu$ ) auftreten können.

Für die Ausführung der Messungen ist es ferner erforderlich, daß der ganze Apparat im Temperaturgleichgewicht ist, da sonst Verspannungen der Platten  $d_1$  und  $d_2$  auftreten, die sich darin zeigen, daß die Streifen auf einer gut ebenen Quarzplatte gekrümmt werden, was eine Unebenheit vortäuscht, und wodurch auch die Meßgenauigkeit ungünstig beeinflußt wird. Für sehr sorgfältige Messungen muß man deshalb nach dem Ansprengen des Endmaßes und der Justierung etwa eine Stunde warten, damit sich alle Temperaturunterschiede ausgleichen. Selbstverständlich ist wohl, daß das Endmaß und auch der ganze Apparat gegen alle Temperaturstörungen (durch Strahlung oder Beatmung des Beobachters) zu schützen ist.

Dieser Absolut-Inko ist auch zum Vergleich zweier Endmaße nach dem früher beschriebenen Verfahren geeignet. Dazu dreht man Spalt und Kapillare des Heliumrohres so, daß sie senkrecht zur brechenden Kante des Prismas stehen, somit keine Dispersion eintritt und alle Linien gleichzeitig zur Wirkung gelangen.

### 6. Weitere Interferenz-Meßmethoden.

Die interferentielle Längenmessung ist übrigens nicht nur auf Parallelendmaße beschränkt, sondern kann auch zur Auswertung von Kugeln und Zylindern benutzt werden. Ursprünglich war dazu vorgesehen, den Prüfling so aufzustellen, daß seine Achse von dem (etwas größeren) Endmaß um angenähert seinen

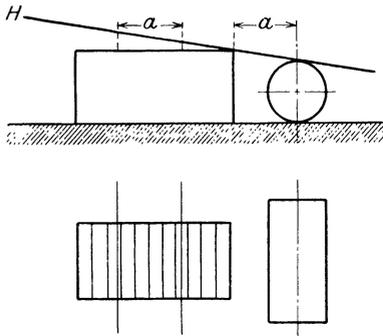


Abb. 133. Interferenzmessung von Zylindern.

Durchmesser  $a$  abstand (Abb. 133). Über beide wurde ein Planglas gelegt, das zwei Marken in demselben Abstände  $a$  hatte. Dann ist der Höhenunterschied zwischen Endmaß und Prüfling durch die innerhalb der beiden Marken liegende Streifenzahl bestimmt. Diese Methode leidet aber darunter, daß die Kanten des Endmaßes niemals geometrisch scharf, sondern stets abgerundet sind, und

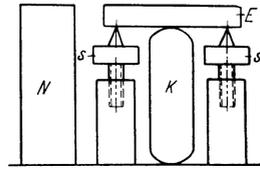


Abb. 134. Interferenzmessung von Zylindern und Kugeln.

daß auch die Planplatte den Prüfling nicht in seinem höchsten Punkt tangiert. Besser ist die in Abb. 134 dargestellte Methode (3), die auch eine Absolutmessung gestattet (wobei dann das Endmaß  $N$  überflüssig ist). Man legt auf das dort gezeichnete Kugelendmaß  $K$  ein kleines Endmaß  $E$  und justiert es durch die 3 Schrauben  $s$  parallel zur Quarzplatte. Die Messung gestaltet sich dann genau so wie bei Parallelendmaßen. Von dem Ergebnis ist die Dicke des Endmaßes  $E$  in Abzug zu bringen. Ferner ist zu beachten, daß der Prüfling infolge der Abplattung zu kurz gemessen wird. Es ist also die Differenz der unten durch das Eigengewicht + Gewicht des Endmaßes, oben durch letzteres allein bewirkten Abplattungen hinzuzuzählen, die man auf Grund der früher gegebenen Formeln (siehe S. 65) berechnen kann.

Die erst genannte Methode ist aus einer einfachen, früher im Bureau of Standards zum Vergleich von Endmaßen verwendeten hervorgegangen (4, 5, 6), bei der die Planplatte auf die Ecken  $A$  und  $B$  der beiden nebeneinander auf eine Quarzplatte angesprengten Endmaße gelegt wurde (Abb. 135), wobei als Lichtquelle ein Heliumrohr oder eine Quecksilberlampe mit einem Filter benutzt wurde, das nur die grüne Linie durchließ (häufig reicht auch ge-

filtriertes weißes Licht aus). Nach den früheren Ausführungen gibt die Ordnungszahl des auf dem Endmaß  $A$  liegenden und durch die Ecke  $B$  gehenden Streifens den Höhenunterschied von  $A$  und  $B$ ; in dem gezeichneten Falle beträgt er  $2,5 \cdot \frac{\lambda}{2}$ . Er ist ferner gleich der Differenz der auf  $I$  und  $II$  bis zu einem beliebigen Punkt  $C$  gezählten Streifen. Auch hier bewirkt indessen die Abrundung der Ecken und Kanten störende Fehler (1), wie aus Abb. 136 ersichtlich; sie können bis zu  $0,15 \mu$  erreichen, was weit über die sonst mögliche Genauigkeit hinausgeht; außerdem erhält man nicht das Mittenmaß<sup>1</sup>.



Abb. 135. Interferenzmessung von Endmaßen.

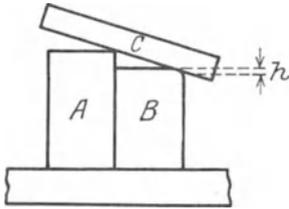


Abb. 136. Fehler bei der Messung nach Abb. 135.

Eine Art Interferenzführlhebel (Abb. 137) wird im National Physical Laboratory zum Vergleich zweier Endmaße benutzt (7). Die beiden zu vergleichenden Endmaße  $E_1$  und  $E_2$  werden an den planparallelen Block  $A$  angesprengt, der auf der genau ebenen Fläche  $B$  gleiten kann. Auf das eine Endmaß  $E_1$  legt sich der Hebel  $C$  mit dem abgerundeten Fuß  $a$ , während sein Gelenk von den Spitzen  $b$  zweier Schrauben gebildet wird, die auf dem Ausleger  $D$  ruhen. Der Hebel  $C$  kann mittels des Exzenters  $F$  betätigt werden; er trägt eine Stahlplatte  $G$  mit genau ebener (oberer) Fläche. Zwischen dieser und der von einem zweiten Ausleger  $H$  getragenen Glasplatte  $J$  entstehen bei geeigneter Justierung Interferenzstreifen. Man zählt ihre Zahl  $p_1$  (unter Schätzung der  $\frac{1}{10}$ ) zwischen zwei auf  $G$  angebrachten Marken. Dann bringt man durch Verschieben von  $A$  das Endmaß  $E_2$  unter den Hebel und ermittelt die jetzt zwischen den Marken liegende Zahl  $p_2$  der Interferenzstreifen.

Dreht sich der Hebel  $C$  aus einer wagerechten Lage beim Auflegen auf  $E_1$  und  $E_2$  um die Winkel  $\varphi_1$  und  $\varphi_2$ , so ist nach Abb. 138 a

$$h_1 = L \cdot \varphi_1 \quad h_2 = L \cdot \varphi_2$$

und somit der Höhenunterschied

$$\delta = L \cdot (\varphi_1 - \varphi_2).$$

<sup>1</sup> Für eine Methode unter Benutzung wandernder Interferenzstreifen siehe (2) (näher beschrieben in 1. Aufl. S. 181).

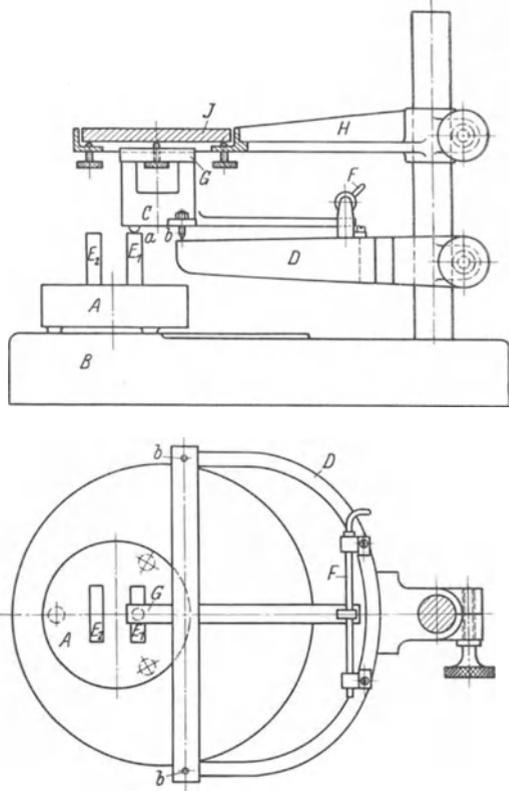


Abb. 137. Interferenz-Fühlhebel.

Bildet die Platte  $G$  in ihrer Nullstellung mit  $J$  den Winkel  $\psi$  (Abb. 138b) und ist  $s$  der Abstand der beiden Marken, so werden die Winkel zwischen beiden bei Auflage des Hebels  $C$  auf  $E_1$  und  $E_2$  gleich  $\psi + \varphi_1$  und  $\psi + \varphi_2$ , die sich bestimmen aus

$$\psi + \varphi_1 = \frac{p_1 \cdot \frac{\lambda}{2}}{s}, \quad \psi + \varphi_2 = \frac{p_2 \cdot \frac{\lambda}{2}}{s}.$$

Somit wird

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{p_1 - p_2}{s} \cdot \frac{\lambda}{2}$$

und

$$\delta = \frac{L}{s} \cdot (p_1 - p_2) \cdot \frac{\lambda}{2} = C \cdot (p_1 - p_2) \cdot \frac{\lambda}{2},$$

wo  $C$  eine Apparatenkonstante ist. Die Genauigkeit dieser Methode hängt im wesentlichen von der Ebenheit von  $B$  und ferner von der genauen Planparallelität von  $A$  ab. Nimmt man den Hebel  $C$  heraus und nähert man die Platte  $J$  den Endmaßen, so kann man auch die Ebenheit und durch Drehung des Blockes  $A$  die Parallelität ihrer Meßflächen untersuchen.

Die bisher betrachteten interferentiellen Meßmethoden beruhen sämtlich auf den Interferenzen gleicher Dicke. Im Auslande wird vielfach auch eine andere Interferenzerscheinung benutzt, die an planparallelen Platten zu beobachten ist (während die Interferenzen gleicher Dicke stets einen Keil erfordern). Jene Interferenzen gleicher Neigung sind erst später entdeckt, da sie an die Parallelität der Platte sehr hohe Anforderungen stellen, die nur von der modernen Technik erfüllt werden konnten.

Es falle auf die Planparallelplatte  $ABCD$  (Abb. 139) ein Parallelstrahlenbündel auf, dann wird jeder Strahl an der Fläche  $AB$  in einen reflektierten und in einen gebrochenen Anteil zerlegt. Von diesem tritt ein Teil als Strahl 1 an der unteren Fläche aus, während der Rest reflektiert wird und zum Teil aus  $AB$  als Strahl 2' austritt, zum Teil auch wieder zurückgeworfen wird. Durch weitere Verfolgung erhält man so nacheinander die nach oben gehenden Strahlen 1', 2', . . . und die nach unten verlaufenden 1, 2, . . . Das gleiche gilt für jeden anderen Strahl des einfallenden Parallelbündels. Die ganzen unter sich parallelen reflektierten (bzw. gebrochenen) Strahlen werden durch eine Linse (Fernrohrobjektiv) vereinigt und interferieren in seiner Brennebene. Wie eine einfache Betrachtung zeigt, ist der Gangunterschied der Strahlen 1 — 2, 2 — 3, . . . konstant und zwar nach S. 110.

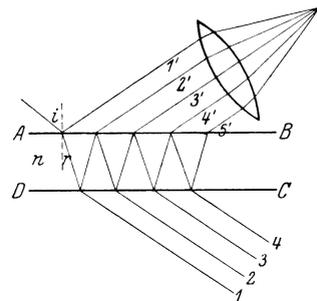


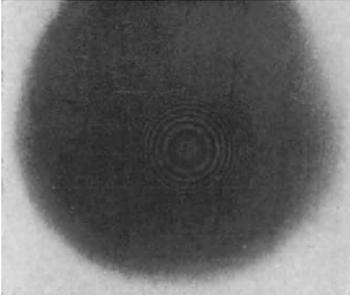
Abb. 139. Entstehung der Interferenzen gleicher Neigung.

$$g = 2 \cdot n \cdot d \cdot \cos r,$$

worin  $d$  die Dicke,  $n$  der Brechungsindex der Platte und  $r$  der zum Einfallswinkel  $i$  gehörige, aus dem Snelliusschen Brechungsgesetz folgende Brechungswinkel ist. Für eine gegebene Platte hängt demnach  $g$  nur von  $r$  und damit von  $i$  ab.

Somit entstehen in der Brennebene der Linse abwechselnd helle und dunkle konzentrische Kreise, deren Mittelpunkt auf der durch den Mittelpunkt des Objektivs gehenden Normalen zur Platte liegt. Die Interferenzen gleicher Neigung an einer 10-mm-Platte sind in Abb. 140 wiedergegeben (auf dem Original sind 3 Ringsysteme zu erkennen, da die zur Aufnahme benutzte violette Quecksilberlinie aus 3 Komponenten besteht).

Die Interferenzen gleicher Neigung sind um so schärfer, je größer die Zahl der mehrfach reflektierten Strahlen, je besser also das Reflexionsvermögen der Planparallelplatte ist (siehe S. 346), weshalb sie fast stets halbdurchlässig versilbert wird. Dabei ist auf gleiches Reflexionsvermögen auf beiden Seiten zu achten, da sich sonst die Interferenzen einem hellen Grunde auflagern und dadurch undeutlich werden. Wegen des (noch von der Wellenlänge abhängigen) Phasensprunges fällt auch hier nicht die optische Oberfläche mit der mechanischen zusammen.



Auf Grund der Versuchsergebnisse kann man bei genügend homogenen Spektrallinien Interferenzen bis zu Gangunterschieden von  $1,2 \cdot 10^6$  Wellenlängen, entsprechend einer Strecke von 720 mm, beobachten. Da aber für genügende Schärfe mindestens die Mitwirkung von vier Teilwellen notwendig ist, so ist die hiermit auszumessende Länge doch auf rund 200 mm beschränkt.

Abb. 140. Interferenzen gleicher Neigung.

Da für den Mittelpunkt der Interferenzringe  $i = r = 0$ ,  $\cos r = 1$  ist, so tritt hier die größte Ordnungszahl auf, während sie nach dem Rande hin abnimmt; dabei wächst der Ringdurchmesser nach demselben Gesetz wie bei den Newtonschen Ringen (gleicher Dicke).

Ein Interferenzmaximum oder -minimum kann nun nur im Mittelpunkt auftreten, wenn die optische Dicke ein ganzes gerades (bzw. ungerades) Vielfaches der halben Wellenlänge ist. Im allgemeinen wird man also nicht gerade im Mittelpunkt ein solches Maximum oder Minimum beobachten. Ist nun  $p$  die Ordnungszahl des kleinsten hellen Ringes und gehört zu ihm der Brechungswinkel  $r_0$ , so gilt für ihn die Beziehung

$$2 \cdot n \cdot d \cdot \cos r_0 = p \cdot \lambda$$

oder, da  $r_0$  ein kleiner Winkel,

$$2 \cdot n \cdot d \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \cdot r_0^2\right) = p \cdot \lambda.$$

Für den Mittelpunkt ( $r_0 = 0$ ) ist der Gangunterschied gleich  $p + \varepsilon$ , wobei  $\varepsilon$  wieder einen echten Bruch bedeutet; hier gilt also

$$2 \cdot n \cdot d = (p + \varepsilon) \cdot \lambda,$$

somit wird

$$\varepsilon = n \cdot d \cdot \frac{r_0^2}{\lambda}$$

und in Luft

$$\varepsilon = d \cdot \frac{r_0^2}{\lambda}.$$

Den Winkel  $r_0$  erhält man aus der Messung des Durchmessers  $2 \cdot \varrho$  des kleinsten hellen Ringes (mittels Okular-Schraubenmikrometers) und aus der Brennweite  $f$  des Fernrohrobjektivs durch die Beziehung

$$r_0 = \frac{\varrho}{f},$$

somit

$$\varepsilon = \frac{d}{\lambda} \cdot \left(\frac{\varrho}{f}\right)^2.$$

Es läßt sich also die Größe  $\varepsilon$  aus dem angenähert bekannten  $d$ , dem gemessenen Ringhalbmesser  $\varrho$  und den gegebenen Größen  $\lambda$  und  $f$  berechnen. Die genaue Dicke der Platte erhält man dann wieder aus der Beziehung

$$d = \frac{1}{2} \cdot (p + \varepsilon) \cdot \lambda.$$

Zur Bestimmung der Ordnungszahl  $p$  geht man in der gleichen Weise wie bei den Interferenzen gleicher Dicke vor, indem man die Beobachtungen mit verschiedenen Wellenlängen ausführt und daraus rechnerisch oder mit Hilfe des Nomoграмms die Korrektur der Dicke  $d$  bestimmt. Auch die Korrekturen für den Einfluß von Luftdruck, Temperatur und Dampfdruck sind in der gleichen Weise wie früher anzubringen. Ebenso muß die Größe des Phasensprungs ermittelt werden.

Um ein Endmaß  $E$  in eine halbdurchlässig versilberte Luftplatte zu verwandeln, werden daran 2 halbdurchlässig versilberte Planplatten  $P$  nach Abb. 141

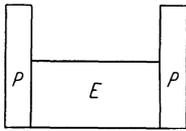


Abb. 141. Messung von Endmaßen durch Interferenzen gleicher Neigung.

angesprengt, die an der Anlagestelle frei von dem Metallbelag sind (8). Die Genauigkeit soll  $\frac{1}{4}$  bis  $\frac{1}{5} \cdot 10^{-6}$  der Länge betragen, ist aber praktisch wegen nicht genügender Parallelität der Meßflächen nicht auszunutzen, während die Interferenzen gleicher Dicke auch in diesem Fall das Mittenmaß mit

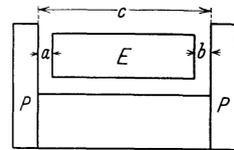


Abb. 142. Messung von Endmaßen im Etalon.

großer Genauigkeit zu bestimmen gestatten. Die Messung nach Abb. 141 ergibt die geometrische Länge + 2 Ansprengschichten oder die Länge des Endmaßes nach DIN 861 + 1 Ansprengschicht.

Um von der Unparallelität der Meßflächen frei zu werden, geht man besser so vor, daß man das Endmaß nach Abb. 142 in einen sogenannten Etalon legt, dessen beide Platten  $PP$  möglichst genau parallel zueinander justiert sind, so daß eine Messung seiner Länge  $c$  bis auf etwa  $5 \mu$  möglich ist, und dann die Abstände  $a$  und  $b$  mittels der Interferenzen gleicher Dicke ermittelt. Bei kleinen Endmaßen und dementsprechend kurzen Etalons kann man auch  $c$  durch Interferenzen gleicher Dicke messen; die Genauigkeit wird für Endmaße bis  $5 \text{ mm}$  Länge zu  $\pm 0,02 \mu$  angegeben (4a). Diese Messungen sind aber umständlicher als die (früher erläuterten) unter Benutzung der Interferenzen gleicher Dicke am Keil.

## 7. Andere Verfahren.

Kurz sei noch darauf hingewiesen, daß man sehr kleine Abstandsänderungen feststellen kann, wenn man die Enden der zu messenden Strecke (durch Hebelübersetzung) als Belegungen eines Kondensators ausbildet, der als Kapazität eines Schwingungskreises in einer Schaltung mit Verstärkerröhren liegt<sup>1</sup>. Die Änderung des Abstandes bewirkt eine solche der Kapazität und damit der Schwingungszahl, die man mit Hilfe der Tonschwebungen leicht feststellen kann (3, 5). Diese lassen sich in Stromänderungen umsetzen und als solche wahrnehmen, bzw. nach Verstärkung durch Elektronenröhren registrieren (3b). Von gleicher Genauigkeit ist die Methode, die durch die Änderung der Kapazität bewirkte Änderung der Stromstärke im Anodenkreis zu beobachten, ein Verfahren, das bereits vielfache Anwendung gefunden hat (1, 2, 3c). Es sollen sich so Genauigkeiten von  $0,01 \mu$  und weniger erreichen lassen (4)<sup>2</sup>. Sehr gut hat sich ferner die Bestimmung der Resonanzstellung eines parallel zum Gitterkreise geschalteten, umlaufenden Kondensators bewährt (3d). Für die Messung von Endmaßen werden aber diese Methoden kaum in Betracht kommen, wohl aber für die Bestimmung von Ausdehnungskoeffizienten und Durchmesser-schwankungen, da sie im allgemeinen nur Längenänderungen, aber nicht Längen selbst zu ermitteln gestatten.

<sup>1</sup> Für ein ähnliches Verfahren, aber mit Widerstandsmessung eines Elektrolyten, siehe (3a).

<sup>2</sup> Für ein Verfahren zur Messung von Längenänderungen bis auf  $0,4 \mu$  mittels Kippspiegels und Photozelle siehe (1a).

## D. Die Genauigkeit technischer Messungen.

Die Genauigkeit technischer Messungen hängt naturgemäß von der der zur Verfügung stehenden Meßgeräte ab. Dabei begeht man aber häufig den Fehler, die Ablesegenauigkeit nicht nur als Genauigkeit des Instruments, sondern sogar als die des Meßergebnisses anzusehen. Wenn z. B. ein Gerät Ablesegenauigkeit auf  $\frac{1}{10}\mu$  und Schätzung auf  $\frac{1}{10}\mu$  gestattet, so ist damit noch lange nicht gesagt, daß auch das Meßergebnis auf  $\frac{1}{10}\mu$  richtig ist. Es kann gar nicht oft genug betont werden, daß Ablesen und Messen zweierlei ist!

Die reine Ablesegenauigkeit ist bedingt durch die Ausführung der Skala, wie saubere Striche, deren Stärke und Länge in einem geeigneten Verhältnis zueinander und zur Größe des Intervalls stehen müssen; guten Kontrast zwischen Strich und Untergrund; ferner — allerdings nicht mehr vom Instrument abhängig — genügend helle, blendungsfreie Beleuchtung<sup>1</sup>, senkrechten Lichteinfall (da davon die Auffassung des Strichschwerpunktes abhängt); schließlich durch die Übung und Sorgfalt des Beobachters usw. Sehr wichtig ist vor allem eine genügende Größe des Strichabstandes, die noch einwandfreie Schätzung der Zehntel erlaubt, wozu Intervallgrößen von 0,7 bis 2,5 mm erforderlich sind; diese Größen müssen auch die durch optische Geräte (Lupe, Mikroskop) erzeugten Bilder der Intervalle haben (Näheres siehe Anhang). Demnach wird man als Ablesegenauigkeit  $\frac{1}{10}$ , unter Umständen  $\frac{1}{20}$  Skalenteil ansetzen können, während man bei ungenügender Intervallgröße  $\frac{1}{5}$  oder gar nur  $\frac{1}{4}$  bis  $\frac{1}{2}$  Skt. zulassen kann.

Bei einem in mm geteilten Maßstab wird die Ablesegenauigkeit somit im allgemeinen  $\frac{1}{10}$  mm betragen; sie ist auch durch optische Vergrößerung nicht zu verbessern, da in der Regel (von großer Übung abgesehen) Schätzung auf mehr als  $\frac{1}{10}$  Skt. nicht auszuführen ist. Dagegen wird es bei Intervallen von  $\frac{1}{10}$  mm mit geeigneter optischer Vergrößerung noch möglich sein, gleichfalls  $\frac{1}{10}$  dieses Intervalls, also  $\frac{1}{100}$  mm, zu schätzen.

Diese Verbesserung der Ablesegenauigkeit läßt sich auch durch mechanische Hilfsmittel erzielen. So kann man es z. B. durch Hebelübersetzung erreichen, daß 1 Skalenteil (von etwa 1 mm Größe) einem Wert von  $1\mu$  entspricht. Dann ist die Ablesegenauigkeit  $\frac{1}{10}\mu$ .

Sie setzt sich also aus 2 Größen zusammen, der kleinsten zu schätzenden Größe in Bruchteilen des Intervalls, die von seiner Größe abhängt, so daß diese stets angegeben werden sollte, und von der Bedeutung des Intervalls. Diese ist bei Maßstäben durch die Größe der Teilung gegeben. Bei den eigentlichen Meßgeräten ist sie dagegen durch ihre Übersetzung, also ihre Konstruktion, bedingt. Man bezeichnet sie auch wohl als Empfindlichkeit und definiert diese als den Quotienten aus dem Ausschlag in Skt. und der Änderung der zu messenden Größe, die diesen Ausschlag bewirkt hat. Bei den Längenmessungen, um die es sich hier im wesentlichen handelt, wird man sie in Skalenteilen angeben. Es hat also z. B. ein Fühlhebel der Übersetzung 1:1000 eine Empfindlichkeit von  $\frac{1\text{ Skt.}}{1\mu}$ . Bei einer Meßuhr, für welche 1 Skt. =  $\frac{1}{100}$  mm ist, beträgt die Empfindlichkeit  $\frac{1\text{ Skt.}}{10\mu}$  oder  $\frac{\frac{1}{10}\text{ Skt.}}{1\mu}$ , sie ist also 10mal kleiner (von Empfindlichkeit kann man natürlich nur bei Geräten mit beweglicher Marke, wie Zeigern, Flüssigkeitsständen usw., sprechen). Die Ablesegenauigkeit in Maßeinheiten ist demnach gleich dem Quotienten aus der durch die Intervallgröße bedingten Ablesegenauigkeit in Skt. und der Empfindlichkeit.

<sup>1</sup> Näheres in der demnächst erscheinenden Arbeit von Reiter (Diss. Techn. Hochsch. Dresden).

Für die Meßgenauigkeit spielen aber außer der (auch durch die Empfindlichkeit bedingten) Ablesegenauigkeit noch andere Faktoren mit, vor allem die Güte der Ausführung und der Behandlung des Instruments; so würden z. B. Beschädigungen, verharztes Öl, große Reibung u. ä. die Meßgenauigkeit stark herabsetzen, da das Gerät dann auf eine kleine Längenänderung überhaupt nicht mehr ansprechen und sein Zeiger erst bei größten Änderungen plötzlich, und zwar unregelmäßig vorspringen würde. Dadurch kommt es, daß man bei wiederholten Beobachtungen, vor allem bei wachsenden und abnehmenden Längen verschiedene Ablesungen erhält (toter Gang), so daß man möglichst alle Einstellungen stets im selben Sinne vornehmen muß, was indessen (z. B. bei Fühlhebeln) nicht immer möglich ist. Einen Maßstab für die Güte eines Instrumentes oder die Instrumentengenauigkeit ergibt dann der halbe Unterschied des bei wiederholten Einstellungen beobachteten größten und kleinsten Wertes. Findet man für diese z. B. die Werte 20,8 und 21,6, so würde die Bestimmung um  $\pm 0,4$  Skt. unsicher sein. Die Angabe dieser Instrumentengenauigkeit ist für ein technisches Meßinstrument außerordentlich wichtig; sie ist auch durch keine noch so starke Vergrößerung der Ablesegenauigkeit (etwa durch optische Mittel oder durch Zwischenschaltung einer weiteren Übersetzung) zu verbessern. Dadurch kommt es, daß die Meßungenauigkeit wesentlich größer als die Ableseungenauigkeit werden kann.

Während die Empfindlichkeit (und damit im Prinzip die Ablesegenauigkeit) im wesentlichen von dem Konstruktionsgedanken des Gerätes abhängt, ist für die Instrumentengenauigkeit die Güte der Ausführung und der Behandlung ausschlaggebend. Nötig ist vor allem Verminderung der Reibung, einwandfreie Hebellagerung usw. Bei gleicher Ablesegenauigkeit (Produkt aus kleinstem zu schätzenden Intervall und der reziproken Empfindlichkeit) bzw., wenn man durchweg mit Schätzung auf  $\frac{1}{10}$  Skt. rechnen darf, bei gleicher Empfindlichkeit ist das Gerät mit der geringeren Instrumentengenauigkeit das wertvollere. Sie muß möglichst kleiner als die Ablesegenauigkeit sein, um diese voll auszunutzen. Ist das nicht der Fall, so muß man überlegen, wieweit eine Schätzung auf Bruchteile des Intervalls überhaupt noch Zweck hat.

Demgegenüber ist es im Prinzip ziemlich gleichgültig, ob die Striche der Teilung an der richtigen Stelle liegen oder nicht, und ob das mittlere Intervall genau den angegebenen Wert hat oder davon abweicht, ob es also z. B.  $1\mu$  oder  $1,13\mu$  ist (seinen Wert erhält man durch Division des Maßes der Gesamtlänge, bzw. der dem Größtausschlage entsprechenden Länge durch die Zahl der Intervalle). Jene beiden Fehler kann man nämlich durch Kontrolle des Gerätes (z. B. einer Schraublehre durch Endmaße) bestimmen, legt sie dann in einer Tabelle oder graphisch fest und berücksichtigt sie bei der Messung. Insofern ist es ganz gleichgültig, wie groß die Korrekturen sind, wenn sie sich nur mit der genügenden Genauigkeit bestimmen lassen. In der Technik wird man indessen darauf sehen, die Korrekturen, wenn möglich, kleiner als die Ablese- bzw. als die Instrumentengenauigkeit zu halten, um das zeitraubende und auch leicht zu Fehlern führende Rechnen in der Werkstatt zu vermeiden. Immer wird sich dies indessen nicht durchführen lassen; z. B. ist es bei Schraublehren im allgemeinen nicht möglich, die Korrekturen unter die Ablese- und Instrumentengenauigkeit von  $1\mu$  herunterzubringen. Wichtig ist vor allem auch, daß die Korrekturen konstant sind, wie es bei Strichmaßen aus geeigneten Werkstoffen der Fall ist. Langsam eintretende, sich über längere Zeiträume erstreckende Änderungen müssen durch periodisch wiederholte Neubestimmungen der Korrekturen unschädlich gemacht werden. Für die Genauigkeit, mit der die Korrekturen bestimmt werden können, gelten dieselben Überlegungen wie für die Genauigkeit der

Messungen (3). Das Vorzeichen der Korrektur ist dabei durch die Beziehung bestimmt:

Ableseung (am Prüfling) bzw. Sollwert + Korrektur = wirklicher Wert  
oder

$$\text{Korrektur} = \text{wirklicher Wert} - \text{Ableseung}.$$

Ergibt sich z. B. bei der Messung eines Endmaßes von 10,000 mm mit einer zu untersuchenden Schraublehre die Ableseung 10,003 mm, so ist die Korrektur

$$k = 10,000 - 10,003 = -0,003 \text{ mm} \quad \text{oder} \quad -3 \mu.$$

Soll dagegen die Schraublehre so eingestellt werden, daß der Abstand ihrer Meßflächen 10,000 mm beträgt, so muß der Index auf 10,003 zeigen, weil dann das Maß gleich  $10,003 - 0,003 = 10,000$  mm ist. Bei der Einstellung muß man also die Korrektur mit entgegengesetztem Vorzeichen berücksichtigen wie bei der Messung. Da den Arbeitern häufig diese Korrekturen mit umgekehrtem Vorzeichen angegeben werden, sollte man sie, um eine Verwechslung mit den üblichen (Ablese- oder Meß-) Korrekturen zu vermeiden, als Einstell-Korrekturen bezeichnen.

Der Käufer oder Benutzer eines Meßgerätes braucht also folgende Angaben:

a) die Empfindlichkeit, am besten ausgedrückt als  $\frac{1 \text{ Skt.}}{n \mu}$  (sie fällt weg bei Maßstäben);

b) die Instrumentengenauigkeit, ausgedrückt in  $\pm m \mu$ ;

c) die (bei optischen Instrumenten scheinbare) Größe des Intervalls in mm (um die Schätzungsmöglichkeit beurteilen zu können);

d) die Korrekturen in  $\mu$  (die sich der Benutzer meist selbst ermitteln, bei sehr hohen Anforderungen durch eine behördliche Prüfung bestimmen lassen wird).

Die Teilungs- (und Übersetzungs-) Fehler sind systematische Fehler, die bei Nichtberücksichtigung der Korrekturen sich auch durch noch so häufige Wiederholung der Messungen nicht beseitigen lassen. Man kann sie nur bis zum gewissen Grade ausschalten, wenn man die Messungen mit verschiedenen Geräten und womöglich nach verschiedenen Methoden durchführt. Der zwischen ihren Ergebnissen auftretende (einseitige) Unterschied weist auf derartige systematische Fehler hin. Am zweckmäßigsten ist es indessen stets, die Korrekturen zu bestimmen, in Rechnung zu setzen und sie damit unschädlich zu machen.

Demgegenüber stellt die Instrumentengenauigkeit einen zufälligen Fehler dar, wie schon durch das  $\pm$ -Zeichen ausgedrückt ist, was anzeigt, daß die Beobachtung sowohl zu groß, wie auch ein andermal zu klein ausgefallen sein kann. Zu diesem kommt nun aber noch eine ganze Reihe weiterer zufälliger Fehler hinzu. So wird man bei wiederholter Ableseung einer Teilung (bei ungeändertem Instrument) in der Regel Werte erhalten, die um etwa  $\pm \frac{1}{10}$  Skt. (bei geübten Beobachtern um  $\frac{1}{20}$  Skt.) schwanken. Bei den eigentlichen Meßgeräten ist dieser Beobachtungsfehler meist schon in der Instrumentengenauigkeit enthalten; bei Maßstäben usw. muß man ihn aber gesondert berücksichtigen. Bei mikroskopischen Beobachtungen z. B. bestimmt man ihn durch wiederholte Einstellung auf denselben Strich. Gute Beobachter erreichen dabei Übereinstimmung auf  $\pm 0,2$  und auch wohl auf  $\pm 0,1 \mu$ , während sie bei ungeübten auf  $\pm 1 \mu$  ansteigt. Der reine Beobachtungsfehler hängt von der Person, ihrer Übung, Disposition, Ermüdung usw., also psychophysischen Einflüssen ab (Näheres siehe Anhang).

Weitaus den größten Einfluß hat aber die Temperatur, ändert doch  $1^\circ$  die Länge von 100 mm bei Stahl um  $1,15 \mu$ . Bei Absolutmessungen und beim Vergleich von Stücken aus verschiedenen Werkstoffen muß man also die Tempe-

ratur sehr genau bestimmen. Gute behördlich geeichte Quecksilberthermometer ergeben eine Genauigkeit von wenigen  $\frac{1}{100}^0$ , wobei man aber noch darauf zu achten hat, daß man wirklich die Temperatur des Körpers und nicht ein Mittelding zwischen dieser und der Luft mißt. So folgen an ein Endmaß angelegte Thermometer besser der Temperatur der Luft als der des Endmaßes, während herumgewickelte Widerstandsthermometer sich entgegengesetzt verhalten (15). Am sichersten ist es, ein Thermolement in eine Bohrung des Körpers einzuführen, was aber praktisch kaum möglich ist (die Stücke müßten dabei selbstverständlich auch gut gegen den Temperatureaustausch mit der Umgebung geschützt werden). Bei Messungen nicht allerhöchster Genauigkeit wird es meist genügen, wenn das Thermometer auf ein möglichst großes Stück an der Oberfläche des Körpers anliegt; zu diesem Zweck steckt man es etwa, wie früher erwähnt, in halbzylinderförmige Kupferblöcke, deren ebene Fläche auf dem Prüfling aufliegt.

Bei Werkstücken und Geräten aus dem gleichen Werkstoff (meist Stahl) braucht man die Temperatur selbst nicht zu kennen, sondern es müssen nur beide gleiche Temperatur haben, da dann ihre Längen auch bei der Bezugstemperatur von  $20^0$  genügend übereinstimmen. Dazu ist nötig, daß sich beide an derselben Stelle des Raumes längere Zeit befunden haben, da zwischen verschiedenen Arbeitsplätzen einer Werkstatt mittlerer Größe leicht Unterschiede von  $3^0$ , in größeren entsprechend mehr, bestehen können. Daß die Stücke vor Bestrahlung durch Sonne, Heizkörper sowie den menschlichen Körper zu schützen sind, daß sie ferner nicht unmittelbar mit den Händen, sondern mit einer wärmeisolierenden Holzzange, eventuell noch unter Benutzung von Asbesthandschuhen, anzufassen sind, ist wohl selbstverständlich. Ganz werden sich Temperaturdifferenzen zwischen zwei zu vergleichenden Stücken niemals vermeiden lassen, namentlich wenn man bedenkt, daß die Werkstücke durch die Bearbeitung erwärmt werden. Da aber der Arbeiter das Bestreben hat, seine Zeit (namentlich bei Akkordentlohnung) möglichst auszunutzen und sofort zu messen, so fragt es sich, welche Zeit zum Ausgleich derartiger Unterschiede erforderlich ist.

Um die Betrachtungen zu vereinfachen, sei angenommen, daß das Werkstück eine höhere Temperatur als die Umgebung habe (für kältere Stücke bleiben die Ergebnisse dieselben). Nach dem Newtonschen Abkühlungsgesetz ist die in der Zeiteinheit abgegebene Wärmemenge proportional der jeweiligen Temperaturdifferenz  $t$ . Bezeichnet man die Zeit mit  $z$ , das Gewicht in Gramm mit  $G$ , die spezifische Wärme mit  $c$ , die Oberfläche in  $\text{cm}^2$  mit  $F$ , den Koeffizienten der äußeren Wärmeleitung, d. h. die Wärmemenge in  $\text{gCal}$ , die je  $\text{cm}^2$  Oberfläche bei der Temperaturdifferenz  $1^0$  in der Zeiteinheit abgegeben wird, mit  $\mu$ , so besteht die Beziehung

$$-G \cdot c \cdot dt = F \cdot \mu \cdot t \cdot dz$$

(das Minuszeichen ist nötig, da der Körper durch die Wärmeabgabe seine Temperatur erniedrigt). Daraus folgt

$$\frac{dt}{t} = -\frac{F \cdot \mu}{G \cdot c} \cdot dz = -A \cdot dz,$$

wo

$$A = \frac{F \cdot \mu}{G \cdot c} \quad \text{ist,}$$

und weiter

$$t = T \cdot e^{-A \cdot z},$$

falls  $T$  die Temperaturdifferenz zur Zeit  $z = 0$  bedeutet. Durch Logarithmieren folgt

$$\ln t = \ln T - A \cdot z;$$

das ist die Gleichung einer Geraden, deren Neigungswinkel  $\alpha$  aus der Gleichung folgt

$$\text{tg } \alpha = -A = -\frac{F \cdot \mu}{G \cdot c} = -\frac{\ln \frac{t}{T}}{z}.$$

Daraus ergibt sich für die Bestimmung von  $\mu$  die Beziehung

$$\mu = \frac{2,301 \cdot G \cdot c \cdot \log \frac{T}{t}}{F \cdot z}$$

Messungen (2) haben ergeben, daß man für Überschlagsrechnungen bei Stan:

$$\mu = 0,008 \frac{\text{gCal}}{\text{cm}^2 \cdot \text{Min.}}$$

setzen kann (falls das Gewicht in Gramm gerechnet wird). Somit wird

$$z = 31,3 \cdot \frac{G}{F} \cdot \log \frac{T}{t} \text{ Min.}$$

Aus obigen Gleichungen folgt ferner, daß für Stücke gleicher Wärmeleitung und gleicher spezifischer Wärme gilt

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{\frac{G_1}{F_1} \cdot \log \frac{T_1}{t_1}}{\frac{G_2}{F_2} \cdot \log \frac{T_2}{t_2}}$$

und bei gleicher Anfangs- und Endtemperatur

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{F_1}{F_2} \cdot \frac{G_1}{G_2}$$

Der Temperatenausgleich mit der Umgebung erfolgt also um so rascher, je größer das Verhältnis der Oberfläche zum Gewicht ist.

Versuche ergaben bei Lehrdornen (Zylindern) und Endmaßen (Prismen) zum Ausgleich verschiedener Temperaturdifferenzen die nachfolgenden Werte, wobei sie auf eine Glasplatte, also auf eine schlecht wärmeleitende Unterlage aufgesetzt, mit Ausnahme dieser Fläche aber von ruhender Luft umgeben waren.

Lehrdorne			Zeit zum Ausgleich von	
Durchmesser mm	Höhe mm	Gewicht g	5 ÷ 1° Min.	5 ÷ 0,1° Min. Stunden
30	15	83	16	66 ~ 1
30	28	154	31	104 ~ 2
60	30	660	83	348 ~ 6
60	48	1060	146	515 ~ 9
100	35	2150	175	785 ~ 13
100	60	3700	243	803 ~ 14

Endmaße				Zeit zum Ausgleich von	
Länge mm	Höhe mm	Breite mm	Gewicht g	5 ÷ 1° Min.	5 ÷ 0,1° Min. Stunden
30	20	15	70	16	117 ~ 2
60	25	20	235	32	293 ~ 5
100	30	20	470	48	300 ~ 5
500	Durchm. 25		1900	70	

Zum Erreichen einer Temperatugleichheit auf 0,1° ist also selbst bei kleinen Stücken mindestens 1 Stunde, bei größeren mehr als 1/2 Tag nötig. Begnügt man sich mit einem Ausgleich auf 1°, so kann man im groben Durchschnitt mit 1/4 der angegebenen Zeiten, für eine solche auf 0,3° mit 2/3 derselben rechnen.

Der Ausgleich läßt sich beschleunigen, wenn man die Stücke einzeln auf eine große Eisenplatte setzt. Dann sinkt die Zeit der obigen gegenüber auf 1/3 bis 1/4. Das gilt aber nur, wenn das Gewicht der Platte sehr groß gegen das der Stücke

ist. Bringt man mehrere Stücke darauf, so richtet sich die Abkühlung im wesentlichen nach der des größten und wird die der kleineren unter Umständen sogar gegenüber der auf der Glasplatte benötigten Zeit verzögert. Besser sind zwei aufeinandergelegte Platten mit entsprechenden Aussparungen für die Stücke und mit Kanälen, die ständig von Wasser von Zimmertemperatur durchflossen werden, das aus einem größeren Behälter durch eine Pumpe im geschlossenen Kreislauf entnommen wird. Häufig genügt schon Aufeinanderlegen von Prüfling und Meßgerät. Isolierende Umhüllungen, die ständig auf dem Meßgerät sind, wirken nur schädlich, da sie den Wärmeaustausch mit der Umgebung verhindern.

Sehr unangenehm macht sich der Einfluß der Temperatur in den Werkstätten an Wintermontagen bemerkbar, da die Räume über Sonntag stark ausgekühlt sind. Die schweren Werkstücke folgen dann der ansteigenden Temperatur wesentlich langsamer als die leichten Meßgeräte. Man muß sich dadurch helfen, daß man diese durch angesetzte Eisenmassen wärmeträger macht, z. B. bei den zur Kontrolle von Rachenlehren dienenden Meßscheiben *M* (Abb. 143) durch beiderseits angesetzte Eisenzylinder *Z* von etwas kleinerem Durchmesser. Am besten ist es, wenn man Werkstück und Meßgerät dasselbe Verhältnis von Oberfläche zum Gewicht geben kann.

Demnach wird man in der Werkstatt mit Temperaturunterschieden zwischen Prüfling und Meßgerät von  $0,3$  bis  $1^{\circ}$  zu rechnen haben, während man in der Revision leicht auf kleinere Differenzen kommen kann, falls man in dieser Tag und Nacht möglichst konstante Temperatur (eventuell durch Zusatzöfen) hält.

Es war schon ausgeführt, daß die eigentliche Beobachtungstemperatur bei gleichem Werkstoff keine große Rolle spielt. Streng trifft auch dies indessen nicht zu, da der Ausdehnungskoeffizient des Stahls etwa zwischen  $9,5$  und  $13,5 \cdot 10^{-6}$ , also gegenüber dem angenommenen Mittelwert von  $11,5 \cdot 10^{-6}$  um  $\pm 2 \cdot 10^{-6}$  schwanken kann (7, 13). Besonders große Änderungen treten beim Härten auf, wo solche von  $10,3$  auf  $13,5 \cdot 10^{-6}$  beobachtet sind (6, 17); dies hängt natürlich davon ab, ob das ganze Stück oder ob es nur an den Enden gehärtet wird. Die mögliche Schwankung macht bei einem  $100$  mm langen Stück eine Unsicherheit von  $\pm 0,2 \mu$  auf  $1^{\circ}$  Abweichung von der Bezugstemperatur von  $20^{\circ}$  aus. Man wird deshalb dafür sorgen, die Messungen möglichst bei  $20^{\circ}$  auszuführen, was sich im Laboratorium ohne große Schwierigkeiten, in der Werkstatt aber kaum wird erreichen lassen.

Der Meßdruck wirkt auf Stücke gleichen Querschnitts (nach dem Hooke'schen Gesetz) oder gleicher Krümmung (nach den Hertz'schen Formeln) in gleicher Weise ein. Nun schwankt der Elastizitätsmodul für verschiedene Stahlsorten höchstens um etwa  $10\%$  (23), das Poissonsche Verhältnis um etwa  $15\%$ , so daß man, da die Abplattung von  $E^{2/3}$  abhängt, nur mit Schwankungen in der Zusammendrückung und in der Abplattung von etwa  $\pm 5\%$  zu rechnen braucht, die man fast stets vernachlässigen können.

Die bei einer Messung auftretenden Fehler setzen sich also zusammen aus:

1. den Instrumenten- einschließlich der Beobachtungsfehler (Ablesefehler),
2. der Unsicherheit der Kenntnis der Korrektur der Skala (oder des Gerätes),
3. dem nie vollkommenen Temperatúrausgleich,
4. den möglichen Unterschieden der Ausdehnungskoeffizienten,
5. den Schwankungen des Meßdruckes (die auch die des Elastizitätsmoduls und des Poissonschen Verhältnisses miteinschließen sollen).

Das Glied 1 kann als konstant, unabhängig von der Größe des Prüflings, angenommen werden, während die Glieder 3 bis 5 proportional der Länge *L*

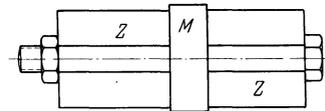


Abb. 143. Temperaturtrüger Meßscheibe.

sind (für die Abplattung von Kugeln gilt dies nicht streng, aber mit genügender Annäherung). Da sich auch Glied 2, die Unsicherheit der Korrektion, genau so aus einem konstanten und aus einem proportional  $L$  wachsenden Gliede zusammensetzt, so kann man die gesamte Meßunsicherheit zu  $a + b \cdot L$  annehmen.

Es wäre nun zu fragen, welches die größte bei technischen Messungen zu erwartende Genauigkeit ist. Diese kann nach den früheren Ausführungen nur beim Interferenzmeßverfahren von Endmaßen erreicht werden. Hier kann man bei sorgfältiger Beobachtung  $a = 0,01$  bis  $0,02 \mu^1$  (was im wesentlichen von der Unsicherheit der Anschubkorrektur herrührt (siehe S. 136) und  $b = 0,5 \cdot 10^{-3}$  ansetzen, so daß die Meßunsicherheit  $f$  wird

$$f = \pm (0,02 + 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot L) \mu \quad (L \text{ in mm}).^*$$

Dabei ist vorausgesetzt, daß die Temperatur auf  $1/50^0$  genau bekannt ist und die Messung bei Temperaturen zwischen  $19,85$  und  $20,15^0$  erfolgt. Denn  $1/50^0$  bewirkt eine Unsicherheit von  $\frac{1}{50} \cdot \frac{1,15}{100} \cdot L = 0,23 \cdot 10^{-3} \cdot L$ , und eine um  $15/100^0$  von  $20^0$  abweichende Beobachtungstemperatur gibt, bei Benutzung des mittleren Ausdehnungskoeffizienten  $11,5 \cdot 10^{-6}$ , eine Unsicherheit von  $\frac{15}{100} \cdot \frac{0,2}{100} \cdot L = 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot L$ , zusammen also rund  $0,5 \cdot 10^{-3} \cdot L$ .

Die Erreichung einer solchen Genauigkeit setzt aber ganz besondere Einrichtungen voraus. Im Fabriklaboratorium kann man im allgemeinen zufrieden sein, wenn man eine Genauigkeit von

$$\pm (0,05 + 1 \cdot 10^{-3} \cdot L) \mu \quad \text{oder} \quad \pm (0,1 + 2 \cdot 10^{-3} \cdot L) \mu$$

erreicht. Auch für letztere ist noch nötig Messung der Temperatur auf etwa  $1/10^0$  (dadurch veranlaßte Unsicherheit  $1,15 \cdot 10^{-3} \cdot L$ ) und Ausführung der Messung zwischen  $19,5$  und  $20,5^0$  (dadurch bewirkte Unsicherheit  $1 \cdot 10^{-3} \cdot L$ ), die zusammen eine Unsicherheit von  $2,15 \cdot 10^{-3} \cdot L$  ergeben.

Hiernach wird es verständlich sein, wenn als Richtlinien für die Genauigkeit der Endmaße der Gütegrade

$$\text{I: } \pm (0,2 + 5 \cdot 10^{-3} \cdot L) \mu$$

und

$$\text{II: } \pm (0,5 + 10 \cdot 10^{-3} \cdot L) \mu$$

zugrunde gelegt sind, da dann für die Werkstatt unter obigen Annahmen nur noch eine Herstellungstoleranz von

$$\text{bei I: } \pm (0,15 + 4 \cdot 10^{-3} \cdot L) \mu \quad \text{bzw.} \quad \pm (0,1 + 3 \cdot 10^{-3} \cdot L) \mu$$

und

$$\text{bei II: } \pm (0,45 + 9 \cdot 10^{-3} \cdot L) \mu \quad \text{bzw.} \quad \pm (0,4 + 8 \cdot 10^{-3} \cdot L) \mu$$

bleibt.

Es hat auch keinen Zweck, die Genauigkeitsansprüche wesentlich weiter zu steigern, obwohl derartige Endmaße durch Ausschuen geliefert werden könnten, da 1. eine den Gütegraden I oder II entsprechende Genauigkeit für technische Messungen stets ausreicht, 2. aber hinzukommt, daß eine höhere Genauigkeit auch nur für den Moment der Ablieferung verbürgt werden könnte, da sich ja die Länge auch bei den sorgfältigst gealterten Endmaßen im Laufe der Zeit um ähnliche Beträge ändert.

<sup>1</sup> Bei wiederholtem Ansprennen hochglanzpolierter und sorgfältig gereinigter Endmaße ist man sogar auf eine Übereinstimmung bis auf  $\pm 3 \mu$  gekommen (18, 19).

\* Bei den allersorgfältigsten Messungen kann man sogar bis etwa

$$f = \pm (0,005 + 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot L) \mu$$

kommen.

Man sollte sich deshalb auch nicht durch übertriebene Genauigkeitsangaben blenden lassen, wie man sie gelegentlich in Katalogen ausländischer Firmen findet, die Garantien von 0,05 und sogar von 0,025  $\mu$  bis 25 mm Länge anbieten (11); erstlich beziehen sich diese, was aber nicht gesagt wird, nur auf das Mittenmaß; dies hilft aber nicht viel, wenn die Meßflächen um größere Beträge uneben und unparallel sind und sich die Endmaße womöglich nicht einmal ansprengen lassen; verschiedentlich hat sich auch gezeigt, daß die angegebenen Garantien nicht einmal für das Mittenmaß innegehalten werden, was auch erklärlich, da einfach die Ablesung als Mittenmaß genommen wird, was, wie nicht oft genug betont werden kann, zu völlig falschen Schlüssen führt<sup>1</sup>.

In Deutschland hat man im DNA bewußt den Weg eingeschlagen, die Garantie so anzugeben, daß auch bei Nachmessung mit anderen (natürlich entsprechend empfindlichen) Geräten und unter Beachtung der nötigen Vorsichtsmaßregeln sich niemals ein Wert ergeben kann, der die Garantie überschreitet. Es werden deshalb zu jeder Ablesung die möglichen Meßfehler hinzugezählt und erst diese Summe als Garantie gegeben. Nur bei einem solchen durch die Ehrlichkeit diktierten Vorgehen weiß der Käufer auch wirklich, mit welchen größten Abweichungen vom Sollwert er zu rechnen hat, während ihm eine irgendwie zustande gekommene Ablesung gar keine Gewähr dafür bietet. Bei derartigen Angaben liegt häufig nur die Absicht vor, den kritiklosen Käufer zu bluffen (1, 22).

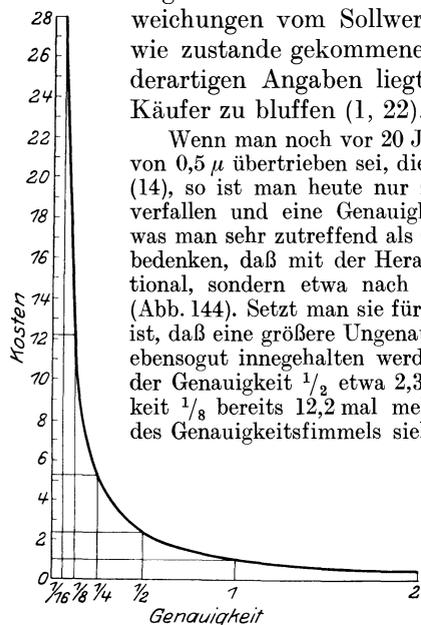


Abb. 144. Herstellungskosten und Genauigkeit.

Wenn man noch vor 20 Jahren auf dem Standpunkt stand, daß eine Garantie von 0,5  $\mu$  übertrieben sei, die von keinem Sterblichen übernommen werden könne (14), so ist man heute nur zu sehr geneigt, in den entgegengesetzten Fehler zu verfallen und eine Genauigkeit zu fordern, die in keiner Weise benötigt wird, was man sehr zutreffend als Genauigkeitsfimmel bezeichnet hat. Man muß immer bedenken, daß mit der Heraufsetzung der Genauigkeit die Kosten nicht proportional, sondern etwa nach einer Exponential- oder Hyperbelkurve anwachsen (Abb. 144). Setzt man sie für eine bestimmte Genauigkeit gleich 1, die so gewählt ist, daß eine größere Ungenauigkeit keine Ersparnis bringt, da sie z. B. auf 1 mm ebensogut innegehalten werden kann wie auf 2 mm, so betragen die Kosten bei der Genauigkeit  $\frac{1}{2}$  etwa 2,3, bei der Genauigkeit  $\frac{1}{4}$  etwa 5,3, bei der Genauigkeit  $\frac{1}{8}$  bereits 12,2 mal mehr [für einige kennzeichnende Beispiele der Kosten des Genauigkeitsfimmels siehe (24, 26)].

Aus den mitgeteilten Zahlen sieht man auch, daß die Genauigkeit der Endmaße wesentlich höher als die der Strichmaße ist, wo sie selbst beim Prototyp nur 0,2 bis 0,5  $\mu$  beträgt. Würde man die Maßstäbe in Eis legen, so daß die Temperatur und auch der Ausdehnungskoeffizient bei der Bezugstemperatur 0° praktisch keinen Einfluß

haben, so bleibt doch stets der von der Unsicherheit in der Auffassung des Schwerpunktes der Striche herrührende Fehler; die Genauigkeit hat deshalb auch bei kürzeren Maßstäben denselben Wert. Da nun beim gegenseitigen Vergleich von Strichmaßen noch Fehler hinzukommen, so kann man im allgemeinen die Unsicherheit von Strichmaßen auf 0,5 bis 1  $\mu$  ansetzen, wozu eventuell noch die Einflüsse der Temperatur und der Verschiedenheit der Ausdehnungen kommen.

Es wäre noch die Frage zu stellen, ob es berechtigt ist, bei den Messungen sämtliche mögliche Fehler zu addieren, statt den mittleren Fehler (siehe S. 49) zu nehmen. Sind die einzelnen Fehler  $f_1, f_2, f_3$  (z. B. Beobachtungsfehler, Einfluß der Temperatur, Einfluß der Ausdehnung), so ist nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz der mittlere Fehler

$$f = \sqrt{f_1^2 + f_2^2 + f_3^2}.$$

Diese Rechnung ist aber nur gerechtfertigt, wenn die  $f_i$  selbst mittlere Fehler darstellen. Bei technischen Messungen kann man aber in der Regel aus wirtschaftlichen Gründen nur

<sup>1</sup> So sind auch die Angaben über einen nach 0,025  $\mu$  abgestuften Endmaßsatz (9) zu bewerten.

eine oder höchstens zwei Messungen ausführen und somit keinen mittleren Fehler berechnen. Insofern ist es durchaus gerechtfertigt, um ganz sicher zu gehen, den Fehler  $f$  aus der Gleichung

$$f = f_1 + f_2 + f_3$$

zu berechnen. Man hat dann auf jeden Fall die Sicherheit, die gegebene Garantie nicht überschritten zu haben (4). Die Gaußsche Fehlerrechnung ist nur dann gerechtfertigt, wenn die Zahl der Beobachtungen so groß ist, daß man die Gesetze der Statistik darauf anwenden darf, d. h. wenn sich der Mittelwert bei Weglassung einer beliebigen Beobachtung praktisch nicht ändert.

Im vorstehendem war im wesentlichen die Rede von der Genauigkeit der Endmaße. Bei den von ihnen abgeleiteten Meßgeräten, vor allem den festen Lehren, wird die Ungenauigkeit entsprechend größer (man sollte überhaupt besser von Ungenauigkeit statt von Genauigkeit sprechen, da eine kleinere Zahl eine geringere Ungenauigkeit, aber eine größere Genauigkeit darstellt). Auch für die Meßgenauigkeit dieser Meßgeräte wird im wesentlichen das Gesetz  $a + b \cdot L$  gelten. Welche Werte  $a$  und  $b$  dabei haben, hängt nun ganz von den benutzten Meßgeräten und den sonstigen Einrichtungen, vor allem der Temperatur und ihrem Verlauf im Meßraum ab.

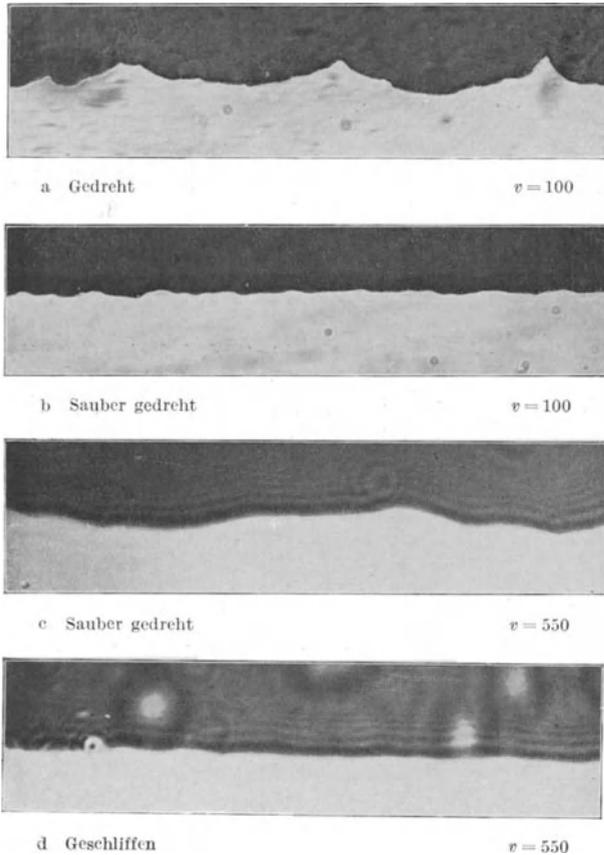


Abb. 145. Oberflächen gedrehter und geschliffener Werkstücke.

Die bei festen Lehren anzunehmenden Werte werden später bei diesen besprochen werden.

Dagegen muß hier noch die Frage aufgeworfen werden, ob diese Genauigkeiten, die bis in die Bruchteile des My gehen, für die Technik erforderlich sind bzw. ob sie in ihren Betrieben überhaupt einzuhalten vermag. Der Genauigkeit sind hier durch folgende Umstände Grenzen gesetzt:

1. Eigenschaften der Werkstoffe,
2. Leistung und Abnutzung der Werkzeuge,
3. Mängel in der Konstruktion und Ausführung der Werkzeugmaschinen, vor allem in der Lagerung der Spindeln und in der Güte der Führungen,
4. Durchfederung der Werkstücke bei der Bearbeitung,
5. Erwärmung beim Bearbeiten, durch Anfassen und durch Strahlung,
6. Genauigkeit, Sorgfalt und Übung des Arbeiters.

Mit den gebräuchlichen Drehstählen ist der kleinste abzunehmende Span bei Eisen  $6 \mu$ , bei Messing  $3 \mu$ ; mit dem Diamanten kann man etwa  $2 \mu$  als kleinsten Wert annehmen (8)<sup>1</sup>. Beim Fräsen sind die Fehler in der Regel höher, da namentlich größere Fräser auf 10 bis  $20 \mu$  hohl oder ballig sind. Dagegen läßt sich mit guten Schleifmaschinen eine Genauigkeit von etwa  $1 \mu$  erreichen, falls der Werkstoff homogen ist und nicht Stellen verschiedener Härte enthält. Bei Bohrungen von 30 mm Durchmesser ließ sich in der Massenfabrikation eine Toleranz von  $7,6 \mu$  (also etwa  $\frac{1}{2}$  PE) innehalten (12). Allerdings bezieht sich dies nur auf den mittleren Durchmesser, denn bei nachgeriebenen Bohrungen von 22 mm Durchmesser ergaben sich Schwankungen in der Höhenrichtung von  $\pm 8 \mu$  und im Durchmesser von  $\pm 2$  bis  $\pm 30 \mu$  (wobei die großen Werte von nicht weggeriebenen Bohrriefen herrühren); dementsprechend betragen auch die Schwankungen im Mittel  $30 \mu$  und im Extrem  $100 \mu$ , so daß die Bohrungen nur der Schlicht- bzw. der Grobpassung zuzurechnen wären (14a). Auf Automaten sind die Ungenauigkeiten etwa von gleicher Größe; man kann angeben, daß für 20 mm Durchmesser die Werkstücke um etwa  $35 \mu$  schwanken, also innerhalb der Toleranz der Welle der Schlichtpassung (3 PE) liegen; auf guten Maschinen ließ sich dagegen Fein- und Edelpassung (1 bzw.  $\frac{3}{4}$  PE) innehalten (16) [für weitere Beispiele s. (8a)].

Die vorstehenden Angaben sind auch durch Untersuchung des Profils der bearbeiteten Werkstücke bestätigt (5). Von grobgedrehten, sauber gedrehten und geschliffenen Flächen wurden Gelatineabdrücke und von diesen Mikrotomschnitte hergestellt, die dann mikroskopisch mit 100- bis 550facher Vergrößerung photographiert wurden (Abb. 145). Danach treten beim Grobdrehen Unebenheiten (Abstand der Spitzen von den Vertiefungen) von 30 bis  $50 \mu$ , beim Schlichtdrehen von etwa  $10 \mu$  und beim Schleifen von  $1,3 \mu$  auf<sup>2</sup>; bei großen Werkstücken können sie bis etwa dreimal größer werden (19a). Beim Bohren mittels Spiralbohrers (Durchmesser 20 mm) betragen die Unebenheiten in Rotguß und Lagermetall 10 bis  $12 \mu$ , in Stahl 20 bis  $30 \mu$ , in Gußeisen  $45 \mu$ . Vor- und nachgeriebene Löcher wiesen solche von 5 bis  $6 \mu$  (in Gußeisen dagegen von  $12 \mu$ ) auf. Nach dem Pressfinish-Verfahren aufgekugelte Bohrungen hatten dagegen nur Unebenheiten von 1 bis  $2 \mu$  (21).

Die Unebenheiten sind auch von Einfluß auf die Meßgenauigkeit, da die Spitzen je nach dem Meßdruck mehr oder minder weggequetscht werden. Im allgemeinen wird man mit einer Meßunsicherheit von der halben Größe der Unebenheiten rechnen können<sup>3</sup>.

## IV. Technische Meßgeräte mit Maßanzeige.

### A. Meßgeräte mit Strichmaßstab.

#### 1. Taster und Zirkel.

Die Strich- und die Endmaße lassen sich nur selten zur unmittelbaren Ermittlung der Maße der Werkstücke benutzen, namentlich wenn es sich um Messungen höherer Genauigkeit handelt; als Beispiel dafür sei etwa die Bestimmung des Durchmessers einer zwischen Spitzen aufgenommenen Welle genannt. Man bedarf deshalb gewisser, dem jeweiligen Zweck angepaßter Hilfsmittel (Meßgeräte), die den Vergleich des Werkstücks mit dem Strich- oder Endmaß mit größerer Genauigkeit vorzunehmen gestatten, als es durch einfaches Anlegen oder nach dem Gefühl möglich ist.

Ursprünglich bediente man sich dazu des Tasters oder des Zirkels (Abb. 146a), die sich bereits um 1580 im Gebrauch finden. Dieser wurde namentlich benutzt, wenn es sich um die Bestimmung von Markenabständen handelte, wie

<sup>1</sup> Damit steht in Übereinstimmung, daß man mit ausgesuchten Diamanten eine Messingwelle von 300 mm Durchmesser und 1000 mm Länge innerhalb einer Toleranz von  $5 \mu$  herstellen konnte (10).

<sup>2</sup> Noch schöner sieht man die Unebenheiten bei Mikrostereo-aufnahmen (20). Dieses Verfahren gibt ein besseres Bild der Oberflächenbeschaffenheit als die Messung des Reflexionsvermögens (25).

<sup>3</sup> Es sei auch darauf hingewiesen, daß die Güte der Oberflächen vor allem für die Schmierung von Wichtigkeit ist, da durch die Unebenheiten und ihr allmähliches Abgeschliffenwerden die Lagerluft geändert wird (siehe Falz: Schmiertechnik).

dies schon beim Vergleich von Strichmaßen miteinander näher ausgeführt wurde. Beim Aufsetzen des Spitzzirkels ist darauf zu achten, daß die Ebene seiner Schenkel parallel zur Maßstabachse verläuft, da man sonst die Projektion mißt. Um ein

Verderben der Striche auf dem Maßstab möglichst zu vermeiden, sollte man den Ausgangsstrich jedesmal wechseln. Vermieden ist jenes bei der in Abb. 146 b gezeigten Ausführung. Der übliche Zirkel muß sich ohne merkliche Fede-

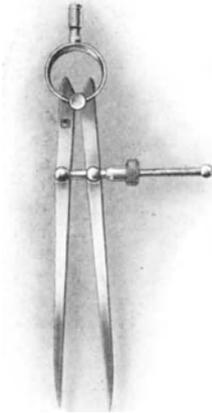


Abb. 146 a. Spitzzirkel.

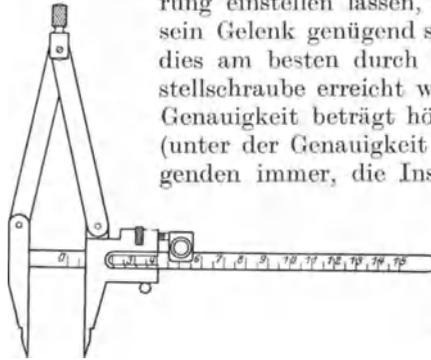


Abb. 146 b. Zirkel mit Maßstab.

rung einstellen lassen, andererseits muß aber sein Gelenk genügend selbstsperrend sein, wie dies am besten durch Federgelenk und Einstellschraube erreicht wird. Die zu erzielende Genauigkeit beträgt höchstens 0,1 bis 0,2 mm (unter der Genauigkeit soll, wie auch im folgenden immer, die Instrumentengenauigkeit,

einschließlich der Beobachtungsfehler, verstanden werden, während für die Gesamt-Meßgenauigkeit noch die Fehler des

Vergleichsmaßstabes sowie die Einflüsse

der Temperatur und der Verschiedenheiten der Ausdehnungskoeffizienten hinzukommen). — Biegt man die Spitzen nach innen oder außen um (Abb. 147 a, b),

so erhält man einen Taster, der häufig auch mit gebogenen Schenkeln ausgeführt wird. Er dient zum Vergleich der Maße von Körpern, wie der Durchmesser von Wellen oder Bohrungen, mit einem Strichmaßstab, besser mit einem Endmaß oder Lehrdorn bzw. Leerring. Die durch Auflegen des Tasters auf einen Strichmaßstab zu erreichende Genauigkeit wird man auf  $\frac{1}{2}$  bis höchstens  $\frac{1}{4}$  mm ansetzen dürfen. Durch das Gefühl der Auffederung beim Überführen des Tasters über einen Körper kann man dagegen auf eine Genauigkeit von einigen  $\frac{1}{100}$  mm kommen, so daß der Taster bei sachgemäßem Gebrauch

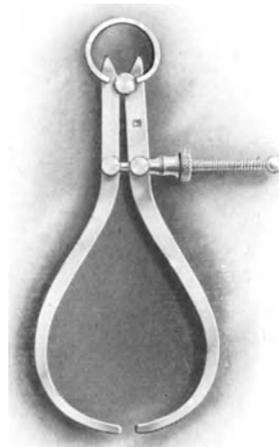


Abb. 147 a. Außentaster.

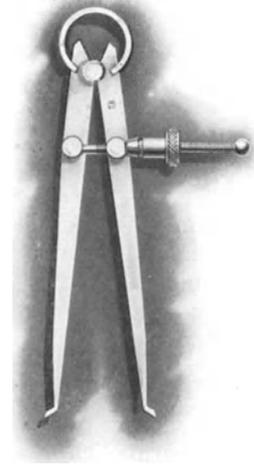


Abb. 147 b. Innentaster.

ein recht genaues Gerät darstellt. Allerdings lassen sich etwaige Unterschiede zwischen Prüfling und Normal bei diesem Verfahren nicht zahlenmäßig angeben.

Bei Hinterdrehungen besteht die Schwierigkeit, daß man den Taster nicht herausnehmen kann (Abb. 147c). Man gibt ihm dann noch einen dritten, kürzeren Schenkel (Anschlag), der durch den beweglichen beim Spreizen mitgenommen wird, beim Zusammenschließen aber stehen bleibt. So kann man jetzt den Taster herausnehmen, geht dann mit dem beweglichen Schenkel

wieder bis zum Anschlag und führt nun den Vergleich mit dem Maßstab oder dem Normal aus.

Gelegentlich hat man den Taster auch mit einem Maßstab versehen (Abb. 147d), dabei gehen aber die Fehler der Federung in die Messung ein; deshalb hat es auch keinen rechten Zweck, ihn mit einer optischen Ablesevorrichtung (ähnlich der des optischen Winkelmessers) auszurüsten (1). Diese Ausführungen bilden einen Übergang zu den Fühlhebeln.

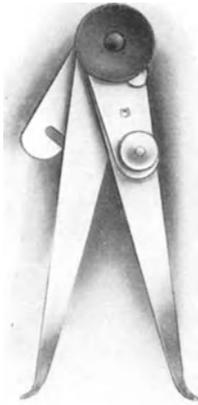


Abb. 147c. Taster für Hinterdrehungen.

Einen guten Schutz gegen das Rosten durch den Hautschweiß und die Atmosphärien bietet, wie auch bei anderen Meßgeräten, das Verchromen.

## 2. Schieblehre und Nonius.

Zirkel und Taster, die durch gelenkige Verbindung ihrer beiden Schenkel gekennzeichnet sind, gestatten stets nur die Überbrückung kleinerer Strecken. Für größere Strecken muß man die beiden



Abb. 147d. Taster mit Skala.

Schenkel auf einer Führung parallel zueinander verschiebbar anordnen, wie dies beim Stangenzirkel (siehe S. 52) geschehen ist. Um von einem besonderen Maßstab unabhängig zu werden, der noch dazu durch das Einsetzen der Spitzen rasch verdorben werden würde, hat man auf der Führungsstange selbst eine mm-Teilung angebracht (Abb. 148) und liest an dieser den Abstand

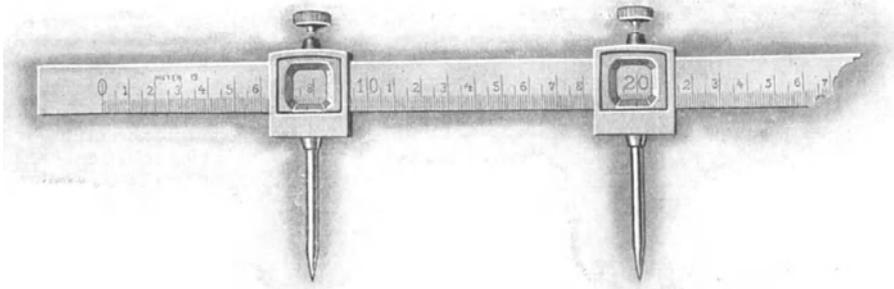


Abb. 148. Stangenzirkel mit Teilung.

der Spitzen mittels eines an dem Schlitten befindlichen Index ab. Das Zusammenfallen der Spitzen mit ihrem Index bestimmt man durch Aufsetzen der Spitzen auf ein Intervall eines Maßstabes (etwa 20 mm) und berücksichtigt die dabei gefundene Korrektur bei den einzelnen Messungen. An die Teilung auf der Führung wird man etwa dieselben Anforderungen wie an Arbeitsmaßstäbe (nach DIN 866, S. 39) stellen; zweckmäßiger prüft man aber das Gerät als Ganzes wie bei der Schieblehre.

Für die Bestimmung von Körpermaßen muß man die Spitzen durch 2 Anschläge mit ebenen, einander parallelen Flächen ersetzen und kommt so zu der Schieblehre (Abb. 149), die das erste Gerät für derartige Messungen war.

Hölzerne Schieblehren finden sich schon im 17. Jahrhundert und auch solche aus Messing waren bereits um 1690 bekannt. Für Metallarbeiten sind sie von Bion 1725 abgebildet und beschrieben. Die erste Schieblehre mit Nonius ist 1790 von Haas in London konstruiert (5) und in Deutschland von Geißler 1796 im 7. Bande seines Buches über Instrumente veröffentlicht. Im praktischen Gebrauch war sie in Frankreich seit 1825 (aber erst seit 1850

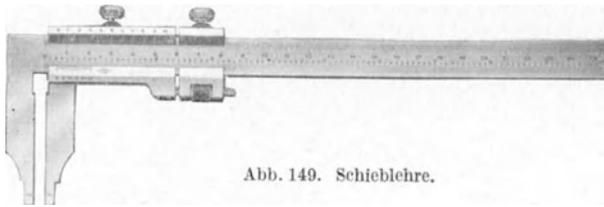


Abb. 149. Schieblehre.

mit Nonius). Sehr genaue Schieblehren mit Ablesung auf  $\frac{1}{1000}$ '' (etwa  $25 \mu$ ) wurden von Brown seit 1850 hergestellt (3).

Bei der Schieblehre (Abb. 149) ist es stets möglich, den durch einen Schlitten auf dem Maßstab geführten Schenkel bis zur unmittelbaren Berührung mit dem festen heranzuschieben. Dann soll der Index auf dem Schlitten mit dem Nullstrich des Maßstabes zusammenfallen (koinzidieren). Eine etwaige Abweichung davon ist eventuell zu bestimmen und bei den Messungen in Rechnung zu setzen, da sie

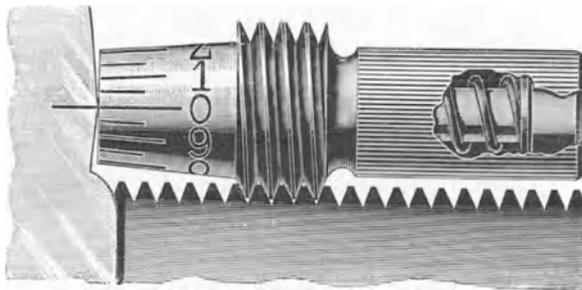


Abb. 150. Schieblehre mit Feineinstellung mittels Zahnstange und Schnecke.

bei (der Abnutzung wegen) nachgearbeiteten Geräten mehrere  $\frac{1}{10}$  mm betragen kann, während bei neuen Lehren nur Werte von  $\pm 20 \mu$  (vereinzelt bis  $60 \mu$ ) beobachtet sind (2). Bei gut gehärteten Schnäbeln ist die Abnutzung allerdings sehr gering, da nach 10000 Messungen nur eine solche von  $20 \mu$  festzustellen war.

Die Einstellung auf ein bestimmtes Maß wird durch eine Feinstellvorrichtung erleichtert. Zu dem Zweck klemmt man den kürzeren rechten Schlitten in Abb. 149 fest und verschiebt durch Drehung der in ihm gelagerten Mutter eine feingängige Schraube und den mit ihr gekuppelten Hauptschlitten. Bei einer anderen Ausführung (Abb. 150) greift eine Schnecke

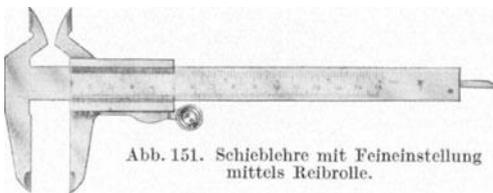


Abb. 151. Schieblehre mit Feineinstellung mittels Reibrolle.

in die zahnstangenartig ausgebildete obere Fläche der Schiene (13); für die Grobverstellung läßt sie sich leicht außer Eingriff schwenken. Auch mittels Reibrolle ist die Feinverstellung durchzuführen (Abb. 151), meist wird sie mit der Festklemmvorrichtung kombiniert; sie sitzt dazu an einem Hebel, dessen Achse einen Nocken trägt, der beim Zurückfedern der Reibrolle den Schieber klemmt, so daß

man zur Feineinstellung und zum Klemmen nur eine Hand braucht (11, 14). In der Regel wird die Feststellung durch eine im Hauptschlitten sitzende Schraube bewirkt; diese soll gegen Verlust, etwa durch Eindrehung und Stift, gesichert sein.

Meist sind die Schnäbel am Ende auf 5 oder 10 mm abgesetzt, um auch Innenmessungen ausführen zu können; die andere Seite läuft gelegentlich auch in 2 Spitzen aus (siehe Abb. 160) und gestattet die Verwendung als Stangenzirkel zur Bestimmung der Entfernung von Marken oder in 2 Schneiden (Abb. 151), um die Ermittlung des Durchmessers von Eindrehungen zu ermöglichen.

Da man die Schieblehre beim Messen in die rechte Hand nimmt, was auch eine gute Beobachtung der Teilung ermöglicht, so sind die Schnäbel fast durchweg dem Körper zugewendet (Abb. 149). Demgegenüber scheint es sehr zweckmäßig, sie nach außen zu richten (10), weil dann, namentlich bei größeren Lehren und bei eingespannten Stücken, das Ablesen der un-

gezwungenen Körperhaltung und des geringeren Augenabstandes wegen erleichtert wird, doch hat sich diese Ausführung bisher wenig eingeführt.

Ursprünglich begnügte man sich auch bei den Schieblehren mit einem einfachen Index, wobei man  $\frac{1}{10}$  oder höchstens  $\frac{1}{20}$  mm schätzen konnte. Da dies jedoch eine gewisse Übung voraussetzt und außerdem persönlichen Fehlern unterworfen ist (siehe S. 342), so bringt man jetzt durchweg einen Nonius zur Verbesserung der Ablesung an.

Dieser ist ein Gerät zum genauen Messen der Bruchteile eines Intervalls und führt seinen Namen nach dem portugiesischen Mönch Pedro Nuñez (geb. 1492), der 1542 in einer Abhandlung über die Ausführung feiner Messungen die Schätzung der Bruchteile der Grade eines Quadranten dadurch zu unterstützen empfahl, daß man zu beiden Seiten des Index eines Hilfsstrich in einem Abstand anbringt, der etwas kleiner als das Intervall ist. Seine heutige Form, die ihn erst zu einem wirklichen Meßgerät machte, rührt von dem Schloßhauptmann Peter Werner zu Dornaus in der Franche Comté (einem Elsässer oder Flamen) her, der in einer in Brüssel 1631 erschienenen Schrift mit dem lateinisierten Namen Petrus Vernierus unterzeichnete, woher auch der Nonius in den romanischen Ländern als Vernier benannt wird; in Deutschland hat sich jedoch der Name Nonius (wohl unverdrängbar) eingebürgert; seine Theorie ist übrigens bereits 1611 von Christ. Clavius aus Bamberg aufgestellt.

Der Nonius (Abb. 152) besteht aus einer mit dem Schieber längs des Maßstabes gleitenden Hilfsteilung von  $n$  Intervallen der Größe  $i'$ , die so gewählt ist, daß seine Gesamtlänge

$$l = n \cdot i' = (\gamma \cdot n \pm 1) \cdot i$$

wird, falls  $i$  die Größe des Intervalls der Hauptteilung und  $\gamma$  eine ganze Zahl, im allgemeinen 1 oder 2, seltener 3 (den sogenannten Modul) bedeuten. Wählt man  $\gamma = 1$  und  $n = 10$ , so erhält man die in Abb. 152a und b dargestellten Formen für das untere und das obere Vorzeichen. Bei ersterer verläuft die Teilung des Nonius im Sinne der des Maßstabes, bei letzterer entgegengesetzt dazu, wonach er als vor- und nachtragender Nonius bezeichnet wird. Seiner kürzeren Länge wegen wird jetzt fast nur noch der vortragende Nonius verwendet.

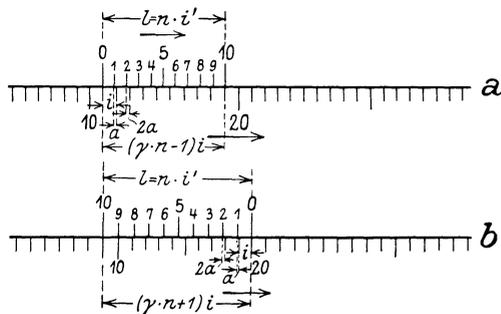


Abb. 152. Vor- und nachtragender Nonius.

Die Ablesegenauigkeit  $a$  ergibt sich allgemein zu

$$a = \pm (\gamma \cdot i - i') = \pm i \cdot \left( \gamma - \gamma \mp \frac{1}{n} \right) = \pm \frac{i}{n}$$

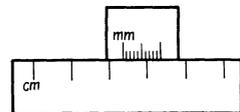


Abb. 153. Nonius mit dem Modul 0.

weshalb man  $n$  auch als Nenner des Nonius bezeichnet.

Für den Modul  $\gamma = 0$  wird, da das negative Zeichen keinen Sinn hat,  $n \cdot i' = i$ , d. h. das Maßstabintervall  $i$  wird auf dem Nonius  $n$ -fach unterteilt. Damit ergibt sich z. B. für  $n = 10$  die in Abb. 153 dargestellte Form; sie hat aber praktisch kaum einen Wert, da sich für  $i = 1 \text{ mm}$   $i' = \frac{1}{10} \text{ mm}$  ergeben würde; diese Teilung wäre aber mit unbewaffnetem Auge nicht mehr zu erkennen. Die Ablesegenauigkeit ist  $a = \frac{1}{10} \cdot i$ .

Mit wachsendem Modul nimmt das Nonius-Intervall  $i'$  zu, da  $i' = \left( \gamma - \frac{1}{n} \right) \cdot i$  ist, und erleichtert damit die Ablesung; bei  $n = 10$  würde für  $\gamma = 1 : i' = \frac{9}{10} \cdot i$  und für  $\gamma = 2 : i' = \frac{19}{10} \cdot i$ . Gleichzeitig steigt aber auch die Noniuslänge von 9 auf 19 mm, während die Ablesegenauigkeit  $a = \frac{1}{10} \cdot i$  unabhängig von  $\gamma$  ist.

Deshalb wird der erweiterte Nonius mit  $\gamma > 1$  heute kaum noch verwendet. Mit dem praktisch also allein vorkommenden Wert  $\gamma = 1$  geht die obige Formel über in

$$l = n \cdot i' = (n - 1) \cdot i, \quad a = \frac{i}{n}$$

Für verschiedene Nenner  $n$  findet man bei 1-mm-Teilung des Maßstabes die Werte

$n =$	10	20	50	100
$a =$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{20}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{100}$ mm
$l =$	9	19	49	99 mm.

Bei  $i = \frac{1}{2}$  mm (was aber eigentlich vermieden werden sollte), findet sich auch  $n = 25$ , was eine Ablesegenauigkeit von  $\frac{1}{25} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{50}$  mm gibt. Bei Winkelteilungen wählt man z. B.:

$i =$	1	$\frac{1}{2}$ Grad,
$n =$	12	30, womit man erhält
$a =$	5	1 Min.,
$l =$	11	$14\frac{1}{2}$ Grad.

Nun vermag man mit unbewaffnetem Auge unter günstigsten Bedingungen noch eine Abweichung von der Koinzidenz zweier Striche bis zu einem Sehwinkel von etwa 12 Sek. wahrzunehmen (siehe S. 343), der bei 250 mm Abstand einer Entfernung von 0,0125 mm entspricht. Somit ist der  $\frac{1}{100}$ -Nonius nicht mehr auszunutzen, weshalb er auch immer mehr verschwindet. Aber selbst beim  $\frac{1}{50}$ -Nonius ist ohne Lupe die Koinzidenz nicht genau zu erkennen, da die vorstehende Angabe dünne, sich gut gegen den Untergrund abhebende Striche und geeignete Beleuchtung voraussetzt, so daß man praktisch mit einem Sehwinkel von 25 Sek. und dementsprechend einem Abstände von 0,03 mm rechnen muß. Der  $\frac{1}{50}$ -Nonius kommt demnach nur in Sonderfällen, im Meßlaboratorium oder in der Revision, in Frage, wo man bei der Messung eine etwa fünffach vergrößernde Lupe zu Hilfe nehmen kann.

Für die Werkstatt bleibt somit im allgemeinen nur der  $\frac{1}{10}$ - und der  $\frac{1}{20}$ -Nonius. Letzterer gibt eine größere Ablesegenauigkeit, ohne daß das Erkennen der Koinzidenz Schwierigkeiten bereitet, führt aber bei der Umrechnung der  $\frac{1}{20}$  auf Dezimalbrüche leicht zu Fehlern. Nun kann man auch mit dem  $\frac{1}{10}$ -Nonius noch weiter kommen; bei guter Ausführung wird sich häufig zeigen, daß überhaupt kein Strichpaar genau koinzidiert. So steht z. B. in Abb. 154 der Strich 4 noch rechts, der Strich 5 dagegen bereits deutlich links von dem entsprechenden der Hauptteilung. In derartigen Fällen kann man nun noch eine Schätzung bis auf  $\frac{1}{4}$  der Ablesegenauigkeit, also auf  $\frac{3}{100}$ ,  $\frac{5}{100}$  oder  $\frac{8}{100}$  mm vornehmen. So wäre in Abb. 154 die Ablesung 89,43 mm. Danach kann man die Ablesegenauigkeit beim  $\frac{1}{10}$ -Nonius zu etwa  $\frac{3}{100}$  mm ansetzen, während man bei  $\frac{1}{20}$ -Nonius auf  $\frac{2}{100}$  mm käme (7). Da dies auch die Ablesegenauigkeit des  $\frac{1}{50}$ -Nonius ist (bei dem sich eine weitere Schätzung nur selten wird durchführen lassen), so wäre damit die Überflüssigkeit des  $\frac{1}{50}$ - und praktisch auch des  $\frac{1}{20}$ -Nonius für die Werkstatt erwiesen, falls nicht die Schieblehren für die einzelnen Nonien mit verschiedener Genauigkeit und jeweils auch nur mit einer solchen ausgeführt würden (siehe S. 166),

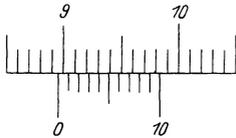


Abb. 154. Schätzung der Bruchteile beim Nonius.

die eine Schätzung der Bruchteile illusorisch macht. Im Laboratorium könnte man sonst auch beim  $\frac{1}{50}$ -Nonius unter Benutzung einer Lupe die Schätzung weiter treiben und damit auf Ablesegenauigkeiten von 5 bis 10  $\mu$  kommen.

Die Größe der Ablesefehler hängt natürlich von der Geschicklichkeit und Übung des Beobachters, sowie den sonstigen Umständen (Ermüdung, Beleuchtung) ab, ist aber durchweg am Ende des Nonius größer als in der Mitte, da man bei fehlender Koinzidenz unbewußt so weit nach beiden Seiten fortgeht, bis zwischen Nonius- und Maßstabstrich ein deutlicher Zwischenraum auftritt, und als eigentlichen Ablesestrich den in der Mitte zwischen jenen beiden gelegenen nimmt. Damit man dieses Verfahren auch in der Nähe der Enden ausführen kann, müssen hier — außerhalb der eigentlichen Noniusteilung — noch einige Hilfsstriche vorhanden sein (12). Ihre Zahl  $z$  auf jeder Seite ergibt sich aus der Bedingung, daß das Produkt

$z \cdot a = \left( z \cdot \frac{i}{n} \right)$  gleich der Strichstärke  $S$  sein muß. Für den Idealfall müßte, um  $\frac{1}{n}$  des Intervalls schätzen oder mittels Nonius ablesen zu können, eigentlich  $S < \frac{i}{n}$  sein; dann würden aber die Striche für Ablesung mit unbewaffnetem Auge zu fein. Setzt man bei  $i = 1$  mm für

$n =$	10	20	50
$S =$	0,16	0,1	0,07, so wird
$z =$	1,6	2,0	3,5 und somit praktisch
$z =$	2	3	4

Voraussetzung für die Ausnutzung der durch den Nonius (entweder unmittelbar oder durch die dazu kommende Schätzung) gegebenen Ablesegenauigkeit ist, daß die Striche der Hauptteilung und des Nonius gradlinig und sauber ausgeführt sind, daß beide gleiche Breite haben, und daß zur Vermeidung der Parallaxe die Kante des Schiebers so abgeschrägt ist, daß die Enden des Noniusstriches soweit als möglich in die Ebene der Hauptteilung fallen (Abb. 160); auch

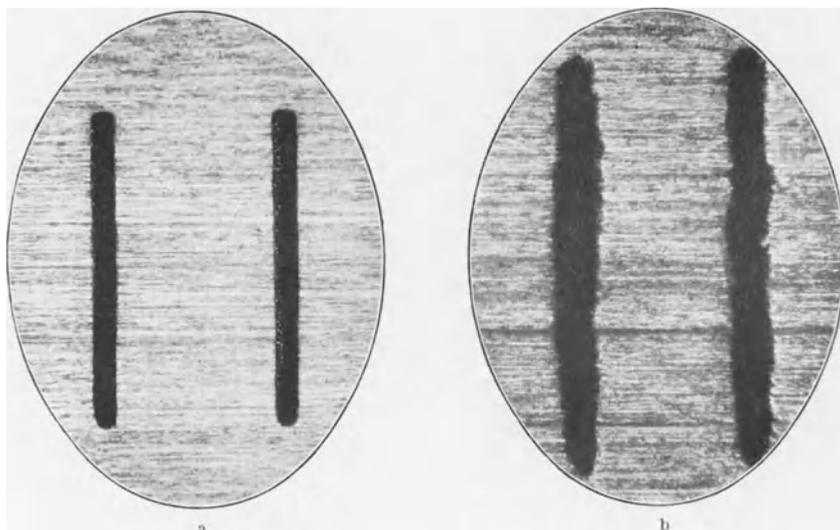


Abb. 155. Teilungsstriche von Schieblehren ( $v = 20$ ).

dürfen jene hier nicht tropfenförmig enden. Die Gestalt der Striche hängt von der Art des Ätzens, der Politur und dem Gefüge des Stahls, vor allem seiner Korngröße ab. Wie verschieden die Striche dadurch ausfallen können, läßt Abb. 155 erkennen (a gute, b schlechte Striche bei 20facher Vergrößerung). Ferner müßten möglichst die übrigen Fehler insgesamt, erst recht also die Teilungsfehler, kleiner sein als die Ablesegenauigkeit.

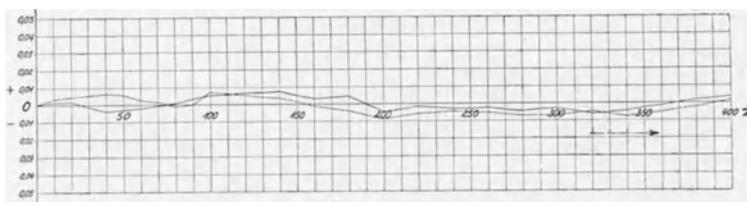


Abb. 156. Teilungsfehler einer Schieblehre.

Will man diese allein haben, so muß man sie, wie bei Strichmaßstäben, durch Vergleich mit einem Normalmaßstab auf dem Komparator ermitteln. Das Ergebnis zweier solcher Messungen zeigt Abb. 156, wonach der größte Teilungsfehler einer sehr genauen, 400 mm langen Schieblehre (mit  $1/50$ -Nonius) innerhalb  $\pm 7 \mu$ , bis 200 mm Länge sogar unter  $6 \mu$ , blieb.

Zweckmäßiger und für den Betrieb wesentlich geeigneter wird man indessen die Prüfung der Schieblehre durch Ausmessen von Parallelendmaßen an verschiedenen Stellen der Schnäbel vornehmen. Hierbei gehen alle Fehler, wie sie von der Teilung der Schiene, des Nonius, der Lage des Nullstriches, der Führung des Schiebers, der Lage des festen Schnabels zur Schiene, sowie der Unebenheit

und der Unparallelität der Meßflächen der Schnäbel herrühren, mit ein. Will man zunächst den Einfluß des Nonius ausschalten, so werden die Endmaße nach  $\frac{1}{1}$  mm abgestuft, so daß stets der Nullstrich des Nonius als Index benutzt wird. Mit unbewaffnetem Auge ist aber die zu dieser Kontrolle nötige Ablesegenauigkeit nicht zu erreichen. Man bestimmt den jeweiligen Abstand des Nullstrichs des Nonius von dem Strich der Hauptteilung mittels eines schwach vergrößernden Mikroskops mit Okularmikrometer oder mit dem Brinellmikroskop (siehe S. 281), deren Ablesegenauigkeit von einigen  $\mu$  hier stets ausreicht. Zur Bestimmung der gesamten Fehler unter Einschluß der des Nonius nimmt man entsprechend abgestufte Endmaße, so daß nacheinander die einzelnen Noniusstriche als Index dienen.

Berücksichtigt man hierbei die Korrekturen der Striche der Hauptteilung, so erhält man, da diese ja bereits die Einflüsse der Schieberführung usw. enthalten, die Korrekturen der Noniusteilung allein (das gilt aber nur, wenn die Schieberführung so gut ist, daß sich bei wiederholten Einstellungen nicht schon Unterschiede hierdurch ergeben).

Für den Gebraucher ist eine solche Prüfung im allgemeinen ausreichend, nur wäre noch die Ebenheit der Meßflächen der Schnäbel (und eventuell ihre Parallelität) zu prüfen, damit sich nicht bei Zylindern andere Werte als bei Endmaßen ergeben, die kleine Vertiefungen überbrücken.

Der Hersteller muß jedoch auch noch dafür sorgen, daß die einzelnen Fehlereinflüsse möglichst gering bleiben, also vor allem auf die sorgfältige Teilung der Schiene und des Nonius achten. Ferner muß die eigentliche Führungsfläche der Schiene (meist ihre untere Schmalseite) genügend, je nach den Ansprüchen, auf 5 bis 10  $\mu$  eben sein (für ihre Bestimmung siehe S. 330). Bewirkt eine Unebenheit  $x$  eine Kippung des Schlittens der Länge  $l$  um den Winkel  $\varphi$

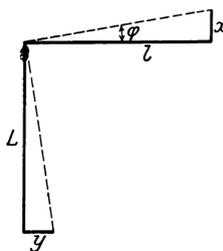


Abb. 157. Verkipfung des Schlittens.

Fehler  $y$ , der sich bestimmt aus

$$y = x \cdot \frac{L}{l}.$$

Im allgemeinen haben  $l$  und  $L$  folgende Werte bei:

Teilungslänge mm	$l$ mm	$L$ mm
200	50	60
250	60	75
300	70	100

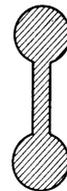


Abb. 158. Querschnittsform für die Schiene.

Nimmt man deshalb das Verhältnis  $\frac{L}{l}$  (ungünstig) zu 1,5 an, so ergeben Unebenheiten  $x$  von 5 oder 10  $\mu$  Meßfehler  $y$  von 7,5 oder 15  $\mu$ .

Ferner muß die gegenüberliegende Schmalfläche zur Führungsfläche auf etwa 20 bis 40  $\mu$  parallel sein, um ein unzulässiges Verkanten des Schiebers zu vermeiden. Außerdem müssen die Hochflächen auf 5 bis 10  $\mu$  senkrecht zur Führungsfläche stehen und untereinander auf 10 bis 20  $\mu$  parallel sein, damit der Schieber kein unzulässiges seitliches Spiel erhält (15). (Die Bestimmung der Parallelität erfolgt durch Ausmessung der Höhe bzw. der Dicke der Schiene mittels Fühlhebels oder Schraublehre.) Für die Schiene ist neben der gebräuchlichen Rechteck- auch Doppel-T- oder Hantelform (Abb. 158) zu empfehlen.

Um ferner nicht beim Anlegen an verschiedene Stellen der Schnäbel unzulässige Maßunterschiede zu erhalten und wirklich das Maß des Prüflings (und nicht seine Projektion) zu ermitteln, müssen der feste Schenkel auf etwa  $\pm 5$  Min. senkrecht zur Schiene stehen (zu kontrollieren mit einem guten Winkelmesser), die Meßflächen beider Schnäbel auf 2 bis 10  $\mu$  (je nach den Genauigkeitsansprüchen) eben und soweit zueinander parallel sein, daß zwischen den aneinander geschobenen Flächen kein Lichtspalt auftritt, auch nicht beim Festklemmen (zahlenmäßige Angaben für die Unparallelität ergeben sich durch Ausmessen von Zylindern an verschiedenen Stellen der Schnäbel oder noch besser durch Messung ihres Abstandes mittels Innenfühlhebels; derartige Messungen wird man zweckmäßig bei verschiedenen Abständen der Schnäbel, vor allem am Anfang, in der Mitte und am Ende der Schiene ausführen). Unter diesen Umständen liefern Messungen an verschiedenen Stellen der Schnäbel innerhalb der Ablesegenauigkeit gleiche Ergebnisse. Bei den besten Schieb-  
lehren ist die Ebenheit der Meßflächen so gut, daß man sie durch Auflegen eines Planglases

mittels der Interferenzen gleicher Dicke untersuchen und daß man Endmaße ansprengen kann.

Weiterhin muß die Ausführung der Schiene so stabil sein, daß durch den Meßdruck, den man im Mittel zu etwa  $\frac{3}{4}$  kg ansetzen kann, nur eine solche Aufbiegung der Meßschnäbel erfolgt, daß sie dadurch parallel gerichtet werden. Da der Meßdruck stets eine merkliche Aufbiegung bewirkt (2), ist es empfehlenswert, wenn die Schnäbel im unbeanspruchten Zustande von der Schiene aus etwas konvergent verlaufen. Bei der Prüfung der Parallelität mit einem Innenfühlhebel, dessen Meßdruck gleichfalls  $\frac{3}{4}$  kg beträgt, wäre dann zu fordern, daß die Abweichungen von der Parallelität, je nach dem Genauigkeitsgrade, 5 bis  $10 \mu$  nicht überschreiten. Die Prüfung erfolgt dann nämlich unter denselben Bedingungen, mit denen die Schieblehre praktisch gebraucht wird, so daß die Aufbiegung in beiden Fällen denselben Wert hat (ebenso wird sie auch bei der Kontrolle nach der Lichtspaltmethode ausgeschaltet). Schließlich ist auch der Abstand der Meßflächen der Innenschnäbel (mittels Schraublehre oder Fühlhebels) zu kontrollieren.

Auf die Bestimmung der Nullpunktkorrektur wurde bereits früher hingewiesen. Liegt bei aneinander geschobenen Schnäbeln der Nullstrich des Nonius entgegen dem Verlauf der Teilung, so ist die Korrektur gleich 1 — Noniusablesung.

Des größeren Abnutzungswiderstandes wegen werden die besten Schieblehren aus Chromstahl hergestellt, Schiene und Schnäbel gehärtet, künstlich gealtert und poliert.

An einer Reihe von Schieblehren wurden folgende Fehler festgestellt (1, 2):

	Nonius		
	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{20}$	$\frac{1}{50}$
Nullpunktkorrektur . . . . .	2 bis $60 \mu$	7 bis $10 \mu$	2 bis $10 \mu$
Teilungsfehler <sup>1</sup> . . . . .	11 „ $110 \mu$	11 „ $17 \mu$	7 „ $22 \mu$
Noniusfehler <sup>2</sup> . . . . .	16 „ $82 \mu$	13 „ $15 \mu$	17 „ $41 \mu$
Unebenheit der Führungskante . .	$\pm 2$ „ $15 \mu$	$\pm 2$ „ $4 \mu$	$\pm 3$ „ $9 \mu$
Unebenheit der Rückenkante . . .	$\pm 6$ „ $23 \mu$	$\pm 3$ „ $5 \mu$	$\pm 4$ „ $7 \mu$
Unparallelität der Hochkanten . .	$\pm 5$ „ $17 \mu$	$\pm 1,5$ „ $14 \mu$	$\pm 2$ „ $11 \mu$
Unparallelität der Schmalkanten .	$\pm 6$ „ $29 \mu$	$\pm 8$ „ $9 \mu$	$\pm 8$ „ $10 \mu$
Winkel: Schiene — fest. Schnäbel <sup>3</sup> .	0 „ $4 \text{ Min.}$	1 „ $3 \text{ Min.}$	1 „ $2 \text{ Min.}$
Unebenheit der Meßflächen . . .	$\pm 1,5$ „ $7 \mu$	$\pm 0,5$ „ $2,5 \mu$	$\pm 0,7$ „ $7 \mu$
Unparallelität der Meßflächen . .	$\pm 1,5$ „ $16 \mu$	$\pm 0,5$ „ $2,5 \mu$	$\pm 1,5$ „ $4 \mu$
Fehler der Innenschnäbel . . . .	1 „ $42 \mu$	12	1 „ $7 \mu$

Die normalen Schieblehren sind in DIN 862 genormt (die gewöhnlichen billigen Schieblehren sollen von der Normung nicht erfaßt werden). Ihre Bestimmungen, die nach den vorstehenden Ausführungen ohne weiteres verständlich sein werden, lauten wie um umstehend S. 166 angegeben.

Eine Normung der Strichlängen und der Anbringung von Hilfsstrichen am Nonius (siehe S. 162) ist aus technischen Gründen nicht vorgesehen.

Gegenüber der angegebenen Instrumentengenauigkeit verschwinden die Fehler, die noch von der Temperatur und der Verschiedenheit der Ausdehnungskoeffizienten herrühren, im allgemeinen; von Einfluß ist dagegen noch die Oberflächenbeschaffenheit der Prüflinge.

Die Noniusbeobachtung hat man auch durch eine Zeigerablesung zu ersetzen versucht, indem man auf der glatten oder gezahnten Führung einen in dem Schlitten gelagerten Reibungstrieb oder Ritzel abrollen ließ (Abb. 159). Derartige Uhrschieblehren gestatten Ablesungen auf  $\frac{1}{100}$  mm. Zur Ausnutzung dieser Genauigkeit gehört aber eine sehr saubere Ausführung, vor allem auch eine möglichst exzentrizitätsfreie Lagerung des Triebes, so daß sie in der Praxis wohl nur ausnahmsweise erreicht werden dürfte<sup>4</sup>.



Abb. 159. Uhrschieblehre.

<sup>1</sup> Bei Ausmessung von Endmaßen nach Abzug der Nullpunktkorrektur.  
<sup>2</sup> Unter Berücksichtigung der Korrekturen der Hauptteilung.  
<sup>3</sup> Abweichung von  $90^\circ$ . <sup>4</sup> Für eine andere, weniger gute Konstruktion siehe (4).

**Schieblehren.****DIN 862 (Entwurf).**

Werkstoff: Stahl, dessen Ausdehnung durch Wärme dem Wert 0,0115 mm für 1 m und 1° C möglichst nahe kommt.

Querschnitt: Rechteck oder sonst geeignete Form (Doppel-T) beliebiger Abmessungen. Teilung. Teilung in mm, engere Teilungen sind unzulässig. Nebenteilung in engl. Zoll ist für Sonderzwecke zulässig.

Ablesung durch Nonius (oder gleichwertige Einrichtung) mit Ablesegenauigkeit auf  $\frac{1}{10}$  ( $\frac{1}{20}$ \*) oder  $\frac{1}{50}$  mm (Zollbruchteile entsprechend). Die Teilstriche der Hauptteilung und des Nonius sind scharfkantig, gerade und mit gleicher Dicke auszuführen. Strichdicke bei



$\frac{1}{10}$ -Nonius: 120 bis 200  $\mu$ ,  
 ( $\frac{1}{20}$ -Nonius: 80 bis 120  $\mu$ )\*,  
 $\frac{1}{50}$ -Nonius: 50 bis 80  $\mu$ .

Diese Werte sind Richtwerte<sup>1</sup>.

Die Nonius-Teilung ist auf abgechrägter Fläche als Kantenteilung so auszuführen, daß die Enden der Striche möglichst in die Ebene der Hauptteilung fallen (Abb. 160).

Genauigkeit der Schieblehren: Schieblehren müssen in allen ihren Teilen so ausgeführt sein, daß bei sachgemäßem Ausmessen mittels Parallelenmaß (an beliebiger Stelle der Schnäbel) die Ergebnisse von dem Wert der Endmaße um nicht mehr abweichen als:

$$\begin{aligned} \text{bei } \frac{1}{10}\text{-Nonius: } & \pm \left( 75 + \frac{L}{20} \right) \mu, \\ \left( \text{bei } \frac{1}{20}\text{-Nonius: } & \pm \left( 50 + \frac{L}{20} \right) \mu \right) *, \\ \text{bei } \frac{1}{50}\text{-Nonius: } & \pm \left( 20 + \frac{L}{50} \right) \mu. \end{aligned}$$

$L$  das (am Nonius abzulesende) Maß, auf das die Schieblehre eingestellt ist, in mm.

Ausführung: Schiene und fester Meßschnäbel sind aus einem Stück zu fertigen, soweit nicht bei den Schieblehren mit  $\frac{1}{10}$ - (und  $\frac{1}{20}$ -) Nonius die zusätzliche Ausbildung der Schnäbel (mit Schneide usw.) eine andere Ausführung bedingt. Die Meßschnäbel müssen bei den Lehren mit  $\frac{1}{10}$ - (und  $\frac{1}{20}$ -) Nonius mindestens an den Enden, bei solchen mit  $\frac{1}{50}$ -Nonius auf die ganze Länge gehärtet und ausreichend gealtert sein.

Die Meßflächen der Schnäbel müssen bei

$$\begin{aligned} \frac{1}{10}\text{-Nonius auf } & \pm 10 \mu, \\ \left( \frac{1}{20}\text{-Nonius auf } & \pm 5 \mu \right) *, \\ \frac{1}{50}\text{-Nonius auf } & \pm 2 \mu \end{aligned}$$

eben sein. Sie müssen ferner so weit parallel zueinander sein, daß im aneinander-geschobenen Zustande mit unbewaffnetem Auge kein Lichtspalt zwischen ihnen wahrzunehmen ist, auch nicht nach dem Anziehen der Klemmvorrichtung.

Meßschnäbel für Innenmessungen: Der Abstand der Meßflächen an den Außenseiten der Meßschnäbel darf von seinem Nennmaß um nicht mehr abweichen als

$$\begin{aligned} \text{bei } \frac{1}{10}\text{-Nonius: } & + 50 \mu, \\ \left( \text{bei } \frac{1}{20}\text{-Nonius: } & + 20 \mu \right) *, \\ \text{bei } \frac{1}{50}\text{-Nonius: } & + 10 \mu. \end{aligned}$$

Bezugstemperatur: 20° C.

\* Schieblehren mit  $\frac{1}{20}$  Nonius nach Möglichkeit vermeiden.

Um den Meßdruck konstant zu halten, hat man gelegentlich auch einen Meßdruck-anzeiger eingebaut, indem ein in dem festen Schenkel gelagerter Bolzen auf einen Fühlhebel einwirkte, oder eine Ratschen-kupplung verwendet (9).

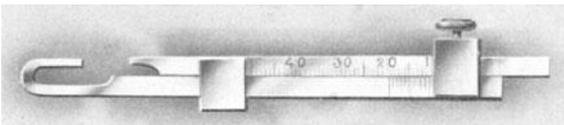


Abb. 161. Schieblehre zum Messen von Kesselblechen.

Da die Ablesegenauigkeit praktisch doch nie 20  $\mu$  überschreitet, so sind alle derartigen Meßdruckanzeiger — sachgemäße Ausführung der Schieblehre und der Messung vorausgesetzt —

<sup>1</sup> Die als Richtwerte angegebenen Grenzmaße werden bei der Abnahme nicht geprüft. Sollen sie unbedingt innegehalten werden, so ist dies bei der Bestellung anzugeben.

überflüssig. — Für Sonderzwecke hat man den Schieblehren und vor allem ihren Meßschnäbeln besondere Formen gegeben. So zeigt Abb. 161 eine Ausführung zur Ermittlung der Dicke von Kesselblechen, bei denen die Messung durch ein Nietloch, unbeeinflusst von einem etwa aufgeworfenen Grat, vor-

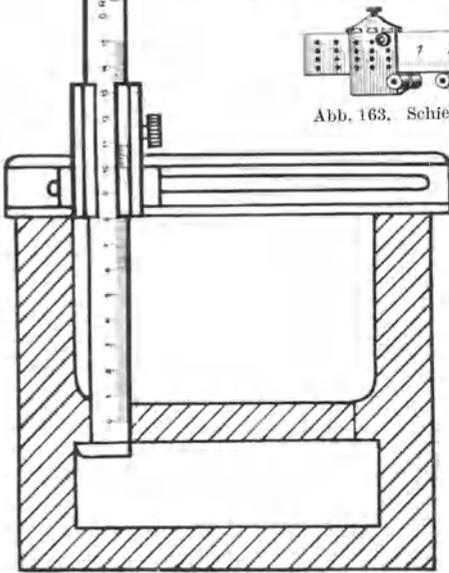


Abb. 162. Schieblehre zum Messen des Rippenabstandes.



Abb. 163. Schieblehre zum Messen von Schwalbenschwanzführungen.

genommen werden soll; Abb. 162 eine Schieblehre zur Bestimmung des Abstandes von Rippen von der Stirnfläche eines Zylinders. Die Ausführung nach Abb. 163 soll zur Messung von Schwalbenschwanzführungen dienen. Indem man den linken Schnabel in die entsprechenden Löcher einsetzt, kann man das Maß für Winkel von 30 und 60° und verschiedene Formen unmittelbar an der Teilung ohne Rechnung ablesen. Um bei größeren Stücken, wie Riemenscheiben u. ä., nicht zu unhandlichen Formen zu kommen, mißt man nach Abb. 164 nur die Sehne  $s$  eines Kreisbogens, dessen Pfeilhöhe  $h$  durch die Länge der Schnäbel gegeben ist (8). Der Durchmesser  $D$  des Prüflings folgt dann aus:

$$D = \frac{1}{4} \cdot \frac{s^2 + h^2}{h}$$

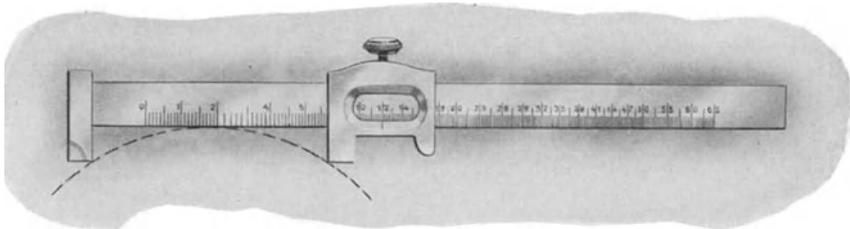


Abb. 164. Schieblehre zum Messen von Riemenscheiben.

Meist ist die Teilung so ausgeführt, daß man an ihr  $D$  unmittelbar abliest<sup>1</sup>. Wie die Fehlerrechnung lehrt, ist eine derartige Messung aber sehr ungenau (11 a). [Über die Ausbildung einer 2 m langen Schieblehre s. (16).]

Zu den Schieblehren kann man auch die Ausführungen nach Abb. 165 und 166 rechnen, die im wesentlichen als einstellbare Normal- oder Grenzrachenlehren gedacht sind. Der bewegliche Schnabel wird mit dem Index immer auf volle mm eingestellt. Da man hierbei aber höchstens eine Genauigkeit von  $\frac{3}{100}$  mm erhält, so kommt ein derartiges Gerät nur für ganz grobe Zwecke in Frage. Die in Abb. 165 links sichtbaren Schnäbel ermöglichen eine Benutzung als Grenzflächlehre zur Messung von Bohrungen.

Um ein für den äußeren Eindruck berechnetes sogenanntes schönes Aus-

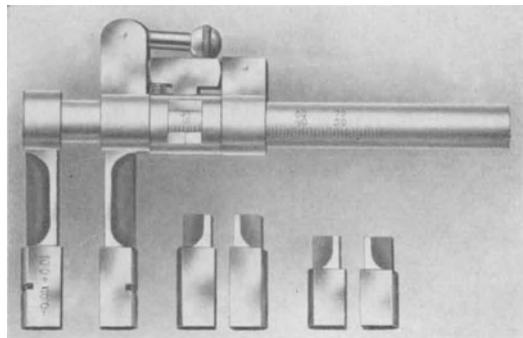


Abb. 165. Schieblehre als einstellbare Rachenlehre.

<sup>1</sup> Für eine andere Ausführung, bei der man die Pfeilhöhe  $h$  bei gegebener Sehne  $s$  mißt, siehe Anschnitt B 14.

sehen zu erzielen, werden recht häufig die Flächen, nachdem sie auf höchste erreichbare Genauigkeit hin gearbeitet sind, noch mit einem gleichmäßigen Schabemuster versehen. Es braucht wohl nicht betont zu werden, daß durch diese Verzierung keine Erhöhung der Ge-

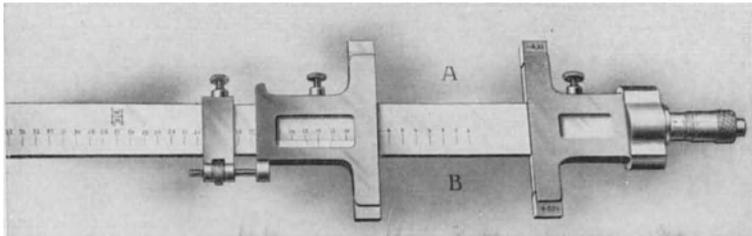


Abb. 166. Schieblehre als einstellbare Rachenlehre.

naugigkeit bewirkt, sondern die vorher vorhandene nur herabgesetzt werden kann. Vom Standpunkt der Genauigkeit ist die Anbringung solcher Muster auf den Meßflächen grober Unfug (6). Das gilt nicht nur für Schieblehren, sondern überhaupt für alle Meßgeräte.

### 3. Dickenmesser.

Die Schieblehren leiden an dem grundsätzlichen Fehler, daß bei ihnen Prüfling und Maßstab nicht in derselben Achse liegen, das Abbesche Prinzip also nicht befolgt ist und somit Kippungsfehler erster Ordnung auftreten. Dies ist bei den sogenannten Dickenmessern vermieden, von denen Abb. 167 eine neuere Ausführungsform wiedergibt.

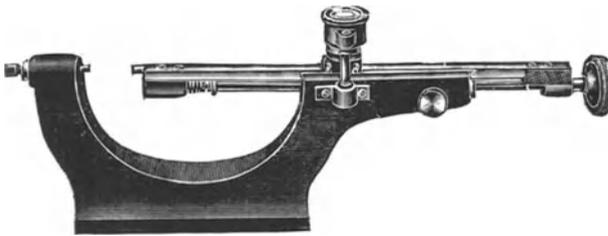


Abb. 167. Dickenmesser.

Ein kräftiger Bügel trägt einen in  $\frac{1}{5}$  mm geteilten, saubergeführten Maßstab, so daß mittels  $\frac{1}{20}$ -Nonius (mit Hilfe einer Lupe)  $\frac{1}{100}$  mm abgelesen werden können. Die Grobeinstellung erfolgt von Hand, die Feineinstellung mittels Mikrometerschraube. Der linke Anschlag ist auf genaue Nullstellung justierbar. Zuweilen lagert man ihn auch verschiebbar und läßt ihn auf einen Fühlhebel als Druckanzeiger einwirken. Der Meßbereich beträgt im allgemeinen 100 (bis 150) mm. Für größere Längen macht man die Träger von Amboß und Maßstab auf dem Bett verschieb- und festklemmbar und stellt dann auf den kleinsten Meßbereich mittels entsprechend abgestufter Endmaße ein.

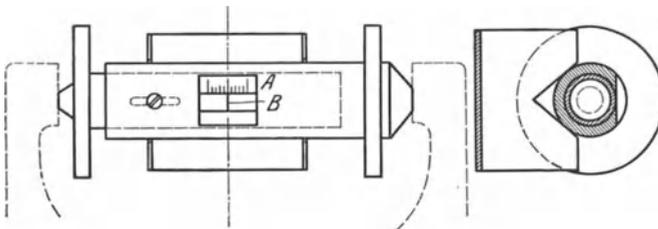


Abb. 168. Bohrungsmesser.

das in Abb. 168 wiedergegebene Gerät dienen. Es besteht aus zwei teleskopartig ineinandergeführten, in einer V-Nut gelagerten Stücken, die durch Federn oder Gewichte mit gleichmäßigem Druck an den Prüfling angelegt werden. Ihre gegenseitige Verschiebung wird mittels Index *B* (oder Nonius) an der Teilung *A* abgelesen. Für größere Genauigkeit mißt man die Lage von *B* gegen den nächsten Teilstrich von *A* mikroskopisch.

Zum Messen der Tiefe von Bohrungen und ähnlichem bedient man sich des Tiefenmaßes (Abb. 169). Es besteht aus einem Anschlag mit ebener Anlegefläche, in dem der Maßstab gleiten kann; um gleichzeitig die Parallelität des Bodens zur Stirnfläche zu prüfen, wird es in dem Anschlag in wagerechter Richtung verschiebbar angeordnet (Abb. 170). Bei den Tiefenmaßen ist auch das Abbesche Prinzip gewahrt. Die Kontrolle des Nullpunktes erfolgt durch Aufsetzen auf ein gut ebenes Stück (z. B. ein Endmaß).

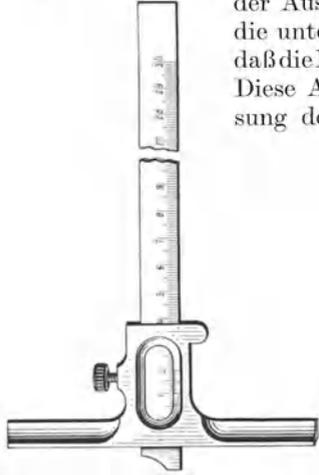


Abb. 169. Tiefenmaß.

Bei der Ausführung nach Abb. 171 läßt sich die untere einstellbare Spitze so justieren, daß die Nullpunktkorrektur verschwindet. Diese Ausführung ist besonders zur Messung der Tiefe von Hinterdrehungen geeignet.

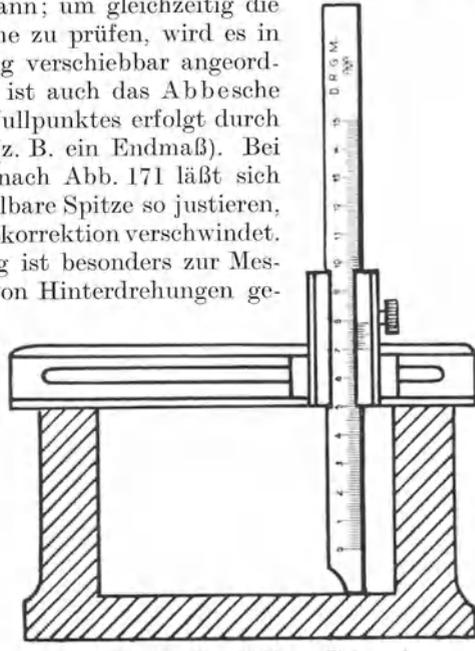


Abb. 170. Verschiebbares Tiefenmaß.

eignet; sie kann nämlich außer in der Senkrechstellung auch in 2 Schräglagen benutzt werden, wobei die 3 Stellungen durch Rasten begrenzt sind und durch Klemmhebel gegen Verstellen gesichert werden. In jeder Stellung ist nur die zugehörige Teilung mit Nonius sichtbar, die wiederum unmittelbar die Tiefe in Richtung der Achse gibt.

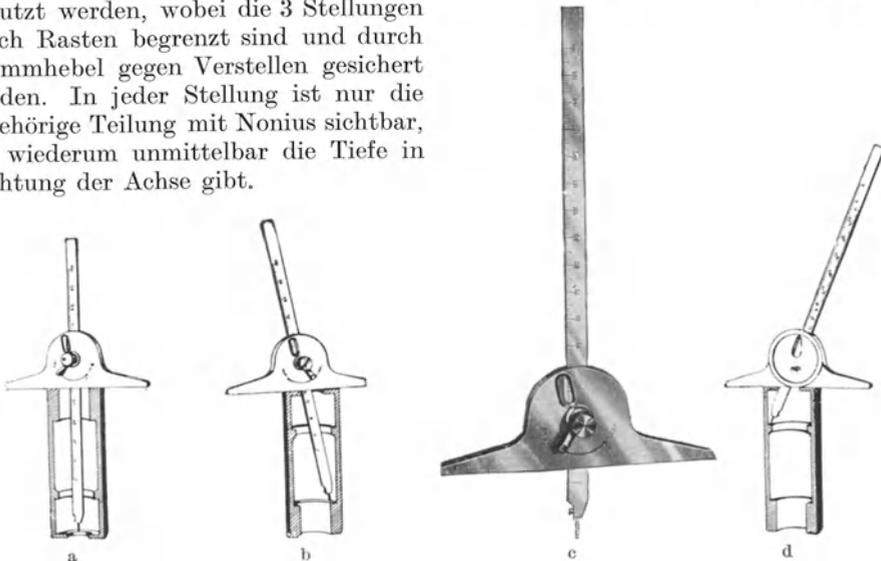


Abb. 171. Tiefenmaß für Hinterdrehungen.

Häufig findet man auch die Schieblehren mit einem (evtl. an- und abstellbaren) Tiefenmaß kombiniert, wie Abb. 172 zeigt.

Als eine Abart der Tiefenmaße kann man auch die Fühlstiftlehren ansehen, die auch häufig zur Prüfung von Höhenunterschieden gebraucht werden. Zur Kontrolle von Bohrtiefen bestehen sie etwa aus einem auf die obere Stirnfläche gesetzten Anschlag *A* (Abb. 173) mit 2 Marken oder 2 Absätzen *a* und *b*, zwischen

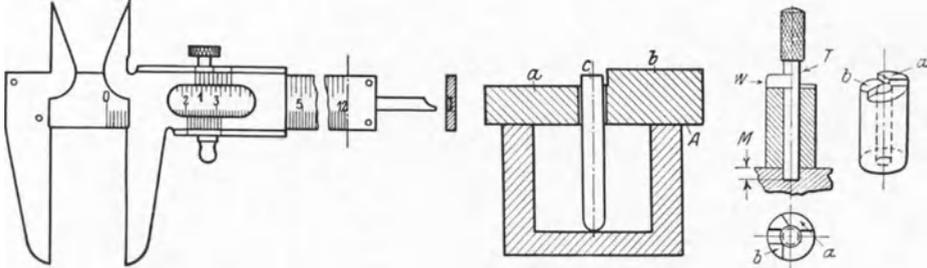


Abb. 172. Tiefenmaß an der Schiebellehre.

Abb. 173. Fühlstiftlehre.

Abb. 174. Fühlstiftlehre.

denen der auf dem Grunde der Bohrung aufliegende, in dem Anschlag leicht geführte Meßbolzen mit seinem oberen Ende *c* bleiben muß, falls die Tiefe inner halb der Toleranz liegt.

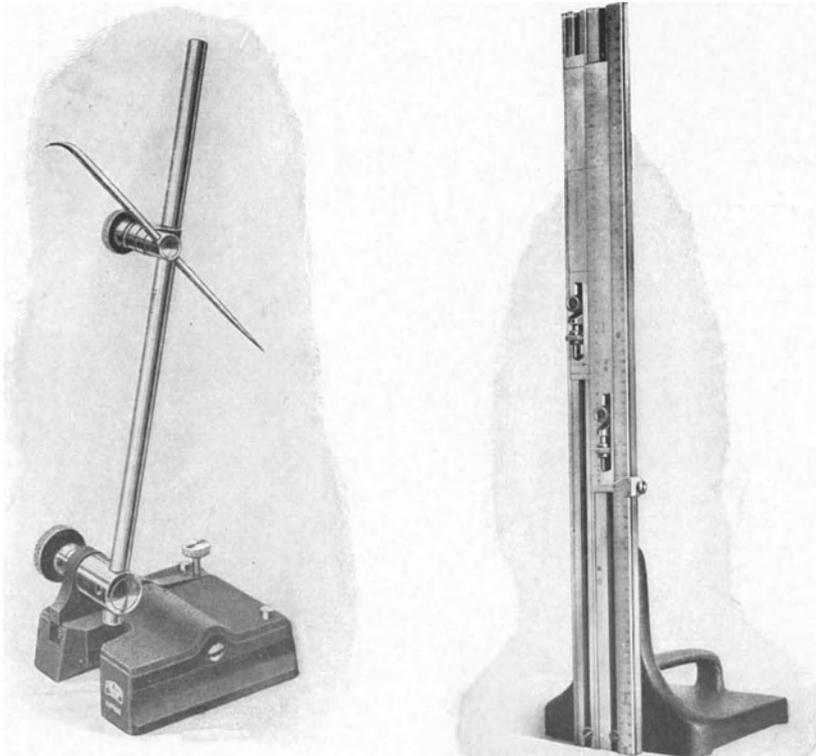


Abb. 175. Höhenreißer.

Abb. 176. Maßstab zum Einstellen des Höhenreißers

Eine bequemere Kontrolle — unter Vermeidung der Ableseschwierigkeiten — ergibt sich noch durch Benutzung der Fühlstiftlehren mit Flügelanschlag (1). Zum Lehren der Lochtiefe *M* z. B. (Abb. 174) wird der Meßbolzen *T* durch den

gekordelten Handgriff gedreht. Das Werkstück ist innerhalb der Toleranz, wenn der Flügel *W* über die Stufe *b* hinweggleitet, aber an die Stufe *a* anschlägt.

### 5. Höhenreißer.

Die gebräuchlichen Höhenreißer (Abb. 175) gehören streng genommen nicht zu den Meßgeräten, da sie nur zur Übertragung des von einem Maßstabe abgenommenen Maßes auf das Werkstück dienen. Zur genauen Einstellung auf den Maßstabstrich gibt man dem Höhenreißer eine Feinverstellung, indem man ihn mittels einer an einen Hebel angreifenden Schraube kippt. Der Maßstab wird mittels eines geeigneten schweren und auf der Unterfläche sauber bearbeiteten Fußes genau senkrecht gestellt (Abb. 176) und auch wohl mit Feineinstellung versehen.

Der Höhenreißer wird zu einem eigentlichen Meßgerät, wenn man seine Führungsstange selbst als Maßstab ausbildet (Abb. 177). Auch bei Ausrüstung mit Nonius wird man seine Genauigkeit günstigstenfalls zu  $\frac{1}{10}$  mm ansetzen können, da die Anreißspitzen keine genauere Übertragung ermöglichen. Damit diese aber überhaupt erreicht wird, muß die Nadel eine geeignete, genügend lange Führung haben und unverdrehbar darin gelagert sein. Sie wird dazu am besten vierkantig ausgeführt und stichelartig so geschliffen, daß ihre untere Fläche wagerecht liegt. Damit der Nullpunkt der Teilung der Auflageplatte bzw. der Unterseite des Fußes entspricht (die zweckmäßig aus einem gehärteten Stahlring besteht), wird die Nadel entsprechend gekröpft. Zweckmäßig ist noch ein in einer Nut des Höhenreißers verschieb- und festklemmbarer Maßstab (2). Man legt dann die Nadel auf ein Endmaß und stellt den Maßstab auf dessen Wert ein. Diese Ausführung ermöglicht auch die Vermeidung jeder Rechnung, wenn, wie es häufig der Fall ist, die Aufstellplatte nicht als Nullpunkt gilt (eine ähnliche Einrichtung ist auch bei Schieblehren vorgeschlagen). Aus demselben Grunde empfiehlt sich auch die Anbringung von zwei entgegengesetzt laufenden Teilungen am Maßstabe. Für Höhen über 400 mm ersetzt man ihn besser durch ein endloses Meßband, das durch eine Feder gespannt und durch eine Rolle im Fuß verschoben wird.



Abb. 177. Höhenreißer mit Maßstab.

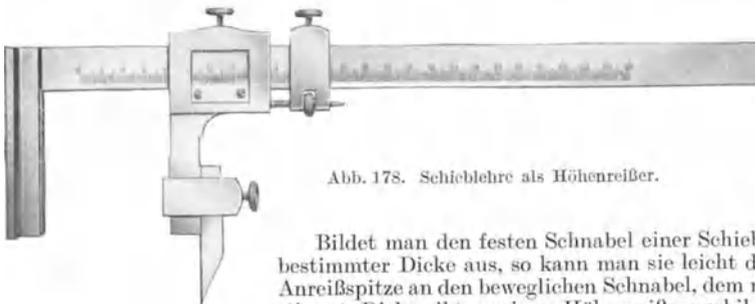


Abb. 178. Schieblehre als Höhenreißer.

Bildet man den festen Schnabel einer Schieblehre zugleich als Fuß bestimmter Dicke aus, so kann man sie leicht durch Ankleben einer Anreißspitze an den beweglichen Schnabel, dem man gleichfalls eine bestimmte Dicke gibt, zu einem Höhenreißer ausbilden, wie Abb. 178 zeigt<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Anreißschieber für Sonderzwecke siehe z. B. (1).

## 6. Keillehren.

Eine größere Ablesegenauigkeit als an einem gewöhnlichen Strichmaßstab erhält man auch bei den Keillehren, die zur Messung des Durchmessers von Drähten und Bohrungen benutzt werden; dieser wird an einer auf dem einen Winkelschenkel angebrachten Teilung abgelesen (Abb. 179), wobei in der Regel ein Intervall  $\frac{1}{10}$  mm des Durchmessers entspricht, so daß die  $\frac{1}{100}$  mm noch bequem durch Schätzung ermittelt werden können. Der dazu nötige Öffnungswinkel  $\varphi$  berechnet sich aus

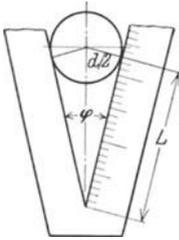


Abb. 179. Keillehre zur Bestimmung von Drahtdurchmessern.

$$\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} = \frac{1}{20},$$

$$[\varphi = 5^{\circ} 43' 32'' \sim 5^{\circ} \frac{3}{4}']$$

Die Ablesung wird um so ungenauer, je größer der Durchmesser  $d$  ist, da dann der Berührungspunkt mit dem Schenkel um so schlechter zu erkennen ist; deshalb sollte man nicht über 5 oder höchstens 10 mm hinausgehen.

Die Messung wird um so genauer, je kleiner der Winkel  $\varphi$  gehalten wird. Um die dabei aber auftretenden großen Längen zu vermeiden, verwendet man die in Abb. 180 wiedergegebene Konstruktion (4), die man als eine Kombination von Keil- und Schieblehre ansehen kann (siehe auch Abb. 165). Die Abschrägung des festen Schenkels kann man dabei leicht so ausführen, daß  $b = a + \frac{1}{10}$  oder auch  $b = a + \frac{1}{100}$  ist. Im letzteren Falle könnte man also an der Teilung sogar  $\frac{1}{1000}$  mm schätzen. Diese Genauigkeit ist aber nicht zu erreichen, da sich die Einstellung auf der Schiene, wie früher erwähnt, nur auf einige  $\frac{1}{100}$  mm ausführen läßt, wozu noch der beträchtliche Einfluß des Meßdruckes kommt.

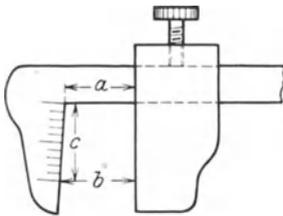


Abb. 180. Verstellbare Keillehre.

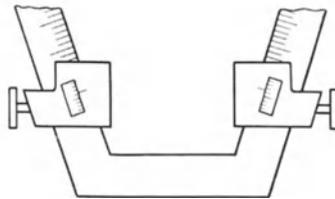


Abb. 181. Keillehre als einstellbare Rachenlehre.

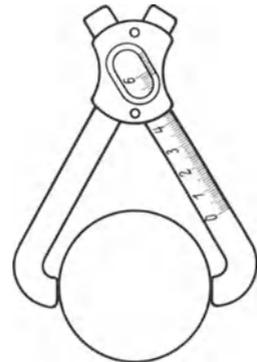


Abb. 182. Keillehre als einstellbare Rachenlehre.

Das Prinzip der Keillehre hat man auch auf einstellbare Rachenlehren nach Abb. 181 und 182 zu übertragen gesucht, wobei auch wohl die eine Meßfläche um die Toleranz abgesetzt wird, um so eine Grenzlehre zu erhalten (1, 41). Auch diese dürften — ganz abgesehen von der mangelnden Steifigkeit des Bügels — höchstens für untergeordnete Zwecke in Frage kommen.

Zum Messen von Bohrungen nimmt man schwach konische Nadeln (Abb. 183), wobei man die auf ihrem zylindrischen Teil gleitende Hülse bis an die Stirn-



Abb. 183. Bohrungsnadel.

fläche der Bohrung anschiebt (2) und dann auf der Teilung den Lochdurchmesser abliest. Bei einer völlig scharfkantigen Bohrung würde sich die Mantellinie der Nadel im Punkte  $B$  anlegen (Abb. 184). Ist nun aber die Kante nach dem

Halbmesser  $r$  abgerundet, so geschieht die Anlage im Punkte  $E$ . und die Ablesung erfolgt so, als wenn die Bohrung auf jeder Seite um das Stück  $BH$  größer wäre. Somit ist der begangene Fehler

$$\begin{aligned}
 f &= 2 \cdot BH = 2 \cdot (CE + DH) \\
 &= 2 \cdot \left[ r \cdot \left( 1 - \cos \frac{\alpha}{2} \right) + r \cdot \left( 1 - \sin \frac{\alpha}{2} \right) \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right] \\
 &= 2 \cdot r \cdot \left( 1 - \frac{1 - \sin \frac{\alpha}{2}}{\cos \frac{\alpha}{2}} \right).
 \end{aligned}$$

Wird die Verjüngung der Nadel so ausgeführt, daß einer Verschiebung um 1 mm eine Änderung des Durchmessers um  $\frac{2}{100}$  mm entspricht, so ist

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{100},$$

mit genügender Annäherung  $\frac{\alpha}{2} = 10^{-2}$  ( $\sim 69'$ )

und  $f = d \cdot 10^{-2}$  mm.

Für  $r = \frac{1}{10}$  mm wird also  $f = 2 \mu$ .

Nimmt man den Einfluß des Meßdrucks gleichfalls zu  $\frac{1}{10}$  mm an, so bewirkt dieser einen weiteren Fehler von  $2 \mu$ . Rechnet man dazu noch die Abweichung

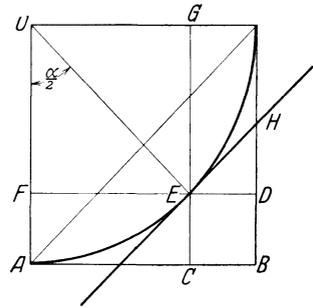


Abb. 184. Meßfehler bei der Bohrungslehre.

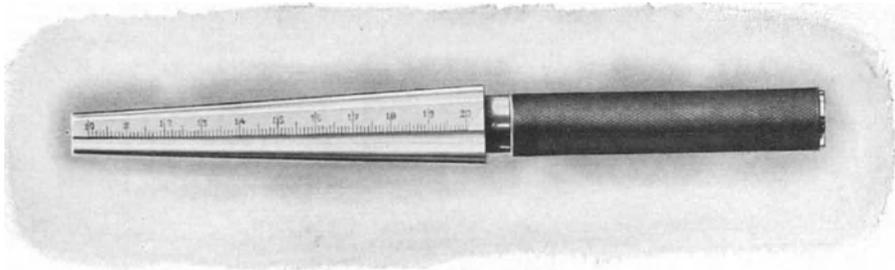


Abb. 185. Bohrungslehre.

in der Verjüngung des Kegels, so wird man eine Meßgenauigkeit von 5 bis  $10 \mu$  annehmen können. Ebenso weit kommt man, wenn man das Gerät mittels Boh-

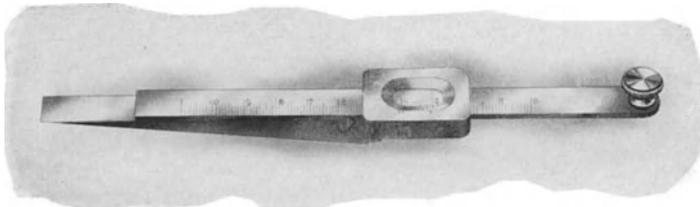


Abb. 186. Lehre zur Ermittlung von Rißbreiten.

rungen eicht, deren Durchmesser auf andere Weise mit möglicher Genauigkeit bestimmt ist.

Andere Ausführungsformen<sup>1</sup> zeigen die Abb. 185 und 186, von denen die letztere zur Ermittlung der Breite von Rissen bestimmt ist.

<sup>1</sup> Siehe auch Abb. 226.

Eine besondere Anwendung finden die Keillehren noch zum Aussuchen von Stahlkugeln (bis  $\frac{1}{2}$ '' Durchmesser). Man läßt sie dazu in einer schwach geneigten Rinne laufen, die von zwei Stahllinealen gebildet wird, deren scharfe Kanten einen kleinen Winkel miteinander bilden, und die mit Hilfe von Normalkugeln eingestellt werden. Die Kugeln fallen an den ihrem Durchmesser entsprechenden Stellen hindurch und werden so selbsttätig in Behälter nach ihrem Durchmesser sortiert. Voraussetzung ist dabei, daß die Linealkanten hinreichend gerade sind.



Abb. 187. Meßrad.

### 7. Meßräder.

Die Meßräder (Abb. 187) dienen zur Ermittlung von Strecken, namentlich von Kurvenlängen. Sie bestehen aus einer in einer Gabel sorgfältig gelagerten, geteilten Scheibe mit scharfkantigem Rand. Für einen Umfang von 250 mm muß ihr Durchmesser  $d = 79,5775$  mm und ihr Halbmesser  $r = 39,7888$  mm sein. Die Länge  $s$  der überfahrenen Strecke folgt aus  $s = r \cdot \varphi$ , wenn  $\varphi$  der Drehwinkel ist.

Bezeichnen  $f_1$  und  $f_2$  die Fehler von  $r$  und  $\varphi$ , so ist der bei der Messung auftretende Fehler  $\sigma$  von  $s$

$$\sigma = \varphi \cdot f_1 + r \cdot f_2$$

oder

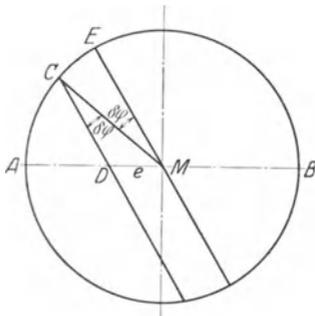
$$\frac{\sigma}{s} = \frac{f_1}{r} + \frac{f_2}{\varphi}$$

Der Fehler  $f_1$  von  $r$  allein bewirkt einen Meßfehler  $F_1 = f_1 \cdot \varphi$ . Innerhalb eines Umlaufes erreicht er seinen größten Wert für eine volle Umdrehung und wird dann  $F_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_1$ . Setzt man  $f_1 = \frac{1}{20}$  mm, so wird  $F_1 \sim 0,3$  mm. Damit  $F_1 \frac{1}{20}$  mm nicht überschreitet, müßte also  $r$  auf weniger als  $\frac{1}{100}$  mm innegehalten werden, was schon eine sehr sorgfältige Lagerung (Lagerluft kleiner als  $\frac{1}{100}$  mm) voraussetzt. Dieser Fehler schreitet mit der Zahl der Umdrehungen fort und ist für kürzere Strecken entsprechend kleiner.

Der Fehler der Teilung läßt sich leicht unter  $\frac{1}{20}$  mm halten, was unter den angenommenen Verhältnissen einem Winkelfehler  $f_2$  von

$$\frac{1}{20 \cdot 40} = 0,00125 \text{ oder rund } 4\frac{1}{3}' \text{ entspricht. Zu diesem kommt}$$

aber noch der Exzentrizitätsfehler hinzu, der dadurch auftritt, daß der geometrische Mittelpunkt  $M$  nicht mit dem Drehpunkt  $D$  zusammenfällt, sondern beide um  $e$  auf dem Durchmesser  $AB$  (Abb. 188) voneinander entfernt liegen. Dreht man um den Winkel  $ADC$ , so hätte sich ein parallel zu  $DC$  angenommener durch  $M$  gehender Schenkel um den Winkel  $AME = \varphi$  gedreht. Es tritt also ein Fehler der Größe  $CME = d\varphi$  auf. Aus dem Dreieck  $MCD$  folgt



$$\frac{DM}{MC} = \frac{\sin DCM}{\sin CDM}$$

und somit

$$d\varphi = \frac{e}{R} \cdot \sin \varphi$$

Er erreicht seinen Größtwert für

$$\varphi = 90^\circ \text{ mit } d\varphi = \frac{e}{R}$$

gleichfalls kleiner als  $4\frac{1}{3}'$  bleibt,

muß  $e < 0,00125 \cdot 40$  oder  $e < \frac{1}{20}$  mm sein. Insgesamt muß man also mit Fehlern von  $0,3 + 0,05 + 0,05 = 0,4$  mm für eine ganze Umdrehung rechnen. Dabei ist aber noch vorausgesetzt, daß kein Gleiten, sondern stets nur ein Abrollen erfolgt, und daß die Scheibenebene jederzeit senkrecht zur Zeichnungsebene und tangential zu der Kurve gehalten wird, da man sonst nur die in ihre Richtung fallende Komponente mißt, so daß man bei den angenommenen Verhältnissen kaum auf eine größere Genauigkeit als  $\frac{1}{2}$  mm rechnen kann.

Abb. 188. Einfluß der Exzentrizität.

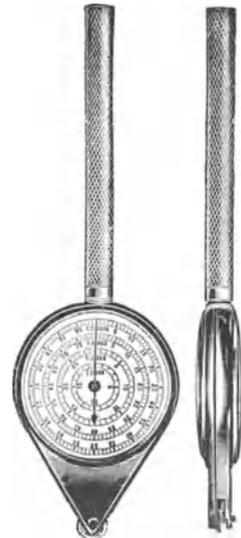


Abb. 189. Kurvimeter.

Ihre Hauptanwendung hat die Meßscheibe bei den Planimetern zur Bestimmung des Flächeninhaltes von Figuren gefunden (bei denen aber stets nur die in die Scheibenebene fallende Komponente gemessen werden soll). Sie wird hier noch mit einem Zählwerk zur Bestimmung der ganzen Umdrehungen gekuppelt, wie dies auch bei dem Kurvimeter (Abb. 189) geschehen ist.

## B. Fühlhebel.

### 1. Einfache Fühlhebel.

Während man mittels Nonius aus physiologischen und auch aus herstellungstechnischen Gründen die Genauigkeit nicht beliebig weit steigern kann, scheint ihr bei Hebelübersetzung keine Grenze gesetzt zu sein, wenn man nur das Verhältnis der beiden Hebelarme (die Übersetzung) genügend groß wählt. Doch scheitert dies auch hier, wie später gezeigt werden wird, an den unvermeidlichen Mängeln der Herstellung.

Der älteste Fühlhebel ist wohl das Zehntelmaß (Abb. 190), das um etwa 1830, und zwar zuerst in Frankreich, aufgekommen ist (4), während doppelte Hebelübersetzungen seit 1850 nachzuweisen sind. Jenes Gerät bezeichnete nach Hartmann (1838) erst den Anfang einer vollkommenen Drehkunst, ist aber nach seiner Meinung nur dort am Platze, wo, wie bei mathematischen und astronomischen Instrumenten, sehr genaue Zapfen erforderlich sind (1). Man ersieht hieraus, wie bescheiden noch vor nicht ganz einem Jahrhundert die Anforderungen an die Meßgenauigkeit waren.

Das Zehntelmaß besteht aus zwei scherenartig miteinander verbundenen Hebeln, wobei der Prüfling zwischen die schneiden- oder punktförmig ausgebildeten Enden des kurzen Hebels der Länge  $l$  gebracht wird, während man seine Dicke durch den Ausschlag des einen langen Schenkels ( $10 \cdot l$ ) auf der von dem anderen getragenen Skala abliest<sup>1</sup>. Bei einer Übersetzung von 1:10, wobei 1 mm-Intervall  $\frac{1}{10}$  mm Dicke entspricht (und woher der Name Zehntelmaß rührt), wird man die  $\frac{1}{100}$  mm schätzen können.

Nun erfolgt aber die Bewegung der Hebelenden nicht auf einer Geraden, sondern auf einem Kreisbogen. Somit tritt nach Abb. 191 ein Meßfehler vom Betrage

$$\delta l = \widehat{a} - d = 2 \cdot l \cdot \left( \frac{\varphi}{2} - \sin \frac{\varphi}{2} \right)$$

auf. Um ein handliches Gerät zu erhalten, wird man die Länge des großen Hebelarms zu etwa 100 mm nehmen, dann ist  $l = 10$  mm. Damit  $\delta l < 0,01$  mm bleibt, muß demnach

$$\frac{\varphi}{2} - \sin \frac{\varphi}{2} < 0,0005$$

sein, was für Winkel  $\varphi$  bis  $16^\circ$  erfüllt ist. Damit beträgt die größte zu messende Strecke, falls der Fehler durch die Kreisbewegung  $\frac{1}{100}$  mm nicht überschreiten soll,

$$d = 2 \cdot l \cdot \sin \frac{16}{2} = 2,78 \text{ mm.}$$

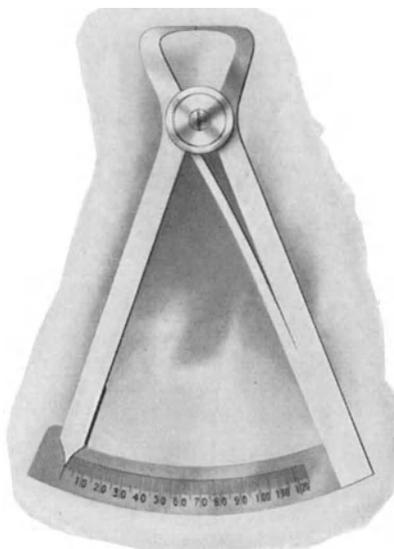


Abb. 190. Zehntelmaß.

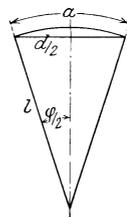


Abb. 191. Meßfehler beim Zehntelmaß.

<sup>1</sup> Dieses Prinzip ist auch bei manchen Tastern verwendet; siehe S. 159.

Begnügt man sich dagegen mit einer Genauigkeit von  $\frac{1}{10}$  mm, so darf der Winkel  $\varphi$  bis  $36^\circ$  betragen, wodurch sich die größte Meßstrecke auf 6,2 mm erhöht.

Zuweilen setzt man den Fühlhebel auch in einen rachenlehnenähnlichen, verstellbaren Bügel (5, 6), um die Verschiebung eines Meßstiftes damit vergrößert anzuzeigen, eine Ausführung, die aber nur für gröbere Messungen in Frage kommt.

Um denselben Fühlhebel für verschiedene Empfindlichkeiten und Meßbereiche benutzen zu können, ist vorgeschlagen, den Meßbolzen durch Mikrometerschraube, Exzenter oder ähnliches senkrecht zu seiner Achse zu verschieben und dadurch die Länge des kurzen Hebelarms zu ändern (2). Ferner ist vorgeschlagen (3), um am Nullpunkt eine größere Empfindlichkeit zu haben, den Drehpunkt exzentrisch zu lagern.

## 2. Mehrfache Fühlhebel.

Um größere Übersetzungen zu erhalten, muß man entweder den großen Hebelarm verlängern oder den kurzen verringern. Läßt man für ersteren etwa 100 mm zu, so dürfte der kurze Hebelarm bei der Übersetzung 1:100 nur eine Länge von 1 mm, bei 1:1000 sogar nur von  $\frac{1}{10}$  mm haben. Bei den früher allein üblichen Zapfenlagerungen waren indessen so kurze Hebelarme praktisch nicht auszuführen. Aber auch der Verlängerung des großen Hebelarmes war aus Festigkeitsgründen bald eine Grenze gesetzt. Man suchte sich deshalb durch Hintereinanderschaltung mehrerer Hebel zu helfen; so hat schon Fraunhofer um 1810 einen Doppelfühlhebel verwendet.

Es muß nun zunächst untersucht werden, ob die mehrfachen Fühlhebel den einfachen gegenüber Vorteile bieten. Man denke sich dazu an jedem Hebel eine Hilfsskala angebracht. Der erste Hebel der Übersetzung  $n_1$  habe einen Übersetzungsfehler  $z_1$  (an seiner Skala abgelesen); durch die folgenden Hebel mit den Übersetzungen  $n_2, n_3 \dots$  (und den Übersetzungsfehlern  $z_2, z_3 \dots$ ) wird zwar der Fehler des ersten Hebels (an der Endskala abgelesen) im Verhältnis  $n_2 \cdot n_3 \dots$  vergrößert, wird also  $z_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \dots$ ; in das Meßergebnis geht er aber nur mit dem Betrage

$$\frac{z_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \dots}{n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \dots} = \frac{z_1}{n_1}$$

ein. Entsprechend wird der Fehler des 2. Hebels

$$\frac{z_2 \cdot n_3 \cdot n_4 \dots}{n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \dots} = \frac{z_2}{n_1 \cdot n_2},$$

der des dritten Hebels  $\frac{z_3}{n_1 \cdot n_2 \cdot n_3}$  usf.

Dabei ist vorausgesetzt, daß die Bewegungen der Hebelenden so klein sind, daß keine in Betracht kommende Verschiebung ihrer einzelnen Angriffspunkte erfolgt, bzw. daß die dadurch etwa eintretende Änderung des Übersetzungsverhältnisses in der Ausführung der Skala berücksichtigt ist. Zu den Übersetzungsfehlern kommt nun noch der Ablesefehler  $y$

an der Endskala (in Skt.) hinzu, der in das Meßergebnis mit dem Betrage  $\frac{y}{n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \dots}$  eingeht. Somit ist der Gesamtfehler bei  $i$  Hebeln

$$f_i = \frac{z_1}{n_1} + \frac{z_2}{n_1 \cdot n_2} + \frac{z_3}{n_1 \cdot n_2 \cdot n_3} + \dots + \frac{z_i}{n_1 \cdot n_2 \dots n_i} + \frac{y}{n_1 \cdot n_2 \dots n_i}, \quad (1)$$

während für einen einzigen Hebel gilt

$$f_1 = \frac{z_1}{n_1} + \frac{y}{n_1}.$$

Je nach dem Verhältnis der Werte von  $z$  und  $y$  kann  $f_i$  größer oder kleiner als  $f_1$  werden. Um die Verhältnisse besser übersehen zu können, sei angenommen, daß alle Hebel die gleiche Übersetzung  $n$  und denselben Übersetzungsfehler  $z$  haben. Dann wird

$$f_i = z \cdot \frac{1 - \left(\frac{1}{n}\right)^i}{n - 1} + \frac{y}{n^i}.$$

Für Übersetzungen von etwa  $n = 10$  an kann man schreiben

$$f_i = \frac{z}{n - 1} + \frac{y}{n^i} \sim \frac{z}{n} + \frac{y}{n^i}.$$

Der  $n$ -fache Hebel bewirkt also vor allem, daß der Ablesefehler im Verhältnis  $n^{i-1}$  verkleinert wird. Er hat somit nur Zweck, wenn der Ablesefehler  $y$  (in Skt.) gegenüber dem Übersetzungsfehler  $z$  noch in Betracht kommt, was bei einfachen langen Hebeln in der Regel der Fall sein wird, da man jenen bei guter Lagerung leicht weit unter dem Ablesefehler von  $\frac{1}{10}$  Skt. halten kann. Die gewünschte Verringerung der Ablesefehler wird nun stets schon durch einen Doppelhebel ( $i = 2$ ) erreicht, weshalb man praktisch auch in der Regel nicht darüber hinausgeht.

Für zwei Fühlhebel gleicher Übersetzung wird

$$f_2 = \frac{z}{n} \cdot \left(1 + \frac{1}{n}\right) + \frac{y}{n^2}$$

während man bei einem einfachen Hebel der gleichen Gesamtübersetzung  $n^2$  und mit dem Übersetzungsfehler  $z'$  einen Fehler

$$f' = \frac{z' + y}{n^2}$$

hätte. Beide Anordnungen ergeben denselben Fehler  $f_2 = f'$ , wenn

$$z' = z \cdot (n + 1)$$

ist. Nun steigt der Übersetzungsfehler im allgemeinen höchstens proportional der Übersetzung  $n$  (und nicht proportional  $n + 1$ ) an, es ist also  $f'$  stets kleiner als  $f_2$ . Somit ist ein einfacher Hebel einem Doppelhebel gleicher Gesamtübersetzung stets überlegen, so daß dessen Verwendung nur dort gerechtfertigt ist, wo räumliche Gründe die Benutzung längerer Hebelarme verbieten oder der kleine Hebelarm aus herstellungstechnischen Gründen nicht genügend verkürzt werden kann (1). Nur wenn es möglich ist,  $z < \frac{z'}{n+1}$  zu halten, wenn also der Übersetzungsfehler stärker als proportional  $n$  anwachsen würde, ist der Doppelhebel dem einfachen gleicher Gesamtübersetzung überlegen.

Weiterhin sei die Kombination von Hebeln ungleicher Übersetzung, und zwar unter Beschränkung auf den praktisch allein wichtigen Fall von zwei Hebeln betrachtet. Nach Gleichung (1) ist dann

$$f_2 = \frac{z_1}{n_1} + \frac{z_2}{n_1 \cdot n_2} + \frac{y}{n_1 \cdot n_2}. \quad (2)$$

Es sei angenommen:  $n_2 > n_1$  und  $z_2 = \frac{n_2}{n_1} \cdot z_1$ . Bei Voranschaltung der kleineren Übersetzung  $n_1$  wird

$$\begin{aligned} f'_2 &= \frac{z_1}{n_1} + \frac{z_2}{n_1 \cdot n_2} + \frac{y}{n_1 \cdot n_2} \\ &= \frac{z_1}{n_1} \cdot \left(1 + \frac{1}{n_1}\right) + \frac{y}{n_1 \cdot n_2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Nimmt man aber den Hebel größerer Übersetzung nach vorn, so wird

$$\begin{aligned} f''_2 &= \frac{z_2}{n_2} + \frac{z_1}{n_1 \cdot n_2} + \frac{y}{n_1 \cdot n_2} \\ &= \frac{z_1}{n_1} + \frac{z_1}{n_1 \cdot n_2} + \frac{y}{n_1 \cdot n_2} \\ &= \frac{z_1}{n_1} \cdot \left(1 + \frac{1}{n_2}\right) + \frac{y}{n_1 \cdot n_2}, \end{aligned} \quad (4)$$

es ist also stets  $f''_2 < f'_2$ . Unter den angenommenen Bedingungen sollte man also stets den Hebel größerer Übersetzung als vorderen verwenden, was aber in der Regel praktisch nicht ausführbar ist, da dies eine entsprechend kräftige Ausführung des langen Armes des Hebels der Übersetzung  $n_2$  voraussetzt, damit an ihm keine Verbiegungen auftreten. Da der Gewinn von  $n_1 = 10$  ab aber stets weniger als 10% ausmacht, so kann man auch ruhig den Hebel kleiner Übersetzung als ersten nehmen.

Bei einem einzigen Hebel der Übersetzung  $n_1 \cdot n_2$  und einem dementsprechenden Übersetzungsfehler  $z = n_2 \cdot z_1$  würde sein

$$f_1 = \frac{n_2 \cdot z_1}{n_1 \cdot n_2} + \frac{y}{n_1 \cdot n_2} = \frac{z_1}{n_1} + \frac{y}{n_1 \cdot n_2}. \quad (5)$$

Durch Vergleich mit (3) folgt, daß auch in diesem Falle ein einzelner Hebel vorteilhafter ist als ein Doppelhebel gleicher Gesamtübersetzung ( $n_1 \cdot n_2$ ), wenn auch der Unterschied mit

wachsender Übersetzung  $n$  immer geringer wird. Hier ergäbe sich gleichfalls nur ein Vorteil, wenn die Übersetzungsfehler schneller als die Übersetzung ansteigen würden.

Vergleicht man noch die Kombination nach Gleichung (3) mit einem einzigen Hebel der Übersetzung  $n_2$ , so würden die Fehler

$$f_2 = \frac{z_1}{n_1} \cdot \left(1 + \frac{1}{n_1}\right) + \frac{y}{n_1 \cdot n_2} \quad (6)$$

$$f_1 = \frac{z_2}{n_2} + \frac{y}{n_2} = \frac{z_1}{n_1} + \frac{y}{n_2}. \quad (7)$$

Es wird  $f_2 < f_1$ , falls

$$\frac{z_1}{n_1^2} + \frac{y}{n_1 \cdot n_2} < \frac{y}{n_2}$$

oder

$$z_1 < \frac{y}{n_2} \cdot \left(1 - \frac{1}{n_1}\right) \cdot n_1^2$$

ist. Bei

$$n_1 = 10 \text{ und } n_2 = 100 \quad 1000$$

muß also

$$z_1 < 0,9 \cdot y \quad 0,09 \cdot y$$

und mit  $y = 0,1$  Skt.

$$z_1 < 0,09 \quad 0,009 \text{ Skt.}$$

sein. Unter diesen Voraussetzungen gibt also die Vorschaltung eines Hebels der (kleineren) Übersetzung  $n_1$  nicht nur einen größeren Ausschlag, sondern auch eine Erhöhung der Genauigkeit.

Schließlich sei noch der Fall der Kombination eines Hebels der Übersetzung  $n_1 = 1$  mit einem solchen der Übersetzung  $n_2$  betrachtet. Dann ist nach Gleichung (2) für die Kombination

$$f_2 = z_1 + \frac{z_2}{n_2} + \frac{y}{n_2},$$

während für den zweiten Fühlhebel allein gelten würde

$$f' = \frac{z_2}{n_2} + \frac{y}{n_2}.$$

In diesem Falle kommt also bei der Kombination noch der Übersetzungsfehler  $z_1$  des vorgeschalteten Hebels hinzu, während, wie selbstverständlich, der Ablesfehler ungeändert bleibt. Um keine zu große Einbuße an Genauigkeit zu erleiden, muß  $z_1$  sehr klein gehalten werden, was durch gute Lagerung und genügend große Länge der beiden gleichen Hebelarme auch zu erreichen ist (2).

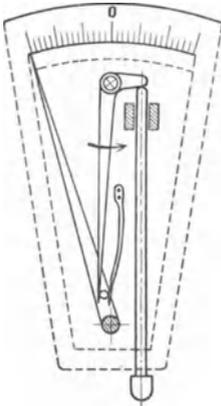


Abb. 192. Doppelfühlhebel.

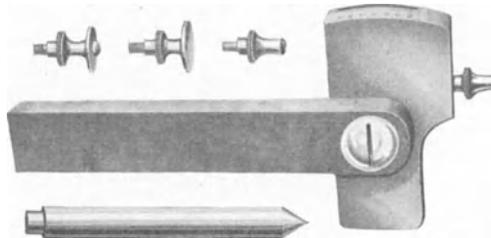


Abb. 193. Doppelfühlhebel (Indikator).

Ein Doppelfühlhebel nach Abb. 192 wurde früher viel im Maschinenbau zur Untersuchung auf Schlag der Spindeln und ähnliches verwendet. Bei der Ausführung nach Abb. 193 läßt sich die Übersetzung auf 1:50 und 1:100 dadurch einstellen, daß man den Meßbolzen in eine der beiden rechts befindlichen Öffnungen steckt und dadurch den kurzen Hebelarm verändert. Die Ausführung nach Abb. 194 dient zur Untersuchung der Bombierung, d. h. der Durchmesser ballig geschliffener Walzen. Er wird dazu mit einem Schuh längs der Walze verschoben, wobei die beiden Schlitten so eingestellt sind, daß bei Anlage des linken Anschlages der Fühlhebel stets innerhalb seines Meßbereiches bleibt.

Auch die Doppelfühlhebel hat man wohl in rachenähnliche Bügel eingebaut. Derartige Geräte, die häufig als Rachenlehren mit Fühlhebel bezeichnet werden, kommen aber nur für gelegentliche Sonderzwecke in Frage.

Ein Präzisionsdoppelfühlhebel wird von der Société Genevoise d'Instruments de Physique gebaut, über dessen Konstruktion nichts Näheres bekannt ist. Seine Genauigkeit wird zu 1% des Meßbereichs angegeben, der bei 40 Skt. 40, 80 oder 200  $\mu$  beträgt, so daß 1 Intervall 1, 2 oder 5  $\mu$  entspricht (3).

Da bei Fühlhebeln mit mehrfacher Übersetzung die Skala entsprechend lang werden würde, ermittelt man mit ihnen nicht mehr die Abmessung des Prüflings selbst, sondern nur ihren Unterschied (an verschiedenen Stellen) gegen ein Vergleichsmaß, beschränkt sich also auf kleine Ausschläge, wodurch auch die im vorhergehenden Abschnitt behandelten Fehler (Messung des Kreisbogens statt der Sehne) in Fortfall kommen.

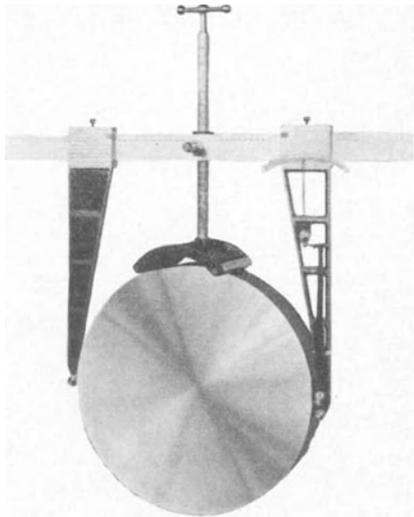


Abb. 194. Fühlhebel zum Messen der Bombierung von Walzen.

### 3. Meßuhren.

Um auch größere Abmessungen unmittelbar und nicht erst durch Vergleich mit einem Normal bestimmen zu können, hat man die Hebel durch Zahnräder-

(segmente) und Ritzel ersetzt und die Skala zifferblattähnlich angeordnet. Bei den älteren Ausführungen dieser Meßuhren (Abb. 195) vollführte der

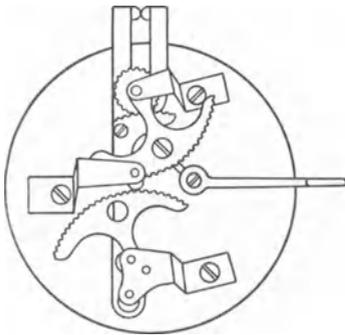


Abb. 195. Meßuhr. ältere Ausführung.

bewegliche Anschlag eine Kreisbewegung; hierbei war man indessen aus den früher angegebenen Gründen auf kleine Abmessungen beschränkt. Deshalb sind die neuen Meßuhren so ausgebildet, daß der bewegliche Anschlag keine Dreh-, sondern nur eine

Längsbewegung vollführt; er ist dazu als Zahnstange gestaltet, an deren herausragendem Ende unter Umständen verschiedene Taststücke angebracht werden können, und überträgt seine Verschiebung durch Trieb- und Zahnradübersetzung auf einen Zeiger (Abb. 196). Da somit der Drehwinkel proportional der Verschiebung des Meß-

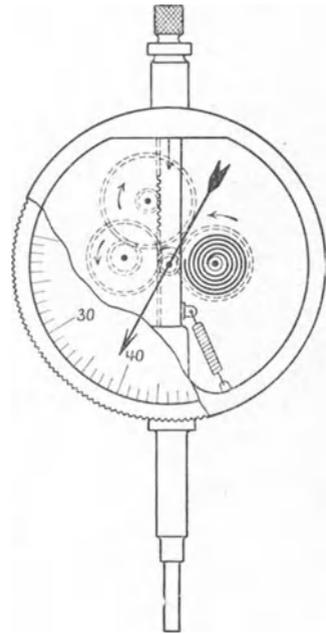


Abb. 196. Meßuhr. neuere Ausführung.

bolzens ist, ergibt die Ablesung auf der Skala (die eventuell mehrfach umlaufen werden kann) das wirkliche Maß. Die Meßuhren besitzen einen Meßbereich von 10 bis 25 mm und gestatten Ablesung auf  $\frac{1}{100}$  mm (bei 2 mm Meßbereich werden sie auch mit 1  $\mu$  Ablesung gebaut).

Der tote Gang (die Zahnluft) wird durch eine kleine Spiralfeder aufgehoben, die auch die Rückbewegung des Meßbolzens bewirken kann; meist ist indessen hierfür eine besondere stärkere (Wurm-)Feder vorgesehen, die zugleich den (angenähert) konstanten Meßdruck liefert. Die Einstellung des Nullpunktes erfolgt entweder durch Verschieben der ganzen Meßuhr mittels einer geeigneten Feineinstellung oder durch Verstellung des dem Meßbolzen gegenüberliegenden festen Anschlages, der in mannigfacher Weise ausgebildet sein kann (siehe weiter unten); bei der Uhrschraublehre durch Drehen des beweglichen Meßzapfens,

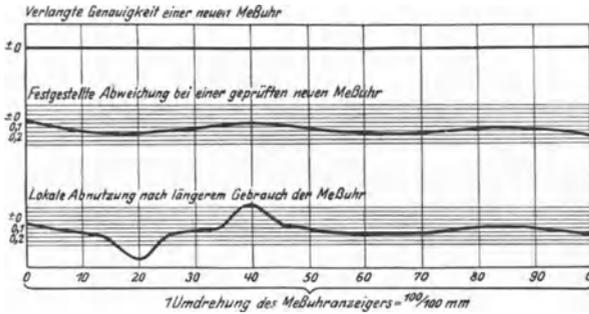


Abb. 197. Meßfehler der Meßuhr.

teilung, Ungenauigkeit der Führung usw.), die auch noch wieder vom Meßdruck abhängen, beträgt die Meßungenauigkeit im allgemeinen  $\frac{1}{100}$  bis  $\frac{2}{100}$  mm (1,5) (siehe Abb. 197), nur ausnahmsweise  $5\mu$ , und wächst bei mehreren Umdrehungen sogar auf  $\frac{2}{100}$  bis  $\frac{3}{100}$  mm. Diese Angaben decken sich auch mit Erfahrungen in Amerika, wo die Fehler bei mehreren Umläufen bis auf  $\frac{5}{100}$  mm stiegen (3,4). Sie erhöhen sich noch, falls die Meßuhr bei Massenprüfungen stets an derselben Stelle benutzt wird (nach Abb. 197 unten auf  $+\frac{2}{100}$  bis  $-\frac{5}{100}$  mm) wegen

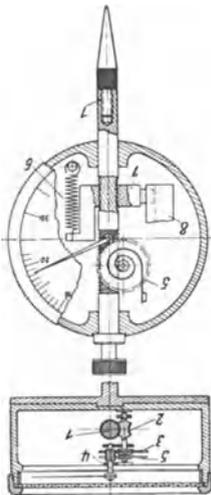


Abb. 198. Meßuhr.



Abb. 199. Meßuhr.

Bei der gewöhnlichen Meßuhr rühren die Hauptfehler von der Ungenauigkeit der das Getriebe betätigenden Zahnstange her (2). Deshalb ist bei der neuen Ausführung von Zeiss der Meßbolzen 1 (Abb. 198), der in Messingbuchsen läuft, in seinem mittleren Teil mit einem Schneckengetriebe versehen, das sich weit genauer herstellen läßt. Dieses betätigt das Schneckenrad 2, auf dessen Achse das Zahnrad 3 sitzt, das in das den Zeiger tragende Ritzel 4 eingreift. Die Spiralfeder 5 dient zur Aufhebung des toten Ganges, während der Meßdruck durch die Spannfeder 6 erzeugt wird, die an dem Schuh 7 sitzt, der, mit Gewinde versehen und durch die Führung 8 gegen Drehung gesichert, durch den Meßbolzen verschoben wird, so daß sein Zeiger an der Längsskala die vollen

meist indessen durch Verdrehen der Skala. Um einen genügenden Meßdruck zu erhalten, soll die Meßuhr im allgemeinen auf mindestens 0,3 mm angeschoben und dann erst das Zifferblatt auf 0 eingestellt werden.

Wegen der vielfachen Fehlerquellen (Spiel und Exzentrizität der Achsen, Fehler der Zahnform und

Umdrehungen gibt (Abb. 199). Die Nulleinstellung läßt sich hier einfach durch Drehen des Taststiftes an dem oben herausragenden Kordelknopf bewirken (2, 6). Die Genauigkeit wird zu  $3\mu$  angegeben, so daß sich Schätzung auf  $\frac{1}{4}$  Skt. lohnt. Gefaßt wird diese Meßuhr durch ein an der Rückwand befindliches Auge, so daß kein Verspannen eintreten kann; sie läßt sich gegen einen anderen Boden mit Spannzapfen auswechseln.



Abb. 200. Meßuhr zum Messen von Drähten.

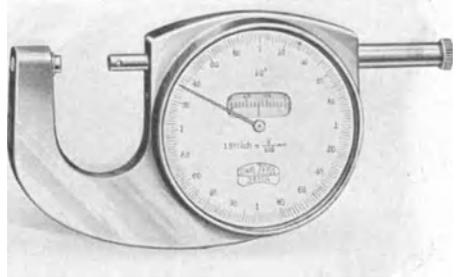


Abb. 201. Meßuhr mit Bügel.

Bei anderen Ausführungen werden die ganzen Umdrehungen durch einen mittels Zahnradübersetzung betätigten kleinen Zeiger angegeben. Für die Untersuchung auf Innehaltung von Toleranzen sieht man auch wohl eine am Skalenring drehbare, mit Ableseschlitzen versehene Glasdeckscheibe vor, die den jeweils benötigten, durch rote Striche gekennzeichneten Toleranzbereich sichtbar macht, oder stellt zwei Marken auf die Grenzmaße ein. Bei der Ausführung von Schlatter (7) bleibt der Zeiger nach der Messung stehen und wird erst durch Druck auf einen Knopf auf 0 zurückgeführt.

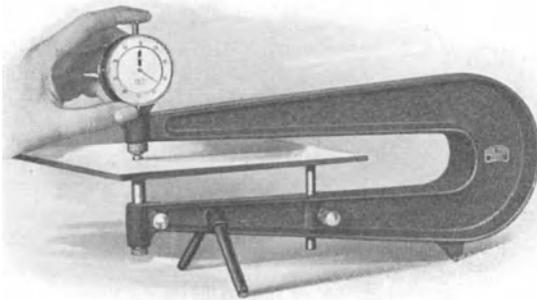


Abb. 202. Meßuhr zum Messen von Blechen.

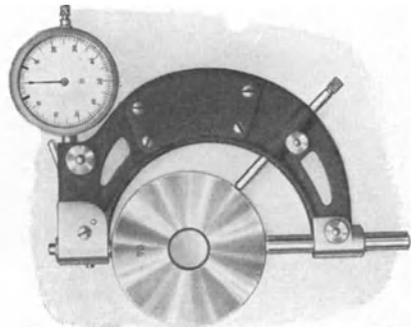


Abb. 203. Meßuhr mit rachenlehrenähnlichem Bügel.

Der dem Meßbolzen gegenüberliegende feste Anschlag kann für die verschiedenen Zwecke in mannigfacher Weise ausgebildet sein. Zum Messen feiner Drähte und Blechstreifen befestigt man ihn an der Meßuhr selbst und gestaltet die Meßflächen zangenartig (Abb. 200) oder als Schneiden, oder gibt ihnen andere passende Formen. Zur Messung größerer Gegenstände verwendet man eine Bügelanordnung, wie sie von den Schraublehren und Rachenlehren her bekannt ist (Abb. 201). Die Meßflächen werden dabei eben gehalten und für die Ermittlung der Dicke weicher Stoffe (Papier, Leder) tellerförmig gestaltet. Zur Bestimmung der Dicke von Blechen und Platten benutzt man 300 bis 500 mm ausladende Bügel (aus Aluminium, Abb. 202) von Doppel-T-Querschnitt, wobei das Verkanten der Prüflinge durch einen Hilfsamboß wirksam verhindert wird. Für dickere Stücke wird der Meßbereich durch Einstellung nach Endmaßen über 10 mm ausgedehnt.

Speziell als Ersatz für Rachenlehren ist die Ausführung nach Abb. 203 gedacht [für eine ähnliche Konstruktion siehe (10)].

In der Revision wird man die Meßuhr meist in einem Stativ benutzen (Abb. 204), dessen Tisch genau eben geschliffen ist. Zum Messen von Papier, Glasplatten, feinmechanischen Teilen usw. tauscht man ihn besser gegen einen Kugeltisch aus (Abb. 205); dabei ist auch wohl ein Hebel zum Lüften des Taststiftes vorgesehen, der für Schnellmessungen mittels Schraube auf das ungefähre Maß eingestellt werden kann. Eine Wagerechanordnung zur Bestimmung von Durchmessern zeigt Abb. 206, eine Sonderausführung als Dickenmesser mit Bronzefuß zur Benutzung auf magnetischen Spannfuttern Abb. 207, die Ausbildung als Tiefenmaß Abb. 208 (durch Einschrauben von um je 10 mm abgestufte Einsätze läßt sich der Meßbereich bis 100 mm erweitern), die Verbindung mit einem Bohrungsmesser Abb. 209. Für Sonderzwecke wird das Gestell den jeweiligen Bedürfnissen angepaßt [Beispiele dafür siehe (12)].

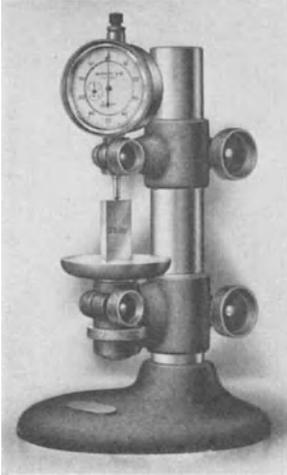


Abb. 204. Meßuhr mit Tischstativ.

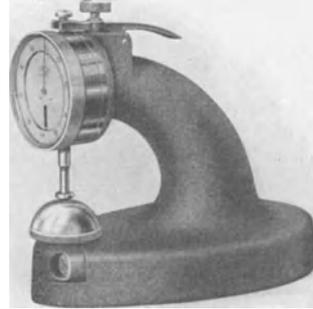


Abb. 205. Meßuhr mit Kugeltisch.

Speziell zur Untersuchung von Werkzeugmaschinen (Schlag der Spindeln usw.), zum Ausrichten von Maschinenteilen und Werkstücken, sowie zur Prüfung der Parallelität von Führungen ist der Ständer nach Abb. 210 bestimmt. Der kleine Fuß links unten dient zur Parallelführung des Meßgeräts an Betten und schwalbenschwanzförmigen Kanten, der andere, rechts unten, zur Parallelführung in Nuten und an rechtwinkligen Kanten.

Wie bei allen Messungen wird man indessen auch die Meßuhr möglichst

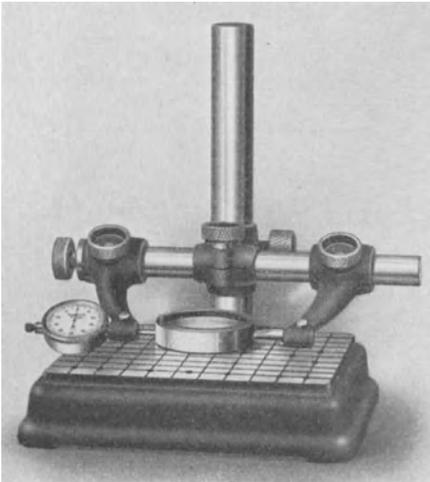


Abb. 206. Meßuhr in Wagerechanordnung.

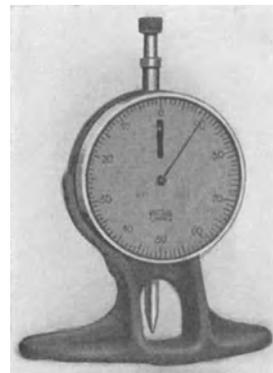


Abb. 207. Meßuhr mit Bronzefuß.

nur zum Vergleich benutzen, indem man ihre Einstellung bei Verwendung eines Endmaßes von möglichst angenähert derselben Größe wie der Prüfling beobachtet und so nur die Differenz der beiden Ablesungen zu berücksichtigen braucht. Dabei wird die Genauigkeit wesentlich erhöht, wenn man den Meßbolzen nach der jeweiligen Einstellung festhält und nicht auf 0 zurückgehen oder gar zurück-

schnappen läßt, da durch die dabei auftretenden Stöße die früher genannten Fehler vergrößert werden.

Zur Erhöhung der Genauigkeit hat man auch wohl den Meßuhren einen Hebel mit zehnfacher Übersetzung vorge-schaltet (9, 11). Bezüglich der da-durch zu erreichenden Genauigkeit sei auf Abschnitt 2 verwiesen.



Abb. 208. Meßuhr als Tiefenmaß.

Zu den Meßuhren kann man auch den in Abb. 211 dargestellten Fühlhebel rechnen, der als Druck-anzeiger an einer Meßmaschine verwendet wird. Der durch die Feder *K* stets nach einer Seite gedrückte Meßbolzen *F* dreht bei seiner Bewegung mittels zweier flacher bei *i* und *e* an ihm befestigter Stahl-bänder von  $0,075 \times 2,5$  mm den Zy-linder *H* und damit das Segment *M*. Dieses wirkt gleichfalls durch zwei, bei *q*<sub>1</sub> und *q*<sub>2</sub> festgeschraubte Stahl-bänder auf den Zylinder *N* und da-mit auf den Zeiger *P* mit dem No-nius *G*, der Ablesung auf  $2,5 \mu$  ge-stattet. Bei dieser Ausführung sind die von den Zahnrädern herrühren-den Fehler vermieden; dafür kom-men aber Fehler durch die Steifigkeit der Stahlbänder sowie durch Gleitungen hinzu.

Auch der Fühlhebelzeiger „Ta-ymin“ benutzt eine Stahlbandüber-tragung, wobei die 400fache Über-setzung im wesentlichen durch ein

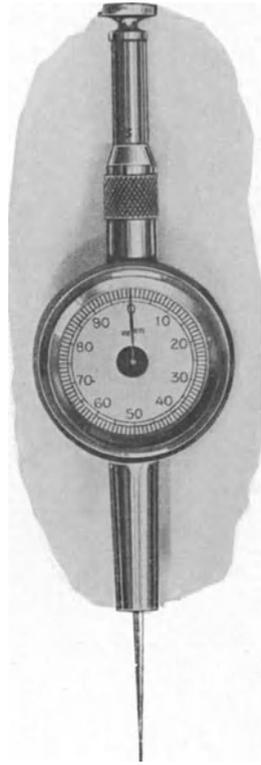


Abb. 209. Meßuhr mit Bohrungsmesser.

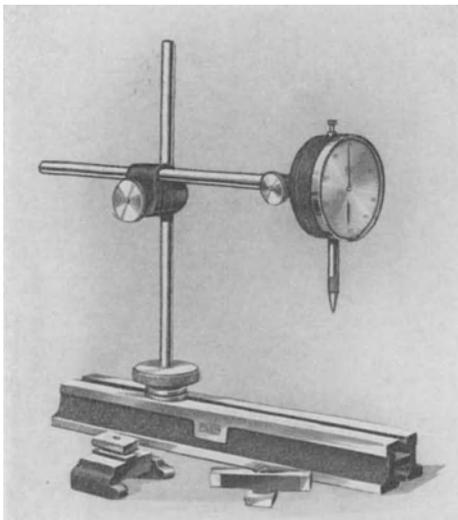


Abb. 210. Meßuhr auf Ständer.

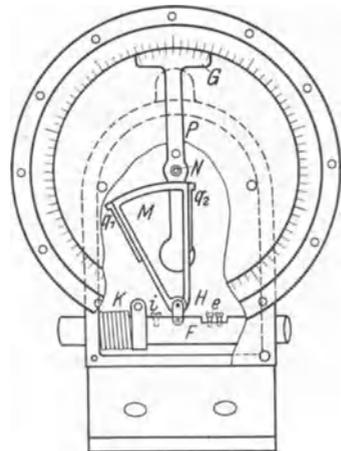


Abb. 211. Meßuhr mit Bandübertragung.

Differentialrad bewirkt wird (8). — Eine Übersetzung mit Reibungsrädern ist bisher nicht ausgeführt, da namentlich bei schnellen, ruckweisen Bewegungen Gleiten zu befürchten ist und bei dem erforderlichen großen Anpreßdruck auch mit ziemlich hohen Reibungs-widerständen gerechnet werden muß.

#### 4. Feinzeiger und Passameter.

Die Verwendung von Ritzel und Zahnrad(segment) findet sich auch bei dem Feinzeiger von Zeiss, der durch die Beschränkung auf einen kleinen Meßbereich eine gedrungene Ausführung gestattet (25 mm Durchmesser bei 100 mm Länge); er ist somit nur zu Vergleichsmessungen bestimmt. Der Meßbolzen (Abb. 212 und 213) wirkt durch eine Kugel (um punktweise Berührung zu ermöglichen) auf den kurzen Schenkel eines Winkelhebels, dessen langer

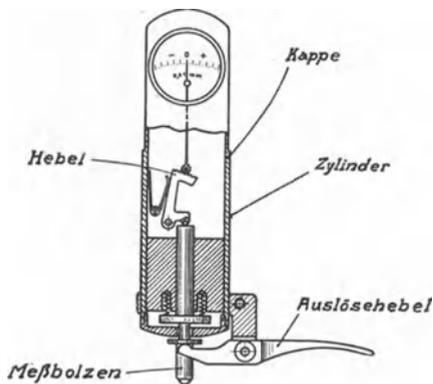


Abb. 212. Feinzeiger.

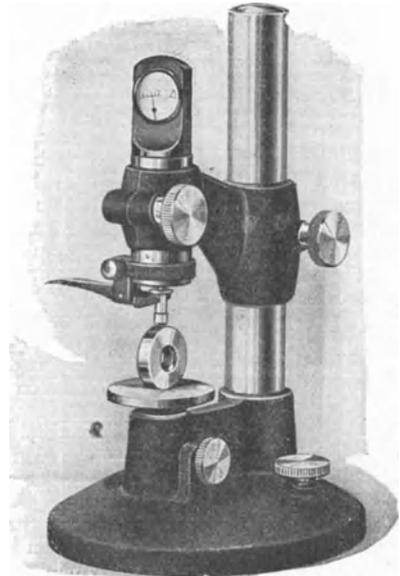


Abb. 213. Feinzeiger.

Arm mit seinem Zahnradsegment aus einer besonderen Messinglegierung ein Ritzel aus Chromnickelstahl mit dem Zeiger betätigt. Dadurch ist erreicht, daß sich auch nach  $10^6$  maschinell ausgeführten Messungen noch keine Abnutzung im Getriebe und keine Vergrößerung der Meßfehler bemerkbar machte. Die Zahn-

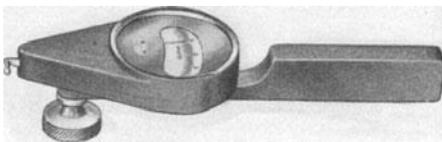


Abb. 214. Feinzeiger zur Verwendung an der Maschine.

luft ist durch eine auf den Hebel einwirkende Blattfeder beseitigt, während der Meßdruck (von etwa 70 g) durch 2 Wurmfedern ausgeübt wird. Die Skala umfaßt 10 Intervalle von je  $5 \mu$  (Meßbereich  $50 \mu$ ); die Instrumentengenauigkeit beträgt  $3 \mu$ . Zur Untersuchung an Maschinen dient die Ausführung nach Abb. 214, bei der das Ende des Meßbolzens einen rechtwinkligen Ansatz mit einer kleinen Kugel trägt, und die ferner mittels Kordelschraube an Ständern, Stichelhaushaltern usw. befestigt werden kann.

Der Fühlhebel von Capstan (1) unterscheidet sich von vorstehendem hauptsächlich dadurch, daß der Übertragungshebel in seinem unteren Teile geschlitzt ist und mittels einer Schraube eine Justierung der Länge des kurzen Hebelarms gestattet. Die Einstellung des Nullpunktes ist dadurch ermöglicht, daß in den Meßbolzen unten ein Stift mit Gewinde eingesetzt ist. Mittels einer Schraube läßt sich der Zeiger auch auf einen bestimmten Strich der Skala (z. B. das untere Abmaß) einstellen und beginnt sich erst zu bewegen, wenn der Prüfling dieses überschreitet.

In einem rachenlehrähnlichen Bügel (Abb. 215 und 216) soll der Feinzeiger von Zeiss auch zur Kontrolle der Innehaltung der Toleranzen der DIN-Passungen dienen und wird deshalb als Passameter bezeichnet (für Passungen bei

Außenmessungen); sein Meßdruck beträgt 1000 g. Der bewegliche Meßbolzen läßt sich durch Druck auf den oben sichtbaren Knopf zur Schonung der Meßflächen beim Einführen des Prüflings zurückziehen. Es ist ferner noch ein Stütznocken so angebracht, daß er den Prüfling in dem Quadranten berührt, der zwischen dem beweglichen Meßbolzen und der Senkrechten auf seiner Achse

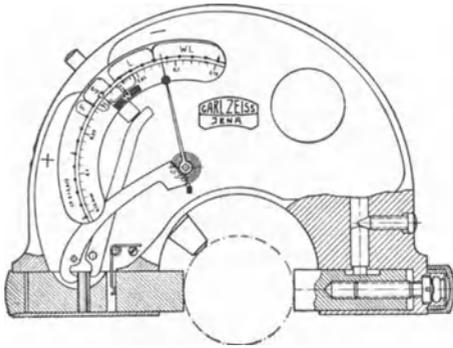


Abb. 215. Passameter.

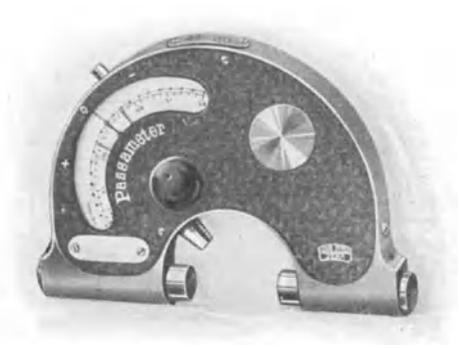
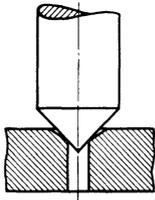


Abb. 216. Passameter.

liegt (3). Auf der Skala sind die verschiedenen Toleranzfelder der DIN-Passungen in sinnreicher Weise angeordnet (mit 5 Passametern läßt sich der Durchmesserbereich von 6 bis 150 mm umfassen); sie lassen sich auch durch 2 plombierbare Marken festlegen. Die Einstellung erfolgt mit Endmaßen oder Meßscheiben (2, 4). Ein ähnliches Gerät ist auch von anderer Seite angegeben (5), bei dem die Anzeige aber nicht auf der Breit-, sondern auf der Schmalseite des Bügels erfolgt.

### 5. Fühlhebel mit Schneidenlagerung (Verkürzung des kleinen Hebelarms).

Mit mehrfacher Übersetzung einfacher Hebel ist die Genauigkeit nicht wesentlich über  $3\mu$  zu steigern. Um weiter zu kommen, hat man deshalb den anderen vorher genannten Weg, die Verkürzung des kleinen Hebelarms, eingeschlagen. Nimmt man die Länge des anderen wieder zu 100 mm an, so erhält der kurze Hebelarm bei 100- und 1000facher Übersetzung nur eine Länge von 1 bzw.  $\frac{1}{10}$  mm. Lagerung in Zapfen ist dabei ausgeschlossen, da sie zu dünn werden müßten und auch der Einfluß der Lagerluft eine zu große Rolle spielte, würde doch eine solche von  $\frac{1}{100}$  mm im letzteren Falle bereits Fehler von 10% bewirken können.

Abb. 217.  
Spitzenlagerung.

Günstiger ist schon Lagerung zwischen Spitzen (Abb. 217), namentlich wenn man das eine Lager federnd ausbildet, wodurch man es so einstellen kann, daß kein Schlottern eintritt und andererseits der auf die Achse ausgeübte Druck nicht zu groß wird. Ferner muß man durch eine Bohrung von etwa 0,25 mm Durchmesser dafür sorgen, daß nicht die feine leicht zu beschädigende Spitze selbst trägt; auch ihr Ersatz durch eine kleine Kugel wird von manchen Seiten empfohlen. Wichtig ist noch, daß die beiden Spitzen genau in die Zapfenachse fallen, was technisch gewisse Schwierigkeiten macht. Für längere Hebelarme hat sich Auflagerung auf 2 Stahlkugeln am besten bewährt, die in entsprechenden Pfannen ruhen. In England werden als Hebelgelenke mit Vorliebe Stahlfedern benutzt, die sich gut bewährt haben sollen.

Als Stützlager haben sich halbkugelförmige, gehärtete und polierte Pfannen

mit einem Ring kleiner Kugeln und einer dreimal größeren darauf (Abb. 218) in bezug auf Reibung, Tragfähigkeit, Führung und Zentrierung der einfachen

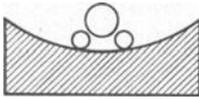


Abb. 218. Stützlager.

Spitzenlagerung in einer Pfanne beträchtlich überlegen erwiesen (6). [Für eine andere im Zählerbau verwendete Ausführung, bei der namentlich die Ölführung sehr gut gestaltet ist, sei auf (3) verwiesen.] Bei der Verwendung von Edelsteinen

ist noch darauf zu achten, daß die tragende Lagerfläche nicht parallel einer Spaltungsfläche ist, da sonst eine beträchtliche Abnutzung eintritt (5). — Für die meisten Präzisions-

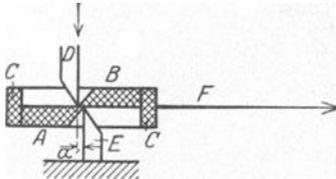


Abb. 219. Fühlhebel von Fuess.

fühlhebel benutzt man heute Schneidenlagerung, wie sie wohl zuerst von Fuess sachgemäß ausgebildet ist. Der kurze Hebelarm besteht aus einer Art Waagebalken (Abb. 219), der von den beiden durch den Rahmen C gehaltenen schneidenförmigen Stücken A und B gebildet

wird, die um das der gewünschten Übersetzung entsprechende Maß gegeneinander verschoben sind. In die beiden dadurch gebildeten

Kimmen greifen die Bolzen D und E mit ihren Schneiden ein, von denen E fest steht. Die durch die Verschiebung von D bewirkte Kippung wird durch einen an dem Rahmen befestigten langen Zeiger F mit starker Vergrößerung auf die Skala übertragen<sup>1</sup>.

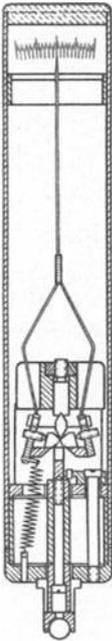


Abb. 221. Minimeter, frühere Ausführung.

Praktisch verwendet ist dieses Prinzip in dem von Hirth (ohne Kenntnis der Konstruktion von Fuess) 1905 für die Massenfertigung genauer Kugellager erfundenen Minimeter, das 1907 seine praktische Form erhielt (8). Es ist schematisch in Abb. 220 und im Schnitt in Abb. 221 dargestellt. Die Schneiden greifen in V-förmige Kimmen ein, deren Scheitel in einer Ebene liegen. Die eine Auflage läßt sich in dem sonst aus einem Stück bestehenden Waagebalken mittels Schrauben auf die gewünschte Übersetzung einstellen<sup>2</sup>. Der lange Hebelarm ist ein dachbinderartiger, aus Draht gebogener Zeiger. Die eigentliche Drehachse wurde, wie aus Abb. 221 ersichtlich, bei der früheren Ausführung von einer Doppelschneide gebildet, die durch eine senkrechte Schraube so eingestellt wird,

<sup>1</sup> Einige Ausführungen für die Werkstatt, bei denen aber Lager und Skala ungeschützt sind (und die nicht von Fuess stammen), sind in (10) beschrieben.

<sup>2</sup> Für andere Möglichkeiten der Ausbildung des kurzen Hebelarms, die praktisch aber nicht verwendet werden, siehe (2, 11).



Abb. 220. Minimeter, Schema.

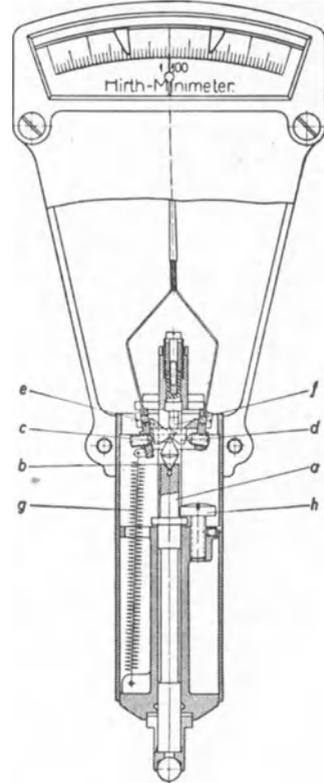


Abb. 222. Minimeter, jetzige Ausführung.

daß eine sichere Drehung gewährleistet ist. Die andere Schneide sitzt an dem in einer Bohrung sauber geführten Meßbolzen. Fehler treten durch die Führung kaum auf, da bei 50 mm Bolzenlänge noch ein Spiel von  $25 \mu$  zulässig ist, ohne daß sie  $0,1 \mu$  übersteigen. Dabei ist allerdings Voraussetzung, daß die Schneide unverrückbar gelagert ist, wie das durch die V-förmige Kimme praktisch gewährleistet ist. Da aber die Parallelstellung der beiden Schneiden ziemlich große technische Schwierigkeiten bereitet, ist die Konstruktion im Jahre 1927 dahin geändert (Abb. 222), daß die untere Schneide *c* mit einem Kegel *b* in einer entsprechenden Aussenkung des Meßbolzens *a* ruht und sich somit selbsttätig parallel zu der jetzt feststehenden oberen (einfachen) Schneide *t* ausrichtet. Auf den Meßbolzen lassen sich unten verschieden gestaltete Ansätze stecken.

Der Meßdruck wird durch die Feder *g* ausgeübt; da die Länge des Hebelarms, an den sie angreift, bei verschiedenen Übersetzungen praktisch konstant ist, während sich der andere auf den Meßbolzen *a* wirkende Hebelarm entsprechend der Übersetzung verkleinert, so würde der Meßdruck bei 1000facher Übersetzung 10 mal größer sein als bei 1 : 100. Deshalb wird für erstere eine schwächere Feder genommen und wurde das Gewicht des Meßbolzens durch eine in seiner Achse wirkende Feder ausgeglichen. Um die Reibung zu vermindern, wird statt ihrer jetzt eine Blattfeder (nach Abb. 221) zwischen Gehäuse und dem geteilten Meßbolzen verwendet, ferner auch der Hebelarm für die Wurmfeder kleiner gehalten (7). Dadurch ist erreicht, daß der Meßdruck bei allen Übersetzungen etwa 100 g beträgt. Die Bewegungsfähigkeit des Meßbolzens wird durch zwei Anschläge begrenzt, um das Gerät vor Beschädigung durch Überbeanspruchung zu bewahren.

Das Minimeter wird mit den Übersetzungen 1 : 100, 1 : 200, 1 : 500 und 1 : 1000 ausgeführt. Der Meßbereich umfaßt im allgemeinen 20 Skalenteile, deren Mitten noch besonders markiert sind, kann jedoch bis auf 60 Skalenteile erweitert werden. Die Instrumentengenauigkeit beträgt bei den kleinen Übersetzungen  $\pm 0,05$  bis  $0,1$  Skt., wächst aber bei den hohen bis auf etwa  $\pm 0,4$  ganze Intervalle, da die Einstellungen des Zeigers bis zu diesem Betrage unsicher werden. Die Meßgenauigkeit wird man deshalb bei  $n = 500$  und  $1000$  zu günstigstenfalls  $0,4 \mu$  ansetzen können, während man bei  $n = 100$  mit Fehlern von etwa  $1 \mu$  zu rechnen hat.

Um möglichst scharfkantige Kimmern und damit eine reine Drehung zu erhalten, wurde bei dem Kruppschen Mikrotast der kurze Hebelarm ursprünglich durch ein gehärtetes dünnes Blech gebildet (Abb. 223), das durch eine Wurmfeder gegen die am Gehäuse befestigte Schneide und gegen die Stelze gezogen wurde, die in einer Pfanne des Meßbolzens ruhte. Der kurze Hebelarm wurde durch den

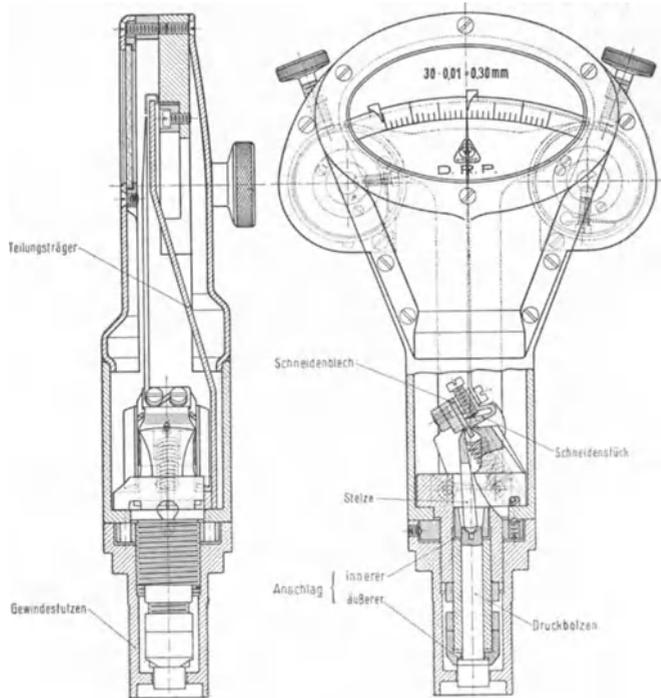


Abb. 223. Mikrotast. frühere Ausführung.

gehärteten dünnen Blech gebildet (Abb. 223), das durch eine Wurmfeder gegen die am Gehäuse befestigte Schneide und gegen die Stelze gezogen wurde, die in einer Pfanne des Meßbolzens ruhte. Der kurze Hebelarm wurde durch den

senkrecht zur Achse genommenen Abstand der beiden Schneiden gebildet. Seine Länge ließ sich dadurch justieren, daß das Blech in dem Haltekörper mittels einer Schraube verstellbar wurde. Durch Ausbalancieren war erreicht, daß der Fühlhebel in jeder Lage gebraucht werden konnte.

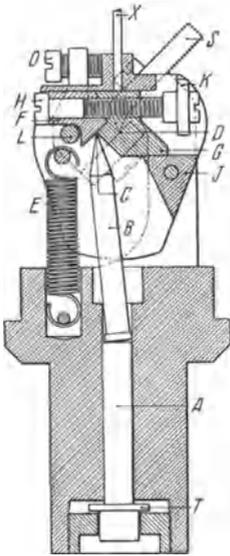


Abb. 224. Mikrotast, jetzige Ausführung.

Diese Ausführung ist indessen aus herstellungstechnischen Gründen verlassen und durch die nach Abb. 224 ersetzt<sup>1</sup>, bei der der kurze Hebelarm von 2 gegeneinander verstellbaren, von ebenen Flächen begrenzten Stücken gebildet wird. Durch diese zweiteilige Ausführung der Widerlager der Schneiden sollen scharfe und sehr genaue Berührungslinien und dadurch gleit- und spielfreie Lagerung bei sehr geringer Reibung erzielt werden (1). Auch hat sich nach  $1\frac{1}{4}$  Millionen Messungen keine Abnutzung gezeigt.

Die geschilderte Ausführung des Mikrotast bietet den Vorteil, bei geringen Übersetzungen (bis 1 : 100) mit kleineren äußeren Abmessungen auskommen zu können. Auch ist es leichter möglich, einen Meßbereich von 60 Skalenteilen bei den Übersetzungen 1 : 100, 1 : 200, 1 : 500, 1 : 1000 zu erreichen. Die Genauigkeit ist über den ganzen Meßbereich etwa dieselbe wie beim Minimeter. Wegen des Einflusses der Schneidenabrundung kann man die Übersetzung auf mechanischem Wege durch einen Hebel nicht höher steigern. Man muß sich, falls dies ausnahmsweise (im Laboratorium) nötig, durch Vorschalten eines sehr gut gelagerten Hebels helfen (siehe S. 177), der etwa mit einer Schneide auf einer möglichst ebenen Fläche aufliegt und durch Federn dagegen gedrückt wird, um durch Erschütterungen bewirkte Verschiebungen auszuschließen. Im übrigen reicht

die mit dem Minimeter und dem Mikrotast zu erzielende Genauigkeit für die technischen Messungen in der Regel aus, wenn es sich nicht gerade um den Vergleich von Endmaßen handelt<sup>2</sup>.

## 6. Sonderkonstruktionen.

Wenig eingebürgert hat sich in die Meßtechnik bisher das in die Materialprüfung von Bauschinger 1873 eingeführte Verfahren, die Längenänderung

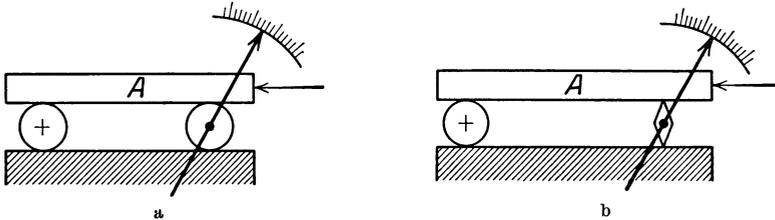


Abb. 225. Fühlhebel mit a Rolle, b Doppelschneide.

eines Körpers durch die Drehung einer mit einem längeren Zeiger verbundenen Rolle (Abb. 225a) oder der von Martens benutzten Doppelschneide (Abb. 225b) zu messen<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Für eine andere Ausführungsform siehe (4).

<sup>2</sup> Bei dem Digor von Goerz, der allerdings nie auf den Markt gekommen ist, ist der Waagebalken durch eine elastische Feder ersetzt, deren im allgemeinen rechtwinklig abgebogene Fortsetzung zugleich den Zeiger bildet. Ein auf demselben Prinzip beruhendes Gerät, das hauptsächlich zur Untersuchung von Spindeln auf Schlag benutzt wird, ist in (9) beschrieben.

<sup>3</sup> Vorgeschlagen ist auch, die Bewegung auf die Rolle durch einen dünnen Draht zu übertragen, was aber der Biegesteifigkeit wegen leicht zu Fehlern führt. In erhöhtem Maße gilt dies, wenn man die Genauigkeit durch Verwendung mehrerer nach Art eines Flaschenzugs angeordneter Rollen steigern will, da sich die Fehler durch Lagerluft und Exzentrizität dabei stark bemerkbar machen.

Da man hier bis zu Durchmessern von 2 oder 1 mm heruntergehen kann, so erzielt man leicht 100- bis 200fache Übersetzung, bei allerdings beschränktem Meßbereich. Die Genauigkeit läßt sich noch steigern, wenn man das Zeigerende mit einem Nonius versieht, wobei aber wegen der Zusatzbelastung am Ende des Zeigers leicht eine Verbiegung auftreten kann<sup>1</sup>.

Die Schlüpfung der Rolle kann man stets verschwindend gering halten. Dagegen hat ihre Unrundheit und die Unebenheit des sich bewegenden Stückes bei dem Abrollen der Walze einen größeren Einfluß, weshalb die Doppelschneide den Vorzug verdient, bei der nur gefordert werden muß, daß die beiden Schneiden möglichst parallel zueinander sind.

Eine auch für die Werkstatt geeignete Form hat dieses Prinzip bei dem in Abb. 226 wiedergegebenen Apparat gefunden (1). Die Bewegung des Meßbolzens *A* wird durch eine auf 2 Rollen gelagerte Platte *B* übertragen und durch den sich mit der Rolle *C* drehenden Zeiger *D* mit 100facher Übersetzung angezeigt. Die Feder *E* drückt *B* und *A* wieder in ihre Anfangsstellung zurück. Nähere Erfahrungen mit diesem Fühlhebel liegen noch nicht vor.

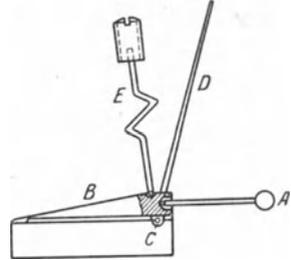


Abb. 226. Praktische Ausbildung des Fühlhebels nach Abb. 225.

Sehr genaue Messungen von Längenänderungen kann man mittels eines Torsionsfühlhebels ausführen (5). Er besteht aus einem bei *A* fest eingespannten Stahldraht (Abb. 227), der bei *B* durch einen Konus geführt ist. Er wird mittels der an dem langen Hebel *C* angreifenden Mikrometerschraube *D* so lange tordiert, bis sich der kleine Arm *E* an den Prüfling anlegt. Seine Bewegung *s* berechnet sich aus

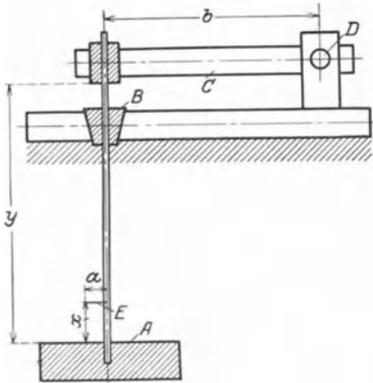


Abb. 227. Torsionsfühlhebel.

$$s = \frac{a \cdot x}{b \cdot y} \cdot S,$$

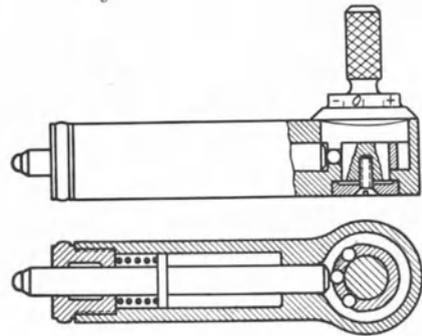


Abb. 228. Meßkugellehre.

falls *S* die Verschiebung der Mikrometerschraube ist. Durch geeignete Wahl der Abmessungen kann man es erreichen, daß 1 Skt. der Mikrometerschraube einer Verschiebung des Endes von *E* um 1  $\mu$  entspricht. Um diese Genauigkeit zu erzielen, wird der Augenblick der Berührung mit dem Prüfling mittels elektrischen Stromes angezeigt. Wegen der Unsicherheit der rechnerischen Grundlagen muß die Eichung des Gerätes mittels Interferenzen erfolgen, wozu man an *E* noch einen längeren Hebel anbringt. Die angegebene Genauigkeit läßt sich aber nur bei der Bestimmung von Längenänderungen, nicht von Längen selbst erreichen.

<sup>1</sup> In der Materialprüfung wird meist ein längerer optischer Zeiger benutzt, indem man in der Verlängerung der Drehachse einen Spiegel anbringt (Näheres siehe S. 201), wobei übrigens nicht ängstlich auf die Parallelität beider geachtet zu werden braucht, da erst eine Kippung um 8° einen Fehler von 1% verursacht (4). Für eine Zusammenstellung von Dehnungsmessern kleiner Meßlänge siehe (2a); es sind damit Übersetzungen bis 13400 erreicht. Sie sind aber nur zur Messung elastischer Verlängerungen (nicht von Längen oder Längenunterschieden) geeignet.

Schließlich sei noch die Meßkugellehre von Bernlöhr (Abb. 228) genannt (2); bei dieser wird die Lage des durch eine Feder ständig nach außen gedrückten Meßbolzens durch Drehen eines Exzenters oder Verschieben eines Keils ermittelt, in dem entsprechend abgestufte Stahlkugeln sitzen. Das Abmaß des Prüflings gegen ein Normal wird an einer an dem Exzenter befestigten Trommel auf  $\frac{1}{100}$  mm beobachtet. Im Gegensatz zu allen anderen Konstruktionen bekommt man hier nur sprungweise Ablesungen; auch besteht die Gefahr, daß die Stahlkugeln allmählich eine Nut in die Stirnfläche des Meßbolzens einarbeiten.

## 7. Minimeter und Mikrotast, Gestaltung.

Während in den beiden vorhergehenden Abschnitten die Konstruktionsgedanken der Fühlhebel mit Schneidenlagerung erläutert sind, soll hier ihre äußere Gestaltung und praktische Anordnung in Stativen und ähnlichem betrachtet werden, da diese für die verschiedenen Fühlhebel in gleicher Weise gestaltet werden können und es sich durch Benutzung anderer Halterarme oder Einsetzen von Buchsen leicht ermöglichen läßt, die Fühlhebel gegeneinander auszuwechseln. Hingewiesen sei darauf, daß ein Schmieren der Meßbolzen und Schneiden nicht nötig, sondern im Gegenteil schädlich ist, da der Staub mit dem Öl im Laufe der Zeit eine zähe Masse bildet, die die leichte Beweglichkeit hindert.



Abb. 229. Meßhütchen.

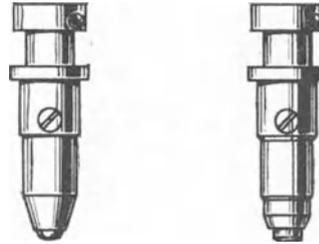


Abb. 230. Federnde Meßhütchen.

Die äußere Form des Minimeters geht aus Abb. 234 hervor; die Abmessungen betragen im Durchmesser 28 und in der Länge 160 mm. Auf den unten herausragenden Meßbolzen werden zum Messen von Prismen, Zylindern, Ansätzen, Bohrungstiefen usw. Meßhütchen mit ebenen oder Kugelflächen gesteckt (Abb. 229); für letzteren Zweck bildet man sie auch federnd aus (Abb. 230), so daß man ihren unteren Teil um etwa 5 mm anheben kann. Oben tragen die Meßbolzen einen Bund, um sie beim Einführen des Prüflings mittels eines zangenartig darunter greifenden Hebels anlüften zu können, der mit einem Ring an dem Gehäuse befestigt wird (siehe Abb. 234). Das Lüften muß stets langsam, nicht ruckweise, geschehen, um nicht die Schneiden zu beschädigen. Zur besseren Beleuchtung oder Beobachtung der Skala (schwarze Striche von 1 mm Abstand auf weißemaltem Grund) läßt sich in ähnlicher Weise am oberen Ende ein kleiner Spiegel oder eine Lupe anbringen. Das Minimeter mit erweitertem Meßbereich, das mit den Übersetzungen 1:100, 1:200, 1:500 ausgeführt wird, zeigt Abb. 231a und b. Durch zwei von der Rückseite zugängige Schrauben sind 2 grüne Marken auf die gewünschten Toleranzgrenzen einzustellen; die Markenverstellung wird durch einen Schieber verdeckt. Schaltet man die Marken und den Zeiger in einen elektrischen Stromkreis, so läßt sich das Überschreiten der Toleranz durch akustische Signale (2 verschiedene Wecker) oder durch optische Zeichen (2 verschiedenfarbige Glühlampen) anzeigen (5).

Die Ausführung des Mikrotasts geht aus Abb. 238 hervor. Auf das untere zylindrische Ende wird eine Tastfassung geklemmt, in der ein Stift geführt ist,



Abb. 231. Minimometer mit erweitertem Meßbereich.

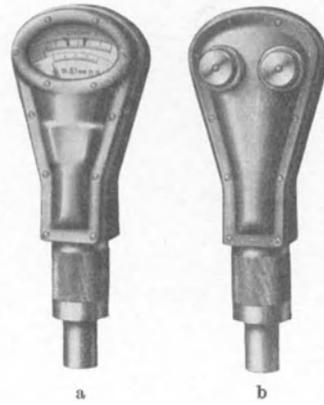


Abb. 232. Bimikrotast.

der auf den Meßbolzen des Mikrotasts einwirkt, und auf dessen unteres Ende die Tastspitze oder -kugel gesteckt wird. Auch beim Mikrotast sind zwei durch Kordelschrauben auf der Rückseite ein- und feststellbare Toleranzmarken vorgesehen (Abb. 232).

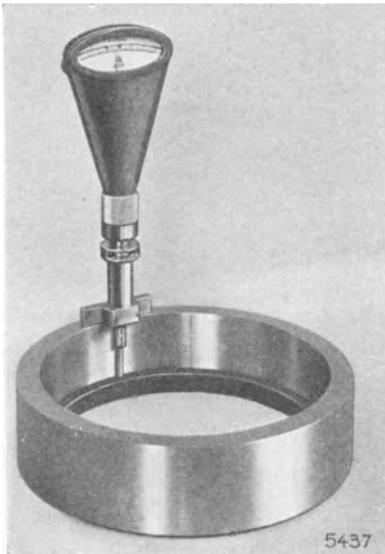


Abb. 233. Mikrotast-Tiefenmaß.

Zur Erleichterung der Schleifarbeit wird der Fühlhebel auch mit zwei Zeigern ausgeführt (Bimikrotast, Abb. 232). Der obere (1) hat einen Meßbereich von 30 Skt. von 10, 5 oder 2  $\mu$  Größe, der untere (2) von 20 Skt. von je 0,1 mm. Der Feinzeiger 1 ist wie sonst beim Mikrotast ausgebildet. Der Grobzeiger 2, der zur Beobachtung des Maßes beim Vorschleifen dient, schwingt um einen Drehzapfen, während sein Gegenhebel Schneidenlagerung hat. Beide sind mit dem gemeinsamen Tastbolzen so gekuppelt, daß Zeiger 1 seine Bewegung erst beginnt, wenn Zeiger 2 in der Mitte der Skala steht.

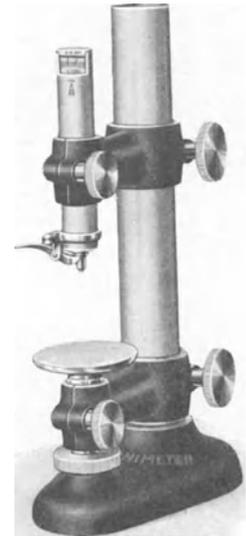


Abb. 234. Minimometer mit Tischstativ.

Bildet man das untere Ende der Fühlhebel bzw. der Tastfassung als Balken mit ebener Anlagefläche aus, so lassen sie sich auch als Tiefenmaß verwenden (1b) (Abb. 233). Für die Messung längerer, sperriger Stücke wird ein gleicharmiger Hebel vorgeschaltet.

Zum Vergleich von Endmaßen untereinander oder mit Werkstücken benutzt man Fühlhebel in einem Stativ mit feinverstellbarem, eben geschliffenem und poliertem Tisch (Abb. 234). Kugelm Maße werden dabei in einem senkrecht stehenden Prisma mit V-Nut durch federnde Klammern gehalten.

Bei allen Messungen ist darauf zu achten, daß die Säulen gegen Temperaturänderungen, besonders durch Strahlung des Beobachters, mittels eines geeigneten Strahlungsschutzes (glänzender Doppelmantel aus Silberpapier, besser aus Weiß- oder vernickeltem Blech, oder durch einen Luftstrom) geschützt werden, da sie sich sonst krümmen und die Nulleinstellung ändern. Zweckmäßig wird man die Fühlhebel an ihrem unteren Ende klemmen, um eine möglichst geringe Säulenlänge zu erhalten.

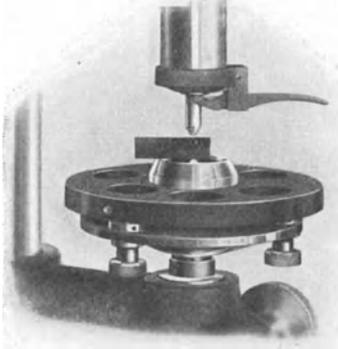


Abb. 235. Hilfstisch zum Messen von Endmaßen.

Beim Ansprengen der Endmaße kann leicht eine Verlagerung des Tisches auftreten, namentlich wenn er, um ihn genau parallel zur Fläche des Meßhütchens stellen zu können (wie in Abb. 238), auf 3 Schrauben ruht. Dann setzt man besser einen kleinen Hilfs-



Abb. 236. Hilfstisch zum Messen von Endmaßen.

tisch auf, der in der Mitte eine Achatkugel und einen sie umgebenden, in ihrer Höhe optisch plan geschliffenen Ring trägt (Abb. 235) oder aus einem planparallelen Stück mit kleiner oberer Fläche

besteht (Abb. 236), das an den eigentlichen Tisch angesprengt wird. Damit die Fläche bzw. die Kugel unter dem Meßbolzen stehen bleibt, wird die Lage des Aufsatzes durch einen Flansch gesichert. Diese Einrichtung gestattet auch, die Endmaße in der Mitte und am Rande zu messen.

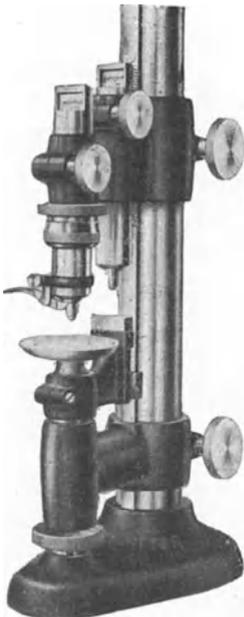


Abb. 237. Gestell mit 2 Minimetern.

Da Endmaße unter 1 mm selten zur Verfügung stehen (auch im allgemeinen nicht sehr zu empfehlen sind), könnte man sich zum Messen von Stücken unter 1 mm, z. B. von 0,43 mm, nur so helfen, daß man den Fühlhebel zunächst mit dem Maß 1,43 mm einstellt, dann ein 1-mm-Endmaß an den Tisch ansprengt und nun den Prüfling zwischen Endmaß und Meßbolzen bringt. Da dabei aber das 1-mm-Endmaß sehr bald zerkratzt werden würde, nimmt man besser ein Gestell mit zwei Fühlhebeln und zwei Tischen nach Abb. 237. Man

bringt dann auf den hinteren zunächst das 1-mm-Endmaß und stellt beide Fühlhebel auf 0, wobei der vordere auf seinem Tisch aufruft. Dann vertauscht man das Endmaß gegen das von 1,43 mm. Stellt man dabei den hinteren Fühlhebel wieder auf 0, so hat der vordere in seiner Nullstellung einen Abstand von 0,43 mm von seinem Tisch.

Bei der Untersuchung von Bodenstärken oder der Rillen von Längslagern würde man den Prüfling nicht unter den gewöhnlichen Fühlhebel bringen können. Man muß dann die federnden Meßbolzen nach Abb. 230 nehmen oder das Gestell

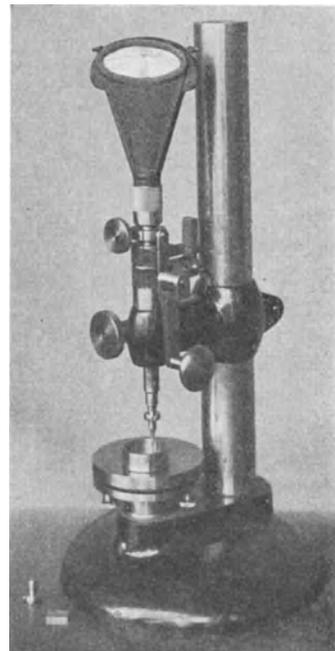


Abb. 238. Mikrotast mit Hubtaster.

nach Abb. 238 so ausbilden, daß man den eigentlichen Fühlhebel in der Tastfassung um ein größeres Stück (25 mm) anheben kann. In der Gebrauchsstellung legt er sich mit einem sauber gearbeiteten Bund unter Federdruck gegen einen ringförmigen Anschlag.

Zur Bestimmung des Durchmessers von Kugeln gibt man dem Gestell noch einen V-förmigen einstellbaren Anschlag (Abb. 239).

Dünne Drähte kann man ihrer stets vorhandenen Krümmung wegen nicht auf einem ebenen Tisch messen. Man benutzt dazu einen Hilfstisch (Abb. 240)



Abb. 239. Minimertgestell zum Messen von Kugeln.

der eine von 2 Federn gehaltene gehärtete Walze und zwei federnde Stifte trägt, in deren V-Nuten der Draht über die Walze gelegt wird. Der Hilfstisch wird wieder mit einem Flansch auf dem Haupttisch zentriert. Die Einstellung auf das Sollmaß geschieht bei größeren Messungen (auf einige  $\mu$ ) dadurch, daß man das betreffende Endmaß unter die Walze legt, auf 0 einstellt und es dann entfernt. Für dünne Drähte, etwa von 0,3 mm, stellt man den Fühlhebel mit einem Endmaß 1,3 mm auf 0 und tauscht dieses dann gegen ein solches von 1 mm aus. Für Messungen höchster Genauigkeit ist dieses Verfahren, der stets vorhandenen Krümmung der dünnen Endmaße wegen, nicht zu

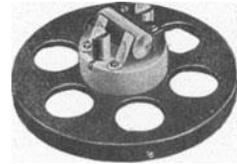


Abb. 240. Hilfstisch zum Messen von Drähten.

brauchen. Hierfür legt man die Endmaße besser auf die Walze, und zwar so, daß sie mit ihrer kurzen Kante parallel zur Zylinderachse zu liegen kommen. Für oft vorkommende Maße hält man sich am besten gehärtete Stahldrähte zum Einstellen, die man genau so wie die Prüflinge über die Walze legt. Drähte, deren Durchmesser kleiner als der Meßbereich des Fühlhebels sind, kann man unmittelbar durch seinen Ausschlag messen.

Bei der in Abb. 241 wiedergegebenen Ausführung wird durch einen Exzenter der Meßfuß (mit vier unten in einer Ebene liegenden Flächen) angehoben; zwischen ihnen sitzt der auf den Mikrotast einwirkende Meßbolzen. Beim Senken legt sich der Meßfuß gegen den Amboß, der pendelnd auf einem gehärteten Stift aufgehängt ist und fünf in einer Ebene liegende Flächen hat. Mit den vier äußeren richtet er sich parallel zum Meßfuß aus, während sich der Meßbolzen auf die fünfte Fläche setzt und so die Nullpunkteinstellung gestattet. Beim Messen legt sich der an einem Knopf befestigte, um die Hülse geschlungene und straff gespannte Draht auf diese fünfte Fläche. Durchmesser bis zu 50  $\mu$  werden unmittelbar (durch den Ausschlag des Fühlhebels) bestimmt; bei dickeren Drähten wird der Fühlhebel vorher durch die Mikrometerschraube um je 50  $\mu$  verstellt. Besser wird sie durch eine Trommel ersetzt, in deren 4 Bohrungen Stäbe von



Abb. 241. Drahtmeßeinrichtung mit Mikrotast.

50  $\mu$  Längenunterschied gehalten werden, die der Drahtdicke entsprechend zwischen den Druckbolzen des Mikrotasts und den Meßbolzen gebracht werden. Die Trommel wird durch eine federnde Rast in ihrer Stellung gehalten. Der Meßdruck wird zu 30 g/1 mm Drahtlänge angegeben, kann aber durch Austausch der Entlastungsfeder geändert werden (1a).

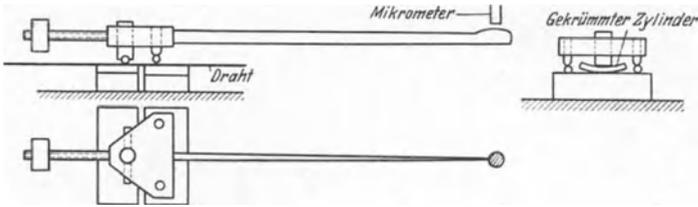


Abb. 242. Drahtmeßeinrichtung.

durch Schraubenmikrometer beobachtet wird (auch mikroskopische Ablesung ließe sich dazu vorteilhaft verwenden). Die Drehachse des Hebels der Übersetzung 1:30 wird von 2 Stahlkugeln gebildet (Abb. 242), mit denen er auf einem

Endmaß aufruht. In der Nullstellung legt er sich mit einem ganz schwach gebogenen Zylinder auf ein zweites gleich hohes Endmaß (wobei der dritte Auflagepunkt mit den beiden Kugeln die Ecken eines gleichseitigen Dreiecks bildet). Würde man die Messung einfach durch Unterlegen des Drahtes ausführen, so würde man mit dem Schraubenmikrometer eine Sehne statt des Bogens messen. Des-



Abb. 243. Minimetergestell zum Messen von Zylindern.

halb wird das linke Endmaß so viel verkleinert, daß seine Länge + Drahtdurchmesser bis auf 2,5  $\mu$  mit der des anderen übereinstimmt.

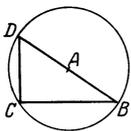


Abb. 244. Auflage des Zylinders.

Nur dieser kleine Unterschied wird durch Messung des Hebelausschlages mit dem Schraubenmikrometer bestimmt. Durch entsprechende Verstellung des Ausgleichgewichtes läßt

sich der Meßdruck unter 0,1 g halten. Bei allen Drahtmessungen ist, falls der Meßdruck nicht sehr klein ist, die Abplattung bei der Nullstellung und bei der Messung zu berücksichtigen<sup>1</sup>.

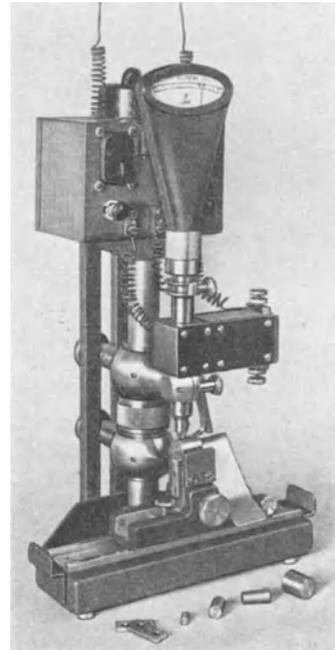


Abb. 245. Gestell zum Messen von Kegeln.

<sup>1</sup> Sehr feine Drähte lassen sich auch durch Projektion mit einer Genauigkeit von 0,5  $\mu$  messen. Bei größeren muß man den Vergleich mit einem Lehdorn vornehmen, da andernfalls infolge der optischen Abbildung gewisse Fehler auftreten können (4a). Die Gleichmäßigkeit des Durchmessers kann bei feinen Drähten aus der Gestalt der Beugungsstreifen ermittelt werden (2a).

Große Zylinder legt man besser auf 2 Walzen (Abb. 243). Um dabei den Durchmesser zu erhalten, muß die Achse des Meßbolzens durch die Achse  $A$  des Prüflings (Abb. 244) und die rechte feste Walze  $B$  gehen. Dazu muß die andere  $C$  so eingestellt werden, daß ein rechtwinkliges Dreieck entsteht, dessen Hypotenuse  $BD$  der Durch-

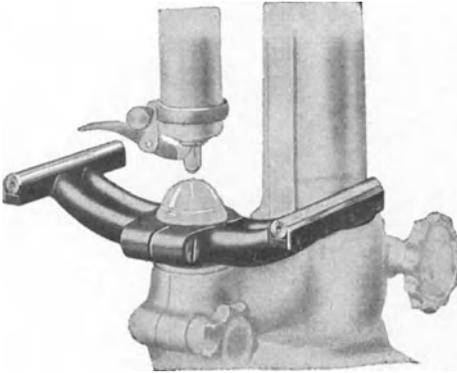


Abb. 246. Minimergestell zum Messen von Blechen.

messer des dem Dreieck  $DBC$  umschriebenen Kreises ist (4). Für kleinere Stücke kann man indessen auch einen ebenen Tisch nehmen. Richtet man ihn noch kippbar ein, so lassen sich auch die Durchmesser und die Ebenheit der Mantellinie von Kegeln (Kegelrollen) bestimmen, wie in Abb. 245 (die auch die Ausrüstung zur Signalgebung beim Über- oder Unterschreiten der Toleranz zeigt) (1 b). — Zum Messen von Blechen verwendet man zweckmäßig einen halbkugelförmig abgerundeten Tisch, wobei die Arme für ihn und für den Fühlhebel so geführt werden, daß der Meßbolzen stets über dem Pol der Kugel steht. Um das Halten des Prüflings zu erleichtern, sieht man noch einen Auflagetisch mit zwei gehärteten Walzen vor (Abb. 246).

Zum Messen an der Maschine setzt man den Fühlhebel in einen rachenlehrenähnlichen Bügel (Abb. 247), dem man noch einen verstellbaren Stütz-

anschlag gibt, damit man sicher ist, den Durchmesser zu erhalten. Für die beiden Meßflächen nimmt man, wie für alle von gekrümmten Flächen begrenzte Körper, ebene Flächen, während man bei ebenen Begrenzungen Kugelmeßbolzen

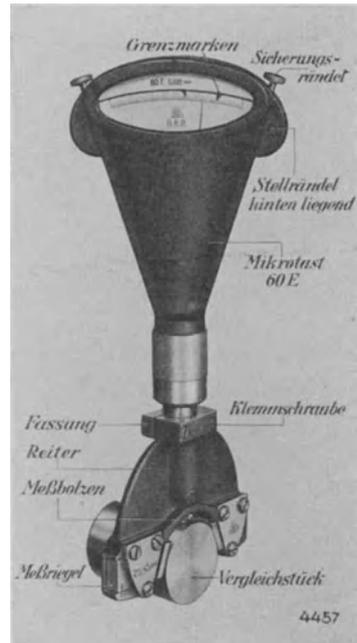


Abb. 248. Reiterlehre.

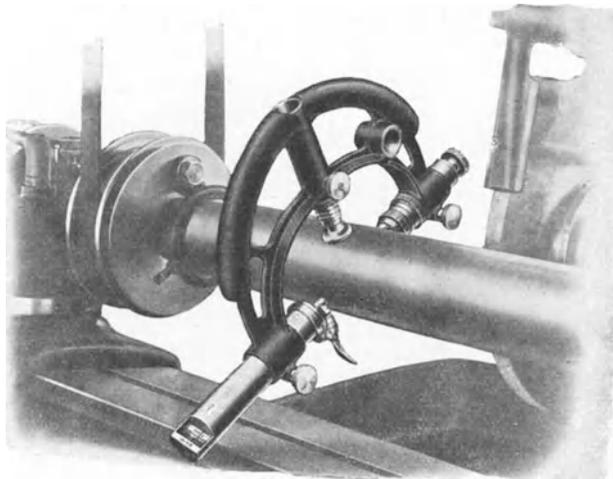


Abb. 247. Fühlhebel mit rachenlehrenähnlichem Bügel.

am Fühlhebel vorzieht, um von der genauen Parallelität der beiden Meßflächen unabhängig zu werden.

Besser dürfte noch die Reiterlehre (Abb. 248) geeignet sein<sup>1</sup> (6, 7), die im allgemeinen mit je 2 Meßflächen auf jeder Seite ausgebildet wird. Handelt es sich dagegen um die Messung schmaler Bunde, von Eindrehungen und dergleichen, so sieht man auf jeder Seite nur eine schmale Meßfläche vor, und muß dann durch Kippen in der Prüflingsachse den größten Ausschlag suchen. Der Reiterlehre kann man leicht einen solchen Winkel geben, daß der Fühlhebelausschlag  $m$  gleich dem Abmaß  $\delta$  der Durchmesser (oder  $\frac{\delta}{2}$  der Halbmesser) ist.

Aus Abb. 249 folgt

$$\begin{aligned} \delta &= d - d' = AB - CD = DB - CA = DB - m \\ &= r + FE - r' - m \\ &= \frac{\delta}{2} + \frac{FG}{\sin \frac{\alpha}{2}} - m \\ &= \frac{\delta}{2} \cdot \left( 1 + \frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} \right) - m \\ m &= \frac{\delta}{2} \cdot \left( \frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} - 1 \right). \end{aligned}$$

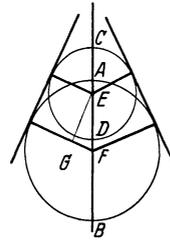


Abb. 249. Winkel der Reiterlehre.

Soll nun  $m = \delta$

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} - 1 &= 2, \\ \sin \frac{\alpha}{2} &= \frac{1}{3}, \end{aligned}$$

$$\frac{\alpha}{2} = 19^\circ 28' 16,7'', \quad \alpha = 38^\circ 56' 33,3''$$

sein.

Die Genauigkeit, mit der der Winkel  $\alpha$  (für den Fall  $m = \delta$ ) einzuhalten ist, ergibt sich daraus, daß ein Fehler  $f$  im Winkel  $\alpha$  einen Fehler  $F$  von  $\delta$  bewirkt, der sich berechnet aus

$$F = \pm f \cdot \frac{1}{4} \cdot \delta \cdot \frac{\cos \frac{\alpha}{2}}{\sin^2 \frac{\alpha}{2}} = \pm 2,1 \cdot \delta \cdot f.$$

Damit  $F < 0,1 \mu$  bleibt, muß bei

$$\begin{array}{ll} \delta = & 10 & 100 \mu \\ f < & 0,005 & 0,0005 \\ < \sim & 16 & 1\frac{1}{2} \text{ Min.} \end{array}$$

sein, so daß Innehaltung des Winkels auf etwa 5 Min. stets genügt.

Handelt es sich um die Bestimmung größerer Abmessungen, z. B. der Bombierung von Walzen (Abb. 250), so wählt man den Winkel der großen Reiterlehren so, daß  $m$  ein Bruchteil von  $\delta$ , etwa  $m = \frac{1}{5} \cdot \delta$  wird (1). Für diesen Fall ist

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} - 1 &= \frac{2}{5}, & \frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} &= \frac{7}{5}, \\ \sin \frac{\alpha}{2} &= 0,714 286, & \frac{\alpha}{2} &= 45^\circ 35' 5'', & \alpha &= 91^\circ 10' 10''. \end{aligned}$$

<sup>1</sup> Sie ist auch sehr gut zum Messen spiralgenuteter Reibahlen (mit ungleicher Zähnezahl) zu verwenden.

Zur Kontrolle der unveränderten Einstellung gibt man dem Arbeiter am besten eine Meßscheibe vom Kleinstmaß, für die großen Reiterlehren mit  $m \neq \delta$  auch wohl zwei Meßscheiben vom Kleinst- und Größtmaß. Die Messung soll man möglichst am ruhenden Werkstück ausführen, da die geringe Zeitersparnis beim umlaufenden Prüfling durch den größeren Lehrenverschleiß und die Gefahr der Verletzung des Arbeiters durch die mitgerissene Lehre mehr als aufgewogen wird (Ausführungen für Messung während der Bearbeitung siehe Abschnitt 14).

Zum Messen größerer Rundteile wie auch der Zylinderform (z. B. bei den Außenlaufbahnen von Lagerringen) verwendet man eine Wagerechanordnung (Abb. 306) mit in der Höhe verstellbarem und in der Achsenrichtung leicht beweglichem („schwimmenden“), sowie am besten auch dreh- und kippbarem Tisch. Eine andere Ausführung dafür ist der Meßtisch (Abb. 251)<sup>1</sup> (3). Durch einen Schlitz des Tisches ragen zwei Anschläge, die auf zwei Schienen hoch- und längsverstellbar sind. Die rechte Schiene ist fest, die andere kann an zwei Blattfedern in der Tischrichtung schwingen und wirkt auf das in ihrer Achse gelegene, grob- und feinverstellbare Minimometer (mit verlängertem Meßbolzen) ein. Die Bewegung der schwingenden Schiene ist rechts durch einen einstellbaren federnden Bolzen begrenzt, während sie in der mittleren Lage durch einen federnden Hebel gehalten wird. Um zu sehen, ob die Achse des Prüflings senkrecht zu seiner Stirnfläche liegt, werden die beiden Anschläge verschieden hoch gestellt und die Messungen nach Umdrehen des Prüflings wiederholt.

Müssen an abgesetzten Werkstücken mehrere Maße kontrolliert werden, so bringt man zwischen Meßbolzen und Prüfling zylindrische Endmaße solcher Längen, daß die Summe aus ihnen und dem betreffenden Maß des Werkstücks stets denselben Wert hat. Diese Endmaße kann man auch in einem Revolver anordnen. Zweckmäßig ist es auch, auf diesem einstellbare Anschläge vorzusehen, die man so justiert, daß der Fühlhebel bei richtigem Maß für jede Meßstelle auf 0 steht.

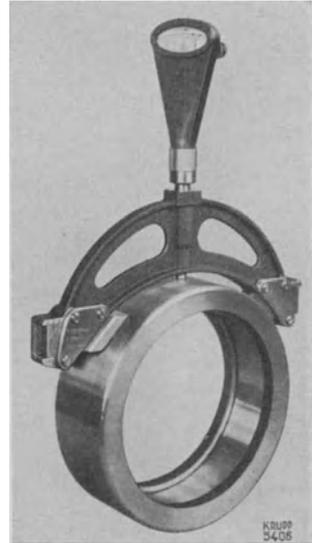


Abb. 250. Messung der Bombierung von Walzen mittels Reiterlehre.

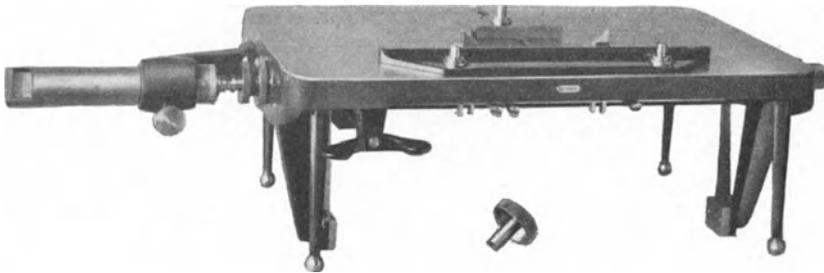


Abb. 251. Meßtisch.

Für Sonderzwecke, z. B. der Prüfung des radialen und axialen Rundlaufs von Kugellager-Außen- und -Innenringen, werden die Fühlhebel entsprechend ausgebildet (2, 4), worauf hier nur verwiesen werden kann.

Als Meßhütchen nimmt man bei Endmaßen und zum Prüfen von Zylindern auf Rundheit solche mit 2 Kugeln (Abb. 252a und c) und sucht den kleinsten bzw. größten Ausschlag auf. Zur Messung kleiner Endmaße und zum Vergleich von Zylindern mit Endmaßen wählt man besser ein Meßhütchen mit Schneide, das andere mit Kugel (Abb. 252b und d), während man zum Vergleich von Zylindern mit Lehdornen beide Meßhütchen mit Schneiden versieht (Abb. 252e). Für die Bestimmung von Kugellendmaßen

<sup>1</sup> In Abb. 251 sind die Ausleger zur Messung von Bohrungen eingestellt; für Außenmessungen werden sie um 180° gedreht.

wird man dagegen die beiden Meßhütchen mit ebenen Flächen ausrüsten (Abb. 252f). Bei senkrechten Fühlhebeln tritt natürlich an die Stelle des zweiten Meßhütchens der ebene Tisch.

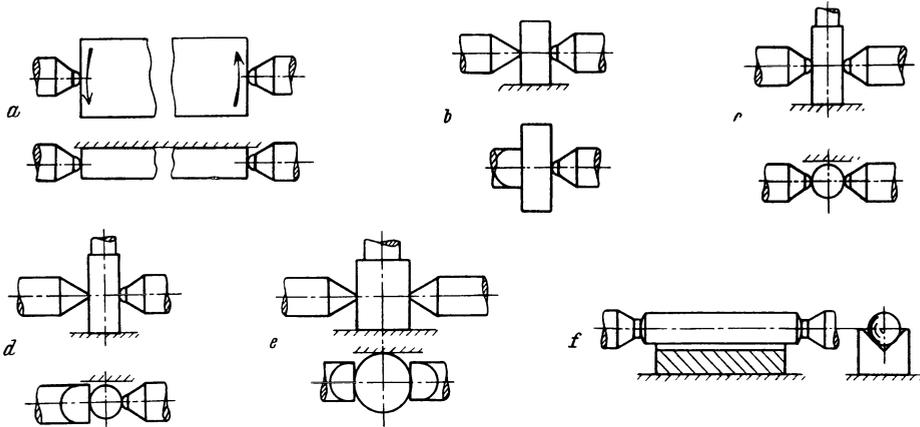


Abb. 252. Meßhütchen.

## 8. Optische Fühlhebel (Verlängerung des großen Hebelarms).

Durch sachgemäße Ausbildung der Lagerung ist es — wie in den vorstehenden Abschnitten ausgeführt — möglich geworden, die Länge des kurzen Hebelarms bis auf  $\frac{1}{10}$  mm zu verringern und dadurch brauchbare Fühlhebel bis zu 1000facher Übersetzung zu schaffen. Immerhin setzt dies aber eine außerordentlich genaue Ausführung voraus, auch dürfte es wohl kaum möglich sein, auf diesem Wege noch wesentlich weiter zu kommen. Man muß deshalb eine Vergrößerung des langen Hebelarms versuchen. Eine rein mechanische Verlängerung verbietet sich aber aus Festigkeits- und aus räumlichen Gründen. Diese Schwierigkeiten fallen fort, wenn man als langen Hebelarm einen Lichtzeiger nimmt, da dieser als gewichtslos beliebig lang gemacht und durch wiederholte Spiegelung auf einen kleinen Raum beschränkt werden kann. Dies bietet zugleich den Vorteil, den kleinen Hebelarm länger halten zu können, und gibt die Möglichkeit, die beiden Auflagerungen (Drehachse und oberes Ende des Meßbolzens) auf derselben Seite anzuordnen, wodurch sich bei Wahl gleicher

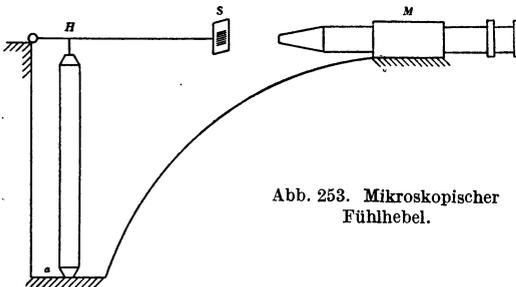


Abb. 253. Mikroskopischer Fühlhebel.

Abbildung für beide die Fehler fortheben, die daher rühren, daß die Bewegung des kurzen Hebelarms nicht in einer reinen Drehung, sondern in einem Abrollen besteht<sup>1</sup>. Außerdem werden auch die von der Abnutzung herührenden Fehler (die eine Änderung der Länge des kurzen Hebelarms bewirken) wesentlich kleiner.

Praktisch läßt sich die Vergrößerung des langen Hebelarms auf zweierlei Weise ausführen: man vergrößert den Ausschlag eines mechanischen Fühlhebels optisch (durch Mikroskop oder Projektion), oder man bewirkt durch die Verschiebung des Meßbolzens die Drehung

<sup>1</sup> Näheres darüber in der demnächst erscheinenden Arbeit von G. Bochmann (Diss. Techn. Hochsch. Dresden).

eines Spiegels, die man mittels Fernrohrs beobachtet (Methode der Poggendorffschen Spiegelablesung).

Das Prinzip eines mikroskopischen Fühlhebels (4), der im wesentlichen zur Schnelluntersuchung von Endmaßen bestimmt war, ist in Abb. 253 wiedergegeben. Auf die obere Meßfläche des an die Fläche  $a$  angesprengten Endmaßes legt sich ein Fühlhebel  $H$  der Übersetzung 1:10 bis 1:20 auf, der am Ende seines langen Armes eine Skala  $S$  mit 6 Strichen im Abstände von 0,1 mm trägt, während 2 Intervalle in 0,02 mm geteilt sind. Ihre Stellung wird mittels des feststehenden Mikroskops  $M$  mit 60facher Vergrößerung beobachtet, wodurch noch  $0,2 \mu$  geschätzt werden können. Die Justierung auf den genauen Wert erfolgt durch Änderung des Abstandes der Skala von der Achse mittels einer Schraube. Damit

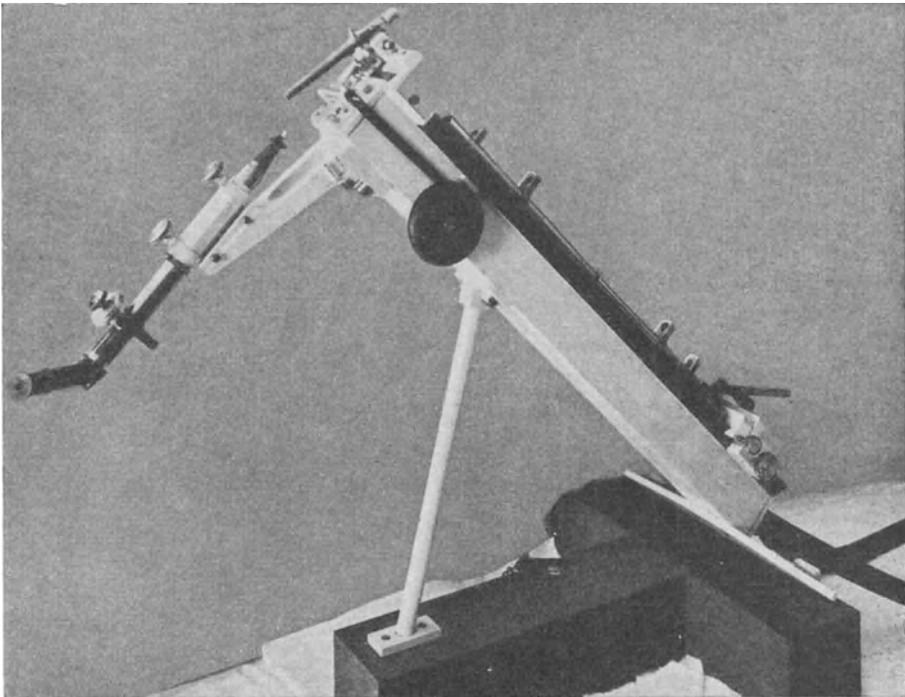


Abb. 254. Schnellvergleichler für zylindrische Endmaße.

die Genauigkeit auch wirklich ausgenutzt werden kann, muß nach Abschnitt 2 der Übersetzungsfehler des mechanischen Hebels möglichst klein gehalten werden, also vor allem seine Lagerung sehr sorgfältig ausgebildet sein; sie besteht hier aus zwei am Hebel befestigten federnden Zungen, in deren Trichterlager die kugelförmigen Enden der Lagerschrauben eingreifen. Zylindrische Endmaße bis 500 mm Länge werden mit dem Apparat nach Abb. 254 untersucht. Sie ruhen in den Nuten eines unter  $45^\circ$  geneigten, gußeisernen, durch strömendes Wasser zu temperierenden Bettes, auf dem ein Anschlag mit der unteren Auflagefläche verschiebbar ist; er besteht aus einem Stahlzylinder, dessen obere Fläche auf 1 mm abgedreht und gegen Beschädigung durch Stoß geschützt ist. Oben legt sich auf das Endmaß ein ähnlicher Zylinder, auf den erst der Fühlhebel aufsitzt. Wählt man die Durchmesser der Anschlagzylinder abweichend von dem der Endmaße, so kann man auch die Parallelität und Ebenheit der Meßflächen durch

Messung der Länge an verschiedenen Punkten ermitteln (statt des mikroskopischen kann man natürlich auch einen anderen Präzisions-Fühlhebel anbringen).

Die Vorrichtung zum Vergleich rechteckiger Endmaße ist grundsätzlich ähnlich gestaltet; sie werden auf eine Schneide und eine Spitze aus Stahl gelegt und automatisch gegeneinander vertauscht. Bei den vorgenommenen Vergleichsmessungen wurde eine Genauigkeit von  $0,2\mu$  erreicht.

Die Vergrößerung des Zeigerausschlages durch Projektion wird bei einem Prüfapparat des National Physical Laboratory (Abb. 255) benutzt (2, 5, 8). Die zu vergleichenden Endmaße werden zwischen die Anschläge  $a$  und  $b$  gebracht, von denen der 3 Stahlkugeln tragende  $a$  längs der an der Platte  $G$  vorgesehenen

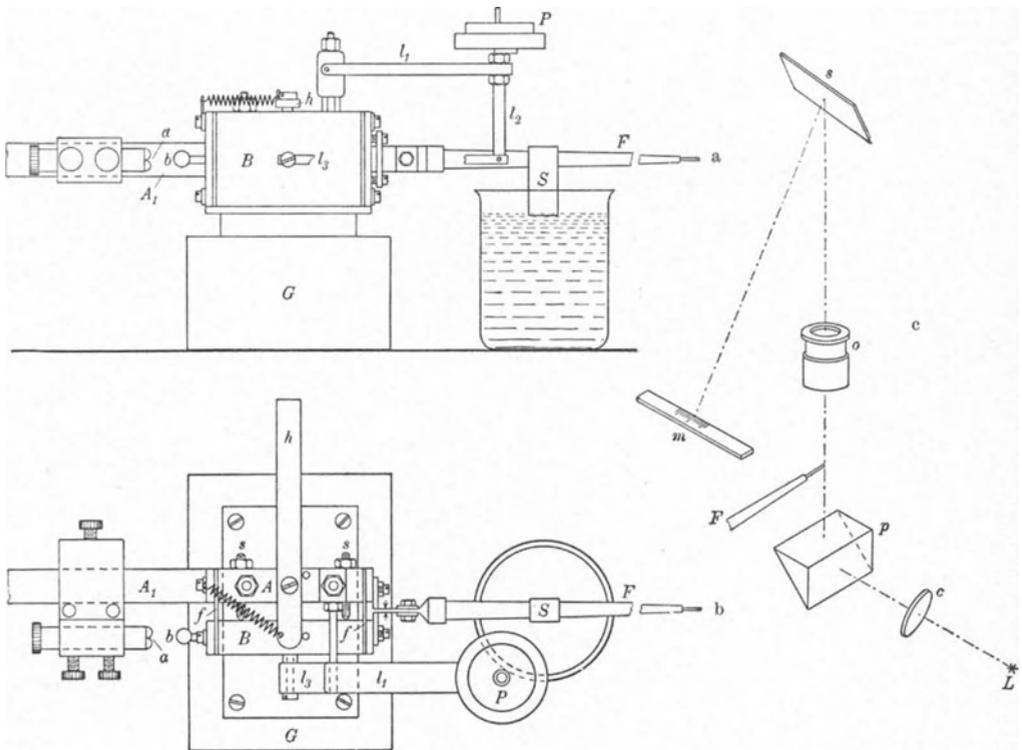


Abb. 255. Projektionsfühlhebel.

Prismenführung  $A_1$  verschoben und festgeklemmt werden kann, während der mit 1 Kugel versehene Anschlag  $b$  an einer Schiene  $B$  sitzt, die mit  $A$  durch 2 Blattfedern gelenkig verbunden ist und somit innerhalb eines durch Anschläge begrenzten Bereiches in ihrer Achsenrichtung schwingen kann. Der gleichbleibende Meßdruck wird durch die an die Hebel  $l_1, l_2$  angreifenden Gewichte  $P$  erzeugt. Die Bewegung der Schiene  $B$  wird durch den Fühlhebel  $F$  vergrößert angezeigt, dessen kurzer Hebelarm durch den kleinen Abstand (von  $0,5\text{ mm}$ ) zweier Blattfedern gebildet wird (siehe Abb. 255 b), von denen je eine mit  $A$  und  $B$  verbunden ist. Sie tragen den langen nadelförmigen Zeiger  $F$ , der durch den Schwimmer  $S$  ausbalanciert und zugleich gedämpft ist. Die mechanische Übersetzung ist 350fach, so daß ein  $1\mu$  entsprechendes Intervall eine Größe von  $0,35\text{ mm}$  hat. Von dem Zeigerende wird nun mittels des aus Lampe  $L$ , Kondensator  $c$ , Ablenkprisma  $P$  und Objektiv  $o$  bestehenden Projektionssystems, unter

Reflexion der Strahlen an dem in größerer Höhe angebrachten Spiegel  $s$ , auf die Skala  $m$  ein Bild mit etwa 50facher Vergrößerung entworfen (Abb. 255c), so daß  $1 \mu$  hier einem Ausschlag von 18 mm entspricht. Neuerdings ist die Zeigerspitze als Ring mit einem darüber gespannten Faden ausgebildet und die Übersetzung auf 1:100000 gesteigert (6). Es ist indessen zu beachten, daß dadurch die Ablese-, nicht aber die Instrumentenfehler verringert und also die Meßgenauigkeit

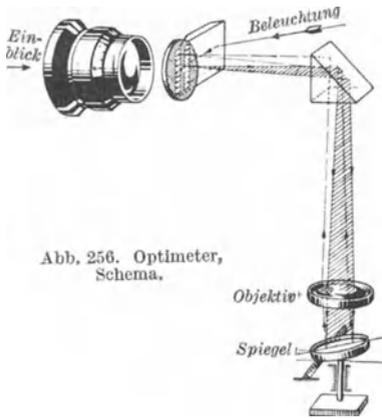


Abb. 256. Optimeter,  
Schema.

durchaus nicht in demselben Verhältnis erhöht ist. Gerade dies gibt Veranlassung zu dem Hinweis, daß Ablesen und Messen zweierlei ist.

Die Verwendung des Kippspiegels bei einem Dickenmesser ist bereits 1911 von Fennel angegeben<sup>1</sup> (3). Eine für den Gebrauch in der Industrie geeignete Gestaltung hat dieses Prinzip in dem Optimeter von Zeiss gefunden

(Abb. 256), das man als Kombination aus Kippspiegel und Autokollimationsfernrohr bezeichnen kann, während es sich in seinem äußeren Aufbau und in seiner sonstigen Gestaltung an das Minimometer anlehnt<sup>2</sup>. Im Brennpunkt des Objektivs befindet sich eine Skala, die durch ein kleines seitliches Prisma beleuchtet wird. Die von ihm ausgehenden Strahlen verlassen das Objektiv als Parallelbündel, werden von dem Spiegel (mit einer kleinen Seitenkipfung) zurückgeworfen und in der Brennebene wieder zu einem (etwas seitlich gelegenen) Bilde der Skala vereinigt, dessen Lage gegen eine feststehende Marke mittels des als Lupe wirkenden Okulars beobachtet wird (Abb. 257). Der optisch ebene Stahlspiegel ruht auf 2 Stahlkugeln<sup>3</sup> und dem mit einer Kugel gleicher Größe versehenen oberen Ende des Meßbolzens auf und wird durch eine Feder mit konstantem Druck dagegen gelegt.

Eine Verschiebung des Meßbolzens um die Strecke  $s$  (Abb. 258) bewirkt eine Drehung um den Winkel  $\varphi$ , der sich aus

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{s}{b}$$

berechnet. Da der ursprünglich senkrecht auftreffende Lichtstrahl nun um den Winkel  $2 \cdot \varphi$  abgelenkt wird, so gilt ferner

$$\operatorname{tg} 2 \cdot \varphi = \frac{S}{B}$$

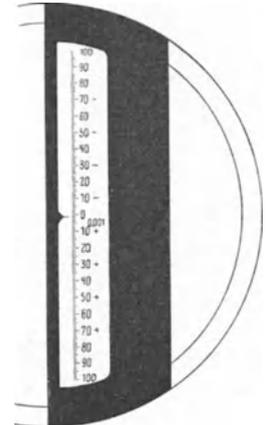


Abb. 257. Optimeter,  
Gesichtsfeld.

Abb. 258. Wirkung des Kippspiegels.

<sup>1</sup> Erwähnt sei, daß schon Steinheil (7) eine Art optischen Fühlhebels benutzt hat, indem er an die Enden der beiden zu vergleichenden Maßstäbe je einen Spiegel anpreßte und den Winkel zwischen beiden mit zwei in gleicher Achse aufgestellten Fernrohren maß, wobei er eine Genauigkeit von  $0,01 \mu$  erreicht haben soll. Noch etwas älter ist die Konstruktion von Joseph Saxton (1837), der einen vertikalen Spiegel verwendete, um dessen Achse eine feine Kette geschlungen war, die an dem Meßbolzen befestigt wurde, der sich gegen das Endmaß legte (1).

<sup>2</sup> Auch beschrieben in (9).

<sup>3</sup> In Abb. 256 ist noch die Schneide der älteren Ausführung wiedergegeben.

und damit, da es sich um kleine Winkel handelt,

$$\frac{S}{s} = 2 \cdot \frac{B}{b}.$$

Folglich ist die Übersetzung  $2 \cdot \frac{B}{b}$  und infolge der Betrachtung der Skala durch das Okular der Vergrößerung  $V$

$$U = 2 \cdot \frac{B \cdot V}{b}.$$

Da  $B = 200$  mm,  $b = 5$  mm und  $V = 12$  ist, so wird  $U = 960$ ; das in der Größe von 0,96 mm erscheinende Intervall entspricht somit einer Verschiebung des Meßbolzens um  $1 \mu$ , wobei  $\frac{1}{10} \mu$  bequem geschätzt werden können. Die Ablesung läßt sich noch etwas verfeinern, wenn man vor das Okular eine Lupe (Mikroskop-Okular) bringt, das mit einer Meßvorrichtung (Okular-Schraubenmikrometer oder Strichplatte) versehen ist, oder wenn man einen mechanischen Fühlhebel vorschaltet (1a, 5a). Man ersieht aus diesen Angaben, daß es durch die optische Vergrößerung gelungen ist, bei  $\sim 1000$ facher Übersetzung dem kurzen Hebelarm die beträchtliche Länge von 5 mm (gegenüber 0,1 mm beim Minimeter und Mikrotast) zu geben. Infolgedessen spielen die durch das Abrollen bei der Drehung und durch das radiale Spiel des Meßbolzens in seiner Führung bewirkten Änderungen des kurzen Hebelarms kaum eine Rolle, und ist es ferner möglich geworden, den Instrumentenfehler unter  $0,1 \mu$  zu halten. Der Meßdruck beträgt  $180 \pm 6$  g. Dadurch, daß sich das Spiegelbild der Skala an dem feststehenden Index vorbeischiebt, ließ sich der Meßbereich auf 200 Skt. (entsprechend 0,2 mm) ausdehnen, was bisher von keinem mechanischen Fühlhebel gleicher Übersetzung erreicht ist.

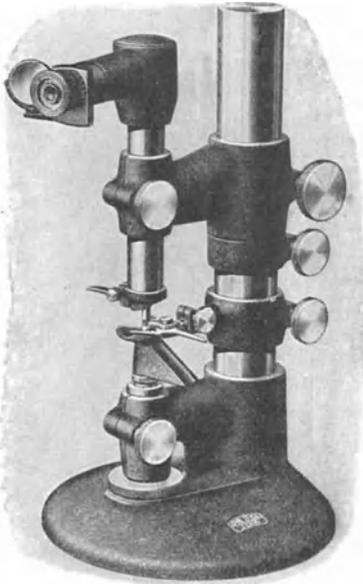


Abb. 259. Optimetergestell zum Messen von Kugeln.

Der Meßbereich von 0,2 mm (bei einer Empfindlichkeit von 1 Skt. gleich  $1 \mu$ ) läßt sich auf rund 0,6 mm erweitern (wobei dann 1 Skt.  $5 \mu$  entspricht), indem die Brennweite auf etwa die Hälfte verkürzt und der mechanische Hebelarm etwas länger gehalten wird. Andererseits kann man durch entsprechende optische Ausgestaltung (bei unverändertem kurzem Hebelarm) die Empfindlichkeit auf 1 Skt. gleich  $0,1 \mu$  (bei naturgemäß etwas verringertem Meßbereich) steigern.

Üblicherweise wird das Optimeter mit einem Tischstativ versehen (ähnlich Abb. 234). Eine Sonderausführung zum Messen von Kugeln zeigt Abb. 259; sie werden zwischen den Meßflächen mittels einer Schere gehalten und durch eine seitliche Bewegung dieser nach der Messung in die Rinne befördert, in der sie abwärts rollen. Das Wagrecht-Optimeter ist in Abb. 306 wiedergegeben. Durch eine kleine Zusatzeinrichtung kann auch der Ausschlag des Optimeters auf eine Mattscheibe geworfen (Abb. 260) und dadurch die Ablesung erleichtert werden, da dann das Auge nicht ständig an seine Stellung gefesselt ist (11, 12).

Die Beobachtung der Kippung des Spiegels durch objektive Ablesung (Projektion) ist bei dem Fühlhebel von Sears verwendet (8), dessen äußerer Aufbau an die Meßmaschinen erinnert (Abb. 261) und der gewissermaßen eine Kombination von mechanischem Fühlhebel und Kippspiegel darstellt. Der feste Anschlag  $A$  läßt sich in dem rechten festen Support verschieben und festklemmen, während der andere,  $B$ , auf 2 Blattfedern  $a$  und  $b$  ruht und durch Winkelhebel und Gewicht  $G$  mit konstantem Druck immer nach rechts gezogen wird. Durch vier an seinem linken Ende angreifende Schrauben  $c$  läßt sich seine Meßfläche

parallel zu der von *A* ausrichten. Seine (kleinen) Bewegungen werden unter Berührung von Stahlkugel und -platte auf den senkrechten Schenkel des Winkelhebels *C* der Übersetzung 1:10 übertragen, dessen Gelenk von 2 Paar senkrecht zueinander stehenden Blattfedern *dd* gebildet wird. Er dreht sich dabei ohne (äußere) Reibung und toten Gang um die Schnittlinie der beiden durch die neutrale Achse der Federn gehenden Ebenen; senkrecht darüber befindet sich auch der Kontakt zwischen Stahlkugel und -platte. Durch die Bewegung des längeren Hebelarms *e* wird der kleine leichte Linsenspiegel *D* mit einer Brennweite von 80'' gekippt, der mit 3 Stahlkugeln auf je zwei in entsprechenden Nuten liegenden Stahlzylindern ruht, und dessen Drehung durch Spiegelung eines Lichtstrahls an dem um 5 1/2' höher stehenden Spiegel *E* auf der Skala *F* angezeigt wird. Dadurch ist eine Gesamtübersetzung von 1:26400 erreicht, so daß eine Verschiebung von *B* um 1 μ einen Ausschlag von 26,4 mm gibt. Dies ist auch nur eine Steigerung der Ables-, nicht aber der Meßgenauigkeit. Die Eichung erfolgt durch Endmaße oder besser interferentiell (10).

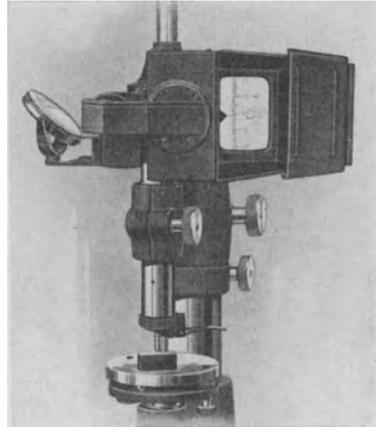


Abb. 260. Optimeter mit objektiver Beobachtung.

Um jene Ablesgenauigkeit auszunutzen, muß der feste Spiegel *s* (Abb. 262) sehr gut eben sein. Sind zwei benachbarte Stellen etwa um den Winkel  $d\varphi$  gegeneinander geneigt, so wird ein einfallender Strahl *A* von beiden in die Richtungen *B* und *C* reflektiert. Dadurch

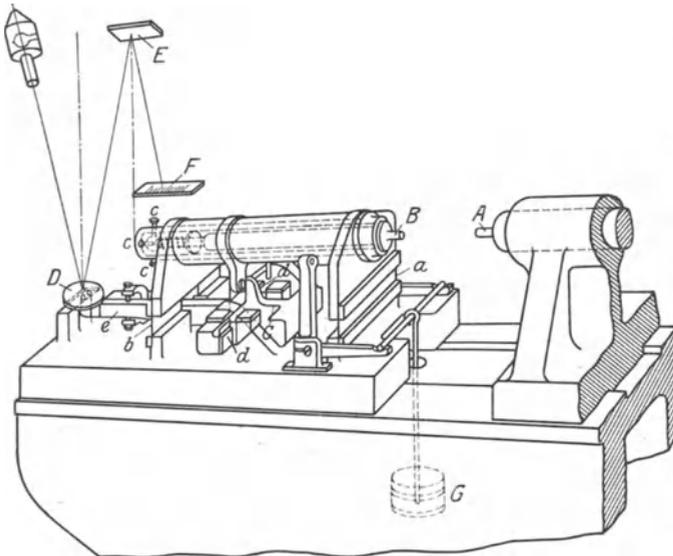


Abb. 261. Fühlhebel von Sears.

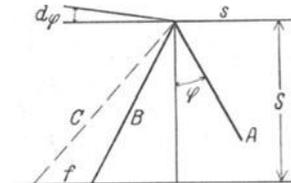


Abb. 262. Genauigkeit des Spiegels.

tritt ein Fehler *f* ein, der sich berechnet aus

$$\begin{aligned}
 f &= S \cdot [\operatorname{tg}(\varphi + 2 \cdot d\varphi) - \operatorname{tg} \varphi] \\
 &= S \cdot \left[ \frac{\operatorname{tg} \varphi + 2 \cdot d\varphi}{1 - 2 \cdot d\varphi \cdot \operatorname{tg} \varphi} - \operatorname{tg} \varphi \right] \\
 &= S \cdot \frac{2 \cdot d\varphi \cdot (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)}{1 - 2 \cdot d\varphi \cdot \operatorname{tg} \varphi} \\
 &\sim 2 \cdot S \cdot d\varphi,
 \end{aligned}$$

da ja  $\varphi$  stets ein kleiner Winkel sein wird.

Soll  $f < 0,1 \mu$  bleiben, so muß für  $S = 2000 \text{ mm}$   $d\varphi < 2,5 \cdot 10^{-5}$  oder kleiner als 5 Sek. sein. Nimmt man der Einfachheit halber an, daß in der Nullstellung der einfallende Strahl senkrecht auf die Skala zurückgeworfen wird (Abb. 263), so ergibt sich für den äußersten noch zur Wirkung kommenden Strahl die Spiegelgröße *s* gleich der halben Skalenlänge *L*; wählt man (bescheiden)  $L = 200 \text{ mm}$ , so muß also *s* mindestens gleich 100 mm sein. Nimmt man ferner an, daß die einzelnen ebenen Spiegelflächenstücke eine Länge von 10 mm haben,

so muß die Unebenheit über die ganze Länge von 100 mm (mit genügender Annäherung) kleiner als  $2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 10$  mm, also kleiner als  $0,25 \mu$  sein. Das sind Bedingungen, deren Innehaltung, namentlich bei noch größeren Spiegeln, doch gewisse Schwierigkeiten macht.

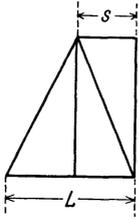


Abb. 263.  
Genauigkeit des  
Spiegels.

## 9. Interferenz- und Libellenführlhebel.

Auf die Benutzung der Interferenzen gleicher Dicke zur Messung von Längenunterschieden ist bereits früher hingewiesen, wo eine Ausführungsform für einen Interferenzführlhebel gezeigt ist (siehe Abb. 137)<sup>1</sup>. Sehr empfindliche Führlhebel lassen sich auch mittels einer Röhrenlibelle herstellen, die ja, wie auch der Kippspiegel, ein sehr genaues Winkelmeßinstrument ist.

Sie ist um 1660 von dem französischen Wegebauingenieur Melchisédec Thevenot erfunden und bestand ursprünglich aus einem mit Flüssigkeit nahezu gefüllten gebogenen Glasrohr. Sie wurde zunächst ziemlich allgemein mit Mißstrauen betrachtet und führte sich nur langsam ein. In der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts finden wir sie indessen bereits vielfach zum Ausrichten bei der Montage, während man früher dafür Nadelniveaus verwendete, die aus einem auf einer Spitze gelagerten kleinen Pendel bestanden, das nach oben in einen kleinen Knopf endete, der sich unter einer Glas- teilung verschob. Im Bergbau benutzte man eine an einem Roßhaar aufgehängte Bleikugel, die sich vor einem senkrechten Brett mit Gradteilung in einer halbkreisförmigen Rinne bewegte. Für den Maschinenbau brauchbare Ausführungen der Libelle wurden in den achtziger Jahren von Brown und Sharpe auf den Markt gebracht (1), während sie in der Feinmechanik bereits viel früher zu hoher Vollendung gelangt waren.

Seit der Mitte des 18. Jahrhunderts besteht die Libelle aus einem Glasrohr, das innen nach einer bestimmten Krümmung ausgeschliffen ist, da sich nur so ein konstanter Krümmungshalbmesser erzielen läßt, und das bis auf eine kleine Blase mit Äther gefüllt wird. Der auch dafür gebräuchliche Name Wasserwaage ist also ziemlich irreführend (Wasser würde das Glas angreifen, wodurch die freie Beweglichkeit der Blase gestört werden würde; man könnte sie deshalb wohl besser als Einrichtwaage bezeichnen). Die Ätherdampfblase stellt sich in dem Rohr stets auf die höchste Stelle ein. Wird nun die Libelle aus ihrer symmetrischen Anfangsstellung (Abb. 264) um den Winkel  $\varphi$  gekippt, so verschiebt sich die Blase um den Bogen  $L$  (der mit genügender Annäherung durch die Tangente ersetzt werden kann und), der sich berechnet aus:

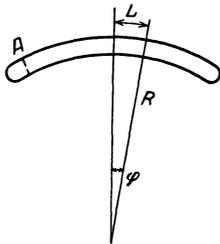


Abb. 264. Röhrenlibelle  
(schematisch).

$$L = R \cdot \varphi \quad (\varphi \text{ in Bogenmaß})$$

oder

$$L = \frac{R \cdot \varphi}{206000} \quad (\varphi \text{ in Sek.}; 1'' = 4,85 \cdot 10^{-6}).$$

Die Empfindlichkeit ist somit

$$E = \frac{L}{\varphi} = \frac{R}{206000} \text{ mm/Sek.}$$

Für eine Empfindlichkeit von  $\frac{1 \text{ mm}}{1 \text{ Sek.}}$  braucht man also einen Krümmungshalbmesser von 206 m. Häufig erfolgt die Einteilung auf dem Glasrohr noch nach Pariser Linien (= 2,2558 mm) oder in Doppelmillimetern; für eine Empfindlichkeit von  $\frac{1 \text{ Sekt.}}{1 \text{ Sek.}}$  muß der Halbmesser 466 bzw. 412,5 m sein. Derartig empfindliche Libellen kommen aber nur für das Meßlaboratorium in Frage. Für die gewöhnlichen Anwendungsgebiete des Maschinenbaues reicht eine Empfind-

<sup>1</sup> Ein Interferenzführlhebel ist bereits 1893 von Hamy (2) speziell zum Prüfen des Rundlaufens von Lagerzapfen angegeben.

lichkeit von  $\frac{1 \text{ bis } 2 \text{ Skt.}}{1 \text{ Min.}}$  (Halbmesser etwa 7 bzw. 14 m) wohl immer aus. Meist gibt man nicht die Empfindlichkeit in  $\frac{\text{Skt.}}{\text{Min.}}$ , sondern die Höhe an, die ein rechtwinkliges Dreieck von 1 m Basis haben muß, um einen Ausschlag von 1 Skt. zu erzeugen. Für einen Winkel von 1 Min. berechnet sich diese Höhe zu  $4,85 \cdot 10^{-6} \cdot 60 \cdot 1000 = 0,2909 \text{ mm}$ , und umgekehrt entspricht einer Empfindlichkeit von  $\frac{1 \text{ mm}}{1 \text{ m}}$  eine Winkelempfindlichkeit von  $\frac{1 \text{ Skt.}}{3,4 \text{ Min.}}$ . Zum Verlegen von Rohrleitungen im Baugewerbe benutzt man gröbere Libellen, die nur aus einem gebogenen Rohr bestehen und meist mit Alkohol gefüllt sind (Normung der Einrichtwaagen siehe S. 208).

Ähnlich wie vorher angedeutet, bestimmt man die Empfindlichkeit mittels des sogenannten Libellenprüfers. Er besteht aus einer ebenen Platte *A* (Abb. 265), die um 2 Kugeln oder zwei kugelig abgerundete Schrauben *B* gekippt werden kann. Unter den kugligen Anschlag *D* werden Endmaße *M* geschoben (in der Regel verwendet man statt der Endmaße ein Schraubenmikrometer). Eine Änderung von *M* um *e* mm gibt eine Winkeländerung  $\varphi = \frac{e}{L}$ . Mit

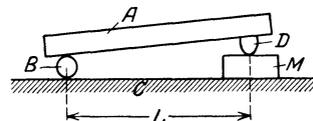


Abb. 265. Libellenprüfer.

einem nach  $\mu$  abgestuften Endmaßsatz ist es nun leicht möglich,  $e = 1 \mu$  zu machen. Es wird dann  $\varphi = 1 \text{ Sek.}$  ( $4,85 \cdot 10^{-6}$ ), wenn man den Abstand  $L = 206,2 \text{ mm}$  macht.

Die Libellen sind sehr empfindlich gegen Temperaturänderungen, da dadurch leicht eine Deformation des Glasrohres und damit eine Änderung ihres Halbmessers und somit auch der Empfindlichkeit eintritt. Wegen der Unvollkommenheit des Schliffs kann man auch die Zehntelschätzung der Skt. nicht mehr völlig ausnutzen, man muß sich vielmehr bei einer Empfindlichkeit von  $\frac{1 \text{ Skt.}}{1 \text{ Sek.}}$  mit einer Genauigkeit von  $\pm \frac{1}{4}$  bis  $\frac{1}{3}$  Skt. zufrieden geben.

Zweckmäßig benutzt man deshalb die Libelle nicht zur Messung von Winkeln oder Längenunterschieden, sondern nur als Nullinstrument. Da der Einstellfehler der Libelle umgekehrt proportional ihrer Blasenlänge ist (6) und diese sich mit der Temperatur stark ändert, so versieht man sie auch wohl mit einer sogenannten Kammer, das heißt man trennt einen Teil des Rohres durch eine Glaswand *A* ab (Abb. 264), die eine kleine Öffnung am Grunde besitzt, durch die man in umgekehrter Stellung einen Teil des in der Blase enthaltenen Dampfes in die Kammer bringen, bzw. bei zu kurzer Blase aus der Kammer entnehmen kann.

Um den Einfluß der Temperatur herabzusetzen, umgibt man die Libelle mit einem Schutzrohr, wozu man am besten einen Nickelstahl von der Ausdehnung des Glases nimmt, da dann alle Deformationsbeanspruchungen durch ungleichmäßige Ausdehnung in Fortfall kommen. In diesem Rohr wird die Libelle zwangs- und spannungsfrei, etwa auf Schneiden mit sanftem Federdruck gehalten, gelagert<sup>1</sup>. Das Fassungsrohr wird, um den Wärmeschutz noch zu verbessern, in ein äußeres Schutzrohr so gelagert, daß es sich zwangsfrei ausdehnen kann. Dieses trägt auch die ebene Grundplatte (Sohle), mit der die Libelle aufgesetzt wird [bei den großen Schwierigkeiten der Herstellung größerer gut ebener Flächen ist es für die Untersuchung sehr genauer Flächen besser, die Auflage nicht auf der ganzen Fläche erfolgen zu lassen, sondern sie auf 2 Linien oder auf 3 Punkte (z. B. durch drei gleiche Kugeln) zu beschränken].

<sup>1</sup> Diese Methode ist der früheren weit überlegen, bei der man das Glasrohr an den Enden mit in Wachs getränkten Baumwollfäden umwickelte und sie dann in Kork faßte (3).

Für das Ausrichten der wagerechten Lage muß nun die Libelle so gefaßt sein, daß die Blase beim Aufsetzen auf eine wagerechte Fläche auf 0 einspielt. Die in der Technik gebrauchten Einrichtwaagen (Abb. 266), deren Sohle vielfach

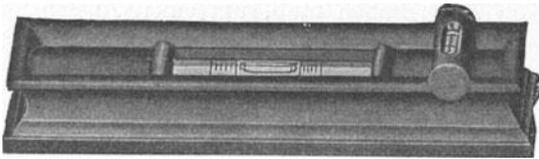


Abb. 266. Einrichtwaage.

auch zugleich als Prisma ausgebildet ist, werden bei der Herstellung entsprechend hingearbeitet. Feinere Libellen müssen aber mit einer Justiereinrichtung versehen sein, die gestattet, dem Fassungsrohr mit der Libelle eine gewisse Neigung

gegen die Sohle (und das äußere Schutzrohr) zu geben. Dies erfolgt mit der in Abb. 267 a rechts sichtbaren Schraube, die die Libelle um die an ihrem linken Ende befindliche wagerechte Achse zu kippen gestattet (zweckmäßiger wird die

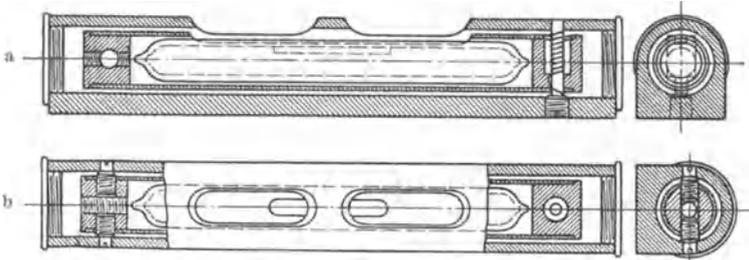


Abb. 267. Röhrenlibelle in Fassung.

Schraube von oben zugänglich gemacht). Zur Justierung benötigt man einen Tisch mit ebener Platte und 3 Fußschrauben *a*, *b*, *c* (Abb. 268). Man stellt die Libelle parallel zur Linie *a b* in der Lage *L*, am besten nach Unterlegen zweier

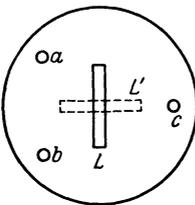


Abb. 268. Justierung der Libelle.

gleicher Parallelenmaße, um von den Unebenheiten der Tischplatte unabhängig zu werden, und justiert den Tisch mit Hilfe der Schrauben *a* und *b* so, daß die Libelle einspielt. Die dabei auftretenden Verhältnisse werden am klarsten, wenn man sich,

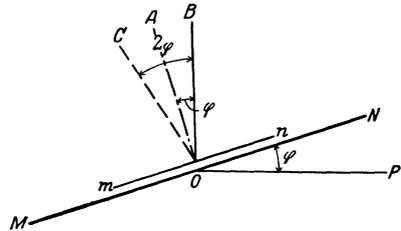


Abb. 269. Justierung der Libelle.

wie in Abb. 269, die Blase durch einen auf der Sohle *mn* stehenden Stab *OB* ersetzt denkt. Ist dieser nicht senkrecht zu *mn*, sondern weicht er von der Senkrechten *OA* um den Winkel  $\varphi$  ab, so wird man, damit *OB* senkrecht steht, beim Justieren dem Tisch die Lage *MN* geben müssen, die mit der Wagerechten *OP* gleichfalls den Winkel  $\varphi$  bildet. Dreht man jetzt die Libelle (bei ungeändertem Tisch *MN*) um  $180^\circ$ , so geht *OB* in die Lage *OC* über, die mit *OB* den Winkel  $2 \cdot \varphi$  bildet (bzw. einen entsprechenden Ausschlag der Blase bewirkt). Beseitigt man jetzt den halben Ausschlag ( $\varphi$ ) durch Kippen des Tisches, so kommt dieser in die wagerechte Lage *OP*, und beseitigt man weiter die restliche Hälfte des Ausschlages durch Korrektur der Libelle, so kommt der Stab *OC* in die zu *mn* senkrechte Lage *OA*. Da man nun beim erstenmal nicht genau je den halben Betrag des Ausschlags erfassen wird, so ist das geschilderte Verfahren nach jedesmaliger Drehung um  $180^\circ$  mehrmals zu wiederholen, bis die

Libelle in beiden Lagen einspielt. Dann ist die Libelle richtig justiert und sind auch alle zur Linie  $a b$  parallelen Geraden wagerecht. Will man die ganze Tischfläche horizontieren, so setzt man die Libelle jetzt in die Lage  $L'$  (senkrecht zur Linie  $a b$ ) und bringt einen etwaigen Ausschlag durch Betätigung der Schraube  $c$  zum Verschwinden (an der Libelle darf selbstverständlich nichts mehr verstellt werden). Nach längeren Pausen ist die Libelle jedesmal in der angegebenen Weise auf ihre Richtigkeit zu prüfen und, wenn nötig, zu berichtigen, da sich das Rohr bei Temperaturänderungen etwas krümmt.

Sehr erwünscht ist es auch, wenn die Achse des Rohres in seitlicher Richtung parallel zur Mittellinie der Grundplatte ist, da man sie nur so genügend genau in die Lage  $L$ , parallel zur Linie  $a b$ , stellen kann. Man prüft dies dadurch, daß sich in dieser Stellung bei kleiner Betätigung der Schraube  $c$  der Ausschlag nicht ändern darf. Gegebenenfalls justiert man die Libelle mittels der in Abb. 267 b links sichtbaren Schrauben, die eine Drehung um die am rechten Ende befindliche senkrechte Achse gestattet. Besonders wichtig ist diese Justierung bei den sogenannten Reiterlibellen, die mit zwei V-förmigen Füßen auf Zylinder gesetzt werden.

Kombiniert man die Libelle mit einem guten Stahlwinkel, so läßt sich damit auch die Lage senkrechter oder irgendwie geneigter Flächen kontrollieren<sup>1</sup>.

Die Libelle läßt sich nun zu einem sehr empfindlichen Fühlhebel ausbilden, wie dies schematisch in Abb. 270 angedeutet ist. Eine Verschiebung des Meßbolzens  $B$  um die Strecke  $e$  bewirkt eine Kippung der um 2 Stahlkugeln  $A$  drehbaren Libelle um den Winkel

$$\varphi = \frac{e}{l}.$$

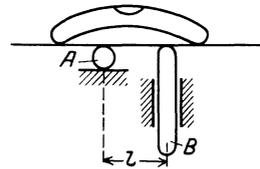


Abb. 270. Libellenfühlhebel.

Bei einem Hebelarm  $l = 10 \text{ mm}$  und einer Verschiebung  $e = 1 \mu$  wird  $\varphi$  gleich  $10^{-4}$  oder angenähert 20 Sek. Da nun die Libelle eine Empfindlichkeit von  $\frac{1 \text{ Skt.}}{1 \text{ Sek.}}$  besitzen kann und man bis zu 0,25 Skt. zu schätzen vermag, so läßt sich

auf diese Weise eine Messung bis auf etwa  $0,02 \mu$  ermöglichen. Voraussetzung ist dazu nur, daß die ganze Apparatur während der Messung keine Drehung erlitten hat, weshalb man an der Fußplatte noch eine zweite (empfindlichere) Libelle zur Kontrolle der unverändert gebliebenen Aufstellung anbringt.

In ähnlicher Weise läßt sich die Libelle gut zum Vergleich von Endmaßen verwenden (Abbildung. 271); diese werden an eine ebene Grundplatte angesprengt, die Libelle legt sich auf  $A$  mit 2, auf  $B$  mit 1 Kugel auf. Durch Umdrehen der

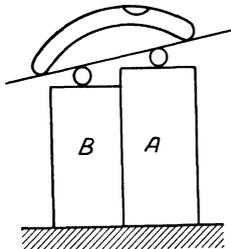


Abb. 271. Vergleich von Endmaßen mittels Libelle.

Libelle um  $180^\circ$  wird der Ausschlag noch verdoppelt und wird man unabhängig von ihrer Nullstellung. Dies dürfte zweckmäßiger sein als ein Vertauschen der Endmaße durch Drehen ihrer Unterlage, da hierdurch leicht eine zusätzliche Kippung hervorgerufen werden kann.

Die Ablesung ist noch nach Abb. 272 so ausgestaltet, daß man mit Hilfe eines Spiegels  $Sp$ , an dem zwei Streifen entfernt sind, zugleich die Blase und die Skala sieht, die so geteilt ist, daß man an ihr unmittelbar den Maßunterschied von  $A$  und  $B$  abliest (zur Vermeidung der Parallaxe macht man  $a = b$ ) (4, 5, 7)<sup>2</sup>.

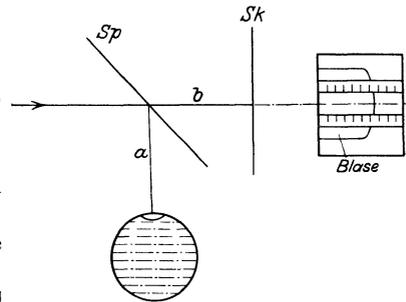


Abb. 272. Ablesung der Libelle.

<sup>1</sup> Für die Verwendung der Libelle als Winkelmesser siehe G. Berndt: Technische Winkelmessungen. Berlin 1925.

<sup>2</sup> Über die Verwendung der Libelle bei der Herstellung langer Endmaße siehe S. 81.

Bei der Normung der im Maschinenbau gebrauchten Einrichtwaagen (DIN Entwurf) war zu beachten, daß die für 20° C geltende Justierung niemals genau erfolgen kann, ferner, daß auch bei verschiedenem Aufsetzen, infolge der Unebenheiten und der Windschiefe der Sohle, sich verschiedene Einstellungen der Blase ergeben können. Die Justierung wird durch Umsetzen der Einrichtwaage um 180° auf einer wagerechten ebenen Fläche oder (bei prismatischer Sohle) auf wagerechten Zylindern verschiedener Durchmesser und (in beiden Fällen) verschiedener Länge geprüft. Dies ist bei Rahmen-Einrichtwaagen (Abb. 273) auch für die der Sohle gegenüberliegende Fläche bzw. Prisma auszuführen, dagegen nicht für die dazu senkrechten Flächen oder Prismen; hier kann deshalb nur die Abweichung der Blasenstellung beim Anlegen an eine senkrechte Fläche oder Zylinder verschiedener Durchmesser und (für beide) verschiedener Länge

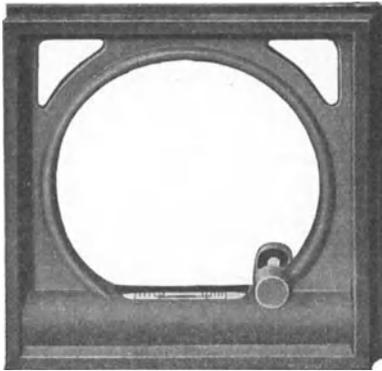


Abb. 273. Rahmen-Einrichtwaage.

gegen das Mittel der bei ihrem Umsetzen auf einer wagerechten Fläche ermittelten beiden Blasenstellungen beobachtet werden. Danach sind folgende Festsetzungen getroffen:

Einrichtwaagen.	DIN Entwurf.
Als Empfindlichkeit der Einrichtwaagen gilt der Höhenunterschied (in mm) der Enden eines 1 m langen Lineals, bei dem sich ein Ausschlag der Blase um ein Intervall ergibt. Die üblichen Empfindlichkeiten sind folgende:	
für besondere Erfordernisse . . . . .	0,1 bis 0,2 mm
normale Einrichtwaagen für den Maschinenbau . . . . .	0,25 „ 0,45 „
kurze Einrichtwaagen. . . . .	0,6 „ 0,9 „
sehr kurze Quer-Einrichtwaagen . . . . .	1,2 „ 1,8 „
Bei der bei 20° erfolgenden Prüfung auf Umschlag und beliebigem Aufsetzen auf eine ebene Platte oder Zylinder verschiedener Durchmesser und Länge muß der Unterschied zwischen den beiden Blasenstellungen weniger als 1/4 Strichabstand betragen.	
Bei Rahmen-Einrichtwaagen gilt diese Forderung auch für die der Sohle gegenüberliegende Fläche bzw. Prisma.	
Für die zur Sohle senkrechte Fläche bzw. Prisma gilt dagegen, daß beim Anlegen an eine senkrechte Fläche bzw. Zylinder verschiedener Durchmesser und Länge die Blase um nicht mehr als 1/4 Skalenteil von dem Mittel der Ausschläge abweichen darf, das sich aus den beiden Stellungen der Blase beim Umsetzen auf wagerechter Fläche ergab. Die Anlage an eine ebene senkrechte Fläche darf nur mit der ebenen Fläche der Einrichtwaage, nicht mit den Kanten des senkrechten Prismas erfolgen.	

Für Montagezwecke reicht auch vielfach die 1777 von dem Mathematiker Joh. Tobias Mayer d. Jüng. in Göttingen erfundene Dosenlibelle aus (Abb. 274); sie ist innen nach einer Kugelfläche geschliffen, die früher auf eine ebene kreisförmige Metallplatte gekittet wurde. Da eine Kittung aber nie auf die Dauer dicht hält, verwendet man besser völlig zugeschmolzene Glaskörper (Abb. 274 b), die dann spannungsfrei in einer Metallfassung befestigt werden. Eine Justierung zur Grundplatte (mittels dreier Schrauben) wird in der Regel nicht vorgesehen, sondern diese vom Hersteller so geschliffen, daß die Blase beim Aufsetzen auf eine wagerechte Fläche in dem mittleren Ring steht (dessen Durchmesser etwa 0,5 bis 1 mm größer als der der Blase sein soll). Die Dosenlibelle dient meist nur als Nullinstrument und bietet dabei den Vorteil, ohne Umsetzen zwei zueinander senkrechte Richtungen einer Fläche und damit diese selbst horizontalisieren zu können. Den mittleren Einstellfehler kann man bei guten Dosenlibellen zu etwa ± 10" ansetzen (3a).

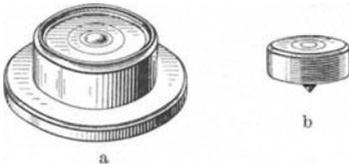


Abb. 274. Dosenlibelle.

## 10. Meßdose.

Die Meßdose ist kein Fühlhebel; da sie aber äußerlich ähnlich wie dieser gestaltet und auch in derselben Weise verwendet wird, schließt sie sich am besten hier an. Sie ist eine Umkehrung der hydraulischen Presse, beruht also wie diese auf dem Prinzip der Unzusammendrückbarkeit und der vollkommenen Verschiebbarkeit der Flüssigkeiten. Wird in einem Rohr vom Durchmesser  $D$  (Abb. 275) ein dicht schließender Kolben um die Strecke  $S$  verschoben, so steigt die Flüssigkeit in dem Ansatzrohr vom Durchmesser  $d$  um ein Stück  $s$ , das sich bestimmt aus

$$\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot s = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 \cdot S,$$

$$s = S \cdot \frac{D^2}{d^2}.$$

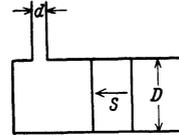
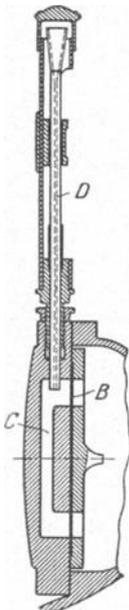


Abb. 275. Prinzip der Meßdose.

Es erfolgt also eine Übersetzung im Verhältnis der Quadrate der Durchmesser. Macht man z. B.  $D = 100$  mm,  $d = 1$  mm, so ist  $s = 10^4 \cdot S$ , so daß eine Verschiebung von  $S$  um  $1 \mu$  den Flüssigkeitsstand um 10 mm ändert und also  $1/10 \mu$  noch bequem zu beobachten ist. Durch Einsetzen anderer Glasröhren (Kapillaren) läßt sich die Übersetzung bis zum gewissen Grade ändern.

Abb. 276.  
Meßdose.

Nun würden aber gut gedichtete Kolben eine viel zu große Reibung haben, während bei nur eingeschliffenen stets mit einem Flüssigkeitsverlust zwischen Kolben und Zylinderwand zu rechnen ist. Deshalb wird die Dichtung zwischen dem druckaufnehmenden Kolben und dem Zylinder durch eine Membran  $B$ , meist aus Neusilber, hergestellt (Abb. 276), die eine leichte Beweglichkeit des Kolbens gestattet (da es sich immer nur um sehr kleine Wege handelt), die Reibung gleichmäßig hält und doch völlig dicht schließt (1). Es ist darauf zu achten, daß sie völlig frei von Falten ist, da sonst die sogenannte cri-cri-Erscheinung auftritt; die Falten verhindern nämlich die Durchbiegung der Membran, bis sie nach Erreichen eines bestimmten auf den Kolben wirkenden Drucks plötzlich in eine neue Gleichgewichtslage schnell. Auch sonst kann bei etwas übermäßiger Beanspruchung die elastische Nachwirkung die genaue Rückkehr in die Nullage verhindern. Die Flüssigkeit muß völlig luftfrei sein, da sonst die sich ansammelnden Luftblasen als elastisches

Polster wirken. Wegen der starken Wärmeausdehnung der Flüssigkeiten (etwa 15 mal größer als beim Stahl) muß die Meßdose sehr sorgfältig wärmeisoliert sein, da sie sonst mehr als Thermometer denn als Fühlhebel wirkt.

Eine praktische Anwendung als Fühlhebel hat die Meßdose unter dem Namen Prestometer gefunden (2).

Eine deutsche Ausführung ist das Tolerimeter (Abb. 277). Die Einstellung des Flüssigkeitsstandes erfolgt hier durch eine Nachstellschraube in der Meßdose, die Feineinstellung durch Verschieben des Auflagesockels. Der auf dieser sichtbare planparallele kleine Auflagesockel wird an den Tisch angesprengt, wenn Endmaße miteinander verglichen werden sollen (siehe S. 192).

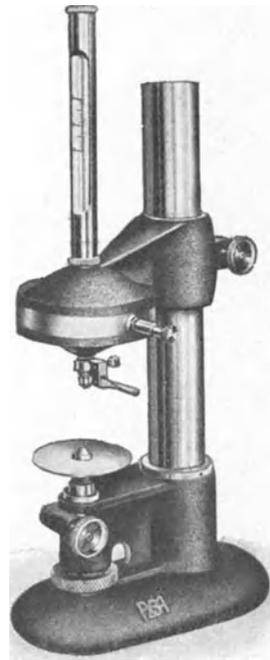


Abb. 277. Tolerimeter.

## 11. Innenfühlhebel. Konstruktionsgrundlagen.

Die in den vorhergehenden Abschnitten betrachteten Fühlhebel sind im wesentlichen für Außenmessungen, also die Ermittlung des Abstandes der Außenflächen von Körpern, des Durchmessers von Zylindern usw., bestimmt. Sie lassen

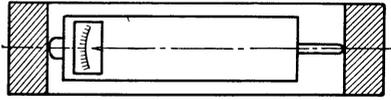


Abb. 278. Innenmessung nach dem Abbeschen Prinzip bei großen Bohrungen.

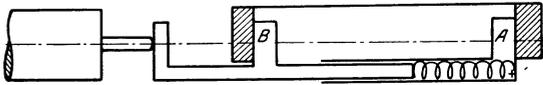


Abb. 280. Innenmessung nach dem Abbeschen Prinzip.

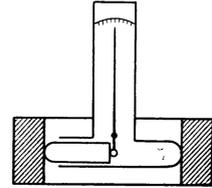


Abb. 279. Innenmessung nach dem Abbeschen Prinzip bei mittleren Bohrungen.

sich aber auch leicht zu Innenmessungen, also zur Messung des Durchmessers von Hohlzylindern usw., verwenden. Gelegentlich kann dies ohne weiteres geschehen, in der Regel wird man dazu noch irgendwelche Übertragungsmittel benutzen müssen. Danach ergeben sich folgende Konstruktionsprinzipien:

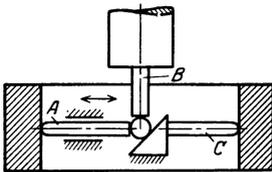


Abb. 281. Innenmessung durch Übertragung mittels Walze und schiefer Ebene.

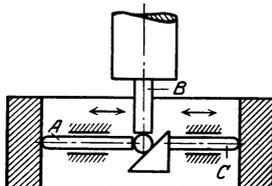


Abb. 282. Innenmessung durch Übertragung mittels Walze und schiefer Ebene.

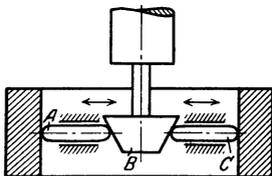


Abb. 283. Innenmessung durch Übertragung mit kegeligem Meßbolzen.

1a. Das ganze Gerät wird in die (große) Bohrung eingesetzt (Abb. 278), wobei das Abbesche Prinzip gewahrt ist.

1b. Der Fühlhebel ist so gebaut, daß sich der Meßbolzen senkrecht zur Achse bewegt (Abb. 279).

2. Zwei einander gegenüberliegende, eventuell teleskopartig geführte Anschläge *A* und *B* (Abb. 280) werden durch Federn gegen die Bohrungswandungen gedrückt; ihre gegenseitige Verschiebung wird in irgendeiner Weise, z. B. durch Fühlhebel, beobachtet.

Hierbei läßt sich leicht die Erfüllung des Abbeschen Prinzips erreichen. Man kann so Bohrungen bis zu 2 mm Durchmesser herunter messen.

3a. Der Meßbolzen *A* überträgt seine wagerechte

Bewegung (Abb. 281) mittels einer auf einer schiefen Ebene von  $45^\circ$  rollenden Kugel oder Walze auf den senkrecht dazu stehenden Meßbolzen *B* des Fühlhebels. Dieses Gerät läßt sich auch so ausbilden, daß beide Anschläge *A* und *C* beweglich sind (Abb. 282), von denen der eine die Kugel, der andere die schiefe Ebene verschiebt, was den Vorteil hat, daß die Anlage der Meßflächen an die Bohrungswandung noch besser gewährleistet ist.

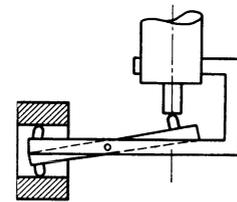


Abb. 284. Innenmessung durch Übertragung mit scherenartigem Hebel.

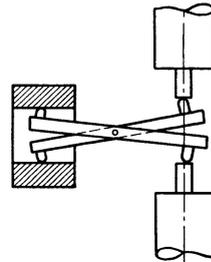


Abb. 285. Innenmessung durch Übertragung mit scherenartigem Hebel.

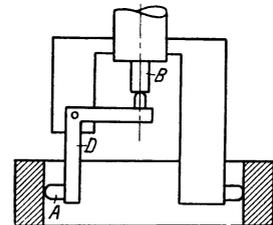


Abb. 286. Innenmessung durch Übertragung mit Winkelhebel.

3b. Der Meßbolzen *B* des Fühlhebels setzt sich unten in einen Kegel fort (Abb. 283), auf den die kuglig endenden Tastbolzen *A* und *C* ihre wagerechte Verschiebung übertragen; dabei kann auch der Anschlag *C* feststehen. Dieses Prinzip ist etwa bis 4 mm Durchmesser abwärts auszuführen.

4a. Ein scherenartiger Hebel, meist der Übersetzung 1:1, überträgt seine Bewegung auf den außenstehenden Fühlhebel (Abb. 284), oder die beiden Schenkel wirken nach Abb. 285 auf 2 Fühlhebel ein (4). Bei geeigneter Ausführung des Hebels kann man so auf ziemlich kleine Durchmesser kommen.

4b. Die Übertragung der wagerechten Verschiebung des beweglichen Tastbolzens *A* auf den senkrechten Meßbolzen *B* des Fühlhebels (Abb. 286) erfolgt mittels des Winkelhebels *D*, gleichfalls meist der Übersetzung 1:1, der in der Regel auf Schneide gelagert ist. Auch dieses Prinzip ist bis etwa 6 mm Durchmesser auszuführen.

5. Die Übertragung der wagerechten Bewegung des Tastbolzens auf den senkrechten Meßbolzen erfolgt mittels eines Kolbens (Abb. 287), der in einem nach einem Viertelkreise gebogenen Rohr geführt ist. Dieses Prinzip ist aber heute wieder verlassen, da die Reibungswiderstände zu groß werden, so daß nur die vier erstgenannten praktische Verwendung gefunden haben.

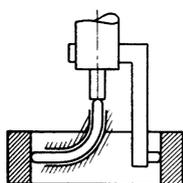


Abb. 287. Innenmessung durch Übertragung mittels Bogenführung.

In den schematischen Skizzen ist durchweg eine Zweipunktanlage gezeichnet. Man kann sie aber sämtlich auch so ausführen, daß man zwei feste Tastbolzen *A* und *B* (Abb. 288) vorsieht. In diesem Falle ist aber

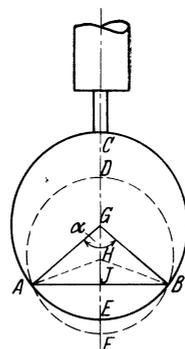


Abb. 288. Dreipunktanlage.

der Ausschlag des Fühlhebels nicht gleich der Abweichung des Durchmessers vom Sollwert (1), vielmehr mißt man nur den Unterschied der Höhen der den Kreisen eingezeichneten Dreiecke; außerdem läßt sich nicht erkennen, in welchem Durchmesser der Fehler liegt. Sie hat ferner den Nachteil, stets eine Einstellung des Fühlhebels mit Normalringen zu verlangen, während man sie bei Zweipunktanlage mittels einer aus Endmaßen zusammengesetzten (und damit genaueren) Rachenlehre vornehmen kann (siehe Abb. 58). Dabei ist allerdings darauf zu achten, daß die Abplattung der Tastbolzen durch den Meßdruck bei der Einstellung (Berührung von Kugel und Ebene) eine andere ist als bei Messung der Bohrung (Berührung von Kugel und Hohlzylinder), und ist dieser Unterschied in Rechnung zu setzen. Derartige Einstelllehren lassen sich für jeden gewünschten Durchmesser mittels eines Endmaßsatzes herstellen, während man bei Dreipunktanlage für jeden gebrauchten Durchmesser (soweit die Unterschiede nicht kleiner als der Meßbereich des Fühlhebels sind) einen besonderen Ring benötigt. Andererseits gestattet die Dreipunktanlage besser, die Unrundheit (namentlich Gleichdicke) zu erkennen, (worauf in Abschnitt VB 1 näher eingegangen werden wird), was mit der Zweipunktanlage unter Umständen nicht möglich ist.

Die Beziehung des Ausschlages *m* zur Abweichung  $\delta$  der Durchmesser *d* und *d'* voneinander ergibt sich nach Abb. 288 zu:

$$\delta = d - d' = CD - EF = m - EF,$$

$$m = \delta + r' + GH - r = \frac{\delta}{2} + GH$$

$$= \frac{\delta}{2} + GJ - HJ$$

$$= \frac{\delta}{2} + r \cdot \cos \frac{\alpha}{2} - r' \cdot \cos AHJ.$$

Nun ist

$$\sin AHJ = \frac{r}{r'} \cdot \sin \frac{\alpha}{2},$$

also

$$\begin{aligned} r' \cdot \cos AHJ &= \sqrt{r'^2 - r^2 \cdot \sin^2 \frac{\alpha}{2}} \\ &= \sqrt{\left(r - \frac{\delta}{2}\right)^2 - r^2 \cdot \sin^2 \frac{\alpha}{2}} \\ &= r \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \cdot \sqrt{1 - \frac{\delta}{r \cdot \cos^2 \frac{\alpha}{2}} + \frac{\delta^2}{4 \cdot r^2 \cdot \cos^2 \frac{\alpha}{2}}}. \end{aligned}$$

Somit wird

$$m = \frac{\delta}{2} + r \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\delta}{r \cdot \cos^2 \frac{\alpha}{2}} + \frac{\delta^2}{4 \cdot r^2 \cdot \cos^2 \frac{\alpha}{2}}}\right).$$

Bei kleinen Unterschieden  $\delta$ , bei denen die Glieder zweiter Ordnung vernachlässigt werden können, wird

$$\begin{aligned} m &= \frac{\delta}{2} + r \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{\delta}{2 \cdot r \cdot \cos^2 \frac{\alpha}{2}}\right)\right] \\ &= \frac{\delta}{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{\cos^2 \frac{\alpha}{2}}\right). \end{aligned}$$

Für  $\alpha = 120^\circ$  wird

$$m = \frac{3}{2} \cdot \delta, \quad \delta = \frac{2}{3} \cdot m.$$

Für den häufig verwendeten Winkel von  $75^\circ$  (5) wird  $m = \frac{9}{8} \cdot \delta$ ,  $\delta = \frac{8}{9} \cdot m$ . Durch entsprechende Wahl der Intervallgröße der Teilung läßt es sich stets so einrichten, daß man unmittelbar die Abweichung des Durchmessers vom Sollwert abliest.

Nimmt diese dagegen größere Beträge an, so würde eine gleichmäßige Teilung nicht mehr richtig sein. Für  $\alpha = 120^\circ$  gilt streng

$$m = \frac{\delta}{2} + \frac{r}{2} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{\delta}{r} + \frac{\delta^2}{r^2}}\right).$$

Damit ergibt sich für

$\Phi$ mm	$\delta$ mm	$\frac{\delta}{m}$	Fehler
20	+ 0,01	0,666 7	0%
	+ 0,1	0,669 95	0,5% $\sim$ 0,5 $\mu$
100	+ 0,01	0,666 7	0%
	+ 0,1	0,667 3	0,1% $\sim$ 0,1 $\mu$
	+ 1,0	0,673 1	1% $\sim$ 10 $\mu$

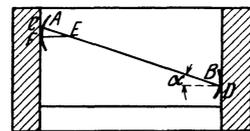


Abb. 289. Fehler bei Kippung in der Axialebene.

Wie man sieht, ist der Fehler bis zu Abweichungen von 100  $\mu$  fast stets zu vernachlässigen; erreicht er größere Werte, so muß man allerdings den Fühlhebel mit einem Ring von angenähert gleichem Durchmesser einstellen, falls es auf genaueste Ermittlung der Abweichung ankommt. Sonst wird man aber auch bei der Dreipunktanlage stets mit einer gleichmäßigen Skala reichen.

Fehler bei der Messung können nun dadurch entstehen, daß man das Gerät aus der Meßebeane herauskippt, da man bei schräger Lage nach Abb. 289 nicht den Durchmesser  $D$ , sondern die Strecke  $AB$  ermittelt.

Diese berechnet sich, falls man den Durchmesser der Abrundung der Tastbolzen in ihrer Meridianebene mit  $d$  bezeichnet, zu

$$\begin{aligned} AB &= CD - 2 \cdot AC \\ &= \frac{D}{\cos \alpha} - 2 \cdot (CE - AE), \\ &= \frac{D}{\cos \alpha} - 2 \cdot \frac{EF}{\cos \alpha} + 2 \cdot AE, \\ &= \frac{D-d}{\cos \alpha} + d. \end{aligned}$$

Somit wird der Fehler

$$f = AB - D = \frac{D-d}{\cos \alpha} \cdot (1 - \cos \alpha),$$

für kleine Winkel

$$f = \frac{1}{2} \cdot (D-d) \cdot \alpha^2,$$

und, da  $d$  wesentlich kleiner als  $D$ ,

$$f \sim \frac{1}{2} \cdot D \cdot \alpha^2.$$

Diese Gleichung gilt mit genügender Annäherung auch für Dreipunktanlage, bei der die Kippung um die Achse  $AB$  (Abb. 288) geschieht, falls die Enden  $A$  und  $B$  der festen Bolzen kugelförmig ausgeführt sind. Sind sie aber torisch gestaltet, so erfolgt die Abwälzung nicht auf einem Kreise, sondern auf einer Ellipse, wodurch die Fehler etwas, wenn auch nur unwesentlich, größer werden. Bei Zweipunktanlage erfolgt auch bei Tastbolzen mit torischen Flächen das Abrollen stets auf einem Kreise.

Aus der obigen Gleichung ergeben sich folgende Werte für  $f$  in  $\mu$ :

$\alpha =$ D mm	$1/4^0$	$1/2^0$	$1^0$	$2^0$	$5^0$
	0,0044	0,0087	0,0174	0,035	0,087
	in Bogenmaß				
	$\mu$	$\mu$	$\mu$	$\mu$	$\mu$
10	0,1	0,4	1,5	6,1	38
50	0,5	1,9	7,6	30,6	190
100	0,9	3,8	15,1	61,2	380
500	4,7	18,9	75,5	301,6	1900

Bei größeren Bohrungen werden also die Kippungsfehler recht bedeutend; will man bei 100 mm Durchmesser eine Genauigkeit von  $1 \mu$  erzielen, so muß  $\alpha < 1/4^0$  bleiben. Diese Fehler schaltet man dadurch aus, daß man das Gerät in der Axialebene schwenkt und den Umkehrpunkt des Zeigers (den größten Ausschlag) beobachtet (damit wird auch der von torischen Flächen bei der Dreipunktanlage herrührende Fehler beseitigt). Unabhängig von der genauen Lage würde man, wie bei Kugelmessungen, werden, wenn man den beiden Tastbolzen dieselbe Krümmung wie der Bohrung geben würde, was allerdings immer nur für das Sollmaß streng richtig wäre und somit bei Innenfühlhebeln für größere Meßbereiche ausgeschlossen ist.

Die Kippungsfehler lassen sich ferner vermeiden, wenn man den Fühlhebel nach Abb. 290 noch in 2 Mantellinien (mittels zweier Zentrier- und Richtleisten an einer angefederten verstellbaren Schiene oder mittels zweier scharnierartig ausschwenkbarer Flügel; siehe Abb. 404) stützt. Sind die Stützbolzen aber wiegenförmig gestaltet, so muß man wieder durch Schwenken den Umkehrpunkt des Zeigers aufsuchen. Frei hiervon wird man ferner, wenn die Stirnfläche der Bohrung genau senkrecht zu ihrer Achse ist. Man legt dann den Prüfling damit gegen 3 Anschläge (Abb. 291); zweckmäßig ist die Scheibe, auf der diese sitzen, axial sauber verschiebbar angeordnet, um in verschiedenen Tiefen

der Bohrung messen zu können. Sehr gut ist bei tiefen Bohrungen Stützung mit 3 Füßen (Abb. 292), die man als Erzeugende eines zum Zylinder konaxialen Kegels ausbildet. Damit nähert man sich dem Idealfall der Zylindermessung, da je 3 Punkte seines Mantels in zwei verschiedenen Querschnittebenen zur

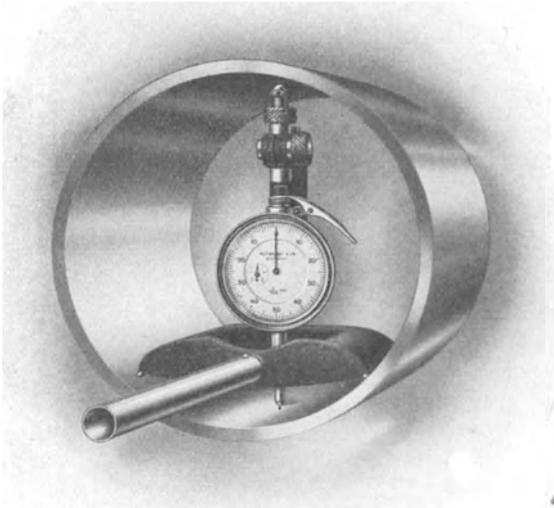


Abb. 290. Stützung des Fühlhebels.

Messung herangezogen werden, von denen fünf die Lage des Meßgerätes zum Zylinder bestimmen, während der sechste zur Messung dient (3).

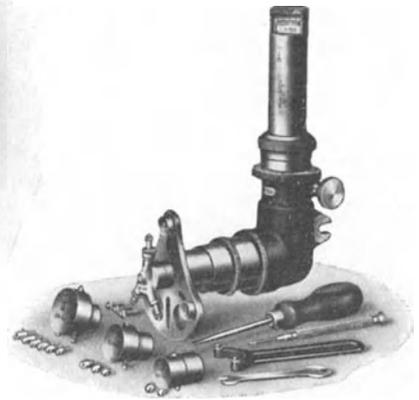


Abb. 291. Innen-Minimeter. Anlage der Bohrung an der Stirnfläche.

Während die Dreipunktanlage bei Stellung parallel zur Achse den beweglichen Meßbolzen stets in Richtung des Durchmessers einstellt, ist bei Zweipunktmessung noch eine Kippung oder Parallelverlagerung des Fühlhebels in der zur Achse senkrechten Ebene möglich. Bei Kippung mißt man nach Abb. 293 statt des Durchmessers  $D$  die Strecke  $FG$ .



Abb. 292. Messung tiefer Zylinder.

Sie berechnet sich, wenn man den Durchmesser der Abrundung der Tastbolzen in der Äquatorialebene mit  $d$  bezeichnet, und wenn man ferner beachtet, daß die Linien  $AB$  und  $AC$  durch ihren Mittelpunkt gehen müssen (da die Tangenten an die Krümmungskurven zusammenfallen) zu

$$\begin{aligned} FG &= 2 \cdot (HE + EG) \\ &= 2 \cdot \left( AE \cdot \cos \beta + \frac{d}{2} \right) \\ &= 2 \cdot (AC - EC) \cdot \cos \beta + d \\ &= (D - d) \cdot \cos \beta + d. \end{aligned}$$

Somit wird der Fehler

$$\begin{aligned} f_2 &= FG - D = (D - d) \cdot (\cos \beta - 1) \\ &= -\frac{1}{2} \cdot (D - d) \cdot \beta^2. \end{aligned}$$

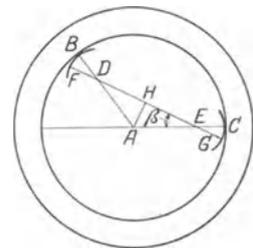


Abb. 293. Fehler bei Kippung in der zur Achse senkrechten Ebene.

Der Fehler  $f_2$  ist also entgegengesetzt gleich dem Fehler  $f_1$ . Man vermeidet ihn, ebenso wie den von einer Parallelverschiebung des Fühlhebels herrührenden, durch Aufsuchen des kleinsten Ausschlages. Er ist von selbst ausgeschaltet bei

Benützung entsprechender Stützbolzen, z. B. nach Abb. 290. Praktisch dasselbe erreicht man, wenn man noch senkrecht zur Achse  $AB$  der Tastbolzen (Abb. 294) zwei verschiebbare Stützbolzen  $CD$  vorsieht, deren Abstand um ein Stück  $s$  kleiner als der Durchmesser ist.

Bei Kippung um den Winkel  $\beta$  kann das Gerät in die Lage  $AFE$  übergehen; dabei kann man mit genügender Annäherung  $MH = MG = \frac{s}{2}$  setzen. Dann ist

$$\beta = \frac{\frac{1}{2} \cdot s}{\frac{1}{2} \cdot D} = \frac{s}{D}$$

und somit

$$f_2 = \frac{1}{2} \cdot (D - d) \cdot \frac{s^2}{D^2} \sim \frac{1}{2} \cdot \frac{s^2}{D}$$

Für  $s = \frac{1}{10}$  mm wird bei

$D =$	10	20	50	100 mm
$f_2 =$	0,5	0,25	0,1	0,05 $\mu$ .

Man sieht also, daß sich der Fehler  $f_2$  durch diese Anordnung auf einen verschwindend geringen Betrag herunterdrücken läßt, namentlich wenn man noch bei Durchmessern bis 20 mm etwa  $s = \frac{1}{20}$  mm wählt, da dann  $f_2$  auf  $\frac{1}{4}$  der angegebenen Werte sinkt (2).

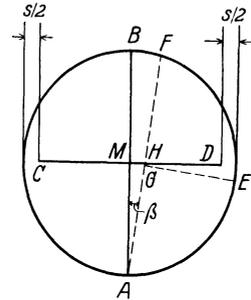


Abb. 294. Fehler bei Kippung in der zur Achse senkrechten Ebene.

## 12. Innenfühhlhebel. Ausführungen.

Die Benutzung des gewöhnlichen Fühlhebels zu Bohrungsmessungen zeigt Abb. 295; er wird dazu noch mit 2 Stützpunkten oder -leisten versehen. Ein Zweipunktmeßgerät ähnlicher Anordnung war bereits in Abb. 290 wiedergegeben.

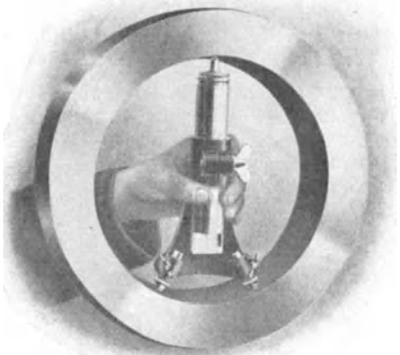


Abb. 295. Innen-Minimeter für große Bohrungen.

Sie sind naturgemäß nur für große Bohrungen zu verwenden, wenn man auch die Meßuhren dafür kleiner hält (38 mm Durchmesser).

Auch verstellbare Stichmaße kann man mit einem Fühlhebel auf einer Seite ausrüsten und so ein geeignetes Gerät mit Zweipunktanlage zum Vergleich von Bohrungsdurchmessern erhalten. In ähnlicher Weise läßt sich auch die Meßkugellehre von Bernlöhr ausgestalten.

Ein einfaches Gerät nach dem Prinzip 1b. ist in Abbild. 296 wiedergegeben; bei diesem wirkt der bewegliche Tastbolzen auf den kurzen Arm eines auf Schneide ge-

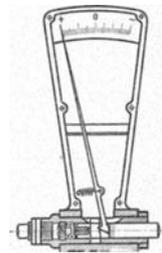


Abb. 296. Innenfühhlhebel.

lagerten Hebels (4). — Nach dem unter 2. angegebenen Prinzip der unmittelbaren Übertragung der Verschiebung der beiden Tastbolzen auf den Fühlhebel, unter Wahrung des Abbeschen Prinzips (Abb. 280), arbeitet das Minimeter für Innenmessungen nach Abb. 297. Dadurch daß die beiden Tastbolzen als Zylindersegmente ausgebildet sind, ist es möglich, Bohrungen bis zu 2 mm Durchmesser herunter messen zu können. Durch Verstellen des festen Bolzens läßt sich der Meßbereich dabei bis auf 2,5 mm, bei den größeren Zylindersegmenten bis um 3 mm erweitern, so daß man mit 5 Paar Bolzen den Durchmesserbereich von 2 bis 10 mm umfaßt. Eingestellt wird dieses Gerät, wie alle nach dem

Prinzip der Zweipunktanlage arbeitenden, mit einer aus Endmaßen zusammengesetzten Rachenlehre.

Größere Bohrungen lassen sich mit dem Meßtisch der Fortuna-Werke nach Abb. 251 messen. Auch bei diesem könnte das Abbessche Prinzip unter Verwendung von 1 oder 2 Doppelhebeln nach Abb. 298 gewahrt werden (3).

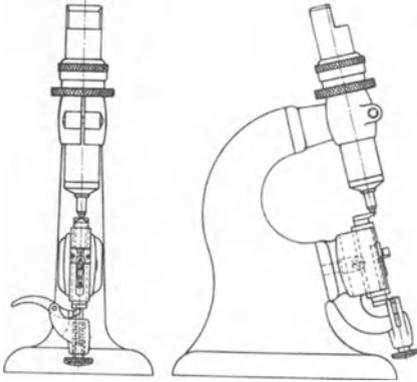


Abb. 297. Innen-Minimeter für kleine Bohrungen.

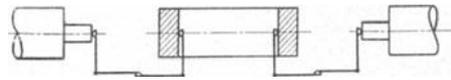


Abb. 298. Innenmessungen mit Doppelhebel nach dem Abbesschen Prinzip.

Das Innenmeßgerät der Société Genevoise d'Instruments de Physique (Abb. 299) arbeitet mit Dreipunktanlage. Die beiden festen Tastbolzen werden durch die Enden eines Stichmaßes  $b$  geeigneter Länge gebildet, das mittels der Schraube  $c$  eingestellt wird; der dritte bewegliche Tastbolzen wirkt auf den Fühlhebel ein. Um

den Ring in der Höhe verstellen zu können, ist eine Höhenverschiebung des Tisches  $a$  vorgesehen.

Die Abweichung  $\delta$  vom Sollwert ergibt sich aus der früher abgeleiteten Beziehung zwischen  $\delta$  und Ausschlag  $m$  für kleine Werte von  $\delta$  zu

$$m = \frac{\delta}{2} \cdot \left( 1 + \frac{1}{\cos \frac{\alpha}{2}} \right).$$

Setzt man die Länge  $AB$  des Stichmaßes (Abb. 288) gleich  $l$ , so ist

$$\cos \frac{\alpha}{2} = \frac{\sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{l^2}{4}}}{\frac{D}{2}}$$

und somit

$$m = \frac{\delta}{2} \cdot \left( 1 + \frac{D}{\sqrt{D^2 - l^2}} \right).$$

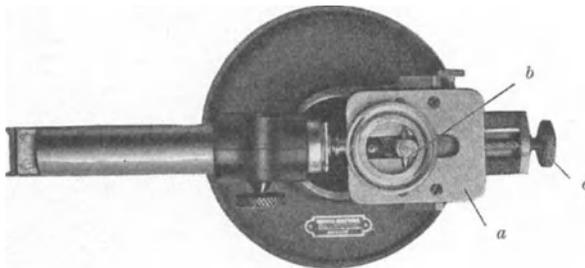


Abb. 299. Innenmeßgerät.

Zwischen  $l$  und der Stablänge  $L$  besteht nach Abb. 300, in der  $M$  den Mittelpunkt der Bohrung vom Durchmesser  $D$ ,  $B$  den der Abrundung vom Durchmesser  $d$  des Stichmaßes bedeuten, die Beziehung

$$\begin{aligned} \frac{l}{2} &= CE = CD + DE, \\ &= \frac{L}{2} - \frac{d}{2} + \frac{d}{2} \cdot \cos BED, \\ &= \frac{L}{2} - \frac{d}{2} + \frac{d}{2} \cdot \frac{\frac{L}{2} - \frac{d}{2}}{\frac{D}{2} - \frac{d}{2}}, \end{aligned}$$

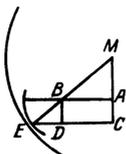


Abb. 300. Korrektur bei der Messung mit dem Gerät nach Abb. 299.

$$l = (L - d) \cdot \left[ 1 + \frac{d}{D - d} \right],$$

$$l \sim L - d,$$

falls  $d$  so klein, daß das Glied  $\frac{d}{D - d}$  gegen 1 vernachlässigt werden kann.

Das zu dritt genannte Prinzip, Abrollen einer Walze auf einer schiefen Ebene von  $45^\circ$ , wird bisher ausschließlich in Verbindung mit dem Mikrotast verwendet (1, 2, 8). Derartige Geräte sind von 4 mm Durchmesser aufwärts ab verwendbar. Der für die verschiedenen Durchmesser auszuwechselnde Lehrenfuß *a* mit dem beweglichen Tastbolzen und dem ihm gegenüberliegenden festen Amboß sowie den senkrecht dazu stehenden festen Stützbolzen (Abb. 301) wird mittels der Fassung *b* (für tiefe Bohrungen bis 1250 mm unter Zwischenschaltung eventuell mehrerer hintereinander gesetzter Verlängerungsstangen *d*) mit dem Fühlhebel verbunden. Von 20 mm Durchmesser ab sind die Mikrotastlochlehren spreizbar ausgeführt, um mit demselben Lehrenfuß einen größeren Durchmesserbereich (1 mm bei kleineren, 10 mm bei größeren Lehren) beherrschen zu können (Abb. 302). Dabei werden die beiden Stützbolzen durch die Tastbolzen selbsttätig so mitbewegt, daß ihr Abstand stets um ein

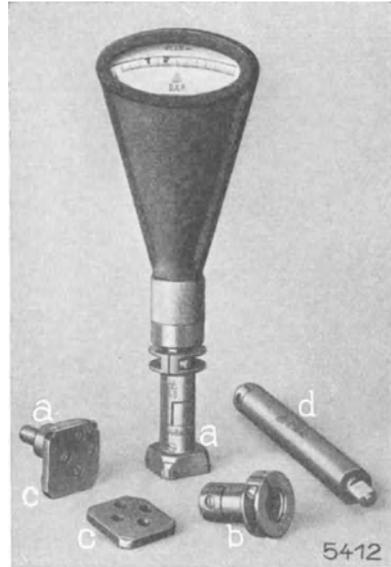


Abb. 301. Innen-Mikrotast.

bestimmtes Stück kleiner bleibt als der zu bestimmende Durchmesser. Für sehr große Bohrungen (bis 450 mm Durchmesser) werden in die Meß- und Stützriegel stell- und klemmbare,

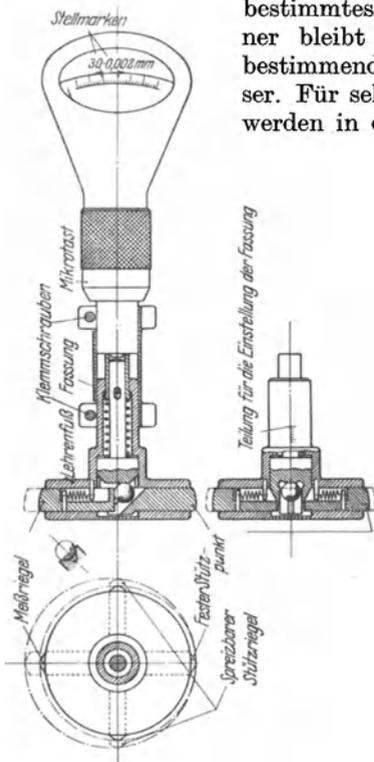


Abb. 302. Spreizbarer Innen-Mikrotast.

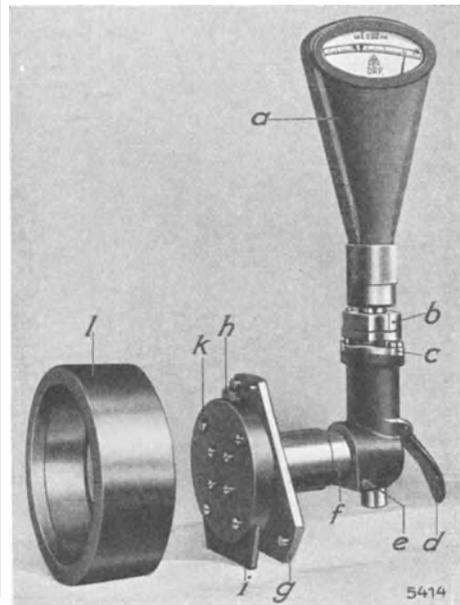


Abb. 303. Spreizbarer Innen-Mikrotast für Laufringe.

mit Rasten versehene Bolzen eingefügt, die um je 5 mm zu versetzen sind. Um auch Sacklöcher messen zu können, ist die Kuppe des Meßbolzens derart

hakenförmig gestaltet, daß sie dem festen Amboß genau gegenüberliegt. Eine besondere Ausbildung hatte der Meßkopf zum Messen von Hinterdrehungen und ähnlichem, besonders von Kugel- und Rollenlager-Laufringen erfahren (Abb. 303). Um ihn hier einführen zu können, lassen sich die weit vorragenden Meß- und Stützbolzen durch Druck mit dem Handballen auf den Hebel *d* völlig hineinziehen.

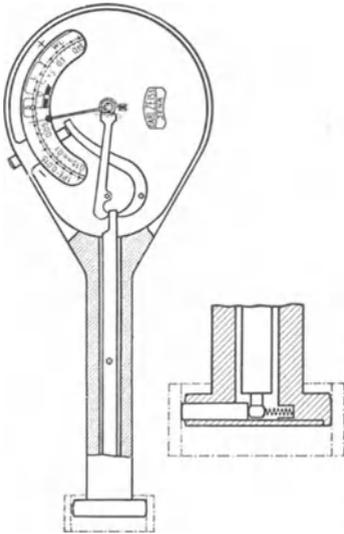


Abb. 304. Passimeter.

Die Übertragung der Bewegung des Tastbolzens durch Hebel auf den eigentlichen Fühlhebel (nach Prinzip 4) ist bei dem Zeiss-Passimeter benutzt (Abb. 304). Dies wirkt durch Zahnradsegment und Ritzel auf einen Zeiger (ähnlich wie bei dem Passameter). Der Meßdruck beträgt 600 g, die Instrumentengenauigkeit  $\pm 3 \mu$ . Die Skala wird genau so wie beim Passameter ausgeführt. Zum Messen verschieden großer Bohrungen werden die Lehrenfüße, bei Durchmessern unter

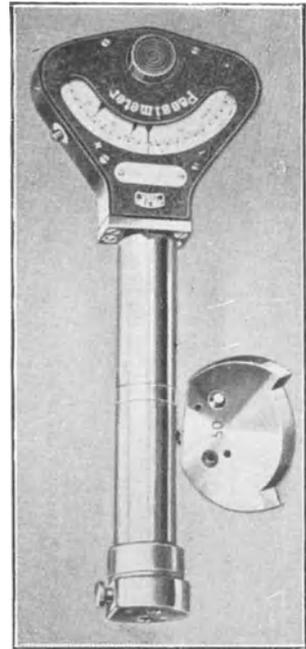


Abb. 305. Passimeter.

18 mm der ganze Schaft am Hauptkörper, ausgetauscht; außerdem wird bei jedem Meßkopf ein bestimmter Taststift in den Tasthebel eingesetzt. Um

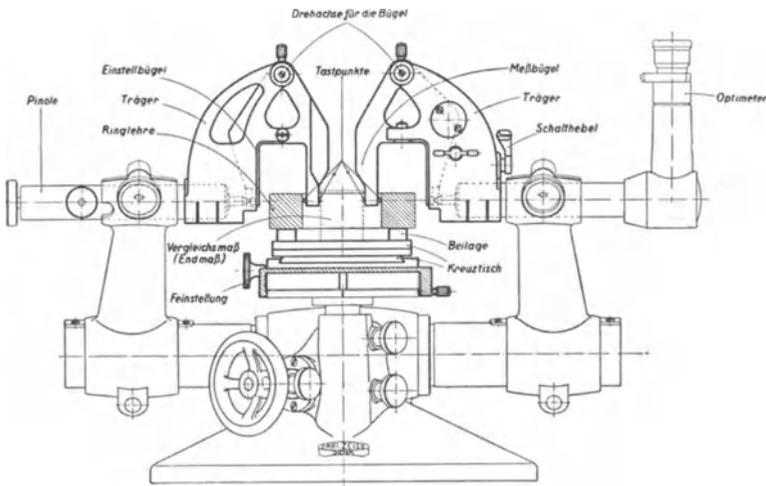


Abb. 306. Wagrecht-Optimeter für Innenmessungen.

die Abnutzung des Taststiftes möglichst gering zu halten, wird er vor der Einführung in den Prüfling durch Druck auf einen Knopf am Gehäuse zurückgezogen (5).

Die Meßköpfe sind so ausgeführt, daß sich eine Dreipunktanlage ergibt (Abb. 305). Die beiden festen Stützpunkte berühren dabei in ziemlich scharfen Kanten, so daß die Gefahr eines Eindrückens in weiche Werkstücke und auch die einer verhältnismäßig starken Abnutzung vorliegt.

Zu einem sehr genauen Bohrungsmeßgerät läßt sich das Wagerecht-Optimeter umgestalten. Dazu werden nach Abb. 306 zwei hufeisenförmige Träger auf die Pinole und auf das Optimeter aufgeklemt, in denen die Achsen für den Einstell- und den Meßbügel sitzen, die (unter Wahrung des Abbeschen Prinzips) mit Kugelberührung auf je einer Seite fest an der Pinole, bzw. an dem Meßbolzen des Optimeters, auf der anderen an der Wand der Bohrung anliegen. Diese ruht auf einem in der Höhe verstellbaren, in der Meßrichtung um  $\pm 3$  mm schwimmenden, senkrecht dazu fein beweglichen, um eine senkrechte Achse drehbaren und ferner noch etwas kippbaren Tisch, so daß man sie so justieren kann, daß man wirklich den Durchmesser ermittelt. Die Einstellung erfolgt entweder durch eine Endmaß-Rachenlehre oder bequemer durch Endmaße, die man zwischen die einander zugekehrten Enden der Tastbolzen bringt, wobei dann ihre Längen zu dem Endmaß hinzuzurechnen sind. Um auch ohne Umbau mit der gleichen Anordnung Außenmessungen (z. B. von Wellen) vornehmen zu können, wird der Meßdruck mittels eines Hebels auf Zug oder Druck umgeschaltet.

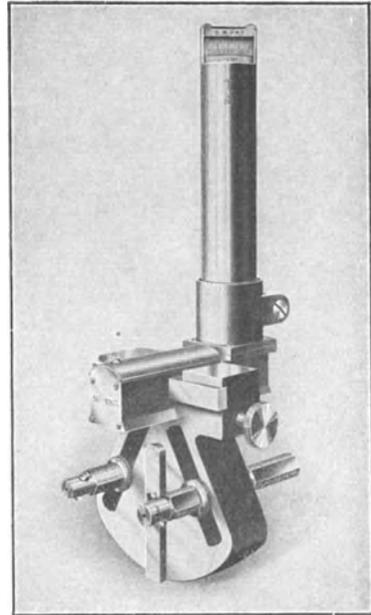


Abb. 307. Innen-Minimeter.

Bei den Fortuna-Innenmeßgeräten, von denen in Abb. 291 und 292 bereits 2 Ausführungsformen wiedergegeben waren, erfolgt die Übertragung durch Winkel-

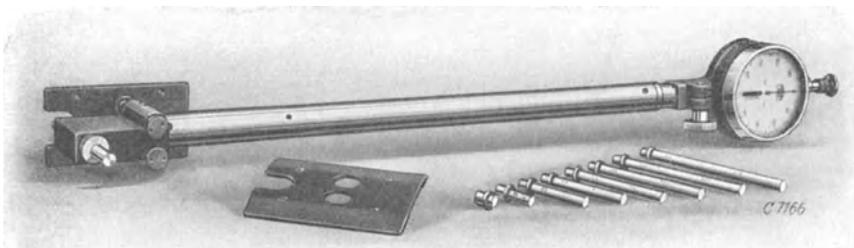


Abb. 308. Innen-Meßuhr mit Verlängerungsstange.

hebel. Einen anderen Meßkopf für mittlere Durchmesser zeigt Abb. 307. Für tiefe Bohrungen werden gleichfalls Verlängerungsstangen zwischen den auswechselbaren Meßkopf und den Fühlhebel geschaltet. Er wird in der Regel mit Dreipunktanlage ausgeführt, doch ist auch Zweipunktanlage (mit senkrecht dazu stehenden Stützbolzen) möglich<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Ähnliche Geräte werden von der Société Genevoise d'Instruments de Physique gebaut (7).

Eine Ausführung, bei der die Bewegung des Tastbolzens durch Winkelhebel und Verlängerungsstange auf eine Meßuhr übertragen wird, ist in Abb. 308 zu sehen. Der Meßbereich läßt sich durch Auswechseln der um 10 mm abgestuften Tastbolzen von 60 bis 150 mm erweitern. Sie sind so genau ausgeführt, daß die Einstellung mittels Endmaß-Rachenlehren und ähnlichem bei einem Tastbolzen genügt; besser wird es indessen auf jeden Fall sein, die Einstellung in der jeweiligen Anordnung zu kontrollieren. Entsprechend dem Bohrungsdurchmesser müssen auch die Führungsschuhe ausgewechselt werden. Der Meßdruck dieses hauptsächlich für die Untersuchung von Motorzylindern bestimmten Geräts beträgt 1000 g. Ähnliche Geräte werden von verschiedenen Seiten hergestellt [siehe z. B. (6)].

### 13. Andere Verfahren zum Messen von Bohrungen.

Im Anschluß hieran sollen einige andere Verfahren zur Bestimmung des Durchmessers von Bohrungen (mit Ausnahme der Innenschraublehren) besprochen werden, wenn auch die Benutzung eines Fühlhebels

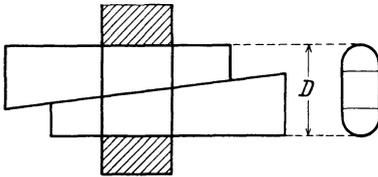


Abb. 309. Bohrungsmessung mittels Keile.

nicht immer erforderlich ist, dafür vielmehr ebensogut ein anderes geeignetes Meßgerät verwendet werden kann.

Ein sehr einfaches Mittel besteht in der Verwendung von zwei gleichen Keilen, deren lange Kathetenflächen

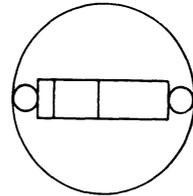


Abb. 310. Bohrungsmessung mittels Endmaßen und Lehrdornen.

zylindrisch gestaltet sind (Abb. 309); die Ermittlung ihrer Dicke  $D$  ergibt sofort den Durchmesser (6, 7), das Ergebnis dürfte aber stark vom Meßdruck abhängen. — Statt die Bohrung durch Endmaße mit angesprengten halbzyklinderförmigen Schnäbeln auszumessen (siehe S. 91), legt man auf beiden Seiten 2 Lehrdorne ein (Abb. 310), wobei man die Endmaße so wählt, daß jene sich auf der Bohrwand gerade nicht mehr abrollen lassen. Die dabei zu erreichende Genauigkeit wird auf  $2,5 \mu$  angegeben (3)<sup>1</sup>.

Den Durchmesser  $D$  von Bohrungen kann man auch dadurch bestimmen, daß man sie auf eine gut ebene Platte setzt, drei gleiche Stahlkugeln vom Durchmesser  $d_1$  (Abb. 311) hinein- und auf diese eine vierte Kugel vom (gleichen oder verschiedenen) Durchmesser  $d_2$  legt (5).

Der Durchmesser  $D$  ergibt sich dann aus

$$\begin{aligned} D &= 2 \cdot EB = d_1 + 2 \cdot AB \\ &= d_1 + 2 \cdot \sqrt{AC^2 - BC^2} \\ &= d_1 + \sqrt{(d_1 + d_2)^2 - [2 \cdot h - (d_1 + d_2)]^2}, \\ &= d_1 + 2 \cdot h \cdot \sqrt{\frac{d_1 + d_2}{h} - 1}. \end{aligned}$$

Für vier gleiche Kugeln ( $d_1 = d_2 = d$ ) wird

$$D = d + 2 \cdot h \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{d}{h} - 1}.$$

<sup>1</sup> Für ein ähnliches Verfahren siehe (2).

Im Mittel wird man  $d = 0,4 \cdot D$  nehmen müssen, da sich bei  $d = 0,465 \cdot D$  die drei unten liegenden Kugel berühren und bei  $d = 0,33 \cdot D$  alle vier in einer Ebene liegen würden. Wegen des starken Einflusses des Meßdruckes wird man die Genauigkeit nur zu etwa  $5 \mu$  ansetzen können (1).

Eine sehr genaue Methode ist von Tomlinson (4) angegeben (Abb. 312). In die in einem Futter dreh- und axial verschiebbar aufgenommene Bohrung wird

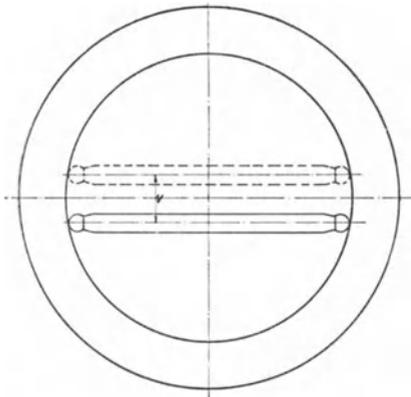


Abb. 312. Bohrungsmessung nach Tomlinson.

ein in 2 Kugelflächen endender Stab, dessen Länge  $l$  etwas kleiner als der Bohrungsdurchmesser  $D$  ist, eingelegt und die Parallelverschiebung  $v$  zwischen den beiden Lagen gemessen, in denen er die Bohrung berührt. Der Stab besteht aus einem, oder um ihn für verschiedene Bohrungen benutzen zu können, aus zwei, in einem Joch gefaßten Stücken (Abbild. 313), das an dem kurzen Arme eines Hebels (Ab-

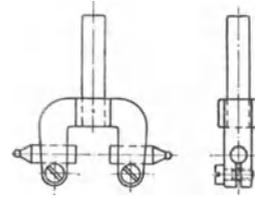


Abb. 313. Bohrungsmessung nach Tomlinson.

bild. 314) befestigt ist, dessen Lager  $B$  von 2 Stahlkugeln gebildet wird. Die Bewegung des Endes  $E$  seines langen Armes wird z. B. mit einem Schraubenmikrometer  $D$  gemessen.

Der Hebel wird zunächst durch das Laufgewicht  $H$  ins Gleichgewicht gebracht und dann der gewünschte Meßdruck durch Umklappen des Gewichtes  $G$

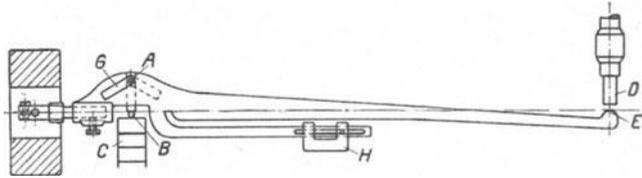


Abb. 314. Bohrungsmessung nach Tomlinson.

nach links oder rechts eingestellt. Der Hebel ruht auf Endmaßen, die so kombiniert werden, daß er bei den beiden Anlagen des Stabes in der Bohrung angenähert wagerecht steht, so daß nur die kleinen Abweichungen hiervon bei  $E$  gemessen werden, für die man die Kreisbögen stets durch die Tangenten ersetzen kann. Der Hebel hat eine Übersetzung 1 : 5; die Stablänge  $l$  wählt man zweckmäßig so, daß die Abweichung der Bohrung vom Sollwert etwa nochmals 5-fach vergrößert wird, so daß die Meßfehler des Schraubenmikrometers von etwa  $2 \mu$  auf  $0,1 \mu$  heruntergebracht werden.

Der Durchmesser  $D$  berechnet sich aus  $l$  und  $v$  nach Abb. 315 zu

$$D = 2 \cdot DG = 2 \cdot \frac{DF}{\sin \alpha}$$

$$= 2 \cdot \frac{DE + EF}{\sin \alpha} = d + \frac{v}{\sin \alpha},$$

falls  $d$  den Abrundungsdurchmesser des Stabes bedeutet. Nun ist

$$\cos \alpha = \cos HCG = \frac{CH}{CG} = \frac{l-d}{D-d}.$$

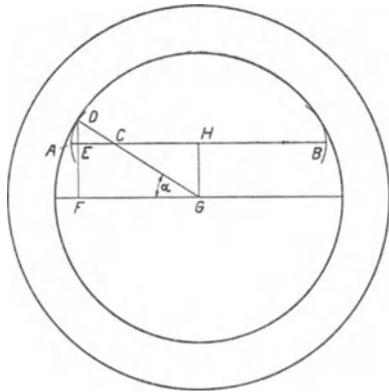


Abb. 315. Bohrungsmessung nach Tomlinson.

Also wird

$$\begin{aligned}\sin \alpha &= \sqrt{\frac{(D-d)^2 - (l-d)^2}{(D-d)^2}} \\ &= \frac{1}{D-d} \cdot \sqrt{D^2 - l^2 - 2 \cdot d \cdot (D-l)}\end{aligned}$$

und somit

$$D-d = \frac{(D-d) \cdot v}{\sqrt{D^2 - l^2 - 2 \cdot d \cdot (D-l)}}$$

oder

$$v = \sqrt{D^2 - l^2 - 2 \cdot d \cdot (D-l)},$$

woraus folgt

$$D^2 = 2 \cdot D \cdot d - l^2 + 2 \cdot l \cdot d - v^2 = 0,$$

$$D = d + \sqrt{(l-d)^2 + v^2}.$$

Die Meßgenauigkeit ergibt sich zu etwa 1 bis  $\frac{1}{2} \mu$ , falls vor allem die Länge  $l$  sorgfältig bestimmt wird (1).

Für sehr feine Bohrungen, wie sie bei Düsen und Ziehsteinen vorkommen, ist es nicht möglich, irgendein Meßgerät einzuführen. Hier dürfte nur das Verfahren übrig bleiben, den Durchmesser durch mikroskopische Messung zu ermitteln oder die Bohrung mittels eines geeigneten Projektionsapparates zu projizieren und ihr Bild auszumessen. Die benutzte Vergrößerung bestimmt man am besten durch Projektion eines genauen in  $\frac{1}{10}$  oder  $\frac{1}{100}$  mm geteilten Glasmaßstabes (Objektivmikrometer). Bei einer Objektivbrennweite von 35 mm und einem Schirmabstand von 2 m erhält man eine 60fache Vergrößerung. Nimmt man die Genauigkeit bei der Ausmessung des Projektionsbildes zu etwa  $\frac{1}{2}$  mm an, so kann man leicht eine Genauigkeit von  $\frac{1}{100}$  mm erhalten.

#### 14. Beispiele für die Verwendung der Fühlhebel.

In folgendem soll der Gebrauch der Fühlhebel in der Werkstatt, sowie für gewisse Sonderzwecke beschrieben werden, um einige Beispiele für ihre vielseitige Verwendbarkeit zu geben<sup>1</sup>. Besonders werden sie (meist in Gestalt der Meßuhr) zur Untersuchung von Werkzeugmaschinen auf Schlag der Spindel, Parallelität oder senkrechte Lage von Tischen und Führungen zur Spindelachse usw. benutzt. Es ist hier nicht möglich, die Abnahme einer Werkzeugmaschine ausführlich zu beschreiben [dafür sei auf (4b) verwiesen]; einige der dazu nötigen Messungen zeigt Abb. 316a und b), wagerechter und senkrechter Schlag von Spindeln, Fühlhebel auf Stativ; c) im Stichelhaushalter befestigt; d) Schlag von Hohlspindeln, wobei dem Fühlhebel ein einfacher Hebel der Übersetzung 1:1 vorgeschaltet ist; e) Prüfung der Parallelverschiebung eines Tisches, Fühlhebel im Stichelhaushalter; f) senkrechte Lage eines Drehtisches, Fühlhebel mit Klemme an der Spindel befestigt [zweckmäßig legt man bei e) und f) unter den Meßbolzen ein Endmaß, um etwaige kleine Vertiefungen im Tisch zu überbrücken].

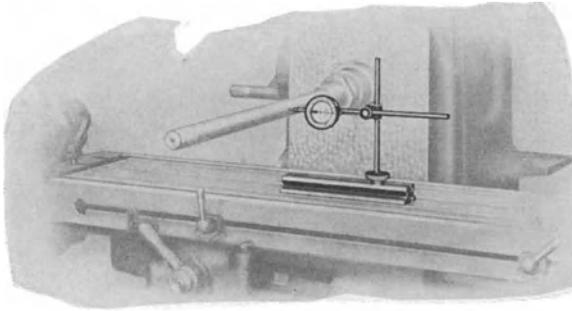
Die fortlaufende Kontrolle des Durchmessers der Werkstücke bei der Bearbeitung auf Rund- und spitzenlosen Schleifmaschinen, Dreh- und Revolverbänken, Gewindeschneidmaschinen usw. ermöglicht der in Abb. 317 wiedergegebene Fühlhebel (1a), der den Vorteil besitzt, unabhängig von den in der Maschine etwa auftretenden Erschütterungen zu sein und ferner auch Gleichdicke erkennen zu lassen<sup>2</sup>.

Er besteht aus dem Unterteil 1, das das Lager für den Schwinghebel 2 mit dem Meßhütchen 15 und ferner die durchbohrte Schiene 3 trägt. Auf dieser sitzen verstellbar der

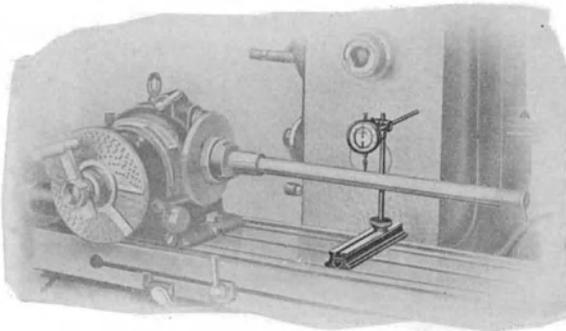
<sup>1</sup> Für weitere Anwendungen siehe z. B. (8).

<sup>2</sup> Für andere Ausführungen siehe (3), (6) und (7).

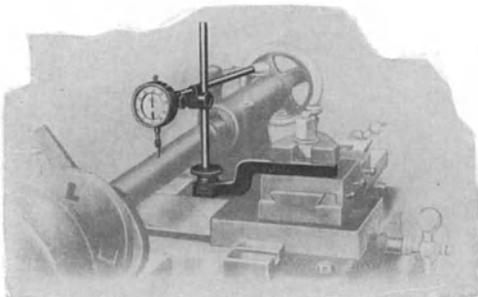
Arm 4 (der durch eine Mutter geklemmt wird) mit dem Amboß 16 und die Schiene 5, die in dem gegabelten Bock 6 geführt ist, sowie die sich auf der Schiene 5 führende Anlage 7 mit dem Stütznocken 14. Beide lassen sich mittels Bolzen und Mutter 8 zugleich an der Schiene 3 festziehen. Der Schwinghebel 2 wirkt mittels des durch Feder 9 ständig gegen ihn gedrückten Bolzens 10 auf die an der Schiene 3 sitzende Meßuhr 11. Die ganze Meßeinrichtung wird am Bock 6 mittels der Schraube 12 gelenkig mit dem Halter 13 verbunden, der in geeigneter Weise am Maschinenbett befestigt wird. Die Anbringung erfolgt so, daß sich das Gerät, etwas gegen



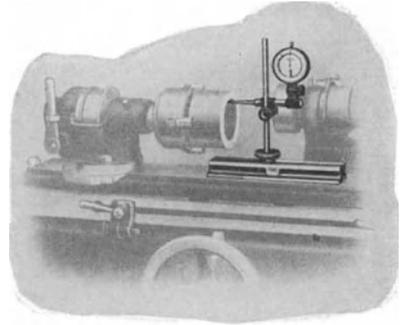
a



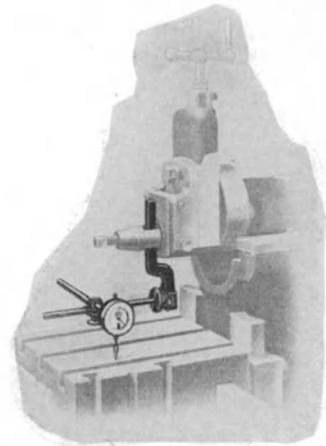
b



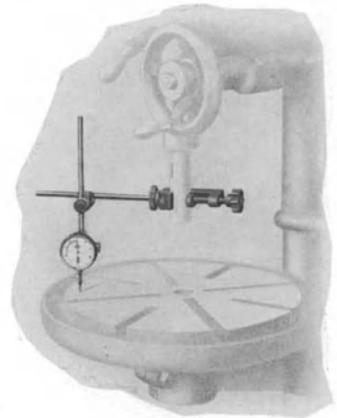
c



d



e



f

Abb. 316a bis f. Gebrauch des Fühlhebels an Werkzeugmaschinen.

die Wagerechte geneigt, gegen das Werkstück 17 legt. Die Einstellung wird zweckmäßig nach einem Normallehrdorn ausgeführt. Dazu wird der Amboßträger 4 (nach Lösen der Klemmschrauben) mittels der Spindel 18 gesenkt oder gehoben. In ihrem unteren Teil besitzt das Gewinde nur eine halb so große Steigung, so daß der Anschlag 7 mit dem Stütz-

nocken 14 nur um die Hälfte der dem Amboß gegebenen Verstellung verschoben wird und jener stets in der Mitte zwischen Amboß 16 und Meßzapfen 15 bleibt. Die zugleich nötige seitliche

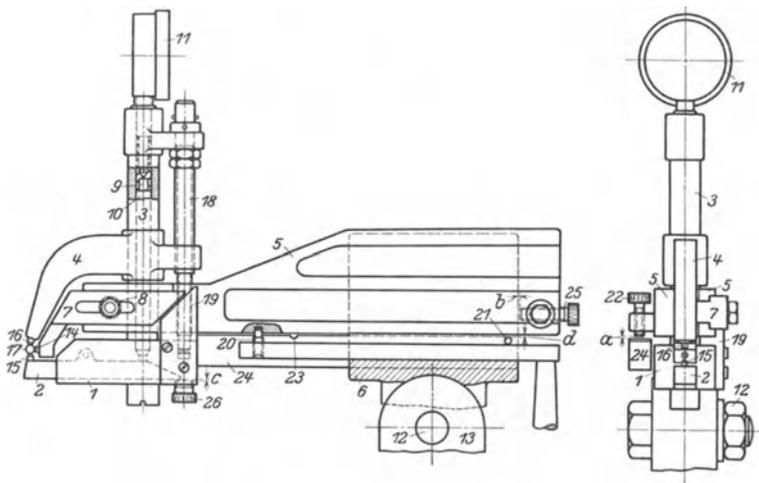


Abb. 317. Fühlhebel zum Messen während der Bearbeitung.

Verschiebung des Stütznockens erfolgt von Hand dadurch, daß der Anschlag 7 mit einer unter  $45^\circ$  verlaufenden Schräge gegen die am Unterteil 1 feststehende Leiste 19 gelegt wird.

Die Nulleinstellung geschieht wie üblich durch Drehen des Zifferblattes der Meßuhr.

In der Arbeitsstellung ruht das eigentliche Meßgerät schwingend auf der Schraube 20, so daß die 3 Taststifte (die zur Vermeidung der Abnutzung aus Diamanten bestehen) stets zur Anlage kommen. Das Loch, in das jene Schraube eintaucht, ist nahe dem Schwerpunkt des Gerätes angebohrt, wodurch die Belastung des Werkstücks durch den Amboß 16 eine sehr geringe ist. Die Schraube 20 wird so eingestellt, daß das Maß  $d$  zwischen Schiene 5 und Anschlagstift 21 etwa 0,5 bis 1 mm beträgt (was an der Meßuhr abzulesen ist).

Beim Nichtgebrauch wird die Meßvorrichtung zurückgezogen, so daß sich die Schraube 22 in die ausgefeilte Rundung 23 des Gleitstücks 24 legt und ein Vorgehen des Geräts während des Ein- und Ausspanns der Werkstücke verhindert.

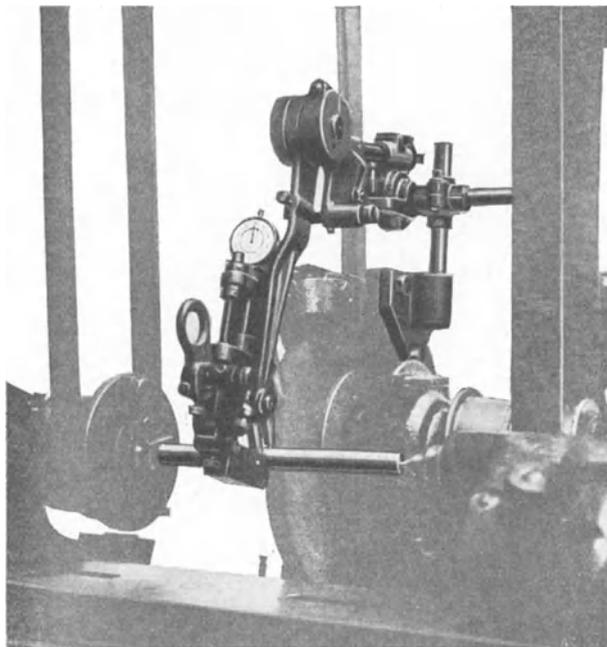


Abb. 318. Fühlhebel zum Messen während der Bearbeitung.

Zum Schleifen von genuteten oder mit Einstichen versehenen Wellen werden die Schrauben 22, 25, 26 so eingestellt, daß die Eintauchtiefe der Meßhütchen bzw. die Abstände  $a$ ,  $b$ ,  $c$  etwa 0,03 bis 0,08 mm betragen und dadurch ein Festhaken der Hütchen in den Nuten oder Einstichen wirksam verhindern.

Eine Ausführungsform für hängende Anordnung ist in Abb. 318 wiedergegeben.

Besondere Ausführungsformen sind noch für die Verwendung an Kurbelwellen-Schleifmaschinen und in der Lünettenbacke von Rundschleifmaschinen geschaffen, sowie für Arbeiten, bei denen die Lünette an der Schleifstelle angesetzt werden muß (Handmeßgerät)<sup>1</sup>.

Beim Gebrauch an der spitzenlosen Schleifmaschine ist die Einrichtung noch so getroffen, daß die fertig geschliffenen Werkstücke beim Verlassen der Schleifscheiben durch die Anlagestifte des Gerätes gleiten und so fortlaufend kontrolliert werden. Gegen das Schleifwasser wird das Gerät durch eine Haube geschützt.

Bei automatischen Schleifmaschinen läßt sich auch die gesamte Schaltung durch Fühlhebel auf elektrischem Wege steuern. An Werkzeugmaschinen und zur Kontrolle von Vorrichtungen können übrigens Fühlhebel vielfach ebenso wie Endmaße (siehe S. 93) verwendet werden; als Beispiel dafür sei das Fräsen von Nuten

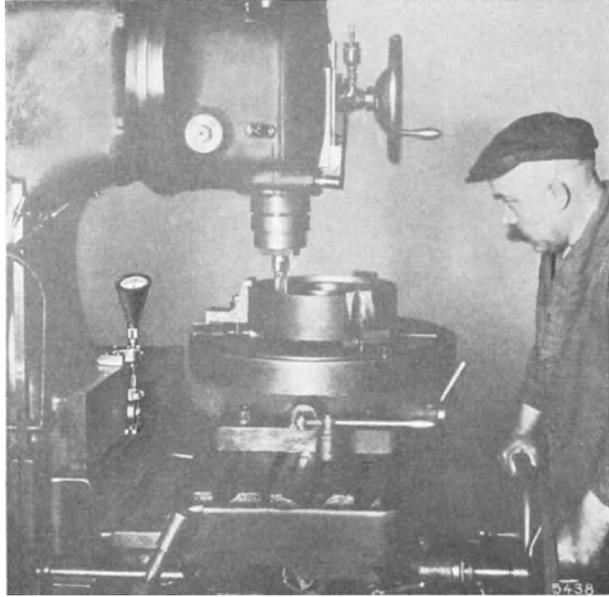


Abb. 319. Fühlhebel an der Fräsmaschine.

auf gleiche Tiefe (Abb. 319) angeführt. — Verwendet werden die Fühlhebel mit großem Meßbereich (Meßuhr) auch zur Bestimmung der Pfeilhöhe  $h$  für eine durch ihr Gestell gegebene Sehnenlänge  $s$ , um daraus den Durchmesser  $D$  großer Räder mittels der

$$\text{Beziehung } D = \frac{h^2 + \frac{s^2}{4}}{h} \text{ zu}$$

ermitteln; eventuell kann man die Teilung so ausführen, daß man an ihr unmittelbar den Wert von  $D$  abliest (Abb. 320). Dieselbe Vorrichtung läßt sich auch entsprechend für die Bestimmung des Durchmessers großer Bohrungen verwenden. Die Ermittlung des Nullpunktes erfolgt durch Aufsetzen auf eine ebene

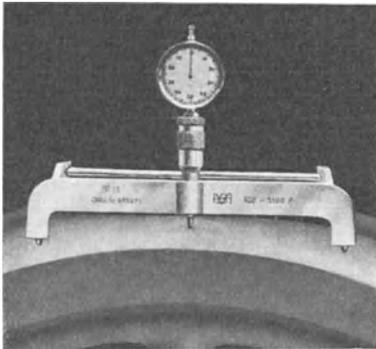


Abb. 320. Messung großer Durchmesser.

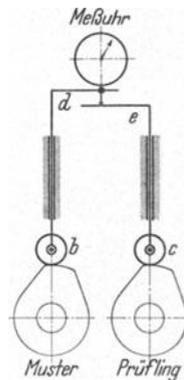


Abb. 321. Kontrolle von Nocken.

Platte (4a). — Weitere Anwendungsgebiete des Fühlhebels sind die Prüfung von Kugellagern auf radialen und axialen Schlag, die Kontrolle von Vorrichtungen usw. ( $1\alpha$ ,  $1\beta$ ). Als Beispiel sei die Kontrolle von Nocken betrachtet (Abb. 321). Normal und Prüfling werden synchron gedreht. Da die Meßuhr von

<sup>1</sup> Für Einzelfertigung und für große Werkstücke, deren verschiedene Ansätze in einer Einspannung fertig geschliffen werden, wird statt des Fühlhebels eine entsprechend gestaltete Schraublehre benutzt, die gleichfalls die Messung während der Bearbeitung gestattet.

dem Arm *d* getragen wird und ihr Meßbolzen auf dem Arm *e* aufsitzt, so zeigt sie keinen Ausschlag, falls sich beide Rollen gleichmäßig heben (4a).

Zur Bestimmung des Abstandes von Bohrungen könnte man eine Art Stangen-zirkel verwenden, dessen Schiene eine mm-Teilung trägt (Abb. 322) oder aus

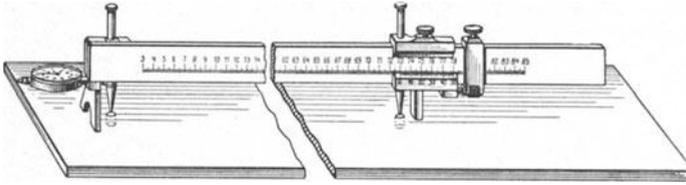


Abb. 322. Messung des Abstandes von Bohrungen.

Endmaßen zusammengesetzt wird, und der mit zwei geeigneten Auflagestühlen mit Dreipunktauflage auf den Prüfling so aufgesetzt wird, daß die konischen Tast-

spitzen stets parallel zu den Bohrungsachsen stehen. Der Vergleich verschiedener Prüflinge wird nun wesentlich erleichtert, wenn man den einen Meß-

schenkel dreh- oder verschiebbar beweglich macht und seine bei der Messung auftretende Bewegung durch einen Fühlhebel anzeigen läßt (9)<sup>1</sup>.

Bei nicht einwandfreien Kanten und bei Löchern von über 10 mm Durchmesser wird eine konische Buchse eingesetzt, deren Innenkonus gleich dem der Meßstifte ist. Unter Benutzung anderer Schnäbel können diese Geräte auch zum Messen von Innen- und Außendurchmessern dienen.

Zur fortlaufenden Kontrolle von gewalzten Platten, Bändern, Rundmaterial usw. während des Walzens oder der Weiterverarbeitung dient der Lichtbilddickenmesser (Abb. 323), der auf dem Prinzip des Kippspiegels beruht.

Auf das Walzgut legt sich der Schwinghebel *6* mit der Rolle *9*, dessen Meßdruck durch die Schraube *5* geregelt wird, und betätigt durch ein gelenkartig gelagertes Zwischenstück, das zur möglichst reibungsfreien Übertragung in Kugeln endet, den Hohlspiegel *8*, der durch eine Feder mittels des Stiftes *4* zu regelnde Lampe dagegen gedrückt wird, und der ein Bild der durch die Lampe *7* beleuchteten segmentförmigen Blende *10* auf der Skala *11* entwirft, die in 2997 mm Abstand an der Decke mittels eines Lattingerüsts befestigt wird. Ihre Teilung gibt entweder  $\frac{1}{10}$  oder  $\frac{1}{100}$  mm, wobei jeweils die  $\frac{1}{10}$  Skt. zu schätzen sind. Der Meßbereich umfaßt 22 Skt.; die Einstellung erfolgt durch Endmaße. Das ganze Gerät wird mittels des Halters *1* und der Schraube *2* an einer Schiene der betreffenden Maschine befestigt. Durch



Abb. 323. Lichtbild-Dickenmesser.

Griff *13* läßt sich die Rolle beim Nichtgebrauch abheben (5).

Fühlhebel mit selbsttätiger Aufzeichnung werden bisher merkwürdigerweise nicht benutzt. Bei der kontinuierlichen Fortbewegung des Prüflings wäre zugleich ein Papierstreifen, ähnlich wie bei den Morseapparaten, an dem Zeiger des Fühlhebels vorbeizuführen, der dann mittels Schreibfeder, elektrischen Funkens oder auch absatzweise registrierend, die jeweilige Dicke, bzw. ihre Abweichung vom Sollwert aufzeichnet. Durch zwei beliebig einzustellende Farbrädchen würde man dabei gleichzeitig die Toleranzgrenzen verzeichnen. Bei absatzweise bewegten Prüflingen (z. B. Blechtafeln) würde nur jedesmal ein Punkt aufgezeichnet und dann beim Anheben des Meßbolzens (zwecks Verschiebung des Prüflings) das Papier um einen bestimmten Betrag weiter bewegt<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Statt des Fühlhebels kann man auch eine Schraublehre nehmen.

<sup>2</sup> Ähnliche Vorrichtungen sind schon früher zum Aufzeichnen des Reliefs von Münzen (2) und des Kalibers von Aräometerspindeln (4) benutzt.

Das Kippspiegelprinzip hat auch verschiedentlich Anwendung gefunden bei den für die Technik bestimmten Apparaten zur Bestimmung des Ausdehnungskoeffizienten<sup>1</sup>. Er wird bei dem in Abb. 324 und 325 wiedergegebenen Apparat

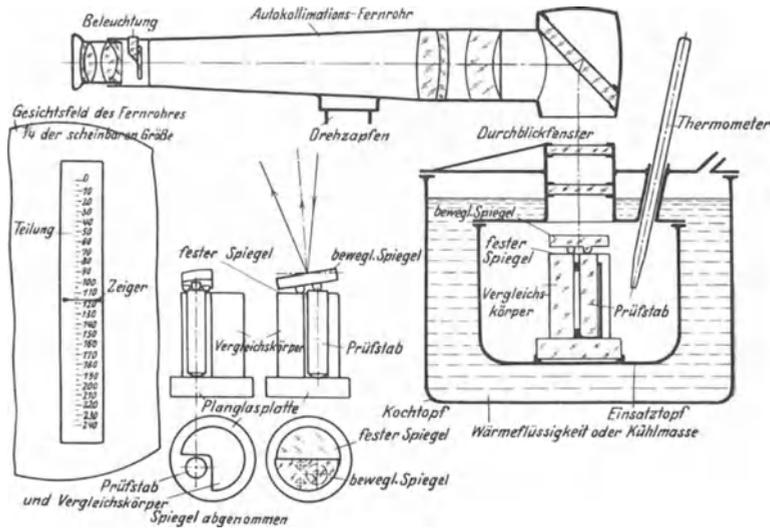


Abb. 324. Apparat zur Bestimmung des Ausdehnungskoeffizienten.

durch Vergleich gegen einen Normalkörper ermittelt; dieser besteht aus einem Glasstab von 50 mm Länge (Toleranz  $+ 0,05$ ,  $- 0,01$  mm) und sektorförmigem Querschnitt, der den sehr kleinen Ausdehnungskoeffizienten  $\beta = 4,8 \cdot 10^{-6}$  besitzt; dieser ist gewählt, damit der Prüfling auf jeden Fall den größeren Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  hat. Beide stehen auf einer Planplatte; ein halbkreisförmiger Spiegel legt sich mit 2 Punkten auf den Glasstab und mit einem dritten auf den Prüfling. Seine Kippung wird, wie beim Optimeter, durch ein Autokollimationsfernrohr beobachtet. Um von allen etwa eintretenden sonstigen Veränderungen unabhängig zu sein, wird aber die Verschiebung der Skala nicht gegen einen im Fernrohr festen Index abgelesen, sondern an dessen Bilde, das von der (von dem Kippspiegel) freien Oberfläche des Glasstabes zurückgeworfen wird, so daß man durch die gegenseitige Verschiebung von Skala- und Indexbild die Änderung  $\lambda$  des Unterschiedes der Längen von Prüfling und Glasstab ermittelt. Beide stehen in einem rings geschlossenen,

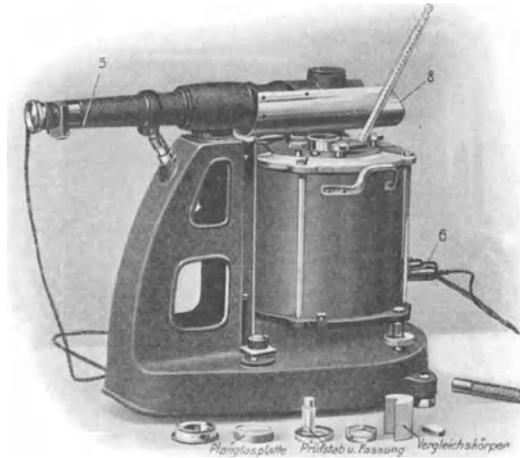


Abb. 325. Apparat zur Bestimmung des Ausdehnungskoeffizienten.

<sup>1</sup> Andere Methoden dafür beruhen auf der interferentiellen Beobachtung der Längenänderung des Prüflings oder auf dem Vergleich mit einem Normal mittels Transversalkomparators bei verschiedenen Temperaturen, wofür auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen werden muß.

elektrisch geheizten Thermostaten, der von  $0^{\circ}$  (schmelzendes Eis) bis  $100^{\circ}$  (siedendes Wasser) erhitzt werden kann. Nun ist

$$\lambda = l \cdot (\alpha - \beta) \cdot t = l \cdot \gamma \cdot t,$$

falls  $l$  die Länge bei der Ausgangstemperatur,  $t$  die Temperaturerhöhung und  $\gamma$  die Differenz  $\alpha - \beta$  bezeichnen. Somit ist

$$\gamma = \frac{\lambda}{l \cdot t}.$$

Bezeichnet man die bei der Messung der einzelnen Größen  $\lambda$ ,  $l$  und  $t$  begangenen Fehler mit  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ , so bestimmt sich der dadurch verursachte Fehler  $F$  von  $\gamma$  aus

$$F = \pm \gamma \cdot \left( \frac{f_1}{\lambda} + \frac{f_2}{l} + \frac{f_3}{t} \right).$$

Setzt man  $t = 100^{\circ}$ ,  $l = 50$  mm, so wird bei Stahl (mit  $\alpha = 11,5 \cdot 10^{-6}$ )  $\gamma = 6,7 \cdot 10^{-6}$ ,  $\lambda = 33,5 \mu$ . Will man  $\gamma$  auf  $0,1 \cdot 10^{-6}$  genau haben, so darf die Klammer den Betrag  $\frac{0,1}{6,7} = 0,015$  nicht überschreiten. Nun kann man  $f_1$  etwa zu  $0,4 \mu$  ansetzen (da die Differenz zweier Ablesungen zu bilden ist), so daß  $\frac{f_1}{\lambda} = 0,012$  wird. Demnach dürfen  $\frac{f_2}{l}$  und  $\frac{f_3}{t}$  höchstens zusammen  $0,003$  ausmachen. Bestimmt man  $l$  auf  $0,05$  mm genau, so ist  $\frac{f_2}{l} = 0,001$ ; für  $t$  genügt es somit, Anfangs- und Endtemperatur auf je  $\frac{1}{10}^{\circ}$  zu messen, da dann  $\frac{f_3}{t} = 0,002$  wird. Es ist also ohne große Schwierigkeit für  $\alpha$  eine Genauigkeit von etwa  $\pm 1\%$  zu erreichen.

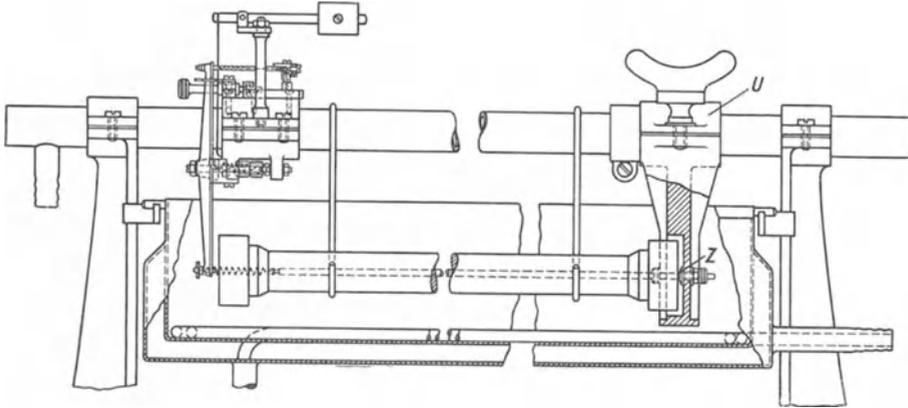


Abb. 326. Apparat zur Bestimmung des Ausdehnungskoeffizienten.

Eine Absolutbestimmung (ohne Benutzung eines Vergleichskörpers) gestattet der in Abb. 326 dargestellte Apparat (1), der den Vorteil hat, den Prüfling in ein Temperaturbad legen zu können. Das Bett besteht aus einem Invarrohr von 20 mm Durchmesser und 580 mm Länge, das rechts geklemmt, links nur geführt ist und von Kühlwasser durchflossen wird. An ihm hängt der Prüfling an 2 Neusilberdrähten und ruht rechts gegen den kugligen Anschlag  $Z$ , der in einem bei  $U$  an das Bett geklemmten Widerlager aus Invar sitzt. Gegen das linke Ende des Prüflings legt sich der auf Schneiden gelagerte, ausbalancierte Fühlhebel aus Invar mittels einer Spitze aus gleichem Werkstoff an<sup>1</sup>. Sein oberes Ende wirkt auf die Stoßstange aus Invar, die einen Kippspiegel betätigt. Seine Drehung

<sup>1</sup> Für die sehr gut durchgeführte Lagerung des Fühlhebels sei auf die angegebene Veröffentlichung verwiesen.

wird mittels eines in 1,7 m Entfernung stehenden Fernrohrs mit Skala beobachtet. Die Gesamtübersetzung ist 1:2000; die Meßgenauigkeit wird zu  $0,1 \mu$  angegeben; die Eichung erfolgt am besten durch Endmaße<sup>1</sup>.

## C. Schraublehren<sup>2</sup>.

### 1. Ausführung.

Die Verwendung der Schraube zu Meßzwecken beruht darauf, daß bei Drehung der Spindel in einer festgehaltenen Mutter der von ihr zurückgelegte Weg proportional dem Drehwinkel  $\varphi$  ist. Bezeichnet man ihre Steigung mit  $h$ , so ist die Verschiebung

$$s = h \cdot \frac{\varphi}{2 \cdot \pi}$$

Die Genauigkeit wird also unter sonst gleichen Umständen um so größer, je feiner  $h$  ist und je genauer sich der Drehwinkel  $\varphi$  messen läßt. Versieht man die Spindel mit einer genügend großen Trommel, so läßt sich auf dieser eine sehr feine Unterteilung anbringen.

Die Verwendung der Schraube in der Gestalt des Okularschraubenmikrometers an Fernrohren und Mikroskopen (siehe S. 53) zu wissenschaftlichen Messungen, besonders in der Astronomie, ist schon sehr alt. An Geschützaufsätzen findet sie sich um 1570.

Als erster Benutzer des eigentlichen Schraubenmikrometers galt bisher William Gascoigne (1621 ? bis 1644) aus Yorkshire, der es für astronomisch-visuelle Feinmessungen verwendete. Seine Erfindung wurde auch von dem Danziger Astronomen Hevelius beansprucht, der es zur meßbaren Feinbewegung der Alhidade seines großen, 1644 vollendeten Azimutalquadranten eingerichtet hatte. In dem Dresdener Mathematisch-Physikalischen Salon finden sich aber bereits Schraubenmikrometer an einer aus dem Jahre 1609 oder 1619 stammenden Rechenschiene und an einem von 1631 datierten Instrument für geodätische Winkelmessungen; das letztere weist sogar bereits Trommelablesung auf (3).

In der Technik wurde schon vor Watt ein Verfahren gebraucht, zwei parallele Backen mittels einer Schraube zu verschieben und den Betrag an einer aufgeritzten Schraubenlinie abzulesen. Das erste bekannte technische Mikrometer stammt indessen von Watt aus dem vorletzten Jahrzehnt des 18. Jahrhunderts (Abb. 327). Es besaß eine feste und eine mittels Schnecke verstellbare, seitlich gezahnte, flach-rechteckige Backe. Die ganzen Umdrehungen wurden an einer Skala, die Bruchteile an einer Teilscheibe mittels Zeigers abgelesen (5). Maudslay benutzte ein 16'' langes Tischmikrometer mit 100teiliger Indexscheibe, die Ableseung auf  $\frac{1}{1000}$ '' gestattete (2). Die verdeckte Schraube soll von Wilkinson eingeführt worden sein (1).

Um 1845 war die Schraublehre als Blechlehre in Wien auf dem Markt, bei der die Ableseung des Drehwinkels an einer größeren Scheibe erfolgte (4). Im Jahre 1848 wurde Palmer in Frankreich ein Patent auf eine Schraublehre erteilt, die bereits die heutige Art der Ableseung zeigt, aber nur  $\frac{1}{10}$  mm zu beobachten gestattete (Abb. 328). Ihre Einführung in die Technik ist aber erst von Amerika aus entscheidend beeinflußt.

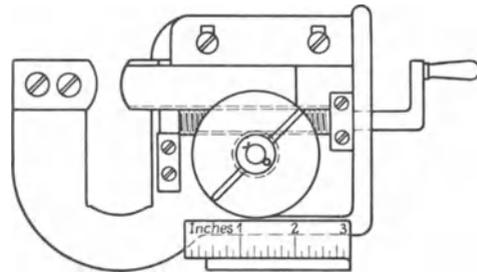


Abb. 327. Schraublehre von Watt.

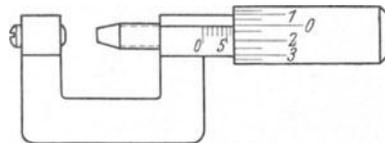


Abb. 328. Schraublehre von Palmer.

<sup>1</sup> Für die Anwendung des Fühlhebels zur Bestimmung der Ebenheit von Linealen, Tuschier- und Anreißplatten siehe Abschnitt V D.

<sup>2</sup> Auf Beschluß des Ausschusses für Meßwesen des DNA sollen diese bisher meist Schraubenmikrometer oder Mikrometerschrauben genannten Geräte als Schraublehren bezeichnet werden.

Hier bekam vor 1867 die Bridgeport Brass Comp. eine Sendung Messingblech als nicht lehrenhaltig zurück. Da sie sich aber nach der Lehre des Herstellers als maßhaltig erwies, wurde weiter nachgeforscht und als Grund für die Meinungsverschiedenheit festgestellt, daß beide Lehren nicht stimmten. Darauf entwarf der Leiter der Gesellschaft, S. R. Wilmot, die Schraublehre (Abb. 329). Die Spindel hatte 40 Gang/1", die Ableseung auf  $\frac{1}{1000}$ " erfolgte durch Index und 25 parallel zur Achse gleichmäßig auf dem Trommelumfang verteilte Grade, die der  $\frac{1}{40}$ " an Spiralen, die die Trommel mit der Spindelsteigung umliefen. Die Enge der Teilung erlaubte nicht das Anbringen einer Bezifferung, so daß die Ableseung außerordentlich schwierig war.

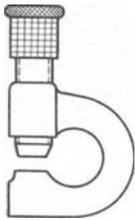


Abb. 329. Älteste amerikanische Schraublehre.

Seit 1867 beschäftigten sich Brown u. Sharpe, die eine Schraublehre von Wilmot besaßen, mit ihrer Herstellung; sie hätten aber die Konstruktion (nach einem Briefe von Sharpe aus dem Jahre 1887) nicht aufgenommen, wenn sie nicht auf der Pariser Weltausstellung 1867 eine Schraublehre von Palmer gesehen hätten. Sie übertrugen nun deren Ableseung (mit der Unterteilung) auf die amerikanische Konstruktion (7, 8). Diese Mikrometer dienten zunächst auch nur als Blechlehren, erst Mitte der 70er Jahre wurde ihr Meßbereich vergrößert und damit das Gerät für die Meßtechnik brauchbar gemacht. Brown u. Sharpe verlegten später auch das Gewinde völlig nach innen, um es vor Verschmutzung und Beschädigung zu schützen, und brachten eine Klemm- und eine Nachstelleinrichtung für die Spindel, sowie die Gefühlsschraube an (2). Bis in die Mitte der 80er Jahre waren sie die einzigen Hersteller. Daß die Schraublehre in den Vereinigten Staaten zur Entwicklung gelangte, hatte seinen Grund in der dort um jene Zeit bereits entwickelten maschinellen Massenfertigung, die durch den Mangel an Facharbeitern bedingt war, und die ein Bedürfnis nach genauen Meßgeräten erweckte.

In ihrer jetzt üblichen Form (Abb. 330) besteht die Schraublehre aus einem kräftigen Bügel, der auf der einen Seite einen festen Anschlag (Amboß) *b*,

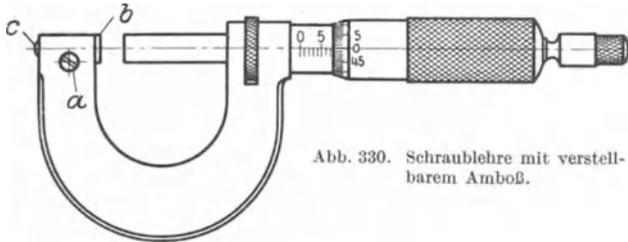


Abb. 330. Schraublehre mit verstellbarem Amboß.

auf der anderen eine Mutter trägt, in der sich die Spindel mit der zweiten Meßfläche dreht. Ihre Drehung wird an der auf ihr befestigten, geteilten Trommel gegen einen auf der festen Mutter gezogenen Strich abgelesen, wo auch

die Marken zur Ermittlung der ganzen Umdrehungen angebracht sind. Da die Schraubenfehler, wie näher weiter unten ausgeführt werden wird, günstigstenfalls  $2\mu$  betragen, so genügt es, 1 Trommelteil gleich  $\frac{1}{100}$  mm zu machen, da man dann die  $\frac{1}{1000}$  mm noch schätzen kann. Voraussetzung ist dazu, daß das Intervall mindestens eine Größe von 0,6 mm hat (siehe S. 37). Bei 100 Teilen müßte also der Trommelumfang mindestens 60 mm und der Durchmesser etwa 20 mm betragen. Man zieht es deshalb vor, der Spindel eine Steigung von 0,5 (statt 1) mm zu geben, da man dann bei mäßigem Trommeldurchmesser für die

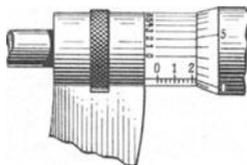


Abb. 331. Nonius an den Schraublehren.

Zehntelschätzung geeignete Intervalle erhält. Die  $\frac{1}{1}$  und  $\frac{1}{2}$  mm werden wieder an einer Längsteilung abgelesen.

Zuweilen versteht man die Schraublehre zur genauen Bestimmung der  $\frac{1}{10}$  der Teilung mit einem Nonius, indem man parallel zur Erzeugenden noch 9 Striche im Abstände von 0,9 Trommelteilen anbringt (Abb. 331) oder, weniger zweckmäßig, eine besondere Hülse mit dem Nonius zugleich mit der Spindeldrehung sich verschieben läßt (Abb. 332).

Die Schraublehren werden auch mit Zahlenablesung ausgeführt, wobei nach Abb. 333 die Spindel mit einem Zählwerk gekuppelt ist. Man kann so die  $\frac{1}{1000}$ " (etwa  $25\mu$ ) unmittelbar ablesen, während die  $\frac{1}{10000}$ " ( $2,5\mu$ ) an der Trommelteilung ermittelt werden (6, 9, 10).

Um eine größere Ablesegenauigkeit zu erzielen, hat man die Schraublehren auch mit einem Differentialgewinde versehen, um eine kleine Steigung von 0,1 mm zu erhalten, so daß man an der 50teiligen Trommel  $2\mu$  ablesen und  $0,2\mu$  schätzen kann. Indessen dürfte die

Meßgenauigkeit nicht diesen Betrag erreichen, da sich die Fehler der beiden Gewinde unter Umständen addieren können.

Bei den meisten Ausführungen dreht man die ganze Spindel und damit auch die eine Meßfläche, so daß durch die Reibung an dem Prüfling eine größere Abnutzung zu befürchten ist. Auch wird dadurch bei nicht genau senkrechter Lage der Meßfläche zur Spindelachse eine Fehlerquelle hervorgerufen. Trotzdem haben sich Konstruktionen, bei denen der die Meßfläche tragende Bolzen durch die Spindeldrehung nur verschoben wird, bisher wenig eingeführt. Eine Ausführungsform dafür zeigt Abb. 334.

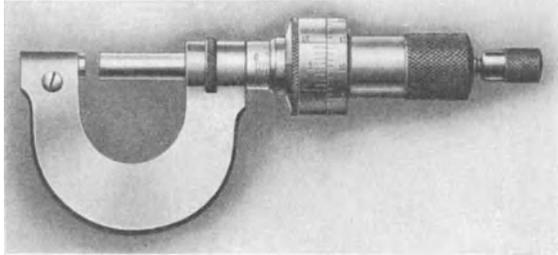


Abb. 332. Schraublehre mit Nonius.

Der in der Hohlspindel *D* gelagerte Meßbolzen *A* ist durch eine angefräste Fläche und den Bolzen *B* gegen Drehung gesichert. Beim Vorwärtsdrehen der Spindel wird er unmittelbar mitgenommen, während dies beim Zurückschrauben mittels der Feder *C* geschieht.

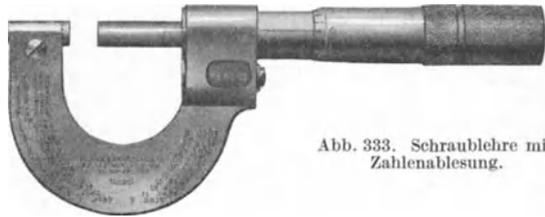


Abb. 333. Schraublehre mit Zahlenablesung.

Hat man Maße sehr verschiedener Größe zu bestimmen, so ist das Verstellen der Spindel über ihren Meßbereich von in der Regel 25 mm etwas zeitraubend (zumal es zur Schonung des Gewindes nicht so ausgeführt werden darf, daß man den Bügel um die Spindel herumschwenkt). Man hat deshalb auch Mikrometer mit Schnellverstellung ausgeführt, bei der die Mutter zweiteilig gehalten ist und durch Druck auf einen Knopf die Spindel freigibt, oder die Grobeinstellung auch in anderer Weise bewirkt. Diese haben sich aber, der dabei wohl kaum zu vermeidenden Fehler wegen, nicht eingeführt.

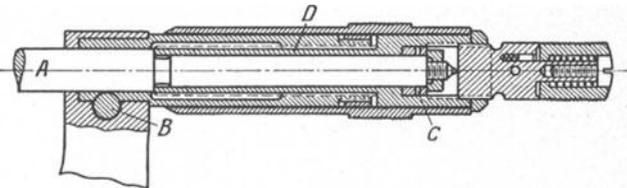


Abb. 334. Schraublehre mit verschiebbarem Meßbolzen.

Da es schwierig ist, lange Schrauben genügend genau herzustellen, so beschränkt sich der

Meßbereich der Schraublehre fast stets auf 25 mm. Handelt es sich um größere Maße, so setzt man die Spindeln in größere Bügel ein. Da man bei diesen den Nullpunkt nicht unmittelbar bestimmen kann, kontrolliert man den kleinsten damit zu messenden Wert mittels Endmaße oder Meßscheiben. Besser ist es noch, sie für das Maß des mittleren Bereichs zu wählen, da dann die Fehler an den Enden nur halb so groß werden.

## 2. Abnutzung und Meßdruck.

Wenn nun auch bei neuen Schraublehren der Nullpunkt (bzw. das Kleinstmaß) stimmt, so wird mit der Zeit infolge der unvermeidlichen Abnutzung doch eine Abweichung auftreten, die man ermitteln und in Rechnung setzen muß. Für die Werkstatt wird man dies aber möglichst zu vermeiden suchen, zumal dabei leicht Vorzeichenfehler begangen werden können. Deshalb sind alle besseren Mikrometer mit Vorrichtungen ausgestattet, die die genaue Einstellung auf das Kleinstmaß gestatten.

Früher führte man dies ausschließlich durch Verstellen des Ambosses *b* (Abb. 330) von Hand oder besser mittels einer Druckschraube *c* aus und klemmte ihn nach erfolgter Einstellung mit der Schraube *a* fest. Die Schraube *c* wurde auch wohl, um die Feineinstellung zu erleichtern, mit Differentialgewinde versehen; zugleich sollte durch die doppelte Reibung in dem im Bügel und im Amboß befindlichen Muttergewinde ein festerer Sitz erzielt werden.

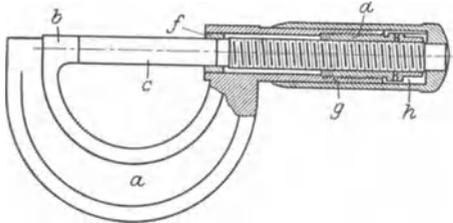


Abb. 335. Schraublehre, ältere Ausführung.

Hierbei ist die Trommel mit der Spindel starr verbunden (verlötet). Da bei dieser Nachstellung aber leicht die Parallelität der beiden Meßflächen verloren geht, ist es besser, den Amboß festsetzen zu lassen und die Nullpunkteinstellung durch Verdrehen der Teiltrommel gegen die Spindel vorzunehmen. Diese Aufgabe ist auf verschiedene Weise gelöst.

Bei der älteren Ausführung von Slocumb (Abb. 335) ist, um eine möglichst feine Justierung zu ermöglichen, auf die Mutter *d* noch ein Gewinde etwas größerer Steigung geschnitten, so daß sie bei Drehung als Differentialschraube wirkt. Das Nachstellen erfolgt mit einem Schlüssel, der in eine Nut von *d* eingreift, die aber nur zugänglich wird, nachdem man die Spindel fast ganz herausgeschraubt hat. Ob die Justierung gelungen, sieht man erst nach völligem Wiedereinschrauben. Da man dieses Verfahren mehrfach wiederholen müssen, ist es sehr unbequem und zeit-

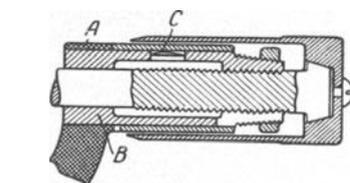


Abb. 336. Schraublehre, ältere Ausführung.

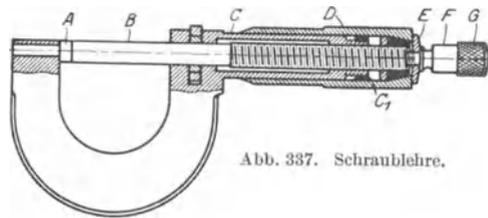


Abb. 337. Schraublehre.

raubend. Dagegen bietet diese Konstruktion den Vorteil, daß die Mutter nach zu starker Abnutzung leicht gegen eine neue ausgetauscht werden kann.

Wesentlich einfacher ist eine ältere Ausführung von Starrett (Abb. 336), bei der der Index mit der  $\frac{1}{2}$  mm-Teilung nicht unmittelbar auf der Mutter *B*, sondern auf einer besonderen zylindrischen Hülse *A* sitzt, die gegen diese verdreht, gegen unerwünschte Verstellung aber durch die Feder *C* gesichert ist.

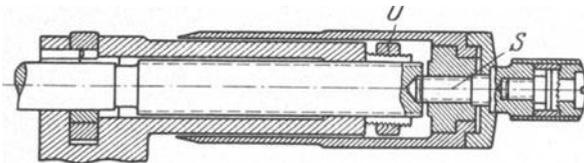


Abb. 338. Schraublehre, neuere Ausführung.

Bei allen übrigen Konstruktionen wird die Trommel gegen den Index verstellt. Bei der Ausführung der Hommel-Werke (Abb. 337), und ebenso

einer neuen von Brown u. Sharpe, wird die Trommel *D* durch die Feder *E* gegen das konische Ende der Spindel gepreßt und läßt sich nach Lösen der Schraube *F* auf dieser leicht um einen gewissen Betrag verdrehen. Ähnlich ist auch eine zweite Konstruktion von Starrett (Abb. 338), nur ist hier der obere Teil der Spindel nicht als Kegel, sondern als Zylinder

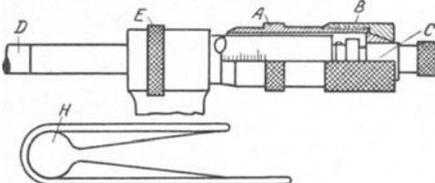


Abb. 339. Schraublehre.

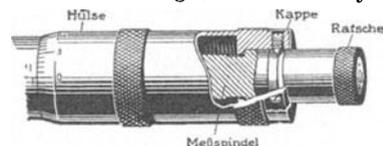


Abb. 340. Schraublehre.

gestaltet, an den die Trommel wieder durch eine Schraube *S* gedrückt wird. Bei der Konstruktion der Maßindustrie Werdau besteht die Hülse aus zwei Teilen *A* und *B* (Abb. 339). Der Teil *A* ist an seinem rechten Ende als geschlitzter Konus ausgebildet, mit Gewinde

versehen und wird durch die Mutter *B* auf die Spindel *C* geklemmt. Zum Nachstellen wird *A* mit einer besonderen Klammer *H* festgehalten, die Mutter *B* gelöst, die Spindel *C* zur Berührung mit dem Amboß *D* gebracht, durch den Exzenter *E* festgelegt, Trommel *A* auf 0 eingestellt, Mutter *B* leicht angezogen, Spindel *C* nach Lösung von *E* etwas zurückgedreht und schließlich *B* auf *A* festgeklemmt. Bei der Schraublehre von Zeiss (Abb. 340) wird die Trommel mit der Spindel durch drei Schraubchen verbunden, die gewöhnlich durch eine Kappe verdeckt sind.

Diesen stehen einige Konstruktionen gegenüber, die den Vorteil haben, daß bei ihnen nicht nur die Teiltrommel verdreht, sondern auch etwas in axialer Richtung verschoben werden kann, damit ihr als Index für die  $\frac{1}{2}$  mm-Teilung dienender unterer Rand auch wirklich mit einem Teilstrich zusammenfällt, wenn der Längsstrich auf 0 zeigt. Die Verbindung von Trommel und Spindel wird hier z. B.

durch eine Schraube *C* mit konischem Kopf (Abb. 341) bewirkt, die beim Hineinschrauben den oberen Teil der Spindel fest gegen die Trommel drückt (eine praktisch ähnliche Ausführung zeigen die Mikrometer von Johansson). Bei der in Abb. 342 wiedergegebenen Ausführung wird der gewünschte Zweck dadurch erreicht, daß der obere, außen konisch gehaltene Teil *a* der Trommel auf der zylindrischen Spindel *c* durch die Überwurfmutter *b* festgeklemmt wird. Bei allen Ausführungen nach Abb. 337 bis 342 kann die Justierung in der Nullstellung selbst erfolgen.

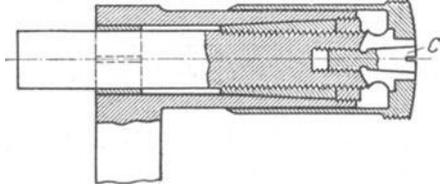


Abb. 341. Schraublehre mit verdreh- und verschiebbarer Trommel.

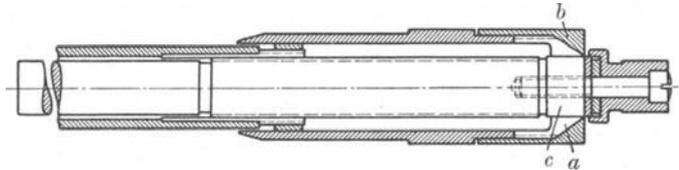


Abb. 342. Schraublehre mit verdreh- und verschiebbarer Trommel.

Beim Gebrauch wird aber auch das Gewinde allmählich abgenützt, wodurch die Spindel zu schlottern beginnt. Diese Abnutzung wird im allgemeinen dadurch aufgehoben, daß die Mutter in ihrem oberen, schwach konisch gehaltenen Teil geschlitzt ist und mittels einer Überwurfmutter *U* (Abb. 338) nachgestellt werden kann, wozu man bei den älteren Konstruktionen wieder die Spindel ganz herausschrauben mußte, während man bei den neueren nur die Trommel abzieht und dadurch die Nachstelleinrichtung zugänglich macht.

Bei dem Mikrometer von Slocomb besteht die Mutter aus zwei Stücken *g* und *h* (Abb. 335); sie werden in ihrer gegenseitigen Lage dadurch erhalten, daß die beiden einander zugekehrten Stirnseiten eine V-förmige Verzahnung tragen; außerdem werden sie durch eine zwischen ihnen liegende Spiralfeder auseinander gepreßt. Falls die Abnutzung zu weit vorgeschritten ist, wird die Spindel ganz herausgeschraubt, *h* um ein kleines Stück verdreht und jene wieder eingeführt.

Um die Abnutzung gering zu halten, sollen die Flanken möglichst auf die ganze Muttergewindelänge tragen. Für die Genauigkeit der Schraublehren genügt es indessen, wenn eins der beiden Gewinde nahezu fehlerfrei ist. Praktisch wird man deshalb die Spindel möglichst genau herstellen, während man auf die Mutter weniger Sorgfalt verwenden wird; allerdings würden bei groben Steigungsfehlern nur 2 Gänge tragen (siehe Abb. 343). Bei idealer Spindel würden durch ihre Drehung auch in einer sehr schlechten Mutter keine zusätzlichen Verlagerungen auftreten. Indessen haben die kleinen noch vorhandenen Abweichungen im Spindelgewinde bei schlechten Müttern selbstverständlich einen größeren Einfluß als bei guten, so daß man eine gewisse Sorgfalt doch auch auf diese verwenden wird. Durch die Nachstellung der Mutter wird die Größe der Schraubenfehler nicht geändert, wie Versuche gezeigt haben, bei denen die Spindel 100000 mal hin und her gedreht wurde. Dabei war es gleichgültig,



Abb. 343. Mutter- und Spindelgewinde.

ob das Spindelgewinde hart oder weich war, und die Mutter aus Stahl, Messing oder Bronze bestand (5).

Will man kontrollieren, ob verschiedene Werkstücke ein bestimmtes Maß nicht überschreiten, so ist es angenehm, wenn man die Spindel in der einmal gegebenen Stellung festklemmen kann. Das erfolgt durch einen mittels Kordelring bewegten Exzenter (Abb. 338) oder durch ein Stahlband, das bremsend auf die Spindel wirkt (Abb. 344).

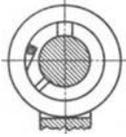


Abb. 344. Feststellvorrichtung.

Da sich bei der Schraube im Gleichgewicht Kraft:Last verhält wie Ganghöhe:Umfang der Spindel, bei den üblichen Ausführungen also etwa wie 1:30, so kann der auf den Prüfling ausgeübte Meßdruck ziemlich stark variieren. Um von der durch das Meßgefühl bedingten Unsicherheit frei zu werden, versieht man die Schraublehre häufig mit einer Gefühlsschraube, die einen stets gleichbleibenden Meßdruck gewährleisten soll. Bei dieser wird der Griff zum Drehen der Schraube nicht starr mit der Spindel, sondern durch eine Reibungskupplung

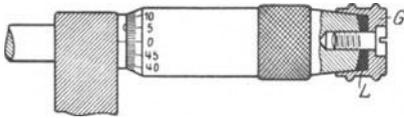


Abb. 345. Reibungskupplung mit Lederscheibe.

(seit 1873 unter dem Namen der Breguet-Bewegung bekannt (14)) oder durch eine Ratschenkupplung verbunden (von G. W. Church 1883 eingeführt).

Bei jener befindet sich z. B. zwischen dem Griff *G* und der Spindel eine Lederscheibe *L* (Abb. 345) oder eine Spiralfeder *S* (Abb. 346) oder auch, bei einer Ausführung von Starrett, eine flach aufgerollte Feder aus Nickelsilber, deren inneres Ende an der Spindel befestigt ist, während sich das andere gegen den Innenmantel des Griffs legt. Solange die bewegliche Meßfläche keinen Widerstand findet, werden

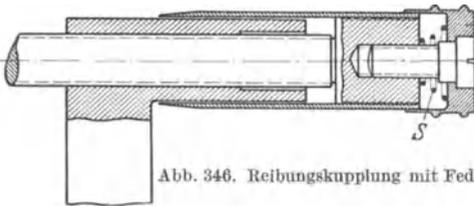


Abb. 346. Reibungskupplung mit Feder.

Spindel und Teiltrommel durch die Reibung mitgenommen, während, nach Berührung des Prüflings unter einem bestimmten Druck, der Griff *G* gleitet.

Bei der Ratschenkupplung greift eine Ringblattfeder *F* (Abb. 347), eine Spiralfeder *S* (Abb. 348) oder ein federnder Stift *S* (Abb. 349) in die Stirnverzahnung *V* des Griffs (also

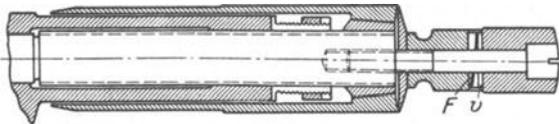


Abb. 347. Ratschenkupplung mit Blattfeder.

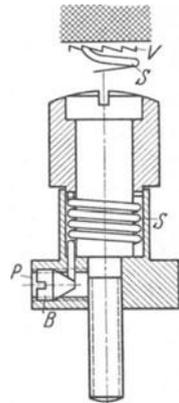


Abb. 348. Ratschenkupplung mit Spiralfeder.

eine Art Kronenrad) ein und kuppelt dadurch den Griff mit der Spindel, bis beide wieder bei einem bestimmten Meßdruck übereinander zu gleiten beginnen. Die Ausführung nach Abb. 348 (8) gestattet beim Nachlassen der Feder eine Regelung ihrer Spannung mittels der auf einen Konus einwirkenden Schraube *B* (die bei *P* plombiert werden kann), um einen stets gleichbleibenden Meßdruck zu erzielen.

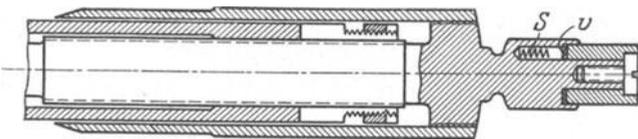


Abb. 349. Ratschenkupplung mit federndem Stift.

Innerhalb der Ablesegenauigkeit der Schraublehre von  $1 \mu$  arbeiten die verschiedenen Zähne der Ratsche genügend gleichmäßig (1), so daß es gleichgültig ist, welchen oder wieviele man benutzt. Bei einer Reihe wiederholter Einstellungen ergaben

sich bei sorgfältigem Arbeiten Abweichungen, die im allgemeinen unter  $1\ \mu$  blieben und nur vereinzelt  $1,3\ \mu$  erreichten. Bei unsachgemäßer Benutzung („Anknallen“) traten bei Ratschenkupplungen Unterschiede bis  $7,5\ \mu$  zwischen den Mittelwerten der Meßreihen bei langsamer und rascher Einstellung auf, während sie bei Mikrometern ohne Gefühlsschraube sich bis auf  $9,3\ \mu$  beliefen, und sich zwischen den Einzelwerten sogar Differenzen von  $11\ \mu$  zeigten. Bei Reibungskupplungen war die Einstellung weit weniger von der Drehgeschwindigkeit abhängig (die Unterschiede betragen hier nur etwa  $\frac{1}{2}\ \mu$ ). Diese Angaben decken sich auch mit amerikanischen Erfahrungen, wonach durch den Meßdruck Unterschiede von 5 bis  $12,5\ \mu$  bewirkt werden können.

Aus vorstehendem darf man nun aber nicht etwa schließen, daß die Reibungskupplung genauer arbeitet, denn selbst bei möglichst gleichmäßiger Einstellung betragen die Unterschiede zwischen den Einzelbeobachtungen  $1,7\ \mu$  gegenüber nur  $0,2\ \mu$  bei der Ratsche; jene waren sogar merklich größer als bei Mikrometern ohne Gefühlsschraube, bei denen sie etwa  $0,6\ \mu$  ausmachten. Diese Abweichungen rühren nicht etwa von einer Aufbiegung des Bügels her, sondern sind im wesentlichen auf eine Verlagerung der Spindel in der Mutter, unter Wegdrängung der zwischen ihren Gängen befindlichen Ölschicht zurückzuführen. In der Hand des geübten Beobachters im Meßlaboratorium bietet also die Ratsche gewisse Vorteile, während die Reibungskupplung, die auch nur noch selten verwendet wird, nicht zu empfehlen ist. In der Werkstatt hat man dagegen beobachtet, daß die Arbeiter in der Regel ohne Gefühlsschraube eine genauere Einstellung als mit ihr erzielen. Der mittlere Einstellfehler hängt natürlich noch stark von der Oberflächenbeschaffenheit der Prüflinge ab und betrug z. B. bei grob geschichteten  $5,3\ \mu$  (gegen  $8\ \mu$  mit Gefühlsschraube), bei feingeschichteten dagegen nur  $0,8\ \mu$  (bzw.  $0,5\ \mu$ ). Bei weniger geübten, aber technisch gebildeten Benutzern ist deshalb die Gefühlsschraube entschieden von Vorteil (17).

Die Größe des Meßdrucks beträgt nach Beobachtungen mit einem kleinen Federdynamometer bei älteren Schraublehren 700 bis 1300 g (1), bei neueren nur noch etwa 300 g. Im Mittel wird man mit etwa  $\frac{1}{2}$  bis  $\frac{3}{4}$  kg, mit einer Schwankung von höchstens  $\frac{1}{4}$  kg, rechnen können. Die dadurch hervorgerufenen Aufbiegungen des Bügels sind bei kleinen Mikrometern völlig zu vernachlässigen, wie aus nachfolgenden Werten hervorgeht, die an einer Reihe von Mikrometern mit verschiedener Bügelausführung erhalten wurden (2), während die Meßgenauigkeit bei den größeren dadurch allerdings verringert wird:

Meßbereich mm	Aufbiegung für $\frac{1}{4}$ kg $\mu$	Meßbereich mm	Aufbiegung für $\frac{1}{4}$ kg $\mu$
0—25	0,13—0,3	125—150	0,3—1,8
25—50	0,15—0,4	150—175	0,6—1,8
50—75	0,3—0,75	175—200	0,8—2,0 <sup>1</sup>
75—100	0,3—1,0	200—225	0,9—2,2 <sup>1</sup>
100—125	0,3—1,2	225—250	1,1—2,5 <sup>1</sup>

Die Aufbiegungen wurden dadurch bestimmt, daß das Kleinstmaß (evtl. unter Benutzung entsprechender Endmaße) ermittelt und dann nach Anhängung von 10 kg in der Nähe des Ambosses erneut beobachtet wurde, wobei die Umrechnung auf  $\frac{1}{4}$  kg unter der Annahme einer linearen Beziehung zwischen Gewicht und Aufbiegung erfolgte.

Im allgemeinen wird man etwa mit dem Mittel der angegebenen Zahlen rechnen können. Die geringste Aufbiegung bei gleichzeitig kleinstem Gewicht

<sup>1</sup> Diese Werte sind nicht beobachtet, da entsprechende Ausführungen mit schwachem Bügel nicht zur Verfügung standen, sondern auf Grund der übrigen Beobachtungen schätzungsweise angenommen.

(das des Meßfühls wegen erwünscht ist) erhält man bei halbkreisförmigen Bügeln, wenn ihre Breite von der Mitte nach den Enden proportional  $\sqrt[3]{\cos \varphi}$  (Abb. 350) abnimmt, bei viereckigen, wenn man dem parallel zur Achse ver-

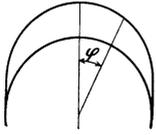


Abb. 350. Günstigste Bügelform.

laufenden Schenkel ein konstantes Trägheitsmoment gibt und die senkrecht dazu stehenden als Träger gleicher Festigkeit ausbildet (2, 13). Bei gleicher Aufbiegung werden aber die ersten wesentlich leichter und liefern einen größeren Meßbereich. Dem Querschnitt gibt man am besten Doppel-T-Profil, wobei man das Gewicht noch durch eine Reihe zweckmäßig angebrachter Bohrungen oder dachbinderartige Ausbildung verringern kann, da man damit die Form größter Steifigkeit bei kleinstem Gewicht erhält. Für Meßbereiche über 300 mm werden die Bügel auch wohl hohl (16) oder aus Leichtmetall ausgeführt, doch muß dann sorgfältig auf die Temperatur geachtet und die Einstellung des öfteren durch Endmaße oder ähnliches kontrolliert werden.

Immerhin hängen die Ergebnisse viel zu sehr von dem Gefühl und der Geschicklichkeit des Beobachters ab, als daß man das Problem des konstanten Meßdrucks bei Schraublehren durch die Gefühlsschraube als gelöst ansehen könnte. Man hat sie deshalb mit einem als Druck-

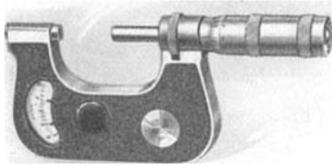


Abb. 351. Schraublehre mit Fühlhebel.

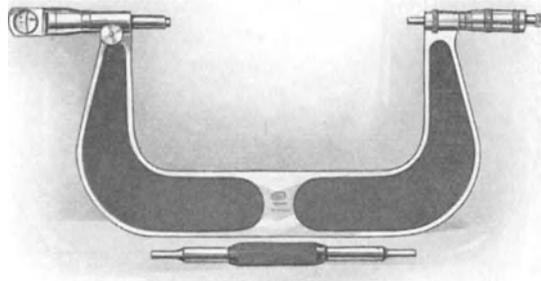


Abb. 352. Schraublehre mit Fühlhebel.

anzeiger wirkenden ein- oder mehrfachen Fühlhebel kombiniert (4, 7, 15), auf dessen kurzen Arm der gleitend im Bügel geführte Amboß einwirkt (Abb. 351)<sup>1</sup>; bei größeren Meßbereichen kann auch einfach ein Meßbolzen an Stelle des Am-

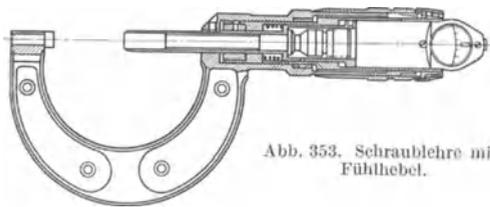


Abb. 353. Schraublehre mit Fühlhebel.

bosses treten (Abb. 352). Eine besondere Ausführung, bei der sich der Fühlhebel auf der Seite der Spindel befindet, ist in Abb. 353 wiedergegeben. Durch die Betätigung der Spindel wird der Fühlhebel so lange verschoben, bis sein Zeiger bei Berührung mit dem Prüfling richtig einsteht.

Soll der Fühlhebel nur als Druckanzeiger dienen, so versieht man seine Skala nur mit einem Mittelstrich, auf den die Zeigerspitze stets einspielen muß; genauer ist die Benutzung einer hochkant stehenden Zunge, die man auf die Mitte zweier um die dreifache Zeigerstärke von einander abstehender Striche einstellt. Wenn zwar bei Übersetzung 1: 100 nur  $1 \mu$  ge-

<sup>1</sup> Gegen die Verwendung mehrfacher Übersetzungen, wie sie bei einigen Sphärometern (3), den Apparaten von Bauschinger und Klebe zur Bestimmung der Schwindung des Zements und bei dem ziemlich komplizierten Mikrotaster von Reichel (6) benutzt ist, sprechen die früher geäußerten Bedenken. Auch die Anbringung einer Meßdose am Amboß ist nicht zu empfehlen, da sie stets eine bestimmte Stellung des Mikrometers verlangt; ferner dürfte hier die Wärmeisolierung Schwierigkeiten bereiten, wenn man nicht zu sehr unhandlichen Ausführungen kommen will.

schätzt werden kann, so ist die Einstellung auf einen Strich oder die Mitte zweier Striche nach S. 342 doch wesentlich genauer auszuführen. So betragen die Abweichungen bei wiederholter Einstellung eines geübten Beobachters  $0,2 \mu$  und bei einem völlig ungeübten auch nur  $0,5 \mu$ . Damit ist man also tatsächlich unabhängig von dem Gefühl des Messenden.

Gibt man dem Fühlhebel eine vollständige Skala, so können derartige Schraublehren noch eine vielseitigere Verwendung finden. Sie bilden dann einen Präzisionsfühlhebel, bei dem die Spindel gewissermaßen den verstellbaren Auflagetisch vertritt. Ihre Genauigkeit wirkt sich namentlich aus, wenn man dabei die Einstellung mit Endmaßen vornimmt. Infolge der großen Hebelübersetzung kann man erreichen, daß ein Intervall einem Wert von  $5 \mu$  (Abb. 352) oder sogar  $2 \mu$  (Abb. 351) entspricht, so daß man  $\frac{1}{2}$  bis  $\frac{1}{4} \mu$  schätzen kann. Sehr geeignet ist diese Form auch zu Vergleichsmessungen, indem man den Prüfling bei festgestellter Spindel zwischen den Meßflächen durchführt und seine Abweichungen durch den Ausschlag des Fühlhebels beobachtet<sup>1</sup>.

Der Druckanzeiger läßt sich auch sonst noch in verschiedener Weise ausbilden. Bei fest aufgestellten Mikrometern kann man z. B. den verstellbaren Amboß auf einen Interferenzfühlhebel einwirken lassen, wie dies wohl zuerst bei Sphärometern ausgeführt ist (9). Ferner kann man den Augenblick des Kontakts elektrisch beobachten, indem man die Pole einer Stromquelle mit dem isolierten Amboß und dem Bügel verbindet und in den Stromkreis einen elektrischen Wecker, besser ein Galvanoskop oder Telephon einschaltet, um mit möglichst schwachen Strömen arbeiten zu können. Wegen der unvermeidlichen Oberflächenschichten ist ein bestimmter und nicht immer gleich bleibender Wert nötig, damit der Stromübergang erfolgt, wodurch man im allgemeinen Unterschiede bis  $1,5 \mu$  erhält (10) und nur unter ganz besonderen Vorsichtsmaßnahmen bzw. Verwendung von Verstärkerröhren und Beobachtung der bei der Berührung plötzlich eintretenden Änderung des Anodenstromes weiter kommt. Sind die Prüflinge von Kugelflächen begrenzt, so soll man durch Beobachtung des Lichtspaltes zwischen ihnen und den Meßflächen sogar eine Genauigkeit von  $0,025 \mu$  erreichen können (11).

Wenn es auch bei sorgfältigem Arbeiten und besonders bei Benutzung eines geeigneten Meßdruckanzeigers möglich ist, die Ablesegenauigkeit von  $1 \mu$  zu erreichen, so sind doch, um sie wirklich auszunutzen, beim Gebrauch noch verschiedene Vorsichtsmaßnahmen zu beachten. Selbstverständlich ist wohl, daß man den Bügel bei der Messung nicht unmittelbar in der Hand hält, da er seine Länge bei 25 mm Meßbereich durch Erwärmung um  $4^{\circ}$  bereits um  $1 \mu$  ändern würde. Kann man das Mikrometer nicht in einen Halter (am besten mit Kugelgelenk) klemmen, so muß man es in der Nähe des Amboß und nicht in der Bügelmitte fassen. Ist dies nicht möglich, so ist eine Wärmeisolierung anzubringen, die allerdings den Nachteil hat, den Wärmeaustausch mit der Umgebung bzw. dem Prüfling zu verzögern. Größere Mikrometer legt man am besten einige Zeit auf diese auf, damit beide gleiche Temperatur annehmen.

### 3. Schraubenfehler und Parallelität der Meßflächen.

Zu den Beobachtungsfehlern und den Einflüssen von Temperatur und Ausdehnungskoeffizient kommen auch hier die von den Herstellungsmängeln des Instruments verursachten hinzu. Die wesentlichsten Fehler rühren von dem Schraubengewinde her, worauf wohl zuerst Bessel aufmerksam gemacht hat. Sie lassen sich unterteilen in a) fortschreitende, b) innere und c) periodische. Die fortschreitenden Fehler rühren daher, daß die Steigung der Spindel nicht genau den Sollwert von  $0,5000$  mm hat. Der dadurch bewirkte Fehler schreitet mit der Zahl der Umdrehungen fort (daher sein Name); soll er bei 25 mm Meßbereich (entsprechend 50 Umdrehungen) nicht mehr als  $2 \mu$  ausmachen, so darf die Abweichung der Ganghöhe vom Sollwert nicht mehr als  $0,04 \mu$  betragen (deshalb wird auch der Meßbereich fast immer auf 25 mm beschränkt). Zu diesen kommen nun noch bei jeder vollen Umdrehung unregelmäßige, innere Fehler hinzu, die von kleinen Ungenauigkeiten in der Steigung, im Flankendurch-

<sup>1</sup> Eine auf demselben Prinzip beruhende Kombination von Mikrometer und Federwaage ist in (12) beschrieben.

messer und im Profil (z. B. zu mageren Flanken) des Bolzen- und Muttergewindes herrühren. Zu diesen kann man auch die Fehler rechnen, die durch die Schwankung des zwischen Bolzen- und Muttergewinde unbedingt nötigen Spiels und die Änderung der zur Verringerung der Reibung erforderlichen Ölschicht herrühren, und die etwa  $1\ \mu$  ausmachen. Deshalb soll man auch vor dem Gebrauch die Spindel einige Male hin und her schrauben, damit sich das Öl gleichmäßig verteilt. Das Spiel macht sich in dem „toten Gang“ bemerkbar, der sich darin äußert, daß man die Spindel ein Stück im entgegengesetzten Sinne drehen kann, ohne daß die Berührung mit dem Prüfling aufhört. Deshalb soll man alle Einstellungen stets in derselben Richtung vornehmen (wie dies bei der Schraublehre von selbst gegeben ist) und, falls man zu weit gedreht hat, um etwa eine Umdrehung zurückgehen und dann erst die Einstellung wiederholen.

Zu den für jede volle Umdrehung auftretenden fortschreitenden + inneren Fehlern kommen nun noch andere hinzu, die innerhalb einer Umdrehung vorhanden sind. Sie haben im wesentlichen 3 Ursachen. Ist die abgewickelte Schraubenlinie keine Gerade, so ist die Verschiebung nicht proportional dem Drehwinkel. Diese Fehler können innerhalb jedes Ganges andere sein, sind aber häufig zu vernachlässigen. Zweitens kann der Querschnitt der Spindel oder der Ablesetrommel von der Kreisform abweichen oder auch die Teilung der Trommel ungleichmäßig sein. Wichtiger ist die dritte Ursache, nämlich eine Unparallelität der beiden Meßflächen oder ein Nichtfluchten von Amboß- und Spindelachse.

Es sei zunächst angenommen, daß beide in eine Gerade fallen, daß aber die Meßflächen unparallel sind, also nicht senkrecht zur Achse stehen. Innerhalb einer Umdrehung können dann die Meßflächen die in Abb. 354 gezeichneten extremen Lagen *A* und *B* zueinander einnehmen. Der kleinste Abstand zwischen ihnen, wie er bei der Messung von Körpern in Wirkung tritt, die über die Meßflächen hinausragen, kann dann von  $s_1$  bis  $s_2$  variieren. Da sich der Fehler proportional dem Sinus des Drehwinkels ändert und innerhalb jeder vollen Umdrehung, wo sie auch immer vorgenommen wird, wiederkehrt, bezeichnet man ihn als periodischen Fehler. Er verschwindet bei Körpern, die infolge ihrer Begrenzung durch gekrümmte Flächen in der Mitte aufliegen,

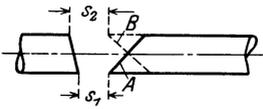


Abb. 354. Meßflächen nicht senkrecht zur Achse.

da dann der Abstand  $s$  unabhängig von der Lage der Meßflächen ist, doch werden sich hier bei Verschiebung des Prüflings senkrecht zur Achse verschiedene Maße ergeben (ferner liefert auch die Nullpunktsbestimmung einen falschen Wert). Der Fehler verschwindet auch, abgesehen von dem Einfluß der Lage des Prüflings und der falschen Nullpunktsanzeige, wenn eine Meßfläche senkrecht zur Achse liegt, tritt aber wieder auf, wenn die Spindel exzentrisch zum Amboß steht, ihre beiden Achsen also zwar parallel zueinander sind, aber nicht zusammenfallen (Abb. 355). Bei geneigter Lage der Achsen zueinander und achsensenkrechten Meßflächen (Abb. 356) bleibt

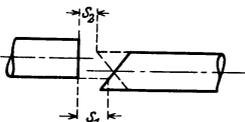


Abb. 355. Exzentrizität der Spindel.

die gegenseitige Lage der Meßflächen zwar stets dieselbe, man mißt aber nicht die wirkliche Länge  $s_2 - s_1$  des Prüflings, sondern ihre Projektion  $s$  auf die Spindelachse, was sich als fortschreitender Fehler äußert. Wirken nun im Extremfall die verschiedenen durch Abb. 354 bis 356 gekennzeichneten Fehler zusammen, so werden die periodischen Fehler nicht mehr durch eine Sinusfunktion, sondern durch eine Summe solcher dargestellt.

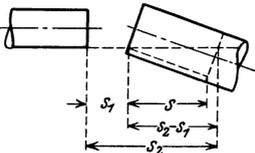


Abb. 356. Amboß- und Spindelachse geneigt.

Die Bestimmung der Schraubenfehler zerlegt man zweckmäßig in 2 Prüfungen, nämlich a) bei vollen Umdrehungen und b) innerhalb einer Umdrehung,

wobei man die letzteren für verschiedene Stellungen der Spindel ermitteln muß (sie seien kurz als fortschreitende und periodische bezeichnet, wobei unter ersteren auch die inneren mitinbegriffen sein sollen und zu beachten ist, daß die letzteren durchaus nicht immer rein periodisch sind). Am einfachsten geschieht

die Fehlerbestimmung durch Ausmessen von Parallelendmaßen, die man für a) entsprechend der Steigung (also meist von  $\frac{1}{2}$  zu  $\frac{1}{2}$  mm), bei b) um 0,1 oder 0,125 mm stuft. Man kann die Bestimmung dieser Korrekturen auch nach dem Komparatorprinzip vornehmen, indem man durch die Spindel einen Maßstab verschiebt und diesen mittels eines fest aufgestellten Mikroskops beobachtet (eine speziell dafür gedachte Meßmaschine wird in Abschnitt IVD 5 beschrieben werden). Zu beachten ist dabei, daß die gewöhnlich kugelförmig ausgebildete Anlage des Maßstabes an der Meßfläche der Spindel genau in der Mitte anliegt, da bei nicht zur Achse senkrechter Lage derselben sonst Zusatzfehler in die Prüfung eingehen. Zweckmäßig führt man die Untersuchungen an der fertigen Schraublehre durch, um das Zusammenwirken von Spindel und Mutter zu erfassen, während man in der Fabrikation natürlich auch die Spindel für sich allein auf gleichmäßige Steigung (und zwar von mm zu mm an 5 um je  $\frac{1}{5}$  Gang versetzten Stellen) untersucht<sup>1</sup>.

Die genaueste Prüfung ergibt wohl wieder die Beobachtung des Wanderns der Interferenzen, die zwischen der Meßfläche der Spindel und einer fest dagegen aufgestellten Planplatte entstehen (9), wie sie z. B. von Shaw bei der Prüfung seiner Meßmaschine verwendet ist (14); ebenso ist auch das Michelsonsche Interferometer dafür benutzt (6)<sup>2</sup>.

Als Schraubenfehler rechnet man die Summe der größten Fehler a) und b), wobei sich jeder einzelne als Abstand  $s$  (Abb. 357) des höchsten und tiefsten Punktes der betreffenden Fehlerkurve ergibt. Während vor etwa 30 Jahren noch Fehler von  $20 \mu$  nicht zu den Seltenheiten gehörten (12), kann man heute mit  $8 \mu$  bei gewöhnlichen, mit  $4 \mu$  bei guten und mit  $2 \mu$  bei sehr guten Mikrometern rechnen. Das deckt sich auch mit den Erfahrungen in England, wonach bei Schraublehren Fehler von  $2,5 \mu$  beobachtet sind (18), und in Amerika, wo bei etwa 50% der geprüften Mikrometer die Schraubenfehler  $2 \mu$  nicht überschritten (5).

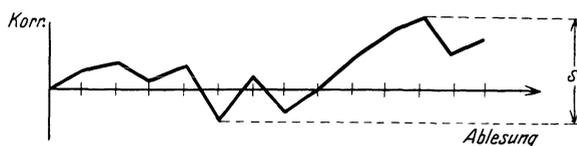


Abb. 357. Fehlerkurve.

Wenn man also mit der Schraublehre auf  $1 \mu$  genau messen will, wie dies bei einem geeigneten Druckanzeiger möglich ist, so müssen die Schraubenfehler von Zeit zu Zeit bestimmt und in Rechnung gesetzt werden (2). Wie früher ausgeführt, ist dabei das Vorzeichen der (Ablese-)Korrektur durch die Beziehung bestimmt, daß

$$\text{Ableseung} + \text{Korrektur} = \text{wirklicher Wert}$$

ist, während die Einstellkorrektur das entgegengesetzte Vorzeichen erhält (siehe S. 150).

Da die Berücksichtigung der Korrekturen in der Werkstatt nicht immer durchführbar ist, so kann man dort die Meßgenauigkeit bei sehr guten Mikrometern zu etwa  $3 \mu$ , bei den handelsüblichen dagegen nur auf 5 bis  $10 \mu$  (unter Umständen noch mehr) ansetzen [während bei schlechter Behandlung die Fehler bis auf  $\frac{1}{10}$  mm steigen (1)], Werkstücke mit sauber bearbeiteten Flächen vorausgesetzt, was sich auch im wesentlichen mit den Erfahrungen des In- und Auslandes deckt (7, 13, 15). Auf jeden Fall sollte man aber vor der Messung die Lage

<sup>1</sup> Für die Durchführung dieser Messungen sei auf G. Berndt: Gewinde, S. 384, verwiesen.

<sup>2</sup> Eine Maschine zur selbsttätig fortlaufenden Aufzeichnung der Fehler der Mikrometer (also nicht nur von Gang zu Gang oder von  $\frac{1}{5}$  zu  $\frac{1}{5}$  Gang, sondern über den ganzen Umfang) ist von Zeiss konstruiert (17) (siehe G. Berndt: Die Gewinde, S. 391).

des Nullpunktes kontrollieren und seine etwaige Abweichung berücksichtigen, da es nicht jedesmal möglich ist, die genaue Justierung vorzunehmen. Erfolgt die Nullpunktsbestimmung und die Messung durch denselben Beobachter, so fällt auch der Einfluß des Meßdruckes zum großen Teile fort.

Daß sich ausnahmsweise durch sorgfältige Herstellung (Schleifen) auch bessere Schrauben erzeugen lassen, beweist das Ergebnis der Prüfung einer 50 mm langen Spindel für ein Okularmikrometer durch Repsold, bei der die Fehler auf 45 mm Länge kleiner als  $0,5 \mu$  waren (11).

Fest aufgestellte Mikrometer lassen sich auch für automatische Registrierung einrichten; Konstruktionen dafür siehe (8, 10, 16).

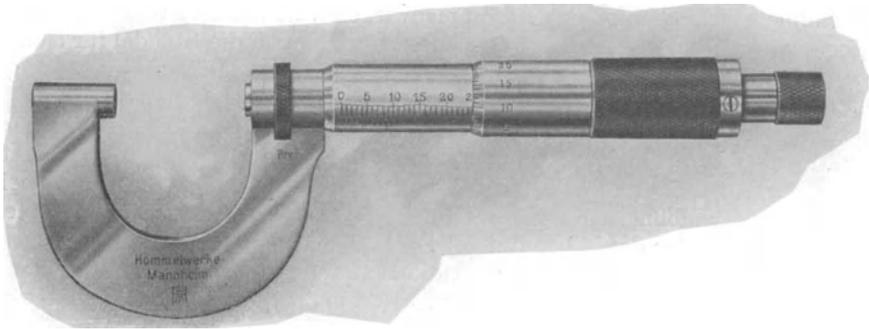


Abb. 358. Schraublehre mit Ausgleich der Fehler an der Trommel.

Um die Meßgenauigkeit zu erhöhen, hat man die Schraubenfehler durch besondere Ausgestaltung der Ablesung auszuschalten gesucht. Die rein fortschreitenden Fehler könnte man z. B. dadurch fortschaffen, daß man den langen Ablese-

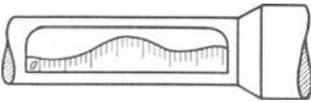


Abb. 359. Ausgleich der Schraubenfehler an der Trommel.

index nicht parallel zur Spindelachse, sondern um den entsprechenden Betrag dagegen geneigt zieht. Bei einer anderen Ausführung (Hommel-Werke) wird die den Nullstrich tragende Hülse in mehrere, 1 mm hohe Ringe zerlegt (Abb. 358), so daß er in eine Reihe kleiner Striche zerfällt. Die Ringe werden mittels eines Schlüssels den fortschreitenden + inneren Schraubenfehlern entsprechend eingestellt. Man kann auch den Ablesestrich als Kante einer Hülse ausbilden und diese so gestalten, daß dadurch die Schraubenfehler ausgeschaltet werden (Abb. 359) (bei dieser Ausführung von Mahr wird übrigens für die Spindel Sägewinde verwendet, wobei die senkrecht zur Achse stehenden Flanken den Meßdruck aufnehmen).

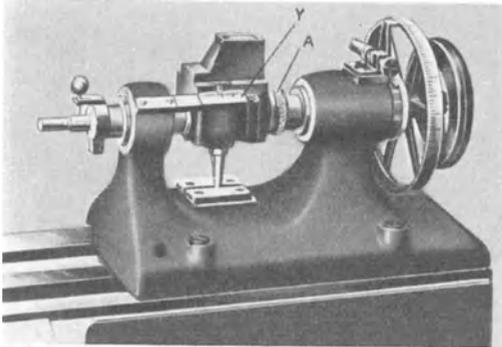


Abb. 360. Ausgleich der Schraubenfehler durch Gleitlineal.

in geeigneter Weise gegen die Spindelachse geneigt ist und so die fortschreitenden Fehler ausgleicht. Soll dies auch für die übrigen Schraubenfehler geschehen, so muß man die Linealkante ähnlich wie in Abb. 359 ausarbeiten.

Durch diese Einrichtungen lassen sich die Korrekturen auch bei längeren Schrauben bis auf  $1\ \mu$  herunterbringen.

Wenn auch bei der Bestimmung der Schraubenfehler mittels Endmaßen die durch die Unparallelität der Meßflächen bedingten periodischen Fehler bereits miteinbegriffen werden, so ist trotzdem doch auf ihre genaue Ebenheit und Parallelität zu achten, da man andernfalls bei Prüflingen mit gekrümmten Flächen je nach der Lage auf der Meßfläche andere Meßergebnisse erhält und auch die Nullpunktsbestimmung falsch wird. Die Ebenheit prüft man am besten mittels Planglases durch die Interferenzen gleicher Dicke. Für die Unparallelität kleiner Mikrometer wird man einen Betrag von  $2\ \mu$  zulassen dürfen, was bei 6 mm Spindeldurchmesser einem Wert von rund 1 Min.

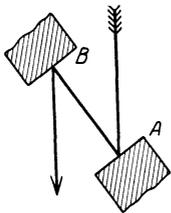


Abb. 361. Prüfung der Parallelität der Meßflächen mit 2 Autokollimationsfernrohren.

entspricht. Die Parallelität kann man z. B. mittels zweier fluchtend aufgestellter Autokollimationsfernrohre nach Abb. 361 prüfen, indem man das Mikrometer so aufstellt, daß die Strahlen nacheinander an seinen Meßflächen *A* und *B* reflektiert werden. Einfacher gestaltet sich die Prüfung mittels eines kleinen rechtwinkligen, außenversilberten Glas- oder eines Stahlprismas, das man nach Abb. 362

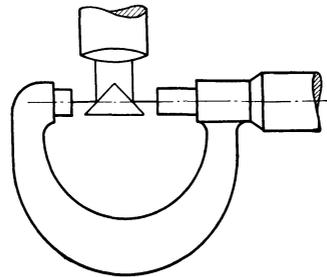


Abb. 362. Prüfung der Parallelität der Meßflächen mit Prisma und 1 Autokollimationsfernrohr.

zwischen die Meßflächen setzt. Bei genau paralleler Lage beider müssen die von ihnen zurückgeworfenen Bilder der Marke des Autokollimationsfernrohres zusammenfallen, falls noch das Prisma einen Winkel von genau  $90^\circ$  hat. Da diese Bedingung aber nie streng erfüllt ist, bestimmt man die Einstellung für parallele Meßflächen dadurch, daß man statt der Schraublehre eine Art Rachenlehre benutzt, die man sich aus einem Endmaß *E* (Abb. 363) und zwei angesprengten überragenden, möglichst geraden Endmaßen  $e_1$  und  $e_2$  herstellt. Um von einer etwaigen Unparallelität der Meßflächen von *E* unabhängig zu werden, sprengt man die Endmaße  $e_1$  und  $e_2$  einmal in der ausgezogenen und dann in der gestrichelten Lage an und nimmt aus den mittels des Okularschraubenmikrometers des Autokollimationsfernrohres beobachteten Abständen der beiden reflektierten Fadenbilder das Mittel.

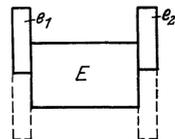


Abb. 363. Eichung des Apparates Abb. 362.

Man ermittelt die Unparallelität zunächst in der Zeichnungsebene; um sie auch in der dazu senkrechten zu erhalten (und aus beiden die größte Unparallelität in beliebiger Richtung berechnen zu können), muß man Prisma und Prüfling um  $90^\circ$  drehen. Einfacher ist dies dadurch möglich, daß man das Prisma nach Abb. 364 auf seine Hypotenusenfläche legt und darüber einen unter  $45^\circ$  geneigten Spiegel anordnet, auf den die von dem Fernrohr kommenden Strahlen zunächst auffallen. Seine Justierung erfolgt dadurch, daß man das Prisma durch einen Spiegel ersetzt und die Neigung des  $45^\circ$ -Spiegels so lange ändert, bis das von dem wagerechten Spiegel reflektierte Bild auf die Marke im Fernrohr fällt.

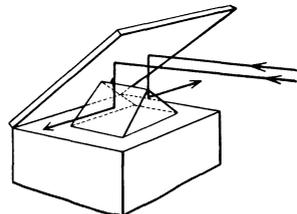


Abb. 364. Prüfung der Parallelität der Meßflächen mit Prisma und Spiegel.

Die Umrechnung des Skalenwertes *s* in Winkelsekunden der Unparallelität kann aus der Beziehung: Winkel =  $\frac{s}{2 \cdot f}$  erfolgen, wenn *f* die Brennweite des Fernrohrobjektivs bedeutet.

Um ihre Bestimmung zu umgehen, führt man besser eine experimentelle Eichung aus, die man mittels eines auf einen Libellenprüfer gesetzten Spiegels vornimmt, dem man durch Unterlegen von Endmaßen unter das freie Hebelende bestimmte Neigungen gibt. Man kann so leicht eine Genauigkeit von  $\frac{2 \text{ Sek.}}{\text{Skt.}}$  oder noch mehr erreichen.

Auf diese Weise ergaben sich für sehr gute Schraublehren größte Unparallelitäten von 20 Sek., bei guten von etwa 60 Sek., bei schlechten bis 270 Sek., was Unparallelitäten (bei 6 mm Spindeldurchmesser) von 0,6, 1,8 bzw.  $8 \mu$  entspricht (3) (die Aufbiegung durch eine Kraft von 10 kg bewirkte im Mittel eine Unparallelität von 60 Sek., also von  $2 \mu$ , war demnach verhältnismäßig gering). Wie man sieht, überschreiten manche Mikrometer die vorher als zulässig angenommene Unparallelität von  $2 \mu$  recht beträchtlich. Da sich die gegenseitige Lage der beiden Meßflächen innerhalb einer Umdrehung in der Regel weit weniger änderte als bei vollen Umdrehungen über den ganzen Meßbereich, so liegt die Ursache der Unparallelität weniger an der nicht senkrechten Lage der Meßflächen zur Achse oder an dem Nichtfluchten der Achsen von Spindel und Amboß, als vielmehr an ungenügender Lagerung und an dem Flankenspiel der Spindeln.



Abb. 365. Glasendmaß zur Prüfung der Parallelität der Meßflächen.

Eine andere Art zur Prüfung der Unparallelität (einschließlich der Unebenheit) beruht darauf, daß man zwischen die Meßflächen ein Parallelendmaß aus Glas oder Quarz bringt und die an den beiden Meßflächen auftretenden Interferenzstreifen beobachtet. Um dies bequem ausführen zu können, gibt man dem Endmaß genügend große Meßflächen (etwa 30 mm Durchmesser) oder die Form der Abb. 365 und kann dann bei senkrechtem Einblick die an der Fläche *a* entstandenen Interferenzen sehen.

Glasendmaße zur Schraublehrenprüfung wurden früher in den Sätzen: 5,0, 5,1, 5,2, 5,3, 5,4 und 24,0, 24,1, 24,2, 24,3, 24,4 mm, jetzt in den Sätzen: 12,00, 12,12, 12,25, 12,37 und 24,00, 24,12, 24,25, 24,37 mm in den Handel gebracht. Ihre Abweichungen von der Parallelität und Ebenheit übersteigen nicht  $\pm 0,2 \mu$ , vom Mittenmaß nicht  $\pm 0,3 \mu$ . Nachdem man das Endmaß möglichst parallel zu einer Meßfläche ausgerichtet hat, was sich bei ebenen Flächen an dem Verschwinden der Interferenzen, bei gekrümmten an dem Auftreten mindestens eines geschlossenen Streifens zeigt, zählt man die auf beiden Meßflächen sichtbaren Interferenzstreifen (die beliebige Form haben dürfen). Rechnet man mit der Wellenlänge des grünen Lichtes (etwa  $0,5 \mu$ ), so entspricht jeder Streifen einer Unparallelität von  $0,25 \mu$ . Vier Streifen im grünen Licht würden demnach eine Unparallelität von  $1 \mu$  bedeuten. Nun hat sich aber gezeigt, daß ihre Zahl sehr von dem Druck abhängt, der auf das Endmaß ausgeübt wird; man muß deshalb die Prüfung mit demselben Druck wie beim Messen vornehmen, was beim Vorhandensein einer Gefühlsschraube leicht möglich ist. Ferner gestattet diese Methode zunächst nur, die Unparallelität für einige wenige Stellen zu bestimmen, für die die betreffenden Endmaße vorhanden sind. Für andere Stellen kann man sich indessen dadurch helfen, daß man an ein Stahlendmaß zwei Glasendmaße ansprengt und mit dieser Kombination die Interferenzstreifen beobachtet. Die Interferenzmethode hat andererseits den großen Vorteil, die Parallelität der Meßflächen gewissermaßen beim Meßvorgang selbst festzustellen, da durch den Meßdruck bis zum gewissen Grade eine automatische Parallelstellung der beiden Meßflächen angestrebt wird. Immerhin wird es sich empfehlen, diese Prüfung durch die vorher genannte zu ergänzen, bei der aus den angegebenen Gründen allerdings eine etwas größere Unparallelität, etwa 60 Sek., zugestanden werden muß; diese wird von allen guten Mikrometern erfüllt.

Beide Methoden setzen übrigens voraus, daß die Meßflächen einigermaßen sorgfältig bearbeitet sind, da sonst keine Interferenzen auftreten, bzw. die reflektierten Bilder so unscharf werden, daß eine genaue Messung der Winkelabweichung nicht mehr möglich ist.

Weniger geeignet zur Bestimmung der Unparallelität ist das Ausmessen kleiner Stahlkugeln an verschiedenen Stellen der Meßflächen, da hierbei durch den exzentrischen Druck leicht eine Verlagerung der Spindel eintritt.

Die Anforderungen an die Genauigkeit der Schraublehren sind in DIN 863 festgesetzt, die wie nebenstehend S. 243 lautet.

Die Herstellung der genauen Spindeln, wie sie für die Schraublehren erforderlich sind, kann nicht auf den gewöhnlichen Leitspindeldrehbänken erfolgen. Um die bei der üblichen seitlichen Anordnung der Leitspindel auftretenden Kippungsfehler erster Ordnung auszuschalten, muß man das Abbesche Prinzip auch bei der Herstellung der Spindeln innezuhalten suchen und Leitspindel und Werkstück in derselben Achse hintereinander anordnen. Um ferner von allen Fehlern der Zahnradübersetzung des Getriebes frei zu werden, wird man

**Schraublehren.****DIN 863.**

## Herstellungsgenauigkeit und Aufbiegung.

**Gesamtfehler.** Unter den Gesamtfehlern der Schraublehren sind die Fehler zu verstehen, die bei der Prüfung mit Parallelendmaßen festgestellt werden. Der größte Unterschied der dabei auftretenden Fehler (also die Ordinatendifferenz irgend zweier Punkte der Fehlerkurve) darf die untenstehenden Beträge nicht überschreiten. Die Fehler gelten für Schraublehren mit einem Verstellbereich bis 25 mm. Sie dürfen auch bei solchen Schraublehren nicht überschritten werden, deren Fehler durch eine Einstellvorrichtung<sup>1</sup> ausgeglichen werden können. Für Schraublehren ohne Bügel gelten die Zahlen für Verstellbereiche von 25 und 50 mm.

Fehler der Meßflächen bei Schraublehren des Genauigkeitsgrades I.

a) Ebenheit: Bei sachgemäßer, möglichst paralleler Auflage einer Planfläche auf die Meßflächen der Schraublehren (mit oder ohne Bügel) darf die Zahl der grünen Interferenzringe nicht größer als drei sein.

b) Parallelität: Die Prüfung auf Parallelität der Meßflächen der Schraublehren mit Bügel und den größten Meßbereichen 25 und 50 mm erfolgt am besten durch Beobachtung der Interferenzstreifen, die zwischen einer Planparallelplatte und den Meßflächen entstehen, wenn diese mit dem üblichen Meßdruck an die Planparallelplatte angedrückt werden und die Planparallelplatte zu einer Meßfläche möglichst parallel ausgerichtet ist (so daß die Interferenzstreifen auf dieser verschwinden oder geschlossene Kurven bilden). Die Zahl der dann auf beiden Meßflächen zugleich zu beobachtenden grünen Interferenzstreifen darf die unten angegebenen Beträge nicht übersteigen.

Bei Schraublehren mit größerem Meßbereich (und bei denen mit 25 und 50 mm Größtmeßbereich, falls keine geeigneten Planparallelplatten zur Verfügung stehen) erfolgt die Bestimmung der Parallelität auf andere geeignete Weise. Auch in diesen Fällen darf die zulässige Abweichung von der Parallelität nicht die unten angegebenen Beträge übersteigen.

Eine Zone von  $\frac{1}{2}$  mm von der Kante ab bleibt bei der Prüfung auf Ebenheit und Parallelität unbeachtet.

Für Schraublehren des Genauigkeitsgrades II werden keine Vorschriften über die Ebenheit und Parallelität der Meßflächen gemacht.

**Aufbiegung der Schraublehren mit Bügel.** Über die Form des Bügels werden keine Vorschriften gemacht. Die Ausführung muß so kräftig sein, daß die Aufbiegung bei einem Meßdruck von 1 kg die in der Zahlentafel angegebenen Werte nicht übersteigt. Die Prüfung erfolgt dadurch, daß man den Bügel am Amboß mit etwa 5 bis 10 kg belastet und den Unterschied der Einstellung gegenüber dem unbelasteten Zustande auf 1 kg umrechnet.

Größte Meßlänge  mm	Gesamtfehler der Schraublehren		Fehler der Meßflächen bei Gg. I			Aufbiegung je kg Meß- druck  μ
	Gg. I  μ	Gg. II  μ	Ebenheit  Zahl der Interferenz- streifen	Parallelität  Zahl der Interferenz- streifen		
25	4	8	3	5	± 2	2
50	4	8	3	7	± 2,5	2
75 u. 100	4	8	3		± 3	3
125 u. 150	5	10	3		± 4	4
175 u. 200	6	12	3		± 6	5
225—300	7	14	3		± 8	6
325—400	8	16	3		± 10	8
425—500	10	20	3		± 12	10

Bezugstemperatur 20° C.

der Leitspindel dieselbe Steigung wie der herzustellenden Spindel geben (4). Man kann auch so vorgehen, daß man statt der Leitspindel ein Gleitlineal nimmt, das den sonstigen Fehlern entsprechend nachgearbeitet ist. Bei sehr sorgfältiger Ausführung der Drehbank lassen sich auch bei der üblichen Anordnung der Leitspindel und unter Benutzung von Zahnradüber-

<sup>1</sup> Z. B. nach Abb. 358 und 359.

setzung sehr genaue Spindeln bis etwa 325 mm Länge herstellen, deren fortschreitende Fehler unter  $0,01 \mu$  (je Gang) und deren innere + periodische Fehler unter  $0,5 \mu$  bleiben. Dies ist allerdings nur dadurch möglich, daß die Mutter der Leitspindel in einem entsprechend nachgearbeiteten Korrektionslineal geführt wird (15a).

#### 4. Ausführungsformen von Schraublehren für Außenmessungen.

Die heute übliche Form der Schraublehre zeigt Abb. 337. Bei größeren Meßbereichen wird die Benutzung des (Kontroll-)Einstellmaßes durch Verwendung zweier, um Amboß und Spindel herumgreifender Hülsen erleichtert (Abb. 366). Zwei Meßbereiche, 0 bis 25 und 25 bis 50 mm, mit einer einzigen Spindel zu

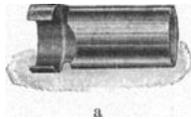


Abb. 366 a bis c. Kontrolle des Kleinstmaßes.

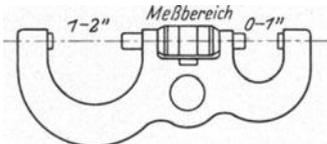
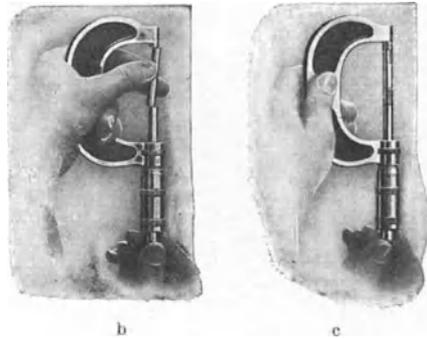


Abb. 367. Schraublehre mit 2 Meßbereichen.



umfassen, gestattet die Form nach Abb. 367 mit Doppelbügel. Die für Reihenbestimmungen erwünschte größere Skala hat man auf verschiedene Weise zu erreichen gesucht (Abb. 368). Häufig wird auch das Ankleben eines Indexträgers und eines Teilungssegmentes an Mutter und Teiltrommel genügen (14),

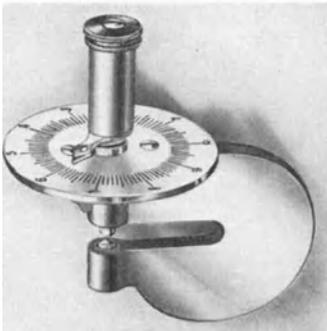


Abb. 368. Schraublehre mit größerer Skala.

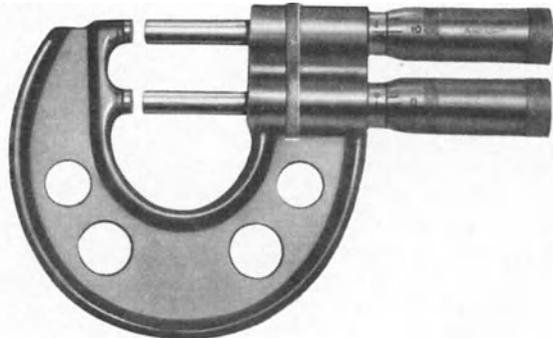


Abb. 369. Schraublehre mit 2 Spindeln zur Kontrolle von Grenzmaßen.

die man auch zur Prüfung auf Innehaltung einer vorgeschriebenen Toleranz einrichten kann (4). Demselben Zweck dient die Ausrüstung eines Bügels mit 2 Spindeln (Abb. 369).

Für Sonderzwecke muß man den Bügel oder die Meßflächen entsprechend gestalten. So wird man zum Messen von Blechen weit ausladende Bügel, zum Messen weicher Stoffe, wie Leder, Papier u. ä., größere Meßflächen nehmen (Abb. 375 c), wobei dann aber ganz besonders auf ihre ständige Parallelität zu achten ist. Zum Messen von Prismen verwendet man einen (offenen oder geschlossenen) Bügel nach Abb. 370, bei dem eine oder beide Schneiden *c* durch Exzenter *d* auf den gewünschten Winkel so eingestellt und durch Prisonstifte fixiert werden, daß die Winkelhalbierende stets in die Spindelachse fällt. Die

Skala wird so ausgeführt, daß die Ablesung den Durchmesser des eingeschriebenen Kreises oder Lehdornes bzw. die Seite oder Höhe des Prismas ergibt (11). Ähnliche Ausführungen für Zylindermessungen sind mehrfach beschrieben (8).

Zum Messen von Rohrwandungen dienen die Ausführungen nach Abb. 371 und 372, zum Messen von Drähten nach Abb. 373. Für viele Zwecke ist es günstig, auf den Amboß eine Stahlkugel zu legen, die durch ein kurzes übergreifendes Rohr in ihrer Lage gehalten wird.

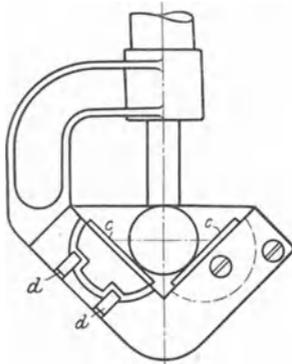


Abb. 370. Schraublehre zum Messen von Prismen.

Vorteilhaft sind für Sonderzwecke Schraublehren mit auswechselbaren Meßeinsätzen mit zylindrischen Endzapfen, die sich gegen eine in der Bohrung der Meßspindel und des Amboß befindliche Kugel legen (Abb. 374) und damit eine sichere stets gleichbleibende Anlage gewährleisten (12, 17). Einige Ausführungsformen der Meßzapfen zeigen Abb. 375a für die Seelenstärke von Spiralbohrern, b) für die Wandstärke von Kugellager-

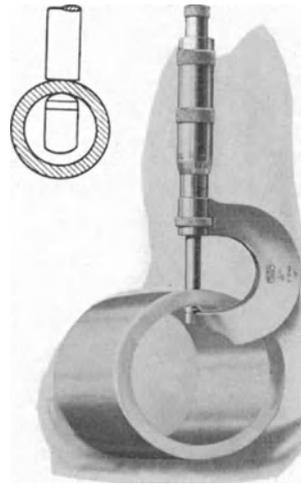


Abb. 371. Schraublehre zum Messen von Rohrwandungen.

lauffringen, c) für Papier und Gummi, d) für Sonderzwecke mit Meßflächen von 0,6 mm Durchmesser und Abb. 376 a) für Triebflügelstärken (plattenförmige Meßbacken), b) für Durchmesser von Trieben (messerförmige Meßbacken), c) für Stufenhöhen an Achsen (abgesetzte Meßbacken).



Abb. 372. Schraublehre zum Messen von Rohrwandungen.

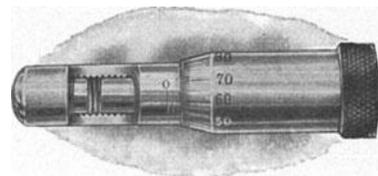


Abb. 373. Schraublehre zum Messen von Drähten.

Sehr bequem sind für die häufig wiederkehrende Messung kleiner Teile die Standschraublehren (Abb. 377), zumal sie auch leicht die Anbringung eines Fühlhebels (an Stelle des Amboß) als Druckanzeiger und einer größeren Meßtrommel zur Erleichterung der Ablesung gestatten (Abb. 378). Dabei ist eine 50 mm lange Spindel von 1/2 mm Steigung mit einer Trommel von 500 Teilen

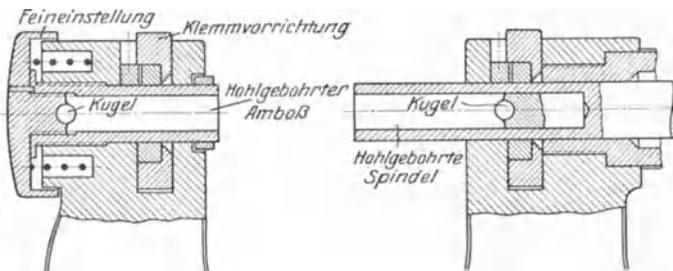


Abb. 374. Schraublehre mit Meßeinsätzen.

lauffringen, c) für Papier und Gummi, d) für Sonderzwecke mit Meßflächen von 0,6 mm Durchmesser und Abb. 376 a) für Triebflügelstärken (plattenförmige Meßbacken), b) für Durchmesser von Trieben (messerförmige Meßbacken), c) für Stufenhöhen an Achsen (abgesetzte Meßbacken).

vorgesehen, so daß  $1 \mu$  abgelesen und  $0,1 \mu$  noch mittels Lupe geschätzt werden kann. Da der Fühlhebel in seiner Fassung um 50 mm (unter Einstellung durch Endmaße) verschoben werden kann, so läßt sich der Meßbereich bis auf 100 mm

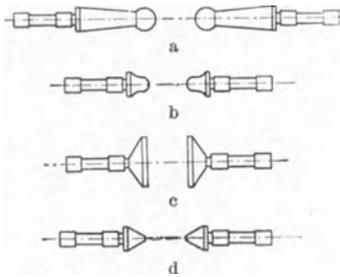


Abb. 375 a bis d. Meßeinsätze.

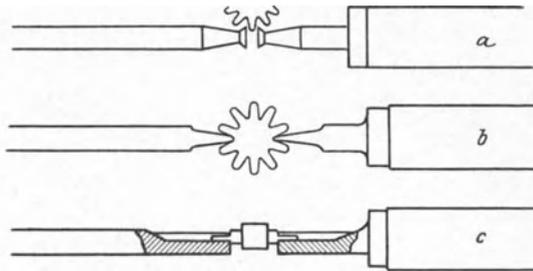


Abb. 376 a bis c. Meßeinsätze.

erweitern. Hier ist auch die früher besprochene Schraubenfehler-Korrektur angebracht, so daß sich eine Meßgenauigkeit von 1 bis  $0,5 \mu$  erzielen läßt, die sich noch erhöht, wenn man sich auf Vergleichsmessungen gegen Endmaße beschränkt, was noch den Vorteil hat, daß für das kleine dabei nur benötigte Stück



Abb. 377. Standschraublehre.

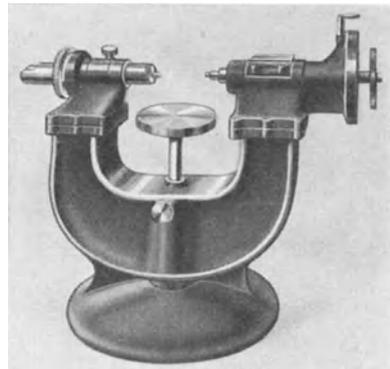


Abb. 378. Standschraublehre.

der Spindel von wenigen  $\frac{1}{100}$  mm die Schraubenfehler völlig vernachlässigt werden können. Diese Ausführung leitet schon zu den Meßmaschinen über.

Das gilt auch für die Dickenmesser mit Schraublehre (Abb. 379), die man auch als Schraublehre mit verstellbarem Amboß betrachten kann. Um seinen Strichmaßstab auf  $\frac{1}{100}$  mm

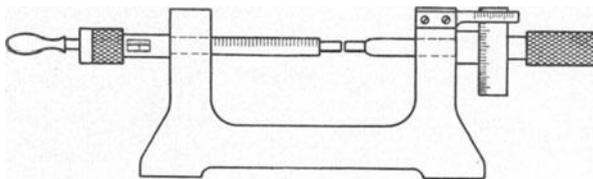


Abb. 379. Dickenmesser mit Schraublehre.

sicher einstellen zu können, müßte statt des einfachen Index mindestens  $\frac{1}{50}$ -Nonius vorgesehen sein. Da ferner infolge der zu kurzen Führung leicht Kippungsfehler auftreten, so wird die Genauigkeit der Schraublehre hier in keiner Weise ausgenutzt; das ist nur möglich, wenn man ausschließlich Vergleichsmessungen gegen

Endmaße vornimmt, womit dann aber die ganze Teilung des verschiebbaren Amboß überflüssig wird. Eine andere Ausführung, die in ihrer äußeren Form mehr an die Schraublehren erinnert, zeigt Abb. 380. Sicherer und bequemer erreicht man die Änderung des Meßbereichs nach Abb. 381 dadurch, daß man in den Amboß entsprechende Verlängerungsstücke einschraubt oder nach Abb. 382 auf ihn bzw. auf die Spindel aufklemmt (1a)<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Für eine andere Ausführungsmöglichkeit siehe (6).

Das über die Dickenmesser mit Schraublehre gefällte Urteil gilt bis zum gewissen Grade auch für die sogenannten Schieblehren mit Schraublehre (Abb. 383),

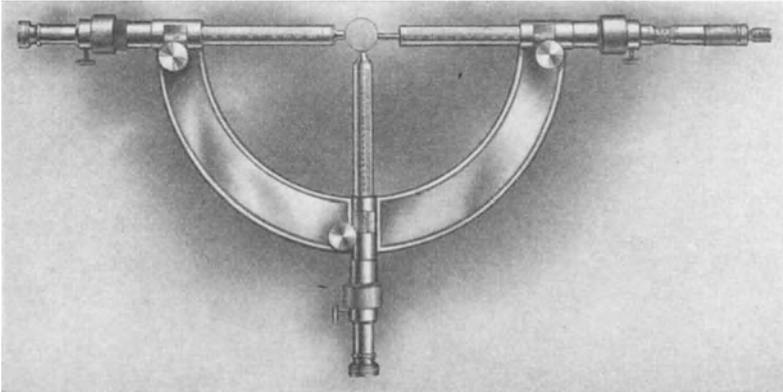


Abb. 380. Schraublehre mit veränderlichem Meßbereich.

die noch dazu den Nachteil haben, daß bei ihnen das Abbesche Prinzip nicht befolgt ist. Die Teilung brauchte eigentlich nur von 25 zu 25 mm ausgeführt

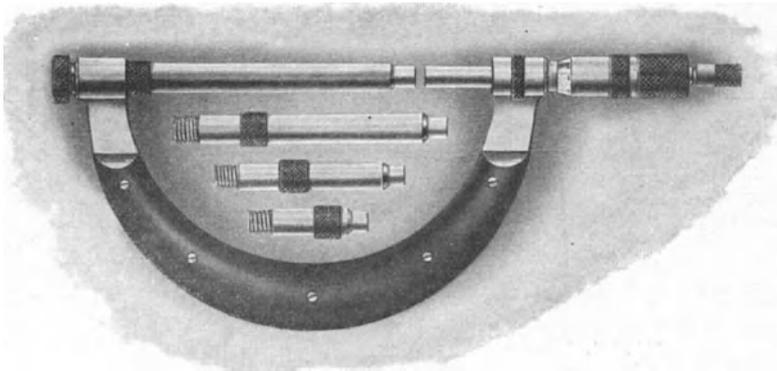


Abb. 381. Schraublehre mit veränderlichem Meßbereich.

zu werden, ist aber von 5 zu 5 mm durchgeführt, um nicht die Spindel zu viel verstellen zu müssen. Um die Einstellung des Index zu erleichtern, ist er mit einem nur aus 2 Strichen bestehenden Nonius versehen, die um  $20 \mu$  gegen das Intervall der Hauptteilung versetzt sind. Statt der Teilung findet man auch konische Löcher (in je 25 mm Abstand), wobei der Schlitten durch einen durchgesteckten konischen Stift fixiert wird.

Besser ist in dieser Beziehung die Superschraublehre von Pratt und Whitney (15, 16), bei der die Einstellung des Amboßträgers *A* durch 8 Meßscheiben von je 1'' Durchmesser erfolgt, die auf die Schiene *B* gelegt werden (Abb. 384). Der Spindelkopf ist so ausgeführt, daß

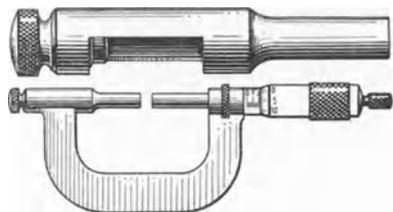


Abb. 382. Schraublehre mit veränderlichem Meßbereich.

Der Spindelkopf ist so ausgeführt, daß

durch Drehung der unverrückbar gelagerten Mutter die Spindel um  $\frac{1}{2}''$  verschoben werden kann; dabei ist ein Gleitlineal zum Fehlerausgleich vorgesehen. Ein Nonius gestattet Ableseung auf  $2,5 \mu$ . Einfacher dürfte es sein, sich für auf-

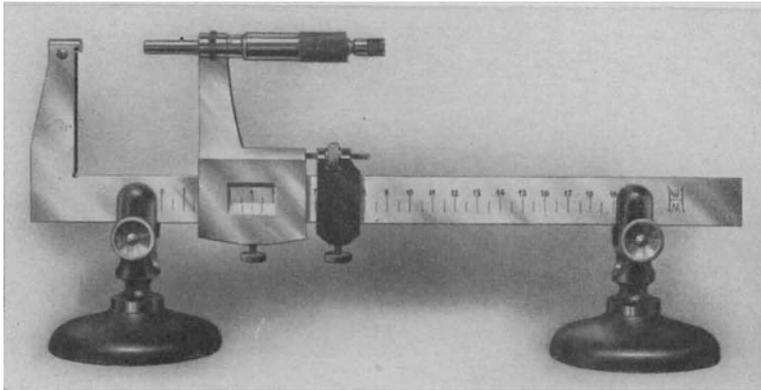


Abb. 383. Schieblehre mit Schraublehre.

tretende Sonderfälle eine Schraublehre mit größerem Meßbereich nach Abb. 385 aus Endmaßen, einem gewöhnlichen und einem mit Mikrometer versehenen Planschnabel aufzubauen, die alle durch einen Endmaßhalter verbunden werden.

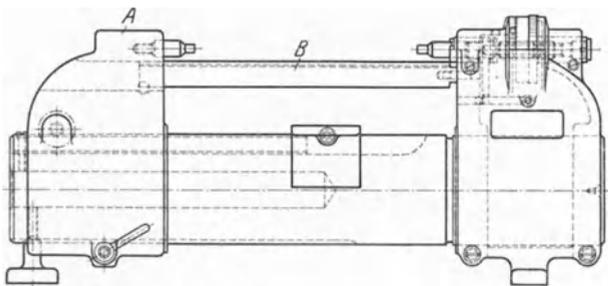


Abb. 384. Superschraublehre.

Vollständig auf die Einstellung mit Endmaßen angewiesen ist die in Abb. 386 wiedergegebene Ausführung der Schraublehre, die als Ersatz für Schieblehren oder auch als Normal-

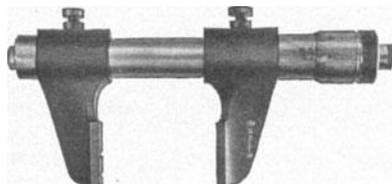


Abb. 386. Schraublehre als einstellbare Rachenlehre.

oder Grensrachenlehre gedacht ist, zu welchem letzterem Zweck die Meßflächen natürlich entsprechend abgesetzt sein müssen<sup>1</sup>. — Zum Messen von Vertiefungen reduziert man den Bügel der üblichen Schraublehre auf ein senkrecht zur Achse stehendes Stück (Abb. 387), das man mit seiner Planfläche auf die Stirnfläche des Prüflings auflegt. Den Meßbereich kann man erweitern durch Einsetzen

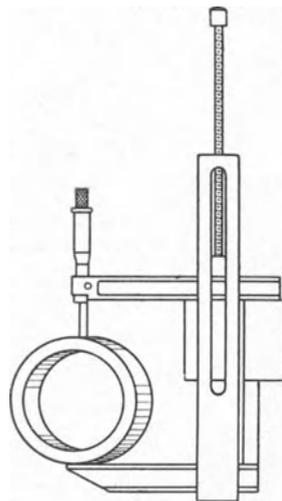


Abb. 385. Schraublehre aus Endmaßen.

<sup>1</sup> Für andere Formen siehe (9) und (10).

entsprechend abgestufter Verlängerungsstangen in die Spindel oder durch Verstellen einer in mm geteilten Stange gegen einen Index (Nonius) oder einer mit Kerben versehenen Stange, in die eine Rast einschnappt; diese die hohl gehaltene Spindel durchsetzenden Verlängerungsstücke werden dann festgeklummt. Die Bestimmung des Nullpunktes erfolgt durch Aufsetzen auf eine Planplatte, bei größeren Meßbereichen durch Unterlegen zweier gleicher Endmaße von der benötigten Höhe unter den Anschlag.

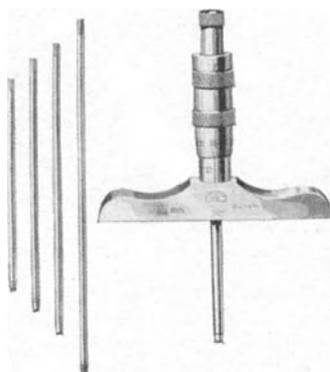


Abb. 387. Schraublehre als Tiefenmaß.

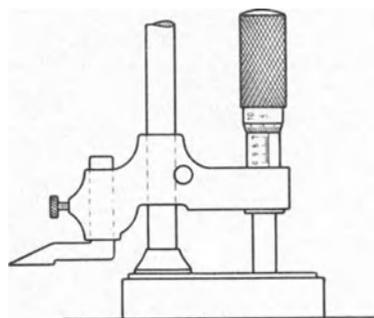


Abb. 388. Höhenreißer mit Schraublehre.

Die Verwendung der Schraublehre zum genauen Einstellen von Höhenreißern zeigt

Abb. 388, wobei man für Höhen über 25 mm entsprechende Endmaße unterlegt. Es wird auch wohl der Fuß des Höhenreißers selbst als Mikrometerschraube ausgebildet. Zur genauen Einstellung kleiner Höhen, die wegen des Fehlens dünner Endmaße nicht möglich ist, ver-

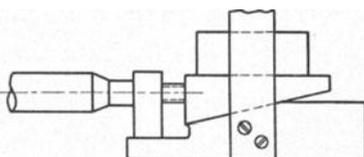


Abb. 389. Höheneinstellung mittels Schraublehre.

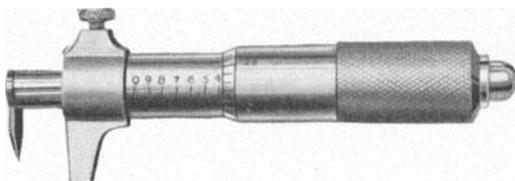


Abb. 390. Schraublehre zum Anreißen von Zahntiefen.

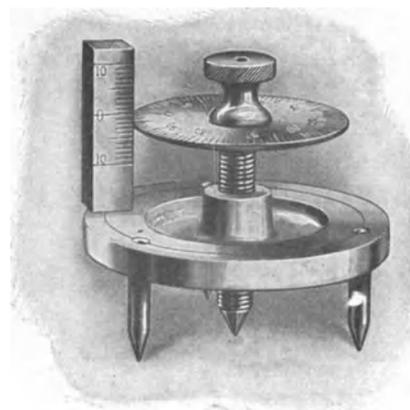


Abb. 391. Sphärometer.

schiebt man nach Abb. 389 zwei Keile mittels eines Mikrometers gegeneinander (1). Wählt man den Keilwinkel gleich 1:20, so kann man an der Trommel noch Höhenänderungen von  $0,05 \mu$  ablesen, während man die Meßgenauigkeit allerdings wohl selbst im günstigsten Fall nur zu  $0,1 \mu$  wird ansetzen dürfen. Eine Sonderform zum Anreißen von Zahntiefen stellt Abb. 390 dar.

Viel benutzt wurde die Schraubenlehre früher zur Bestimmung der Höhe von Kugelkalotten und damit des Krümmungshalbmessers  $R$  von Linsen und ähnlichem als Sphärometer (Abb. 391)<sup>1</sup>. Man stellt es dazu mit seinen, die Ecken eines gleichseitigen Dreiecks der Kante  $a$  bildenden spitzen Füßen auf den Prüfling und bringt dann die im Mittelpunkt des umschriebenen Kreises (vom Halbmesser  $\rho$ ) stehende Mikrometerschraube in Berührung mit der Kugelfläche. Der Unterschied ihrer Einstellung hier und

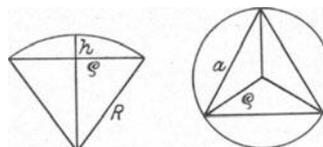


Abb. 392. Berechnung des Krümmungshalbmessers.

<sup>1</sup> Auf eine dreifache Schraublehre zur Bestimmung des Durchmessers und der Tiefe von Kugeleindrücken bei der Brinellprobe (13) sei nur hingewiesen.

beim Aufsetzen auf eine Planfläche gibt die Höhe  $h$  der Kalotte, die von der durch die Fußspitzen gehenden Ebene begrenzt wird. Nach Abb. 392 ist

$$R^2 = (R - h)^2 + \varrho^2$$

$$R = \frac{h^2 + \varrho^2}{2 \cdot h}$$

$$\varrho = \frac{1}{2} \cdot a \cdot \cos 30 = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

$$R = \frac{h^2 + \frac{1}{3} \cdot a^2}{2 \cdot h} .$$



Abb. 393. Sphärometer.

Die Länge  $a$  wird durch Aufdrücken des Sphärometers auf Papier und Ausmessen der drei Abstände der Eindrücke der Fußspitzen mittels eines Glasmaßstabes ermittelt.

Gewöhnlich beobachtet man die Berührung der Schraube mit dem Prüfling aus dem dann eintretenden Wackeln des Sphärometers oder aus dem Zusammenreffen ihrer Spitze mit deren Spiegelbild, wobei aber nur eine Genauigkeit von 5 bis höchstens  $2 \mu$  zu erzielen ist. Genauer wird dies, wenn man einen mechanischen, Libellen- oder Interferenzführlhebel als Druckanzeiger verwendet, wie in Abb. 393, wo der Prüfling von oben auf die drei Füße aufgelegt wird, die Stücke eines Kreisringes bilden<sup>1</sup>.

Das Sphärometer kann auch zur Messung der Dicke von Körpern dienen, indem man diese auf eine Planplatte legt, das Gerät einmal darauf und ferner auf den Prüfling einstellt.

Im Anschluß hieran sei eine Methode des National Physical Laboratory erwähnt (5, 7), Der Prüfling wird auf ein auf einer Planplatte ruhendes Endmaß  $l$  (Abb. 394) gelegt, an beiden Seiten zwei Lehdorne vom Durchmesser  $d$  eingeführt und ihr Abstand  $L$  gemessen. Es ist dann

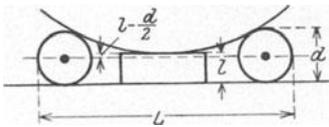


Abb. 394. Bestimmung des Krümmungshalbmessers.

$$\left(R + l - \frac{d}{2}\right)^2 = \left(R - \frac{d}{2}\right)^2 - \left(\frac{L}{2} - \frac{d}{2}\right)^2,$$

$$R = \frac{\left(l - \frac{d}{2}\right)^2 + \left(\frac{L}{2} - \frac{d}{2}\right)^2 - \frac{d^2}{4}}{2 \cdot (d - l)}$$

$$= \frac{(L - d)^2 + (2 \cdot l - d)^2 - d^2}{8 \cdot (d - l)} .$$

Die zu erreichende Genauigkeit ist aber ziemlich gering, da sich  $L$  nur schwer genau bestimmen läßt.

### 5. Innenschraublehren.

Innenschraublehren sind zuerst von J. T. Usher 1886 angegeben (1). Um das Mikrometer auch für Innenmessungen verwenden zu können, klemmt man auf Amboß und Spindel 2 Schnäbel  $f$  und  $g$  nach Abb. 395 so auf, daß der Abstand ihrer Meßflächen  $rr$  gleich dem Abstand der Meßflächen  $k$  und  $l$  ist, so daß man dieselbe Skala für Außen- und Innenmessungen verwenden kann<sup>2</sup>. Leicht läßt sich die in Abb. 386 gezeigte Form für Innenmessungen umgestalten,

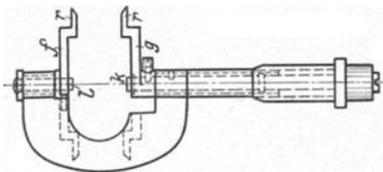


Abb. 395. Innenschraublehre.

<sup>1</sup> Andere Formen der Sphärometer siehe S. 273.  
<sup>2</sup> Für andere Ausführungsformen siehe (4).



der dreh- und verschiebbaren, durch *b* hindurchgeführten Spindel *d* mittels Mutter *g* so befestigt, daß er sich zwar verschieben kann, durch Führung in dem Schlitz *h* der Hülse *c* aber gegen Drehung gesichert ist.

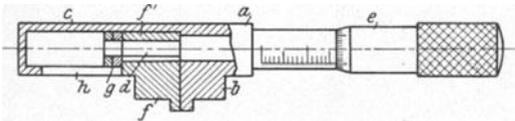


Abb. 397. Innenschraublehre.

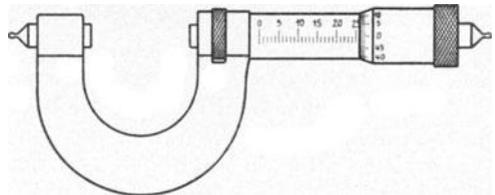


Abb. 398. Innenschraublehre.

In größere Bohrungen führt man am besten die ganze Schraublehre ein, die dazu noch am Außenende des Ambosses und der Spindel mit zwei kugelförmigen Anschlägen versehen ist (Abb. 398), wobei dann auch das Abbesche Prinzip gewahrt ist. Besser ist es, hierzu den Bügel ganz fortzulassen; man erhält dann ein Schraublehren-Stichmaß (Abb. 399).

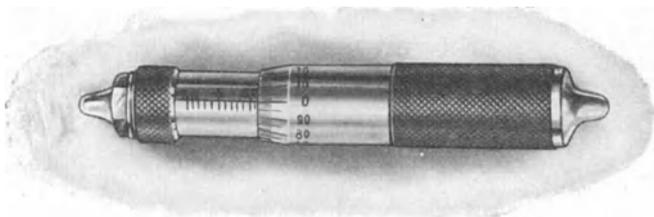
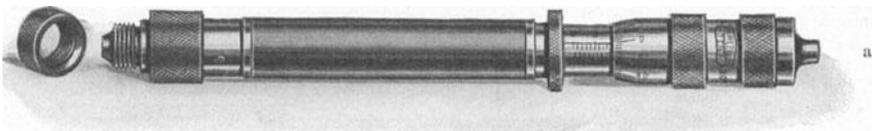


Abb. 399. Schraublehren-Stichmaß.

Um ihm größere Meßbereiche zu geben, werden an die Spindel entsprechend abgestufte Verlängerungsstangen angeschraubt. Sehr



empfehlenswert ist hier die Konstruktion von Zeiss, bei der die eigentlichen Meßbolzen geschützt in Rohren liegen (Abb. 400 b) und erst beim Aufschrauben hervorgedrückt werden (Abb. 400 a); die einzelnen Meßflächen legen sich dabei durch Federdruck gegeneinander.

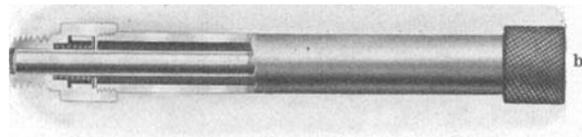


Abb. 400 a und b. Schraublehren-Stichmaß.

Man kann so Meßbereiche von 50 bis 900 mm herstellen. Gerade bei diesen

Messungen empfiehlt sich sehr die Anbringung eines Fühlhebels als Meßdruckanzeiger (Abb. 401). Man kann die Anordnung auch als Innenführlhebel be-



Abb. 401. Schraublehren-Stichmaß mit Meßdruckanzeiger.

trachten, dessen Meßbereich durch die Schraublehre verändert wird. Da diese Innenschraublehren bei tiefen Bohrungen nicht abgelesen werden können,

so werden sie hier nach erfolgter Einstellung festgeklemmt und dann herausgenommen.



Abb. 402. Innenschraublehre.

Zur bequemen Messung tiefer Bohrungen kann man die Schraublehren ähnlich wie die Innenführlhebel gestalten, indem die kegelig endende Spindel 2 oder 3 Meßbolzen (auch wohl 2 Meß- und 2 Stützbolzen) nach außen bis zur Berührung mit der Bohrungswand verschiebt (Abb. 402), oder indem man die Bewegung durch Hebel auf den Meßbolzen überträgt, wie im Prinzip nach Abbild. 403, die man als eine Kombination von Taster und Schraublehre ansehen kann.



Abb. 403. Lochtaster mit Schraublehre.

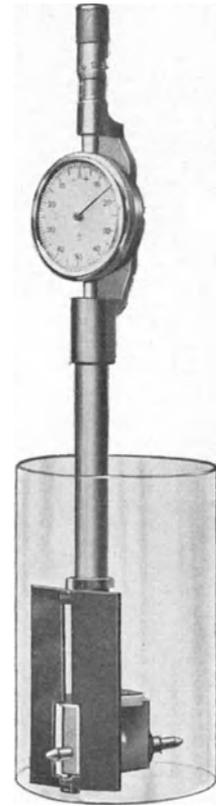


Abb. 404. Innenschraublehre mit Meßdruckanzeiger.

Eine sachgemäßere Form dafür gibt Abb. 404 wieder, die sich in ihrer Ausführung völlig den Innenführlhebeln anschließt, doch dient die Meßuhr hier im wesentlichen nur als Druckanzeiger, wenn man auch kleine Maßabweichungen unmittelbar daran ablesen wird.

Bei allen Messungen mit Innenschraublehren ist besonders sorgfältig auf den Meßdruck zu achten (soweit nicht ein Druckanzeiger vorgesehen ist). Zweckmäßig nimmt man auch mit den Innenschraublehren nur Vergleichsmessungen vor, indem man sie mittels einer Endmaßrachenlehre kontrolliert. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Abplattung der meist kugelförmig gestalteten Meßstücke eine andere ist als bei Messung in der Bohrung.

## D. Meßmaschinen.

### 1. Endmaß-Meßmaschinen. Bett und Führung.

Wenn auch die Schraublehre gelegentlich mit Bügeln ausgeführt wird, die eine Messung (von 475) bis 500 mm zulassen, so wird doch die Meßgenauigkeit mit wachsender Größe, der schwierigeren Handhabung wegen, immer geringer. Aus dem Bedürfnis nach genaueren Messungen entstanden die Meßmaschinen, die man als Standschraublehren auffassen kann, bei denen der Bügel die Form eines kräftigen, meist als Träger gleicher Festigkeit ausgebildeten Bettes angenommen hat, und bei denen nach Möglichkeit alle Verbesserungen, besonders

Druckanzeiger, angebracht sind, die bei jenen des beschränkten Raumes und Gewichts wegen nicht möglich waren. Im Grunde ist somit jede Schraublehre eine kleine Meßmaschine und der Übergang zwischen beiden ziemlich kontinuierlich.

Das älteste Modell einer Meßmaschine (Abb. 405) war 1851 von Whitworth in London ausgestellt (3, 6). Da bei diesem die Träger von Amboß und Spindel noch feststehen, mußten, um einen möglichst großen Meßbereich zu erzielen, beide mit Schraublehren ausgerüstet werden, von denen aber nur die rechte zur Messung dient, während die linke ausschließlich zur Einstellung benutzt wird. Die Messung des Prüflings erfolgt nur durch Vergleich mit Endmaßen.

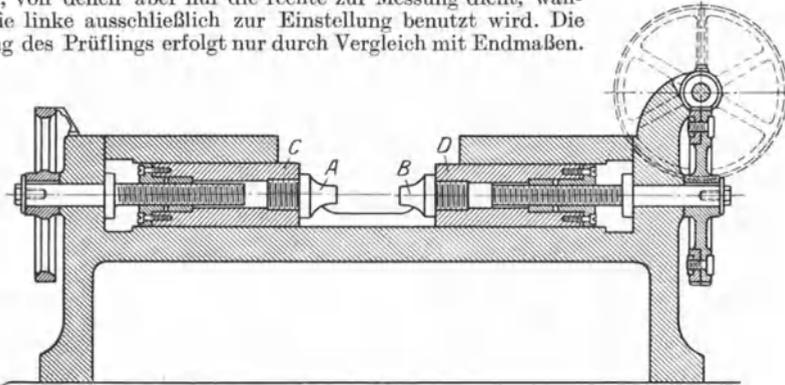


Abb. 405. Meßmaschine.

Die neuen Meßmaschinen (Abb. 406), wie sie in Deutschland zuerst von Reinecker im Anfang der 80er Jahre gebaut wurden, erreichen einen größeren Meßbereich dadurch, daß der eine Träger auf dem Bett verschiebbar ist, was durch Zahnstange und Trieb oder Spindel und Mutter geschieht, wobei gelegentlich auch eine Feineinstellung vorgesehen ist. Ferner ist bei ihnen fast stets ein Druckanzeiger am Amboß vorhanden.

Bei sehr langen Betten (Meßmaschinen werden normalerweise bis 6 m Länge, vereinzelt bis 12 m gebaut)

würde durch Verschieben des Supports eine merkliche Durchbiegung des Bettes und damit eine unzulässige Unparallelität der Meßflächen auftreten<sup>1</sup>. Man kann bei 500 mm Bettlänge und Belastung in der Mitte mit 10 kg mit einer Durchbiegung von 3,5 Sek. rechnen (2), so daß man bei 1 m Länge und gleicher Ausführung rund 1/2 Min. ansetzen müßte, was noch durchaus zulässig wäre, da bei 8 mm Durchmesser der Meßflächen die Unparallelität dann noch nicht 1  $\mu$  be-

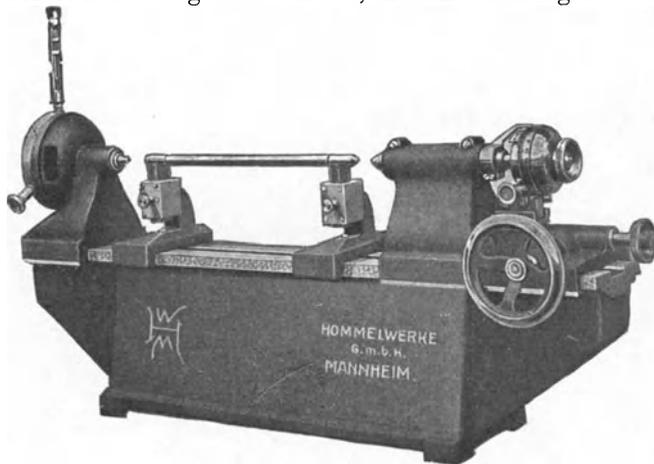
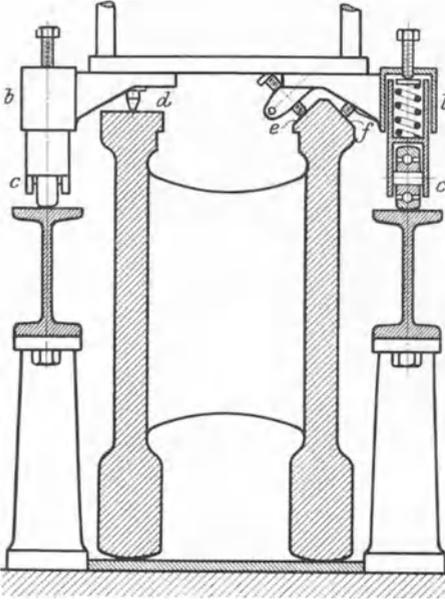


Abb. 406. Meßmaschine.

<sup>1</sup> Sie macht sich besonders störend bei der im nächsten Abschnitt beschriebenen Meßmaschine mit Strichmaßstab durch die dabei erfolgende Schiefstellung der Mikroskopachse bemerkbar, wodurch Fehler bis etwa  $10^{-6}$  der Länge auftreten können (5).

tragen würde. Längere Meßmaschinen müßten aber sehr kräftige Betten erhalten, damit nicht unzulässig große Fehler auftreten. Aus diesem Grunde werden bei der Meßmaschine von Shaw zur Entlastung des Bettes die Träger auf zwei besonderen seitlichen Schienen mit federnden Laufrollen *bc* (Abb. 407) gelagert und durch das Bett nur geführt.



bb . 407. Lagerung der Amboß- und Spindelträger.

Die Führung der Schlitten könnte wie bei Werkzeugmaschinen durch zwei V-förmige Prismen erfolgen, auf denen

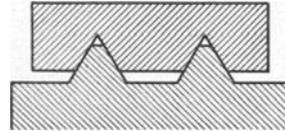


Abb. 408. V-Prismenführung.

die Schlitten mit zwei V-Nuten gleiten (Abb. 408). Diese Konstruktion setzt aber eine sehr genaue Ausführung voraus, da die Prismen und Nuten genau parallel zueinander verlaufen und auch die halben Flankenwinkel einander gleich sein müssen, was technisch mit der für Meß-

maschinen nötigen Genauigkeit kaum zu erreichen sein dürfte. An ihnen findet man vielfach eine Führung auf einer rechtwinkligen Schiene nach Abb. 409,



Abb. 409. Rechteckige Prismenführung.

wobei der Schlitten durch zwei von unten angeschraubte Schienen gegen Abheben durch den Meßdruck gesichert wird, oder eine Schwalbenschwanzführung nach Abb. 413. Hierfür gelten, wenn auch im verringerten Maße, dieselben Bedenken wie bei der V-Führung, namentlich gestaltet sich die Bearbeitung der Führungsbahnen am Schlitten nicht einfach, so daß stets die Gefahr eines seitlichen Zwanges oder Wackelns vorliegt. Diese ist bei der in Abb. 407 wiedergegebenen Ausführung vermieden, bei der die Führung auf einem V-Prisma und einer Planfläche erfolgt, so daß keine seitlichen Zwangskräfte auftreten können, zumal noch der Schlitten nur in einzelnen nachstellbaren Punkten *d*, *e*, *f* aufliegt. Statt des Prismas könnte man auch einen Zylinder nehmen, auf den der Schlitten nur an zwei (in möglichst großem Abstände voneinander befindlichen) Stellen (*A* und *B*) aufliegt. Auf die Ebenheit der Planfläche kommt es nicht wesentlich an; denn die durch ihre Unebenheiten oder schiefe Lage bewirkte Hebung und Senkung des dritten Auflagepunktes veranlaßt nur eine Drehung um *AB*, senkrecht zur Bewegungsrichtung, und somit höchstens einen Fehler 2. Ordnung. Dieser wird noch um so kleiner, je weiter man Planfläche und Zylinder auseinanderrückt (das gilt auch entsprechend für die weiterhin beschriebenen Führungen).

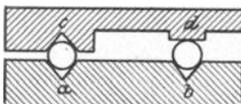


Abb. 410. Schwimmende Führung in V-Nuten.

Eine sehr leichte, praktisch nahezu reibungsfreie Bewegungsmöglichkeit erhält man durch die sogenannte schwimmende Anordnung, bei der der Schlitten auf Kugeln läuft, die in 2 V-Nuten *a* und *b* des Bettes liegen (Abb. 410), während der Schlitten mit einer V-Nut *c* und einer Planfläche *d* versehen ist. Dabei ist

die V-Nut *b* an der Seitenführung nicht beteiligt und kann der Schlitten auf seiner Planfläche allen Seitenkräften nachgeben. Dasselbe Prinzip findet sich bei der Führung nach Abb. 411, bei der die V-Nuten durch Zylinder *a* ersetzt sind, die sich genauer herstellen und auch parallel zueinander justieren lassen (7). Gelegentlich werden auch Führungen mit Planflächen auf 4 Kugellagern *a*, *b*, *c*, *d* (Abb. 412) verwendet, von denen *d* beweglich gelagert ist und durch eine Feder gegen den Schlitten gedrückt wird, so daß dieser seitlich ausweichen kann.

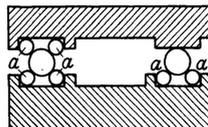


Abb. 411. Schwimmende Führung auf Zylindern.

Bei allen schwimmenden Anordnungen sollte man aber unbedingt geschabte Flächen vermeiden und sie durch geschliffene ersetzen, da sich die Kugeln oder die Außenringe nahezu allen punktwisen Unebenheiten anpassen; so wurden bei geschabten Flächen auf 200 mm Längsverschiebung Seitenabweichungen bis zu  $\pm 2 \mu$  und Höhenabweichungen bis zu  $\pm 3,5 \mu$  (4) und im National Physical Laboratory sogar Unebenheiten bis  $13 \mu$  festgestellt. Bei Flächenberührung nach Abb. 408 und 409 erfolgt dagegen durch die größere Führungslänge des Schlittens ein gewisser Ausgleich der durch das Schaben bewirkten Unebenheiten (siehe S. 337). Hier konnten auf die gleiche Länge nur (Höhen-)Abweichungen von höchstens  $1 \mu$  beobachtet werden (1). Bei 500 mm Länge haben sich die durch die Unebenheiten veranlaßten Seiten- und Höhenabweichungen auf  $2,5 \mu$  heruntbringen lassen (8).

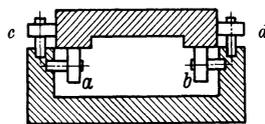


Abb. 412. Führung auf Kugellagern.

Messungen an einigen Meßmaschinen<sup>1</sup> haben Winkeländerungen in der Seiten- und in der Höhenrichtung von 4 bis 35 Sek. bei 250 mm Verschiebung ergeben (2), die noch als zulässig angesehen werden können. Immerhin ersieht man daraus, daß bei längeren Meßmaschinen große Sorgfalt auf die Führung zu verwenden ist. Man könnte daran denken, ihren schädlichen Einfluß auf die Messungen durch Verwendung möglichst kleiner Meßflächen herabzusetzen, doch würde dann der spezifische Meßdruck unzulässig groß werden (siehe S. 103).

Zu den eben genannten kommen noch die von der Verschiebung des Meßbolzens herrührenden Kippungen seiner Meßfläche (ähnlich wie bei den Schraublehren), die zu 30 bis 45 Sek. festgestellt wurden. Auch dies dürfte ein Grund sein, die Meßmaschinen möglichst nur zur Bestimmung des kleinen Unterschiedes von wenigen  $\frac{1}{100}$  mm zwischen Prüfling und Endmaß zu benutzen. Für bestimmte Stellungen kann man dadurch eine gute Parallelität der Meßflächen erzielen, daß man beide zugleich mit einem planparallelen Stück schleift; dabei muß man aber auch darauf achten, daß die Meßflächen eben und senkrecht zur Achse werden.

## 2. Endmaß-Meßmaschinen. Spindelköpfe.

Der Mikrometerkopf ist bei allen Meßmaschinen so ausgeführt, daß sich der eigentliche Meßbolzen nur verschiebt, aber nicht dreht. Im übrigen lassen sich die verschiedenen Konstruktionen grundsätzlich auf 3 zurückführen:

1. Die unverrückbar gelagerte Spindel verschiebt die gegen Drehung gesicherte Mutter (Whitworth, Fortuna-Werke, National Physical Laboratory I, Reinecker, Sautter und Messner, Société Genevoise d'Instruments de Physique).

2. Die unverrückbar gelagerte Mutter verschiebt die gegen Drehung gesicherte Spindel (Shaw).

3. Die Spindel wird in die feststehende Mutter hineingeschraubt und verschiebt dadurch den Meßbolzen (wie gelegentlich bei Schraublehren) (Fortuna-Werke II, Hommel, Mahr, National Physical Laboratory II, Newall, Wickman).

<sup>1</sup> Für die Bestimmung der Güte von Führungen siehe S. 337.

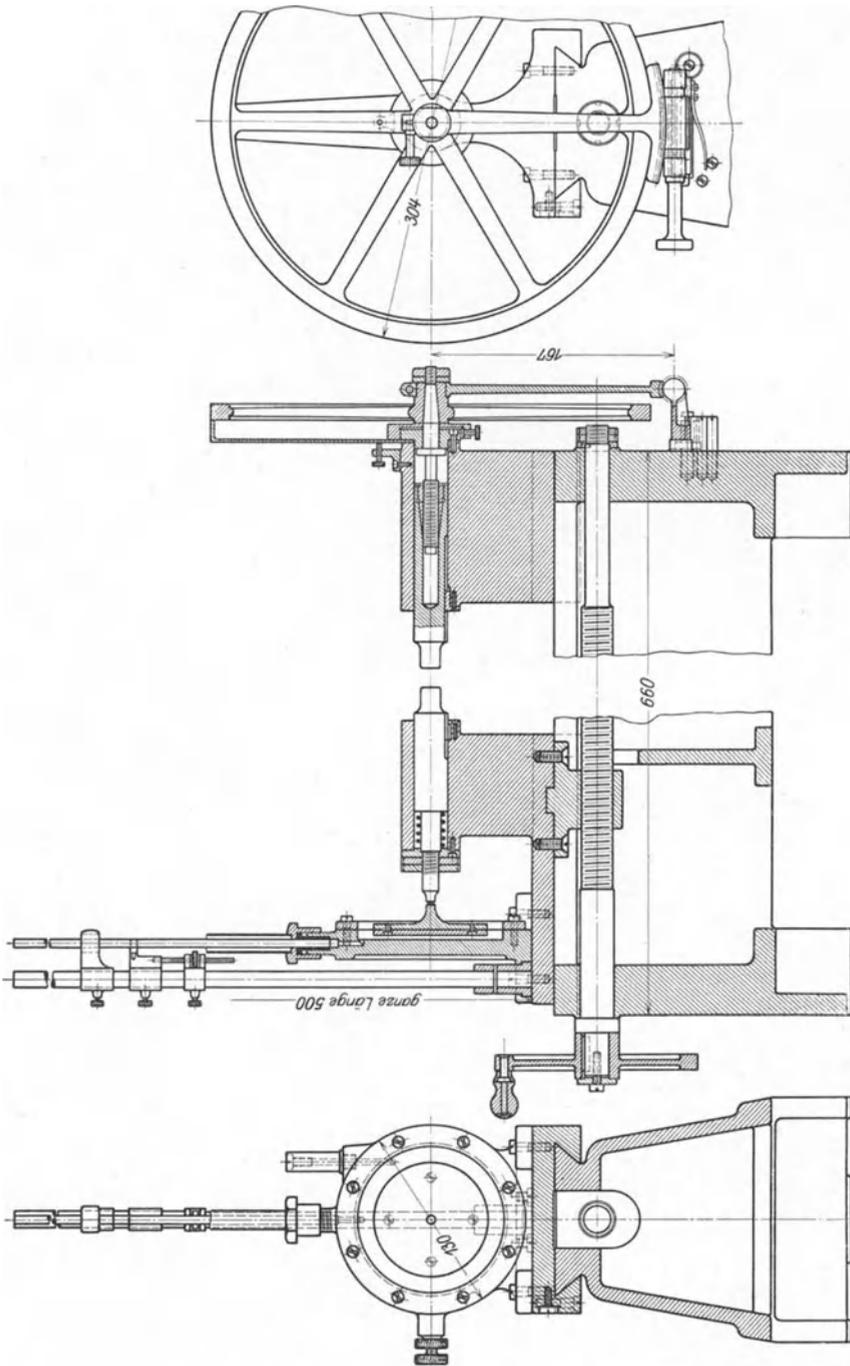


Abb. 413. Meßmaschine von Reinecker.

Eine vierte prinzipiell noch mögliche Konstruktion, daß man nämlich die Mutter über die feststehende Spindel schraubt, und dadurch den Meßbolzen verschiebt, ist der größeren herstellungstechnischen Schwierigkeiten wegen bisher

nicht ausgeführt. — Das erste Prinzip, wobei durch Drehung der unverrückbaren Spindel die Mutter verschoben wird, findet sich bereits bei der Meßmaschine von Whitworth (Abb. 405).

Die Spindel wird hier durch Bund und die mittels Schraube festgehaltene Ablesetrommel gegen Längsbewegung gesichert. Die Muttern sitzen in zwei genau geschliffenen Prismen *C* und *D*, die in V-Nuten des Betts gleiten; in die Prismen sind die Meßbolzen *A* und *B* eingeschraubt. Um die Mutter nach erfolgter Abnutzung sowie zur Aufhebung des toten Ganges nachstellen zu können, besteht sie aus zwei Stücken, die durch zwei in axialer Richtung wirkende Schrauben gegeneinander gepreßt werden. Durch die Möglichkeit der Anbringung einer großen Trommel an der Spindel ist man in der Lage, an ihr unmittelbar  $\mu$  ablesen und  $\frac{1}{10} \mu$  schätzen oder mittels Nonius ermitteln zu können. So gestattete auch die von Whitworth für die Werkstatt zur Messung von Lehdornen bestimmte Meßmaschine Ablesung auf  $\frac{1}{50000}''$  (etwa  $0,5 \mu$ ). Ende der 70er Jahre wurde sie zur Millionth Measuring Machine ausgebaut. Um auf  $10^{-6}$  Zoll (etwa  $0,025 \mu$ ) ablesen zu können, wurde die eigentliche Meßspindel durch ein 200-zähniges Schneckenrad angetrieben, dessen Trommel 250 Zähne aufwies und in das eine Schnecke mit 20 Gang/1'' eingriff<sup>1</sup>. Diese

Ablesegenauigkeit ist aber in bezug auf die zu erreichende Meßgenauigkeit von einigen  $\frac{1}{10} \mu$  entschieden übertrieben<sup>2</sup>.

Auf derselben Grundlage beruht die Ausführung des Spindelkopfes der ältesten deutschen Meßmaschine von Reinecker (Abb. 413)<sup>3</sup>. Die Spindel stützt sich mit ihrem rechten kugelförmigen Ende durch die Wirkung einer Blattfeder gegen den Maschinenkörper und verschiebt die durch Nut und Prismenführung gegen Drehung gesicherte Mutter, die gleichfalls zur Nachstellung zweiteilig ausgeführt ist (3). Ihr vorderes 20 mm langes Stück war ursprünglich warm in den eigentlichen Meßbolzen eingesetzt, um ein möglichst genaues Zusammenfallen der Achsen zu erreichen. Bei der neueren Ausführung ist es schwach konisch gehalten und fest eingepreßt.

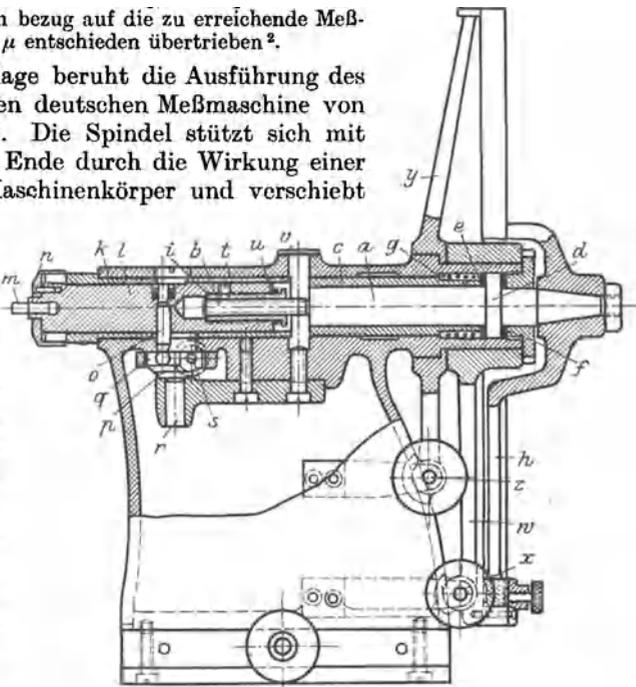


Abb. 414. Meßmaschine.

Die Ablesung erfolgt mit Nonius auf  $\frac{1}{10} \mu$  an einem großen Teilrad, das mittels einer ausklappbaren Schnecke fein verstellt werden kann.

Die Unbeweglichkeit der Spindel ist bei der Konstruktion der Fortuna-Werke (Abb. 414) durch den zwischen den beiden Laufringen *e* und *f* gehaltenen Bund *d* gesichert, von denen *e* durch eine Feder dauernd gegen *d* gedrückt wird,

<sup>1</sup> Eine ähnliche Einrichtung ist auch von Schott und Kaller benutzt (6).

<sup>2</sup> Daß die Fehler bei Nichtbeachtung der nötigen Vorsichtsmaßregeln größere Beträge annehmen können, dafür sei angeführt, daß sich früher bei behördlichen Eichungen von Endmaßen von 1 bis 12'' mittels Meßmaschinen Unterschiede von 1 bis 2  $\mu$  ergaben (8), und daß sie in den Fabriklaboratorien noch größere Werte annahmen.

<sup>3</sup> Das gleiche gilt auch für die amerikanische Konstruktion von Bett (7), nur sind bei dieser die fortschreitenden Schraubenfehler dadurch ausgeglichen, daß für jede Trommelumdrehung ein anderer Indexstrich benutzt wird.

um jedes axiale Spiel aufzuheben. Die Mutter *i* ist in der Pinole *l* festgeschraubt, die in der Büchse *k* sauber geführt ist. Durch eine Aussparung in ihr und der Rohrwand tritt der in der Pinole *l* festsetzende Bolzen *o* hindurch und sichert sie mittels des Gleitsteins *q* und der Kulisse *p* gegen Drehung. Diese Vorrichtung dient gleichzeitig durch Schrägstellen von *p* mittels der Schraube *s* zum Ausgleich der fortschreitenden Schraubenfehler. Die Nachstellung der Mutter *i* nach erfolgter Abnutzung erfolgt mittels der Gegenmutter *u*, die nach Verschieben des aus Federblech bestehenden Abschlußringes *v* leicht zugänglich ist (5).

Der Ausgleich der fortschreitenden Fehler durch ein Gleitlineal war früher notwendig, wo man zum Einstellen der Meßmaschine um 25 mm abgestufte Endmaße und innerhalb dieses Bereiches die Mikrometerspindel benutzte. Die inneren und die periodischen Fehler, von denen namentlich die erstgenannten größere Bedeutung haben (bei einer 10 mm langen Spindel wurden innere Fehler von  $-0,3$  bis  $+1,7 \mu$  und periodische von  $-0,75$  bis  $+0,2 \mu$  beobachtet), bleiben aber dabei bestehen und können nur durch eine entsprechende Ausarbeitung des Lineals behoben werden, die noch dazu von Zeit zu Zeit erneuert werden müßte. Insofern bietet die Schraubenfehlerkorrektur keine wesentlichen Vorteile, da man die übrigen Schraubenfehler doch bestimmen und in Rechnung setzen muß. Heute, wo man die Prüfung mit einem Endmaß (oder einer Endmaßkombination) möglichst derselben Länge vornimmt und das Schraubenmikrometer nur auf einige  $\frac{1}{100}$  mm benutzt, ist sie gänzlich überflüssig und bedeutet nur eine unnötige Komplikation.

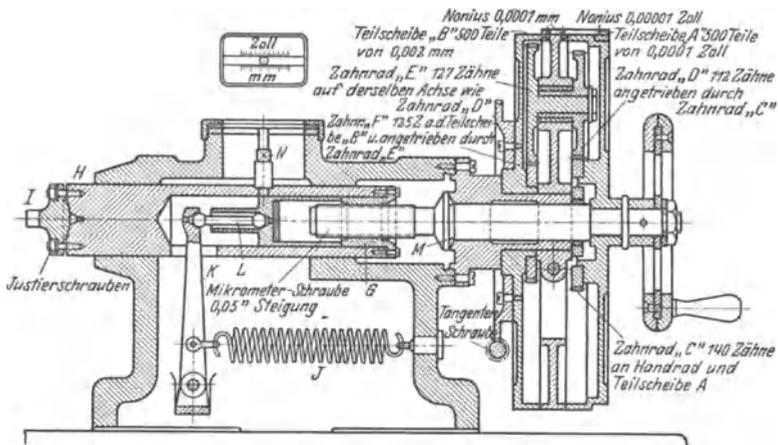


Abb. 415. Meßmaschine des National Physical Laboratory.

Die Sicherung der Mutter gegen Drehung und die Korrektur der Schraubenfehler durch ein Gleitlineal findet sich auch an der Meßmaschine des National Physical Laboratory (Abb. 415). Die mit Sägewinde von  $0,05''$  Steigung versehene Spindel ist in einem gehärteten, genau justierbaren Stahllager durch das Widerlager *M* gegen Verschiebung gesichert. Sie greift in die Bronzemutter *G* ein, die in der Pinole *H* sitzt, die ihrerseits mit dem Arm *K* in einem Gleitlineal geführt ist. Der tote Gang und die axiale Verschiebung der Spindel ist durch die Feder *J* aufgehoben, die mittels des Hebels *K* und des Kugelstabs *L* die Pinole ständig nach rechts drückt. Die eigentliche Meßfläche *J* ist durch 4 Schrauben genau senkrecht zur Spindelachse justierbar. Sehr sinnreich ist die Teiltrommel ausgestaltet, die an der Scheibe *A* Zoll- und mm-Maß unmittelbar abzulesen gestattet. Sie ist in 500 Teile von  $1 \cdot 10^{-4}$  Zoll und ferner in 637 Teile von  $2 \mu$  geteilt. Die  $10^{-5}$  Zoll (etwa  $0,25 \mu$ ) werden direkt mittels Nonius beobachtet. Durch die Zahnräder *C*, *D*, *E*, *F* mit 140, 112, 127 und 125 Zähnen, von denen *C* mit der Kurbel und der Teilscheibe *A* verbunden ist, *D*

und *E* auf einer gemeinsamen Welle sitzen und *F* mit *B* verbunden ist, überträgt *A* seine Drehung mit der Übersetzung  $\left(\frac{140}{112}\right) \cdot \left(\frac{127}{125}\right) = 1,27$  auf die Scheibe *B*, die folglich für je 1 mm Verschiebung eine Umdrehung macht. An ihr werden die  $\frac{1}{10}$ ,  $\frac{1}{100}$  und  $\frac{2}{1000}$  mm unmittelbar, die  $0,1 \mu$  dagegen an der 637er Teilung der Scheibe *A* mittels Nonius abgelesen. Die Scheibe *B* dient somit nur als Zähler, so daß die Zahnradfehler ohne Einfluß auf die Ablesegenauigkeit sind. Die  $\frac{1}{1}$  Zoll und mm werden an einer parallel zur Spindel liegenden Skala beobachtet. — Bei der Meßmaschine der Société Genevoise d'Instru-

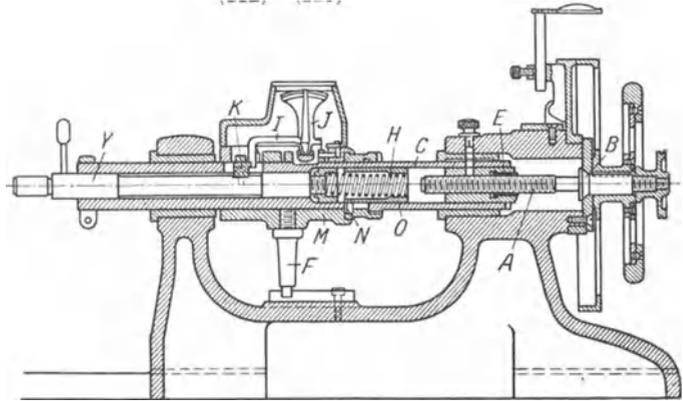


Abb. 416. Meßmaschine.

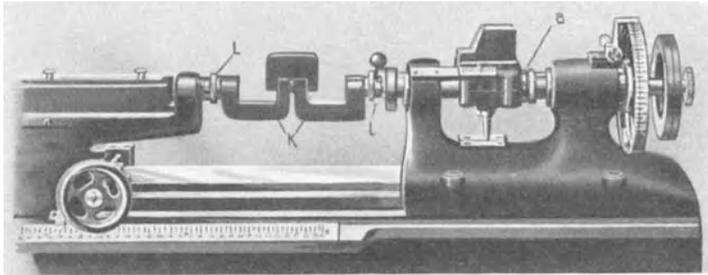


Abb. 417. Innenmeßmaschine.

ments de Physique (Abb. 416) ist die Spindel *A* unverrückbar mit einem Konus *B* gelagert (1, 2) und verschiebt die durch Verdrehen des Teils *E* nachstellbare Mutter *C*, die durch den in einem Gleitlineal geführten Stift *F* gegen Drehung gesichert ist, wodurch zugleich auch wieder die Schraubenfehler ausgeglichen werden. Um den Meßdruck — für Innenmessungen — umschalten zu können, ist der eigentliche Meßbolzen *Y* mit der Mutter *C* durch die Feder *H* gekuppelt, die aber nicht direkt an *C*, sondern an der Trommel *O* befestigt ist. An dieser befindet sich der Stift *N*, der durch eine auf der inneren Seite des Ringes *M* eingeschnittene Schraubennut geführt wird. Durch Drehen von *M* läßt sich *O* achsenparallel verschieben und damit der Feder *H* eine Zug- oder Druckspannung geben. Für die Ausführung von Innenmessungen werden an *Y*

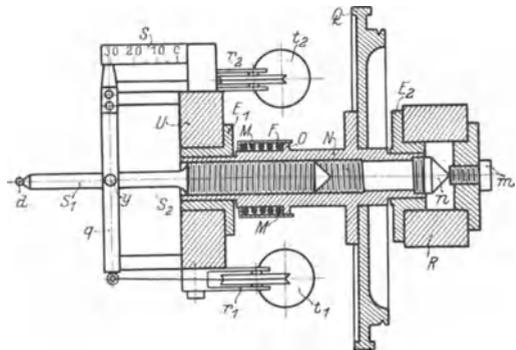


Abb. 418. Meßmaschine von Shaw.

und den Amboß entsprechend gekröpfte Hilfsstücke angesetzt, die mit ihren Meßstiften in das Innere der zu messenden Bohrungen hineinragen (Abb. 417).

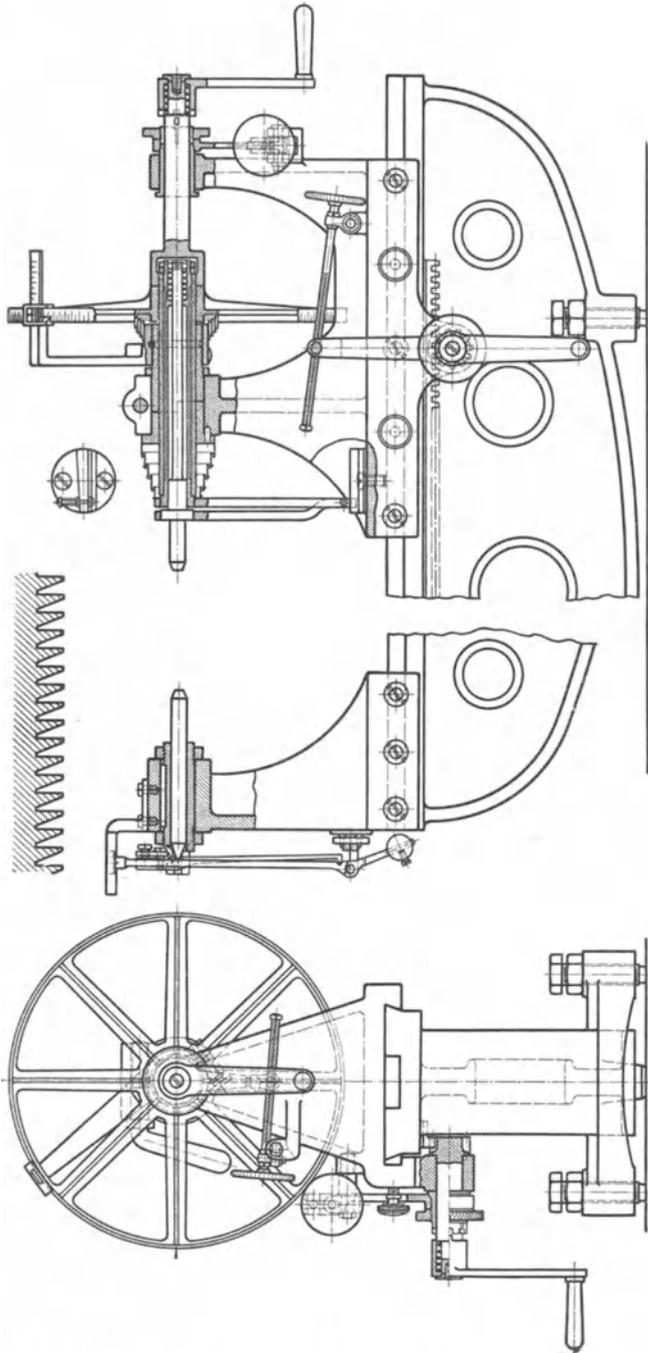


Abb. 419. Meßmaschine von Ma.h.r.

Grundsätzlich dieselbe Ausführung wie die besprochenen zeigen auch die Spindelköpfe der Meßmaschinen von Alig und Baumgärtel sowie von Sautter und Messner.

Der zu zweit genannte Konstruktionsgedanke — die unverrückbare Mutter verschiebt die Spindel — ist bisher nur bei der Meßmaschine von Shaw (Abb. 418) verwirklicht (9). Die die Teiltrommel *Q* tragende Mutter *N* von  $\frac{1}{2}$  mm Steigung aus gehärtetem Glockenmetall stützt sich unter dem Druck der Feder *F* mit der genau in ihre Achse fallenden Spitze *n* gegen die Stirnfläche der Schraube *m* und verschiebt bei ihrer Drehung die Spindel  $S_1, S_2$  aus Silberstahl, die durch den Anschlag *q* geführt wird. Der tote Gang wird durch die über die Rollen  $r_1$  und  $r_2$  geführten Gewichte  $t_1$  und  $t_2$  aufgehoben. Um den Einfluß der Handwärme auszuschalten, erfolgt die Drehung der Mutter mittels Schnurübertragung. Von einem Ausgleich der Schraubenfehler

konnte um so mehr Abstand genommen werden, als die Spin-

del nach dem Rowlandschen Verfahren (siehe S. 282) mit äußerster Genauigkeit hergestellt ist. Die Ablesung erfolgt mittels Nonius auf  $0,1 \mu$ .

Eine größere Zahl von Meßmaschinen zeigt einen Spindelkopf, bei dem (nach dem dritten Prinzip) die Spindel in die feststehende Mutter hineingeschraubt wird und dadurch den Meßbolzen verschiebt. Bei der Meßmaschine von Mahr (Abb. 419) ist die Spindel der besseren Druckaufnahme wegen mit Sägewinde versehen; für die Mutter ist Gußeisen gewählt, da dieses angenähert denselben Ausdehnungskoeffizienten wie die Spindel hat; es ist ferner noch dem früher meist gebrauchten Rotguß aus dem Grunde vorzuziehen, daß die Spindel dabei mehr geschont wird. Im Rotguß setzen sich nämlich leicht kleine Späne und mineralische Staubteilchen fest, die die Spindel abschleifen. Im Gegensatz dazu erleidet Gußeisen die größere Abnutzung, so daß es nur nötig ist, die Mutter, also den weniger wertvollen Teil, auszuwechseln (2). Um einen automatischen Fehlerausgleich durch Gleitlineal anbringen zu können, ist der in ihm geführte Meßbolzen in die Hohlspindel an seinem rechten Ende eingeschraubt, wobei der tote Gang durch eine Druckfeder aufgehoben wird. Die Mutter läßt sich nach erfolgter Abnutzung nachstellen, meist wird dabei auch ein Nacharbeiten des Gleitlineals — der geänderten Schraubenfehler wegen — nötig sein.

Einfacher ist der Schraubenfehlerausgleich bei der Meßmaschine von Hommel (Abb. 420) durch Führung des den Nonius tragenden Segments in einer Gleitschiene erreicht<sup>1</sup>. Die von Hand grob und nach Anziehen der Klemmung  $p$  mittels Schnecke fein verstellbare Spindel ist mit der (durch Nutenföhrung gegen Verdrehung gesicherten) Pinole  $A$  wieder durch eine Feder  $i$  zusammengehalten. Zur Nachstellung ist die Mutter aus zwei gegeneinander verdrehbaren Teilen  $k$  und  $l$  gebildet<sup>2</sup>.

Um die ganzen Umdrehungen bequem ablesen zu können, ist bei einer Meßmaschine des National Physical Laboratory (Abb. 421), bei der gleichfalls die Spindel  $B$  (mit 50 Gang/1") in die feststehende Mutter hineingeschraubt wird, die fest auf ihr sitzende Scheibe  $D$  mit der Scheibe  $C$  durch eine Übersetzung 1:50 gekuppelt, so daß diese sich für 1" einmal herumdreht (4). Auf der in 100 Intervalle geteilten Skala von  $C$  werden die  $\frac{1}{10}$  und  $\frac{1}{100}$  Zoll, auf der in 200 Intervalle unterteilten Skala von  $D$  die drei nächsten Dezimalen gegen einen auf einem Zahnrad sitzenden Index abgelesen (in der Abb. z. B. 0,988 48").

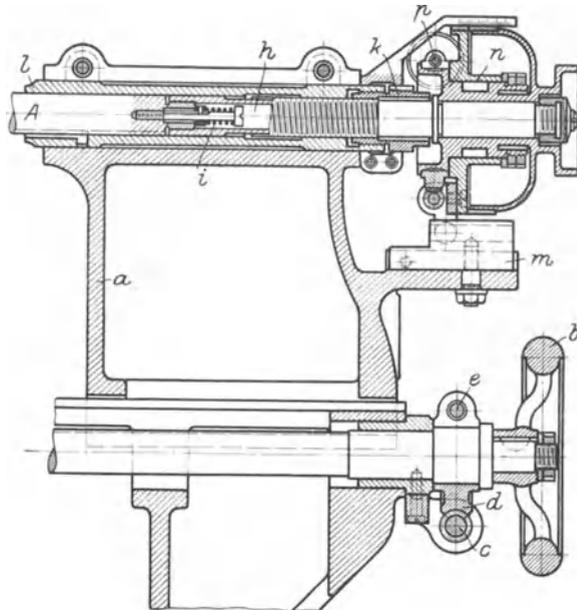


Abb. 420. Meßmaschine.

<sup>1</sup> Ähnlich ist auch die Konstruktion von Bethel-Player (13).

<sup>2</sup> Über den Fehlerausgleich bei der Meßmaschine von Newall siehe (10, 11).

### 3. Endmaß-Meßmaschinen, Meßdruckanzeiger.

Um eine Meßgenauigkeit bis auf  $\frac{1}{10}\mu$  oder weniger zu erreichen, muß der Meßdruck entsprechend konstant gehalten werden. Daß die von der Schraub-

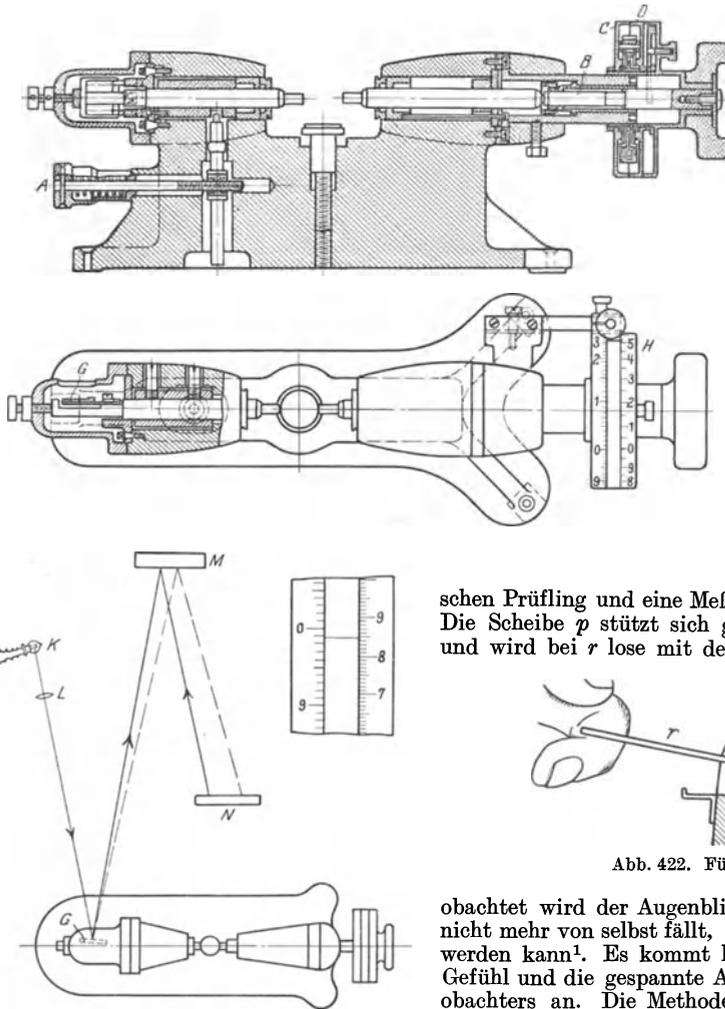


Abb. 421. Meßmaschine des National Physical Laboratory.

Angabe von Whitworth (6) hat sich eine Einstellgenauigkeit von  $10^{-6}$  Zoll ( $0,025\mu$ ) damit erreichen lassen, was aber wohl nur in neuem Zustande und mit sehr geübten Beobachtern ausnahmsweise der Fall war, denn von anderer Seite wird eine wesentlich größere Ungenauigkeit angegeben. Bei seiner Werkstatt-Meßmaschine beobachtete man den Augenblick, in dem sich die Platte herausziehen ließ, und will damit auf eine Genauigkeit von  $0,7\mu$  gekommen sein.

Das Gefühl wenigstens ist bei dem an der Meßmaschine von Pratt und Whitney benutzten Fallkaliber (Abb. 423) ausgeschaltet; es besteht aus einem Zylinder *a* mit einem exzentrisch daran angebrachten Gewicht *b*, der zwischen den (durch eine Feder *c* mittels des

Reibungskupplung, die z. B. bei den Maschinen von Sweet (14) und früher auch von Sautter und Messner (13) benutzt wurde, dafür nicht geeignet ist, geht aus dem früher darüber Gesagten hervor.

Bei der ältesten, der Whitworth-Maschine, benutzte man dazu nach einem Vorschlage von Sheepshanks (10) eine durch Reibung gehaltene Fühlplatte (Abb. 422),

die ursprünglich zwischen Prüfling und eine Meßfläche gebracht wurde. Die Scheibe *p* stützt sich gegen einen Anschlag *q* und wird bei *r* lose mit dem Finger gehalten; be-

Abb. 422. Fühlplatte.

obachtet wird der Augenblick, bei dem sie gerade nicht mehr von selbst fällt, aber noch leicht bewegt werden kann<sup>1</sup>. Es kommt hier somit alles auf das Gefühl und die gespannte Aufmerksamkeit des Beobachters an. Die Methode hängt weiterhin, wie leicht ersichtlich, sehr von der Beschaffenheit, der Schmierung, Abnutzung usw. der Flächen ab, so daß auf die Dauer nur bei sehr sorgfältiger Wartung brauchbare Ergebnisse damit zu erzielen sind. Nach

<sup>1</sup> Eine Abart dieser Methode ist die Benutzung eines Stückchens Seidenpapier, das man zwischen den Prüfling und Meßfläche bringt und das im Augenblick der Berührung in Bewegung gerät (3).

Anschlages *d* dagegen gedrückten) Bolzen *e* und den Lagerbock *f* gebracht wird. Man stellt so ein, daß das ursprünglich wagerecht gehaltene Gewicht *b* (Abb. 423a) eben herumzukippen beginnt (Abb. 423b), während es bei einem wenig stärkeren Druck ganz herumfällt (Abb. 423c). Der Meßunterschied zwischen dem Bewegungsbeginn und dem völligen Herumfallen beträgt etwa  $2\mu$ ; bei großer Übung kann man den Fallwinkel so regulieren, daß man eine Genauigkeit von  $0,2\mu$  erhält<sup>1</sup>.

Bei den heutigen Meßmaschinen benutzt man durchweg das bereits bei der Maschine von Pratt und Whitney auftretende Prinzip, auf eine bestimmte Spannung der Feder, mit der der Amboß gegen den Prüfling gedrückt wird, einzustellen, und beobachtet jene an ihrer Zusammendrückung mit Hilfe eines mechanischen oder optischen Fühlhebels, einer Meßdose oder auch wohl mikroskopisch. Diese Methode fand sich bei einer früheren Ausführung der Société Genevoise d'Instruments de Physique (Abb. 424), um den Druckanzeiger an den Mikrometerkopf verlegen zu können. Bei der Betätigung der Spindel verschieben sich der durch eine Feder damit gekuppelte Träger des Mikroskops *B* und die Pinole *D* zuerst gemeinsam, bis ihre Meßfläche den Prüfling berührt. Dann wird die Spindel noch so lange weiter gedreht, bis der Faden des Mikroskops mit einer auf *D* angebrachten Marke zusammenfällt<sup>2</sup>. Der unbequemen Beobachtung wegen ist diese Ausführung heute verlassen und durch die in Abb. 416 wiedergegebene ersetzt, bei der an Stelle des Mikroskops ein Doppelfühlhebel *IJ* von 1000facher Übersetzung verwendet wird. Wenn der Meßbolzen *Y* den Prüfling berührt, so bewegt sich die Mutter, genau wie in Abb. 424, unter Zusammendrückung der Feder noch weiter, so daß die Nase *K* des Meßbolzens auf den an der Mutter befestigten und mit ihr verschobenen Doppelhebel *IJ* einzuwirken beginnt. Bei dieser Anordnung muß die Ausführung aber sehr sorgfältig geschehen, da die Kippungsfehler von der ersten Ordnung sind (siehe S. 57) und somit eine ziemliche Unsicherheit veranlassen können.

Einen auf Schneiden gelagerten Doppelfühlhebel (am Amboß) benutzen Mahr (und in ähnlicher Weise auch Sautter und Messner sowie Schott und Kaller (13)) (Abb. 419), auf dessen kurzen Arm der Amboß einwirkt. Er übt dabei durch ein Gewicht einen konstanten Meßdruck aus, wenn er stets auf denselben Strich der Skala eingestellt wird. Slocomb läßt den Fühlhebel eine Meßuhr betätigen, um eine 13750fache Übersetzung zu erzielen.

Einen auf Schneiden gelagerten Doppelfühlhebel (am Amboß) benutzen Mahr (und in ähnlicher Weise auch Sautter und Messner sowie Schott und Kaller (13)) (Abb. 419), auf dessen kurzen Arm der Amboß einwirkt. Er übt dabei durch ein Gewicht einen konstanten Meßdruck aus, wenn er stets auf denselben Strich der Skala eingestellt wird. Slocomb läßt den Fühlhebel eine Meßuhr betätigen, um eine 13750fache Übersetzung zu erzielen.

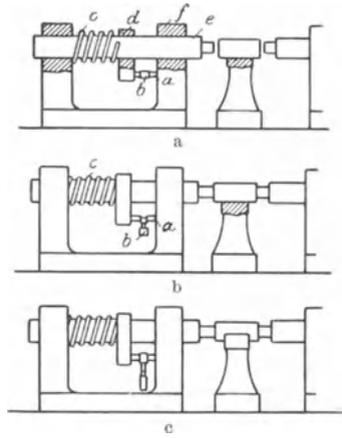


Abb. 423 a bis c. Fallkaliber.

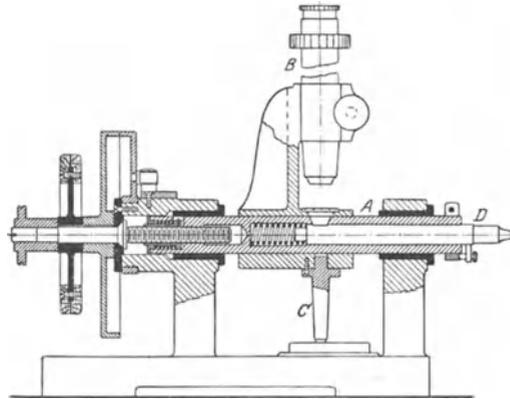


Abb. 424. Mikroskopische Beobachtung des Meßdrucks.

<sup>1</sup> Für die sehr komplizierte Einrichtung an der Meßmaschine von Barriquand und Marre siehe (2).

<sup>2</sup> Ähnliche Konstruktionen fanden sich auch an den Meßmaschinen von Schütte (4) und von Brown und Sharpe (10), mit denen aber nur festgestellt werden sollte, daß durch den Meßdruck keine Deformationen verursacht waren.

Statt des Doppelhebels kann auch jeder genügend empfindliche Präzisionsführlhebel (Minimeter, Mikrotast, Optimeter) als Druckanzeiger dienen. Man kann dann übrigens den Maßunterschied zwischen Prüfling und Endmaß bei festgehaltenem Mikrometer unmittelbar durch den Ausschlag des Fühlhebels bestimmen. Die Mikrometerschraube dient dabei nur noch zum Einstellen des Meßbolzens, nicht mehr zum Messen und verlangt infolgedessen keine sehr sorg-

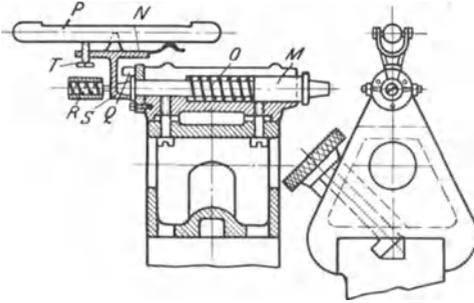


Abb. 425. Libellenführlhebel als Meßdruckanzeiger.

fältige Ausführung. Damit geht die Meßmaschine in einen Wagerecht-Fühlhebel über.

Ein Libellenführlhebel ist wohl zuerst von Newall als Druckanzeiger benutzt (18, 19). Der wie üblich durch eine Feder *O* zur Anlage an den Prüfling gebrachte Amboß *M* (Abb. 425) wirkt auf einen um *S* drehbaren Hebel ein, der durch die Feder *R* immer sicher dagegen (bei Nichtgebrauch gegen einen festen Anschlag) gelegt wird. Das Hebelarmverhältnis und die Empfindlichkeit der Libelle sind so gewählt, daß sich eine Übersetzung von 1:4000 ergibt. Die Justierung der Libelle *P* auf dem Hebel erfolgt durch die Schraube *T*.

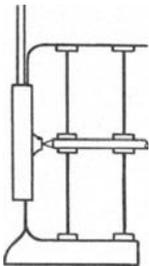


Abb. 426. Meßdose mit schwingend gelagertem Amboß.

Ein ähnlicher Libellenführlhebel wird an dem Gewindemeßapparat der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt benutzt (8), der bei 20 mm Hebelarm und einer Libellenempfindlichkeit von 1 Skt./2,75 Sek. eine 3750fache Übersetzung liefert, so daß man leicht eine Genauigkeit von  $0,1 \mu$  erhält. Er findet sich ferner bei der Meßmaschine der Bethel-Player-Comp. (25). Notwendig ist auch hier, die unverändert gebliebene Aufstellung durch eine zweite, am Bett der Maschine befestigte, empfindlichere Libelle zu kontrollieren. In England hat man den Libellenführlhebel wieder aufgegeben, da die Libellenblase zu träge sein soll (17), und ihn zu einem Kippspiegel umgebaut.

Von Reinecker wurde zuerst die Meßdose (Abb. 276) als Druckanzeiger verwendet, die sich auch an vielen anderen Meßmaschinen findet. Ähnlich wie bei dem Fühlhebel von Sears (siehe S. 203) wird auch dabei wohl der Amboß schwingend gelagert (9) (Abb. 426).

Von Göpel (7, 24) ist der gewöhnliche Fühlhebel durch Anbringung mikroskopischer Ablesung verbessert worden (Abb. 427), der dann von Sautter und

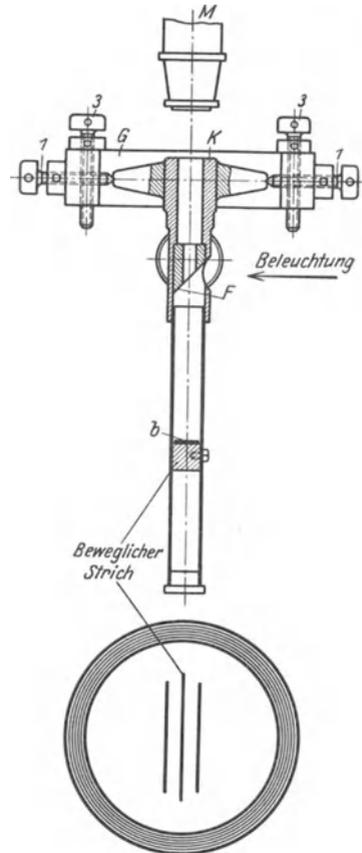


Abb. 427. Mikroskop-Fühlhebel als Meßdruckanzeiger.

Messner übernommen ist (15). Er besteht aus einem 8 mm starken Messingrohr, das mit dem stählernen Kopf *K* zwischen den Spitzen *I* hängt, während der Amboß gegen eine darin eingelassene Stahlplatte drückt. Das Rohr trägt nahe seinem unteren Ende ein Silberplättchen *b* mit einem feinen, durch eine kleine Lampe vermittle der Glasplatte *F* beleuchteten Strich, dessen Lage mit einem am Bett der Maschine befestigten Mikroskop *M* beobachtet wird (Abb. 428). Der

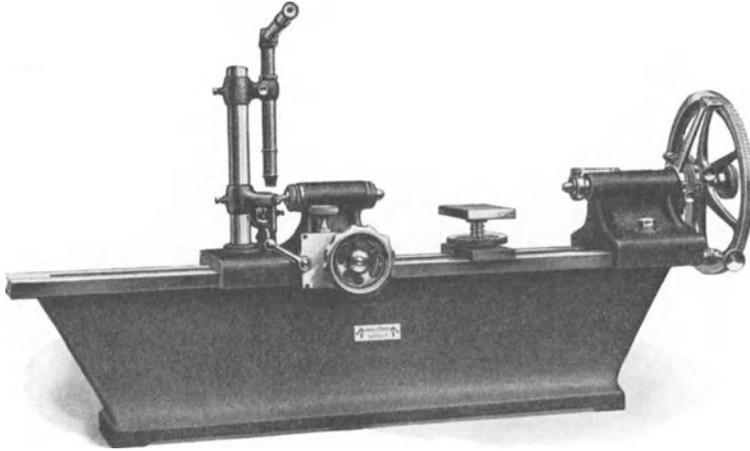


Abb. 428. Meßmaschine mit Mikroskop-Fühlhebel als Meßdruckanzeiger.

bestimmte Meßdruck ist erreicht, wenn der Strich genau in der Mitte des Doppelfadens des Mikroskops liegt. Bei 70 mm Rohrlänge, 2 mm kurzem Hebelarm und 13facher Mikroskopvergrößerung erreicht man eine Einstellgenauigkeit von  $0,1 \mu$ .

An englischen Maschinen suchte man früher die Ablesung des als Druckanzeiger wirkenden mechanischen Fühlhebels durch Projektion des Zeigerendes (wie bei dem Fühlhebel von Eden, Abb. 255) zu erleichtern. So brachte Wickman (20, 21) die 60-fache Übersetzung eines Doppelfühlhebels durch Projektion mit 70facher Vergrößerung auf 1:4200. Heute wird dort fast ausschließlich der Kippspiegel (in der von dem Searsschen optischen Fühlhebel her bekannten Form) als Druckanzeiger benutzt. Zuerst wurde der Libellenfühlhebel aus den vorher angegebenen Gründen dazu umgebaut (23). Eine andere Ausführung mit dreimaliger Reflexion ist in Abb. 429 wiedergegeben.

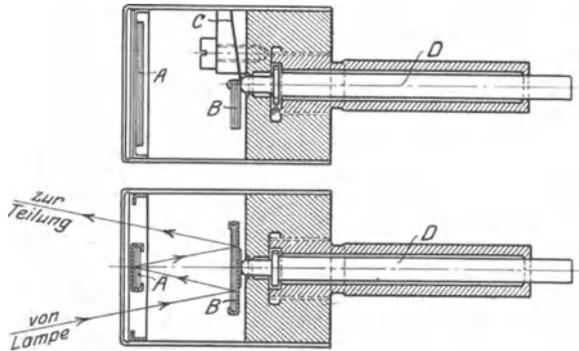


Abb. 429. Kippspiegel als Meßdruckanzeiger.

Die Ausrüstung der früher beschriebenen Meßmaschine des National Physical Laboratory (Abb. 415) mit einem Kippspiegel-Druckanzeiger ist in Abb. 430 dargestellt (11). Der Amboß, dessen Meßfläche gleichfalls mit 4 Schrauben senkrecht zu seiner Achse justiert werden kann, ruht, wie bei dem Fühlhebel von Sears, auf 2 Stahlfedern. Der Meßdruck wird durch eine bei *U* regulierbare

Feder  $T$  mittels des Hebels  $K'$  und des Kugelstabes  $L'$  auf ihn übertragen. Der Amboß drückt mit einem verstellbaren Stab auf den an zwei wagerechten Stahl-

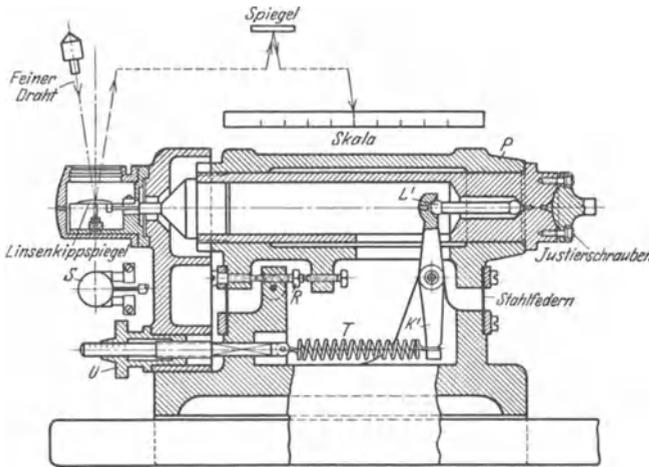


Abb. 430. Kippspiegel als Meßdruckanzeiger.

hängenden Linenspiegel  $S$ , dessen Ebene dicht oberhalb des Angriffspunktes des Stabes liegt, so daß ein sehr kurzer Hebelarm entsteht. Das Bild einer Lichtquelle beleuchteten Drahts wird von ihm vermittels eines in größerer Höhe angebrachten ebenen Spiegels auf die in der Nähe der Meßmaschine befindliche Skala geworfen. Die Gesamtübersetzung ist 1:4000. Mit einer ähnlichen Ein-

richtung ist auch die in Abb. 421 dargestellte Meßmaschine des National Physical Laboratory ausgerüstet (12).

Wenig verwendet als Druckanzeiger ist bisher der Interferenzführlhebel.

Statt eines Druckanzeigers beobachtet Shaw den Augenblick der Berührung von Prüfling und Meßfläche elektrisch (16). Er ging davon aus, daß die Berührung von Fläche und Fläche, ihrer Unvollkommenheit wegen, niemals zuverlässige Ergebnisse liefern kann, und daß ferner die deshalb vorzuziehenden punktförmigen Kontakte bei mechanischer Berührung nicht zu brauchen sind, da sie sich eindrücken, während die elektrischen Kontakte hiervon frei sind. Sie lassen sich indessen nur anwenden, wenn beide Meßflächen mit Schraubmikrometern ausgerüstet sind. Diese werden bis zum Ertönen des in den Stromkreis geschalteten Telefons an den Prüfling herangeführt. Die damit erreichte Genauigkeit betrug bei

20	25	150 mm Länge
0,2	0,5	0,5 $\mu$ .

Es zeigte sich ferner, daß bei anscheinend optischer Berührung die Kontakte noch um 0,5  $\mu$  weiter herangeführt werden mußten, damit der elektrische Strom zwischen den Platin-Iridium-Flächen und dem Prüfling übergang. Um diesen Betrag würde also ein Maß beim Vergleich mit einem Strichmaß auf jeder Seite zu klein ausfallen. Die Methode hat sich als sehr geeignet erwiesen zur punkweisen Prüfung eines Maßes auf Planparallelität seiner beiden Meßflächen.

Um die größtmögliche Genauigkeit zu erreichen, müssen Meßflächen und Prüfling frei von Staub sein, mittels Lupe daraufhin untersucht werden, sowie die Spindellagerung sehr sorgfältig ausgeführt sein. Die Meßmaschine darf weder berührt und angeatmet werden, noch der Körperstrahlung ausgesetzt sein. Die Mikrometerspindel und der Druckanzeiger dürfen nur langsam betätigt und letzterer auch nicht zu weit aus seiner Nullstellung entfernt werden. Sehr wichtig ist vor allem, daß die Temperatur längere Zeit vor und auch während der Messung bis auf mindestens  $\frac{1}{2}^{\circ}$  konstant ist. Selbst dann muß man aber nach den einzelnen Operationen (Reinigen, Drehen der Spindel) genügend lange warten, bis sich alle Temperaturunterschiede ausgeglichen haben (1).

Ferner ist bei verschiedenen Querschnitten von Prüfling ( $Q'$ ) und Vergleichsmaß ( $Q''$ ) der Unterschied der elastischen Zusammendrückungen in Rechnung zu setzen. Nach dem

Hookeschen Gesetz ergeben sie sich für einige Meßdrucke, wie sie an den verschiedenen Meßmaschinen vorkommen, für 1 m Länge zu

$Q'$ mm <sup>2</sup>	$Q''$ mm <sup>2</sup>	$P = 1,5$	3	7,5 kg
10	315	7,3	14,5	36,3 $\mu$
100	315	0,5	1,8	2,5 $\mu$

Sie erreichen also bei größeren Prüflingen recht erhebliche Beträge. Der Druck von 7,5 kg ist danach nur beim Vergleich von Stücken mit angenähert gleichem Querschnitt zulässig, wobei noch darauf zu achten ist, daß die Elastizitätsgrenze nicht überschritten wird. Zu gering darf man aber den Meßdruck auch nicht wählen, da sich sonst kleine Fett- oder Luftschichten störend bemerkbar machen. Deshalb hat sich auch eine Einigung auf einen bestimmten Druck bisher nicht erzielen lassen (22). Bei der Abplattung von Zylindern spielt auch die Größe der Meßflächen eine Rolle; in der Regel haben sie einen Durchmesser von 8 mm.

Bei Erfüllung aller dieser Forderungen und Erhöhung der Ablesegenauigkeit auf  $\frac{1}{100} \mu$ , wie man sie z. B. durch Beobachtung des Meßdruckanzeigers, eventuell unter Zuhilfenahme optischer Vergrößerung, erhält, hat sich eine Meßgenauigkeit von  $\pm \left( 0,03 + \frac{L}{5000} \right) \mu$  (Meßlänge  $L$  in mm) erzielen lassen, während man sich in der Regel indessen mit einigen Zehntel  $\mu$  wird begnügen müssen.

#### 4. Endmaß-Meßmaschinen, Ausführungsformen.

Die Ausführungsformen der heute gebrauchten Endmaß-Meßmaschinen gehen aus Abb. 406, 413 (beide mit Meßdose), 419 (mit Fühlhebel), 428 (mit Libellenfühlhebel als Druckanzeiger) genügend hervor.

Einfache Meßmaschinen für rohere Messungen werden ohne Druckanzeiger ausgeführt. Absolutmessungen sollen dabei durch Einstellung des verstellbaren Mikrometerträgers auf einen Strich des Maßstabes erfolgen. Bei einem anderen Modell ist statt des Maßstabes eine Reihe gleich weit voneinander absteher Löcher vorgesehen (4), wie bei der Kombination von Schieblehre und Schraublehre (siehe S. 247).

Von den betrachteten Ausführungsformen unterscheidet sich die Universal-Meßmaschine der Hanson-Whitney Comp. in wesentlichen Zügen. Der Prüfling, in Abb. 431 ein Lehrdorn, wird gegen einen Träger (links) gelegt, der auf dem Bett verschoben und festgeklemmt werden kann. Dann wird der Träger des großen Fühlhebels bis zur Berührung seiner Meßfläche mit dem Prüfling verschoben und durch Betätigung einer Mikrometerschraube auf 0 gebracht, wobei

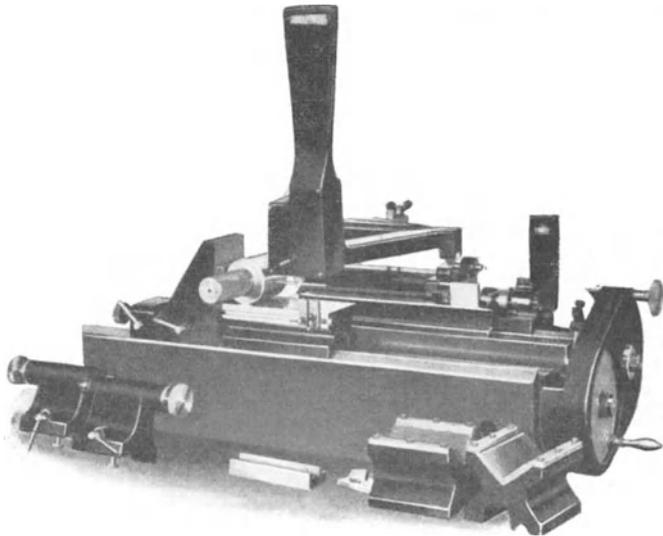


Abb. 431. Universal-Meßmaschine.

der kleine Fühlhebel (rechts) als Druckanzeiger dient. Das Maß des Prüflings wird dadurch bestimmt, daß an seine Stelle Endmaße gelegt oder aber diese zwischen Mikrometer und den Anschlag des großen Fühlhebels gebracht werden, wobei sein Meßbolzen den linken Träger berührt. Der Unterschied wird aus dem Ausschlag des großen Fühlhebels oder mittels der Mikrometerschraube ermittelt, die so eingestellt wird, daß der Fühlhebelzeiger wieder auf 0 steht (7, 8).

Die Art der Ausführung, die als eine Kombination der gewöhnlichen Meßmaschine mit dem Komparatorprinzip betrachtet werden kann, erklärt sich daraus, daß diese Meßmaschine

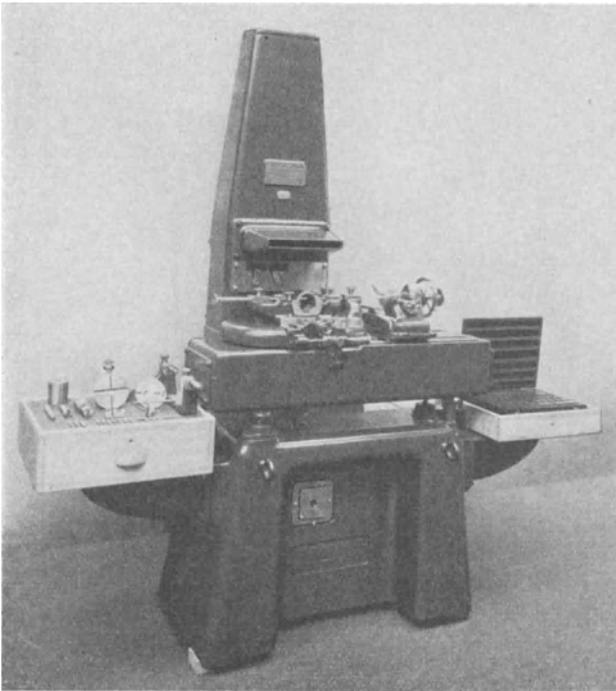


Abb. 432. Universal-Meßmaschine.

in erster Linie zur Bestimmung der Steigung von Gewinden<sup>1</sup> gedacht ist, aber auch zu sonstigen Messungen verwendbar sein soll.

Eine Universal-Meßmaschine stellt auch die Ausführung von Wickman dar (Abb. 432), die aber die Verschiebung des Fühlhebels und somit die dabei auftretenden Verkippungsfehler erster Ordnung vermeidet. Das nivellierbare Bett trägt ein verstell- und festklemmbares Mikrometer (rechts), dessen Schraubenfehler durch entsprechende Drehung des Nonius mittels Gleitlineals ausgeglichen werden, und das ein sauber geführtes, auf Kugeln rollenden Schlitten unter dem feststehenden Fühlhebel verschiebt, dessen Zeigerausschlag durch

Projektion, wie bei dem Fühlhebel von Eden, mit einer Gesamtübersetzung von 1:4200 vergrößert wird, wozu der hohe Aufbau nötig ist (die Gesamthöhe der

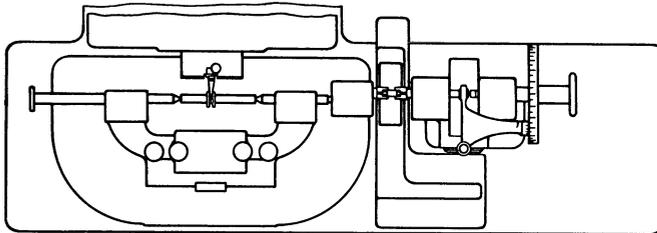


Abb. 433. Außenmessung mit der Meßmaschine.

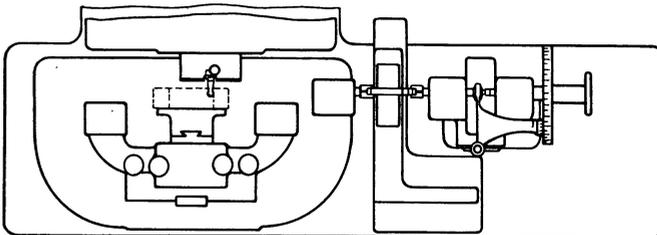


Abb. 434. Innenmessung mit der Meßmaschine.

Apparatur vom Fußboden beträgt etwa 2 m). Die Schwingungen des Fühlhebelzeigers werden durch eine Öldämpfung geschwächt. Der Prüfling bzw. die Vergleichsmaße kommen zwischen die Meßfläche des Mikrometers und einen Anschlag des Schlittens. Dabei greift der Meßbolzen des Fühlhebels in eine V-Nut eines

<sup>1</sup> Auf die zahlreichen dafür vorliegenden Konstruktionen soll hier, als außerhalb des eigent-

lichen Themas liegend, nicht weiter eingegangen werden; für nähere Ausführungen sei auf G. Berndt: Die Gewinde und erster Nachtrag dazu, verwiesen.

Stabes ein, der zwischen die Spitzen des verschiebbaren Schlittens aufgenommen ist (Abb. 433). Größere Prüflinge werden zwischen senkrecht zur Meßachse stehende Spitzen gespannt, die auf einem kleinen, schwimmend angeordneten Schlitten sitzen. Der Meßdruck wird durch Gewichte ausgeübt, wobei Stöße durch Öldämpfung vermieden werden. Bei der Bestimmung von Innenmaßen wird der Prüfling auf den verschiebbaren Schlitten an Stelle des Stabes gebracht (Abb. 434) und dieser, unter Einfügung von Endmaßen zwischen Mikrometer und Bettanschlag, so verschoben, daß der Fühlhebel nacheinander an beiden Seiten anliegt, wozu ihm ein kleiner Seitendruck gegeben werden kann. Dem jeweiligen Zweck entsprechend werden in den Fühlhebel geeignete Meßbolzen eingesetzt (3).

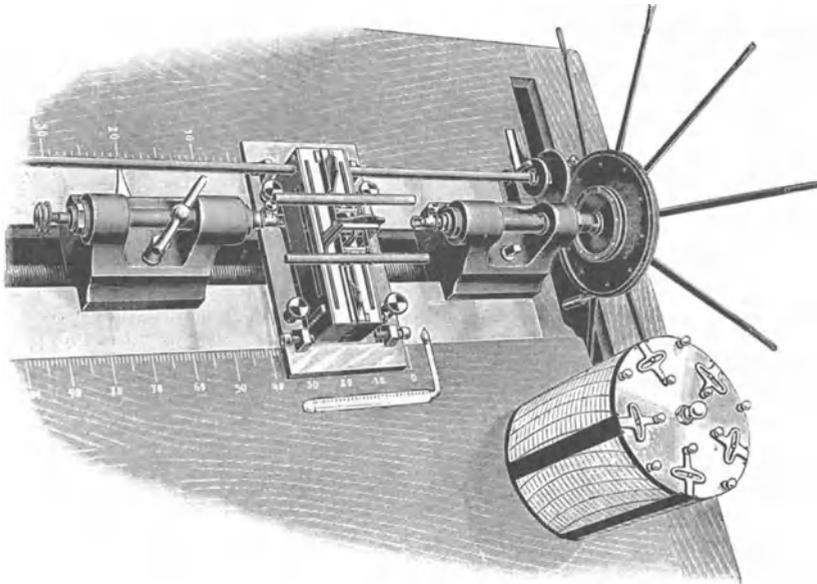


Abb. 435. Registrierende Meßmaschine.

Zum Vergleich vieler Stücke mit demselben Endmaß hat Hartmann (2,6) für die Section Technique de l'Artillerie Française die Meßmaschine mit einer Registriervorrichtung ausgerüstet. Um die nötige Genauigkeit zu erzielen, trägt die Spindeltrömmel (Abb. 435) zehn lange, genau auf  $\frac{1}{10}$  des Umfanges justierte Arme, die einen Kreis von 2 m Umfang beschreiben, wodurch eine 2000fache Vergrößerung erzielt ist. Bei dieser Maschine wird automatisch die Spindel mit konstantem Druck eingestellt, dann der der Schreibtrommel gegenüberliegende Arm dagegen gedrückt, wobei er mittels einer Spitze ein kleines Loch und zugleich seine Nummer in das Papier einprägt. Darauf wird die Spindel zurückgedreht, Endmaß und Prüfling vertauscht und das ganze Verfahren mehrfach wiederholt. Nach zehn Registrierungen wird ein neues Werkstück eingelegt. Nach Untersuchungen im Bureau International des Poids et Mesures erreicht man eine Genauigkeit von etwa  $0,5 \mu$ . Die Maschine ist nur für von gekrümmten Flächen begrenzte Stücke (Kugelendmaße z. B.) geeignet, da sich automatisch kein einwandfreies Ansprenge von Parallelendmaßen erzielen läßt, Parallelendmaße müssen durch zwei angesprenge Stücke mit je einer ebenen und einer Kugelfläche in Kugelendmaße verwandelt werden. Die Maschine ist auch zur Aufzeichnung des Profils von Lehrdornen und ähnlichem geeignet, indem diese nach jeder Messung automatisch um 2 mm verschoben werden<sup>1</sup> (1a).

<sup>1</sup> Für eine halbautomatische Meßmaschine, die eine Meßgenauigkeit von  $0,14 \mu$  gab, siehe (5), für eine besondere (nicht automatische) Vorrichtung zum Ausmessen von Zylindern siehe (7).

### 5. Strichmaß-Meßmaschinen.

Die Benutzung der im vorstehenden geschilderten Meßmaschinen setzt den Besitz genauer und guter Endmaße voraus. Vor ihrer allgemeineren Verwendung bestand nur die Möglichkeit, die Werkstücke an einen Strichmaßstab anzuschließen. Die beim Vergleich von Endmaßen mit Strichmaßen (in Abschnitt III B) besprochenen Methoden, die den Prüfling durch Anschiebstücke in ein Strichmaß verwandeln, kommen für die Technik nicht in Frage. Hierfür mußten besondere Einrichtungen erdacht werden, deren Prinzip von der Schieblehre bzw. dem Dickenmesser ausgeht. Der Prüfling wird zwischen einen festen und einen verschiebbaren Anschlag gebracht, dessen Stellung an einem Strichmaßstab abgelesen wird. Nur mußte hier die Beobachtung durch Benutzung eines Mikroskops, statt eines Nonius, verfeinert werden.

Der Ausgangspunkt der Strichmaß-Meßmaschinen liegt in Amerika, wo zuerst von Prof. Rogers, dem Astronomen der Harvard-Universität, und dem Ingenieur G. Bond eine solche Meßmaschine für Pratt und Whitney ausgeführt wurde, die zum Vergleich von Strich-

und Endmaßen mit einem Strichmaß bestimmt war (6).

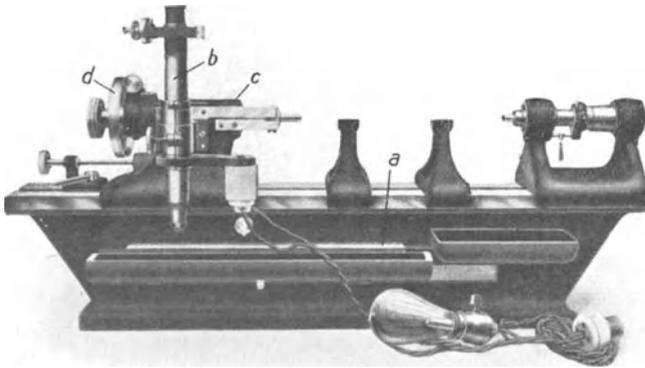


Abb. 436. Meßmaschine von Pratt und Whitney.

Aus dieser nur noch historisches Interesse bietenden Konstruktion hat sich dann in den 80er Jahren die in Abb. 436 wiedergegebene entwickelt, deren Prinzip man bei vielen anderen, z. B. Bett, Brown und Sharpe, Reinecker, Sweet (6), Barriquand und

Marre (2) (die zugleich als Teilmaschine ausgebildet war), Hommel-Werke (1-m-Meßmaschine), Sautter und Messner (7), Schütte (1) wiederfindet. Sie sind alle nicht nur zum Vergleich von End- mit Strichmaßen, sondern auch zum Vergleich von End- mit Endmaßen bestimmt. Von den reinen Endmaß-Meßmaschinen unterscheiden sie sich im wesentlichen dadurch, daß an dem Träger *c* der Mikrometerschraube *d* noch ein Mikroskop *b* mit Okular-Schraubenmikrometer angebracht ist, welches auf den vorn am Bett befindlichen Strichmaßstab *a* eingestellt wird. Zum Vergleich des Prüflings mit dem Strichmaß bringt man durch Verschieben des Mikroskopträgers zunächst die beiden Meßflächen miteinander in Berührung und stellt das Schraubenmikrometer des Mikroskops auf den nächsten Strich des Maßstabes ein. Darauf verschiebt man den beweglichen Träger, legt den Prüfling zwischen die Meßflächen und stellt den Faden des Mikroskops wieder auf den Maßstab ein. Im übrigen lassen sich die Prüflinge auch mit Endmaßen genau so wie bei den im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Maschinen vergleichen. Nach diesem Prinzip gab es um 1900 in Amerika 13, in Deutschland zu jener Zeit nur 3 Meßmaschinen (Reinecker, Lorenz, Hommel-Werke).

Bei diesen nach dem Prinzip des Longitudinal-Komparators bzw. der Schieblehre arbeitenden Strichmaß-Meßmaschinen muß nun eine sehr große Sorgfalt auf die Güte der Führungen gelegt werden, da die Verkippung des Mikroskops, wie sie z. B. infolge der Durchbiegung des Bettes bei Verschiebung des Trägers

eintreten kann, Fehler erster Ordnung hervorruft. Seine Stellung senkrecht zum Maßstab kann man mit einer angebrachten Libelle kontrollieren oder, indem man sieht, ob die Staubteilchen

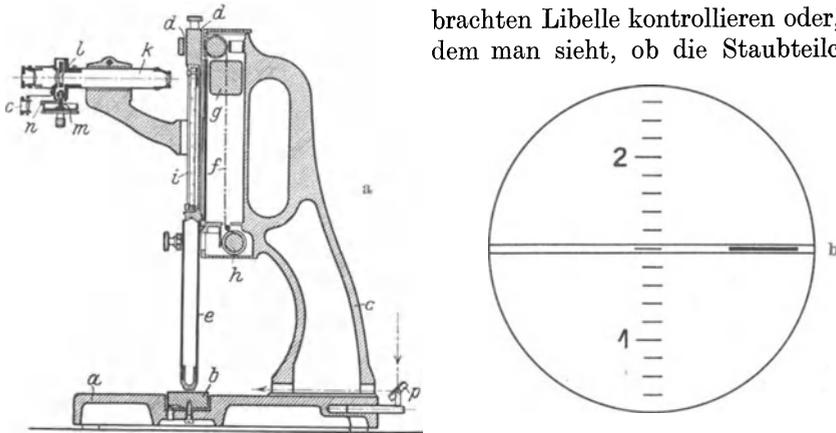


Abb. 437 a und b. Abbescher Dickenmesser.

auf einer mit Quecksilber gefüllten Wanne, zu der der Maßstab parallel ausgerichtet ist, stets scharf erscheinen. Noch besser ist es, wenn man (ähnlich wie auf S. 57), am Mikroskop einen Spiegel anbringt und seine unveränderte Lage mittels eines Autokollimationsfernrohres beobachtet. Eine gewisse Kontrolle gibt auch Ausführung der Messung an verschiedenen Stellen des Bettes. Aus diesem Grunde wird man auch das Mikroskop möglichst eng an den Träger anbauen.

Diese Fehler lassen sich nun bis auf Größen zweiter Ordnung beseitigen, wenn man das Abbesche Prinzip befolgt, also Prüfling und Maßstab in derselben Achse hintereinander anordnet und somit vom Schieblehren- zum Dickenmesser-Prinzip übergeht. Befolgt ist dies zuerst bei dem Abbeschen Dickenmesser (5) (Abb. 437). Der zum Teil durch das Gewicht *g* ausbalancierte, in 2 Stahlzylindern sauber geführte, in 0,1 mm geteilte senkrechte Stahlmaßstab *i* legt sich mit seinem Meßbolzen *e* auf den Auflagetisch *b* bzw. den darauf gesetzten Prüfling. Seine Lage wird mit dem Mikroskop *k* von

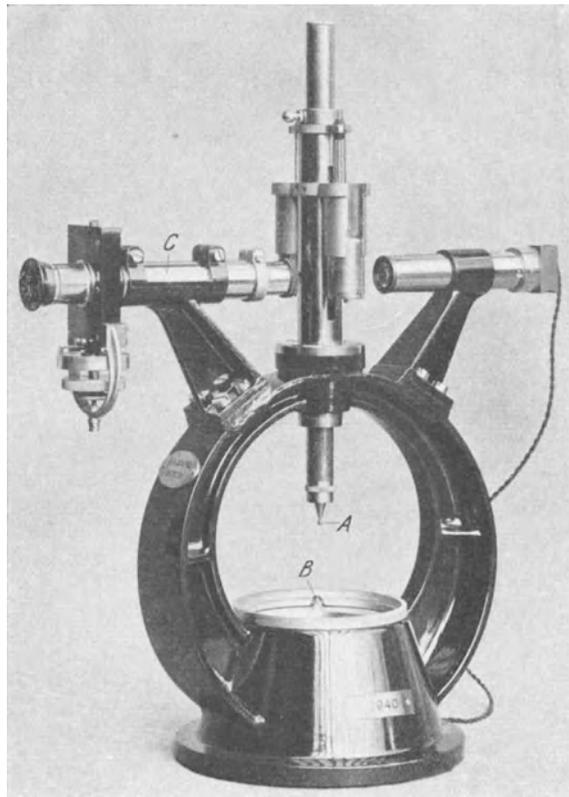


Abb. 438. Abbescher Dickenmesser.

50facher Vergrößerung und dem Okularschraubenmikrometer  $m$  auf  $\frac{1}{100}$  oder  $\frac{1}{1000}$  mm bestimmt, wobei noch  $\frac{1}{1}$  bzw.  $\frac{1}{10} \mu$  geschätzt werden können. Statt des Schraubenmikrometers kann man auch die Spiralstrichplatte oder die auf einer schiefen Ebene verschobene Skala (siehe S. 55) nehmen. Eine kräftige Ausführung, bei der ein Glasmaßstab im durchfallenden Licht beobachtet wird, ist in Abb. 438 wiedergegeben; dabei wird man für technische Messungen möglichst ein Glas mit dem Ausdehnungskoeffizienten des Stahls nehmen [für eine ähnliche Ausführung siehe (3)]. Bei der Konstruktion nach Abb. 439 wird nur ein kurzer Maßstab  $B$  verwendet und der Meßbereich unter Benutzung von Endmaßen durch Verstellung an der Tragsäule  $C$  erweitert. Die Fehler des Maßstabes und der

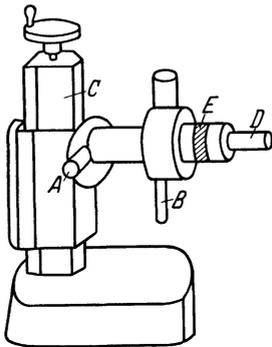


Abb. 439. A b bescher Dickenmesser.

Ablesevorrichtung werden am besten durch Ausmessen von Endmaßen ermittelt (14).

Diese Geräte lassen sich auch gut zur Prüfung von Schraublehren verwenden, indem man den Maßstab durch ihre Spindel verschiebt. Eine wagerechte An-

ordnung dafür ist in Abbild. 440 (für Schraublehren bis 25 mm Meßbereich) dargestellt (11, 13).

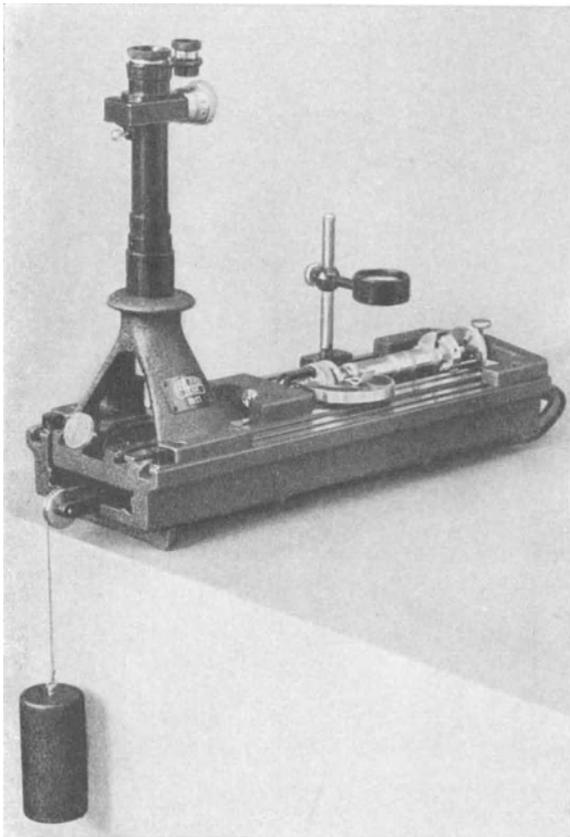


Abb. 440. Meßmaschine zur Prüfung von Schraublehren (bis 25 mm).

In dem darsenkrecht stehende Mikroskop 2 tragenden Bett 1 (Abb. 441) läuft auf Kugeln ein Schlitten 3 mit dem in  $\frac{1}{10}$  mm geteilten, 10 mm langen Maßstab 4. Die Mikrometerschraube wird am Trommelende (nach abgeschraubtem Rändhenteil) mittels der Zange 16 (Abb. 441a) mit dem am Bett feststehenden Zwischenlager 13 (Abb. 441b) verbunden und dadurch festgelegt, jedoch so, daß die Spindel betätigt werden kann und den Mikrometerbügel 10 verschiebt, der durch eine in einer Kreuznut des beweglichen Schlittens zu befestigende federnde Klammer 14 mit festem Auflagepunkt gegen Drehung gesichert ist. Die Verschiebung des Mikrometerbügels wird durch die an dem Amboß 9 angreifende Zange 15 und die Brücke 11 auf den beweglichen Schlitten mit dem Maßstab 4 übertragen und mittels des Mikroskops 2 beobachtet.

Bei Schraublehren mit Meßbereichen über 25 mm legt sich der Meßzylinder 19 der Spindel (Abb. 441c) gegen die (in der Ebene des Maßstabes befindliche) kugelige Widerlage 18 des Bockes 17, der an dem Bett in einer Kreuznut grob verschieb- und feststellbar ist. Die Anlage erfolgt unter Wirkung des Gewichtes 22, die dem Widerstand der Gefühlsschraube (Ratsche) 23 entspricht. Der Bügel wird in dem beweglichen Schlitten

mittels der in einer Kreuznut grob längs verschiebbaren Klammer 20 festgelegt, so daß dieser bei Betätigung der Meßtrommel entsprechend bewegt wird und die Verschiebung an dem Maßstab beobachtet werden kann.

Diese Meßmaschine läßt sich auch zur Untersuchung der Spindel allein auf fortschreitende, innere und periodische Fehler verwenden. Sie wird zwischen Spitzen 27 und 28 gespannt

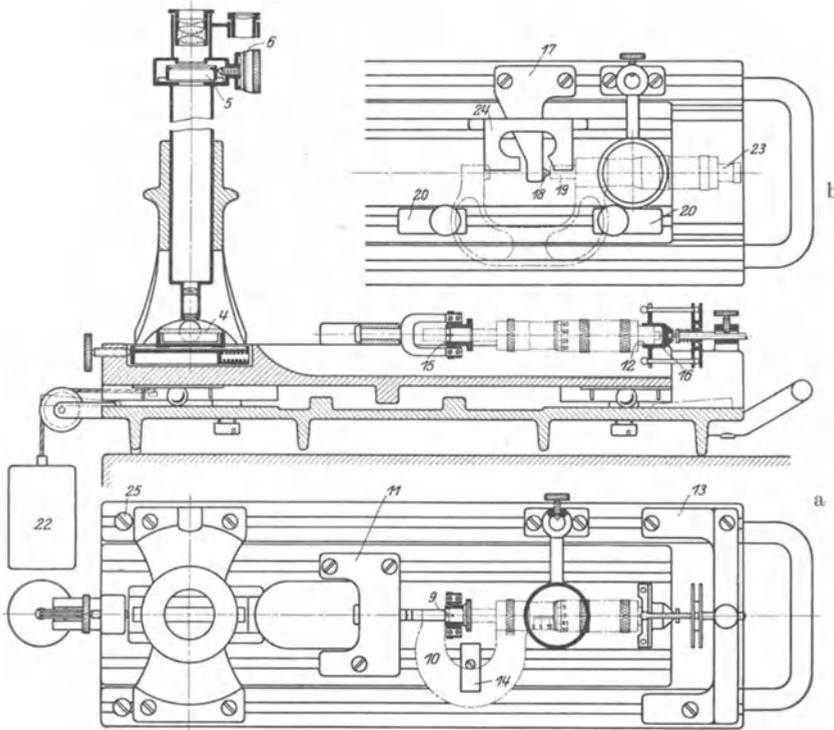
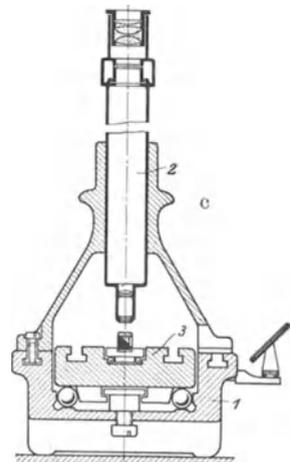


Abb. 441 a bis c. Meßmaschine zum Prüfen von Schraublehren.

(Abb. 442 a), von denen die erstere längs verschiebbar ist und durch die Schraube 29 festgelegt wird. Um die andere feste Spitze 28 läßt sich das in 10 genau gleiche Abschnitte geteilte Stufenrad 30 konzentrisch drehen, wobei die jedesmalige genaue Einstellung durch die Sperrklinke 31 (sowie den Hebel 32 mit dem Reguliergewicht 33) gegeben ist. Die Bewegung des Stufenrades 30 wird durch den an ihm festsitzenden Mitnehmer 34 und den an der Schraube angebrachten Mitnehmer 35 auf diese übertragen, so daß sie bei jeder Weiterschaltung um  $\frac{1}{10}$  des Umfanges gedreht wird (nach Ausschaltung von Sperrklinke 31 und Hebel 32 durch den Hebel 37 läßt sich die Spindel mittels der Kurbel 36 schneller drehen).

An dem Schlitten 3 sitzt nun ein Böckchen 38 (Abb. 442 b), das die in einen Zahn 40 endende Feder 39 trägt. Diese greift in das Gewinde ein, so daß bei seiner Drehung der Schlitten 3 mit dem Maßstab 4 jedesmal um  $\frac{1}{10}$  der Steigung verschoben wird.

Das Prinzip des Abbeschen Dickenmessers wird auch bei den neueren Sphärometern zur Bestimmung des Krümmungshalbmessers von Kugelflächen (Linsen) verwendet. Der Maßstab (Abb. 443) wird mit einem bestimmten, durch das Gewicht  $f$  ausbalancierten Meßdruck gegen den auf dem Ring  $c$  ruhenden Prüfling  $d$  gedrückt. Bei konvexen Flächen legt er sich gegen die innere, bei konkaven gegen die äußere scharfe Kante des Ringes. Die Bestimmung des Nullpunktes erfolgt durch Auflegen einer Planplatte auf den Ring.



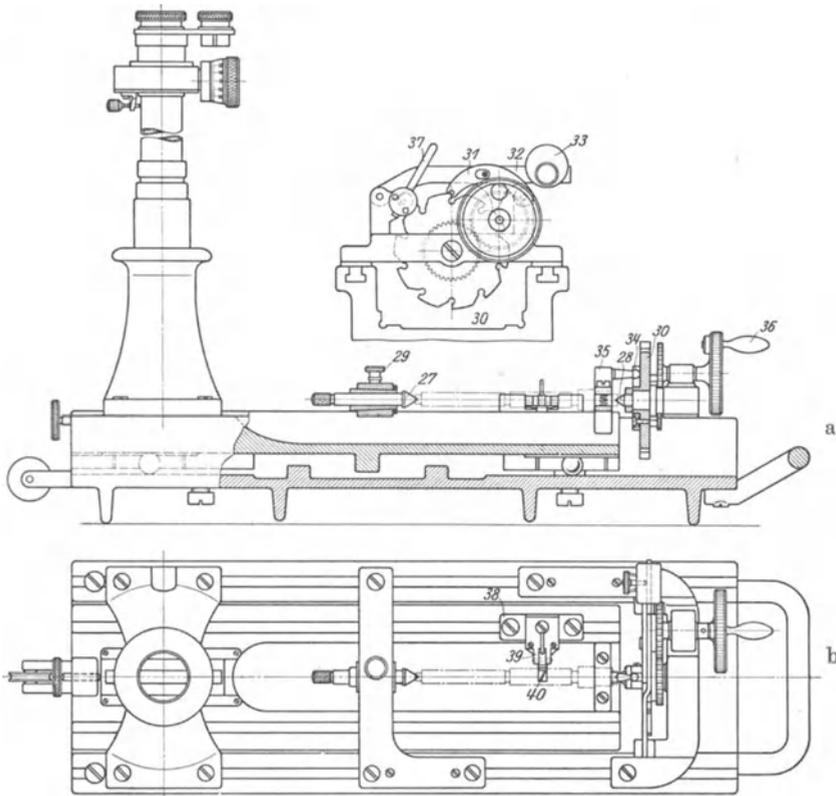


Abb. 442a und b. Meßmaschine zum Prüfen von Mikrometerspindeln.

Bei den Strichmaß-Meßmaschinen ist das Abbessche Prinzip durchgeführt bei einer Konstruktion der Société Genevoise d'Instruments de Physique<sup>1</sup>. Hier

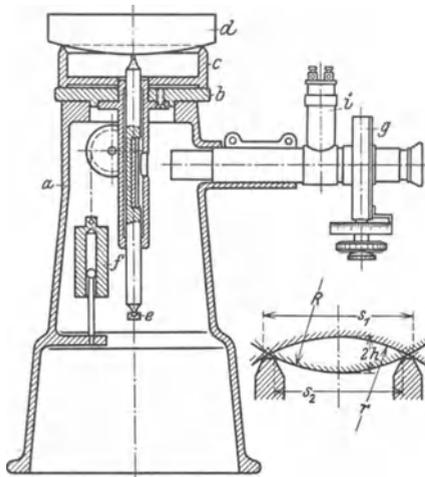


Abb. 443. Sphärometer.

steht der Träger des Mikroskops fest, während der mittels vier auf Federn gelagerten Zylindern auf dem Bett ruhende Schlitten mit dem genau parallel zur Bewegungsrichtung zu justierenden Maßstab verschoben wird, wobei der Meßdruck durch den Fühlhebel *a* (Abb. 444) angezeigt wird. In der Achse des Maßstabes befindet sich an seinem rechten Ende die zweite Meßfläche. Der Meßbereich ist durch die Anordnung zweier genau um die Maßstablänge von 500 mm voneinander abstehender Mikroskope verdoppelt, wobei die Ablesungen für Maße von 0 bis 500 mm an dem ersten, für die von 500 bis 1000 mm an dem zweiten Mikroskope erfolgen.

Der Vergleich des Prüflings mit dem Strichmaßstab kann auf zwei verschiedene Weisen

<sup>1</sup> Ähnliche Ausführungen finden sich auch bei Brown und Sharpe (6), dem National Physical Laboratory (4) und bei (12).

erfolgen. Bei der ersten läßt man das Schraubenmikrometer fest stehen, schiebt den Schlitten bis zur Berührung beider Meßflächen heran und führt die Ablesung durch Einstellung des Okularschraubenmikrometers auf den nächsten Maßstabstrich aus. Ebenso verfährt man nach Zwischenbringung des Prüflings zwischen die Meßflächen. Bei der zweiten Methode stellt man den Maßstab mit Hilfe des Mikrometers jedesmal so ein, daß ein Strich zwischen die Doppelfäden des Mikroskops bei festgehaltener Stellung des Okularschraubenmikrometers zu liegen kommt. Im allgemeinen ist das erste Verfahren vorzuziehen, da dabei nur Teile von geringerem Gewicht bewegt werden. Schließlich kann man auch bei festgehaltenem Schlitten den Vergleich gegen Endmaße vornehmen, was man, wenn irgend möglich, vorziehen wird, da sie sich wesentlich genauer als Strichmaße herstellen und messen lassen.

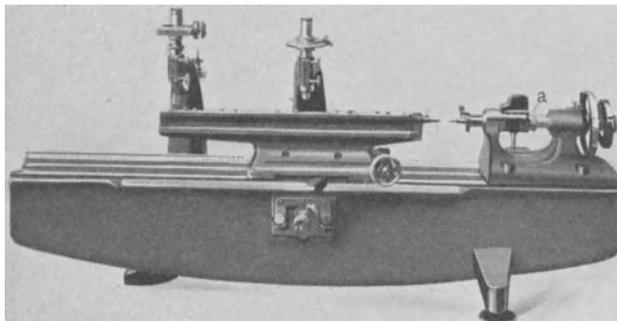


Abb. 444. Meßmaschine.

Die Meßmaschine der Société Genevoise d'Instruments de Physique läßt sich nach Aufsetzen geeigneter Bügel auch für Innenmessungen verwenden. Eine weitere Ausführung ist speziell zum Messen und Einstellen von Rachenlehren bestimmt<sup>1</sup>.

Bei den Meßmaschinen muß der Maßstab zwangsfrei (also nur an einem Ende befestigt) gelagert sein. Bei den meist in Betracht kommenden Längen wird man die Teilung in der neutralen Schicht ausführen und ihn in den Besselschen Punkten unterstützen (falls sich die Teilung auf der Oberfläche befindet, dagegen in den günstigsten Punkten). Erwünscht ist, daß er die Ausdehnung des Stahls hat. Seine Korrekturen, die man am besten behördlich bestimmen läßt, sind in Rechnung zu setzen. Trotzdem wird man die Instrumentengenauigkeit der Strichmaß-Meßmaschinen doch nur auf etwa  $1 \mu$  ansetzen können.

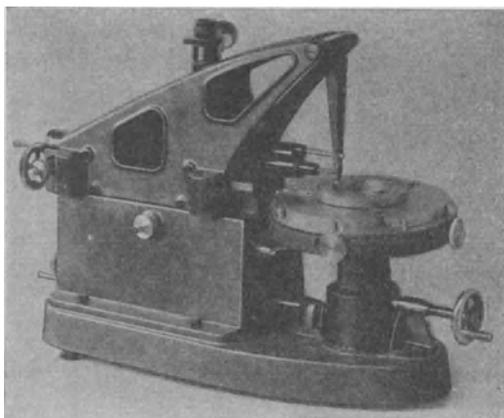


Abb. 445. Innenmeßmaschinen.

Eine besondere Erwähnung verdient die Innenmeßmaschine von Zeiss nach Abb. 445, da sie den Halbmesser von Ringen und ähnlichem (und nicht wie sonst den Durchmesser) zu ermitteln gestattet. Die Prüflinge werden auf einen, auch in der Höhe verstellbaren Tisch aufgenommen. Auf derselben Grundplatte ruht das Bett, auf dem ein Schlitten beweglich ist, dessen Verschiebung mittels Mikroskops an einem von unten beleuchteten Glasmaßstab abgelesen wird. Jener trägt einen Ausleger mit einem einarmigen Hebel, der durch eine Feder gegen die Innenwandung des Prüflings gezogen wird und durch einen Verbindungssteg auf den Spiegel eines Optimeters einwirkt, wobei die Ablesung durch ein gemeinsames Okular für dieses und für das Mikroskop erfolgt. Der Prüfling wird so justiert, daß sich der Ausschlag bei Drehung des Tisches nicht ändert. Wenn der Nullpunkt der Einstellung auf den Mittelpunkt entspricht, so gibt die Ablesung den Halbmesser des Prüflings.

<sup>1</sup> Diese Methode gibt aber nicht das Maß der Rachenlehre nach der in Deutschland geltenden Definition (siehe S. 293).

Die Strichmaß-Meßmaschinen erfordern bei Befolgung des Abbeschen Prinzips — Prüfling und Maßstab in derselben Achse hintereinander — ein Bett von mindestens der doppelten Maßstablänge, also bei Meßmaschinen für 6 m von mehr als 12 m Länge. Man kann diese wesentlich verkürzen, wenn

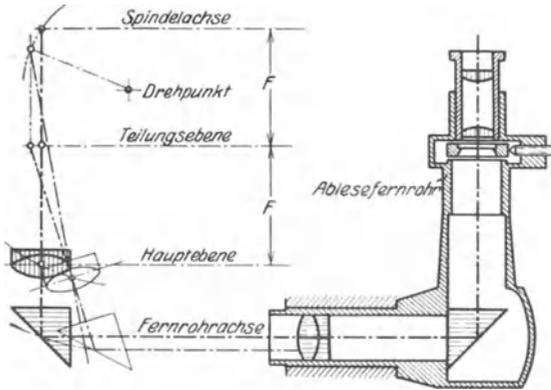


Abb. 446. Abbesches Prinzip bei nebeneinander liegendem Prüfling und Maßstab.

man mehrere um die jeweilige Maßstablänge gegeneinander versetzte Mikroskope anbringt (wie in Abb. 444). Bei einem Maßstab von 500 mm würde man für 6 m Meßlänge 13 Mikroskope brauchen, während die Bettlänge allerdings auf (etwas über) 6,5 m verringert würde. Durch Verschieben nur eines Mikroskopes gegen eine Reihe entsprechender Anschläge wird sich dagegen die nötige Genauigkeit kaum erreichen lassen. Daß

man den Meßbereich auch durch Zwischenlegen entsprechend abgestufter Endmaße erweitern kann, wurde bereits vorher erwähnt; doch ist hierbei das Prinzip der reinen Strichmaß-Meßmaschine verlassen.

Durch eine geeignete optische Anordnung kann man es aber auch bei nebeneinander liegendem Maßstab und Prüfling erzielen, daß die Kippungsfehler, wie

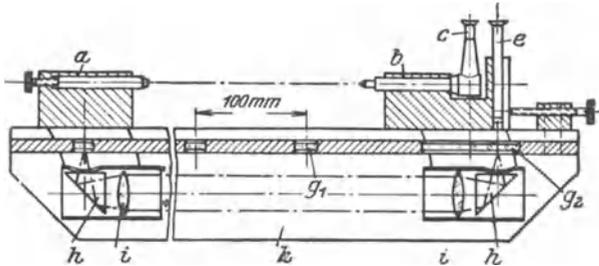


Abb. 447. Strichmaß-Meßmaschine.

bei Befolgung des Abbeschen Prinzips, nur von der zweiten Ordnung werden. Das Prinzip dieser von der Fa. Zeiss angegebenen Anordnung geht aus Abb. 446 hervor (8). Das Ablesemikroskop ist hier in 2 Teile, einem aus Objektiv und Ablenkprisma bestehenden Kollimator und ein (geknicktes) Ablesefernrohr zerlegt, was den Vorteil bietet, daß dieses parallel zu seiner Achse verschoben werden kann (da die vom Kollimator kommenden Strahlen parallel in sein Objektiv einfallen), an der Bewegung des Kollimators aber nicht teilzunehmen braucht. Die Achse des mit dem Amboßträger verschiebbaren Kollimators liegt in der durch die Meßachse und die Teilungsebene bestimmten Ebene; sein Objektiv ist ferner so konstruiert, daß sein vorderer Brennpunkt in die Teilungsebene, sein vorderer Knotenpunkt in die Meßachse fällt. Bei Drehung um eine durch den Knotenpunkt gehende und senkrecht zu jener Ebene stehende Achse bleibt nun die Richtung der austretenden Strahlen ungeändert (sie erleiden nur eine Parallelverschiebung), so daß derselbe Teilstrich in dem Fernrohr abgelesen wird. Die Drehung um irgend eine andere, senkrecht zu jener Ebene stehende Achse läßt sich nun in ihrer Wirkung ersetzen durch eine Drehung um eine durch den Knotenpunkt gehende, dazu parallele Achse und durch eine Schiebung in jener Ebene. Erstere ist, wie erwähnt, ohne Einfluß auf die Ablesung, die zweite bewirkt dagegen, daß man nicht die längs der Meßachse vorgenommene Verschiebung, sondern ihre Projektion auf die geneigte

Lage mißt, was nach den früheren Ausführungen (siehe S. 57) aber nur Fehler zweiter Ordnung bewirkt.

Die Anwendung dieses Prinzips auf die Strichmaß-Meßmaschine zeigt Abb. 447. Das Bett trägt einen in  $\frac{1}{10}$  mm geteilten, 100 mm langen Glasmaßstab  $g_2$  und ferner in je 100 mm Abstand einzelne Strichmarken  $g_1$ . Der Amboßträger  $a$  wird grob so eingestellt, daß der mit ihm fest verbundene Kollimator  $h$ ,  $i$  durch das Objektiv des Fernrohrs  $i$ ,  $h$  die dem betreffenden Meßbereich entsprechende Marke  $g_1$ , bei einem Prüfling von 450,2 mm also die Marke 4, auf den Maßstab  $g_2$  abbildet, der gewissermaßen die Strichplatte des Fernrohres ist. Dann wird der rechte Schlitten  $b$  und die mit ihm verbundene Optik  $i$ ,  $h$  so verschoben, daß der Doppelstrich der Marke  $g_1$  den Strich 50,2 mm des Maßstabes einschließt (Abb. 448a), was mit Hilfe des Ablesemikroskopes  $e$  beobachtet wird, das hier an Stelle des Okulars der Abb. 446 tritt. Der Schlitten  $b$  trägt noch ein Optimeter  $c$ , dessen Meßbolzen die zweite Meßfläche bildet.

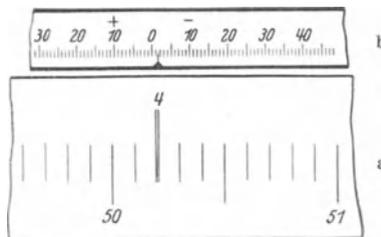


Abb. 448 a und b. Meßmaschine, Ablesung.

Bringt man nun den Prüfling zwischen die beiden Meßflächen von  $a$  und  $b$ , so gibt der Ausschlag des Optimeters, das zugleich den konstanten Meßdruck liefert, wieder die  $\frac{1}{100}$  und  $\frac{1}{1000}$  mm und durch Schätzung die  $\frac{1}{10}$   $\mu$ . So zeigt Abb. 448 b eine Abweichung von  $-1,5 \mu$  von

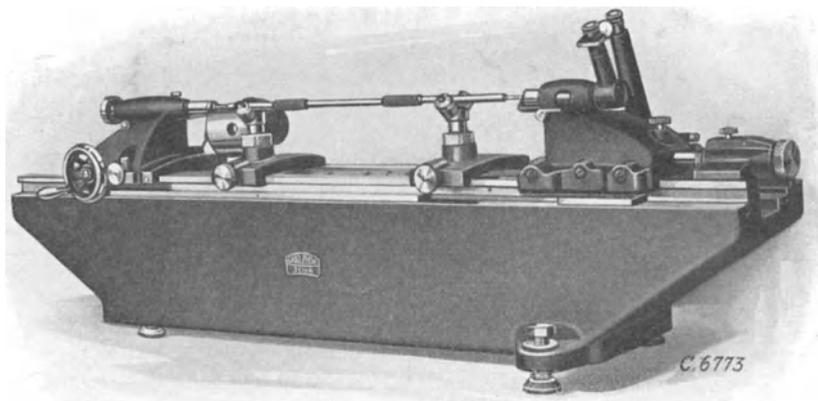


Abb. 449. Strichmaß-Meßmaschine.

dem eingestellten Maß von 450,2 mm an, so daß das wirkliche Maß des Prüflings 450,1985 mm ist.

Diese Meßmaschine, die bis zu Längen von 6 m gebaut wird, und die Abb. 449 in Ansicht wiedergibt, läßt sich in derselben Weise wie das Wagerecht-Optimeter durch Anbringung der dort angegebenen Bügel an Amboß und Optimeter auch für Innenmessungen verwenden (11a)<sup>1</sup>.

## 6. Auflageböcke.

Für die Messung müssen die Prüflinge genau senkrecht zur Achse stehen; Stücke mit ebenen Flächen werden dazu an die Meßflächen der Maschinen

<sup>1</sup> Für eine Meßmaschine von Zeiss, bei der die Ablesung des Maßstabes und der Optimeterskala durch ein gemeinsames Okular erfolgt, siehe (9, 10, 11).

angesprengt. Kleinere Prüflinge werden überhaupt durch den Meßdruck gehalten und richten sich dadurch aus. Schwerere legt man auf einen Kreuzschlitten mit Drehbewegung (am besten mit schwimmender Anordnung), der auch unter Umständen durch die in Abb. 450 wiedergegebene einfache Anordnung ersetzt werden kann, bei der der als Träger der Tischplatte verwendete dünne Stahldraht eine allseitige Beweglichkeit gibt. Man kann die Prüflinge auch nach allen Richtungen frei beweglich, eventuell in mit Kreuzführungen versehenen Supporten, kardanisch aufhängen. Zylindrische Stücke werden auch wohl zwischen Spitzen aufgenommen, deren Träger gleichfalls schwimmend angeordnet ist. Lange Stücke, namentlich zylindrische Endmaße, werden auf 2 Auflageböckchen so aufgelegt, daß sie in den günstigsten Punkten unterstützt sind. Eine einfache Ausführung dafür zeigt Abb. 451. Gut sind in der Höhe verstellbare Böcke, wie in Abb. 406, die durch Unterlegen von Endmaßen ausgerichtet werden. Eine andere sehr gute Anordnung dafür,

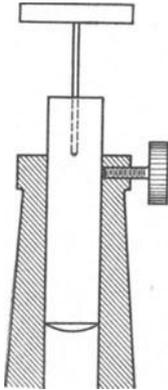


Abb. 450. Allseitig frei beweglicher Auflagetisch.

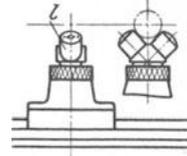


Abb. 451. Auflageböcke für zylindrische Endmaße.

die zwecks zwangfreier Auflagerung mit Rollen-V-Lagern ausgerüstet ist, gibt Abb. 452 wieder (2), bei der die eigentlichen Träger gleichfalls durch Einfügen von Endmaßen zwischen ihre kugelförmigen Enden und die Anschläge so verstellt werden, daß die Prüflings- und die Meßachse stets zusammenfallen.

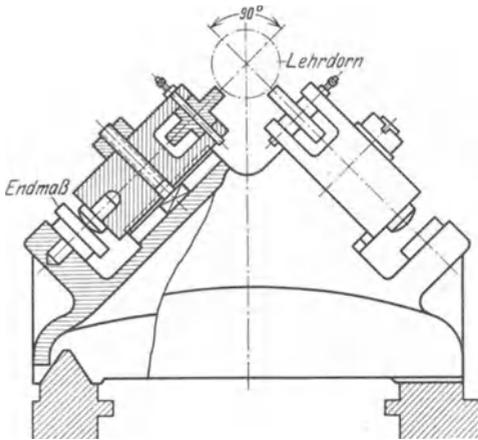


Abb. 452. Auflagebock mit verstellbaren Rollen-V-Lagern.

Sehr schwere Stücke kommen am besten auf besondere neben dem Bett stehende Träger, um unzulässige Durchbiegungen zu vermeiden (1).

Zweckmäßig bewegt man die Prüflinge vor der endgültigen Messung etwas drehend senkrecht zur Meßachse hin und her, um ein etwa noch zwischen ihnen und den Meßflächen befindliches Luftpolster fortzuschaffen.

## 7. Schraubenmeßmaschinen.

Statt durch Vergleich mit Endmaßen oder mit einem Strichmaßstab kann

man die Messung auch durch Vergleich mit einer genügend langen Meßschraube vornehmen. Da bei den dazu benötigten größeren Längen die fortschreitenden Fehler von überwiegendem Einfluß sind, ist hier die Anbringung eines Gleitlineals zu ihrem Ausgleich auf jeden Fall erwünscht. Sie lassen sich dann bei 500 mm Länge unter  $2,5 \mu$  halten, während die inneren und periodischen Fehler bei guter Ausführung unter  $0,8 \mu$  bleiben (9).

Man könnte derartige Schraubenmeßmaschinen nach Art der Schraublehren ausbilden, bei denen sich also die eine Meßfläche an der Spindel bzw. an dem von ihr verschobenen Meßbolzen, die andere an dem auf einen Druckanzeiger einwirkenden Amboß befindet, wobei auch das Abbesche Prinzip gewahrt wäre, und sie so zur Messung von Werkstücken verwenden. Praktisch würde man aber doch immer, um auch die übrigen Schraubenfehler auszuschalten, einen Vergleich gegen Endmaße vornehmen müssen, so daß die lange Spindel nur als

Transport-, aber nicht als Meßschraube diene. Damit käme man aber im Grunde auf das Prinzip der üblichen Endmaß-Meßmaschinen.

Eine andere Möglichkeit zur Messung von Werkstücken ist in Abb. 453 wiedergegeben. Diese Schraubenmeßmaschine ist noch mit einem in eine Kugel endenden Libellenfühlheber ausgerüstet, der sich um eine wagerechte, parallel zur Meßrichtung liegende Achse herauskippen läßt und durch Anlage an einen sauber gearbeiteten Anschlag die genaue Rückkehr in seine Meßstellung gewährleistet. Der Prüfling wird mit dem Schlitten so verschoben, daß der Fühlheber sich nacheinander an seine beiden Enden anlegt und dabei einspielt. Man ermittelt so seine Länge + dem Durchmesser der Kugel am Meßbolzen des Fühlhebels. Bei Innenmessungen (bei denen der Kugeldurchmesser zu dem

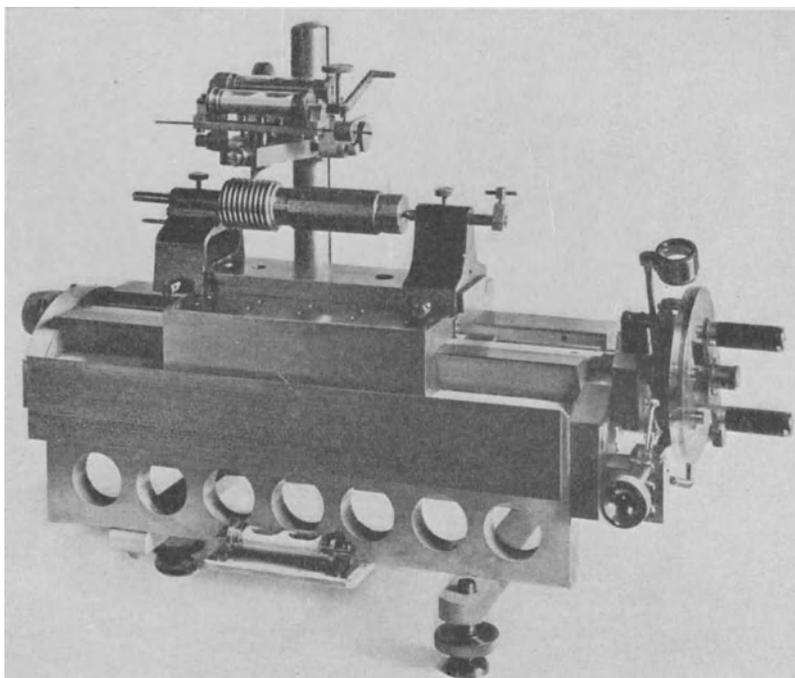


Abb. 453. Schraubenmeßmaschine mit Libellenfühlheber.

Meßergebnis hinzuzurechnen ist) ist ein Herausklappen des Fühlhebels nicht nötig (in der Abbildung ist die Bestimmung einer Gewindesteigung dargestellt).

Aus den vorher angegebenen Gründen wird die Schraubenmeßmaschine im wesentlichen nur zur Bestimmung der Entfernung von Marken, also z. B. zum Ausmessen von Photogrammen<sup>1</sup> und ähnlichem verwendet, wobei die Einstellung unter Benutzung eines Mikroskops erfolgt. Sie stellen damit einen Longitudinalkomparator dar, bei dem der Normalmaßstab durch eine Meßschraube ersetzt ist. Um sie nicht zu lang werden zu lassen, ist bei ihnen in der Regel das Abbesche Prinzip nicht befolgt, vielmehr die Schraube, wie in Abb. 453 und 454, unterhalb des Schlittens angebracht, auf den der Prüfling aufgelegt wird. Durch

<sup>1</sup> Erfahrungsgemäß verziehen sich photographische Schichten auf Platten durch Entwickeln, Fixieren, Wässern und Trocknen um 1 : 40000, also um etwa  $2,5 \mu/100$  mm Länge, während die Schrumpfung guter Filme zu 0,4 bis 0,8% angegeben wird; dieser Fehler ist noch durch die bei der Aufnahme verwendete Vergrößerung zu dividieren.

Führung des möglichst langen Schlittens in 3 Punkten auf genau bearbeiteten Führungsbahnen lassen sich indessen die Verkippungsfehler (1. Ordnung) auf einen nicht mehr störenden Betrag herunterbringen (siehe S. 61). Die Spindel

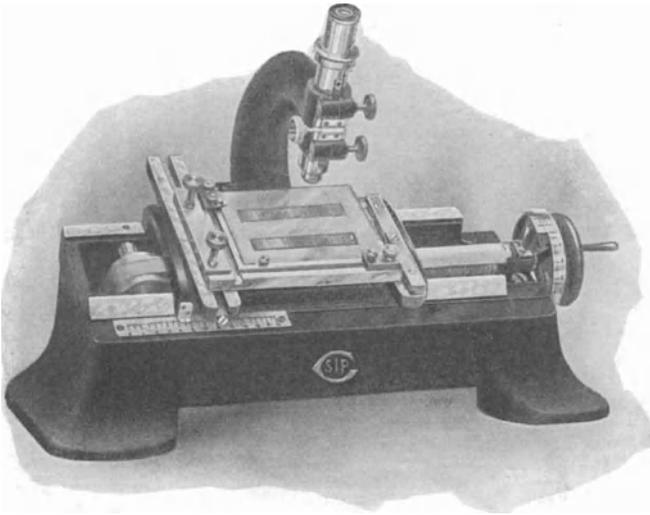


Abb. 454. Schraubenmeßmaschine.

wird dabei unverrückbar, auf der einen Seite etwa in einem Kugeltrag- und -stützlager, auf der anderen in einen federnden Spitzkörper gelagert, um die Ausdehnung von Bett und Spindel ausgleichen zu können. Gegen Beschädigung wird sie durch ein in

Abb. 454 sichtbares Stahlband geschützt. Die Kupplung zwischen Spindel und Schlitten erfolgt dabei mög-

lichst zwangfrei durch eine Phosphorbronze-Mutter, die in der Achsenrichtung zerlegt ist und deren beide gelenkig miteinander verbundene Teile durch ein-

stellbare Federn zusammengehalten und gegen die Spindel gezogen werden. Der losen Kupplung wegen ist hier besonders auf Vermeidung des toten Ganges zu achten<sup>1</sup>.

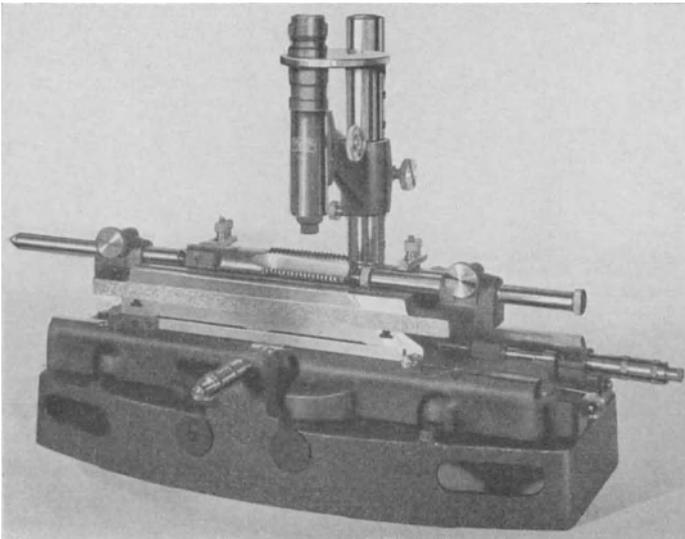


Abb. 455. Meßmikroskop.

Die Ablesung der  $\frac{1}{1}$  mm erfolgt an einer parallel zum Schlitten am Bett befestigten Skala, die der  $\frac{1}{10}$ ,  $\frac{1}{100}$  und  $\frac{1}{1000}$  mm mittels Nonius an der (bei 1 mm Spindelsteigung) in 100 Intervalle geteilten Trom-

mel. Für größere Meßreihen ist auch eine automatische Druckvorrichtung der Ablesung empfehlenswert (5), um nicht fortwährend das Auge zwischen Mikroskop und Teiltrommel bewegen und entsprechend akkomodieren zu müssen.

<sup>1</sup> Beschreibung einer sehr gut durchkonstruierten Schraubenmeßmaschine bei (2a u. 12).

Zum Messen von Koordinaten läßt sich bei dem Werkstatt-Meßmikroskop (Abb. 455) der Tisch durch 2 Spindeln in zwei zueinander senkrechten Richtungen verschieben; zur Messung können statt dessen Endmaße verwendet werden. Mittels seines drehbaren Okulars können auch Winkel gemessen werden. [Für die Messung von Polarkoordinaten wird der Tisch drehbar gehalten und mit einer Gradeinteilung versehen (11)]<sup>1</sup>.

Bei den einfachen Meßmaschinen zur Ermittlung nur einer Ordinate wird häufig statt des Schlittens das Mikroskop durch eine Meßschraube verschoben (wobei aber die Kippung einen Fehler 1. Ordnung verursacht: siehe S. 57). Diese Ausführung findet sich in der Regel bei dem Meßmikroskop zur Bestimmung des Durchmessers der Kugeleindrücke bei der Brinellhärteprobe (Abb. 456). Gelegentlich versieht man es auch wohl noch mit einem Drehtisch (8).

Meist werden die Schraubenmeßmaschinen als Teilmaschinen zur Herstellung beliebiger Längenteilungen verwendet. Dazu ist nur nötig, an dem Bett ein Reißerwerk *R* (Abb. 457) zu befestigen, das gestattet, einen geeigneten Stichel zu heben und zu senken, sowie senkrecht zur Tischverschiebung zu bewegen. Zur bequemeren Handhabung empfiehlt es sich übrigens, den Kopf der Spindel auf der rechten Seite anzuordnen (9, 10). Meist ist er noch so ausgebildet, daß er eine halbautomatische Herstellung der Teilung gestattet. Je nach dem

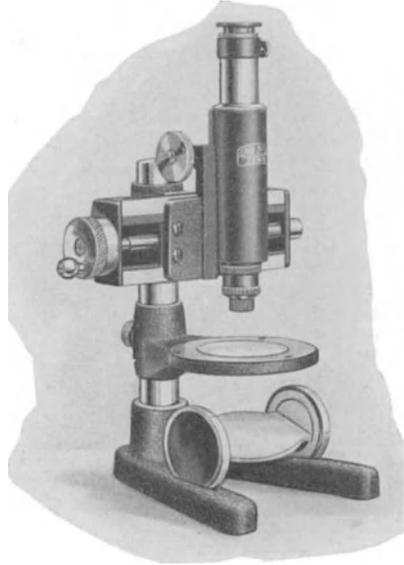


Abb. 456. Brinell-Mikroskop.

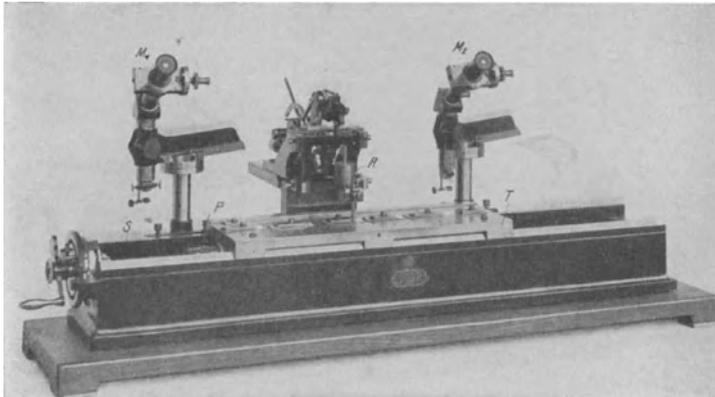


Abb. 457. Teilmaschine.

gewünschten Zweck, Teilung von Maßstäben, Strichplatten o. ä., werden die Teilmaschinen in verschiedenster Weise ausgebildet<sup>2</sup>.

Für sehr genaue Teilungen verläßt man sich nicht auf die Genauigkeit der Spindel, sondern stellt sie durch Kopieren eines genauen Strichmaßstabes her, den man auf dem Bett, am besten in Verlängerung der Achse des zu teilenden Stabes, anbringt. Man benutzt dann die Spindel auch nur als Transportschraube, um den Normalmaßstab unter dem

<sup>1</sup> Beschreibung einer Koordinaten-Meßmaschine s. (13).

<sup>2</sup> Beschreibung einer sehr genauen automatischen Teilmaschine von 2 m Länge s. (14).

Mikroskop  $M_2$  (unter Beachtung seiner Korrekturen) einzustellen. Dieses Mikroskop ist auch nötig, wenn man über den Bereich der Schraube hinausgehende Maßstäbe zu teilen hat, um sie entsprechend verschieben zu können. Das zweite Mikroskop  $M_1$  ist vorgesehen, um die Teilmaschine als Longitudinalkomparator benutzen zu können (Abb. 457). Die genauesten Teilungen werden durch interferometrische Beobachtung der Verschiebung des zu teilenden Stücks hergestellt. Eine Grenze ist hier nur durch die Genauigkeit gesetzt, mit der die Einstellung durch den Stichel übertragen wird.

Bei der in Abb. 458 dargestellten Teilmaschine läßt man das zu teilende Stück feststehen und verschiebt Reißerwerk und Mikroskop, wobei ihr Schlitten auf einem sorgfältig

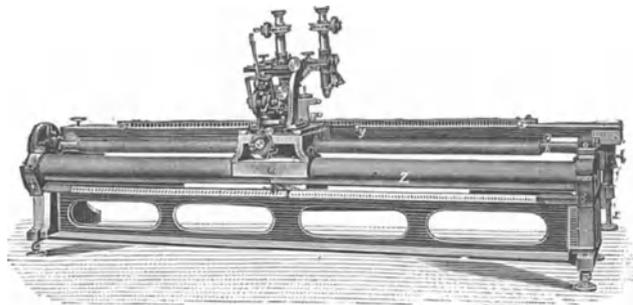


Abb. 458. Teilmaschine.

geschliffenen Zylinder und sein Stützpunkt mittels einer Rolle auf einer Schiene gleitet. Dabei ist der Zylinder, um Verspannungen zu vermeiden, nur einseitig festgeklemmt (7).

Die genaueste Teilmaschine ist wohl von Rowland hergestellt worden (2, 4). Sie gestattet, bis zu 1700 Striche auf 1 mm bei 60 mm Teillänge und bis auf  $0,025 \mu$  genau gleichen Abstand zu

ziehen. Dies geschieht vollkommen automatisch, da selbst die geringste Temperaturänderung durch die Körperstrahlung des Beobachters unzulässige Fehler verursachen würde. Aus dem von Rowland angegebenen Verfahren (6) zur Herstellung der dazu benötigten Schraube kann auch die Technik manche Anregungen schöpfen.

Das Gewinde wird auf eine Spindel aus ausgeglühtem Werkzeugstahl gleichzeitig mit 2 um  $180^\circ$  versetzten Stählen geschnitten, um die periodischen und die infolge von Durchbiegung möglichen Fehler weitestgehend zu verringern. Selbstverständlich nimmt man nur sehr feine Späne und arbeitet mit geringer Schnittgeschwindigkeit. Zum Ausgleich der Fehler der Leitspindel wechselt man den Eingriff der Supporte in diese von Zeit zu Zeit und dreht am Ende des Schneidens die Spindel um. Sie wird dann zunächst mit gewöhnlichem, später mit allerfeinstem Schlemmschmirgel mittels einer Mutter aus Rotguß geschliffen, die axial aufgeschnitten und aus welcher der größte Teil des Gewindes herausgedreht ist, so daß nur kleine rippenförmige Gewindestücke von je 12 mm Abstand stehen bleiben; sie ist durch ein Gegengewicht ausbalanciert. Indem man die beiden Hälften der Mutter von Zeit zu Zeit umdreht, werden die Fehler der Spindel und der Mutter durch das Schleifen zugleich verringert. Der Prozeß wird dann mit einer mit Weißmetall ausgegossenen Mutter unter Benutzung von Schlemmschmirgel und Öl wiederholt und schließlich mit Rötöl poliert. Während das Schneiden der Spindel eine Woche dauerte, mußten auf das Schleifen und Polieren  $9\frac{1}{2}$  Wochen verwendet werden. Dadurch waren dann die Schraubenfehler in weitgehendem Maße fortgeschafft, dagegen trat fast stets eine Abweichung zwischen Spindel- und Lagerachse auf. Deshalb wurde das Lager genau touchiert und in das eine ein Rubin- zylinder mit ebener und zur Achse senkrechter Fläche eingesetzt (Stahl eignet sich dafür nicht, da sich etwaige weiche Stellen heraus schleifen). Die Gebrauchsmutter besteht aus einem zweiteiligen Metallzylinder, der durch Ringe und Justierschrauben zusammengehalten wird, und in dem zahlreiche Pflöcke aus Pockholz befestigt sind, die nach innen etwas vorstehen (3). Durch allmähliches Zusammenspannen der beiden Hälften wird das Gewinde der Spindel in die Mutter kopiert. Durch diese Anordnung ist ein guter Sitz von Bolzen und Mutter, sowie eine geringe Abnutzung der Spindel gewährleistet. Die trotzdem noch übrig gebliebenen Schraubenfehler werden in der früher beschriebenen Weise ausgeglichen<sup>1</sup>.

Durch weitere Vervollkommnung der Herstellungsmethoden ist es Anderson gelungen (1), die Fehler noch weiter herabzusetzen. So beträgt der größte Steigungsfehler (anscheinend je Gang) weniger als  $10^{-7}$  Zoll ( $2,5 \mu$ ). Der Krümmungshalbmesser der Achse übersteigt 250 englische Meilen (etwa 400 km); die Lagerachse koinzidiert mit der Spindelachse bis auf  $5 \cdot 10^{-5}$  Zoll ( $0,125 \mu$ ); der axiale Schub ist geringer als  $10^{-6}$  Zoll ( $25 \mu$ ), wie interferometrisch festgestellt wurde.

<sup>1</sup> An der angegebenen Stelle findet man auch Ausführungen über die Herstellung sehr guter Führungen, was durch Schleifen mittels genau auf das Bett aufgepaßter Gußeisenbacken erfolgt, die alle halbe Stunden umgedreht werden; um nicht eine Kurve zu erhalten, muß man mit denselben Backen 2 Paar Schienen abwechselnd schleifen.

## V. Feste Lehren (Meßgeräte ohne Maßanzeige).

### A. Normallehren.

#### 1. Blech- und Drahtlehren.

Im Laufe des 19. Jahrhunderts hatte sich der Austauschbau, von den amerikanischen Waffenfabriken ausgehend, fast auf alle Industriezweige ausgedehnt. Seiner Durchführung standen aber selbst um 1870 noch ziemlich meßtechnische Schwierigkeiten entgegen, denn außer dem einfachen Strichmaßstab, sowie Taster und Zirkel war höchstens noch die Schieblehre greifbar. Brauchbare Schraublehren kamen in den 70er Jahren auf den Markt und hatten anfangs nur eine Genauigkeit von einigen  $\frac{1}{100}$  mm, während die genauen Fühlhebel hoher Übersetzung erst aus den letzten 20 bis 25 Jahren stammen.

So blieb nichts anderes übrig, als sich Normalstücke zu verschaffen, mit denen die einzelnen Werkstücke verglichen wurden. Hierzu standen 2 Wege offen: der nächstliegende war, das Werkstück mittels Taster und Zirkel mit einem Normal derselben Art zu vergleichen; dabei ist man aber sehr stark von der Aufmerksamkeit und dem Feingefühl des Arbeiters abhängig, die man nur bei besonders geschickten und mit feineren Arbeiten vertrauten voraussetzen und verlangen kann. Unabhängig hiervon wird man, wenn man das Werkstück mit einem Gegenstück, also etwa eine Welle mit einem (ihrem späteren Lager entsprechenden) Ring und eine Bohrung mit einem Dorn prüft. Derartige Geräte bezeichnet man als Normallehren, wie sie seit 1840 vereinzelt, seit Mitte der 80er Jahre im allgemeinen

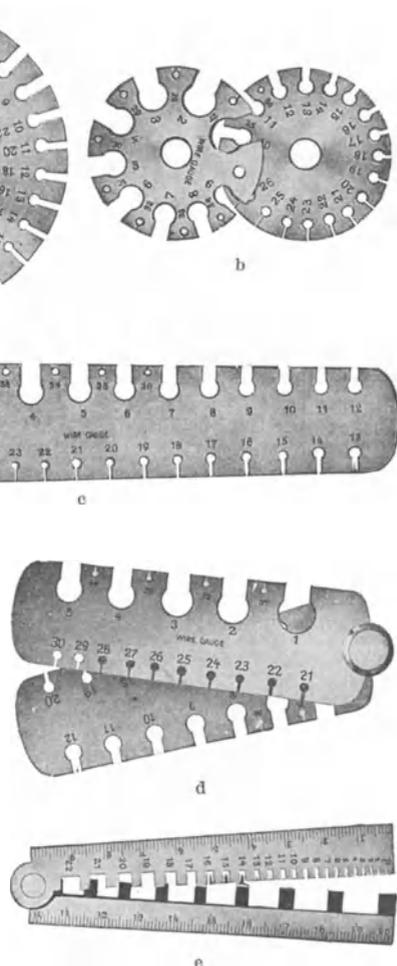


Abb. 459. Blech- und Drahtlehren.

Gebrauch waren (siehe S. 35). Ihre Vorgänger hatten sie in den Draht- und Blechlehren (Abb. 459 und 460), kreisförmigen oder rechteckigen Blechen, die mit einer Reihe entsprechend abgestufter Löcher oder Einschnitte versehen waren und im wesentlichen zum Sortieren von Drähten und Blechen dienten, sowie in den Dickenlehren, die aus einem Satz von in der Regel um  $\frac{1}{10}$  mm in der Dicke abgestuften Blechen bestehen (Abb. 461), und die zum Messen von Zwischenräumen, z. B. der Breite

von Rissen in Kesselblechen, gebraucht werden. Derartige Lehren sind bereits aus dem 16. und 17. Jahrhundert bekannt<sup>1</sup> und sind auch heute noch vielfach in Gebrauch. Sie werden zum Teil nach Buchstaben, meist jedoch nach Nummern bezeichnet. Die wichtigsten europäischen und amerikanischen Lehren sind nachstehend [nach (2)] in mm-Maß angegeben (die amerikanischen Blechlehren entsprechen den gleichnamigen Drahtlehren).

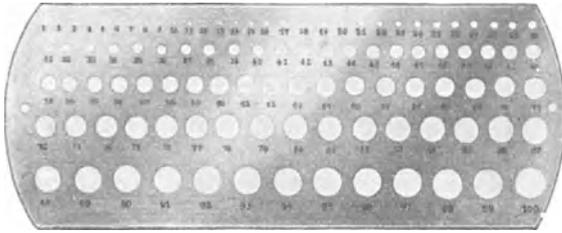


Abb. 460. Drahtlehre.

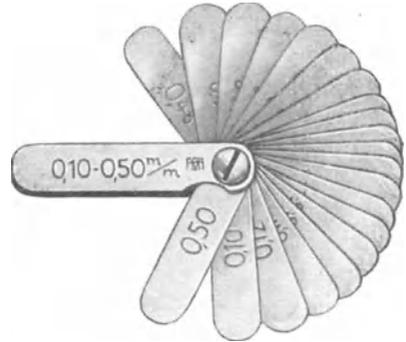


Abb. 461. Dickenlehre.

Wie man daraus ersieht, entbehren die Nummerbezeichnungen, mit Ausnahme der deutschen mm-Drahtlehre, der sinnfälligen Bedeutung und laufen in bezug auf das Maß zum Teil auch entgegengesetzt. Ferner werden gelegentlich auch dieselben Stärken in den einzelnen Systemen mit verschiedenen Nummern bezeichnet. Es wäre deshalb zu wünschen, daß hier zum mindesten eine Vereinheitlichung einträte, wofür in Amerika Bestrebungen im Gange sind, oder noch besser, daß die Bezeichnungen nach derartigen Lehren überhaupt verschwänden und durch Maßangaben ersetzt würden.

## Europäische Blech- und Drahtlehren.

Nr. der Lehre	Deutsche mm-Drahtlehre	Deutsche Feinblechlehre	Dillinger Feinblechlehre <sup>2</sup>	Westfälische Stiftdrahtlehre	Englische Feinblech- u. Drahtlehre <sup>3</sup>	Französische Feinblech- u. Drahtlehre <sup>4</sup>	Nr. der Lehre	Deutsche mm-Drahtlehre
	mm	mm	mm	mm	mm	mm		mm
0000					11,531	s. Forts.	37	3,7
000					10,795		38	3,8
00					9,652		39	3,9
0					8,636		40	4,0
1		5,50	5,50	0,60	7,620	0,6	42	4,2
2	0,2	5,00	5,00	0,68	7,213	0,7	44	4,4
2/2	0,22						46	4,6
2/4	0,24						48	4,8
2/6	0,26						50	5,0
2/8	0,28						55	5,5
3		4,50	4,50	0,76	6,579	0,8	60	6,0
3/1	0,31						65	6,5
3/4	0,34						70	7,0
3/7	0,37						75	7,5
4	0,40	4,25	4,25	0,80	6,045	0,9	80	8,0

<sup>1</sup> Die älteste Lehre von 1570 befindet sich im Historischen Museum zu Dresden unter den Werkzeugen des Kurfürsten August, eine Blech- und Drahtlehre von Christian Cichorius aus dem Jahre 1695 im Museum zu Guben; eine ähnliche Lehre ist abgebildet von Ch. Weigel: „Hauptstände“, 1798 (1).

<sup>2</sup> Benutzt von den Werken von Dillingen und Hayange.

<sup>3</sup> Englische Lehre BWG (Birmingham Wire Gauge), meist auch in Norddeutschland für Blech, Draht und Bandisen, in Süddeutschland für Bandisen benutzt.

<sup>4</sup> Jauge de Paris, 1857; in Frankreich allgemein für Draht und Drahtstifte, in Deutschland für Drahtstifte, in Süddeutschland meist auch für Draht benutzt.

Europäische Blech- und Drahtlehren (Fortsetzung).

Nr. der Lehre	Deutsche mm-Drahtlehre	Deutsche Feinblech-lehre	Dillinger Feinblech-lehre <sup>1</sup>	Westfälische Stiftdraht-lehre	Englische Feinblech- u. Drahtlehre <sup>2</sup>	Französische Feinblech- u. Drahtlehre <sup>3</sup>	Nr. der Lehre	Deutsche mm-Drahtlehre
	mm	mm	mm	mm	mm	mm		mm
4/5	0,45						85	8,5
5	0,50	4,00	4,00	0,88	5,588	1,0	90	9,0
5/5	0,55						95	9,5
6	0,60	3,75	3,50	1,00	5,154	1,1	100	10,0
7	0,70	3,50	3,25	1,12	4,572	1,2		
8	0,80	3,25	3,00	1,20	4,191	1,3		
9	0,90	3,00	2,75	1,30	3,759	1,4		
10	1,0	2,75	2,50	1,40	3,404	1,5		
11	1,1	2,50	2,25	1,56	3,048	1,6		
12	1,2	2,25	2,00	1,66	2,769	1,8		
13	1,3	2,00	1,85	1,84	2,413	2,0		
14	1,4	1,75	1,70	2,04	2,108	2,2		
15		1,50	1,55	2,20	1,829	2,4		
16	1,6	1,375	1,40	2,40	1,651	2,7	P 0	0,50
17		1,250	1,25	2,60	1,473	3,0	P 1	0,46
18	1,8	1,125	1,10	2,92	1,245	3,4	P 2	0,42
19		1,000	1,00	3,40	1,067	3,9	P 3	0,37
20	2,0	0,875	0,90	3,84	0,889	4,4	P 4	0,34
21		0,750	0,80	4,20	0,813	4,9	P 5	0,30
21 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>		0,680	0,70				P 6	0,28
22	2,2	0,625	0,60	4,65	0,711	5,4	P 7	0,27
22 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>			0,50				P 8	0,25
23		0,562	0,40	5,45	0,635	5,9	P 9	0,23
24		0,500	0,30		0,559	6,4	P10	0,22
25	2,5	0,438		7,0	0,508	7,0	P11	0,20
26		0,375		7,6	0,475	7,6	P12	0,18
27		0,300		8,8	0,406	8,2	P13	0,17
28	2,8			9,4	0,356	8,8	P14	0,16
29				10,0	0,330	9,4	P15	0,15
30					0,310	10,0		
31	3,1				0,280			
32					0,249			
33					0,221			
34	3,4				0,196			
35					0,175			
36	s. Forts.				0,155			

<sup>1 2 3</sup> s. Anmerkungen <sup>2 3 4</sup> auf S. 284.

Westfälische Drahtlehre<sup>1</sup>.

Bezeichnung	Dicke mm	Bezeichnung	Dicke mm
Ketten . . . . .	7,80	Grobmemel . . . . .	4,12
Schleppen . . . . .	6,83	Mittlmemel . . . . .	3,82
Grobriinken . . . . .	6,00	Feinmemel . . . . .	3,40
Feinriinken . . . . .	5,55	Klinkmemel . . . . .	2,96
Malgen . . . . .	4,70	Natel . . . . .	2,60

<sup>1</sup> Diese älteste Lehre nur noch in der Gegend von Altena und Iserlohn üblich.

Westfälische Drahtlehre<sup>1</sup> (Fortsetzung).

Bezeichnung	Dicke mm	Bezeichnung	Dicke mm
Mittel . . . . .	2,36	Gattung oder 3 Blei . . . . .	0,60
Dünnmittel . . . . .	2,15	Feine Gattung . . . . .	0,55
3 Schillings . . . . .	1,96	1 Holl. oder 4 Blei . . . . .	0,50
4 „ . . . . .	1,74	2 Holl. oder 5 Blei . . . . .	0,46
2 Band <sup>2</sup> . . . . .	1,55	3 „ „ 6 „ . . . . .	0,42
1 „ . . . . .	1,40	4 „ „ 7 „ . . . . .	0,39
3 „ . . . . .	1,25	5 „ „ 8 „ . . . . .	0,36
4 „ . . . . .	1,12	6 „ „ 10 „ . . . . .	0,31
5 „ . . . . .	1,03	7 Holl. oder 12 Blei . . . . .	0,28
6 „ . . . . .	0,88	8 „ „ 14 „ . . . . .	0,26
7 „ . . . . .	0,83	9 „ „ 15 „ . . . . .	0,24
Ord. Münster oder 1 Blei . . . . .	0,71	10 „ „ 16 „ . . . . .	0,22
Fein „ „ 2 „ . . . . .	0,65	11 „ „ 17 „ . . . . .	0,20

<sup>1</sup> Diese älteste Lehre nur noch in der Gegend von Altena und Iserlohn üblich.

<sup>2</sup> Band 2 und Band 1 werden in anderen Tabellen vielfach irrig in umgekehrter Reihenfolge mit verwechselten Dicken angeführt.

## Amerikanische Blech- und Drahtlehren.

Nr. der Lehre	Twist Drill and Steel Wire Gauge <sup>1</sup> mm	Amer. oder Brown and Sharpe Gauge mm	Stubs Iron Wire Gauge <sup>2</sup> mm	Washburn and Moen Mfg. Co. Gauge mm	Trenton Iron Co. Wire Gauge mm	Stubs Steel Wire Gauge <sup>3</sup> mm	Imperial Wire Gauge mm	USSt- Standard Gauge mm	Washburn and Moen Mfg. Co. Gauge <sup>4</sup> mm	Webster and Horsefold Gauge <sup>4</sup> mm
8-0									0,210	
7-0									0,220	
6-0							12,699	12,699	0,241	
5-0					11,430		11,785	11,905	0,253	
4-0		11,683		10,002	10,159		10,159	10,317	0,269	0,152
3-0		10,388		9,207	9,143		9,448	9,524	0,304	0,177
2-0		9,245		8,406	8,381		8,838	8,729	0,337	0,203
1-0		8,249		7,784	7,746		8,228	7,937	0,365	0,228
1	5,791	7,347		7,187	7,238	5,776	7,619	7,142	0,396	0,253
2	5,613	6,542		6,665	6,730	5,563	7,010	6,745	0,421	0,279
3	5,410	5,826		6,189	6,222	5,385	6,400	6,349	0,452	0,304
4	5,309	5,189		5,722	5,714	5,258	5,892	5,950	0,477	0,330
5	5,220	4,520		5,257	5,206	5,182	5,384	5,554	0,513	0,355
6	5,182	4,114		4,876	4,825	5,105	4,876	5,158	0,546	0,406
7	5,105	3,662		4,518	4,444	5,055	4,470	4,762	0,584	0,457
8	5,055	3,261		4,114	4,063	5,004	4,063	4,363	0,617	0,507
9	4,978	2,805		3,766	3,682	4,928	3,657	3,967	0,650	0,558
10	4,915	2,585		3,428	3,301	4,851	3,250	3,571	0,685	0,600
11	4,851	2,203		3,060	2,984	4,775	2,946	3,174	0,721	0,660
12	4,801	2,054		2,079	2,666	4,699	2,641	2,776	0,751	0,736
13	4,699	1,828		2,324	2,349	4,623	2,336	2,506	0,797	0,787
14	4,623	1,627		2,031	2,031	4,572	2,031	1,984	0,828	0,838
15	4,552	1,449		1,829	1,777	4,521	1,828	1,785	0,876	0,888
16	4,496	1,290		1,587	1,549	4,445	1,625	1,587	0,914	0,939
17	4,394	1,149		1,371	1,333	4,369	1,422	1,428	0,957	0,909
18	4,305	1,023		1,206	1,142	4,267	1,219	1,269	1,003	1,041
19	4,216	0,911		1,141	1,015	4,166	1,015	1,111	1,051	1,092
20	4,089	0,811		0,883	0,888	4,089	0,914	0,952	1,102	1,142

<sup>1</sup> <sup>2</sup> <sup>3</sup> <sup>4</sup> s. Anmerkungen S. 287.

Amerikanische Blech- und Drahtlehren (Fortsetzung).

Nr. der Lehre	Twist Drill and Steel Wire Gauge <sup>1</sup>	Amer. oder Brown and Sharpe Gauge	Stubs Iron Wire Gauge <sup>2</sup>	Washburn and Moen Mfg. Co. Gauge	Trenton Iron Co. Wire Gauge	Stubs Steel Wire Gauge <sup>3</sup>	Imperial Wire Gauge	USSt-Standard Gauge	Washburn and Moen Mfg. Co. Gauge <sup>4</sup>	Webster and Horsfold Gauge <sup>4</sup>	
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	
21	4,039	0,722	Wie Birmingham Wire Gauge (siehe vorstehende Tabelle)	0,806	0,787	3,988	0,812	0,872	1,168	1,193	
22	3,988	0,642		0,726	0,711	3,937	0,711	0,793	1,226	1,320	
23	3,912	0,573		0,655	0,634	3,886	0,609	0,714	1,295	1,396	
24	3,861	0,510		0,584	0,571	3,835	0,558	0,634	1,396	1,498	
25	3,797	0,454		0,518	0,507	3,759	0,507	0,555	1,488	1,549	
26	3,734	0,404		0,459	0,457	3,708	0,457	0,476	1,589	1,650	
27	3,658	0,360		0,439	0,431	3,632	0,416	0,436	1,671	1,777	
28	3,569	0,321		0,411	0,406	3,531	0,378	0,396	1,828	1,828	
29	3,454	0,285		0,380	0,380	3,404	0,345	0,356	1,930	1,955	
30	3,264	0,254		0,305	0,355	0,355	3,226	0,324	0,317	2,03	2,108
31	3,048	0,226		0,254	0,335	0,330	3,048	0,294	0,277		
32	2,946	0,201		0,229	0,325	0,304	2,921	0,274	0,257		
33	2,870	0,179		0,203	0,299	0,279	2,845	0,253	0,238		
34	2,819	0,160		0,178	0,264	0,253	2,794	0,243	0,218		
35	2,794	0,142		0,127	0,241	0,241	2,743	0,213	0,198		
36	2,705	0,136		0,102	0,228	0,228	2,692	0,193	0,178		
37	2,641	0,113				0,215	2,616	0,172	0,168		
38	2,578	0,100			0,203	2,565	0,152	0,151			
39	2,526	0,089			0,190	2,515	0,132				
40	2,488	0,0798			0,177	2,464	0,121				
	Fort.					Fort.	Fort.				

Nr. der Lehre	Twist Drill and Steel Wire Gauge <sup>1</sup>	Stubs Steel Wire Gauge <sup>3</sup>	Imperial Wire Gauge	Nr. der Lehre	Twist Drill and Steel Wire Gauge <sup>1</sup>	Stubs Steel Wire Gauge <sup>3</sup>
	mm	mm	mm		mm	mm
41	2,437	2,413	0,111	61	0,990	0,965
42	2,374	2,337	0,101	62	0,965	0,940
43	2,260	2,235	0,091	63	0,939	0,914
44	2,183	2,159	0,081	64	0,914	0,889
45	2,081	2,057	0,071	65	0,889	0,838
46	2,057	2,007	0,060	66	0,838	0,813
47	1,993	1,956	0,050	67	0,812	0,787
48	1,930	1,905	0,040	68	0,787	0,762
49	1,853	1,829	0,030	69	0,745	0,737
50	1,770	1,753	0,025	70	0,711	0,686
51	1,701	1,676		71	0,660	0,660
52	1,612	1,600		72	0,635	0,610
53	1,511	1,473		73	0,609	0,584
54	1,396	1,397		74	0,571	0,559
55	1,320	1,270		75	0,533	0,508
56	1,181	1,143		76	0,508	0,457
57	1,092	1,067		77	0,457	0,406
58	1,066	1,041		78	0,400	0,381
59	1,041	1,016		79	0,368	0,381
60	1,016	0,991		80	0,343	0,330

<sup>1</sup> Verwendet für Spiralbohrer und den hierzu benutzten Stahldraht.

<sup>2</sup> Dient zum Messen der Stubsschen Eisendrächte.

<sup>3</sup> Zum Messen von gezogenem Stahldraht und Bohrerdraht; ist bei den meisten amerikanischen Werken, die Spiralbohrerdraht herstellen, im Gebrauch.

<sup>4</sup> Für Klaviersaitendraht.

Stubs' Stahldraht-Buchstabenlehre.

Bez.	mm								
A	5,994	F	6,528	K	7,137	P	8,204	U	9,347
B	6,045	G	6,629	L	7,366	Q	8,433	V	9,576
C	6,147	H	6,756	M	7,493	R	8,611	W	9,804
D	6,248	I	6,909	N	7,671	S	8,839	X	10,084
E	6,350	J	7,036	O	8,026	T	9,093	Y	10,262
								Z	10,490

Die Draht- und Blechlehren zeigen deutlich, daß es bei der Verarbeitung gar nicht auf die Kenntnis des Maßes ankommt, sondern daß dieses ebenso gut durch irgend eine Nummer oder ein sonstiges Zeichen auf der Zeichnung oder der Stückliste ersetzt werden kann. Dasselbe gilt für alle zur Kontrolle der Werkstücke benutzten festen Lehren.

## 2. Normallehrdorn und -ring.

Zur Kontrolle der Werkstücke wurden, wie vorher erwähnt, ursprünglich Normallehrdorn und -ring benutzt (Abb. 462), die so zueinander abgestimmt

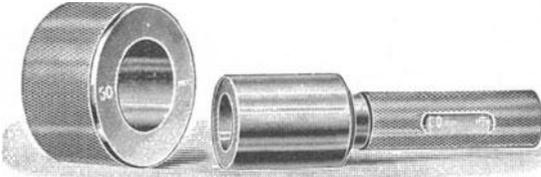


Abb. 462. Normallehrdorn und -ring.

waren, daß der Ring sich im gut eingefetteten Zustande auf dem Dorn durch sein Eigengewicht gerade eben noch bewegte. Es gehört eine gewisse Kunstfertigkeit dazu, die beiden Lehren zu paaren; nachdem dies geschehen, müssen sie ständig gegeneinander bewegt werden, da sonst Kaltschweißung eintritt und die beiden Stücke nicht mehr ohne Beschädigung auseinander zu bringen sind. Diese Normallehren weisen nun aber zwei Mängel auf. Erstlich läßt sich mit ihnen streng genommen immer nur ein bestimmter Sitz erzielen, und zwar wird man zunächst annehmen, daß es sich um eine Art Gleitsitz handeln dürfte. Braucht man aber andere Sitze, für sich bewegende oder aufeinander festsitzende Teile (Lauf- und Festsitze), so kann man dem Arbeiter nur angeben, daß die Werkstücke etwa leicht oder sehr leicht, ganz knapp oder gerade nicht mehr sich mit den Lehren paaren lassen dürfen. Somit hing der zu erreichende Sitz völlig von dem subjektiven Gefühl des Arbeiters über die mit den Lehren erzielte Passung ab. Als zweites kommt dazu, daß man sich im allgemeinen bemühte, jedes Werkstück den Lehren so genau wie möglich anzupassen, wodurch die Arbeit unnötig verteuert wurde (3) (siehe auch S. 155). Wandel konnte hierin nur durch Benutzung von Grenzlehren geschaffen werden (siehe nächsten Abschnitt). Schließlich ist noch zu bemerken, daß zum Prüfen der Wellen stets ein Ausspannen notwendig war.

Um nun zu wissen, welchen Sitz genau in die Lehren passende Werkstücke ergeben, muß man vor allem sehen, wie sich die Maße von aufeinander aufgepaßtem Dorn und Ring verhalten. Nach früheren Messungen mußte dazu der Ring um 2 bis 3  $\mu$  größer sein als der Dorn (4, 5); sehr sorgfältig polierte Lehren sollten sich auch bei gleicher Größe, wenn auch mit Schwierigkeiten, zusammenbringen lassen (8), es konnte also demnach der sogenannte Berührungsfehler bis auf 0 sinken. Bei den weniger sorgfältig bearbeiteten Werkstücken wird er (zunächst bei Paarung mit der Lehre) natürlich größer, und zwar wurden hier für ihn bei Durchmessern von 10, 20 und 40 mm Werte von 5, 10 und 15  $\mu$  angegeben (8).

Nach Messungen von anderer Seite (1, 6, 9, 10) tritt der Berührungsfehler 0 aber nur bei ungefetteten Lehren auf und wird bei gefetteten sogar negativ, z. B. bei 1" Durchmesser — 2,5 bis — 12,5  $\mu$ , d. h. daß der auf den Dorn passende Ring kleiner als jener ist. Eingehende Untersuchungen (2) haben dann gezeigt, daß bei Einfettung ein Ring um 2 bis 14  $\mu$  kleiner sein kann als der Dorn und sich trotzdem auf diesem durch sein Eigengewicht noch bewegt. Die Größe des Untermaßes hängt von der Vorweite des Ringes (die das Hinaufführen auf den Dorn überhaupt erst möglich macht) und von seiner Oberflächenbeschaffenheit ab. Die elastische Aufweitung, welche der Ring durch das Einführen des Dorns erleidet, ist auch an seinem Außendurchmesser mittels eines geeigneten Fühlhebels leicht zu beobachten. Aus diesen Messungen kann man schließen, daß etwa  $\frac{3}{5}$  des Maßunterschiedes sich durch Aufweitung des Ringes,  $\frac{2}{5}$  durch Zusammendrücken des Dorns ergeben (9). Im nicht gefetteten Zustande ging der Ring dagegen nur über einen um 0,5  $\mu$  kleineren Dorn, doch trat dann sofort Kaltschweißung ein. Bei einem Unterschied von 1,5  $\mu$  zwischen Ring und Dorn war dagegen die Paarung auch im ungefetteten Zustande leicht möglich, so daß man bei ungefetteten, gut polierten Stücken mit einem Berührungsfehler von + 1  $\mu$ , bei nur geschliffenen dagegen von + 2 bis 3  $\mu$  rechnen kann.

Demnach darf man annehmen, daß bei der Kontrolle geschliffener Werkstücke mit einem Normallehrdorn und -ring eine Welle um etwa 8 bis 20  $\mu$  kleiner ausfällt als die Bohrung (wenn man ihre Berührungsfehler mit den Lehren zu je 3  $\mu$  ansetzt). Man erhält somit nicht einen Gleitsitz, sondern einen Sitz vom Charakter des engen Laufsitzes, mit einem Mindestspiel von etwa  $\frac{1}{2}$  Paßeinheit, doch kann dieses bei größeren negativen Berührungsfehlern des Lehringes bedeutend größer werden.

Somit ging es nicht mehr an, die Normallehrringe den betreffenden Dornen anzupassen, sie mußten vielmehr unabhängig davon gemessen werden. Genau so wenig wie es nun möglich ist, Werkstücke absolut genau herzustellen, ist dies auch bei Lehren durchzuführen, ihnen muß deshalb gleichfalls eine Herstellungsgenauigkeit gegeben werden. Für die Normallehrdorne ist sie in DIN 226 und 236, für die Normallehrringe in DIN 237 festgelegt<sup>1</sup> (und zwar gleich der der Prüflehren für Edelpassung nach DIN 2058/59). Sie ist in nachfolgender Tabelle enthalten, wobei zu beachten ist, daß die Normallehrdorne und -ringe nur bis 100 mm Durchmesser genormt sind (über den Einfluß der Unrundheit und Konizität siehe S. 308).

Herstellungsgenauigkeit von Normallehren und Einstellringen.

Durchmesserbereich mm	Herstellungsgenauigkeit (in $\mu$ ) der		
	Normallehrdorne und -ringe	Einstellringe für	
		Feinpassung	Schlichtpassung
1— 3	$\pm 0,7$	— 2,0	— 3,0
über 3— 6	0,7	2,0	3,0
„ 6— 10	0,8	2,5	3,5
„ 10— 18	0,9	2,5	4,0
„ 18— 30	1,0	3,0	4,5
„ 30— 50	1,3	3,5	5,0
„ 50— 80	1,5	4,0	6,0
„ 80—120	2,0	5,5	8,0
„ 120—150	—	7,0	10,0

Während ein angepaßter Ring von 100 mm Durchmesser früher um — 2,0 — 14 = — 16  $\mu$  bis + 2,0 — 2,0 = 0  $\mu$ , also um 16  $\mu$  schwanken konnte, ist dies jetzt auf — 2 bis + 2  $\mu$ , also auf 4  $\mu$  beschränkt. Andererseits können aber jetzt Normallehrdorn und -ring nicht

<sup>1</sup> Mit diesen Werten stimmen auch die in dem Katalog von Johansson angegebenen angenähert überein.

mehr unbedingt zueinander passen; wenn z. B. ein Dorn mit der Herstellungsgenauigkeit  $+ 2 \mu$  mit einem Ring der Herstellungsgenauigkeit  $- 2 \mu$  zusammentrifft, so werden sie unter Umständen nicht mehr gepaart werden können (nur infolge des negativen Berührungsfehlers wird es gelegentlich im eingefetteten Zustande noch möglich sein). Im entgegengesetzten Falle haben dagegen beide eine Luft von  $4 \mu$  und werden ziemlich klappern. Dies muß aber unbedingt mit in Kauf genommen werden, wenn man die sonst möglichen Größenabweichungen der Ringe von ihrem Sollwert vermeiden will. Im übrigen hängt das Gefühl des Zusammenpassens von Dorn und Ring noch sehr von ihrem Zustande ab. Während z. B. ein um  $2,5 \mu$  größerer Ring ungefettet einen losen Sitz zeigt, paßt er gefettet anscheinend saugend auf den Dorn oder täuscht gar einen festen Sitz vor (9).

Die Normallehren sind aus den angegebenen Gründen als Arbeitslehren heute fast überall durch die Grenzlehren und als Normale durch die Parallelendmaße, gelegentlich auch durch Meßscheiben und Kugelendmaße, ersetzt. Nur in einigen Sonderfällen sind sie heute noch nötig, z. B. die Normallehrdorne (meist in der Form der Meßscheibe) zum Messen von Rachenlehren, die Normallehrringe zum Einstellen von Innenfühlhebeln mit Dreipunktanlage und für Reibahlen (7)<sup>1</sup>.

Den Einstellringen für Reibahlen hat man aus Zweckmäßigkeitsgründen nicht eine symmetrisch  $\pm$  zum Nennmaß, sondern eine nach Minus gelegene Herstellungsgenauigkeit gegeben (DIN 369), damit die Reibahle (namentlich bei abgenutzten Ringen) nicht zu groß eingestellt wird. Im übrigen ist sie für die Einstellringe für Feinpassung gleich der Herstellungsgenauigkeit der Prüflehren für Feinpassung und für Schlichtpassung gleich der Herstellungsgenauigkeit der Prüflehren für Schlicht- und Grobpassung nach DIN 2058/59 (siehe vorstehende Tabelle). Um der Abnutzung und dem Aufreiben der Reibahlen Rechnung zu tragen, erhalten die Einstellringe ein Sollmaß, das um etwa  $\frac{2}{3}$  der Toleranz über dem Gutseitenmaß der Werkstücke liegt (siehe DIN 369). Dies entspricht etwa mittleren Verhältnissen, da der Durchmesser, den man der Reibahle zu geben hat, noch von den Eigenschaften des Werkstoffs, der wegzunehmenden Werkstoffmenge, dem Vorschub, dem Zustand der Arbeitsmaschine usw. abhängt.

Die äußeren Abmessungen (Baumaße) der Normallehrdorne und -ringe sowie der Einstellringe sind in DIN 236, 226, 252, 237 und 369 festgelegt. Nach diesen dürfen die Stirnkanten abgerundet oder abgeschrägt werden. Dadurch wird die Einführung des Dornes in die Bohrung zwar erleichtert, andererseits liegt aber auch die Gefahr vor, daß der Lehrdorn leicht in eine zu enge Bohrung hineingepreßt werden kann und dann womöglich nicht ohne Beschädigung wieder herauszubringen ist. Ebenso sind auch die äußeren Abmessungen der Meßscheiben in DIN 307, 308, 305, der Meßstäbe in DIN 310 und der Kugelendmaße in DIN 309 genormt. Dabei ist ein Teil der Abmessungen als Richtmaße angegeben.

Richtmaße sind Maße, auf deren Einhaltung es nicht genau ankommt, doch sollen sich die Abweichungen in solchen Grenzen bewegen, die bei der Fertigung mit den üblichen Werkstattsmitteln ohne besondere Mühe eingehalten werden können, so daß eine Erschwerung der Fertigung und somit eine Erhöhung der Kosten nicht eintritt. Größere Abweichungen, die die Verwendbarkeit oder die Benutzungsdauer in Frage stellen, sind nicht zulässig.

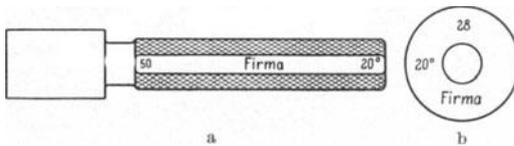


Abb. 463 a und b. Beschriftung der Normallehrdorne und -ringe.

Die Vorschriften für die Beschriftung nach DIN 1813 (11) für Normallehrdorne nach DIN 236 und Normallehrringe nach DIN 237 ergeben sich aus Abb. 463 a und b; die für Normalmeßscheiben und für Normalkugelendmaße werden in Abschnitt 6 behandelt.

<sup>1</sup> Auch die Prüflehren der Grenzlehren (Meßscheiben und Normalrachenlehren) gehören eigentlich zu den Normallehren; sie sollen indessen erst im Zusammenhange mit den Grenzlehren besprochen werden.

## B. Grenzlehren. Grundsätzliche Betrachtungen.

### 1. Das Messen mit Grenzlehren.

Ein wirtschaftliches Arbeiten nach festen Lehren war erst möglich, als man sich nicht mehr bemühte, die Abmessungen der Werkstücke den zufällig vorhandenen Normallehren anzupassen. Infolge der Abweichungen der gerade je-

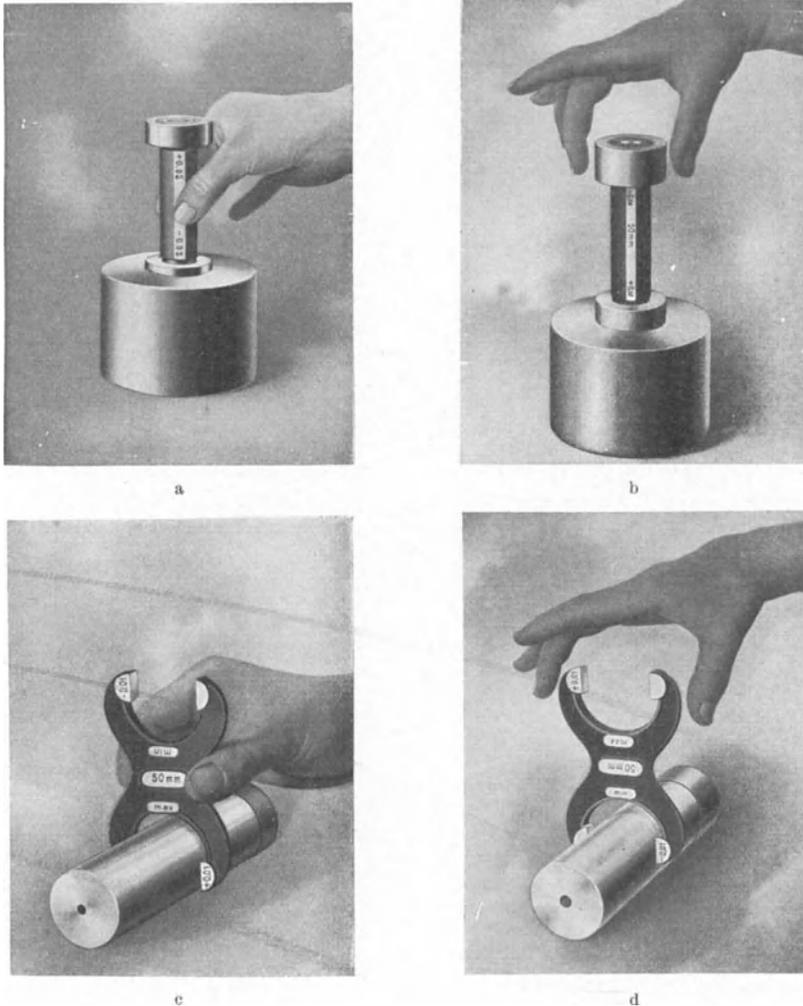


Abb. 464 a bis d. Gebrauch der Grenzlehren.

weils benutzten Lehren voneinander und vor allem infolge der verschiedenen Art der Paarung mit ihnen, die von dem Gefühl des betreffenden Arbeiters abhing, zeigten die Werkstücke doch Abweichungen voneinander, ohne daß ihr Verwendungszweck im mindesten darunter litt. Es war deshalb wirtschaftlicher, dem Arbeiter die bei den fertigen Werkstücken gefundenen Abweichungen als Freiheit bei der Herstellung (Toleranz) zu geben und nur zu kontrollieren, daß die zugewilligten Grenzen nicht überschritten wurden. Dazu braucht man 2 Lehren, die meist zu einem Meßgerät, der Grenzlehre, vereinigt sind. Zur

Kontrolle der Bohrungen wird man also einen Grenzlehrdorn benutzen, dessen kleinerer Meßzapfen sich leicht in die Bohrung einführen lassen muß, während der größere nicht hineingehen oder höchstens anschnäbeln darf (Abb. 464). Da es nun stets möglich ist, eine Bohrung zu vergrößern, eine zu groß geratene aber nicht mehr nachgearbeitet werden kann und somit Ausschuß ist, so bezeichnet man den kleineren Meßzapfen als die Gut-, den größeren als die Ausschußseite. Da die Gutseite leicht in das Werkstück hineingehen soll und somit stets ein gewisser Maßunterschied zwischen Prüfling und Lehre besteht, so ist auch die Gefahr einer Beschädigung oder gar einer Kaltschweißung in weitgehendem Maße verringert.

Zur Kontrolle der Wellen verwendet man dagegen im allgemeinen nicht Grenzlehrringe, da man mit diesen (beim Drehen oder Schleifen) zwischen Spitzen aufgenommene Werkstücke nicht ohne Ausspannen kontrollieren kann, sondern hat sie im allgemeinen durch Grenzzachenlehren ersetzt, die man als eine Art festen Tasters oder als eine feste Schieblehre auffassen kann (wenn es gestattet ist, diesen widerspruchsvollen Ausdruck zu brauchen), da sie mit zwei parallelen Meßflächen ausgerüstet ist<sup>1</sup>. Bei ihnen ist die größere Seite die Gutseite, die leicht über den Prüfling hinübergehen muß, während die (kleinere) Ausschußseite wieder nicht hinübergehen oder höchstens anschnäbeln darf (Abb. 464). Die Grenzzachenlehren versagen bei der Prüfung dünnwandiger Hohlkörper, da diese durch den Meßdruck stets deformiert werden würden. Hierfür kann man nur Grenzlehrringe verwenden. Da es sich dabei aber um Sonderfälle handelt, so sind Grenzlehrringe nicht genormt.

Erst durch die Mitte der 90er Jahre in größerem Umfange erfolgte Einführung der Grenzlehren ist die Durchführung des Austauschbaus ermöglicht worden. Wie eng beide ursächlich zusammenhängen, mögen folgende Zahlen illustrieren: es werden gebraucht bei der Herstellung eines amerikanischen Infanteriegewehrs 1263, eines Maschinengewehrs 2200 und eines Kraftwagens 15000 Lehren [die amerikanischen Arsenale haben einen Bestand von einer halben Million Lehren im Werte von 30 Millionen Dollar; (17)].

Damit aber ein Austausch nicht nur zwischen den in einer Fabrik, sondern auch zwischen den an verschiedenen Arbeitsstellen gefertigten Werkstücken möglich ist, mußten ihre zulässigen Abmaße einheitlich festgelegt werden, wie dies seit Beginn dieses Jahrhunderts und vor allem in den letzten 10 Jahren durch die Normenausschüsse der verschiedenen Industrieländer erfolgt ist. Auf die von ihnen aufgestellten Passungssysteme einzugehen, ist hier nicht der Ort<sup>2</sup>.

Die in der Praxis mögliche Schwankung der Maße der Werkstücke ist aber nicht nur durch die zulässige Toleranz bedingt, vielmehr kommen dabei noch die bei der Kontrolle möglichen Meßfehler hinzu, wie sie vor allem von der Herstellungsgenauigkeit und der Abnutzung der Lehren, also der Abweichung ihres Istmaßes von dem Sollmaß, herrühren. In Deutschland bezeichnen die Toleranzmaße im Grunde die Sollabmaße der Lehren, so daß die in den Passungs-Normenblättern gegebenen Maße noch um die Herstellungsgenauigkeit und die Abnutzung der Lehren überschritten werden können. Im

<sup>1</sup> In römischen Siedelungen haben sich bereits kleine zirkelförmige Instrumente mit nicht beweglichen Schenkeln gefunden, von denen man (aber wohl mit Unrecht) vermutet, daß sie als Lehren bei der Massenherstellung von Waffen gedient haben (8).

<sup>2</sup> Einen guten Überblick über Passungen und das Arbeiten mit Grenzlehren geben: Gramenz: DIN-Passungen. DIN-Buch 4, 2. Aufl.; Zimmermann-Brinkmann: DIN-Normen; sowie die Broschüren der Firmen Loewe (Grenzlehren), Mahr (Grenzlehren), Stock (Breuer: Was müssen Techniker und Kaufleute von Rundpassungslehren wissen?); über Auslandspassungen siehe: Berndt, G.: Z. Feinmech. u. Präzision 1925 u. 1926.

Auslande stellen dagegen die angegebenen Zahlen häufig die äußersten Grenzen der Werkstücke dar, so daß den zur Kontrolle bei der Herstellung benötigten Lehren eine um ihre Herstellungsgenauigkeit und Abnutzung engere Toleranz gegeben werden muß. Ganz allgemein gilt indessen, daß die Werkstatttoleranzen um so größer angesetzt werden können, je kleiner die Meßfehler sind. Daraus folgt, daß das genaueste Meßwerkzeug das wirtschaftlich wertvollste ist (6), da es eine Erhöhung der Werkstatttoleranz und damit eine Herabsetzung der Kosten ermöglicht.

Es ist nun zu untersuchen, ob die Grenzlehren wirklich eine einwandfreie Kontrolle der Werkstücke gestatten. Die Rachenlehren sind im Grunde nur — wenn auch sehr kräftige — Taster und werden sich deshalb beim Gebrauch durch den Meßdruck aufbiegen. Eine bleibende Deformation ist dabei allerdings nicht zu befürchten, da bei Lehren von 30 bis 85 mm hierzu Aufbiegungen um 90 bis 580  $\mu$  nötig sind, die senkrecht zu den Meßflächen wirkende Kräfte von 60 bis 275 kg erfordern, was einen beim Messen ausgeübten Druck von etwa der Hälfte der angegebenen Werte erfordern würde (2), der aber beim praktischen Gebrauch, selbst bei ziemlich grober Unvorsichtigkeit, nicht auftreten kann. Die Aufbiegung hängt im wesentlichen von der Konstruktion des Bügels ab, den man deshalb genau so wie für die Schraublehren angegeben (siehe S. 236) ausführen wird. Sie hängt ferner noch ab von der Oberflächenbeschaffenheit der Werkstücke und beträgt bei trockenen Flächen (der größeren Reibung wegen) weniger als die Hälfte der bei gut gefetteten beobachteten Werte. Im Mittel hat sich für die Aufbiegung durch 1 kg Meßdruck ergeben (2):

	Werkstück	
	gefettet	ungefettet
Für kräftige Lehren . . .	3,1 $\mu$	1,4 $\mu$
„ schwache Lehren . . .	5,8 $\mu$	2,6 $\mu$

In einem anderen Falle wurden Werte von 1,2 bis 7,7  $\mu$ , je nach dem Zustande der Flächen (nur geschliffen und ungefettet; poliert und gut gefettet), gelegentlich sogar bis 29  $\mu$ /kg beobachtet (11). Diese wurden auch durch Betriebserfahrungen bestätigt; in verschiedenen Werkstätten nach derselben (Normal-) Lehre für 43 mm Durchmesser gefertigte Stücke aus gleichem Werkstoff zeigten Unterschiede bis zu 5,5  $\mu$ .

Diese Unterschiede sind aber für die Innehaltung der Toleranzen zu groß. Es mußte deshalb ein bestimmter Meßdruck vorgesehen werden. Hierfür ergab sich als einfachste Festsetzung das Eigengewicht, das aber, um die Reibung sicher zu überwinden, auf mindestens 100 g gebracht werden muß. Auch hierbei hätte nun aber die Aufbiegung noch von der Bügelkonstruktion und der Oberflächenbeschaffenheit abgehängt. Erstere ist dadurch ausgeschaltet, daß auf Beschluß des Ausschusses für Messwesen (siehe DIN 2057) als Maß der Rachenlehre nicht der Abstand der Meßflächen im undeformierten Zustande gilt, sondern der Durchmesser eines polierten Zylinders (der als Prüfllehre dienenden Meßscheibe; siehe weiter unten), über den die Rachenlehre in leicht eingefettetem Zustande gleichfalls durch ihr Eigengewicht gerade hinübergleitet (3). Sie erleidet dann bei der Kontrolle eines Werkstücks derselben Oberflächenbeschaffenheit genau dieselbe Aufbiegung, so daß also Werkstück und Prüfllehre einander gleich werden; als Maß der Rachenlehre wird auf ihr der Durchmesser der Prüfllehre verzeichnet. Bei weniger sorgfältig bearbeiteten Werkstücken ist die Aufbiegung etwas geringer, wird also der Prüfling etwas kleiner, was günstig ist, da Stücke mit weniger sauberen Oberflächen ein größeres Spiel im Lager haben müssen

als sehr sorgfältig bearbeitete. Die Rachenlehre ist also im Grunde gar keine starre Lehre oder eigentliches Meßgerät, sondern nur ein Maßübertragungsmittel.

Das Maß der Rachenlehre darf demnach nicht im unbeanspruchten Zustande bestimmt werden, wie man es erhalten würde, wenn man z. B. 2 Parallelendmaße mit je einem Meßstrich auf einer zu ihren Meßflächen senkrechten Seite (siehe S. 84) ansprengt und den so hergestellten Strichmaßstab auf einem Komparator auswertet (zu dem Ergebnis wäre noch die Summe der Strichabstände von den Meßflächen hinzuzufügen, die nur einmal bestimmt zu werden braucht). Auch Innenführlhebel und Innenmeßmaschinen sind nicht geeignet, da sie im allgemeinen einen anderen Meßdruck ausüben als er beim Gebrauch durch das Eigengewicht auftritt. Vielfach bestimmt man das Maß der Rachenlehren dadurch, daß man Endmaße in den Rachen einführt, doch hängt hierbei das Ergebnis stark von der Geschicklichkeit des Messenden und von dem dabei ausgeübten Druck ab, wenn auch nicht verkannt werden soll, daß dauernd damit beschäftigte Personen sich eine große Sicherheit hierin erwerben können. Allein maßgebend ist die Prüfung mit polierten Zylindern (Meßscheiben) oder Ausschnitten daraus, über die, wie erwähnt, die Rachenlehren durch ihr Eigengewicht (mindestens jedoch 100 g) hinübergelassen müssen. Fehlt eine passende Meßscheibe, so kann man eine bis zu 5 mm kleinere nehmen und den Unterschied durch an die eine Meßfläche angesprengte oder angeschobene Endmaße ausgleichen. Man kann sich auch dadurch helfen, daß man sich eine Art Flachlehre, d. h. eine von 2 Zylinderflächen begrenzte Lehre, aus aneinandergesprengten Endmaßen und Meßschnäbeln zusammensetzt.

Die obige Definition entspricht den gewöhnlich auftretenden Verhältnissen, versagt aber, wenn man die Kontrolle an Werkstücken vorzunehmen hat, die in senkrechter Stellung bearbeitet werden, wie dies bei sehr schweren Teilen der Fall ist, und wo man die Rachenlehre wagerecht halten muß. Radikale Abhilfe ließ sich hier nur dadurch schaffen, daß man

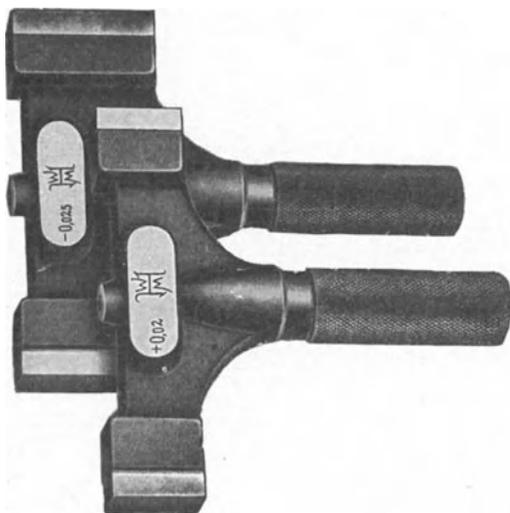


Abb. 465. Grenzflachlehre.

in den Griff einen Druckanzeiger, etwa ein Federdynamometer mit nur 1 Strich auf der Skala einbaut, der so angebracht ist, daß der bei einwirkendem Zeiger einwirkende Druck gleich dem Eigengewicht ist. Einfacher kommt man zum Ziel, wenn man die Rachenlehre in wagerechter Lage mit angenähert gleichem Druck über die Prüfling schiebt, da sich dann die Aufbiegung forthebt, oder, noch besser, sie unter der einen Meßbacke unterstützt und sie dann um die Meßscheibe bzw. den Prüfling schwingt (7). Beide Verfahren würden aber zur Messung wagerechter und senkrechter Werkstücke — wegen der Verschiedenheit der Aufbiegung in beiden Fällen — verschiedene Lehren erfordern. Um welche Größen es sich hierbei handelt, geht z. B. daraus hervor, daß ein Taster bei senkrechter Einstellung (Hinübergleiten durch Eigengewicht) und bei „schwingender“ Einstellung für 500 mm Durchmesser einen Unterschied von 0,22 mm ergab. Die Verhältnisse liegen übrigens nicht gar so schlimm, wie es den Anschein hat, da ja die Gutseite leicht, also ohne merklichen Druck über die Welle gehen, die Ausschußseite nur anschnäbeln soll.

Zum Prüfen von Bohrungen werden nach den Festsetzungen des NDI bis 100 mm Grenzlehrdorne (Abb. 464), von über 100 bis 260 mm Durchmesser Grenzflachlehren (Abb. 465) und über 260 mm Grenzkugellendmaße (Abb. 466)

gebraucht. Gelegentlich werden die beiden letzteren in der Praxis auch bei kleineren Durchmessern benutzt. Im Idealfall gibt nun der Lehrdorn eine Flächen-, die Flachlehre eine Linien- und das Kugelendmaß eine Punktberührung. Wegen der Unvollkommenheiten der Flächen wird aber theoretisch nur eine Berührung in 3 (bzw. 2) Punkten erfolgen. Praktisch werden Übergänge zwischen diesen beiden Extremen eintreten, zumal auch die Kugelendmaße durch den Meßdruck abgeplattet werden, immerhin wird aber der Berührungsfehler, wegen der verschiedenen Anlage, voneinander abweichende Werte annehmen.

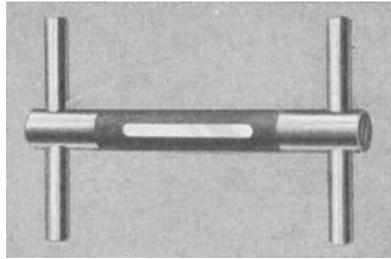


Abb. 466. Grenzkugelendmaß.

Die Angaben hierüber gingen ziemlich weit auseinander. Für sehr sauber bearbeitete und gut gefettete Bohrungen war gefunden, daß sie für die Paarung mit dem Lehrdorn 2 bis  $5 \mu$  größer, mit der Flachlehre  $\frac{1}{3}$  bis  $\frac{1}{2} \mu$  größer sein müßten, während sich bei einem Kugelendmaß kein Unterschied zwischen beiden ergeben hatte (12). Von anderer Seite (15) war dagegen beobachtet, daß, wenn ein Lehrdorn von 65 mm in eine Bohrung paßte, sie bei Prüfung mit einer Flachlehre oder einem Kugelendmaß um 12 bis  $20 \mu$  kleiner ausgeführt werden mußte, und daß die Unterschiede bei größeren Durchmessern noch bedeutender wurden. Diese Ergebnisse sind aber wohl durch eine nicht genügend sorgfältige Ausführung der Werkstücke (Unrundheit) vorgetäuscht, woran auch andere Versuche zur Bestimmung des Berührungsfehlers (14) gescheitert sind. Mit sehr sorgfältig ausgeführten Bohrungen (Normallehrringen) angestellte Versuche (4) haben dann ergeben, daß z. B. bei 100 mm Durchmesser im gut gefetteten Zustande die Bohrung  $13,9 \mu$  kleiner als der Lehrdorn,  $13,3 \mu$  kleiner als die Flachlehre und  $2,8 \mu$  kleiner als das Kugelendmaß ausfiel, während sie im ungefetteten Zustande beim Lehrdorn ein Übermaß von  $0,5 \mu$ , bei der Flachlehre und dem Kugelendmaß dagegen ein Untermaß von  $4,3$  bzw.  $2,8 \mu$  haben mußte.

Bei den Kugelendmaßen ist also das Einfetten ohne Einfluß, da das Schmiermittel hier beiseite gedrängt wird. Das in beiden Fällen beobachtete Untermaß der Bohrung von  $2,8 \mu$  rührt im wesentlichen von der Abplattung und der elastischen Zusammendrückung des zylindrischen Stabes des Kugelendmaßes her. Im übrigen ergibt sich, daß bei gut gefetteten Werkstücken die Bohrung mit Lehrdorn und Flachlehre angenähert gleich groß (allerdings rund  $\frac{1}{100}$  mm kleiner als diese Lehren) ausfällt, daß sie aber bei der Prüfung durch Kugelendmaße größer gehalten werden muß. Im ungefetteten Zustande erhält man mit dem Lehrdorn eine Bohrung von angenähert seinem Durchmesser, während sie bei der Kontrolle durch eine Flachlehre oder ein Kugelendmaß um 4 bis  $3 \mu$  kleiner auszuführen wäre. Man muß daraus die Folgerung ziehen, daß man die Lehren nicht mit Gewalt in die Werkstücke bringen darf, da dabei größere Berührungsfehler auftreten würden, sondern stets darauf zu achten hat, daß die Gutseiten leicht hineingehen, womit die Berührungsfehler praktisch verschwinden.

Die Messung von Bohrungslehren erfolgt durch Vergleich mit Endmaßen mittels Fühlhebels oder Meßmaschine. Da sie stets von Zylinder- oder Kugelflächen begrenzt sind, so ist auf die durch den Meßdruck erfolgende Abplattung zu achten, die mit Hilfe der auf S. 65ff. angegebenen Formeln zu berechnen ist, da nach dem Beschluß des Ausschusses für Meßwesen (16) als Durchmesser der Lehren die Länge eines entsprechenden Parallelendmaßes gilt, falls in beiden Fällen das Prüfmittel gleich tief eindringt, d. h. die Messungen mit dem Druck 0

ausgeführt werden. Das ist aber praktisch nicht möglich, da sich dabei die zwischen Prüfling und Meßfläche befindlichen Luft- und Fettschichten nicht wegdrängen lassen.

Nachdem sich somit herausgestellt hat, daß sich die Aufbiegung der Rachenlehren und der Berührungsfehler der verschiedenen Bohrungslehren im praktischen Gebrauch gewissermaßen ausschalten läßt, scheint es, als wenn die festen Grenzlehren sehr wohl zur Kontrolle der Innehaltung der Toleranzen geeignet sind, und daß sie ferner zur Prüfung ebenflächiger Werkstücke (rechtwinklige Prismen, Nuten usw.) benutzt werden können. Auch für andere Formen werden sie in der jeweils benötigten Weise ausgebildet.

Nun lassen sich aber Zylinder niemals ideal herstellen; ihre zur Achse senkrechten Querschnitte werden stets eine Abweichung von der Kreisform (Elliptizität, Unrundheit) aufweisen, auch sind ihre Mantellinien niemals ideale Gerade, außerdem werden sie auch nicht parallel zueinander verlaufen (beides sei unter dem Begriff der Konizität zusammengefaßt)<sup>1</sup>. Unrundheiten von Wellen lassen sich (bis auf den Fall der Gleichdicke; siehe weiter unten) nun mit der Rachenlehre leicht durch Prüfung mehrerer Durchmesser feststellen, dasselbe gilt auch für die

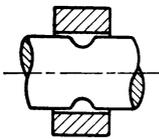


Abb. 467. Rachenlehre an unebenen Werkstücken.

eigentliche Konizität, während ein- oder zweiseitige Vertiefungen, wenn sie kürzer sind als die Breite der Meßflächen der Rachenlehren, nicht mehr angezeigt werden (Abb. 467). Diese machen sich indessen beim praktischen Gebrauch auch kaum störend bemerkbar, falls es sich nicht um äußerst genaue Führungszyylinder handelt, die man aber kaum mit Rachenlehren abnehmen, sondern auf andere Weise kontrollieren wird.

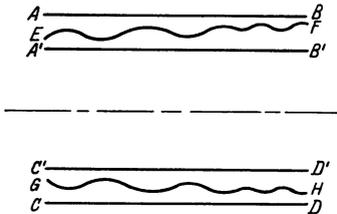


Abb. 468. Mit Grenzrachenlehren abgenommenes Werkstück.

Abgesehen hiervon gestattet also die Grenzrachenlehre eine Kontrolle der Toleranzen der Durchmesser, wobei man sich aber klar sein muß, daß damit nichts darüber gesagt ist, daß das Werkstück ein idealer, zwischen den Toleranzgrenzen  $ABCD$  und  $A'B'C'D'$

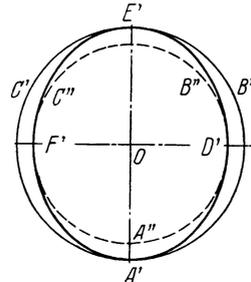


Abb. 469. Mit Grenzrachenlehren abgenommenes Werkstück.

(Abb. 468) liegender Zylinder ist, sondern z. B. auch von unregelmäßig gekrümmten Mantellinien  $EF$ ,  $GH$  begrenzt sein kann. Ferner ist auch die Kreisform des Querschnitts durchaus nicht damit gewährleistet, da die Prü-

<sup>1</sup> Der Ausschuß für wirtschaftliche Fertigung (AwF) hat hierfür, wie für den Begriff des Schlags folgende Definitionen aufgestellt:

Unrundheit ist die Abweichung eines senkrecht zur Achse liegenden Querschnitts von der Kreisform (dies gilt nicht nur für zylindrische Körper, sondern auch für beliebig gestaltete Drehkörper).

Ungeradheit ist die Abweichung einer geometrischen geraden Linie zwischen zwei Punkten der Mantelfläche, die in einer Ebene in Achsenrichtung liegen.

Umfangsschlag — d. i. Schlag am Umfang eines Drehkörpers — ist die Abweichung der tatsächlichen Drehachse von der bei der Herstellung angenommenen Achse. Voraussetzung dabei ist, daß eine Prüfung auf Unrundheit vorausgegangen ist.

Stirnschlag — d. i. Schlag an der zur Längsachse eines Drehkörpers senkrechten Stirnfläche — ist die bei Drehung um die tatsächliche Drehachse auftretende Abweichung eines Punktes der Stirnfläche von einem festen Bezugspunkt.

(Bei Achsen, die sich nicht drehen, spricht man im allgemeinen von Krümmheit statt von Schlag.)

fung zwischen den Toleranzgrenzen  $A'B'C'$  und  $A''B''C''$  (Abb. 469) z. B. auch die Ellipsenform  $A'D'E'F'$  oder sonst irgend eine unregelmäßige zwischen den beiden angegebenen Grenzen liegende Form einschließt (5). Bei engen Toleranzen werden derartige Unregelmäßigkeiten nicht stören, da sich die Wellen in den Lagern durch stärkere Abnutzungen der vorstehenden Stellen bald zylinderförmig gestalten werden; bei größeren Toleranzen (Grob-toleranzen und Große Spiele) werden aber unter Umständen derartige Abweichungen von der Zylinderform nicht mehr zulässig sein. Hier wäre also gegebenenfalls die Abnahme mit anderen Mitteln (z. B. mit Reiterlehren nach Abb. 248 oder mit Fühlhebeln, die mit einem rachenlehrenähnlichen Handgriff versehen sind, nach Abb. 247) durchzuführen.

Dieselben Übelstände machen sich auch bei der Prüfung von Bohrungen mit Grenzlehrdornen in verstärktem Maße bemerkbar. Es stelle in Abb. 470  $A'B'D'C'$  die Gut-,  $ABDC$  die Ausschußseite dar. Damit die Gutseite der Lehre leicht hineingeht, muß die Bohrung des Werkstücks größer als  $A'B'D'C'$  sein; ebenso wird auch die Grenze  $ABDC$  etwas nach außen verschoben, da der Ausschußlehrdorn bei nicht polierten Bohrungen nur hineingehen würde, wenn sie um ein geringes größer als sein Durchmesser gehalten wird. Somit wird das ganze Toleranzfeld etwas nach außen verschoben, doch ist der Betrag auf der Ausschußseite so gering, daß er nicht störend wirkt und somit die Verschiebung auf der Gutseite nur eine kleine Verengung der Toleranz ausmacht. Die dadurch hervorgerufene Vergrößerung des Mindestspies zwischen Bohrung und Welle wird durch die fortschreitende Abnutzung der Lehren immer geringer (von dem Einfluß der Herstellungsgenauigkeit der Lehren soll, um die Verhältnisse nicht unnötig zu komplizieren, abgesehen werden).

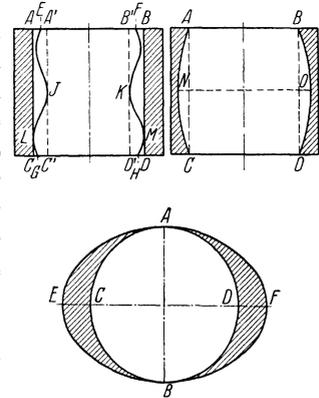


Abb. 470 bis 472. Mit Grenzlehrdorn abgenommenes Werkstück.

Nun wird aber auch eine etwa nach den Linien  $EIG$ ,  $FKH$  verlaufende Bohrung durchaus noch abgenommen. Dafür gilt das vorher bei den Wellen Ausgeführte; bei größeren Passungen wären also die Maßtoleranzen noch durch Formtoleranzen zu ergänzen, deren Innehaltung dann auf andere Weise geprüft werden müßte. Viel unangenehmer ist dagegen der in Abb. 471 dargestellte Fall, in dem  $ABDC$  die Ausschußseite  $ANC$ ,  $BOD$  die wirkliche Form angeben möge. Die Gutseite des Lehrdorns geht leicht hinein, die Ausschußseite nicht, da die Durchmesser der Stirnseiten das zulässige Größtmaß nicht überschreiten. Derartige Tonnenformen würden also durch Lehrdorne (und auch durch Flachlehren) nicht erfaßt. Sie sind aber sehr unangenehm, da die Bohrung immer nur an den Stellen  $AB$  und  $CD$  aufliegt, die dadurch bald abgenutzt werden, wodurch dann die ganze Bohrung zu groß wird. Derartige Tonnenformen, die glücklicherweise nicht allzu häufig auftreten, könnten z. B. durch Kontrolle der Ausschußseite mit Kugelmäßen ausgeschlossen werden.

Ebenso kann auch ein über die Toleranzgrenze hinausgehender, etwa elliptischer Querschnitt vorkommen, wie Abb. 472 zeigt, in der  $ADBC$  wieder die Ausschußseite darstellt, während die Bohrung die Form  $AFBE$  hat. Da der Ausschußlehrdorn nicht hineingeht, so würde die Bohrung als gut abgenommen werden. Diese auch praktisch beobachteten Formen ließen sich durch Benutzung einer Flachlehre oder auch eines Kugelmäßes für die Ausschußseite erkennen, da diese nur in einem einzigen Durchmesser anliegen. Es zeigt sich auch hierin

die Bestätigung des alten Satzes, daß man die Prüfung auf der Gutseite stets mit einer dem (idealen) Werkstück entsprechenden Gegenlehre vornehmen kann, daß aber auf der Ausschubseite jedes Bestimmungsstück (in diesem Falle jeder Durchmesser) einzeln geprüft werden muß, was — bei Verwendung fester

Lehren — hier nur mit einem Kugelendmaß geschehen könnte<sup>1</sup>.

Einer besonderen Betrachtung bedürfen noch die Querschnittsformen, die mit dem Kreise die Eigenschaft teilen, daß der Abstand zweier paralleler Tangenten konstant ist, und die man deshalb als Gleichdicke bezeichnet. Sie entstehen z. B., wenn man um die Ecken eines gleichseitigen Dreiecks  $ABC$  mit der Seite  $a$  (Abb. 473 a) oder mit einer Strecke größer als  $a$  (Abb. 473 b) Kreise schlägt. Es können auch unregelmäßige Formen auftreten, wie in Abb. 473 c, wo an der Stelle  $AD$  der (ausgezogene) Begrenzungsbogen um ein kleines Stück gegenüber dem (gestrichelten) Kreise vor- und auf der anderen Seite bei

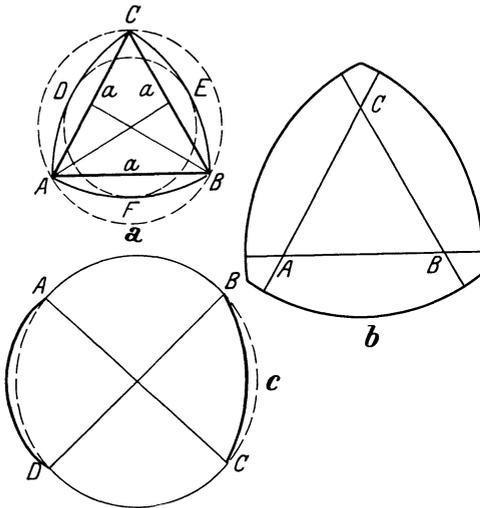


Abb. 473. Gleichdicke.

$BC$  um ein gleiches Stück zurücktritt. Entsprechende Formen lassen sich auch aus Vier-, Fünfecken usw. und ferner bei den entsprechenden Raumkörpern herstellen (9, 10, 13).

Derartige Gleichdicke (deren Wirkung in England als *lobing effect* bezeichnet wird) treten auf bei ungleich verteilten Massen der sich drehenden Werkstücke, z. B. beim Schleifen von Zapfen mehrfach gekröpfter Kurbelwellen, durch periodische Schwingungen der Antriebsmittel der Bearbeitungsmaschinen, oder bei der spitzenlosen Schleifmaschine, falls die Werkstücke nicht die richtige Höhenlage zwischen den beiden rotierenden Scheiben haben (1), ferner beim Schleifen und Maßpolieren dünner Drähte (wie sie z. B. zur Bestimmung des Flankendurchmessers verwendet werden) zwischen ebenen Platten.

Es sollen hier die Erörterungen auf den einfachsten Fall der Abb. 473 a beschränkt werden, zumal die gleichzahligen Vielecke (z. B. Ellipsen) mit der Rachenlehre erkannt werden können. Solche Gleichdicke würden sich als Welle nur in eine Bohrung  $ABC$  mit dem Durchmesser  $2 \cdot \frac{a}{\sqrt{3}} = 1,155 \cdot a$  einführen lassen, während in sie als Bohrung nur eine Welle  $DEF$  mit dem Durchmesser  $2a \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}}\right) = 0,845 \cdot a$  hineingingen. Die Messung mit der Rachenlehre würde dagegen den scheinbaren Durchmesser des Gleichdicks zu  $a$  ergeben (siehe Abb. 474 a, die zugleich deutlich erkennen läßt, daß der Abstand zweier paralleler Tangenten konstant ist).

Es muß nun untersucht werden, ob es mit Rachenlehren, die ja den Abstand zweier paralleler Tangenten prüfen, möglich ist, Gleichdicke zu erkennen und damit von der Verwendung auszuschließen (5). Nach Abb. 474 a würde ein Gleichdick in allen Lagen in eine Rachenlehre passen und sich damit nicht von der Kreisform unterscheiden; dabei wäre der Durchmesser  $a$  des Gleichdicks gleich dem Durchmesser  $d_1$  der Prüfmeßscheibe. Es ist aber bei Gleichdicken auch möglich, die Rachenlehre um den einen Anlagepunkt (rechts) zu schwenken, ohne daß die Anlage aufhört; bei einem Kreise würde sich dagegen eine größere Schwenkung nicht ausführen lassen, da dann die eine Meßfläche (rechts) in den Körper eindringen müßte, während die andere nicht mehr in der Anlage verbliebe. Dieses

<sup>1</sup> Für eine praktische Bestätigung dieser Betrachtungen s. (10a).

Kriterium ist aber für die Praxis, namentlich bei kleinen Durchmessern, nicht scharf genug, zumal beim Arbeiten mit Grenzlehren das Werkstück kleiner als die Gut- und größer als die Ausschußseite sein soll. Ist es möglich, den Prüfling um seine Achse bei schwimmend aufgestellter Rachenlehre zu drehen (Abb. 474b), so würde ein Gleichdick in seiner einen (ausgezogenen) Lage gerade in die Rachenlehre passen, in einer anderen (gestrichelten) nur rechts, an einer Kante der Meßfläche, anliegen, die linke aber nicht mehr berühren. Bei einer Verschiebung der Rachenlehre nach unten würde der Abstand links noch größer werden. Für die Praxis sind aber diese Unterscheidungsmerkmale zu umständlich und auch wohl kaum ausreichend.

Es werde nun senkrecht zu den Meßflächen, in einem ungefähren Abstände der halben Meßweite von ihrer Mitte aus, eine Stützfläche angebracht. Es gibt immer eine Stellung (Abb. 474c), bei der etwa das Gleichdick mit einer Spitze auf jener aufruht und dabei die oberen Kanten der Meßflächen berührt (dabei ist  $a > d_2$ ). Nach Drehung um  $180^\circ$  (Abb. 474d) würde aber das Gleichdick nicht mehr zwischen die Meßflächen bei gleichzeitiger Auflage auf die Stützflächen

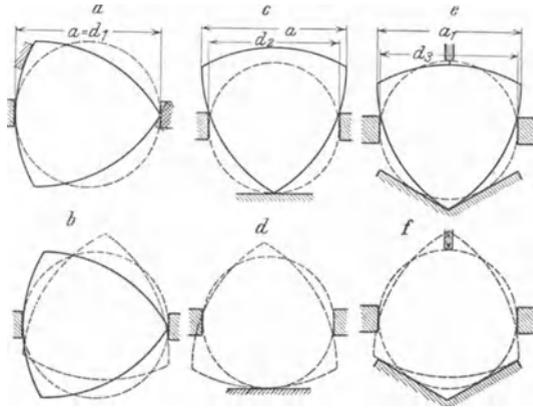


Abb. 474. Prüfung von Gleichdicken mittels Rachenlehre und Fühlhebel.

zu bringen sein. Hiermit läßt sich ein Gleichdick einwandfrei von einem Kreise unterscheiden. Eine solche Stützfläche ist nur auf der Gutseite nötig, da ja der Prüfling in die Ausschußseite nicht hineingehen darf. Statt der Stützfläche könnte man auch eine V-Nut vorsehen. Die Lage in Abb. 474e (bei der man sich, wie in Abb. 474f, die eingezeichneten Meßbolzen eines Fühlhebels wegdenke) gibt wieder das größtmögliche passende Gleichdick (wobei gleichfalls  $a > d_3$ ), während es nach Drehung um  $180^\circ$  (Abb. 474f) auch nicht in die Rachenlehre hineingeht. Durch Vergleich mit Abb. 474c und d sieht man, daß die als V-Nut ausgebildete Stützfläche zur Unterscheidung zwischen Gleichdick und Kreis nicht so gut ist wie die gerade Stützfläche, deren Ausführung und Anbringung in der Rachenlehre auch leichter auszuführen ist. Man müßte deshalb, um Gleichdicke mit Sicherheit erkennen und ausschließen zu können, die Rachenlehren auf der Gutseite mit einer geraden Stützfläche versehen, was auch nachträglich leicht möglich ist.

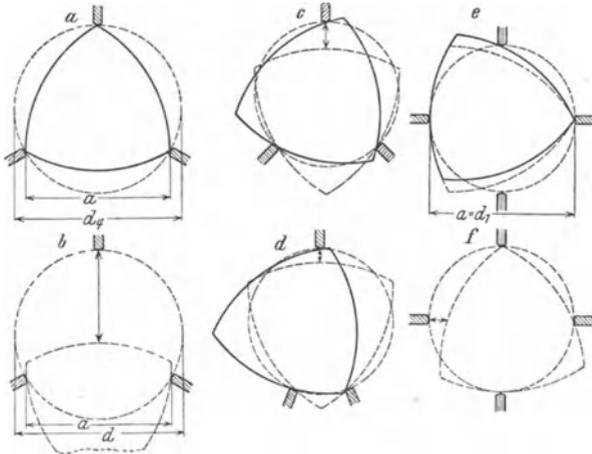


Abb. 475. Prüfung von Gleichdicken mittels Fühlhebels.

Es sei weiterhin ein Fühlhebel betrachtet; aus Abb. 474e und f (in der jetzt die Meßflächen der Rachenlehre wegzudenken sind) erkennt man, daß die Lage des Meßbolzens und damit der Zeigerausschlag bei einem Kreise unverändert bleibt, bei einem Gleichdick aber (in dem betrachteten Falle 3) Größt- und Kleinstwerte auftreten. Hier wird man die V-Nut der geraden Stützfläche nach Abb. 474c und d vorziehen, da bei dieser die unveränderte Lage während der Drehung schwer innezuhalten ist. Denkt man sich den Fühlhebel statt oben unten derart angebracht, daß sein Meßbolzen zwischen den Flächen des Prismas hindurchgeht, so kommt man zu der Reiterlehre, für die die gleichen Betrachtungen gelten.

Noch größere Ausschläge erhält man bei einem Fühlhebel mit drei um  $120^\circ$  voneinander abstehenden Bolzen (Abb. 475a und b). Es gibt eine Lage (Abb. 475a), in der der Fühlhebel denselben Ausschlag zeigt wie bei der Einstellung mit einem Zylinder (dabei ist  $a < d_4$ ).

Zur Prüfung von Zylindern würde man unten zweckmäßig 4 Stützpunkte nehmen (die hier genügen, da sie ein Rechteck bilden). Liegen die beiden festen Stützbolzen unter einem Winkel von  $90^\circ$  oder  $30^\circ$  zueinander (Abb. 475c und d), so bleiben die Verhältnisse grundsätzlich dieselben, nur sind die Ausschläge bei Drehung des Gleichdicks kleiner.

Bei einem Fühlhebel mit Zweipunktanlage und 2 Stützbolzen von etwas größerem Abstände gibt es nach Abb. 475e eine Stellung des Gleichdicks, wo bei Anlage an den oberen Stützbolzen Gleichdick und Kreis gleiche Ausschläge geben (dabei ist  $a = d_4$ ). Nach Drehung um  $90^\circ$  (Abb. 475f) läßt aber die eintretende Änderung des Zeigerausschlages beide deutlich voneinander unterscheiden.

Zusammenfassend ergibt sich somit, daß Gleichdicke und Kreise am besten mittels Fühlhebels mit symmetrischer Dreipunktanlage (Winkel der Meßbolzen  $120^\circ$ ), nächst dem mit anderen Winkeln (Reiterlehre) oder nach dem Vierkreuzsystem, ferner auch mittels Rachenlehren mit Stützflächen zu unterscheiden sind. Dementsprechend lassen sich auch bei der Herstellung Gleichdicke vermeiden, wenn man dabei für eine Dreipunkt- bzw. Dreilinienanlage sorgt.

Für Hohlkörper ist der Lehdorn vom Durchmesser  $d$  ziemlich ungeeignet, da damit nach Abb. 473a auch ein Gleichdick abgenommen wird, dessen Durchmesser  $a$  sich aus

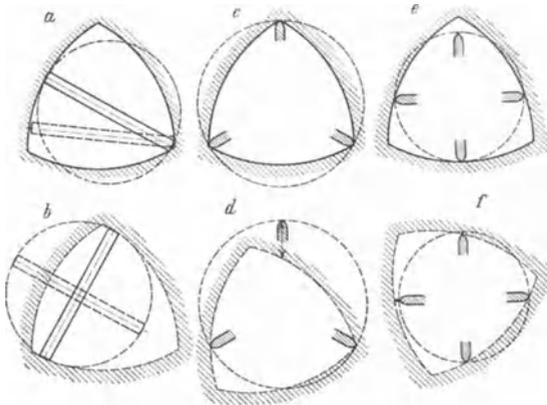


Abb. 476. Prüfung von Gleichdickbohrungen mittels Flachlehren und Fühlhebeln.

der Beziehung  $0,845 \cdot a = d$  oder  $a = 1,183 \cdot d$  ergibt. Für die Prüfung mit einer Flachlehre (Abb. 476a) gilt im wesentlichen dasselbe wie für die Prüfung von Wellen mittels Rachenlehre. Die Flachlehre läßt sich bei Gleichdicken um einen Punkt schwenken, was beim Kreis nicht möglich ist, doch gibt auch dies keine sichere Unterscheidungsmöglichkeit. Dagegen wäre nach Abb. 476b Drehung der Flachlehre um ihre Achse bei einem Hohlzylinder, nicht dagegen bei einem Hohlgleichdick auszuführen. Streng genommen, müßte man demnach auch bei Durchmessern unter 100 mm stets den Lehdorn durch die Flachlehre (oder ein Kugelendmaß) ersetzen, wie dies schon zum Erkennen des Spezialfalls der Elliptizität früher bemerkt war.

Das beste Kriterium gibt auch hier wieder ein Fühlhebel mit Dreipunktanlage, der nach einem Normallehdorn eingestellt wird. Wenn auch in einer Stellung (Abb. 476c) das Gleichdick denselben Zeigerausschlag hervorruft wie der Lehdorn, so wird er doch bei anderer Lage des Gleichdicks (Abb. 476d) wesentlich kleiner. Dasselbe gilt, in allerdings etwas verringertem Maße, auch bei einem Fühlhebel mit Zweipunktanlagen und 2 Stützbolzen von etwas kleinerem Abstände (Abb. 476e und f), wobei Anlage des Prüflings an den unteren Stützbolzen angenommen ist.

Im allgemeinen geben auch Fühlhebel nicht das genaue Maß des Gleichdicks. Um dieses zu erhalten, müßte man einen Kreisring herstellen, in den die Welle gerade hineingeht, bzw. einen Zylinder, der sich gerade in das Hohlgleichdick einführen ließe. Aus ihrem Durchmesser  $d$  würde dann der scheinbare Durchmesser des Gleichdicks mit Hilfe der Beziehungen  $1,155 \cdot a = d$  bzw.  $0,845 \cdot a = d$  oder  $a = 0,866 \cdot d$  bzw.  $a = 1,183 \cdot d$  für ein gleichseitiges Gleichdick folgen.

## 2. Herstellungsgenauigkeit und Abnutzung der Grenzlehren.

Für die Herstellungsgenauigkeiten der Grenzlehren war in Deutschland ursprünglich etwa  $\frac{1}{5}$  der Toleranz genommen und dieser Betrag noch etwas verkleinert. Die in der 1. Ausgabe von DIN 168 vom 1. Februar 1921 enthaltenen Werte waren nämlich so entstanden, daß man nur die Unterschiede der Lehren gegen die Normalen bei jeder einzelnen Firma bestimmt, aber nicht die Abweichungen der Normalen von ihren Sollwerten

**Herstellungsgenauigkeit der Arbeits- und Abnahmelehren<sup>1</sup>.**

**DIN 2057 (früher DIN 168).**

Werte in  $\mu$  ( $1 \mu = 1/1000$  mm).

Bei Grenzlehren sind für die Sollmaße<sup>2</sup> folgende Abweichungen zulässig:

1. Die Gutseite erhält eine der Abnutzung entgegengesetzte Abweichung, also
  - a) eine positive Abweichung bei Lehrdornen, Flachlehren und Kugellendmaßen;
  - b) eine negative Abweichung bei Rachenlehren<sup>3</sup>.
2. Die Ausschußseite erhält, entsprechend der geringen Abnutzung, eine gleiche Abweichung nach beiden Seiten, wobei die Toleranz für die Herstellung der Lehre die gleiche ist wie bei der Gutseite.

Nenn- durchmesser- bereich mm	Zulässige Abweichungen (bei Gutseite für Bohrungslehren +, für Wellenlehren —)							
	Edelpassung		Feinpassung		Schlichtpassung		Grobpassung	
	Gut	Aussch.	Gut	Aussch.	Gut	Aussch.	Gut	Aussch.
über 1— 3			2,5	$\pm 1,3$	6	$\pm 3$	10	$\pm 5$
„ 3— 6	2,0	$\pm 1,0$	3,0	1,5	6	3	10	5
„ 6— 10	2,5	1,3	4,0	2,0	6	3	10	5
„ 10— 18	2,5	1,3	4,5	2,3	7	3,5	12	6
„ 18— 30	3,0	1,5	4,5	2,3	7	3,5	12	6
„ 30— 50	3,5	1,8	5,0	2,5	8	4	12	6
„ 50— 80	4,0	2,0	6,5	3,3	10	5	14	7
„ 80—120	5,5	2,8	8,5	4,3	12	6	18	9
„ 120—180	7,0	3,5	10,0	5,0	14	7	22	11
„ 180—260	9,0	4,5	12,0	6,0	18	9	28	14
„ 260—360	12,0	6,0	16,0	8,0	22	11	36	18
„ 360—430	14,0	7,0	18,0	9,0	26	13	44	22
„ 430—500	16,0	8,0	20,0	10,0	30	15	50	25

<sup>1</sup> Als Herstellungsgenauigkeit der Abnahmelehren gilt die Herstellungsgenauigkeit für die Ausschußseite der Arbeitslehren. Herstellungsgenauigkeit der Prüflehren siehe DIN 2058/59.

<sup>2</sup> Sollmaß = Nennmaß + (bzw. —) Abmaß.

<sup>3</sup> Als Maß einer Rachenlehre gilt der Durchmesser derjenigen Meßscheibe, über die sie in leicht eingefettetem Zustande durch ihr Eigengewicht, aber mindestens 100 g, gerade hinübergeht.

Die Ziffern ,3 und ,8 sind Abrundungen für ,25 und ,75.

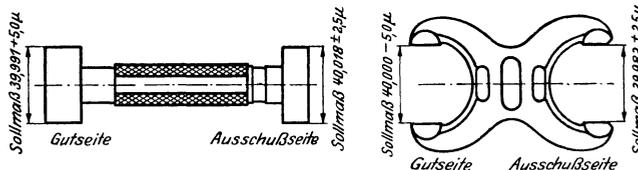


Abb. 477. Beispiele für den Durchmesser 40 mm, Schiebeseitz, Feinpassung, Einheitswelle.

und die sonstigen Meßfehler berücksichtigt hatte, wie sie von der Temperatur, der Verschiedenheit der Ausdehnungen und den Instrumentenfehlern herrühren, woher es kam, daß die Lehren die zulässige Herstellungsgenauigkeit überschritten. Auf Beschluß des Ausschusses für Meßwesen soll aber die Herstellungsgenauigkeit gewährleistet, daß die Abweichungen auf keinen Fall über die angegebenen Werte hinausgehen. Es muß deshalb beim Hersteller die Abnahme mit engeren Grenzen erfolgen, die man erhält, wenn man von den festgelegten Werten die sämtlichen möglichen Meßfehler einschließlich der Unsicherheit der Kenntnis der Korrekturen der Normalen abzieht.

So entstand die 2. Auflage der DIN 168 vom 18. November 1922, die noch für die Bohrungen und Wellen der Edelpassung verschiedene Herstellungsgenauigkeiten vorsah. Während nämlich die Bohrungslehren ein sekundäres Produkt sind, da sie unmittelbar an Endmaße angeschlossen werden, stellen die Rachenlehren ein tertiäres Meßgerät dar, da ihr Maß

ja erst durch das der Meßscheiben (die wie die Bohrungslehren unmittelbar an Endmaße angeschlossen werden und somit ein sekundäres Produkt sind) gegeben ist. Durch die Verbesserung der Meßmethoden und -geräte ist es aber allmählich möglich geworden, die Meßscheiben für Sonderzwecke so genau herzustellen, daß man auch den Rachenlehren der Edelpassung die gleiche Herstellungsgenauigkeit wie ihren Bohrungslehren zu geben vermag. Als nun die Herabsetzung der Toleranz der Wellen der Edelpassung von 1 auf  $\frac{3}{4}$  Paßeinheiten eine Neuaufstellung der Herstellungsgenauigkeiten erforderlich machte, wurden diese Fortschritte berücksichtigt. Das jetzt für die Herstellungsgenauigkeit geltende Normblatt trägt die Nummer DIN 2057.

Für die Ausschußseite liegt die Herstellungsgenauigkeit symmetrisch  $\pm$  zum Sollmaß, so daß also das Toleranzfeld um ihren einseitigen Betrag vergrößert oder verkleinert werden kann. Auf der Gutseite liegt sie mit demselben Gesamtbetrag einseitig gegen die Abnutzung, ist also für Wellenlehren negativ, für Bohrungslehren positiv (siehe Abb. 478a und b). Bei der Edel- und der Feinpassung beträgt die Herstellungsgenauigkeit  $\frac{1}{2}$  bis  $\frac{1}{3}$  der Toleranz, so daß also dadurch das Toleranzfeld unter Umständen auf  $\frac{1}{4}$  seines Betrages verkleinert

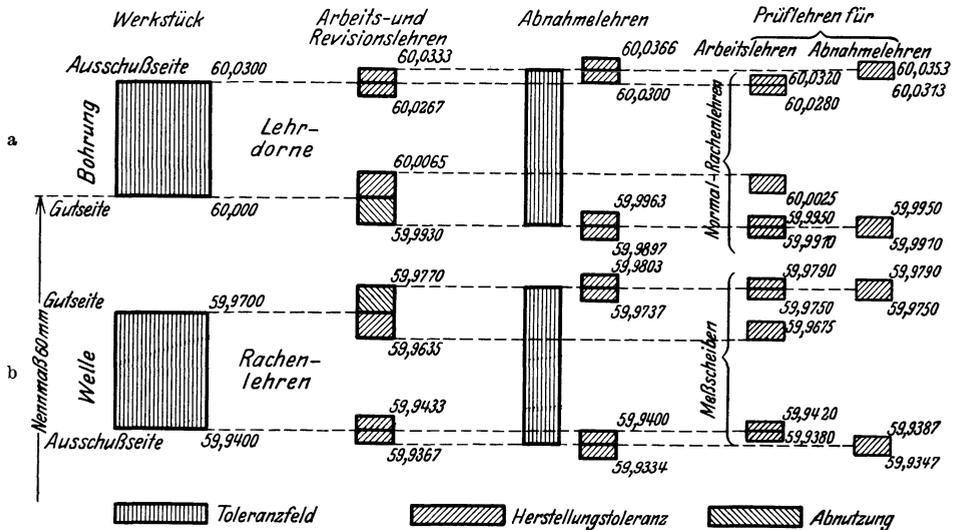


Abb. 478. Herstellungsgenauigkeit und Abnutzung der Arbeits-, Abnahme- und Prüflehren.

werden kann; bei der Schlicht- und der Grobpassung macht sie dagegen nur  $\frac{1}{3}$  bis  $\frac{1}{4}$  bzw.  $\frac{1}{5}$  bis  $\frac{1}{7}$  der Toleranz aus. Das Toleranzfeld nähert sich mit fortschreitender Abnutzung allmählich seinem theoretischen Betrage. Bei einer neuen Lehre, die genau das Sollmaß hätte, wäre aber überhaupt keine Abnutzung mehr möglich und würde die Lehre nach kurzer Benutzungsdauer unbrauchbar. Um auch diesem Falle Rechnung zu tragen, ist noch eine über das Sollmaß nach der entgegengesetzten Seite (also bei Wellenlehren nach Plus, bei Bohrungslehren nach Minus) gehende Abnutzung zugelassen, deren Betrag auf den einzelnen Passungsblättern und in DIN 2060 angegeben ist (da die Ausschußseite sich nicht mit dem Werkstück paaren läßt, braucht hier keine Abnutzung vorgesehen zu werden). Bei nicht genormten Lehren wird man Herstellungsgenauigkeit und Abnutzung entsprechend wählen.

Die zulässigen Abnutzungen betragen danach für

Toleranz . . . . .	0,75	1	1,5	2	2,5	3	3,5	5,5	10 PE
Abnutzung . . . . .	0,2	0,25	0,35	0,4	0,5	0,6	0,6	0,6	1,5 „
Angehärtes Verhältnis . .	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{7}$

Zulässige Abnutzung der Arbeitslehren — Gutseite.											
DIN 2060.											
Werte in $\mu$ ( $1 \mu = 1/1000$ mm).											
Einheitsbohrung.											
Nenn- durchmesser- bereich	Lehrdorne, Flachlehren, Kugelendmaße				Rachenlehren						
	Edel-	Fein-	Schlicht-	Grob-	Edelp.	Feinpassung			Schlichtp.	Grobp.	
						passung	L	LL			WL
mm					alle Sitze	P, F, T, H, S, G, EL	L	LL	WL	alle Sitze	
über 1— 3		2	3	9		1,5	2	2,5	3	3	9
„ 3— 6	2	3	5	12	1,5	2	3	3	4	5	12
„ 6— 10	2,5	3,5	5	15	2	2,5	3,5	4	5	5	15
„ 10— 18	3	4	8	18	2,5	3	4	5	6	8	18
„ 18— 30	4	5	8	22	3	4	5	6	8	8	22
„ 30— 50	4,5	6	10	25	3,5	4,5	6	7	9	10	25
„ 50— 80	5	7	12	30	4	5	7	8	10	12	30
„ 80—120	6	8	15	35	4,5	6	8	9	11	15	35
„ 120—180	7	9	15	40	5	7	9	10	13	15	40
„ 180—260	8	10	30	45	6	8	10	12	15	20	45
„ 260—360	9	12	20	50	7	9	12	14	18	20	50
„ 360—500	10	14	25	60	8	10	14	16	20	25	60
Paßeinheiten ~	0,25	0,35	0,6	1,5	0,2	0,25	0,35	0,4	0,5	0,6	1,5
Einheitswelle.											
Nenn- durchmesser- bereich	Rachenlehren				Lehrdorne, Flachlehren, Kugelendmaße						
	Edel-	Fein-	Schlicht-	Grob-	Edelp.	Feinpassung			Schlichtp.	Grobp.	
						passung	L	LL			WL
mm					alle Sitze	P, F, T, H, S, G, EL	L	LL	WL	alle Sitze	
über 1— 3		1,5	3	9		2	2,5	3	3	3	9
„ 3— 6	1,5	2	5	12	2	3	3	4	5	5	12
„ 6— 10	2	2,5	5	15	2,5	3,5	4	5	5	5	15
„ 10— 18	2,5	3	8	18	3	4	5	6	8	8	18
„ 18— 30	3	4	8	22	4	5	6	8	8	8	22
„ 30— 50	3,5	4,5	10	25	4,5	6	7	9	10	10	25
„ 50— 80	4	5	12	30	5	7	8	10	12	12	30
„ 80—120	4,5	6	15	35	6	8	9	11	15	15	35
„ 120—180	5	7	15	40	7	9	10	13	15	15	40
„ 180—260	6	8	20	45	8	10	12	15	20	20	45
„ 260—360	7	9	20	50	9	12	14	18	20	20	50
„ 360—500	8	10	25	60	10	14	16	20	25	25	60
Paßeinheiten ~	0,2	0,25	0,6	1,5	0,25	0,35	0,4	0,5	0,6	0,6	1,5

Durch die zulässige Abnutzung kann also das Toleranzfeld um  $1/4$  bis  $1/9$  und unter Hinzurechnung der einseitigen Herstellungsgenauigkeit der Ausschußseite um  $1/2$  bis  $1/4$  seines Betrages vergrößert werden.

Zur näheren Erläuterung seien die Lehren zur Prüfung eines Laufsitzes der Einheitsbohrung der Feinpassung von 60 mm Durchmesser betrachtet (Abb. 478). Nach den DIN-Normen soll die Rachenlehre zur Kontrolle der Welle folgende Maße haben (HG = Herstellungsgenauigkeit, Ab = Abnutzung) (s. S. 304):

	Gutseite	Ausschußseite
Welle, Sollmaß . . . . .	59,970	59,940
Infolge der HG von $-6,5$ bzw. $\pm 3,3 \mu$ kann das Maß schwanken von . . . . .	59,970—59,9635	59,9433—59,9367
Infolge der Ab von $7 \mu$ von . . . . .	59,977—59,9635	59,9433—59,9367
Bohrung, Sollmaß . . . . .	60,000	60,030
Infolge der HG von $+6,5$ bzw. $\pm 3,3 \mu$ kann das Maß schwanken von . . . . .	60,000—60,0065	60,0267—60,0333
Infolge der Ab von $7 \mu$ von . . . . .	59,993—60,0065	60,0267—60,0333

Damit ergeben sich:

	Gut	Aussch.	Toleranzfeld
Welle, Abmaße in $\mu$ :			
Soll . . . . .	$-30$	$-60$	30
Extremwerte . . . . .	$-23$	$-63,3$	40,3
	$-36,5$	$-56,7$	20,2
Bohrung, Abmaße in $\mu$ :			
Soll . . . . .	$\pm 0$	$+30$	30
Extremwerte . . . . .	$-7$	$+33,3$	40,3
	$+6,5$	$+26,7$	20,2
	Soll	Min.	Max.
Mindestspiel in $\mu$ (kleinste Bohrung — größte Welle) . . . . .	30	16	43
Größtspiel in $\mu$ (größte Bohrung — kleinste Welle) . . . . .	90	83,4	96,6

Infolge der Herstellungsgenauigkeit und der Abnutzung der Lehren kann also das Toleranzfeld in dem betrachteten Beispiel von 1,5 PE auf etwa 2 PE vergrößert oder auf 1 PE verkleinert, ferner das Mindestspiel von 1,5 PE auf etwa  $2\frac{1}{4}$  PE erhöht oder auf  $\frac{3}{4}$  PE verringert werden, während das Größtspiel von 4,5 PE nur um etwa  $\pm \frac{3}{8}$  PE geändert wird.

Für die Herstellung in der Werkstatt und für die Kontrolle in der Revision des Herstellers werden Lehren gleicher Art benutzt, so daß also kein Unterschied zwischen Arbeits- und Revisionslehren gemacht wird. Würden nun die Arbeitslehren schon weitgehend abgenutzt, die Revisionslehren dagegen verhältnismäßig neu sein und womöglich noch an den Grenzen der zulässigen Herstellungsgenauigkeit liegen, also die Werte aufweisen:

Arbeitslehre für Welle 59,977,      für Bohrung 59,993,  
Revisionslehre für Welle 59,9635      für Bohrung 60,0065,

so würden die Revisionslehren nicht über die Wellen hinüber- bzw. in die Bohrungen hineingehen, die sich mit den Arbeitslehren hatten paaren lassen, was zu Meinungsverschiedenheiten zwischen Arbeiter und Revisor führen würde, da beide nach ihren Lehren im Recht sind. Um derartige Streitigkeiten auszuschließen, soll man der Werkstatt stets die neuen, der Revision dagegen die bereits abgenutzten Lehren geben, da dann ein Werkstück, das sich mit der Gutseite der Arbeitslehre paaren läßt, dies mit der der Revisionslehre auf jeden Fall tut. Eine weitere Möglichkeit zu derartigen Meinungsverschiedenheiten läge nun auch auf der Ausschußseite vor. Hat die Werkstatt etwa eine Rachenlehre mit dem Maß 59,937, die Revision dagegen mit 59,940 oder gar 59,943, so würde diese über das Werkstück hinüber gehen, während dies mit der Arbeitslehre nicht möglich war. Derartige Fälle schalten sich aber praktisch dadurch aus, daß sich der Arbeiter stets bemüht, möglichst nahe der Gutseite zu bleiben, so daß man im allgemeinen damit rechnen kann, daß die Wellen etwa in der

der Gutseite benachbarten Hälfte des Toleranzfeldes liegen, während man bei Bohrungen erfahrungsgemäß etwa  $\frac{2}{3}$  des Toleranzfeldes dafür ansetzen muß, da die Bohrungslehren schwerer einzuführen als die Rachenlehren über die Wellen zu bringen sind. Tritt trotzdem gelegentlich auf der Ausschußseite eine derartige Differenz auf, so muß die Kontrolle mit der Arbeitslehre vorgenommen werden (nachdem man sich davon überzeugt hat, daß sie innerhalb der Herstellungsgenauigkeit liegt), da selbstverständlich (in obigem Beispiel) jede Welle zwischen 59,977 und 59,9367 mm bzw. jede Bohrung zwischen 59,993 und 60,0333 mm als abnahmefähig zu gelten hat.

Während die Arbeits- und die Revisionslehren des Herstellers identisch sind, müssen für die Abnahme durch den Besteller besondere Abnahmelehren vorgesehen werden, da ja nach den DIN-Toleranzen jedes Werkstück zulässig ist, das innerhalb der durch die Toleranzen, die Herstellungsgenauigkeit und die Abnutzung der Arbeitslehren gegebenen Grenzen bleibt. Würden die Abnahmegenaue so wie die Arbeitslehren ausgeführt werden, so würden sich die vorher erwähnten Mißstände in noch verstärktem Maße bemerkbar machen, da die Abnahmelehren ihres selteneren Gebrauchs wegen viel weniger abgenützt werden als die Arbeits- und auch die Revisionslehren. Damit ergibt sich, daß die Gutseiten der Abnahmelehren das Maß der völlig abgenutzten Arbeitslehren, ihre Ausschußseite das unter Berücksichtigung der Herstellungsgenauigkeit der Arbeitslehren mögliche Kleinstmaß bei Wellen- und Größtmaß bei Bohrungslehren erhalten müssen (siehe Abb. 478a und b).

Für das vorher betrachtete Beispiel des Laufsitzes der Einheitsbohrung der Feinpassung, 60 mm Durchmesser, würde gelten:

		Gutseite	Ausschußseite
Welle.	Arbeitslehre, Sollmaß . . .	59,970	59,940
	Abnahmelehre, Sollmaß . . .	59,977	59,9367
Bohrung.	Arbeitslehre, Sollmaß . . .	60,000	60,030
	Abnahmelehre, Sollmaß . . .	59,993	60,0333

Um ganz sicher zu gehen, hätte man die Herstellungsgenauigkeit der Abnahmelehren so verlegen müssen, daß die Lehre niemals in das soeben angegebene Toleranzfeld hineinreichte. Dadurch wäre dies aber auf jeder Seite nochmals um die Herstellungsgenauigkeit von  $6,5 \mu$ , insgesamt also um  $13 \mu$  erweitert worden. Da dies nicht anging, so wurde die Herstellungsgenauigkeit symmetrisch  $\pm$  zu den Sollwerten verlegt.

Für das obige Beispiel würden sich damit folgende Verhältnisse ergeben:

		Gutseite	Ausschußseite
Welle.	Arbeitslehre . . . . .	59,977 — 59,9635	59,9433 — 59,9367
	Abnahmelehre . . . . .	59,9803 — 59,9737	59,9400 — 59,9334
Bohrung.	Arbeitslehre . . . . .	59,993 — 60,0065	60,0267 — 60,0333
	Abnahmelehre . . . . .	59,9897 — 59,9663	60,030 — 60,0366

Daraus folgen die Abmaße:

		Gut	Aussch.	Toleranzfeld
Welle.	Abnahmelehre Soll . . .	— 23	— 63,3	40,3
	Extreme .	— 19,7	— 66,6	46,9
		— 26,3	— 60	33,7
Bohrung.	Abnahmelehre Soll . . .	— 7	+ 33,3	40,3
	Extreme .	— 10,3	+ 36,6	46,9
		— 3,7	+ 30	33,7

Danach wäre es theoretisch möglich, daß ein nach einer richtigen Arbeitslehre abgenommenes Werkstück von der Abnahmelehre zurückgewiesen werden würde. Liegt nämlich in obigem Beispiel ihre Gutseite bei der Rachenlehre zwischen  $-23$  und  $-26,3 \mu$ , so geht sie nicht über die mit einem Abmaß von  $-23 \mu$  hergestellte Welle und liegt ihre Ausschußseite zwischen  $-63,3$  und  $-60 \mu$ , so läßt sie sich über die mit einem Abmaß von  $-63,3 \mu$  hergestellte Welle hinüberbringen. Diese Möglichkeiten können zwar auf dem Papier auftreten, nicht aber praktisch, da ja der Arbeiter nie die völlig, sondern die allenfalls zur Hälfte abgenutzte Lehre bekommt, so daß die kleinste Gutseite des Werkstücks höchstens ein Abmaß von  $-26,5 \mu$  aufweist und somit die Abnahmelehre stets hinübergeht. Auf der Ausschußseite verschwinden aber die Schwierigkeiten, genau wie vorher bei der Revision erörtert, dadurch, daß sich der Arbeiter immer möglichst nahe der Gutseite hält, so daß seine Ausschußseite praktisch stets bei  $-48$  oder höchstens  $-55 \mu$  liegt, die Abnahmelehre also stets kleiner als das Werkstück ist. Diese Ausführungen gelten entsprechend auch für die Abnahme von Bohrungen. Beim Zusammentreffen aller unglücklichen Umstände könnte es natürlich — in alleräußerster Seltenheit — einmal vorkommen, daß jene theoretischen Möglichkeiten auftreten. Dann muß durch Kontrolle der Arbeitslehren festgestellt werden, daß die Werkstücke innerhalb der Toleranz liegen und abnahmefähig sind.

Durch die zulässige Abnutzung kann es auch kommen, daß der Charakter eines Sitzes ungünstig beeinflusst wird. Für einen mit einer neuen Lehre hergestellten Gleitsitz der Feinpassung würde im äußersten Falle eine Berührung von Bohrung und Welle an der Nulllinie auftreten (Abb. 479 a). Sind sie aber beide nach

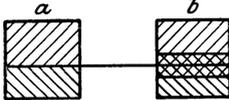


Abb. 479. Gleitsitz bei  
a neuen, b abgenutzten Lehren.

völlig abgenutzten Lehren hergestellt, so würden sich die Werkstücke in dem gekreuzt schraffierten Feld der Abb. 479 b überschneiden und nicht mehr gegeneinander verschiebbar sein. Nun muß man aber bedenken, daß kaum jemals gerade Werkstücke zusammentreffen werden, die beide nach völlig abgenutzten Lehren und auch beide so nahe ihrer Gutseite ausgeführt sind (zumal ja in der Werkstatt die Lehren nie bis zur äußersten Abnutzung gebraucht werden). In der Praxis ist deshalb auch ein solcher Fall bisher nicht beobachtet.

Nach DIN 2057 ist jede Rachenlehre richtig, bei der der Abstand der Meßflächen von dem Sollwert um nicht mehr als den zulässigen Betrag abweicht, wobei aber nichts über ihre Ebenheit und Parallelität gesagt ist. Stellen in Abb. 480 a und b  $AB-CD$  und  $EF-GH$

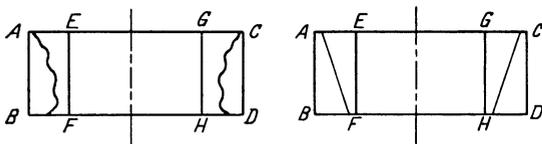


Abb. 480. Meßflächen von Rachenlehren.

die Grenzen dar, in denen die Meßflächen bei einer neuen Rachenlehre nach DIN 2057 liegen müssen, so würde diese Bestimmung auch von einer Rachenlehre erfüllt, deren Meßflächen nach den eingezeichneten Kurven oder auch geneigt gegeneinander verlaufen. Bei der Prüfung mit der Meßscheibe, deren Durchmesser man immer nur feststellen, daß die Rachenlehre nicht zu eng oder zu weit ist, es ist aber nicht möglich, zu bestimmen, ob nicht einzelne Teile der Meßflächen das zulässige Maß überschreiten. Man müßte sie dazu eigentlich punktweise (z. B. mit einem Innenführlhebel oder auch einer Innenmeßmaschine) ausmessen; die dabei auftretende Aufbiegung spielt keine Rolle, da es ja nur auf die Unterschiede der einzelnen Messungen gegeneinander ankommt (und der Angriffspunkt sich nur unbedeutend verschiebt). Die Prüfung auf Ebenheit kann man bei polierten Meßflächen (die der Rachenlehren für Schlicht- und Grobpassung werden nur geschliffen) durch Auflegen eines Planglases und Beobachtung der Interferenzen gleicher Dicke vornehmen. Bei guten Rachenlehren erhält man Bilder ähnlich wie bei Endmaßen

(siehe S. 114), bei weniger guten muß man dagegen nach Abb. 481 mit Unebenheiten von  $\pm 0,5$  bis  $1 \mu$  rechnen. Diese sind bei Schlicht- und Grobpassung durchweg, bei Edel- und Feinpassung dagegen nur bei größeren Durchmessern zu vernachlässigen, während bei solchen unter 10 mm größere Sorgfalt darauf verwendet werden müßte. Hier ist aber auch die Beobachtung der Interferenzen sehr schwierig, wenn nicht unmöglich, so daß sich die Benutzung von Rachenlehren bei diesen beiden Passungen erst von 10 mm Durchmesser aufwärts empfiehlt.

Die Parallelität der Meßflächen kann man genau so wie bei den Schraublehren angegeben (mittels Prisma und Autokollimationsfernrohr) bestimmen. Die Messung wird durch die Unebenheit erschwert, da man dadurch für verschiedene Stellen der Meßflächen ganz verschiedene Winkel erhält.

Beobachtungen im unbeanspruchten Zustande zeigten an guten Rachenlehren (1) größte Gesamtunparallelitäten von 5 bis 82 Sek., was Abweichungen von 0,3 bis  $12 \mu$  ergibt (die größten Winkel traten im allgemeinen auch gerade bei den größten Meßflächen auf). Im Durchschnitt kann man bei guten Rachenlehren mit Unparallelitäten von  $\pm 0,5$  bis  $1 \mu$  rechnen. Es gelten also hierfür dieselben Ausführungen wie für die Unebenheit. Bei größeren Rachenlehren ist aber eine Kontrolle auf Parallelität doch sehr notwendig, besonders bei Rachenlehren für Edel-, Fein- und Schlichtpassung, um zu sehen, daß der Abstand verschiedener Punkte der Meßflächen

nicht außerhalb der zulässigen Herstellungsgenauigkeit liegt, wodurch die Abnutzung eine zu starke wird, da sie bei den engsten Stellen sehr rasch einsetzt. Durch Belastung mit 10 kg senkrecht zu den Meßflächen trat eine proportional dem angehängten Gewicht verlaufende Änderung der Unparallelität um 5 bis 114 Sek. auf, so daß dadurch der Abstand verschiedener Punkte nochmals um etwa den gleichen Betrag wie oben angegeben verändert werden könnte. Beim praktischen Gebrauch wird man bei kleinen Lehren nur mit einer Seitenkraft von etwa 200 g zu rechnen brauchen (dem Doppelten des durch das Eigengewicht ausgeübten Meßdruckes, siehe S. 293), während man bei größeren bis zu 10 kg (entsprechend einem Gewicht von 5 kg) kommt. Während also die Änderung der Parallelität bei kleinen und mittleren Lehren im allgemeinen zu vernachlässigen sein wird, kann sie bei größeren Lehren, namentlich bei zu schwacher Bügelkonstruktion, doch recht störend wirken. Man sollte deshalb bei großen Lehren für eine recht kräftige Ausführung sorgen. Man könnte auch daran denken, die Meßflächen so zu legen, daß sie im unbeanspruchten Zustande nach vorne zu schwach konvergent verlaufen; dies empfiehlt sich aber deshalb nicht, weil dadurch die Einführung des Prüflings erschwert und infolgedessen ein falsches Maß vorgetäuscht wird. Die Prüfung der Parallelität der Meßflächen sollte deshalb stets im unbeanspruchten Zustande und ferner so geschehen, daß man senkrecht zu ihren Meßflächen eine Kraft von etwa dem doppelten Eigengewicht (jedoch mindestens 200 g) angreifen läßt, da man damit einen guten Aufschluß über die Konstruktion ihres Bügels erhält. Vielleicht dürften sich auch hier Vorschriften über die zulässige Aufbiegung empfehlen (die man übrigens auch mit einem Innenführlhebel ermitteln könnte).

Bei den Bohrungslehren ist durch die Angabe der Herstellungsgenauigkeit gleichfalls nur gesagt, daß jeder Punkt zwischen den Grenzen  $ABCD$  und  $A'B'C'D'$  (Abb. 468) zu liegen hat, während die Rundheit und die Konizität innerhalb dieser Grenzen schwanken kann. Im allgemeinen sind die dabei auftretenden Fehler aber nur gering und bleiben bei sorgfältiger Herstellung unter  $\pm 0,5 \mu$ , was sich auch mit Auslandserfahrungen deckt (3). Gelegentlich sind aber auch größere Abweichungen (bis zu  $3 \mu$  bei einem 30-mm-Lehrdorn) beobachtet. Man sollte deshalb Lehrdorne stets in mehreren Kreisdurchmessern und auch in verschiedenen Höhen prüfen, um festzustellen, daß sie nirgends die zulässige Herstellungsgenauigkeit überschreiten. Ferner ist auch die Prüfung daraufhin zu erstrecken, daß der Querschnitt des Lehrdorns kein Gleichdick ist. Ähnlich werden auch Flachlehren und Kugelm Maße kontrolliert, wobei man sie in verschiedene Lagen zwischen den einander parallelen Meßflächen der Meßmaschine bringt (von deren Parallelität man sich also vorher überzeugt haben muß). Es ist dies immer noch das einfachste und genaueste Verfahren zur Prüfung von Kugelmäßen. Im allgemeinen wird man mit Abweichungen von der

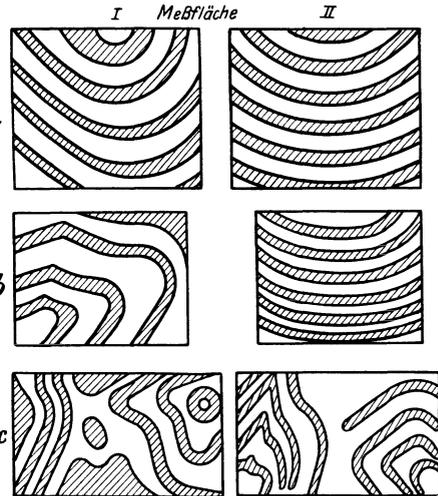


Abb. 481. Interferenzen an Meßflächen von Rachenlehren.

Kugelform von  $\pm 0,5$  bis  $2\mu$  rechnen müssen. Die Bestimmung des Krümmungshalbmessers mit dem Sphärometer (siehe S. 249 u. 273) ist kaum durchzuführen, da dazu die Meßflächen von höchstens 20 mm Durchmesser nicht ausreichen. Die Methode der Beobachtung der Newtonschen Interferenzringe unter einem aufgelegten Probeglas (siehe S. 113) ist meist wegen der unvollkommenen Politur der Meßflächen nicht durchzuführen und würde auch der vielen benötigten Probegläser wegen zu kostspielig werden. Die sonstigen optischen Methoden<sup>1</sup> (bei denen der Krümmungshalbmesser aus der Größe der Spiegelbilder und der Gegenstandsweite ermittelt wird) geben bei weitem nicht die verlangte Genauigkeit. Eine Prüfung soll sich dadurch ermöglichen lassen, daß man ein aus etwa 10 mm breiten Papierstreifen hergestelltes Quadrat von 450 bis 500 mm Kantenlänge sich so in dem Kugelendmaß spiegeln läßt, daß eine Seite durch den Pol geht, wobei ihr Spiegelbild eine Gerade wird (Abb. 482) und auch bei der Rotation des Endmaßes um seine Achse eine Gerade bleiben muß, falls die Meßfläche wirklich eine Kugelfläche ist (2). Erfahrungen über die damit zu erreichende Genauigkeit liegen nicht vor.

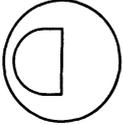


Abb. 482.  
Prüfung von  
Kugelendmaßen.

Was vorher für die Grenzlehren ausgeführt wurde, gilt entsprechend auch für die Normallehrendorne und -ringe. Die letzteren sind gleichfalls in verschiedenen Durchmessern und Höhen mittels Innenfühlebens auf Unrundheit und Konizität zu kontrollieren, wobei sich zugleich zeigt, ob etwa ein Gleichdick vorliegt. Bei sorgfältiger Ausführung bleiben diese Fehler in den Grenzen von  $\pm 0,3$  bis  $1\mu$ .

### 3. Prüflehren.

Da das Maß der Rachenlehre durch den Durchmesser der zylindrischen Lehre gegeben ist, über den sie, leicht eingefettet, durch ihr Eigengewicht gerade eben hinübergeht, so braucht man zur Herstellung der Rachenlehren zwei derartige Prüflehren (für die Gut- und für die Ausschußseite). Sie werden für Durchmesser bis 100 mm in der Form

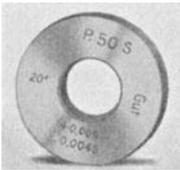


Abb. 483. Meßscheibe.

flacher Lehrdorne als Meßscheiben (Abb. 483), für Durchmesser über 100 bis 260 mm als Meßstäbe (Abb. 484) und über 260 mm als Kugelendmaße ausgeführt (um das Verziehen beim Härten nach Möglichkeit zu vermeiden).

Nun braucht auch der Benutzer auf jeden Fall noch eine Meßscheibe, um festzustellen, daß die zulässige Abnutzung noch nicht überschritten ist. Aber auch die Ausschußseite bedarf im Betriebe der Kontrolle. Ist nämlich eine Welle Ausschuß geworden, so liegt für den Arbeiter die Versuchung zu nahe, die Rachenlehre im Schraubstock etwas zusammenzubiegen und dann zu behaupten, daß er sie so erhalten habe. Ebenso könnte er, um Arbeit zu sparen, die Gutseite etwas aufbiegen, was praktisch aber als Überschreiten der Abnutzung sehr bald in

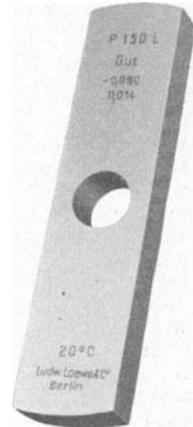


Abb. 484. Meßstab.

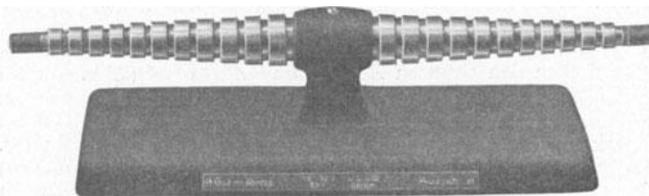


Abb. 485. Meßscheiben auf Ständer.

Erscheinung träte. Ein Zusammenbiegen der Gutseite ist dagegen nicht zu befürchten, da damit das Toleranzfeld verengert würde.

Um alle derartigen Möglichkeiten auszuschließen, empfiehlt

es sich, dem Arbeiter bei der Ausgabe vorzuführen, daß die Gutseite noch nicht über die Abnutzungs-Prüflehre hinübergeht, daß dagegen die

<sup>1</sup> Siehe z. B. G. Berndt: Physikalisches Praktikum 1.

Ausschußseite über die dafür bestimmte Prüfllehre gerade eben hinübergleitet. Ebenso muß man sich bei der Rückgabe davon überzeugen, um zu sehen, daß die Ausschlußseite nicht willkürlich geändert ist, und ferner, um etwa an der Grenze der Abnutzung liegende Rachenlehren ausscheiden und zur Aufarbeitung geben zu können. Zu dem Zweck werden die benötigten Meßscheiben und -stäbe am besten auf Ständern nach Abb. 485 und 486 angeordnet.

Demnach sind 3 Arten von Meßscheiben zu unterscheiden, für Gutseite neu, für Gutseite abgenutzt und für Ausschlußseite, von denen aber für den Benutzer nur die beiden letzteren notwendig sind.

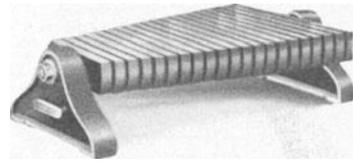


Abb. 486. Meßstäbe auf Ständer.

Bei den Bohrungslehren braucht der Hersteller keine Prüfllehren, da sie unmittelbar mit Endmaßen verglichen werden. Auch die Prüfung auf Abnutzung könnte man beim Gebraucher in derselben Weise vornehmen. Um aber auch bei der Ausgabe die Richtigkeit vorzeigen zu können, nimmt man hier (einseitige) Normalrachenlehren (Abb. 487), die über die Gutseite der Arbeitslehren nicht hinübergehen dürfen. Die Ausschlußseite von Lehdornen und Flachlehren braucht nicht kontrolliert zu werden, da sie vom Arbeiter nicht willkürlich geändert werden kann, ohne deutliche Spuren zu hinterlassen. Dagegen wäre es bei Kugelmessern möglich, sie durch einige Hammerschläge zu strecken, deren Eindrücke dann durch den Isoliergriff verdeckt würden. Deshalb ist zweckmäßig für diese auch eine Prüf-Normalrachenlehre vorzusehen.



Abb. 487. Prüfrachenlehre.

Den Sollwert der Prüfllehren für die Ausschlußseite wird man möglichst gleich dem Sollwert der Arbeitslehren machen; dasselbe wird auch für die Gutseite abgenutzt gelten. Um eine große Abnutzungsmöglichkeit bei der Arbeitslehre zu erhalten, wird man dagegen der zur Herstellung benutzten Prüf-Meßscheibe für Gutseite neu einen Sollwert geben, der gleich dem Kleinstwert der Rachenlehre ist.

Entsprechende Prüfllehren wird man auch zur Kontrolle der Abnahme-Rachenlehren benutzen, bei denen aber keine Abnutzung vorgesehen ist, so daß man hier nur Prüfllehren für Gutseite neu und für Ausschlußseite braucht, die einen Sollwert gleich dem der Abnahmelehren erhalten.

Nun muß aber auch den Prüfllehren eine Herstellungsgenauigkeit zugestanden werden. Ihre Lage ergibt sich aus Abb. 478a und b (in die auch die Prüfrachenlehren für Gutseite neu aufgenommen sind, obwohl diese praktisch nicht vorkommen). Sie liegen also für Ausschlußseite und für Gutseite abgenutzt der Arbeitslehren, bzw. für Gutseite neu der Abnahmelehren, welche letztere beide identisch sind, symmetrisch  $\pm$  zu den Sollwerten. Für die Gutseite neu der Arbeitslehren sind sie dagegen einseitig so verlegt, daß das Toleranzfeld nicht noch weiter verengert wird. Sie werden also bei den Rachenlehren von ihrem Kleinstwert aus nach Plus, bei den Bohrungslehren von ihrem Größtwert aus nach Minus angeordnet. Die Größe der Herstellungsgenauigkeit der Prüfllehren ist in DIN 2058/59 niedergelegt (siehe folgende Tabelle, in die beide zusammengefaßt sind), wobei die Stufung bis  $1\ \mu$  nach  $\frac{1}{10}\ \mu$ , bis  $3\ \mu$  nach  $\frac{1}{4}\ \mu$  (unter Abrundung auf ,3 und ,8), bis  $5\ \mu$  nach  $\frac{1}{2}\ \mu$  und über  $5\ \mu$  nach  $\frac{1}{1}\ \mu$  erfolgt ist.

**Herstellungsgenauigkeit der Prüflöhren für Wellen- und Bohrungslehren.  
DIN 2058 und 2059 (früher DIN 171 und 172).**

Werte in  $\mu$  ( $1 \mu = \frac{1}{1000}$  mm).

Prüflöhren für Wellenlehren sind Meßscheiben und Endmaße mit Zylinderflächen.

Die Bohrungslehren werden zweckmäßig unmittelbar mit Endmaßen verglichen; wo dies nicht möglich ist, müßten Prüflöhren mit nachstehenden Abmaßen Anwendung finden.

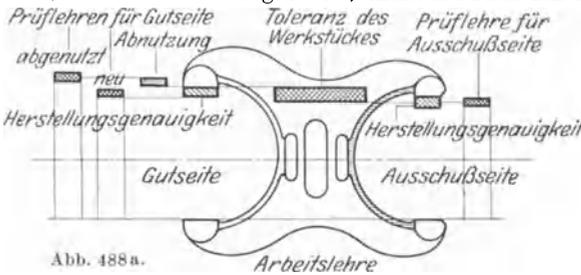


Abb. 488 a.

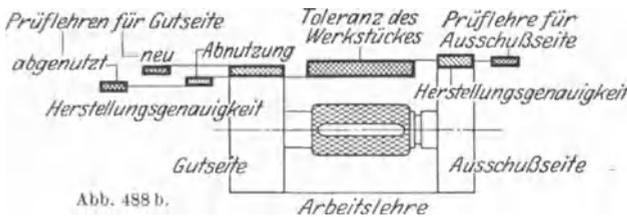


Abb. 488 b.

Abb. 488 a und b. Die schraffierten Felder im Bild geben nur die gegenseitige Lage der Toleranzen, nicht aber deren Größe an.

Zu unterscheiden sind Prüflöhren für

1. die Gutseite der abgenutzten Arbeitslehre,
  2. die Ausschlußseite der Arbeitslehre (Sollmaß)<sup>1</sup>
- und gegebenenfalls
3. die Gutseite der neuen Arbeitslehre. (Abb. 488 a und b.)

Dabei gilt:

- A für das Größt- (Kleinst-) Maß der abgenutzten Arbeitslehre, Gutseite<sup>2</sup>, für das Sollmaß der Abnahmelehren, Gutseite<sup>1</sup>, für das Sollmaß der Arbeits- und Abnahmelehren, Ausschlußseite, Gutseite<sup>1</sup>, für das Kleinst- (Größt-) Maß der neuen Arbeitslehren, Gutseite<sup>3</sup>,

und zwar bezieht sich bei den abgenutzten Lehren das Größtmaß auf die Wellen-, das Kleinstmaß auf die Bohrungslehren, bei den neuen Arbeitslehren das Kleinstmaß auf die Wellen-, das Größtmaß auf die Bohrungslehren.

Zulässige Abweichungen (für die Kleinstmaße der neuen Wellenlehren +, für die Größtmaße der neuen Bohrungslehren -).

Durchmesserbereich mm	1. Güte für Edelpassungslehren		2. Güte für Feinpassungslehren		3. Güte für Schlicht- und Grobpassungslehren	
	A	B	A	B	A	B
über 1— 3			± 1,0	2,0	± 1,5	3,0
„ 3— 6	± 0,7	1,4	1,0	2,0	1,5	3,0
„ 6— 10	0,8	1,6	1,3	2,5	1,8	3,5
„ 10— 18	0,9	1,8	1,3	2,5	2,0	4,0
„ 18— 30	1,0	2,0	1,5	3,0	2,3	4,5
„ 30— 50	1,3	2,5	1,8	3,5	2,5	5,0
„ 50— 80	1,5	3,0	2,0	4,0	3,0	6,0
„ 80—120	2,0	4,0	2,8	5,5	4,0	8,0
„ 120—180	2,5	5,0	3,5	7,0	5,0	10,0
„ 180—260	3,0	6,0	4,5	9,0	7,0	14,0
„ 260—360	4,0	8,0	6,0	12,0	9,0	18,0
„ 360—430	5,0	10,0	7,0	14,0	10,0	20,0
„ 430—500	6,0	12,0	8,0	16,0	11,0	22,0

<sup>1</sup> Sollmaß = Nennmaß + (bzw. -) Abmaß.

<sup>2</sup> Größt- (Kleinst-) Maß der abgenutzten Wellen- (Bohrungs-) Arbeitslehre = Nennmaß + (bzw. -) oberes (unteres) Abmaß + (-) zulässige Abnutzung.

<sup>3</sup> Kleinst- (Größt-) Maß der neuen Wellen- (Bohrungs-) Arbeitslehre = Nennmaß + (bzw. -) oberes (unteres) Abmaß + (-) Herstellungsgenauigkeit nach DIN 2057.

Die Ziffern ,3 und ,8 sind Abrundungen für ,25 und ,75  $\mu$ .

Für das früher betrachtete Beispiel: Laufsitz der Einheitsbohrung der Feinpassung 60 mm Durchmesser wird:

	Soll	Herstellungsgenauigkeit
Rachenlehre, Gutseite, abgenutzt . . . . .	59,977	59,977 —59,970
Prüflehre dazu (HG = $\pm 2,0 \mu$ ) . . . . .	59,977	59,979 —59,975 <sup>1</sup>
Rachenlehre, Ausschußseite . . . . .	59,940	59,9433—59,9367
Prüflehre dazu (HG = $\pm 2,0 \mu$ ) . . . . .	59,940	59,942 —59,938
Rachenlehre, Gutseite neu . . . . .	59,970	59,970 —59,9635
Prüflehre dazu (HG = $+ 4,0 \mu$ ) . . . . .	59,9635	59,9675—59,9635
Abnahmerachenlehre, Gutseite. . . . .	59,977	59,9803—59,9737
Prüflehre dazu (HG = $\pm 2,0 \mu$ ) . . . . .	59,977	59,979 —59,975 <sup>1</sup>
Abnahmerachenlehre, Ausschußseite . . . . .	59,9367	59,940 —59,9334
Prüflehre dazu (HG = $\pm 2,0 \mu$ ) . . . . .	59,9367	59,9387—59,9347
Bohrungslehre, Gutseite abgenutzt. . . . .	59,993	59,993 —60,000
Prüflehre dazu (HG = $\pm 2,0 \mu$ ) . . . . .	59,993	59,991 —59,995 <sup>1</sup>
Bohrungslehre, Ausschußseite . . . . .	60,030	60,0267—60,0333
Prüflehre dazu (HG = $\pm 2,0 \mu$ ) . . . . .	60,030	60,028 —60,032
Bohrungslehre, Gutseite neu . . . . .	60,000	60,000 —60,065
Prüflehre dazu (HG = $- 4,0 \mu$ ) . . . . .	60,065	60,025 —60,065
Abnahmebohrungslehre, Gutseite . . . . .	59,993	59,9897—59,9963
Prüflehre dazu (HG = $\pm 2,0 \mu$ ) . . . . .	59,993	59,991 —59,995 <sup>1</sup>
Abnahmebohrungslehre, Ausschußseite . . . . .	60,0333	60,030 —60,0366
Prüflehre dazu (HG $\pm 2,0 \mu$ ) . . . . .	60,0333	60,0313—60,0353

Infolge der Herstellungsgenauigkeit der Prüflehren kann die Abnutzung um  $2 \mu$  verkleinert oder vergrößert und dadurch das Toleranzfeld nochmals um  $2 \mu$  (auf  $42,3 \mu$ ) bei den Wellen und Bohrungen vergrößert, das Mindestspiel um  $4 \mu$  (von 16 auf  $12 \mu$ ) verkleinert werden. Praktisch hat dies aber keine Bedenken, da ja doch die völlig abgenutzten Lehren nicht in der Werkstatt verwendet werden. Ferner kann die Herstellungsgenauigkeit der Gutseite von 6,5 auf  $2,5 \mu$  verringert werden. Bei der Prüfung der Gutseite abgenutzt der Arbeitslehre tritt die Herstellungsgenauigkeit der Prüflehren weiter nicht störend in Erscheinung, wohl aber bei der Kontrolle der Ausschußseite der Arbeitslehren. So wird eine Rachenlehre mit 59,9367 mm nicht über eine Meßscheibe mit 59,942 mm hinüber gehen, während umgekehrt eine Rachenlehre mit 59,9433 mm viel zu leicht über die Meßscheibe 59,938 mm geht und deshalb vom Arbeiter in den beiden Fällen als zu klein bzw. zu groß zurückgewiesen werden würde, obwohl beide noch als richtig anzusehen sind. Über diese Schwierigkeiten kann man sich dadurch hinweghelfen, daß man die Rachenlehren den zugehörigen Meßscheiben anpassen läßt und diese bei Neubestellungen mit einsendet, wenn man nicht einen zweiten, möglichst mit dem Gebrauchssatz identischen Satz von Prüflehren dauernd beim Hersteller beläßt. Anschließend folgt daraus auch, daß man niemals die gesamte angegebene Herstellungsgenauigkeit der Ausschußseite ausnutzen kann, sondern daß sich diese im wesentlichen innerhalb des Bereiches der Herstellungsgenauigkeit der Prüflehren bewegt. Sie ist trotzdem etwas größer gehalten, um des kleinen Unterschieden bei der Kontrolle mit der Meßscheibe und auch deren etwaiger Abnutzung Rechnung zu tragen.

Auf der Gutseite neu liegen die Verhältnisse ganz entsprechend. Demnach können die Prüflehren nicht etwa zur Kontrolle auf Richtigkeit der Arbeitslehren dienen. Falls eine Rachenlehre nicht auf die zugehörige Prüfmeßscheibe paßt, bleibt nichts anderes übrig, als das Maß der Rachenlehre in der früher angegebenen Weise mit einer kleineren Meßscheibe und Ausgleich des Unter-

<sup>1</sup> Diese Prüflehren für Arbeits- und Abnahmelehren sind identisch.

schiedes (bis zu 5 mm) durch an die Meßflächen der Rachenlehre angeschobene Endmaße zu bestimmen.

Beim Gebrauch der Grenzlehren treten nun zu den durch die Herstellungsgenauigkeiten der Arbeits- und der Prüflehren bedingten Änderungen der Toleranzen noch die sonstigen Meßfehler durch die Temperatur und die Verschiedenheit der Ausdehnungen hinzu. Um sie zu verringern, dürfen die Lehren nicht in der ganzen Hand gehalten werden, sondern sind möglichst mit einem Isolierstück zu versehen, wie man dies bei Rachenlehren und Kugellendmaßen anzubringen pflegt, während man wohl die Erwärmung bei Lehdornen und Flachlehren (über 100 mm) ihrer großen Massen wegen meist wird vernachlässigen können. Die Wärmeisolierung muß sich an die Lehre nur mit einigen Vorsprüngen, nicht aber satt anlegen, damit die Luft dazwischen hindurchstreichen und den Temperatenausgleich befördern kann, ferner, damit nicht schädliche Spannungen durch die Isolierung auf die Lehren übertragen werden.

Gerade in der schweren und ungelenken Hand des Arbeiters hatten die festen Lehren ihre Berechtigung (2), da sie verhältnismäßig unempfindlich gegen raue Behandlung sind und auch ihr Verschleiß bei sachgemäßem Gebrauch verhältnismäßig gering ist (siehe S. 80). Bei ausgesprochener Massenfertigung macht sich dieser aber doch, namentlich bei kleinen Durchmessern, unwirtschaftlich bemerkbar, bei denen auch aus den anderen erwähnten Gründen den festen Lehren eine Grenze gesteckt sein dürfte. Sie versagen ferner bei sehr hohen Ansprüchen, wie sie vor allem bei der Edelpassung auftreten, da hier das Mindestspiel um 200% und mehr schwanken kann [siehe auch (1)], wobei noch der Einfluß der Temperaturunterschiede usw. von Lehre und Prüfling gänzlich außer acht gelassen ist. Noch engere Toleranzen als 0,75 PE sind deshalb mit festen Lehren nicht mehr zu kontrollieren, zum mindesten ließen sich für diese keine Prüflehren mehr herstellen. Aus diesem Grunde ist man auch in vielen Betrieben dazu übergegangen, die festen Lehren ganz oder teilweise durch Fühlhebel zu ersetzen, die ein sehr zuverlässiges und rasches Arbeiten (bis zu 2000 Messungen in der Stunde) gestatten und auch bei etwa eintretender Abnutzung sehr schnell durch Endmaße wieder eingestellt werden können. Die Schraubenlehre eignet sich hierfür weniger, da ihre Ergebnisse doch ziemlich stark von der Übung und der Gewissenhaftigkeit des Arbeiters abhängen und auch ihre Meßgenauigkeit, der Schraubenfehler wegen, vielfach nicht ausreicht, die Berücksichtigung der Korrekturen aber nur in vereinzelten Sonderfällen möglich ist, da man die Rechenarbeit aus der Werkstatt möglichst verbannen muß.

Über die Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Meßverfahren fehlt es bisher an eingehenden Unterlagen. Nachstehende Tabelle der Anstell- und Meßzeiten an einer Schleifmaschine gibt vielleicht einen kleinen Anhalt:

Länge der Welle mm	Schraublehren		Fühlhebel		Rachenlehre			
	Zahl der Mes- sungen	Zeit Min.	Zahl der Mes- sungen	Zeit Min.	grob		fein	
					Zahl der Mes- sungen	Zeit Min.	Zahl der Mes- sungen	Zeit Min.
100		1 —1,2		2,0—2,3		0,44—0,6		0,6—0,8
250	3	1,06—1,86	3	2,8—3,0	2	0,65—0,86	3	1,0—1,3
500	stei- gend	1,9 —2,1	stei- gend	3,5—4,0	stei- gend	0,9 —1,2	stei- gend	1,4—1,6
800	auf	2,7 —2,9	auf	3,7—4,2	auf	1,0 —1,25	auf	1,9—2,1
1200	14	3,5 —3,7	7	4,7—5,2		1,3 —1,5		2,7—2,9
2000		4,7 —4,9		5,8—6,7	6	1,7 —1,9	12	4,3—4,5

Diese Tabelle bezieht sich auf das Messen bei jedem Stillstand der Maschine. Die vorstehenden Zeiten werden beim Fertigschleifen benötigt: bei Messung mittels Schraublehren dreifach, bei Messung mit Fühlhebel und Rachenlehre zweifach (3).

Was man vorzieht, feste Lehren oder Fühlhebel, wird im wesentlichen von der Fabrikation, aber auch von der Erziehung und der Gewöhnung der Arbeiter abhängen. Diese muß übrigens auch beim Konstrukteur einsetzen. Um ihm einen Begriff von dem Charakter der verschiedenen (Bewegungs-)Sitze zu vermitteln, dienen die Passungsfühlgeräte. Sie bestehen zweckmäßig aus einem Ring und der benötigten Anzahl dreistufiger Dorne (Abb. 489), die so gegen die Bohrung abgestimmt sind, daß sie das Größt-, Mittel- und Kleinstspiel des betreffenden Sitzes mit ihr ergeben. Dabei muß die Paarung aber fettfrei erfolgen, da sonst ein zu fester Sitz vorge-täuscht wird. Für die festen Sitze läßt sie sich nicht vornehmen, da man bei ihnen Dorn und Ring nicht ohne Beschädigung wieder würde auseinander bringen können.

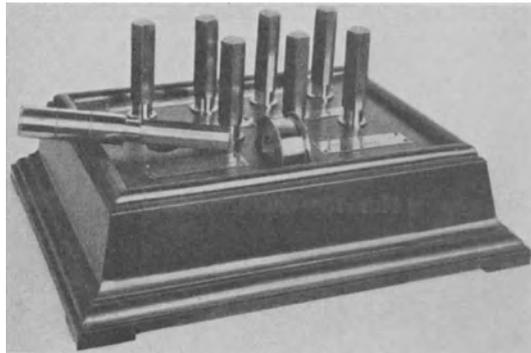


Abb. 489. Passungsfühlgerät.

Führt man den Ring schwach konisch aus, und gibt man dem Gegenstück denselben Konus, so daß zwischen ihnen ein über die Ringhöhe gleichbleibendes Spiel entsteht (4), so erhält man ein sehr kompendiöses Passungsfühlgerät (Abb. 490).

In diesem Zusammenhang sei noch auf die von verschiedenen Firmen gebauten Demonstrationsmodelle für Einheitsbohrung und Einheitswelle hingewiesen, die aber nur das Mindestspiel gefühlsmäßig erkennen lassen.

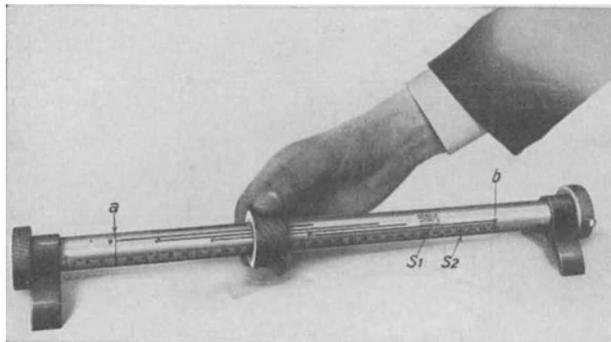
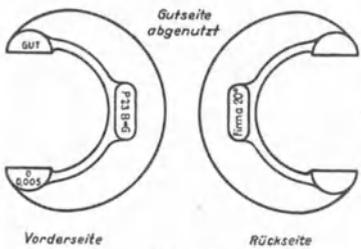
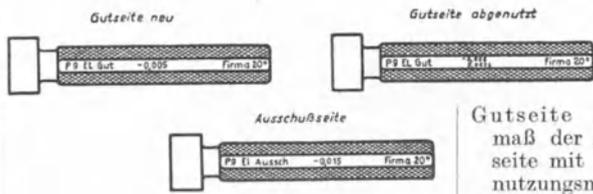
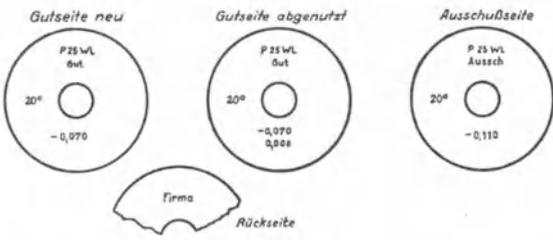


Abb. 490. Passungsfühlgerät.

#### 4. Normung der Arbeits-, Abnahme- und Prüflehren.

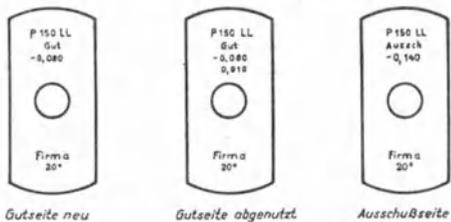
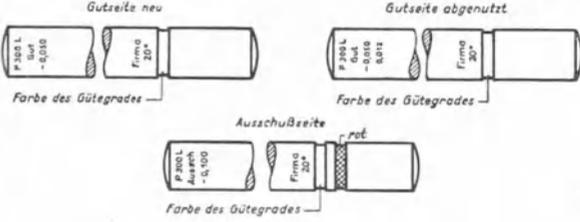
Da das Maß der Rachenlehre durch den Durchmesser der zugehörigen Meßscheibe definiert ist, über die sie, leicht eingefettet, durch ihr Eigengewicht hinübergleitet, und sich somit die bei der Justierung und beim Gebrauch erfolgende Aufbiegung aufhebt, so brauchen die als Grenz- und als Prüflehren gebrauchten Rachenlehren nicht genormt zu werden, was auch bei den verschiedenen Ausführungsformen ziemliche Schwierigkeiten bereiten würde. Dagegen sind die äußeren Maße der Prüflehren für Rachenlehren (Meßscheiben und Meßstäbe, DIN 307, 308, 305, 310), sowie der Grenzlehrdorne (DIN 306, 227, 253) und der Kugellendmaße (DIN 309) genormt. Bei letzteren ist dies für Normal- und für Grenzlehren geschehen, da sie gelegentlich auch als Einstellehren Verwendung finden. Für Flachlehren liegt bisher nur ein Entwurf in DIN E 366 vor (9). Die Normung der Baumaße ist erfolgt, um einheitliche Aufbewahrungsbrettchen oder -kästen verwenden zu können, in denen die Lehren auch dem Arbeiter übergeben werden sollen, damit sie nicht auf der Werkbank zwischen dem anderen Werkzeug herumliegen und dabei beschädigt werden.

Für die Kennzeichnung und Beschriftung der Prüflehren für Grenzlehren bzw. für Normalmeßscheiben und -stäbe liegen Normen in DIN 1812 und 1813 (8), für Grenzlehren in DIN 249, für Abnahmelehren in DIN 1811 und für Kugellendmaße als Normallehren in DIN 1813 vor (8).

Kennzeichnung und Beschriftung der Prüflehren für Grenzlehren.			
Richtlinien: DIN 1812.			
Durchmesser-Bereich mm	Art der Lehre	Kennzeichnung <sup>1</sup>	Beschriftung
1 bis 500	Prüfrachenlehre für Grenzlehren, Grenzflachlehre u. Grenzkugellendmaße. Nur für Gutseite, abgenutzt, s. Fußnote DIN 172.	Grundanstrich der Lehre in der Farbe des Gütegrades der Arbeitslehre.	„Gut“, Abmaß der Arbeitslehre, Gutseite mit Vorzeichen und Abnutzungsmaß ohne Vorzeichen auf den Meßbacken. „P“ zur Kennzeichnung als Prüflehre, Nennmaß, Gütegrad und Sitz auf der Vorderseite, Firma und Bezugstemperatur auf der Rückseite.
	 <p>Vorderseite Rückseite</p> <p>Abb. 491.</p>		
3 bis 18	Prüfmeßscheiben mit Griff nach DIN 307 für Grenzrachenlehre.		„P“ zur Kennzeichnung als Prüflehre, Nennmaß, Gütegrad, Sitz und „Gut“ bzw. „Ausschuß“.
	 <p>Gutseite neu Gutseite abgenutzt</p> <p>Ausschußseite</p> <p>Abb. 492.</p>		Gutseite neu: Abmaß der Arbeitslehre Gutseite mit Vorzeichen. Gutseite abgenutzt: Abmaß der Arbeitslehre Gutseite mit Vorzeichen u. Abnutzungsmaß ohne Vorzeichen. Ausschußseite: Abmaß der Arbeitslehre Ausschuisseite mit Vorzeichen, Firma, 20°. Die Griffe (DIN 305) für die Meßscheiben nach DIN 308 erhalten Beschriftung nach DIN 1813.
über 18 bis 100	Prüfmeßscheiben nach DIN 308 für Grenzrachenlehre.		
	 <p>Gutseite neu Gutseite abgenutzt Ausschuisseite</p> <p>Rückseite</p> <p>Abb. 493.</p>		

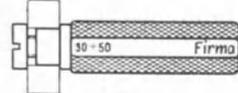
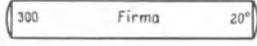
<sup>1</sup> Besondere Kennzeichnung der Prüflehren für Grenzlehren: P vor dem Nennmaß.

Die Prüflehren erhalten außer der Kennzeichnung durch den Buchstaben P als Beschriftung noch das Nennmaß mit den Zeichen für Gütegrad und Sitz (siehe DIN 776), Abmaß bzw. Abmaß und Abnutzung der Arbeitslehren, die Firma, die Bezugstemperatur 20° (Celsius), sowie die Worte „Gut“ und „Aussch.“.

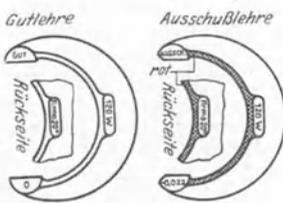
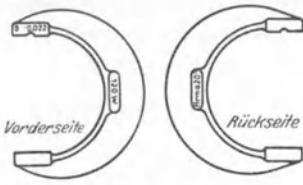
Kennzeichnung und Beschriftung der Prüflehren für Grenz-arbeitslehren.			
Richtlinien: DIN 1812 (Fortsetzung).			
Durchmesser-Bereich mm	Art der Lehre	Kenn-zeichnung <sup>1</sup>	Beschriftung
über 100 bis 260	Prüfmeßstäbe nach DIN 310 für Grenz-rachenlehre.	 <p style="text-align: center;">Abb. 494.</p>	Siehe die Bemerkungen zu Abb. 492 und 493 auf S. 314.
über 260	Prüfkugelmessmaße nach DIN 309 für Grenz-rachenlehre.	<p>Farbring entsprechend dem Gütegrad der Arbeitslehren. Ausschußseite: Roter Farbring.</p>  <p style="text-align: center;">Abb. 495.</p>	<p>Beschriftung in Richtung der Achse oder senkrecht dazu. „P“ zur Kennzeichnung als Prüflehre, Nennmaß, Gütegrad, Sitz, „Gut“ bzw. „Aussch.“.</p> <p>Gutseite neu: Abmaß der Arbeitslehre Gutseite mit Vorzeichen.</p> <p>Gutseite abgenutzt: Abmaß der Arbeitslehre Gutseite mit Vorzeichen und Abnutzungsmaß ohne Vorzeichen.</p> <p>Ausschußseite: Abmaß der Arbeitslehre Ausschußseite mit Vorzeichen, Firma, 20°.</p>

<sup>1</sup> Siehe Fußnote S. 314.

April 1927.

Kennzeichnung und Beschriftung der Normallehren.	
Richtlinien: DIN 1813 (Auszug).	
 <p>Abb. 496.</p>	<p>Abb. 496: Normalmeßscheiben nach DIN 308.</p>
 <p>Abb. 497.</p>	<p>Abb. 497: Normalmeßscheiben mit Griff nach DIN 307.</p>
 <p>Abb. 498.</p>	<p>Abb. 498: Griffe für Meßscheiben nach DIN 305.</p>
 <p>Abb. 499.</p>	<p>Abb. 499: Normalmeßstäbe nach DIN 310 für Durchmesser über 100 mm.</p>
 <p>Abb. 500.</p>	<p>Abb. 500: Normal-Kugelmessmaße nach DIN 309 für Durchmesser über 260 mm.</p>

Beschriftung in Richtung der Achse oder senkrecht dazu.

Kennzeichnung und Beschriftung der Grenzlehren. <span style="float: right;">DIN 249.</span>			
Durchmesser-Bereich mm	Art der Lehre.	Kennzeichnung	Beschriftung
1 bis 100	GrenZRachenlehre.	<p>Grundanstrich der Lehren in der Farbe des Gütegrades. Ausschußseite bzw. Ausschußlehre: verkürzte Meßflächen, hellrote Emailfarbe im Ausschußrachen.</p> 	<p>„Gut“ bzw. „Ausch.“ auf den Meßbacken, Abmaße, Nennmaß mit Zeichen für Gütegrad und Sitz auf der Vorderseite, Firma und Bezugstemperatur auf der Rückseite.</p>
Abb. 501.			
über 100	GrenZRachenlehre. Gut- und Ausschußseite getrennt.	<p>Kennzeichnung wie bei Abb. 501.</p> 	<p>„Gut“ bzw. „Ausch.“ und Abmaße auf den Meßbacken, Nennmaß mit Zeichen für Gütegrad und Sitz auf der Vorderseite, Firma und Bezugstemperatur auf der Rückseite.</p>
Abb. 502.			
	GrenZRachenlehre. Gut- und Ausschußseite in einem Rachen.	<p>Grundanstrich der Lehre in der Farbe des Gütegrades.</p> 	<p>Abmaße auf den Meßbacken, Nennmaß mit Zeichen für Gütegrad und Sitz auf der Vorderseite, Firma und Bezugstemperatur auf der Rückseite.</p>
Abb. 503.			
1 bis 100	Grenzlehrdorn.	<p>Ausschußseite: verkürzte Meßfläche und Eindrehung für die Farbe des Gütegrades.</p> 	<p>Auf dem Griffe von der Gutseite ausgehend: Unteres Abmaß, Firma, Nennmaß mit Zeichen für Gütegrad und Sitz, Bezugstemperatur und oberes Abmaß.</p>
Abb. 504.			

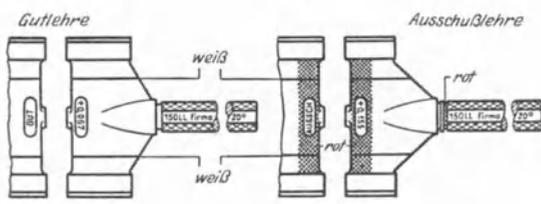
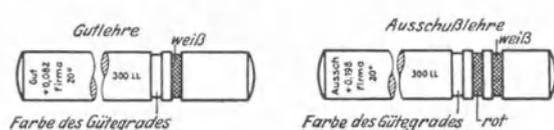
Kennzeichnung und Beschriftung der Grenzlehren. DIN 249 (Fortsetzung).											
Durchmesser-Bereich mm	Art der Lehre	Kennzeichnung	Beschriftung								
über 100 bis 260	Grenzflachlehre. Gut- und Ausschußseite getrennt.	<p>Grundanstrich der Lehren in der Farbe des Gütegrades.</p> <p>Ausschußlehre: verkürzte Meßflächen u. hellroter Strich entweder an der Stirnseite der Lehre oder in einer Eindrehung am Griff.</p>	<p>Abmaße auf den Meßbacken oder auf besonderen Flächen an den Enden der Lehre. Auf dem Griff Nennmaß mit Zeichen für Gütegrad und Sitz, Firma und Bezugstemperatur.</p>								
<p style="text-align: center;">Abb. 505.</p>											
über 260	Kugelendmaß. Gut- und Ausschußseite getrennt.	<p>Gutlehre: Eine Eindrehung in der Nähe der Meßfläche für die Farbe des Gütegrades. Schwarzer Isoliergriff.</p> <p>Ausschußlehre: Eine Eindrehung in der Nähe der Meßfläche für hellroten Lack, eine zweite für die Farbe des Gütegrades. Roter Isoliergriff.</p>	<p>Von dem Ende ohne Eindrehung ausgehend: „Aussch.“ bzw. „Gut“, Abmaß, Firma, Bezugstemperatur, Nennmaß mit Zeichen für Gütegrad und Sitz.</p>								
<p style="text-align: center;">Abb. 506 a.</p> <p style="text-align: center;">Abb. 506 b.</p>											
<p>Die Grenzlehren erhalten als Beschriftung das Nennmaß mit dem Zeichen für Gütegrad und Sitz (siehe DIN 776), die Abmaße, die Firma, die Bezugstemperatur (20°) sowie die Worte „Gut“ bzw. „Ausschuß“. Bei Grenzlehrdornen und Grenzrachenlehren mit Gut- und Ausschußseite in einem Rachen fallen die beiden letzten Worte fort.</p> <p>Farben der Gütegrade bei:</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;">Edelpassung . . . . .</td> <td>kornblumenblau<sup>1</sup></td> </tr> <tr> <td>Feinpassung . . . . .</td> <td>schwarz<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td>Schlichtpassung . . . . .</td> <td>gelb<sup>3</sup></td> </tr> <tr> <td>Grobpassung . . . . .</td> <td>hellgrün</td> </tr> </table> <p>Als Beispiel für die Beschriftung ist der leichte Laufsitz der Feinpassung, Einheitswelle gewählt worden. Die Abbildungen sind nur schematische Darstellungen, um die Art der Beschriftung zu zeigen.</p> <p style="text-align: right;">Oktober 1922.</p>				Edelpassung . . . . .	kornblumenblau <sup>1</sup>	Feinpassung . . . . .	schwarz <sup>2</sup>	Schlichtpassung . . . . .	gelb <sup>3</sup>	Grobpassung . . . . .	hellgrün
Edelpassung . . . . .	kornblumenblau <sup>1</sup>										
Feinpassung . . . . .	schwarz <sup>2</sup>										
Schlichtpassung . . . . .	gelb <sup>3</sup>										
Grobpassung . . . . .	hellgrün										

<sup>1</sup> Früher waren die Wellenlehren der Edelpassungen mit denen der Feinpassung identisch und erhielten deshalb auch schwarzen Anstrich.

<sup>2</sup> Schwarz als die unempfindlichste Farbe ist für die Feinpassung gewählt, da sie am häufigsten vorkommt.

<sup>3</sup> Ursprünglich war Postgelb vorgesehen; da dieses aber zu leicht verschmutzt, nimmt man heute lieber Ocker.

Kennzeichnung und Beschriftung der Abnahmelehren. <span style="float: right;">DIN 1811.</span>			
Richtlinien:			
Durchmesser-Bereich mm	Art der Lehre	Kennzeichnung <sup>1</sup>	Beschriftung
1 bis 100	Grenzrachenlehre.	<p>Grundanstrich der Lehren in der Farbe des Gütegrades.</p> <p>Ausschußseite bzw. Ausschußlehre: Verkürzte Meßfläche, hellrote Farbe im Ausschußrachen.</p>	<p>„Gut“ bzw. „Ausch.“ auf den Meßbacken, Abmaße, Nennmaß mit Zeichen für Gütegrad und Sitz auf der Vorderseite, Firma und Bezugstemperatur auf der Rückseite.</p>
		<p style="text-align: center;">Abb. 507.</p>	
über 100	Grenzrachenlehre, Gut- u. Ausschußseite getrennt.	<p>Kennzeichnung wie bei Abb. 507.</p>	<p>„Gut“ bzw. „Ausch.“ und Abmaße auf den Meßbacken, Nennmaß mit Zeichen für Gütegrad und Sitz auf der Vorderseite, Firma und Bezugstemperatur auf der Rückseite.</p>
		<p style="text-align: center;">Abb. 508.</p>	
	Grenzrachenlehre. Gut- u. Ausschußseite in einem Rachen	<p>Grundanstrich der Lehre in der Farbe des Gütegrades.</p>	<p>Abmaße auf den Meßbacken, Nennmaß mit Zeichen für Gütegrad und Sitz auf der Vorderseite, Firma und Bezugstemperatur auf der Rückseite.</p>
		<p style="text-align: center;">Abb. 509.</p>	
1 bis 100	Grenzlehrdorn.	<p>Ausschußseite: Verkürzte Meßfläche und Eindrehung für die Farbe des Gütegrades.</p>	<p>Auf dem Griffe, von der Gutseite ausgehend: Unteres Abmaß, Firma, Nennmaß mit Zeichen für Gütegrad und Sitz, Bezugstemperatur und oberes Abmaß.</p>
		<p style="text-align: center;">Abb. 510.</p>	
<p><sup>1</sup> Besondere Kennzeichnung der Abnahmelehren: Weißer Farbstrich bzw. weißer Farbring.</p>			

Kennzeichnung und Beschriftung der Abnahmelehren.			
Richtlinien: DIN 1811 (Fortsetzung).			
Durchmesser-Bereich mm	Art der Lehre	Kennzeichnung <sup>1</sup>	Beschriftung
über 100 bis 260	Grenzflächlehre. Gut- u. Ausschublehre getrennt	<p>Grundanstrich der Lehre in der Farbe des Gütegrades.</p> <p>Ausschublehre: Verkürzte Meßfläche und hellrote Farbe entweder an der Stirnseite oder in einer Eindrehung am Griff.</p>	<p>„Gut“ bzw. „Aussch.“ und Abmaße auf den Meßbacken oder auf besonderen Flächen an den Enden der Lehre. Auf dem Griff Nennmaß mit Zeichen für Gütegrad und Sitz, Firma und Bezugstemperatur.</p>
 <p style="text-align: center;">Abb. 511.</p>			
über 260	Grenzkugelmessende Maße.	<p>Gutlehre: Eine Eindrehung in der Nähe der Meßfläche für die Farbe des Gütegrades, eine Eindrehung für weiße Farbe. Schwarzer Isoliergriff.</p> <p>Ausschublehre: Eine Eindrehung in der Nähe der Meßfläche für hellrote Farbe, eine zweite für die Farbe des Gütegrades und eine dritte für weiße Farbe. Roter Isoliergriff.</p>	<p>Beschriftung in Richtung der Achse oder senkrecht dazu. Von dem Ende ohne Eindrehung ausgehend: „Gut“ bzw. „Aussch.“, Abmaß, Firma, Bezugstemperatur, Nennmaß mit Zeichen für Gütegrad und Sitz.</p>
 <p style="text-align: center;">Abb. 512.</p>			
<p>Die Abnahmelehren erhalten außer der Kennzeichnung des weißen Farbstrichs bzw. Farbringes als Beschriftung das Nennmaß mit dem Zeichen für Gütegrad und Sitz (siehe DIN 776), die Abmaße (siehe DIN 812 bis 819) die Firma, die Bezugstemperatur 20<sup>0</sup> (Celsius) sowie die Worte „Gut“ bzw. „Aussch.“. Bei Grenzlehrendornen und Grenzrachenlehren mit Gut- und Ausschubseite in einem Rachen fallen die Worte „Gut“ und „Aussch.“ fort.</p> <p>Als Beispiel für die Beschriftung ist der leichte Laufsitz der Feinpassung, Einheitswelle gewählt worden.</p> <p>Die Abbildungen sind nur schematische Darstellungen, um die Art der Beschriftung zu zeigen.</p>			
April 1927.			
<p><sup>1</sup> Siehe Fußnote S. 318.</p>			

Vielfach werden auch Rachenlehren beim Vordrehen von zu schleifenden ungehärteten Wellen gebraucht (Schrupplehren). Sie erhalten nach DIN 60 grauen Anstrich und die Bezeichnung *gZ* (Grobzugabe). Der Kraftfahrzeugbau hat noch in DIN KrG 122 sowohl für Bohrungen wie für Wellen zwei Arten von Zugaben vorgesehen. Die Feinzugabe gilt für zu härtende und nicht zu härtende Werkstücke, die an den zu schleifenden Stellen vor dem Schleifen noch in Vorrichtungen zentrisch aufgenommen werden. Wo dies nicht der Fall ist, wird die Grobzugabe zugestanden, die bei Wellen über 80 mm Durchmesser indessen nur für nicht zu härtende Teile anzuwenden ist. Die Rachenlehren erhalten gleichfalls einen grauen Grundanstrich, die für Feinzugabe außerdem noch einen blauen Farbstreifen parallel zu den Meßflächen (etwa in der Breite der blanken Beschriftungsfläche). Die Lehrdorne haben einen grauen Farbring, der bei denen für Feinzugabe noch 4 blaue Längsstreifen parallel zur Achse (in einer Breite von etwa  $\frac{1}{4}$  des Farbringdurchmessers) aufweist. Die Bezeichnung auf Zeichnungen und auf Lehren ist für Feinzugabe *fZ*, für Grobzugabe *gZ*. Über Herstellungsgenauigkeit und Abnutzung sind keine Vorschriften gemacht; zweckmäßig wird man die bei der Grobpassung dafür vorgesehenen Werte nehmen.

Obwohl in den DI-Normen nur Lehrdorne mit Meßzapfen mit Konus zur Verbindung mit dem Griff und Lehrdorne mit Meßzapfen aus einem Stück angegeben sind, finden sich in der Praxis doch noch die verschiedensten Befestigungen der meist ringförmig gehaltenen Meßzapfen mit dem Griff. So werden sie z. B. mit Preßsitz auf den zylindrischen Griff aufgedreht. Dabei ist darauf zu achten, daß die Elastizitätsgrenze nicht überschritten wird. Beim Aufpressen bleibt aber die Zylinderform nicht gewahrt, da der Meßzapfen an seinen Stirnflächen leichter nachgeben kann als in der Mitte. Deshalb darf die endgültige Bearbeitung erst nach dem Aufpressen erfolgen. Durch die hohe Preßspannung, die notwendig ist, um ein Abdrehen des Meßzapfens vom Griff zu verhindern, sollen aber im Laufe der Zeit Maßänderungen auftreten.

Alle bisher genannten Verbindungen von Meßzapfen und Griff haben den Nachteil, daß die beim Gebrauch hauptsächlich nur an der Stirnseite abgenutzten Meßzapfen nicht umgedreht und dadurch ihre Lebensdauer verdoppelt werden kann. Verschiedentlich ist deshalb vorgeschlagen, sie nur durch Schellack mit dem Griff zu verkiten (3, 4), da diese Verbindung sich durch Erwärmen leicht wieder lösen läßt. Bei der Verbindung von Meßzapfen und Griff durch Nut und Feder ist infolge des einseitigen leichten Druckes, wie er beim Gebrauch der Lehre auftritt, auch eine Maßänderung des Zylinders zu befürchten.

Ferner soll durch das geringe seitliche Spiel zwischen Nut und Feder das Fühlen in der Bohrung beeinträchtigt sein.

Durch das Aufschrauben des Meßzapfens auf den Griff (Abb. 513) treten nach außen wirkende Kräfte auf. Sie sollen bei Flach- und noch besser bei Trapezgewinde durch die nach innen gerichteten Kräfte ausgeglichen werden, die durch die beim Einschrauben eintretende, parallel zur Achse gerichtete Zugspannung entstehen (2). Bei dieser Befestigung bleibt aber stets die Gefahr einer Lösung des Meßzapfens vom Griff, wenn jener sich aus irgendwelchen Gründen in dem Prüfling festgesetzt hat und der Arbeiter ihn durch Rückwärtsdrehen wieder frei zu bekommen sucht. Ein Verkern oder Verstemmen liefert auch nur einen gewissen Schutz hiergegen und ist überhaupt wegen der dabei erzeugten Spannungen zu vermeiden.

Dieselben Gründe sprechen auch gegen das Festhalten des Meßzapfens am Griff durch einen Schraubenbolzen (Abb. 514), der in ein Gewindeloch des Griffs hinein-, oder durch Mutter, die auf einen Gewindezapfen des Griffs aufgeschraubt wird. Außerdem treten dabei durch die Auflage des Schraubenkopfes oder der Mutter auf die Stirnfläche (oder eine Eindrehung) des Meßzapfens zusätzliche Spannungen auf. Um diese nach außen wirkenden Kräfte zu vermeiden, gibt man dem Meßzapfen eine konische Eindrehung nach Abb. 515, gegen die sich die entsprechend gestaltete Mutter nur nach innen hin anlegt (7). Ein besseres Festhalten und eine gleichmäßigere Verteilung der Spannungen sucht man nach Abb. 514 dadurch zu erzielen, daß man zwischen Meßzapfen und dem konischen Ende des Griffs eine innen konische, geschlitzte Buchse *A* bringt, auf die der Schraubenkopf *C* mittels einer Unterlage *B* aufliegt (5).

Das Aufstecken des Meßzapfens auf den Griff und Sicherung durch Mutter gewährt indessen auch keinen ausreichenden Schutz gegen Lösen beim Versuch des Herausbringens festgesetzter Meßzapfen aus einem Werkstück. Besser ist es schon, wenn man der Mutter oder der Sicherungsschraube ein Gewinde von etwas kleinerer Steigung als dem Meßzapfen und dem Griff gibt. Dadurch entsteht eine Art Differentialgewinde, das eine gute Sicherung gegen

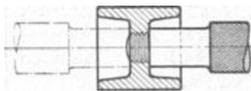


Abb. 513. Lehrdorn mit aufgeschraubtem Meßzapfen.

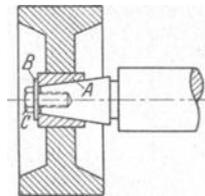


Abb. 514. Befestigung des Meßzapfens durch Schraube.

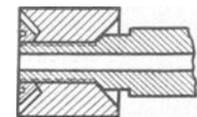


Abb. 515. Befestigung des Meßzapfens durch Mutter.

Lösen des Meßzapfens bietet, doch können die dabei auftretenden Kräfte so groß werden, daß die Sicherungsschraube reißt.

Eine sehr gute Befestigung hat sich dadurch ergeben, daß man den Meßzapfen nur ganz lose auf dem Gewinde des Griffs gehen läßt und ihn durch eine Schraube mit Linksgewinde sichert, wobei eine Lockerung nicht möglich ist und andererseits auch nicht so große Kräfte wie bei einem Differentialgewinde auftreten können. Da die Anlage an die Stirnfläche des Meßzapfens infolge der unvermeidlichen Unvollkommenheiten der Herstellung nur an einigen Stellen erfolgt, so können leicht einseitige axiale Kräfte hervorgerufen werden, die ungünstig auf die Maßhaltigkeit einwirken. Um sie zu vermeiden, muß die Anlage mittels einer pendelnden oder einer etwas elastischen Zwischenlage erfolgen. Dadurch sollen Maßveränderungen, auch bei gewaltsamem Anziehen, vermieden sein (1, 6).

Ihre Grenze finden derartige Konstruktionen aus herstellungstechnischen und wirtschaftlichen Gründen bei Durchmessern von 30 oder höchstens von 18 mm.

## C. Ausführung der Grenzlehren.

### 1. Wellenlehren.

Zum Messen von Wellen, rechtwinkligen Prismen und ähnlichem werden heute wohl überwiegend Rachenlehren verwendet. Für kleine Durchmesser haben sie die Form einer viereckigen Platte aus gehärtetem Flachstahl mit einer die Meßflächen enthaltenden Aussparung (Abb. 516). Rachenlehren für mittlere Durchmesser (Abb. 464 und 487) werden in der Regel aus Siemens-Martinstahl im Gesenk geschmiedet und ihre Meßbacken im Einsatz gehärtet. Große Rachenlehren (Abb. 517) bestehen meist aus Gußeisen, Stahl- oder Temperguß, womit die gehärteten Meßbacken durch Schrauben, konische Stifte, Profilmuten (14) oder durch Schweißung verbunden werden. Für Grenzlehren nimmt man als Lehrenkörper meist die 8-Form der Abb. 464, oder man ordnet auch die beiden Paar Meßflächen hintereinander an (Abb. 517), wobei der Abstand des hinteren Paares um die Toleranz enger als der des vorderen ist. Beide haben den Nachteil, daß das Nacharbeiten nicht nur an den allein abgenutzten Meßflächen der Gut-, sondern auch an denen der noch brauchbaren Ausschußseite erfolgen muß. Deshalb sieht man häufig zwei getrennte Lehren für die Gut- und die Ausschußseite vor, die man auch wohl durch Schrauben zu einem einzigen Stück vereinigt, um die Handhabung bei der Kontrolle der Werkstücke zu erleichtern (16).

Zum Ausgleich innerer Spannungen müssen auch die Rachenlehren künstlich gealtert werden (siehe S. 76). Um nicht nachträglich wieder Spannungen hineinzubringen, dürfen die Bezeichnungen nicht aufgeschlagen, sondern nur aufgeätzt werden (auch könnte man sie auf besonderen Schildern anbringen). Man härtet (abgesehen von den kleinen Durchmessern) nicht die ganze Lehre, um sie nach eingetretener Abnutzung wieder zusammenbiegen zu können. Dies darf aber nur in warmem Zustande geschehen, da sonst infolge der inneren Spannungen fortschreitende Maßänderungen auftreten. Selbstverständlich sind dann die Meßflächen wieder auf richtiges Maß, Parallelität und Ebenheit nachzuarbeiten.

Die Meßflächen führt man meist als Ebenen aus, deren Größe dem Durchmesser angepaßt ist. Um eine leichtere Auswechslung der Meßflächen zu ermöglichen, ist vorgesehen (7), sie nach Abb. 518 durch drei senkrecht stehende Stahlplatten zu ersetzen (3 sind gewählt, um ein Verkippen zu vermeiden, wodurch der Prüfling zu groß erscheinen würde), doch

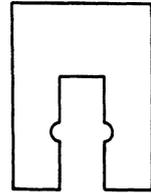


Abb. 516. Rachenlehre für kleine Durchmesser.



Abb. 517. Rachenlehre für große Durchmesser.

wird dabei der Verschleiß der geringen Berührungsfläche wegen ziemlich groß sein. Um beim Messen ebenflächiger Körper die Einführung zu erleichtern, hält man auch die eine Meßfläche länger und läßt sie vorstehen (Abb. 519). Für Sonderzwecke wird man überhaupt die Formen der Lehre und ihrer Meßflächen geeignet ausbilden müssen.

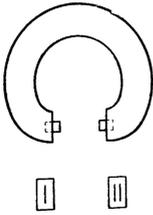


Abb. 518. Rachenlehre mit Stahlplatten als Meßflächen.

kann. Sie soll backen werden

Gelegentlich findet man statt der ebenen Meßbacken Zylinder- und Kugelflächen (28); ihre Achsen müssen dann aber genau parallel zueinander, bzw. die Verbindungslinie der Kugelmittelpunkte senkrecht zur Lehrenachse stehen. Erreicht ist dies bei der in Abb. 520 wiedergegebenen Konstruktion; in dem Bügel werden 2 Kugelendmaße gehalten, von denen das rechte feststeht, das linke mittels Kordelschraube zwischen 2 Anschlägen verschiebbar ist, die um 0,02 bis 0,6 mm relativ zueinander eingestellt werden können, so daß diese Lehre als Grenzlehre benutzt werden



Abb. 519. Rachenlehre zum Prüfen ebenflächiger Körper.

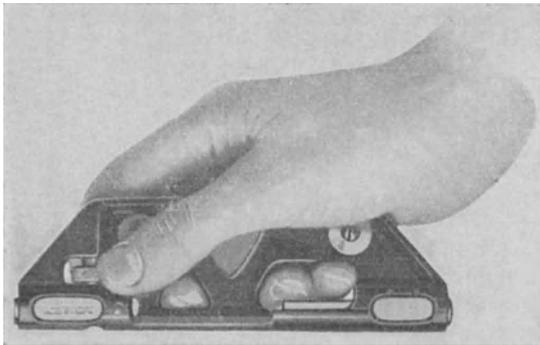


Abb. 520. Einstellbare Rachenlehre mit Kugelflächen.

in fester Verbindung mit dem Bügel und macht nur die andere, bzw. bei Grenzlehren die beiden anderen *a* und *b* einstellbar. Erleichtert wird die Justierung, wenn man die Meßbolzen mit Gewinde oder Differentialgewinde (1) versieht. Um die erforderliche Drehung genau vornehmen zu können, ist auch vorgeschlagen, auf den einen Zapfen einen kleinen Kreisabschnitt mit einem Indexstrich und auf den anderen eine größere Scheibe mit Teilung zu setzen. Nachdem dieser um den erforderlichen Betrag verstellt ist, werden beide Scheiben vertauscht und dann der erste Bolzen justiert (27).

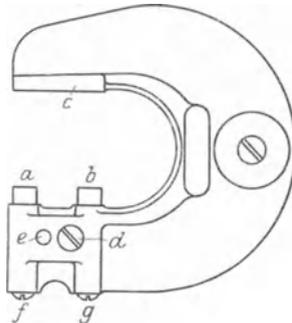


Abb. 521. Nachstellbare Rachenlehre.

Da ein Gewinde aber selten genau zur Achse läuft, so geht bei einer Drehung der Meßbolzen leicht die Parallelität der Meßflächen verloren. Dies wird vermieden, wenn man, wie in Abb. 521, den gegen Drehung durch Stift und Nut oder in sonstiger Weise gesicherten Meßbolzen nur mittel der Schrauben *f* und *g* verschiebt, wonach die Einstellung durch die Klemmschrauben *d* und *e* festgelegt wird (2). Hat man zu weit geschraubt, so müssen nach dem Zurückdrehen der Schrauben *f* und *g* die Meßbolzen von Hand nachgedrückt werden. Im Gegensatz dazu werden sie bei der Ausführung nach Abb. 522 durch die Justierschraube *B* auch mit zurückgenommen, die sich dabei gegen den konischen Kopf der in dem Meßbolzen sitzenden Schraube *C* legt. Dasselbe wird auch mit der in Abb. 523 wiedergegebenen Konstruktion erreicht, bei der der Kopf *A* der Schraube sich beim Zurückdrehen gegen den in eine V-Nut

Derartige Meßbacken werden auch wohl durch an der Lehre befestigte Zylinder oder Kugeln gebildet, die nach erfolgter Abnutzung um ein Stück verdreht oder ausgewechselt werden sollen. Dies setzt aber eine sehr genaue Herstellung voraus, so daß sich derartige Lehren bisher nicht eingeführt haben.

Einfacher und besser wird jenes Ziel erreicht, wenn man die ebenen Meßbacken nicht starr, sondern justierbar mit dem Lehrenkörper verbindet. Sie bestehen dazu etwa aus Zylindern mit ebenen und zur Achse senkrechten Stirnflächen, die in dem geschlitzten Bügel festgeklemmt werden, was entschieden besser ist, als sie durch eine in eine Zahnung der Meßbacken eingedrückte Bleiplombe zu sichern. Dabei läßt man auch wohl die eine Meßbacke *c* (Abb. 521)

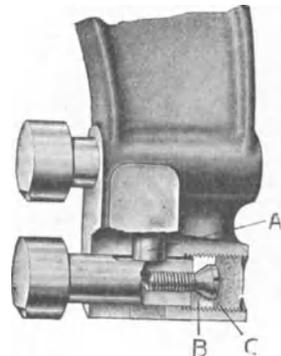


Abb. 522. Nachstellbare Rachenlehre.

eingepreßten federnden Ring *B* legt. Um den Meßbolzen gut gegen Drehung zu sichern und ihn stets in derselben relativen Lage zu erhalten, ist die in ihm angebrachte Nut *D* genau der Form des Kopfes *C* der Klemmschraube angepaßt (5).

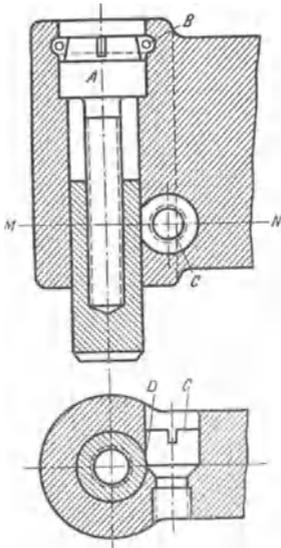


Abb. 523. Nachstellbare Rachenlehre.

bolzens *I* hineinragen, deren Achsen so gegen die der Schraubstifte versetzt sind, daß der Meßbolzen durch den Stift *3* nach innen, durch den Stift *4* nach außen verschoben wird, wodurch zugleich die Einstellung gesichert ist. Dieses Verfahren wird auch für einstellbare Kugelendmaße verwendet (12).

Gänzlich zu verwerfen ist eine Nachstelleinrichtung (10), die darauf beruht, daß man den Lehrenkörper durch eine Schraube elastisch oder wohl gar dauernd deformiert, da dadurch für die Maßhaltung schädliche innere Spannungen hervorgerufen werden und auch die Meßflächen nicht parallel zueinander bleiben (dasselbe gilt auch für derartige einstellbare Flachlehren).

Der Vorteil, den man durch die Nachstellbarkeit erreicht, ist aber nur ein scheinbarer, da sich durch die Abnutzung nicht nur der Abstand der Meßflächen ändert, sondern diese auch so sehr beschädigt werden, daß sie doch nachgearbeitet werden müssen.

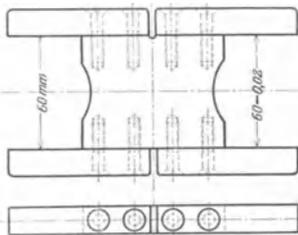


Abb. 526. Grenzrachenlehre mit austauschbaren Meßbacken.

Aus diesem Grunde haben sich auch nachstellbare Lehren bisher in Deutschland nicht durchgesetzt. Richtiger sind deshalb Konstruktionen, die aus einer Kombination von endmaßähnliche: Stücken

mit 2 Meßschnäbeln bestehen, denen man eine zweckentsprechende Gestalt gibt, da hier trotz des Nacharbeitens der Meßschnäbel ihr richtiger Abstand und ihre Parallelität immer erhalten bleibt (21). Um eine Grenzrachenlehre zu erhalten, schraubt man die Meßschnäbel gegen ein entsprechend abgesetztes rechtwinkliges Prisma (Abb. 526) oder gegen seine 4 Hochkantflächen, deren Kantenlängen sich um die Toleranz unterscheiden (22). Diese Ausführungen

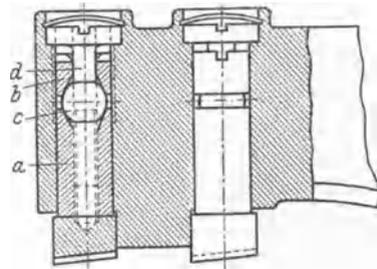


Abb. 524. Nachstellbare Rachenlehre.

Eine weitere Ausführung zeigt Abb. 524; zwischen dem in die Meßbacken endenden Bolzen *a* und der in den Bügel eingepreßten Buchse *b* liegt eine Stahlkugel *c*; durch *b* und *c* geht frei die Schraube *d* hindurch. Die Grobeinstellung erfolgt durch Drehen der Buchse *b*, die Feineinstellung durch Betätigung der Schraube *d*, deren Kopf sich gegen eine Aussparung des Bügels legt und die Kugel *c* dabei etwas zusammenpreßt (13, 30, 31). Eine Maßänderung durch einen allmählich erfolgenden Ausgleich der Spannungen ist zwar nicht ganz ausgeschlossen, dürfte sich aber in unschädlichen Grenzen halten.

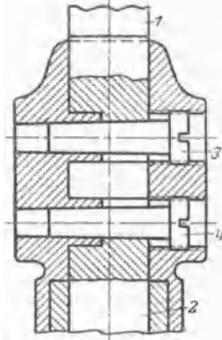


Abb. 525. Nachstellbare Rachenlehre.

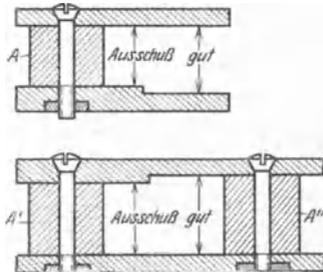


Abb. 527. Grenzrachenlehre mit austauschbaren Meßbacken.

sind den in Abb. 527 wiedergegebenen vorzuziehen, bei denen die Absätze in die Meßschnäbel verlegt sind (8, 26), da man bei jenen nur die Meßflächen eben zu schleifen braucht, während man beim Nacharbeiten der letzteren auf richtigen Abstand und Parallelität der beiden Flächen jedes Meßschnabels zu achten hat.

Völlig unbrauchbar sind Konstruktionen, bei denen sich die ebenen Meßschnäbel gegen ein keilförmiges Stück (24) oder gegen 2 Kugeln verschiedenen Durchmessers legen (4), wodurch zwar die beiden Enden ein um die Toleranz verschiedenes Maß erhalten, aber die Meßflächen nicht parallel zueinander sind.

Verschiedentlich hat man auch erstrebt, die Rachenlehren so auszugestalten, daß sie für verschiedene Sitze gebraucht werden können. Man hat dazu eine Meßbacke durch ein

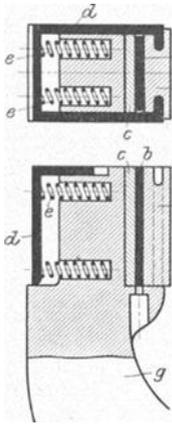


Abb. 528. Rachenlehre für verschiedene Sitze (Einstellung durch Endmaße).

um eine Achse drehbares Stahlprisma ersetzt, dessen Meßflächen um je  $\frac{1}{100}$  mm steigenden Abstand von der Achse haben (18). Es dürfte aber schwierig sein, Drehachse und geometrische Achse zum Zusammenfallen zu bringen, auch werden Sprünge um  $\frac{1}{100}$  mm durchaus nicht immer die gewünschte Maßänderung ergeben. Eine kontinuierliche Abstufung hat man dadurch zu erhalten gesucht, daß man die beiden Meßbacken keilförmig zueinander gestellt und senkrecht zur Meßachse einen verschiebbaren Anschlag angeordnet hat, bis zu dem sich das Werkstück muß einführen lassen (1a). Über die Ungeeignetheit dieser Konstruktion braucht weiter kein Wort verloren zu werden, zum mindesten muß man doch versuchen, die Parallelität der beiden Meßflächen zu sichern. Bei der Ausführung nach Abb. 528 wird dies dadurch erreicht, daß zwischen eine am Lehrenkörper befestigte Stahlplatte *c* und die Meßbacke *a* entsprechende Parallelendmaße *b* gelegt werden, die alle drei durch Federn zusammengehalten sind (6).

Meist hat man sich nicht mit der Möglichkeit begnügt, verschiedene Toleranzbereiche mit derselben Lehre beherrschen zu können, sondern danach gestrebt, mit möglichst wenig

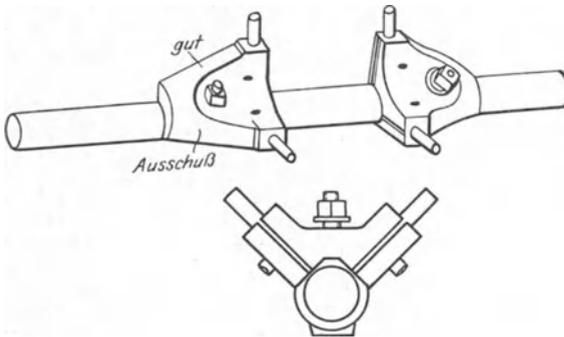


Abb. 530. Verstellbare Rachenlehre.

Rachenlehren für den ganzen Durchmesserbereich auszukommen. Dazu gehören die Rachenlehren mit verstellbaren Meßbacken, die mittels Strichmaßstab (siehe S. 167) oder Schraublehren (siehe S. 248) eingestellt werden. Bei der Ausführung nach Abb. 529 werden die beiden Meßbacken auf einer Schiene mit Schwalbenschwanzführung (oder die als Doppelprisma ausgebildet ist) gegeneinander verschoben und dann unter Zwischenfügung einer Meßscheibe zwischen die Schnäbel oder die beiden oberen Meßflächen geklemmt, die mit der Gutseite



Abb. 529. Verstellbare Rachenlehre.

fluchten (17). Dabei tritt aber leicht ein Verziehen ein, so daß die Rachenlehre nachher nicht mehr gerade eben noch über die zugehörige Meßscheibe hinübergleitet; außerdem kann nach dem Herausnehmen der Endmaße sehr leicht eine Maßänderung der eigentlichen Rachenlehre eintreten [sie trägt noch ein Fenster, in das sich ein Zelluloidschildchen mit dem Nennmaß einfügen läßt, für das die Lehre eingestellt ist (33)].

Vermieden werden diese Übelstände, wenn man die Einstellung unmittelbar an den Meßbacken vornimmt und außerdem zur Führung einen kräftigen Zylinder verwendet, wie dies bei Rachenlehren für Meßbereiche über 120 mm möglich ist. Die bewegliche Backe wird auf diesem mittels Zahnstange und Schlüssel verschoben. Zur Einstellung werden die Toleranz-Meßbacken gegen glatte Meßbacken ausgetauscht (18a).

Wenn man verstellbare Rachenlehren bauen will, so muß vor allem die Führung sehr sorgfältig ausgebildet sein, wie z. B. bei der Lehre von Taylor (Abb. 530). Auf einem genau geschliffenen Zylinder lassen sich 2 Träger verschieben, die 3 zueinander senkrechte 45°-V-Nuten haben. Sie ruhen mit der größeren auf dem Zylinder und werden nach erfolgter Einstellung durch einen Ring zentrisch festgeklemmt. In die beiden anderen V-Nuten werden Stahlzylinder eingelegt, deren Achsen somit senkrecht zu dem Führungszyylinder stehen. Drei Zylinder besitzen gleichen Durchmesser, während der vierte um die doppelte Toleranz kleiner gehalten ist. Werden nun die Superte durch Endmaße zwischen den Gutseite-Zylindern eingestellt, so ist damit auch der Abstand der beiden Ausschußseite-Zylinder gegeben (20). Diese Lehren lassen sich als Rachen-, Entfernungs- und Abstandslehren verwenden. Dasselbe erreicht man auch, wenn man die üblichen Rachenlehrenschenkel nimmt und sie auf einer Stange, etwa durch Kegelstifte, fixiert (9), eine Ausführung, die sich namentlich zur Kontrolle großer Längen eignet.

Eine recht gute Kombination aus scheibenförmigen, durchbohrten Endmaßen und zwei entsprechend gebogenen Meßschnäbeln, die durch 2 Schraubenbolzen zusammengehalten wird, stellt die Konstruktion nach Abb. 531 dar (3), die auch mit entsprechend abgestuften Meßbacken als Grenzlehre gebraucht werden kann.

Für gelegentliche Sonderzwecke baut man am besten eine Rachenlehre aus Endmaßen und 2 Meßschnäbeln, die durch einen Halter zusammengehalten werden (siehe S. 90). Für Grenzrachenlehren nimmt man einen glatten Meßschnabel und einen anderen, dessen Meßfläche um die Abmaße für Gut- und Ausschußseite gegenüber seiner Ansprengfläche versetzt ist (Abb. 532), so daß man nur die dem Nennmaß entsprechenden Endmaße zwischenzufügen hat (34). Bei allen diesen Konstruktionen bleibt indessen zu beachten, daß sie nicht der Definition des Maßes der Rachenlehren nach DIN 2057 entsprechen.

Nach einem anderen Vorschlage werden die Endmaße durch eine Schraube *A* festgehalten (Abb. 533), die in den Schlitz *a* des einen Arms eingeschoben wird und die eine Meßbacke *B* trägt. Zur Einstellung des gewünschten Meßbereichs werden geschlitzte oder durchbohrte Endmaße auf die Schraubenspindel aufgeschoben, so daß sie zwischen den Lehrenkörper und die Meßbacke *B* zu liegen kommen (11) [für eine ähnliche Ausführung siehe (15)].

Eine sehr gute Lösung stellt die Ausführung nach Abb. 534 dar; der Bügel trägt zwei endmaßmäßig bearbeitete parallele Meßflächen in einem bestimmten Abstande *L*. Wird das Maß  $L - l$  benötigt, so werden an beide Flächen Endmaße vom Maß  $l - 16$  mm, angenähert symmetrisch verteilt, angesprengt. Vor jede Seite

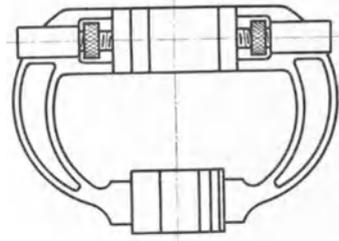


Abb. 531. Verstellbare Rachenlehre.

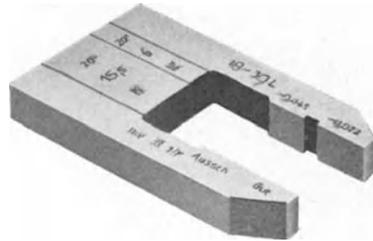


Abb. 532. Grenzrachenlehre aus Endmaßen und Meßschnäbeln.

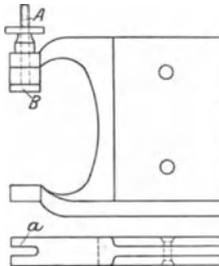


Abb. 533. Verstellbare Rachenlehre.

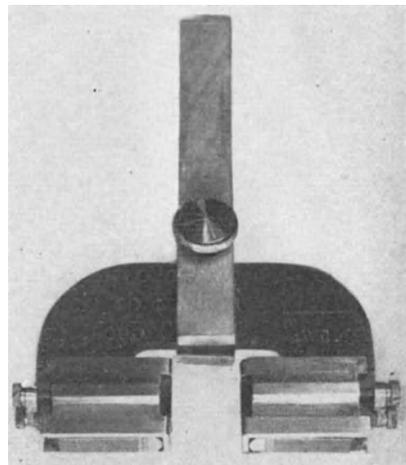


Abb. 534. Verstellbare Rachenlehre.

kommt dann ein besonderes Hilfsstück, ein Endmaß von 8 mm Dicke, dessen Enden aber auf den einander zugekehrten Seiten zylindrisch abgerundet und zurückgesetzt sind. An diese legt sich der Boden eines Halters so an, daß er hinter die eigentliche Meßfläche zurücktritt; die Haltersättel ziehen dann mittels eines Querstegs und zweier Spindeln die Endmaße mit dem Hilfsstück fest gegen



Abb. 535. Rachenlehre mit abgeschrägter Meßbacke (als Vortaster).

den Bügel. So lassen sich mit 11 Bügeln einwandfreie Rachenlehren bis 420 mm Meßbereich herstellen.

Immerhin werden verstellbare Rachenlehren stets nur eine ganz gelegentliche Ausnahme bleiben, wenn es sich einmal um die Kontrolle weniger Stücke handelt, für die gerade eine geeignete Rachenlehre fehlt. Bei ausgesprochener Massenfertigung müssen doch an jedem Arbeitsplatz die nötigen Meßgeräte vor-

handen sein. In den genannten Ausnahmefällen wird man sich aber häufig auf andere Weise, durch Schraublehren oder noch besser durch Fühlhebel und Vergleich mit Endmaßen, helfen können.

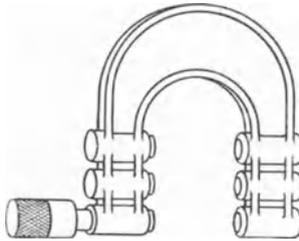


Abb. 536. Rachenlehre mit Schraublehre als Vortaster.

Bei der Bearbeitung lassen die festen Lehren — im Gegensatz zu den Meßgeräten mit Maßangabe — nicht erkennen, wieviel noch von dem Werkstück wegzunehmen ist. Geübte Arbeiter haben dies zwar im Gefühl und stellen dementsprechend den Span, wenn auch zum Schluß mit der nötigen Vorsicht, ein. Es ist deshalb eine Reihe von Rachenlehren mit Vortaster entstanden, die die Größe des Übermaßes anzeigen sollen. Dazu wird eine entsprechende Teilung auf einer vorn abgeschrägten Meßbacke, wie in Abb. 535 vorgesehen<sup>1</sup>. Brauchbare Ausführungen erhält man indessen nur, wenn man die Rachenlehren mit einer Schraublehre (Abb. 536) (32) oder auch mit einem (entsprechend unempfindlichen) Fühlhebel von großem Meßbereich kombiniert, die dann als Vortaster dienen.

## 2. Bohrungslehren.

Für Innenmessungen werden im allgemeinen bis 100 mm Durchmesser Lehdorne, von über 100 bis 260 mm Flachlehren und darüber Kugellendmaße verwendet. Die Herstellung der Flachlehren geschieht im wesentlichen in derselben Weise wie die der Rachenlehren, also durch Schmieden im Gesenk, Einsetzen,

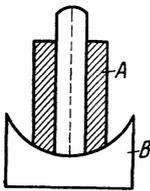


Abb. 537. Herstellung von Kugellendmaßen.

Härten, Schleifen und Maßpolieren der Meßflächen. Bei den Lehdornen werden selbstverständlich nur die Meßzapfen, bei größeren Kugellendmaßen nur die Enden gehärtet, doch zieht man der Verbiegungsgefahr wegen gelegentlich auch Härtung über die ganze Länge vor. Lehdorne lassen sich auch ebenso wie Parallelendmaße maschinell in größerer Stückzahl gleichzeitig fertigstellen; da sie aber dabei Gleichdicke werden, müssen sie zum Schluß doch, genau so wie bei der Einzelfertigung, mit einem geschlitzten nachstellbaren Kupferring maßpoliert werden. Die Flächen der Kugellendmaße werden so hergestellt, daß man sie

unter Drehung um ihre Achse und Schwenken um eine dazu senkrechte, durch ihren Mittelpunkt gehende Achse an einer rotierenden Topfscheibe vorbeiführt, wodurch die Konzentrität der Kugelflächen gesichert ist, die Meßflächen aber nicht poliert werden können. Letzteres erreicht man, wenn man sie z. B. in einem Hilfsstück A (Abb. 537) aufnimmt, dessen Stirnfläche mit der benötigten Krüm-

<sup>1</sup> Für andere Ausführungen siehe (19, 25, 29).

mung ausgeführt ist, und beide in einer Kugelschale *B* gleicher Krümmung hin- und herbewegt.

Der Gewichtersparnis halber werden die Meßzapfen der Lehrdorne mit mehreren symmetrisch verteilten Bohrungen versehen (17) (Abb. 538) und ihre Griffe auch hohl gehalten oder aus Aluminium gefertigt. Noch um etwa 50% leichter ist Hartgummi, das sich außerdem durch bessere Haftfähigkeit und

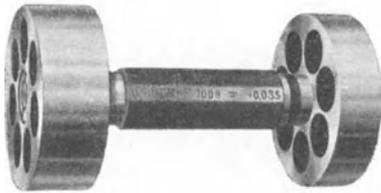


Abb. 538. Lehrdorn mit leichten Meßzapfen.

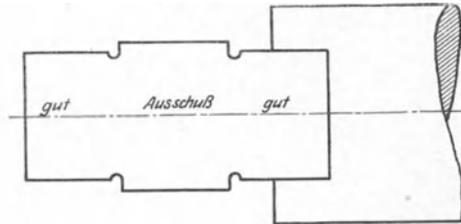


Abb. 539. Lehrdorn mit 3 Meßzapfen.

geringere Wärmeleitfähigkeit auszeichnet und auch von den im Betriebe verwendeten Flüssigkeiten, wie Benzin, Petroleum, Öl, Seifenwasser usw., nicht angegriffen wird. Empfehlenswert ist, ihnen Achteckform zu geben (6).

Gewöhnlich befinden sich die zwei Meßzapfen zu beiden Seiten des Griffs, doch kommen auch Anordnungen mit Gut- und Ausschußseite hintereinander vor.

Um die Lebensdauer zu erhöhen, sieht man nach Abb. 539 einen dritten (Gut-)Meßzapfen vor, der mit Schellack im Griff befestigt wird (dadurch gegen Korrosion geschützt ist) und nach Abnutzung des ersten Meßzapfens seinerseits nach vorne kommt (9).



Abb. 540. Stufenlehrdorn.

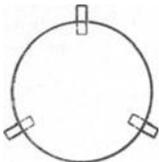


Abb. 541. Lehrdorn mit Stahlplättchen als Meßbacken.

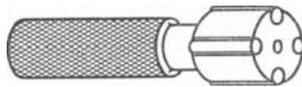


Abb. 542.

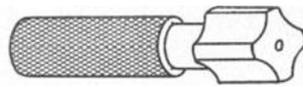


Abb. 543.

Abb. 542 und 543. Lehrdorn mit 4 Meßbacken.

Für die Kontrolle von Absätzen nimmt man aus mehreren ringförmigen Meßzapfen zusammengesetzte Lehrdorne nach Abb. 540<sup>1</sup>.

Während die Lehrdorne im Idealfall auf der vollen Fläche anliegen, geben die Flachlehren eine Berührung in zwei Linien. Zur Messung von Zylindern benötigt man aber fünf, zur Messung von Kreisen zwei Stützpunkte. Deshalb ist vorgeschlagen, in einen zylindrischen Dorn 3 unter 120° voneinander abstehende Bleche mit gerader oder gekrümmter Hochkante einzusetzen (Abb. 541), die nach Abnutzung leicht auszuwechseln sind (3).

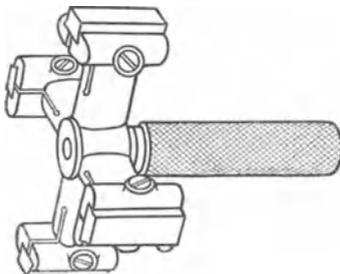


Abb. 544. Vierkreuzlehre.

Daneben kommen auch Ausführungen mit 4, 6 oder 8 Berührungslinien vor (Abb. 542 und 543);

man erhält sie, wenn man die Zylinder so ausfräst, daß nur 4 Rippen als Meßflächen stehen bleiben, oder aber in einen Zylinder 4 Stahldrähte einlegt (12).

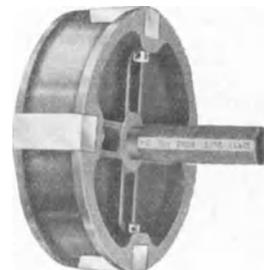


Abb. 545. Vierkreuzlehre.

<sup>1</sup> Um die Lehren beim Einführen nicht zu beschädigen und dazu die Bohrung auf jeden Fall vorher zu reinigen, ist allen Ernstes vorgeschlagen, an der Stirnfläche des Meßbolzens eine Bürste anzubringen (16).

Größere Vierkreuzlehren zeigen Abb. 544 und 545, bei denen die gehärteten Meßbacken in entsprechendem Gußkörpern befestigt sind. Man verwendet sie an Stelle großer Lehrdorne, um bei geringerem Gewicht leichtere Einführbarkeit und sicheres Meßgefühl zu erhalten. Den Flachlehren gegenüber bieten sie den Vorteil, daß weniger leicht ein falsches Ergebnis durch Verkanten vorgetäuscht werden kann. — Zum Messen von Boh-

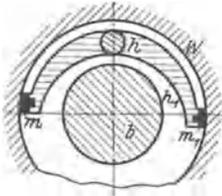


Abb. 546. Bohrungslehre zum Gebrauch an der Schleifmaschine.

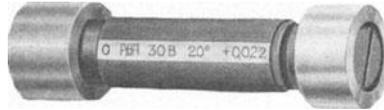


Abb. 547. Lehrdorn mit abgeschrägtem Meßzapfen als Vortaster.

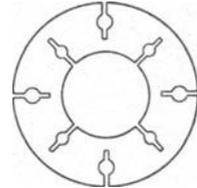


Abb. 548. Nachstellbarer Lehrdorn.

rungen an der Schleifmaschine oder auf dem Bohrwerk ohne Ausspannen dient die Lehre nach Abb. 546, bei der die Meßbacken in einem rachenlehrenähnlichen Bügel sitzen (4, 13). Für eine Sonderausführung eines Toleranzkugellendmaßes sei auf Abb. 520 verwiesen.

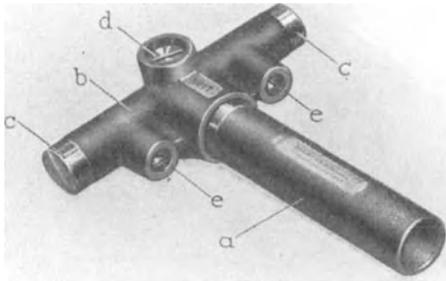


Abb. 549. Nachstellbares Kugellendmaß.

man dem Meßzapfen die Form eines Ringes mit Schlitzen (Abb. 548), in die konische Stifte gleich weit hineingedrückt werden sollen (7), oder man ersetzt den Meßzapfen durch eine Reihe von Stahlkugeln, die auf der konischen Abschrägung eines sonst zylindrischen

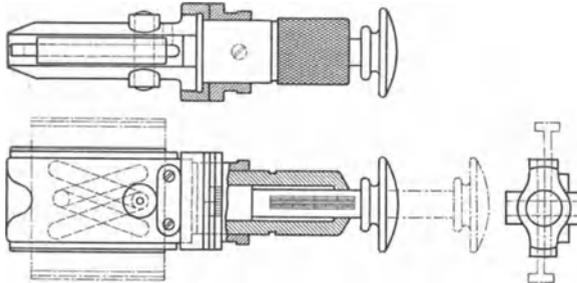


Abb. 550. Verstellbare Flachlehre.

Wie bei den Wellenlehren hat man auch bei den Bohrungslehren versucht, sie nachstellbar oder gar für einen größeren Meßbereich einstellbar auszuführen. Dazu gibt Körpers liegen, der mittels Gewinde in einer Mutter verschoben werden kann (15). Gänzlich ungeeignet ist natürlich eine Deformation durch Druck oder Schlag, wie sie von einer Seite bei im Einsatz gehärteten Lehrdornen empfohlen wird, da dadurch innere Spannungen hineinkommen. Dagegen ist ein Nacharbeiten bei verchromten Lehren durch Abschleifen der Chromschicht und Neuverchromen leicht zu erreichen (1a)<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Für eine nachstellbare Vierkreuzlehre siehe (11).

zurückstehen, daß hier — wie auch sonst bei verstellbaren Lehren — Plomben zur Sicherung gegen unbefugte Änderungen angebracht werden können.

Eine Veränderung des Meßbereichs erhält man bei Lehrdornen und Flachlehren, indem man drei bzw. zwei auf der Innenseite abgeschrägte und auch wohl mit Schwalbenschwanzführung versehene Meßbacken durch einen, gewöhnlich mittels Schraublehre betätigten Keil oder Konus je nach Bedarf mehr oder minder weit parallel zueinander verschiebt (Abb. 550). Die Einstellung erfolgt am besten mittels einer aus Endmaßen und Meßschnäbeln zusammengesetzten Rachenlehre, bei drei Meßbacken mittels eines Normallehringens (2, 5, 14).

Am einfachsten lassen sich Stichmaße verschiedenen Meßbereichs herstellen, indem man 2 Kugelendmaße in einer Hülse zusammenhält (8) und, wenn erforder-



Abb. 551. Verstellbares Stichmaß.

lich, Parallelendmaße dazwischen einfügt (Abb. 551). Bringt man sie noch in einen Halter mit zwei wiegenförmig gestalteten federnden Füßen *C* und *D* (Abb. 552), so wird die Kontrolle von Bohrungen erleichtert, da damit die achsensenkrechte Stellung sofort gegeben ist (1). Es sei auch daran erinnert, daß man durch Anspannen halbzyylinderförmiger Meßschnäbel an Endmaße jedes gewünschte Stichmaß zu erzeugen vermag (siehe S. 90).

Die festen Lehren lassen sich nicht nur zur Prüfung von Rundteilen oder von durch parallele ebene Flächen begrenzten Voll- und Hohlkörpern verwenden, sondern sich den verschiedensten Bedürfnissen anpassen. Handelt es sich um die Prüfung verschiedener Abmessungen an demselben Stück mittels Grenzlehren, z. B. bei Schrauben von Schaftdurchmesser, Kopfdurchmesser, Kopfhöhe, Gewindelänge usw., so wird man die verschiedenen dazu nötigen Lehren zu einem Stück vereinigen. Es empfiehlt sich aber nicht, sie etwa alle (in Form von Ausschnitten) in eine Platte einzuarbeiten (die so eine Reihe von Rachenlehren in sich vereinigen würde), da bei falscher Ausführung oder Abnutzung auch nur eines einzigen Rachens die ganze Lehre mit sämtlichen Meßstellen verworfen werden müßte. Die wirtschaftliche Lösung dieser Aufgabe besteht darin, die verschiedenen Lehren einzeln anzufertigen und sie alle auf einer gemeinsamen Platte zu befestigen, da dann jeder Rachen für sich ausgewechselt werden kann und die anderen nicht in Mitleidenschaft zieht (10).

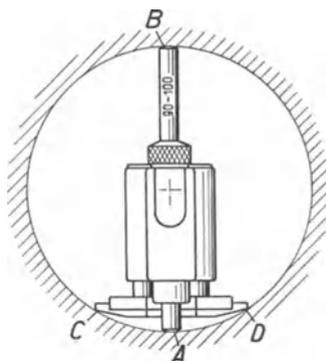


Abb. 552. Verstellbares Stichmaß.

## D. Lineale, Tuschier- und Anreißplatten.

Die zu den verschiedensten Zwecken gebrauchten Lineale und Platten gehören zwar eigentlich nicht mehr zu den Meßgeräten, dienen aber vielfach als Hilfsmittel zu Messungen, z. B. die Haar- und Kantenlineale (Abb. 553 und 554) zur Prüfung der Gradlinigkeit, die Platten zum Aufstellen der Meßgeräte und Prüflinge. Entscheidend für die Genauigkeit der Messungen ist dabei vor allem

die Ebenheit der Lineale bzw. Platten, auf deren Prüfung deshalb hier vorzugsweise eingegangen werden soll. Bei den Linealen (die bis zu 5 m Länge ausgeführt werden) kommt es dabei in erster Linie auf die Ebenheit der Hochkanten an, doch ist auch die Ebenheit der Flachseiten bis zu einem gewissen Grade nötig, um seitliche Durchbiegungen auszuschließen und die Auflage zu verbürgen (bei den Dreikantlinealen gelten dieselben Forderungen für die beiden sich in der Linealkante schneidenden Flächen). Um die Lineale auch zum Ziehen paralleler Striche verwenden

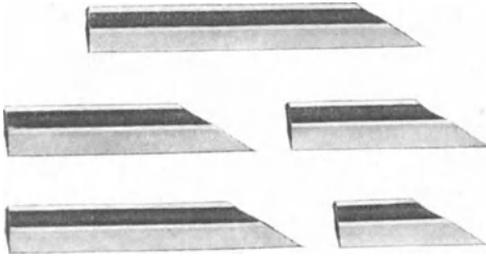


Abb. 553. Haarlineale.

zu können, muß ferner Parallelität der Hoch- (und auch der Flach-) Kanten gefordert werden, die leicht mittels Fühlhebel oder Schraublehre zu bestimmen

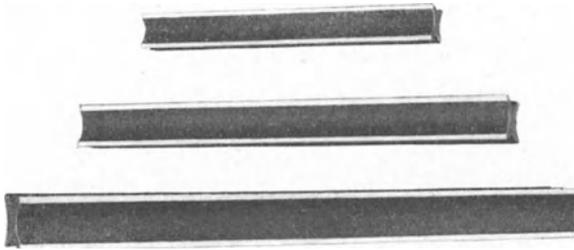


Abb. 554. Kantenlineale.

ist, handelt es sich doch dabei um eine einfache Dickenmessung. (Bei den Haarlinealen entfällt naturgemäß die Vorschrift der Parallelität.)

Eine außerordentlich genaue Bestimmung der Parallelität ergibt sich nach Abb. 555. Auf den Prüfling, der auf einer sehr gut ebenen Platte oder auf zwei Zylindern  $W$  ruht, wird eine

Brücke mit zwei parallelen, gehärteten Füßen aufgesetzt, die an einem Lenker um den Punkt  $O$  drehbar ist und einen Spiegel  $S$  trägt. Dreht man nun den Prüfling um  $180^\circ$ , so geht der Spiegel in die Lage  $S'$  über, die mit  $S$  den Winkel  $2\cdot\alpha$  bildet. Die Beobachtung der Drehung eines Spiegels mittels Autokollimationsfernrohres ergibt den Winkel  $4\cdot\alpha$ . Die Fehler der Winkelmessung werden stets gegenüber denen verschwinden, die von der Unebenheit der Flächen des Prüflings und der Unterlage herrühren. Wichtig ist vor allem, daß diese ihre Lage während der Messung nicht ändert, was mittels einer empfindlichen Libelle oder eines zweiten auf ihr stehenden Spiegels (und Fernrohres) kontrolliert wird. Anstatt der Brücke mit dem Spiegel  $S$  kann man auch eine empfindliche Libelle benutzen.

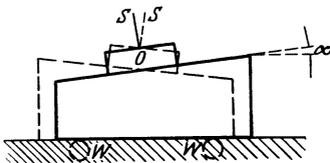


Abb. 555. Bestimmung der Unparallelität.

Zur Bestimmung der Ebenheit wird in der Praxis meist noch die Beobachtung des Lichtspaltes oder die Tuschiermethode verwendet; letztere hängt aber sehr von dem verwendeten Druck und der Geschicklichkeit des Prüfenden ab. Legt man ein genau gerades Lineal mit schmaler, gut polierter Fläche (Messerkante) auf eine gleichfalls gut polierte Fläche des Prüflings auf, so kann man bei genügend starker diffuser Beleuchtung von hinten mit unbewaffnetem Auge noch einen Lichtspalt von  $1\mu$  wahrnehmen; sind jene Voraussetzungen weniger gut erfüllt, so steigt seine Größe allerdings bis auf  $5\mu$  (11). Bei Benutzung einer Lupe der Vergrößerung  $V$  (bis höchstens  $V = 5$ ) wird diese Größe im Verhältnis  $1:V$  kleiner. Auf diese Weise kann man indessen, wie auch bei der Tuschiermethode, nur die Abweichung des Prüflings von der Ebenheit erkennen, sie aber nicht der Größe nach ermitteln.

Um die Unebenheit zahlenmäßig zu bestimmen, bedient man sich häufig eines Fühlhebels, etwa nach Abb. 556, der mittels eines auf drei Füßen (für die Prüfung schmaler Körper auf

zwei Kanten) ruhenden Tisches über den Prüfling verschoben wird (4, 12). Bei der Anordnung nach Abb. 557 liegt der Fühlhebel auf einem als Träger gleicher Festigkeit ausgebildeten Lineal, das zwei gleich hohe einstellbare Walzen trägt. Der Prüfling wird über diese, bei schweren Stücken das Gerät über den Prüfling verschoben. Die Einstellung muß mit einem genauen Lineal erfolgen (3). Genauer ist noch die Methode des Kippspiegels, bei der auf dem kleinen Tisch ein senkrechter Spiegel steht, dessen jeweilige Lage mittels eines Autokollimationsfernrohres beobachtet wird (Abb. 558). Eine kompendiöse Ausführung eines solchen Spiegelfühlhebels zeigt Abb. 559. Statt des Spiegels kann man auch eine Libelle mit dem Tisch verschieben (8), muß aber stets kontrollieren, daß sich die ganze Aufstellung während der Messung nicht ändert. Alle diese Methoden messen im Grunde nur die durch die Unebenheiten bewirkten Kippungen des Tisches, der den Fühlhebel, den Spiegel, bzw. die Libelle trägt. Auf die Größe der Unebenheiten selbst kann man dadurch nur sehr angenähert schließen, da es ganz davon abhängt, wie die Füße stehen. Nur in der Lage Abb. 560 a könnte man die Unebenheit  $u$  aus  $u = l \cdot \varphi$  bestimmen, während man in der Lage  $b$  einen zu großen ( $u_1 + u_2$ ), in der Lage  $c$  einen zu kleinen Wert ( $u_1 - u_2$ ) für  $u$  erhalten würde. Ein statt des Spiegels in der Mitte des Tisches angebrachter Fühlhebel würde in  $a$  den Wert  $\frac{1}{2} \cdot u$ , in  $b$  den Wert  $\frac{1}{2} \cdot (u_2 - u_1)$ , in Lage  $c$  dagegen den Wert  $\frac{1}{2} \cdot (u_1 + u_2)$  anzeigen. Durch eine geeignete Kombination beider Meßmethoden ließen sich somit auch in gewissen Fällen die Unebenheiten  $u_1$  und  $u_2$  einzeln bestimmen. Etwas weiter kommt man bei kleinen Prüflingen, die man nach Abb. 556 auf einer genau ebenen Unterlage unter dem feststehenden Fühlhebel verschiebt, wodurch man auch die Planparallelität prüfen kann, wie dies bereits bei den Endmaßen angegeben war (siehe S. 105).



Abb. 556. Fühlhebel zur Ebenheitsprüfung.

Man hat auch daran gedacht, zwei kommunizierende Gefäße zu nehmen und den Flüssigkeitsstand in ihnen mittels Schraublehren zu messen (Abb. 561). Damit man die einzelnen Unebenheiten erhält, dürfen sie nur in je einem Punkte aufrufen, weshalb man sie noch durch genaue Führungen stützen muß. Bei wiederholten Einstellungen auf eine ruhende Quecksilberfläche ist eine Genauigkeit von  $1 \mu$  zu erreichen. Bei der unvermeidlichen Bewegung des Quecksilbers streuen aber die Beobachtungen infolge Änderung der Oberflächenspannung (auch in weiten Gefäßen) um  $4 \mu$ . Bei Verwendung von Wasser, wozu man verbleite oder Graphitspitzen an die Mikrometerspindel ansetzt, belaufen sich die Einstellfehler auf  $10 \mu$  und nach Bewegung des Wassers sogar auf  $20 \mu$ . Die Genauigkeit dieser Methoden ist also im allgemeinen nicht ausreichend.

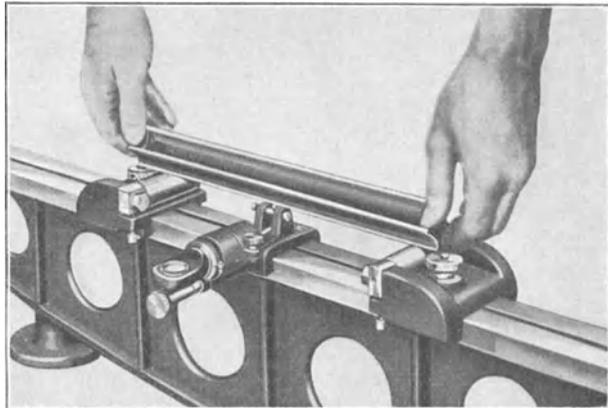


Abb. 557. Ebenheitsprüfung.

Man hat auch daran ge-

dacht, zwei kommunizierende Gefäße zu nehmen und den Flüssigkeitsstand in ihnen mittels Schraublehren zu messen (Abb. 561). Damit man die einzelnen Unebenheiten erhält, dürfen sie nur in je einem Punkte aufrufen, weshalb man sie noch durch genaue Führungen stützen muß. Bei wiederholten Einstellungen auf eine ruhende Quecksilberfläche ist eine Genauigkeit von  $1 \mu$  zu erreichen. Bei der unvermeidlichen Bewegung des Quecksilbers streuen aber die Beobachtungen infolge Änderung der Oberflächenspannung (auch in weiten Gefäßen) um  $4 \mu$ . Bei Verwendung von Wasser, wozu man verbleite oder Graphitspitzen an die Mikrometerspindel ansetzt, belaufen sich die Einstellfehler auf  $10 \mu$  und nach Bewegung des Wassers sogar auf  $20 \mu$ . Die Genauigkeit dieser Methoden ist also im allgemeinen nicht ausreichend.

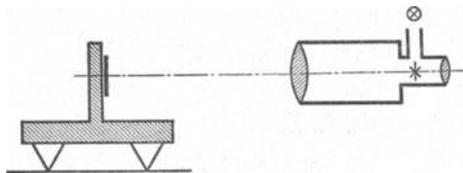


Abb. 558. Ebenheitsprüfung mit Spiegel und Fernrohr.

Eine einwandfreie Methode zur zahlenmäßigen Bestimmung der Unebenheit von Linealen besteht darin, daß man zwischen das Normal und den Prüfling zwei gleiche Endmaße legt und den Abstand zwischen den beiden Linealen

durch Endmaße ausführt (5, 9). Sehr geeignet sind hierzu die Endmaßsätze

$$1 \text{ mm} + 1, 2, \dots 9 \mu,$$

$$1 \text{ mm} - 1, 2, \dots 9 \mu.$$

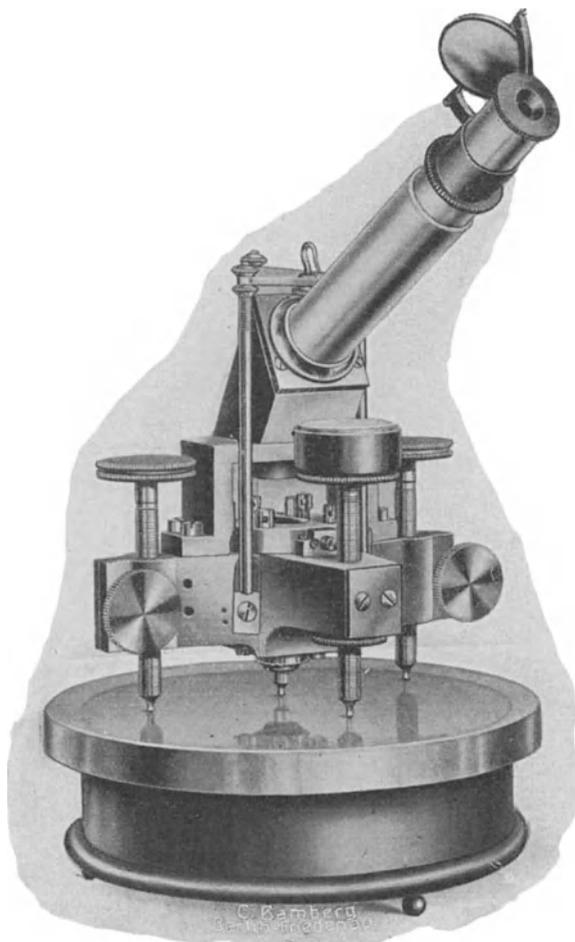


Abb. 559. Ebenheitsprüfung mit Spiegelfühlhebel.

Da die Endmaße infolge ihrer Breite Vertiefungen überbrücken und somit nur die Erhöhungen, nicht aber jene angeben, empfehlen sich, wenn es auf punktweise Ermittlung ankommt, in gleicher Weise abgestufte Stahlkugeln. Da aber durch die Keilwirkung beim Einführen der Endmaße oder Kugeln leicht größere Kräfte auftreten, die die Lineale abheben oder verbiegen, so wird die Messung des Abstandes zwischen Normal und Prüfling am besten mittels eines Innenfühlhebels mit geeigneten Meßstücken vorgenommen. Dabei sind noch die Abweichungen des Normals von der Ebenheit sowie die Durchbiegung der Lineale durch ihr Eigengewicht und den Meßdruck des Fühlhebels zu beachten (siehe weiter unten). Verfügt man nicht über ein Normallineal von bekanntem Profil, so kann man die Unebenheiten zweier gleicher Lineale auf folgende Weise bestimmen: bezeichnen  $A$  und  $B$  die Unebenheiten der beiden Kanten des einen,  $C$  und  $D$

die beim anderen Lineal, so bestimmt man durch Messung ihrer Dicken (mittels Fühlhebels oder Schraublehre) die Größen

$$A + B = x_1 \quad \text{und} \quad C + D = x_2.$$

Dann legt man die Lineale unter Zwischenfügung zweier gleicher Endmaße einander gegenüber und ermittelt nach einer der beschriebenen Methoden (am besten mittels Innenfühlhebels) die Größen

$$A + C = x_3, \quad A + D = x_4, \quad B + C = x_5, \quad B + D = x_6.$$

Aus diesen folgt

$$A = \frac{1}{2} \cdot (x_1 + x_4 - x_6) = \frac{1}{2} \cdot (x_1 + x_3 - x_5) = \frac{1}{2} \cdot (x_3 + x_4 - x_2);$$

entsprechende Ausdrücke ergeben sich für  $B$ ,  $C$  und  $D$  (2). Die Genauigkeit darf man zu etwa  $\pm 1 \mu$  ansetzen<sup>1</sup>. Im Prinzip bestimmt man dadurch zugleich

<sup>1</sup> Die Herstellung eines Urlineals oder einer Urplatte erfolgt dadurch, daß man drei Stücke  $A$ ,  $B$ ,  $C$  in den Kombinationen  $A$  und  $B$ ,  $A$  und  $C$ , sowie  $B$  und  $C$  schleift, bis alle

die Parallelität der beiden Linealkanten. Da nun meist eine gewisse Unparallelität vorhanden ist, erhält man bei der graphischen Auftragung der Ergebnisse der Ebenheitsprüfung eine geneigt zur Abszissenachse liegende Kurve (Abb. 562). Für die beiden die ideale Gerade bestimmenden Punkte nimmt man am besten die beiden End-

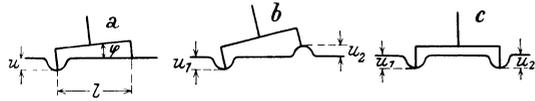


Abb. 560. Einfluß der Unebenheiten auf die Kippung.

punkte (bei starkem Randabfall besser zwei nahe den Enden gelegene Punkte) *A* und *B* oder legt sie so, daß die von ihr und der Kurve eingeschlossenen Flächen ober- und unterhalb von *AB* angenähert einander gleich werden. Die Unebenheiten *u* sind dann durch den senkrechten Abstand der Kurvenpunkte von der Geraden *AB* gegeben; bei kleinen Werten von *u* kann man diese genügend genau durch die senkrecht zur Abszissenachse genommenen Abstände der Kurvenpunkte von *AB* ersetzen. Die Neigung der Geraden *AB* gegen die Abszissenachse gibt zugleich die Abweichung von der Parallelität an.

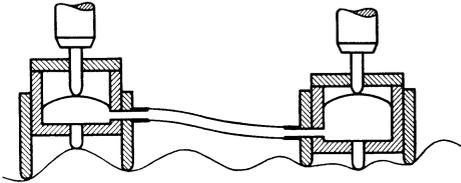


Abb. 561. Ebenheitsprüfung mit kommunizierenden Gefäßen.

Die Durchbiegung durch das Eigengewicht vermeidet man, wenn man die Lineale wagerecht (und zwar das eine auf mehrere Stahlkugeln schwimmend) legt und sie an den Punkten, an denen die Endmaße liegen, durch einen bestimmten Druck zusammenhält (die in der aufliegenden Breitseite dabei auftretende Durchbiegung stört nicht). Frei von der Durchbiegung durch das Eigengewicht wird man ferner bei der Prüfung zweier gleicher Lineale, wenn man das untere in den günstigsten Punkten unterstützt, oben an denselben Stellen die beiden gleichen Endmaße und darauf das zweite Lineal legt. Da nämlich die Biegungskurve in den günstigsten Punkten wagerecht verläuft, so kann durch die Auflagerung des anderen Lineals kein zusätzliches Drehmoment hervorgerufen werden.

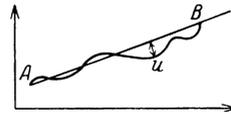


Abb. 562. Kurve der Unebenheiten.

Sind diese beiden Anordnungen nicht zu verwenden, so muß man die Durchbiegung an den einzelnen Stellen bestimmen, was rechnerisch oder im allgemeinen besser auf graphischem Wege geschieht (9).

Die größte in der Mitte auftretende Durchbiegung durch das Eigengewicht ist für einen an den Enden unterstützten Stab der Länge *L* und vom Gewicht *G*

$$d = \frac{5}{384} \cdot \frac{L^3 \cdot G}{E \cdot \lambda},$$

wo wieder *E* der Elastizitätsmodul und  $\lambda$  das Trägheitsmoment des Querschnitts um die neutrale Achse ist. Für Stahl mit  $E = 2 \cdot 10^9$  g/cm<sup>2</sup>,  $s = 7,8$  wird:

$$d = 0,508 \cdot \frac{L^4 \cdot Q}{\lambda} \cdot 10^{-10} \text{ cm.}$$

Für einen rechteckigen Querschnitt von  $9 \times 35$  mm<sup>2</sup> oder  $18 \times 120$  mm<sup>2</sup> (auf der Hochkante stehend;  $\lambda = \frac{b \cdot h^3}{12}$ ) oder für ein Dreikantlineal mit der Breite  $b = 9$  mm und der Höhe

eben sind, wie dies wohl zuerst 1840 von Whitworth angegeben ist (13); bei großen Stücken ist sorgfältig auf die Vermeidung der Durchbiegung zu achten.

$h = 25 \text{ mm}$  ( $\lambda = \frac{b \cdot h^3}{36}$ ) würden sich folgende Werte bei  $L = 1 \text{ m}$  ergeben:

Rechteckiger Querschnitt	Dreikantlineal
$9 \times 35$	$18 \times 120$
49	4,2
	146 $\mu$ .

Bei größeren Längen sind die Durchbiegungen (die eigentlich streng nur für die neutrale Achse gelten, mit stets ausreichender Genauigkeit aber auch für die Unterkante angenommen werden können) proportional  $L^4$ , sind also für  $L = 2 \text{ m}$  16mal größer, bei  $L = \frac{1}{2} \text{ m}$  dagegen 16mal kleiner. Selbst bei dieser kurzen Länge sind sie aber mit Ausnahme des Lineals  $18 \times 120 \text{ mm}$  zu berücksichtigen. Sie können erst vernachlässigt werden ( $d$  kleiner als rund  $0,5 \mu$ ) bei:

rechteckigem Querschnitt	Dreikantlineal
$9 \times 35$	$18 \times 120$
für $L < 300$	600
	250 mm.

Bestimmt man die elastische Linie für verschiedene symmetrisch gelegene Unterstützungen, so ergeben sich als deren wichtigste Lagen die folgenden (10), wobei  $a$  die Entfernung von den Enden des Lineals bedeutet:

$a = 0,207 \cdot L$ : in den Unterstützungspunkten und in der Mitte sind die Biegemomente gleich groß; das ist zwar für die Meßtechnik ohne Bedeutung, dagegen von Wichtigkeit für die sparsame Ausnutzung des Werkstoffes auf Festigkeit.

$a = 0,2113 \cdot L$ : günstigste Punkte; die Tangenten an die Enden des Lineals verlaufen wagerecht; günstigste Lagerung für die Messung von Endmaßen (ihre Meßflächen stehen senkrecht zur Achse) und für die Messung von Strichmaßen mit Teilung auf der oberen Fläche, da dann die Längenänderung (bei den üblichen Größen) einen Kleinstwert hat.

$a = 0,2142 \cdot L$ : die Durchbiegung ist an den Enden des Lineals gleich Null (in der Mitte ist sie  $0,035 \cdot d$ ); dieser Fall ist für die Meßtechnik ohne Bedeutung.

$a = 0,22031 \cdot L$ : Besselsche Punkte; der Unterschied der Projektion der neutralen Achse gegen ihre Länge hat den Kleinstwert; günstigste Lagerung für die Messung von Strichmaßen mit Teilung in der neutralen Schicht.

$a = 0,2232 \cdot L$ : die Durchbiegung ist auf die ganze Länge am kleinsten und hat für die Enden und für die Mitte gleiche Größe; günstigste Unterstützung für Messung mit Lineal auf seiner ganzen Länge.

$a = 0,2386 \cdot L$ : die Durchbiegung ist für den zwischen den Unterstützungspunkten des Lineals liegenden Teil sehr gering (in der Mitte gleich Null), so daß sie in der Regel vernachlässigt werden kann.

Es empfiehlt sich deshalb, Lineale von der doppelten Länge des benötigten Meßbereichs zu verwenden und sie in den Punkten  $a = 0,2386 \cdot L$  zu unterstützen. Die Lage der Unterstützungspunkte, für die man am besten Zylinder oder Halbzylinder (Meßschnäbel) verwendet, muß möglichst genau innegehalten werden, da schon geringe Verschiebungen recht beträchtliche Änderungen der Durchbiegung bewirken, wie aus nachstehender Tabelle für ein auf der schmalen Kante stehendes Lineal von  $2000 \times 120 \times 18 \text{ mm}$  hervorgeht:

Durchbiegung in den Punkten	$0 \cdot L$ $1,0 \cdot L$	$0,1 \cdot L$ $0,9 \cdot L$	$0,2 \cdot L$ $0,8 \cdot L$	$0,3 \cdot L$ $0,7 \cdot L$	$0,4 \cdot L$ $0,6 \cdot L$	$0,5 \cdot L$
Unterstützung in						
$a = 0,2113 \cdot L$ . . . . .	+ 4,3	+ 4,1	+ 0,8	- 1,0	- 2,2	- 2,7
$a = 0,2142 \cdot L$ . . . . .	$\pm 0,0$	+ 0,2	+ 0,1	- 0,8	- 1,9	- 2,3
$a = 0,22031 \cdot L$ . . . . .	- 0,9	- 0,3	0,0	- 0,5	- 1,3	- 1,7
$a = 0,2232 \cdot L$ . . . . .	- 1,4	- 0,6	0,0	- 0,4	- 1,1	- 1,4
$a = 0,2386 \cdot L$ . . . . .	- 3,9	- 2,0	- 0,4	+ 0,3	+ 0,1	$\pm 0,0$

Die Durchbiegung durch eine in der Mitte eines an beiden Enden aufliegenden Stabes angreifende Einzelkraft  $P$  ist

$$d' = \frac{1}{48} \cdot \frac{P \cdot L^3}{E \cdot \lambda},$$

also für einen Stahlstab

$$d' = 1,042 \cdot \frac{P \cdot L^3}{\lambda} \cdot 10^{-8} \text{ cm} \quad (P \text{ in kg}).$$

Für ein auf der Hochkante stehendes Lineal von  $9 \times 15$  oder  $18 \times 120 \text{ mm}^2$  und für ein Dreikantlineal von 9 mm Breite und 25 mm Höhe würden sich damit nachfolgende Werte bei  $L = 1 \text{ m}$  für einen Druck von  $P = 1 \text{ kg}$  ergeben:

Rechteckiger Querschnitt	Dreikantlineal
$9 \times 35$	$18 \times 120$
32,4	0,4
	267 $\mu$ .

Für Längen von 2 m würde die Durchbiegung durch den Meßdruck 8mal größer, für solche von  $1/2 \text{ m}$  8mal kleiner. Sie kann vernachlässigt werden ( $d'$  kleiner als  $0,5 \mu$ ) bei:

rechteckigem Querschnitt	Dreikantlineal
$9 \times 35$	$18 \times 120$
für $L < 250$	1100
	125 mm.

Ein einfaches Abtasten des Profils wäre dadurch zu erreichen, daß man den Fühlhebel auf einer genau geraden und durchbiegungsfreien Führung über den Prüfling, besser noch diesen unter dem Fühlhebel verschiebt<sup>1</sup>. Dies scheidet aber daran, daß es im allgemeinen nicht möglich ist, derartige Führungen für Längen über 200 mm herzustellen<sup>2</sup>. Die Schwierigkeiten lassen sich indessen auf optischem Wege überwinden.

Als Führungsbahnen dienen hier zwei dünne gespannte Quarzfäden oder Metalldrähte, die innerhalb der verlangten Genauigkeit gerade sind.

Ihr größter Durchhang in der Mitte berechnet sich zu

$$d'' = \frac{G \cdot L}{8 \cdot P} ,$$

wenn  $G$  das Gewicht ( $G = L \cdot Q \cdot s$ ),  $L$  die Länge und  $P$  die Kraft bedeuten, mit der der Faden gespannt ist. Bezeichnet man die Spannung (je Flächeneinheit) mit  $\sigma$ , so ist  $P = \sigma \cdot Q$ , somit der maximale Durchhang

$$d'' = \frac{s \cdot L^2}{8 \cdot \sigma}$$

und also unabhängig vom Querschnitt bzw. dem Durchmesser. Für Quarz ( $s = 2,65$ ) kann man die größtzulässige Spannung angenähert gleich seiner Zerreißfestigkeit  $17 \cdot 10^5 \text{ g/cm}^2$ , für Phosphorbronze ( $s = 8,7$ ) gleich der Streckgrenze rechnen, die man bei den dünnen (etwa  $15 \mu$ ) dicken, stark gewalzten Drähten zu  $40 \cdot 10^5 \text{ g/cm}^2$  annehmen kann. Damit wird für  $L = 1 \text{ m}$   $d'' = 19,5$  bzw.  $27,2 \mu$  und für  $L = 200 \text{ mm}$   $d'' = 0,8$  bzw.  $1,1 \mu$ . Vielfach werden diese Beträge vernachlässigt werden können, im übrigen macht auch die Berechnung des Durchhanges für die verschiedenen Punkte der Länge keine Schwierigkeit, so daß er leicht berücksichtigt werden kann.

Auf derartig dünnen Drähten läßt sich nun kein Gerät verschieben, man muß sie deshalb gewissermaßen mit einem gewichtslosen Lichtstrahl abtasten. In Abb. 563 stellen  $b_3$  und  $b_4$  die beiden Quarzfäden vor, die von zwei Lampen  $c_2$  und  $c_3$  (Abb. 564) beleuchtet werden. Zwischen ihnen steht eine Kombination von zwei rechtwinkligen Prismen  $c_5$  und  $c_6$ . In der Nullstellung werden die Fäden so reflektiert, daß die Strahlen in Richtung  $x$  in das Mikroskop  $c_7$  eintreten. Die Prismen sind nun am Mikroskop mit ihrem Träger  $c_4$  leicht geführt, der mit dem Fuß  $c_9$  auf dem Prüfling aufliegt (und durch den Hebel  $c_{10}$  gelüftet werden kann). Wird nun das Mikroskop auf den Seitenflächen  $b_1 b_2$  eines Rahmens mittels des Schlittens  $c_1$  verschoben, so tritt beim Übergleiten über den Prüfling ein Heben oder Senken der Prismen und dadurch eine Verschiebung gegen die stillstehenden Quarzfäden ein. Nehmen diese dabei die relativen Lagen  $b'_3$  und  $b'_4$  zu den Prismen ein, so werden die Hauptstrahlen jetzt in die Richtungen  $y$  und  $z$  in das Mikroskop eintreten. Man beobachtet nun auf seiner Strichplatte  $c_8$  den Abstand der beiden

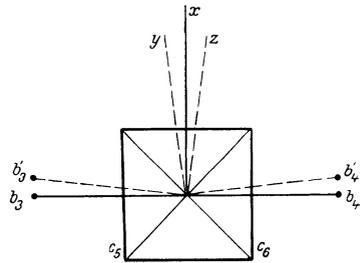


Abb. 563. Prinzip des Fadenlineals.

<sup>1</sup> Statt des Fühlhebels könnte man auch eine ebene Platte nehmen und die zwischen ihr und dem Prüfling auftretende Kapazitätsänderung mittels elektrischer Schwingungen bestimmen (10a). Die Auswertung dürfte aber hierbei auf sehr große Schwierigkeiten stoßen.

<sup>2</sup> Siehe G. Berndt: Technische Winkelmessungen. Auch auf die Geräte zur Prüfung der Gradlinigkeit der Mantellinien von Kegellehren kann hier nur hingewiesen werden (1).

Fadenbilder. Die Eichung der Apparatur erfolgt durch Unterlegen entsprechend abgestufter Endmaße unter  $c_9$ .

Der Rahmen ruht auf den Füßen  $a_3$  und  $a_4$  (an den Stirnflächen  $a_1$  und  $a_2$ ) und  $a_7$  (an der Seitenfläche  $b_1$ ) auf dem Prüfling. Die beiden ersteren werden mittels der Schrauben  $a_5$  und  $a_6$  so justiert, daß man in den beiden Endstellungen des Mikroskopes angenähert gleiche

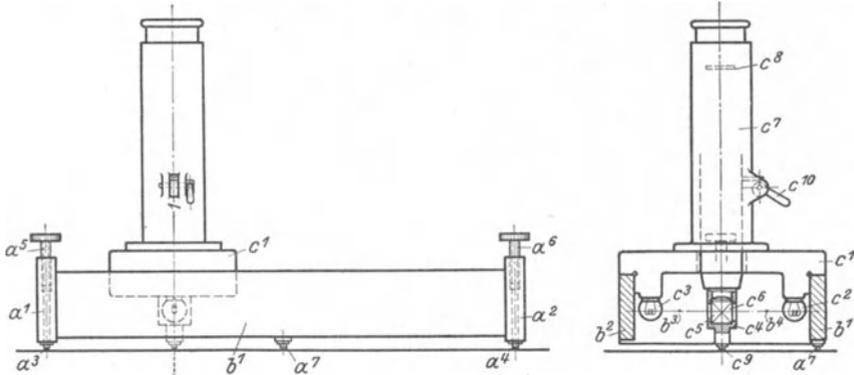


Abb. 564. Fadenlineal.

Ablesungen erhält, d. h. daß die Schlittenführung angenähert parallel zu der durch diese beiden Endpunkte des Prüflings gelegten Geraden ist (eine etwaige Differenz ist proportional der Verschiebung auf die einzelnen Ablesungen zu verteilen).

Eine andere Ausführung ist in Abb. 565 wiedergegeben. Bei dieser ist die Prismenkombination durch ein kleines Objektiv  $o$  ersetzt, das den Faden  $b_3$  in einer durch den anderen Faden



Abb. 565. Prinzip des Fadenlineals.

$b_4$  gehenden Ebene abbildet. Bei der senkrechten Verschiebung des wieder mit einem Fuß auf dem Prüfling aufruhenden Objektivs nehmen die Fäden die relativen Lagen  $b'_3$  und  $b'_4$  ein, von denen ersterer in  $b''_3$  abgebildet wird. Der Abstand  $b''_3$   $b''_4$  wird nun wieder auf der Strichplatte des Mikroskopes abgelesen. Bei geeigneter Vergrößerung kann man eine

Meßgenauigkeit von 1 bis evtl.  $0,5 \mu$  erreichen, vorausgesetzt, daß die Fäden bis auf diesen Betrag gleichmäßigen Durchmesser besitzen, was bei Quarzfäden bis 250 mm Länge wohl zu erreichen ist, bei längeren Metalldrähten indessen doch auf Schwierigkeiten stoßen wird.

Die Genauigkeit der Führungsschienen  $b_1$  und  $b_2$  spielt bei diesem Fadenlineal nur eine untergeordnete Rolle. Von der Kippung des Mikroskopes und des Prismen- bzw. Objektivträgers senkrecht zu den Fäden ist man durch die Beobachtung der gegenseitigen Lage der beiden Fäden unabhängig. Eine Kippung parallel zu ihnen würde nur bedeuten, daß man statt der tatsächlichen Unebenheit ihre Projektion auf die geneigte Stellung mißt, was nur Fehler 2. Ordnung bewirkt. Es genügt deshalb, für die Führungen gezogenen Werkstoff

zu nehmen. Dabei hat sich herausgestellt, daß geschliffene Führungen von 500 mm Länge Unebenheiten von  $+2,2$  bis  $-1,4 \mu$  hatten, geschabte und tuschierte dagegen von  $+5,4$  bis  $-10,2 \mu$  aufwiesen, also etwa fünfmal schlechter waren (6).

Die meisten der geschilderten Verfahren sind entsprechend auch auf die Prüfung der Gradlinigkeit der Mantellinien von Zylindern und Kegeln anzuwenden. Bei der Bestimmung der Unebenheit von Platten muß man so vorgehen, daß man die Abstände ihrer Punkte von einer angenommenen Ebene aus ermittelt; diese ist durch 3 Punkte bestimmt. Dafür wählt man zweckmäßig die 2 Ecken  $A$  und  $B$  einer Längsseite (Abb. 566) und eine dritte Ecke  $a$  und legt (bei der Methode mit Lineal und Fühlhebel oder Endmaßen) auf diese drei gleiche Endmaße. Durch Auflegen des Lineals auf  $Ba$  ermittelt man die Lage des Punktes  $M$  (unter Berücksichtigung der Durchbiegung und der etwaigen Korrektion

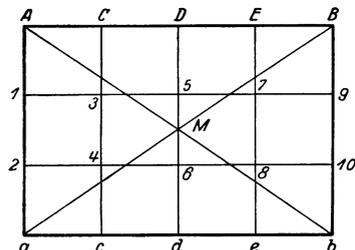


Abb. 566. Bestimmung der Unebenheit von Platten.

des Lineals) und läßt hier ein entsprechendes Endmaß liegen, dann durch Auflegen des Lineals auf  $A$  und  $M$  die Lage des Punktes  $b$ , wo man gleichfalls das entsprechende Endmaß liegen läßt. Durch Auflagerung des Lineals auf die Endmaße in  $A$  und  $B$  sowie nachher in  $a$  und  $b$  erhält man nacheinander die Lage der Punkte  $C, D, E, c, d, e$ ; durch weiteres Auflegen auf  $Aa, Cc, \dots Bb$  erhält man die Lage der Punkte  $1, 2, 3, 4, \dots, 9, 10$  und hat dadurch die Möglichkeit, die Höhenschichtenlinien der Platte zu ermitteln (zweckmäßig bestimmt man die Durchbiegung des Lineals bei den einzelnen Auflagerungen auf graphischem Wege [für die Durchführung einer solchen Messung siehe (9)]).

Die zu erreichende Genauigkeit wird bei der Verwendung von Endmaßen oder Stahlkugeln im wesentlichen durch den bei ihrer Einführung ausgeübten Druck beeinflusst, der bei größeren Linealen eine zusätzliche (und nicht zu berechnende) Durchbiegung gibt, und kann deshalb nur auf einige  $\mu$  angesprochen werden, während man bei Benutzung eines geeigneten Innenfühlhebels auf eine solche von etwa  $\pm 1$  bis  $1,5 \mu$  kommt.

In ähnlicher Weise läßt sich auch die Unterscheidung der Ebenheit von Platten mittels des Fadenlineals durchführen.

Die zuletzt genannten Methoden gestatten, wie erwähnt, das Profil punktweise aufzunehmen. In der Praxis wirken sich aber die so gefundenen Unebenheiten nicht in vollem Betrage aus, da man auf den Platten immer Stücke verschiebt, die mit einer größeren Fläche aufliegen (z. B. Stahlwinkel oder Füße von Höhenreißern auf Anreißplatten, Supporte an Meßmaschinen). Dadurch tritt ein gewisser Ausgleich ein, da diese Stücke stets auf den höchsten Punkten aufliegen, die noch dazu durch den Auflagedruck abgeplattet werden. Deshalb wird man auch bei der Benutzung von Innenfühlhebeln zweckmäßig jedesmal zwischen die zu untersuchende Platte und den Meßstift des Fühlhebels ein Endmaß legen, um nicht die beim Gebrauch unschädlichen kleinen Vertiefungen mit zu erfassen.

Praktisch wird man darum auch die Güte von Führungen dadurch bestimmen, daß man auf dem zu verschiebenden Teil (z. B. im Support, an Stelle des Drehstahls) einen Fühlhebel befestigt und ihn an einem genau geraden Stück (Lineal, Zylinder) vorbeischiebt (natürlich kann man auch bei kürzeren Führungen das Lineal im Support festspannen und den Fühlhebel fest aufstellen). Um die Abweichungen in wagerechter und in senkrechter Richtung zu erhalten, muß man beide Bestimmungen mit entsprechender Anordnung des Fühlhebels vornehmen. Bei sehr langen Führungen scheidet diese Methode daran, daß es nicht möglich ist, genügend lange, ebene und durchbiegungsfreie Lineale zu erhalten. Dann spannt man besser parallel zum Bett einen Draht aus (Abb. 567) und befestigt an dem Support ein Meßmikroskop (z. B. nach Abb. 456), das stets so eingestellt wird, daß das Bild des Drahtes

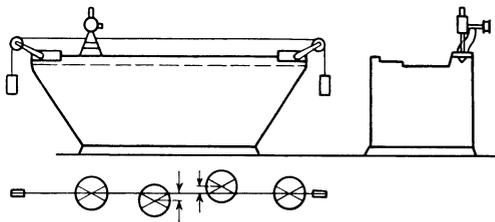


Abb. 567. Prüfung von Führungen mit gespanntem Draht und Mikroskop.

befindlichen Marke deckt (ein Verfahren, das viel zur Prüfung der Führungen an den Betten von Werkzeugmaschinen verwendet wird). Diese Methode, deren Genauigkeit etwa  $5 \mu$  beträgt, kann sowohl zur Prüfung der Führung in wagerechter als auch in senkrechter Richtung verwendet werden, falls man in letzterem Fall noch den Durchhang des Drahtes berücksichtigt. Nur für diesen ist das folgende Verfahren geeignet, bei dem man neben dem Bett zwei kommuni-

zierende, der Oberflächenspannung wegen breite Tröge mit Wasser aufstellt (Abb. 568; Quecksilber wäre besser, wird aber der großen benötigten Mengen wegen zu teuer) und an dem Support zwei Schraubelehren mit abgerundeten,

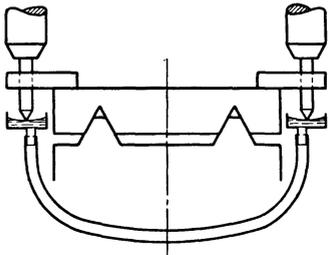


Abb. 568. Prüfung von Führungen mit kommunizierenden Gefäßen.

verbleiten oder Graphitspitzen anbringt, wobei der Augenblick der Berührung auf elektrischem Wege beobachtet wird. Die Genauigkeit soll  $2,5 \mu$  betragen, wenn man die Oberflächen frei von Staub und den Graphit trocken hält (7). Diese Angabe dürfte aber zu hoch sein, man wird im allgemeinen, selbst in diesem Falle, in dem

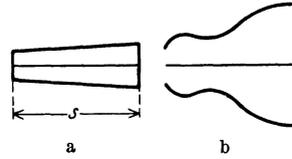


Abb. 569. Prüfung von Führungen durch Aufzeichnung.

die Gefäße nicht bewegt zu werden brauchen, wie früher erwähnt, mit etwa  $10 \mu$  Ungenauigkeit rechnen müssen.

Bei kürzeren Führungen kann man auch eine Schreibspitze (Diamant, Stahlnadel, Schweinsborste) nehmen und ihre Bewegung auf einer (evtl. berußten) Glasplatte aufzeichnen lassen. Dreht man diese um  $180^\circ$ , so daß ihre obere Seite jetzt nach unten kommt, und verfährt wie vorher, so würde man bei idealer Führung zwei gerade Linien, etwa nach Abb. 569a, beim Vorliegen von Unebenheiten dagegen zwei kurvenförmige Linien, etwa nach Abb. 569b erhalten; es wird sich dann der mikroskopisch gemessene Abstand beider nicht proportional der Verschiebung  $s$  ändern. Aus den Abweichungen hiervon kann man dann die wirksame Größe der Unebenheiten ermitteln.

Handelt es sich dagegen um die Änderung des Winkels bei der Verschiebung, so setzt man auf den Support zwei Libellen parallel und senkrecht zu ihrer Richtung oder besser

Stahllineale	(DIN Entwurf)
Zulässige Abweichung der Hochkanten von der Geraden:	
Haar- und Dreikantlineale . . .	$\pm \left( 0,001 + \frac{L}{500000} \right)$ mm,
Vierkant- und Normallineale . .	$\pm \left( 0,001 + \frac{L}{200000} \right)$ mm,
Werkstattlineale I. Qualität . .	$\pm \left( 0,002 + \frac{L}{100000} \right)$ mm,
Werkstattlineale II. Qualität . .	$\pm \left( 0,005 + \frac{L}{50000} \right)$ mm.
Zulässige Abweichung der Ebenheit der Flachseiten: der dreifache Betrag wie bei der Hochkante (bei den Dreikantlinealen gilt diese Forderung für die beiden die Kante enthaltenden Flächen).	
Zulässige Abweichung von der Parallelität:	
bei den Hochkanten: das Doppelte	} der zulässigen Abweichung von der Ebenheit der Hochkanten.
bei den Flachkanten: das Sechsfache	
Dabei bedeutet $L$ die Gesamtlänge der Lineale.	

Platten- und Tuschieerlineale	(DIN Entwurf)
Zulässige Abweichung von der Ebenheit:	
geschabt, I. Qualität . . .	$\pm \left( 0,005 + \frac{L}{200000} \right)$ mm,
geschabt, II. Qualität . . .	$\pm \left( 0,01 + \frac{L}{100000} \right)$ mm,
gehobelt . . . . .	$\pm \left( 0,02 + \frac{L}{50000} \right)$ mm.
Dabei bedeutet $L$ die Länge der größten Kante.	

einen Spiegel und beobachtet seine Kippung in zwei zueinander senkrechten Richtungen mit einem fest aufgestellten Autokollimationsfernrohr<sup>1</sup>.

Auf Grund der ausgeführten Messungen (2, 9) lassen sich für Lineale und Platten vorstehende Forderungen aufstellen.

Wenn auch durch fortschreitende Verbesserung der Meßgeräte und -methoden die Meßgenauigkeit immer weiter erhöht und das Gefühl beim Messen in immer größerem Umfange ausgeschaltet ist, so darf man doch nicht vergessen, daß das Entscheidende stets der Mensch ist. Das gilt nicht nur für die Ausführung der Messung selbst, sondern vor allem auch für ihre kritische Verwertung. Um das Ergebnis einer Messung verbürgen zu können, müssen nicht nur die möglichen Fehler der Methode und des Meßgeräts bekannt sein, sondern auch von Zeit zu Zeit immer wieder neu bestimmt werden; das gilt auch für jedes neue Meßwerkzeug sofort nach der Anlieferung, wenn nicht der Prüfschein einer zuverlässigen Firma oder das Beglaubigungszeugnis einer Behörde mitgeliefert wird. Wie schon Bessel ausgeführt hat, muß jede Meßeinrichtung zweimal konstruiert werden, einmal vom Hersteller und dann vom Benutzer. Ferner müssen die verschiedenen Einflüsse auf die Messung (Temperatur, Verschiedenheit der Ausdehnungskoeffizienten, Verkürzung und Abplattung durch den Meßdruck, Durchbiegung usw.) beachtet und soweit als möglich ihrer Größe nach festgestellt werden, damit man sieht, ob sie vernachlässigt werden können oder in Rechnung gesetzt werden müssen. Erst nach einer solchen kritischen Durcharbeitung der Meßgeräte und -methoden ist es möglich, sich ein Urteil darüber zu bilden, welche Genauigkeit überhaupt in den einzelnen Fällen zu erreichen ist. Dann wird auch der Benutzer oder Käufer eines Meßgeräts nicht irgend welchen Angaben von Genauigkeiten zum Opfer fallen, die zahlenmäßig kleiner sind als die selbst bei allersorgfältigsten Messungen unvermeidlichen Fehler, oder die bei den meisten technischen Messungen gänzlich zwecklos sind und in den Fabriklaboratorien überhaupt nicht nachgeprüft werden können. Nur durch Erziehung zur kritischen Wertung wird es möglich sein, übertriebene Ansprüche im Interesse der Wirtschaftlichkeit auf ein vernünftiges Maß zurückführen zu können.

<sup>1</sup> Über eine Pendelanordnung zur Prüfung von Führungen siehe (14).

# Anhang.

Von H. Schulz.

## A. Physiologische Fehler.

Den systematischen, durch die Unvollkommenheiten der Meßgeräte bedingten Fehlern, die mindestens teilweise durch zweckentsprechende Abänderung der instrumentellen Hilfsmittel unwirksam gemacht werden können, stehen die zufälligen gegenüber, die in erster Linie dadurch bedingt sind, daß bei fast allen Meßwerkzeugen die Einstellung und die Ablesung durch das Auge gemacht wird. Dieses hat aber, wie jeder physikalische Apparat, nur eine beschränkte Meßgenauigkeit und weist eine Anzahl von Fehlern auf, deren Größe von den Beobachtungsbedingungen abhängig ist. Da diese aber nur selten einwandfrei feststellbar sind, ist es von besonderer Wichtigkeit, die Größe der Fehler beurteilen zu können, bevor eine Messung ausgeführt wird.

Die durch den Bau des menschlichen Auges bedingten Einstell- und Ablesefehler können recht beträchtliche Werte annehmen, ihr Einfluß auf das Meßergebnis also gegebenenfalls größer sein als derjenige der instrumentellen Ungenauigkeit.

Die Wahrnehmung äußerer Gegenstände kommt bekanntlich in der Weise zustande, daß durch den optischen Apparat des Auges ein verkleinertes Bild auf dem Augenhintergrunde entworfen wird, welches nun von den Nervenendigungen der Netzhaut aufgenommen und als Reiz dem Gehirn zugeführt wird, wo er in Vorstellungsinhalte umgewandelt wird. Bei diesem komplizierten Übertragungsvorgange sind neben den Abbildungsfehlern des optischen Systems die Grenzen des Wahrnehmungsvermögens in energetischer Beziehung zu beachten, ferner die infolge der Struktur der Netzhaut vorhandenen Unvollkommenheiten des räumlichen Unterscheidungsvermögens und endlich psychische Einflüsse bei der Umwandlung der Reize im Vorstellungsinhalte. Letztere machen sich bei einer größeren Anzahl von Einzelmessungen als Folgen einer Ermüdung stets bemerkbar und sollten sorgfältig geprüft und berücksichtigt werden.

Auf die Abbildungsfehler des optischen Systems des Auges (1) einzugehen, ist im allgemeinen nicht nötig, da diese durch Ausgestaltung des Beobachtungsverfahrens, insbesondere durch Benutzung passender Sehhilfen (Brillengläser) oder vergrößernder Instrumente (Lupen, Mikroskope, Fernrohre) ausgeschaltet werden können. Wichtig für die Leistungsfähigkeit des Auges ist der Einfluß physiologischer Prozesse, die durch den Bau der Netzhaut bedingt sind. Diese bedeckt als Ausbreitung des Sehnerven die innere Fläche der Sehnethaut, welche das Auge als feste Hülle umschließt. In den Ausläufern der Sehnervenfasern, die unmittelbar an die Sehnethaut angrenzen und von ihr nur durch eine dünne Pigmentschicht getrennt sind (in der auch die zur Ernährung des Auges notwendigen Adern verlaufen), wird das Licht absorbiert und die Lichtenergie in Reize umgewandelt. Wenn auch zwischen auftreffender Lichtenergie und Größe des Nervenreizes zahlenmäßige Beziehungen bestehen, so sind diese doch nicht eindeutig durch die auftreffende Lichtenergie allein bestimmt, sondern werden noch beeinflußt durch die Vorgeschichte der lichtempfindlichen Aufnahmeelemente.

Das Auge ist in der Lage, sich starken Intensitätsunterschieden weitgehend anzupassen, und zwar durch eine Art Sensibilisierungsvorgang. In den Nervenendungen, den Zapfen und Stäbchen, befindet sich ein lichtempfindlicher Farbstoff, der Sehpurpur, dessen Menge durch die mittlere äußere Helligkeit bestimmt ist, der diesen Gleichgewichtszustand aber erst nach Ablauf einer endlichen Zeit erreicht, welche bei starken Intensitätsänderungen bis zu etwa einer Stunde betragen kann. Es ist daher notwendig, bei Präzisionsmessungen stets die günstigste Helligkeitsstufe zu wählen und diese während der Messungen möglichst unverändert beizubehalten, da sonst die Wahrnehmungsfähigkeit für Helligkeitsunterschiede sehr stark vermindert wird und auch die Erkennbarkeit räumlicher Lagenunterschiede leidet.

Als günstigste Beleuchtungsstärke für gut reflektierende Flächen ist das Intervall von etwa 50 bis 250 Lux zu betrachten. Ist die Beleuchtungsstärke geringer oder größer (9), so werden die notwendigen Intensitätsunterschiede für die Erkennbarkeit von Marken so beträchtlich (6a, 7a), daß sie bei Metallteilungen zuweilen nicht mehr erreicht werden, besonders wenn die Metallflächen (Silberflächen) oxydiert sind und dadurch ihr Reflexionsvermögen abgenommen hat.

Hinsichtlich ihres Unterscheidungsvermögens für räumliche Einzelheiten ist die Netzhaut der photographischen Platte vergleichbar. Ihre lichtempfindlichen Elemente, die schon genannten Zapfen und Stäbchen, haben wie die Bromsilberkörner der Platte eine endliche Ausdehnung.

Mag deshalb das auf einem Netzhautelement entworfene Bild noch so viele Einzelheiten aufweisen, so kann doch eine Unterscheidung nicht mehr stattfinden, weil das betreffende Zäpfchen oder Stäbchen nur den Gesamtreiz anzuzeigen vermag. In dem für Messungen allein in Frage kommenden gelben Fleck, der Stelle schärfsten Unterscheidungsvermögens, befinden

sich nur Zapfen, die in ziemlich regelmäßigem sechseckigem Querschnitt den hinteren Teil des Augapfels in wabenförmiger Anordnung bedecken (Abb. 570). Jedes dieser Empfangselemente hat einen Durchmesser von etwa  $4 \mu$ , der, vom Knotenpunkt des Auges aus gesehen, einem Sehwinkel von etwa  $50''$  entspricht. Zwei Punkte oder zwei parallele Linien können demnach nur getrennt wahrgenommen werden, wenn ihr Abstand wenigstens unter diesem Winkel erscheint, also in der normalen Sehweite von 250 mm

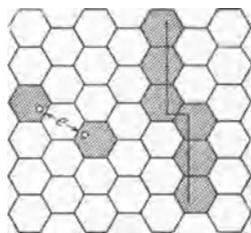


Abb. 570. Schematisches Bild des gelben Flecks.

mindestens 0,06 mm beträgt (siehe S. 37), vorausgesetzt, daß das Licht weder zu schwach noch blendend ist. Bei der Auswertung einer Skala mit Hilfe einer Lupe oder eines Mikroskopes, wobei der Sehwinkel entsprechend der Vergrößerung  $v$  wächst, läßt sich also noch ein Unterscheidungsvermögen von  $\frac{0,06}{v}$  mm erreichen. Diese Grenze gilt jedoch nur für geringe Vergrößerungen, für stärkere wird sie durch den Einfluß der optischen Abbildungsfehler, sowie die Helligkeitsabnahme ungünstig beeinflusst. Als äußerste Grenze für die Vergrößerung, die infolge der Justierungsschwierigkeiten kaum überschritten werden kann, ist  $v = 300$  bis 400 anzusehen, so daß der geringste bei Mikroskopbeachtung noch unterscheidbare Abstand in der Größenordnung von  $0,1 \mu$  zu suchen ist (4). Bei stärkerer Vergrößerung leidet außerdem die Schärfe der Abbildung, wenn nicht die Aperturen des Meßmikroskops und der Beleuchtungseinrichtung entsprechend gewählt werden, was bei solchen immerhin als Hilfseinrichtungen zu betrachtenden optischen Instrumenten nicht stets erzielt werden kann.

Die einfache Aufgabe, festzustellen, ob zwei Striche oder Punkte durch einen noch eben wahrnehmbaren Zwischenraum getrennt sind oder nicht, kommt bei Längenmessungen nur selten in Frage. Meist handelt es sich darum, entweder einen dünnen Faden auf die Mitte eines dickeren Striches oder eines durch zwei Fäden begrenzten Intervalles einzustellen, also eine Halbierung durch Schätzung auszuführen, oder man soll beurteilen, ob ein Teilstrich die Fortsetzung eines andern bildet, gegen den er seitlich verschoben sein kann (Nonieneinstellung).

Die einfache Aufgabe, festzustellen, ob zwei Striche oder Punkte durch einen noch eben wahrnehmbaren Zwischenraum getrennt sind oder nicht, kommt bei Längenmessungen nur selten in Frage. Meist handelt es sich darum, entweder einen dünnen Faden auf die Mitte eines dickeren Striches oder eines durch zwei Fäden begrenzten Intervalles einzustellen, also eine Halbierung durch Schätzung auszuführen, oder man soll beurteilen, ob ein Teilstrich die Fortsetzung eines andern bildet, gegen den er seitlich verschoben sein kann (Nonieneinstellung).

In beiden Fällen gilt die oben angegebene Größe für die Leistungsgrenze des Auges nicht. Der Fehler bei Mittenschätzungen, der selbstverständlich auch von der Größe und Anordnung der Aufnahmeelemente abhängig ist, ist noch bedingt durch die Breite  $s$  des zu teilenden Intervalles. Unter Voraus-

setzung normalen Augenabstandes folgt für die Größe des Fehlers  $k$  im Mittel nach den Beobachtungen von Dorst (3), Labitzke (7, 10) und Reinartz (11):

$s = 1$	2	3	4 mm,
$k = 0,035$	0,050	0,064	0,074 mm,

also ein Fehler von gleicher Größenordnung, wie für die Grenze des Unterscheidungsvermögens aus dem Bau der Netzhaut abgeleitet worden ist, aber etwa mit der Quadratwurzel aus der Intervallgröße wachsend. Streng genommen ist er noch von der Fadendicke, der Fadenanordnung (Einzel- oder Doppelfaden) und von der Richtung der Begrenzung des Intervalles gegen die Augenverbindungslinie abhängig.

Dies ist darauf zurückzuführen, daß die Größe vertikal gelegener Strecken anders beurteilt wird, wie diejenige horizontaler, wie man bereits aus der Anordnung der Netzhaut-elemente in dem gelben Fleck zu schließen gezwungen ist. Nach Abb. 570 sind die Zapfen in vertikaler Richtung so geordnet, daß ihre Mittelpunkte auf vertikalen gleichabständigen Geraden liegen, während sie in der Horizontalen für benachbarte Elemente gegeneinander versetzt sind. Daher werden auch kleine Quadrate als stehende Rechtecke angesehen und erst bei Mitwirkung einer sehr großen Anzahl von Zapfen, wenn nämlich beim Netzhautbild die Seiten des Quadrates gleich dem Durchmesser der Netzhautgrube sind, gleicht sich der Unterschied der Richtungen aus, um bei noch größeren Figuren in das Gegenteil umzuschlagen (14). Für die Abschätzung der Fehlergrenzen genügt es jedoch, von diesen Einflüssen abzusehen.

Bei etwa 40facher Mikroskopvergrößerung würde sich eine Mitteneinstellungsgenauigkeit von etwa  $1 \mu$  ergeben.

Außer dem variablen tritt hierbei noch ein konstanter Fehler auf, welcher im allgemeinen für das rechte und das linke Auge verschiedene Vorzeichen hat; er läßt sich gleichfalls auf physiologische Ursachen zurückführen (6). Es liegen nämlich die Empfangselemente in der (in Richtung des in das Auge eintretenden Lichtes) letzten Schicht der Netzhaut; die überlagernden Nervenschichten bilden nun rings um den gelben Fleck eine Verdickung, den Retinawall. Infolge seiner größeren Dicke auf der nasalen Seite des Auges muß nun die nasale Seite der einzuteilenden Strecke (wenigstens für normal gebaute Augen) überschätzt werden. Die scheinbare Mitte ist deswegen von der wahren Mitte bei Beobachtungen mit dem rechten Auge nach rechts, mit dem linken Auge nach links verschoben (12). Diese Annahmen geben eine gute zahlenmäßige Übereinstimmung mit den Beobachtungswerten und auch eine Begründung für die Tatsache, daß der relative, vom Bau des einzelnen Auges abhängige Fehler der Mittenschätzung von einer bestimmten Intervallgröße an sich nicht mehr ändert. Es sei auch noch hingewiesen auf die unbewußte Vorliebe für eine bestimmte Dezimale bei Zehntelschätzungen (persönliche Gleichung), die sehr starken individuellen Schwankungen unterliegt, ebenso auf die Tatsache, daß durch Verschiedenheiten zu beiden Seiten des zu teilenden Intervalles eine Beeinflussung der Mitteneinstellung stattfindet.

Untersuchungen über die Größe des Schätzungsfehlers bei Zehntel- und Zwanzigstelschätzung sind unter Benutzung geodätischer Messungen verschiedentlich ausgeführt worden (8, 13) und haben für den mittleren unregelmäßigen Ablese- und Schätzungsfehler  $m$  die Beziehung ergeben:

$$m = \frac{\pm (3,43 \pm 0,10) \cdot \sqrt{s}}{100},$$

wobei der Koeffizient von  $s$  noch von Beobachter zu Beobachter sich ändern kann. Der Verlauf des Schätzungsfehlers in Abhängigkeit von

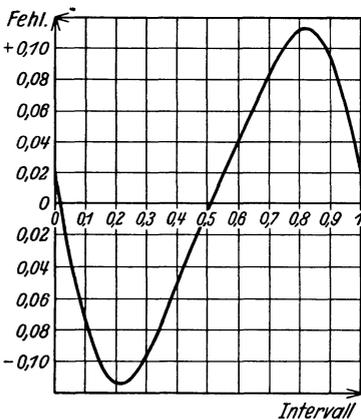


Abb. 571. Fehler bei Zehntelschätzung.

der Intervallstelle, der auch als „Dezimalgleichung“ bezeichnet wird, zeigt Extremwerte bei 0,2 und 0,8 und Nullwerte in der Nähe von 0,0, 0,5 und 1,0 (Abb. 571).

Für die Größe der Breitenwahrnehmung oder die „Noniensehschärfe“, die angibt, welche Verschiebung zweier Striche gegeneinander noch erkannt werden kann, ist außer dem Abstand der Teilstriche ihre Länge und Dicke maßgebend. Aus dem Bau der Netzhaut folgt, daß die Verschiebung zweier Teilstriche auch dann noch wahrnehmbar sein muß, wenn der Abstand der Netzhautbilder kleiner ist als ein Zapfendurchmesser  $e$ , daß aber mit abnehmender Strichlänge die Erkennbarkeit der Verschiebung immer geringer wird, bis schließlich die Noniensehschärfe für sehr geringe Strichlängen in die wesentlich durch den Zapfendurchmesser bestimmte „Punktsehschärfe“ von 50'' übergeht. Nach Messungen von Wülfing (18) beträgt der Mindestwert der noch erkennbaren Verschiebung eines Noniusstriches gegen einen Teilstrich der Hauptteilung 12'', doch können bei geeigneten Beobachtungsbedingungen von manchen Beobachtern noch Verschiebungen von etwa 3 bis 4'' nachgewiesen werden (5). Das Optimum der Noniensehschärfe läßt sich nur bei großer Übung, einwandfreier Beleuchtung und richtiger Wahl von Strichlänge und Strichdicke erreichen; außerdem müssen Skala und Nonius in einer idealen Linie zusammenstoßen. Jeder sie trennende Zwischenraum, sowie Verdickung der Teilstriche an der Kante setzt die Ablesungsgenauigkeit merklich herab.

Die Wahl der Strichlänge für ein durch die instrumentellen Bedingungen gegebenes Teilungsintervall ist durch das Nomogramm (Abb. 572) erleichtert (15). Zunächst muß die Strichdicke festgelegt werden, die einerseits durch das Intervall bestimmt wird, andererseits durch das Material, auf dem die Teilung ausgeführt werden soll. Im allgemeinen sollte bei  $n$  tel Nonien die Strichdicke  $\frac{1}{2}n$  des Strichabstandes nicht übersteigen (was aber aus praktischen Gründen häufig nicht innezuhalten ist; siehe S. 162). Das Teilungsintervall selbst ist so klein zu wählen, daß die von Bourdon (2, 16) festgestellte Abnahme der Noniensehschärfe bei größeren Winkeln zur Augenachse noch nicht in Erscheinung tritt. Nach Bourdon ist nämlich:

Neigung der Strahlen gegen die Augenachse	Noniensehschärfe	Verhältnis zur zentralen Sehschärfe
0°	7''	1
1°	23''	3,3
5°	237''	34
10°	413''	59
20°	836''	120

Bei angenommener Ablesungsgenauigkeit, die in diesem Falle auf Beobachtung mit unbewaffnetem Auge sich bezieht, und weiterhin bekannter Strichdicke ergibt sich dann die Strichlänge aus dem Nomogramm wie folgt: Man verbindet zunächst die der gewählten Ablesungsgenauigkeit entsprechenden Punkte der Skalen Ia und IIa mit den zugehörigen Punkten der Skalen Ib und IIb, die die Strichdicke angeben, wodurch man auf den Trägern Ic und IIc Hilfspunkte erhält, deren Verbindungslinie auf der Kurve die Strichlängen ergibt, bei denen der Ablesungsfehler am kleinsten wird. Das in der Abb. 572 eingetragene

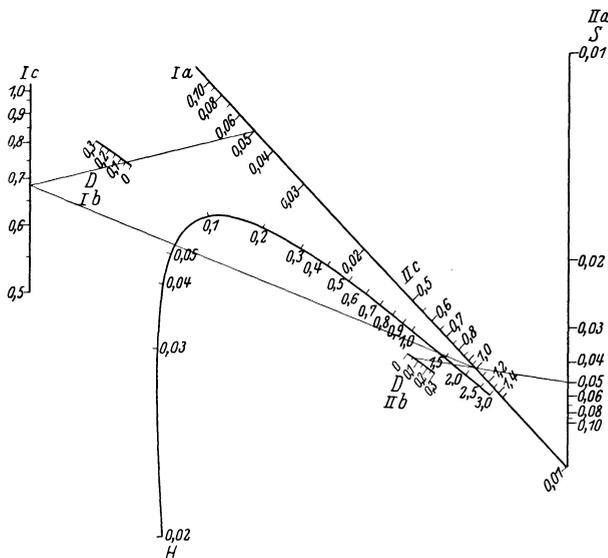


Abb. 572. Nomogramm zur Bestimmung der günstigsten Strichlänge.

Beispiel bezieht sich auf eine Strichdicke von 0,05 mm und eine Ablesungsgenauigkeit von 0,05 mm. In der folgenden Tabelle sind für einige Werte der Strichdicke  $D$  und der Ablesungsgenauigkeiten  $m_a$  die Strichlängen (sämtliche Größen in Millimeter) verzeichnet<sup>1</sup>.

$D$	$m_a$			
	0,05	0,1	0,15	0,2
0,01	0,37	0,40	0,44	0,48
0,02	0,64	0,67	0,1	0,74
0,03	0,90	0,93	0,96	0,99
0,04	0,18	1,20	1,23	1,25
0,05	1,45	1,47	1,49	1,51
0,10	2,67	2,67	2,67	2,67

## B. Die Zurückführung des Meters auf die Wellenlänge des Lichtes.

Alle Versuche, als Urmaß den Abstand bestimmter Marken oder Flächen eines materiellen Körpers zu benutzen, sind, wie früher erwähnt, gescheitert, weil die Länge nicht nur durch unmittelbare Temperatureinwirkung sich ändern kann, die Festlegung mithin eine genaue Temperaturbestimmung erfordert, sondern weil vor allem jeder materielle Körper inneren Veränderungen unterliegt; diese können durch Ausgleich innerer Spannungen hervorgerufen oder durch Kristallisationsvorgänge bedingt sein, über deren Verlauf eindeutige Aussagen nicht möglich sind (siehe Abschnitt I E 2).

Seit etwa 40 Jahren ist man zu der Überzeugung gelangt, daß als ideales, von der Natur unmittelbar gegebenes, an allen Orten wiederherstellbares Längenmaß die Wellenlänge des Lichtes anzusehen ist; sie gibt die Möglichkeit, sich von allen materiellen, zeitlichen Änderungen unterworfenen Maßstäben frei zu machen. Auch bei der Zusammensetzung dieser kleinsten Urnormalen treten keine Fehler auf. Der einzige Nachteil dieser Einheit ist ihre geringe, praktischen Bedürfnissen nicht immer angemessene Größe; man muß deshalb die praktischen Längenmessungen mit Hilfsnormalen ausführen, die in Lichtwellenlängen geeicht sind. Die Zurückführung der praktischen Einheit, des Meters, auf die Wellenlänge des Lichtes ist in verhältnismäßig einfacher Weise durch Anwendung der Interferenz des Lichtes möglich, da die Abstände der Maxima und Minima der Interferenzstreifen bereits größere vom menschlichen Auge unmittelbar wahrnehmbare Längenunterschiede ergeben.

Der auf das Auge wirkende Spektralbereich ist im allgemeinen auf die Wellenlängen 0,4 bis 0,8  $\mu$  beschränkt (18), obwohl in Sonderfällen noch außerhalb dieses Gebietes liegende Strahlungen vorgenommen werden können. Man wird also die als Urinheit zu benutzende Wellenlänge möglichst in der Nähe der optimal sichtbaren Strahlung zu wählen haben, da die photographische oder energetische Auswertung von Interferenzerscheinungen wohl als Beobachtungshilfsmittel herangezogen werden kann, im allgemeinen aber die Vergleiche visuell ausgeführt werden müssen. Als eine der wichtigsten Bedingungen ist also die gute Sichtbarkeit der Intensitätsschwankungen zu betrachten, die, abgesehen von den physiologischen Eigenschaften des Auges, noch durch die Feinstruktur der Linie bestimmt ist, ferner die Interferenzfähigkeit der für die Erzeugung der Helligkeitsunterschiede in Betracht kommenden Einzelwellen.

Der allgemeine Ausdruck für die Elongation  $y$  (zur Zeit  $t$ ) einer einfachen Lichtwelle

$$y = a \cdot \sin 2\pi \cdot \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) = a \cdot \sin \left( 2\pi \cdot \frac{t}{T} - \delta \right) \quad (1)$$

<sup>1</sup> Für das Verhältnis der Längen der Einer-, Fünfer- und Zehnerstriche ist vorgeschlagen: 1 : 1,5 : 2. für Breite und Strichdicke von Ziffern:  $\frac{7}{10}$  bzw.  $\frac{1}{10}$  der Höhe (17).

( $a$  die Amplitude,  $T$  die Schwingungsdauer,  $\lambda$  die Wellenlänge,  $x$  die Entfernung vom Anfangspunkt) ergibt für die Amplitude  $A$ , die durch Einwirkung mehrerer gleichzeitig in einem Punkte zusammentreffender Einzelschwingungen entsteht, den Wert

$$A^2 = (\sum a_v \cdot \cos \delta_v)^2 + (\sum a_v \cdot \sin \delta_v)^2 = \sum a_v^2 - 2 \sum a_v \cdot a_{v+1} \cdot \cos(\delta_v - \delta_{v+1}), \quad (2)$$

also einen von der Zeit unabhängigen Ausdruck. Je nach den Phasendifferenzen  $\delta$  und den Amplituden  $a$  der Teilwellen wird daher die Amplitude  $A$  Größt- und Kleinstwerte annehmen können, die sich mit den angegebenen Parametern ändern. Da die Phasendifferenz und auch die Amplitude eine Funktion der Richtung der Welle ist, werden sich im allgemeinen Falle räumliche Intensitätsschwankungen ergeben, die jedoch für den ganzen Raum das gleiche Gesetz befolgen müssen. Die hierbei vorausgesetzte Kohärenz der interferierenden Wellenzüge ist aber niemals vorhanden. Jede Lichtquelle ist als endlich ausgedehnt zu betrachten, so daß die von den verschiedenen Oberflächenelementen der leuchtenden Fläche ausgesandten Elementarwellen bereits mit verschiedener Phase und Amplitude von der Lichtquelle ausgehen, weiterhin aber beide Größen in unregelmäßiger Weise sprunghaft sich ändern, wobei die Zeitintervalle in der Größenordnung von  $10^{-8}$  Sek liegen. Nach der Planckschen Quantentheorie erfolgt die Ausstrahlung nicht kontinuierlich; die einzelnen Lichtquanten müssen getrennt voneinander behandelt werden, und daher folgt, daß nur innerhalb eines bestimmten Raumgebietes die durch die Gleichung (2) angedeutete Intensitätsverteilung vorhanden sein kann. Überschreitet der die Phasendifferenz ergebende Wegunterschied der Elementarwellen eine bestimmte Größe, so hört die Interferenzfähigkeit auf und die Intensität ist durch

$$A^2 = \sum a_v^2 \quad (2a)$$

gegeben, d. h. es können keine räumlichen Intensitätsschwankungen auftreten. Der äußerste Gangunterschied, bei dem noch Interferenzen sichtbar sind, wird von Väisälä (19) mit 80  $\mu$  angegeben, wobei jedoch bemerkt wird, daß die schlechte Sichtbarkeit bei solchen Entfernungen hauptsächlich durch die Inhomogenitäten der Luft bedingt sind. Für die Versuche ist die gelbe Linie des Kupfers ( $\lambda = 0,5782 \mu$ ) benutzt worden; während die übrigen Wellenlängen schon bei wesentlich geringeren Gangunterschieden keine Interferenzen mehr zeigten.

Der Grund für diese Unterschiede der Sichtbarkeit sind, wie erwähnt, in der Feinstruktur der Emissionslinien zu suchen. Bei Wellen von verschiedener Länge findet keine Interferenz mehr statt, sondern die den einzelnen Wellenlängen zugeordneten Intensitätsverteilungen überlagern sich additiv. Fizeau konnte beim Natriumlicht die Interferenzen gleicher Dicke (siehe S. 111) nur bis zu 20 mm Luftabstand der reflektierenden Flächen beobachten. Die bei geringer Dicke der Luftschicht deutlich sichtbare Interferenzerscheinung wurde nach etwa 50 Maximalwerten der Intensität unsichtbar, um nach etwa 1000 Streifen wieder sichtbar zu werden. Bei weißem Licht sind nur etwa 7 bis 9 Streifen wahrnehmbar, da die Interferenzstreifen höherer Ordnung schnell eine immer weißlichere Tönung annehmen. Für die Dicke Null ist für alle Wellenlängen der Gangunterschied der beiden an der ersten und zweiten Fläche reflektierten Wellen Null und somit tritt für alle Wellenlängen im reflektierten Licht ein Minimum auf. Der Streifen von der Ordnung Null ist also im reflektierten Licht schwarz, im durchgehenden weiß (achromatisch). Bei endlicher Dicke der Schicht ist, weil die Phasendifferenz eine Funktion der Dicke und der Wellenlänge ist, der Gangunterschied der interferierenden Teilwellen für jede Wellenlänge ein anderer, so daß bei weißem Licht, wenn für eine Wellenlänge Dunkelheit auftritt, für benachbarte stets noch eine endliche Intensität bleibt, die Interferenzerscheinung also niemals völlig dunkle Streifen, sondern nur farbige (chromatische) aufweisen kann.

Ungünstig beeinflusst wird die Sichtbarkeit der Interferenzen gleicher Dicke meist noch durch die Tatsache, daß die Intensitätsverteilung wegen der Beschränkung auf zwei interferierende Elementarwellen nahezu sinusförmig ist (die Amplitude der übrigen Teilwellen nimmt so schnell ab, daß diese die Intensitätsverteilung nicht wesentlich beeinflussen).

Bei den Interferenzen gleicher Neigung, die erst später als die gleicher Dicke beobachtet und benutzt worden sind, treten dagegen mehrere Teilwellen in Wirksamkeit (siehe S. 145). Der Gangunterschied  $x$  der Teilwellen 1' bis 2', 2' bis 3', 3' bis 4', . . . und 1 bis 2, 2 bis 3, 3 bis 4, . . . (Abb. 139) ist konstant und hat für den Einfallswinkel  $i$  (dessen zugehöriger Brechungswinkel  $r$  durch das Brechungsgesetz gegeben ist), den Wert

$$x = 2 d \cdot n \cdot \cos r, \quad (3)$$

woraus für die Phasendifferenz folgt

$$\delta = \frac{4\pi \cdot d \cdot n \cdot \cos r}{\lambda} + \pi. \quad (4)$$

Ist der noch vom Einfallswinkel  $i$  abhängige Reflexionskoeffizient der oberen Fläche  $\sigma_1$ , der der unteren  $\sigma_2$ , so gilt für die Intensität  $J_r$ , der im reflektierten Licht zu beobachtenden

Interferenzen

$$J_r = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \cos^2 \delta}{1 + \sigma_1^2 \cdot \sigma_2^2 - 2\sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \cos^2 \delta} \quad (5)$$

Für das durchgehende Licht ist dann

$$J_a = 1 - J_r,$$

d. h. die Erscheinung ist komplementär zu der im reflektierten Licht zu beobachtenden. Aus den Gleichungen (4) und (5) folgt, daß für eine bestimmte Dicke  $d$  der Gangunterschied und damit die Intensität nur von der Neigung der einfallenden Strahlen abhängig ist<sup>1</sup>.

Für den einfachsten Fall, daß  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$  ist, ist die Intensitätsverteilung im reflektierten Licht in Abhängigkeit von  $\frac{\delta}{2\pi}$  in Abb. 573 a dargestellt. Während also für  $\sigma = 0,2$  die Verteilung nahezu sinusförmig ist, werden die Minima mit wachsender Größe von  $\sigma$  immer

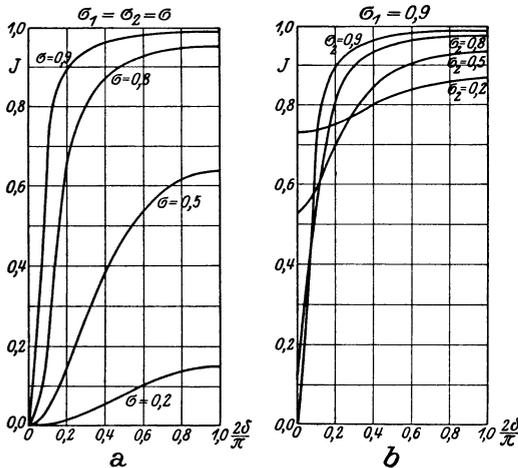


Abb. 573. Intensitätsverlauf der Interferenzen bei *a* gleichem, *b* verschiedenem Reflexionsvermögen der beiden Flächen.

schärfer begrenzt. Das gleiche gilt auch, wenn  $\sigma_1 < \sigma_2$ , also der Reflexionskoeffizient für eine der Flächen größer ist, als für die andere, wenn also beispielsweise die Interferenzen zwischen einer Glas- und einer Metallfläche beobachtet werden (Abb. 573 b). Die Minima werden in diesem Falle nicht absolut dunkel oder, mit anderen Worten, die Interferenzerscheinung ist einem hellen Grunde überlagert.

Die zur Erlangung scharfer, gut wahrnehmbarer Interferenzen notwendige Erhöhung des Reflexionsvermögens ist bei senkrechtem Einfall zu erzielen durch eine schwach (durchsichtige) Versilberung der Platten (Fabry und Perot), welche noch genügend Licht durchtreten läßt, solange der Einfallswinkel klein bleibt. Freilich tritt bei der Reflexion an Metallflächen ein bei Präzisionsmessungen zu beachtender Phasensprung auf, der eine scheinbare Veränderung der Dicke bewirkt. Die „optische Oberfläche“ der Metallschicht fällt demnach nicht mit ihrer mechanischen zusammen (15 a).

Während bei geringem Reflexionsvermögen die Intensität der aufeinanderfolgenden Teilwellen 1, 2, ...  $\infty$ , 1', 2', ...  $\infty'$  (vgl. Abb. 139) außerordentlich schnell abnimmt, so daß praktisch nur die beiden ersten zur Wirkung gelangen, haben bei hohem Reflexionsvermögen auch noch die weiteren eine merkbare Intensität. Die bei Einwirkung sämtlicher Teilwellen 1 bis  $\infty$  (bzw. 1' bis  $\infty'$ ) sich ergebende Schärfe der Interferenzstreifen ermöglicht noch die Messung geringer Bruchteile der Streifenbreite, während bei sinusförmiger Verteilung mit dem allmählichen Übergang von hell zu dunkel eine genaue Bestimmung der Lage des Maximums bereits auf Schwierigkeiten stößt. Durch Erhöhung des Reflexionsvermögens läßt sich auch erst eine brauchbare Beobachtung der Koinzidenzen<sup>2</sup> erzielen, die bei sinusförmiger Verteilung nur schwer möglich ist.

Die vorstehenden Überlegungen gelten nur für streng homogenes Licht oder die Überlagerung einzelner homogener Schwingungen. Je homogener das Licht ist, desto schärfer sind die Interferenzen. Für die Erzeugung von Interferenzen zu Meßzwecken sind daher nur diejenigen Spektrallinien geeignet, die eine geringe Breite und eine einfache Feinstruktur aufweisen, weil bei hohem Gang-

<sup>1</sup> Die mitgeteilten Formeln gelten nur für natürliches Licht. Bei Anwendung polarisierten Lichtes ist die einfallende Welle in die Hauptkomponenten zu zerlegen, und es sind für diese die Fresnelschen Reflexionskoeffizienten einzusetzen.

<sup>2</sup> Während unter Konsonanz das Zusammenfallen zweier Maxima oder Minima standan wird, was streng genommen nur für Wellenlängen möglich ist, welche in einem rationalen Verhältnis stehen, bezeichnet man als Koinzidenz das Vorhandensein beliebiger gleicher Phasen für beide Wellenlängen, wobei also der Gangunterschied der Teilwellen nicht gleich einer ganzen oder halben Wellenlänge zu sein braucht. Die Koinzidenzen machen sich durch eine bestimmte Mischfarbe bemerkbar.

unterschied infolge Überlagerung der den einzelnen Elementarwellenlängenbezirken entsprechenden Interferenzsysteme die Erkennbarkeit merklich abnimmt. Man muß also, wenn man die Wellenlänge als Urmaßstab benutzen will, feststellen, ob die zur Erzeugung der Interferenzen benutzte Strahlung hinreichend homogen und auch unveränderlich ist. Dabei ist zu beachten, daß die Bedingungen, unter denen die Emission erfolgt, eine Veränderung der wirksamen Wellenlänge der emittierten Strahlung bewirken können. Da auch die engsten Spektrallinien immer noch eine endliche Breite besitzen, kann nämlich sowohl eine einseitige Verbreiterung wie auch eine Verschiebung des Emissionsmaximums infolge von Temperaturänderungen des gasförmigen Strahlers oder von Druckschwankungen, die die mittlere freie Weglänge beeinflussen, oder endlich eine Veränderung der Strahlungsintensität der Trabanten hervorgerufen werden.

Durch Versuche von Goos (4), Saint John und Ware (5) ist erwiesen, daß eine Veränderung der Feinstruktur durch Erhöhung der Stromstärke des Lichtbogens oder durch Druckänderung nicht bei allen Linien gleichmäßig auftritt. Als Hauptnormale gilt bisher noch die rote Linie des Cadmiumlichtbogens im Vakuum, doch ist auch für diese der Anschluß an das Meter noch nicht als abgeschlossen zu betrachten.

Als Normalen werden ferner benutzt die grüne und blaue Cadmiumlinie und einige Linien des Quecksilbers, des Heliums, des Kryptons und des Neons, deren Wellenlängen auf S. 121 und 122 angegeben sind.

Als besonders geeignet haben sich die Linien des Kryptons erwiesen, von denen auf deutschen Antrag hin die gelbgrüne  $0,5649 \mu$  auf der Tagung des internationalen Komitees für Gewichte und Maße in Paris (1927) als zukünftiger Ersatz der unschärferen roten Cadmiumlinie und Normale 1. Ordnung in Aussicht genommen ist (17).

Die Kenntnis mehrerer Wellenlängen ist aus dem Grunde wichtig, weil die absolute Längenbestimmung ebenso wie die Vergleichung verschieden großer Längen, wie sie bei der Auswertung von Etalons und Endmaßen vorkommt, schwierig durchzuführen ist. Hierbei ist aber zu beachten, daß in vielen Fällen die auf die rote Cadmiumlinie als Normale bezogenen Wellenlängen mit dem Gangunterschied teilweise recht beträchtliche, zuweilen periodische Schwankungen zeigen, die durch die Einwirkung der asymmetrischen Intensitätsverteilung zu erklären sind.

Michelson (12) hat bereits auf die Veränderlichkeit der Sichtbarkeit der Interferenzen hingewiesen, die bei der roten Cadmiumlinie mit wachsendem Gangunterschied stetig abnimmt, bei anderen Linien, z. B. der grünen Thalliumlinie, einen sehr komplizierten Charakter zeigt. Meist ist es nicht möglich, eindeutig von der Sichtbarkeitskurve auf die Struktur der Linie zu schließen, doch ist es Michelson gelungen, eine Reihe beachtenswerter Schlüsse zu ziehen. Eine Fortsetzung dieser Beobachtungen bilden die Untersuchungen von Pérard (16), bei denen für mehrere Wellenlängen des Cadmiums, Quecksilbers, Heliums, Kryptons und Neons die Abweichungen der beobachteten Werte von den berechneten für verschiedene Gangunterschiede bestimmt worden sind. Danach sind für Meßzwecke verwendbar die gelbgrüne Quecksilberlinie  $0,57695996 \mu$ , sowie die gelbe und die grüne Kryptonlinie, deren Wellenlängen von Pérard mit  $0,58709154$  und  $0,55702892 \mu$  angegeben werden.

Weitere Wellenlängen sind durch Anschluß an die bereits genannten Primärnormalen verschiedentlich bestimmt worden, so z. B. für den Eisenbogen von Meggers, Kiess und Burns (10, 11).

Michelson und Benoît haben, nachdem die Vorarbeiten von Michelson in Gemeinschaft mit Morley (15) erledigt waren, in den Jahren 1892 und 1893

die erste Auswertung des Meters in Wellenlängen vorgenommen (14), die später durch Fabry und Perot (1907) wiederholt worden ist (1), deren Ergebnisse

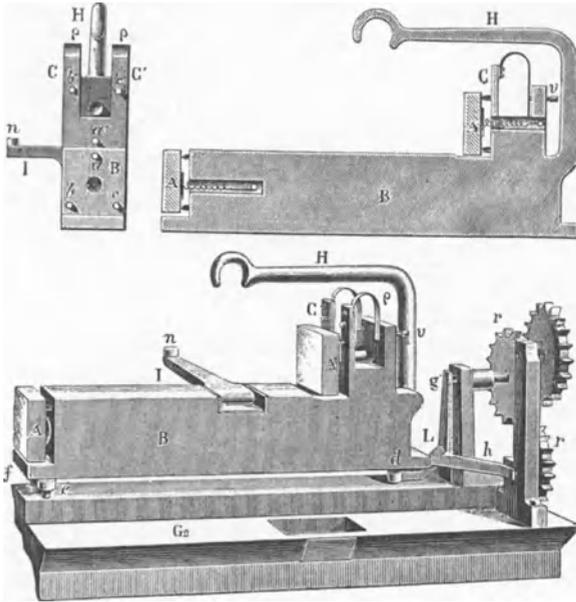


Abb. 574. Etalon von Michelson.

neuerdings bestätigt wurden (20). Da eine unmittelbare Auszählung nicht möglich ist, war als Hilfsnormale, für die einerseits die auf seine Länge entfallende Anzahl der Wellenlängen direkt bestimmt und andererseits das Längenverhältnis zum Meterprototyp gemessen wurde, ein Etalon von 100 mm in der in Abb. 574 gegebenen Form gewählt. *A* und *A'* sind zwei oberflächenversilberte Glasspiegel, deren einer (*A*) durch eine Feder gegen drei feste Auflagestifte *a, b, c* gepreßt wird, während von den Anschlagflächen *a', b', c'* des Spiegels *A'* die eine feststeht, die anderen beiden aber durch eine Schraube *v*, die den Metallstreifen *C*

durchbiegt, so weit verstellt werden können, daß strenge Parallelität der versilberten Flächen von *A* und *A'* erzielt werden kann.

Perot und Fabry benutzen für die Feinverstellung einen Kautschukball, in dem der hydrostatische Druck durch Heben und Senken des mit dem Schlauch verbundenen Druckgefäßes fein eingestellt wird. Ebenso kann auch eine äußerst feine Parallelstellung erzielt werden, wenn der Ball zwischen Stahlfedern eingeschlossen wird (Abb. 575). Wie groß die durch diese Vorrichtung erreichbare Genauigkeit ist, läßt sich daraus ersehen, daß einem Hub des Druckgefäßes von 1 m eine Verschiebung um nur  $5 \mu$  entspricht.

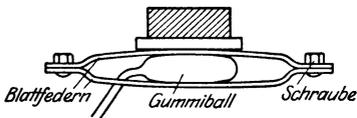


Abb. 575. Justierung des Fabry-Perot-Etalons.

Außer diesem Hauptetalon sind von Michelson und Benoit noch 8 andere benutzt worden, deren Länge nach einer geometrischen Reihe fortschreitet; Etalon I hatte die Länge  $10 \cdot 2^{-8}$  cm, Etalon II eine solche von  $10 \cdot 2^{-7}$  cm und so fort bis zum Etalon IX von 10 cm Länge.

Der bei der Messung benutzte Strahlengang ist in Abb. 576 dargestellt, wobei aber die Beleuchtungseinrichtung wesentlich vereinfacht wiedergegeben ist. Die von der Lichtquelle *L* ausgehenden Strahlen werden zunächst durch das Objektiv *O*<sub>1</sub> parallel gemacht und treffen auf den Spiegel *A*, dessen hintere Fläche (in Richtung der Lichtfortpflanzung gerechnet) durchsichtig versilbert ist. Sie werden an dieser teilweise reflektiert und treffen auf eine versilberte Planfläche *C*, von der sie durch die Platte *A* hindurch zum Beobachter gelangen. Der durch *A* hindurchgehende Teil der Lichtwellen durchsetzt eine Platte *B* von gleicher Dicke wie *A*, um den Gangunterschied, der in *A* für das an *C* reflektierte Bündel erzeugt wird, auszuschalten, und trifft darauf auf die Spiegel *M*<sub>1</sub>, *M*<sub>2</sub> und *N*<sub>1</sub>, *N*<sub>2</sub> zweier Etalons. Die Spiegelpaare *M*<sub>1</sub> und *M*<sub>2</sub>, sowie *N*<sub>1</sub> und *N*<sub>2</sub> werden vorher durch Autokollimation parallel

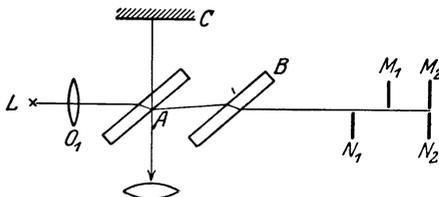


Abb. 576. Interferometer von Michelson.

Die Spiegelpaare *M*<sub>1</sub> und *M*<sub>2</sub>, sowie *N*<sub>1</sub> und *N*<sub>2</sub> werden vorher durch Autokollimation parallel

gestellt. Justiert man nun den Etalon  $N_1, N_2$  so, daß die vom Spiegel  $A$  entworfenen Bilder der versilberten Flächen von  $N_1$  und  $N_2$  genau parallel zu  $C$  sind, so werden im homogenen Licht der Cadmiumlinien innerhalb der durch  $N_1$  und  $N_2$  bedeckten Teile des Gesichtsfeldes Interferenzkurven gleicher Neigung auftreten, die gleichzeitig noch dazu benutzt werden können, um das durch Reflexion entstandene Bild von  $N_2$  durch Parallelverschiebung des Etalons genau in die Ebene  $C$  zu bringen. Der Etalon  $M_1 M_2$  wird so gestellt, daß das Spiegelbild von  $M_2$  mit einer geringen Neigung die Ebene  $C$  schneidet. In dem dem Bild von  $M_2$  entsprechenden Teile des Feldes treten dann bei Beobachtung mit einer auf die Ebene  $C$  eingestellten Lupe Interferenzen gleicher Dicke im weißen Licht auf. Die Lage der Streifen wird durch ein auf  $C$  aufgraviertes Kreuzgitter bestimmt. Längs der Geraden, in der das Spiegelbild von  $M_2$  die Ebene  $C$  schneidet, wo also der Gangunterschied der längs  $ACA$  und längs  $AM_2A$  verlaufenden Strahlen für alle Wellenlängen gleich Null wird, muß sich in Anbetracht des für den Strahl  $ACA$  noch auftretenden Phasensprunges von  $\frac{\lambda}{2}$  ein schwarzer

(achromatischer) Streifen bilden. In dem  $N_1$  entsprechenden Felde ergeben sich Kurven gleicher Neigung im monochromatischen Licht. Das sich darbietende Bild ist in Abb. 577 links wiedergegeben. Verschiebt man nun durch eine Mikrometerschraube beide Etalons gleichmäßig parallel zu sich selbst, bis im Felde  $M_1$  Interferenzstreifen auftreten und der achromatische in  $M_1$  gleiche Lage hat, wie vorher im Feld  $M_2$ , so läßt sich die erforderliche Verschiebung gleichzeitig in Wellenlängen durch das Wandern der Ringe im Felde  $N_1$  auszählen. Für den kleinsten Etalon, der mit  $10 \cdot 2^{-8}$  cm Spiegelabstand für rotes Cadmiumlicht ungefähr 1212 Wellenlängen entspricht, ist diese Zählung leicht auszuführen. Überdies ist bei Anwendung der Benoitschen Methode der Ordnungszahlbestimmung auf Grund der überschießenden Teile für mehrere Wellenlängen eine genaue Bestimmung auch möglich, wenn die Ordnungszahl nur auf wenige Einheiten bekannt ist. Ist auf diese Weise der Wert des kleinsten Etalons ermittelt, so kann man zu dem nächst größeren übergehen. Es wird dann der kürzere Etalon verschiebbar, der längere fest aufgestellt, und zwar so, daß die von der Lichtquelle abgelegenen Flächen  $M_2$  und  $N_2$  (Abb. 576) in einer Ebene liegen, gleichzeitig aber ihr Spiegelbild bis auf einen äußerst kleinen Winkel mit der Bezugsebene  $C$  zusammenfällt. Verschiebt man nun die Bezugsfläche  $C$  parallel zu sich selbst, so werden, sobald die Verschiebung gleich der Länge des kürzeren Etalons ist, die Interferenzen auf  $M_1$  erscheinen. Wird nun wieder der Etalon I verschoben, bis die Interferenzen zwischen  $M_2$  und  $C$  entstehen, so werden, falls Etalon II nahezu die doppelte Länge von Etalon I besitzt, die Flächen  $M_1$  und  $N_1$  gleichzeitig Interferenzen zeigen, und eine mögliche kleine Abweichung kann sofort in Wellenlängen ausgewertet werden. Der geringe Fehler, der bei Bestimmung der Länge des kleinsten Etalons begangen wird, überträgt sich bei dem Vergleich mit dem nächst größeren zunächst in doppelter Größe und so fort, so daß er für den größten Etalon der Fehler schon recht beträchtlich werden könnte, doch kann ein Ausgleich nach jedem Vergleich durch Anwendung des Benoitschen Verfahrens erreicht werden. Der Fehler in der Länge des größten Etalons beträgt dann noch etwa  $\frac{1}{20}$  Wellenlänge. Die Tabelle gibt einen Anhalt für die bei verschiedenen Beobachtern erzielte Übereinstimmung:

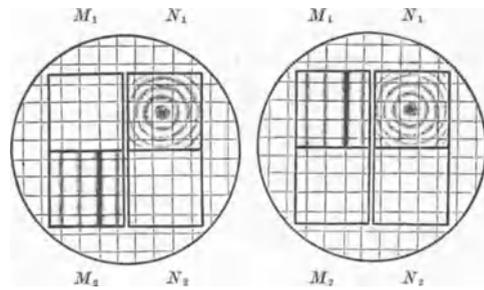


Abb. 577. Interferenzerscheinung beim Vergleich von Etalons mit dem Interferometer nach Michelson.

Beobachter	Auswertung des 10-cm-Etalons für die Cadmium-Linien		
	rot	grün	blau
I	310678,48	393307,92	416735,86
II	310678,65	393308,10	416736,07
III	310678,68	393308,09	416736,02

Der letzte Schritt der Bestimmung war der Vergleich des 10-cm-Etalons mit dem Meterprototyp. Er geschah durch mehrfache Anwendung des beim Vergleich der Etalons untereinander benutzten Verfahrens. Hierfür war natürlich eine äußerst feine Führung der Schlitten erforderlich, um nicht durch Lagenänderung bei der Verschiebung der Spiegel Fehler zu begehen <sup>1</sup>,

<sup>1</sup> Die Messung wird erleichtert, wenn man das Interferometer vertikal aufstellt, da man dann als beweglichen Spiegel einen Quecksilberhorizont nehmen kann, der bei jeder Verschiebung sich selbst parallel bleibt (13).

ferner eine außerordentlich gute Temperaturkonstanz sowie Schutz gegen Luftströmungen und Erschütterungen. Da ein unmittelbarer Vergleich mit dem als Strichmaß ausgebildeten Meterprototyp nicht möglich war, war der Etalon IX mit einem Indexstrich auf einem seitlich angebrachten Nickelknopf versehen. Der zu den spiegelnden Flächen parallele Strich konnte für die Ausgangs- und Endstellung des Etalons mit Hilfe eines Transversalkomparators mit den Strichen des Meterprototyps verglichen werden<sup>1</sup>.

Das Endergebnis der von Michelson und Benoît im Bureau International des Poids et Mesures zu Sèvres in den Jahren 1892 und 1893 durchgeführten Messungen ergab bei 15° (Angabe des Thermometers aus verre dur, entsprechend 14,930° des Wasserstoffthermometers) und 760 mm Quecksilberdruck für die Gesamtzahl der Wellenlängen der roten, grünen und blauen Cadmiumlinie, die auf die Länge des internationalen Meters entfielen:

$$\begin{aligned} 1 \text{ m} &= 1553163,5 \lambda_R \quad \text{oder} \quad \lambda_R = 0,64384722 \mu \\ 1 \text{ m} &= 1966249,7 \lambda_{Gr} \quad \text{,,} \quad \lambda_{Gr} = 0,50858240 \mu \\ 1 \text{ m} &= 2083372,1 \lambda_{Bl} \quad \text{,,} \quad \lambda_{Bl} = 0,47999107 \mu \\ 1 \text{ m} &= 2137596,2 \lambda_v \quad \text{,,} \quad \lambda_v = 0,4678152 \mu \end{aligned}$$

Unter Berücksichtigung der Änderungen der zum Meteranschluß benutzten Arbeitsnormalen des Bureau International müssen diese Werte korrigiert werden (4a) in:

$$\begin{aligned} 1 \text{ m} &= 1553163,8 \lambda_R \quad \text{oder} \quad \lambda_R = 0,64384708 \mu \\ 1 \text{ m} &= 1996250,1 \lambda_{Gr} \quad \text{,,} \quad \lambda_{Gr} = 0,50858229 \mu \\ 1 \text{ m} &= 2083372,1 \lambda_{Bl} \quad \text{,,} \quad \lambda_{Bl} = 0,47999007 \mu \\ 1 \text{ m} &= 2137596,7 \lambda_v \quad \text{,,} \quad \lambda_v = 0,4678151 \mu \end{aligned}$$

Die Genauigkeit betrug etwa  $\frac{1}{2} \cdot 10^{-6}$ , also etwa eine Wellenlänge auf 1 m (da nämlich bei der letzten zehnmaligen Verschiebung eine Kontrolle der Bruchteile der Ordnungszahlen nicht mehr möglich war, vergrößerte sich der Fehler, der selbst bei dem Etalon IX nur  $\frac{1}{20} \lambda$  betrug, auf etwa  $\frac{1}{2} \lambda$ , wozu noch der durch den mikroskopischen Vergleich der Endstriche sich ergebende kommt).

Die Michelsonschen Messungen weisen jedoch noch einen systematischen Fehler auf, der teils auf Nichtberücksichtigung der Veränderlichkeit der Wellenlänge mit der Temperatur und vor allem der Feuchtigkeit der Luft, teils aber darauf beruht, daß die Ausdehnung der Bronzekörper der Etalons nicht genau in Rechnung gesetzt worden war.



Abb. 578.  
Etalon von  
Fabry-  
Perot.

Bei einer Wiederholung der grundlegenden Auswertung des Meters durch Benoît, Fabry und Perot (1) wurde für die Vergleichung der Etalons, die in abgeänderter Form hergestellt waren, ein etwas abweichendes Verfahren benutzt, bei dem Verschiebungen unnötig und damit die Fehler ausgeschaltet waren, die infolge von Lagenänderungen der Spiegel beim Transport des Etalons durch die Mikrometerschraube entstehen können. Die Form der benutzten Etalons gibt Abb. 578 wieder<sup>2</sup> (3). Die einseitig durchsichtig versilberten Glasplatten  $P, P'$  werden durch Federn gegen die in einem Ring  $S$  aus Invar eingelassenen Anschlußknöpfe  $K$  gedrückt, die so abgeschliffen werden, daß der Abstand der Silberflächen den gewünschten Wert hat. Außerdem ist zu den Messungen noch ein Luftkeil benutzt worden, der aus zwei einseitig versilberten Glasplatten von  $200 \times 30 \times 15$  mm bestand, die an den Enden eine Zwischenlage von verschiedenen dicken Zinnfolien

<sup>1</sup> Das Verfahren von Michelson ist auch sehr geeignet zur Ausmessung der mm- und cm-Intervalle von Strichmaßstäben, indem man den Etalon mit dem Strichmaßstab unter einem Mikroskop verschiebt.

<sup>2</sup> Eine etwas abgeänderte Form, bei der die Justierung der Platten (Parallelstellung) erleichtert ist, hat Koch (6) angegeben.

hatten. Auf der einen Silberschicht dieser als Kompensator dienenden Vorrichtung war eine Längsteilung angebracht, welche die an der betreffenden Stelle vorhandene Dicke der Luftschicht, in Wellenlängen ausgewertet, angab.

Die Etalons wurden in den Längen 6,25 cm, 12,5 cm, 25 cm, 50 cm und 1 m hergestellt und zunächst der kleinste Maßstab unter Verwendung der Koinzidenzen ausgewertet, wobei zwecks genauerer Festlegung der Länge des kleinsten Endmaßes noch zwei Hilfsmaße von  $\frac{1}{4}$  und  $\frac{1}{5}$  der Länge des ersten Etalons benutzt wurden. Für den Vergleich der verschieden langen Etalons untereinander wurden die Brewsterschen Interferenzen verwendet.

Sind zwei parallele, schwach gegeneinander geneigte Glasplatten gegeben, so teilt sich jeder auffallende Strahl, wenn man zunächst von mehrfachen Reflexionen absieht, in die sechs Strahlen 1, 2, 3, 4, 5, 6 (Abb. 579), die sämtlich miteinander interferieren können. Sind die Platten genau gleich dick, so würde bei vollkommener Parallelstellung der Gangunterschied der Strahlen 2, 3, 5, 6 für jeden beliebigen Einfallswinkel Null sein, bei gegeneinander geneigten Platten hängt er vom Einfallswinkel ab, und die entstehenden, der Keilkante parallelen Interferenzstreifen liegen um so weiter auseinander, je kleiner der Winkel ist, den die Platten miteinander bilden. Wegen der geringen Größe der Gangunterschiede bei schwacher Plattenneigung sind die Interferenzen auch im weißen Licht zu beobachten. Selbst bei ungleich dicken Platten können infolge mehrfacher Reflexionen unter bestimmten Bedingungen gleichfalls Interferenzen im weißen Licht beobachtet werden. Wenn ein Strahl in der Platte  $G$  (Abb. 579)  $2m$  Reflexionen, in der Platte  $G'$  dagegen  $2m'$  Reflexionen erleidet, ein anderer kohärenter Strahl entsprechend  $2p$  und  $2p'$  mal reflektiert wird, so ist der Gangunterschied bei senkrechtem Einfall

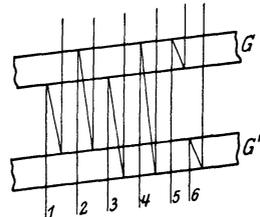


Abb. 579. Brewstersche Interferenzen.

$$(p - m) \cdot \Delta + (p' - m') \cdot \Delta' = \gamma, \tag{7}$$

wobei  $\Delta$  und  $\Delta'$  die Gangunterschiede in den Platten  $G$  und  $G'$  bei zweimaligem Durchlaufen einer Platte bedeuten. Dieser Gangunterschied wird Null, wenn

$$\frac{\Delta}{\Delta'} = - \frac{p' - m'}{p - m} \tag{8}$$

ist. Da die Gangunterschiede bei gleichem Brechungsindex des Plattenmaterials den Dicken  $d, d'$  der Platten proportional sind, so gilt

$$\frac{d}{d'} = - \frac{p' - m'}{p - m}. \tag{9}$$

Gemäß Definition sind  $p, p', m, m'$  ganze Zahlen. Die Bedingung (9) kann daher nur streng erfüllt werden, wenn das Verhältnis der Dicken  $d$  und  $d'$  eine rationale Zahl ist. Die folgende Tabelle gibt eine Zusammenstellung von Werten, die sämtlich der gestellten Bedingung genügen.

$d$	$d'$	$m$	$m'$	$p$	$p'$
1	1	{ 0	1	1	0
		{ 1	1	1	1
1	2	{ 0	1	2	0
		{ 0	2	2	1
2	1	{ 0	2	1	0
		{ 1	3	2	1
1	3	{ 0	2	3	1
		{ 1	2	4	1
		{ 0	1	3	0
3	1	{ 0	3	1	0
		{ 1	4	2	1
		{ 1	3	2	0

In allen Fällen ist der Gangunterschied der betrachteten senkrecht einfallenden Strahlen Null. Weicht, wie es bei den Versuchen stets der Fall sein wird, das Dickenverhältnis um

einen geringen Betrag von einer rationalen Zahl ab, so wird zwar auch für senkrechten Einfall ein geringer Phasenunterschied der interferierenden Teilwellen auftreten, doch werden die Interferenzen immer noch in weißem Licht sichtbar sein. Je mehr das Dickenverhältnis von 1 abweicht, je größer also die Zahl der erforderlichen Reflexionen wird, desto schlechter sind die Interferenzen sichtbar, weil sie sich einem immer helleren Grunde überlagern. Legt man die geringste Anzahl  $n$  von Reflexionen zugrunde, bei welcher Brewstersche Interferenzen auftreten können, so ergeben sich für das Verhältnis der Intensitäten der Maxima und Minima

$$\frac{J_{\min}}{J_{\max}} = \left( \frac{1 - \sigma^n}{1 + \sigma^n} \right)^2 \tag{10}$$

und daraus für einen Reflexionskoeffizienten von  $\sigma = 0,75$ , wie er bei durchsichtig versilberten Schichten anzunehmen ist, folgende Werte:

	$\frac{d}{d'}$	$n$	$\sigma^n$	$\frac{J_{\min}}{J_{\max}}$
1	—	2	0,56	0,08
2	$\frac{1}{2}$	3	0,42	0,17
3	$\frac{1}{3}$	4	0,32	0,26
4	$\frac{1}{4}$	5	0,24	0,38
5	$\frac{1}{5}$	6	0,18	0,48
6	$\frac{1}{6}, \frac{5}{2}, \frac{2}{5}, \frac{3}{4}, \frac{4}{3}$	7	0,13	0,59

Für kleineres  $\sigma$  wird der Abfall stärker.

Die Brewsterschen Interferenzen bieten demnach eine Möglichkeit, Luftstrecken unmittelbar zu vergleichen, die in einem einfachen ganzzahligen Verhältnis stehen. Ist also ein Etalon in Wellenlängen ausgemessen, so läßt sich ein solcher von doppelter oder dreifacher Länge auf diesem Wege ebenfalls auswerten, ohne daß dabei eine wesentliche Erhöhung der Meßfehler zu befürchten ist.

Bringt man zwei zu vergleichende Etalons verschiedener Dicke hintereinander in den Strahlengang, so würde bei völliger Parallelstellung eine gleichmäßige Färbung und Helligkeit über das ganze Gesichtsfeld zu beobachten sein, wobei jedoch nicht zu entscheiden ist, ob die Phasendifferenz der interferierenden Bündel positiv oder negativ ist. Durch Einschaltung des versilberten Luftkeiles kann die Entscheidung getroffen werden. Auch auf anderem Wege, nämlich bei schwacher Neigung der Etalons gegeneinander, kann die Messung ausgeführt werden. Der Winkel zwischen den Flächen der beiden Etalons darf, wenn eine Bestimmung der Ordnungszahl auf 0,1 noch möglich sein soll, bei 1 m Abstand der Etalonflächen, 150 cm Brennweite der Kondensorlinse und 4 mm Durchmesser der Lichtquelle nicht größer als 2'' sein; ferner müssen die Flächen

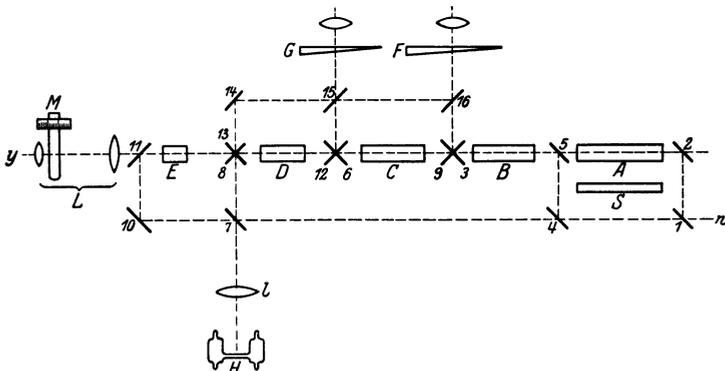


Abb. 580. Auswertung des Meters in Wellenlängen nach Fabry-Perot.

jedes Etalons sehr genau parallel verlaufen. Da eine Kontrolle der Parallelität bei großem Flächenabstand durch Kurven gleicher Neigung nicht mehr möglich

ist, haben Benoît, Fabry und Perot für die langen Etalons zur Prüfung der Parallelität die Autokollimationsmethode benutzt, wobei das Fernrohrobjektiv eine Brennweite von 1000 mm hatte.

Die Anordnung der optischen Teile bei der endgültigen Messung ist in Abb. 580 wiedergegeben. Zwei Lichtquellen, eine weiße  $w$  und eine monochromatische (Cadmiumlampe)  $H$ , welche im Brennpunkt eines Kondensors  $l$  sich befand, dienten zur Erzeugung der Interferenzen, und zwar wurde zunächst mit Hilfe der Cadmiumlampe der Etalon  $E$  von 6,25 cm Länge durch Beobachtung der Koinzidenzen und durch die Bestimmung der überschießenden Bruchteile der Ordnungszahl ausgewertet. Hierzu wurde das Fernrohr  $L$  mit Okularmikrometer  $M$  benutzt. Dann erfolgte unter Benutzung der Brewsterschen Interferenzen der Vergleich der einzelnen Etalons  $A, B, C, D, E$  untereinander, wobei die versilberten Luftkeile  $F$  und  $G$ , wie beschrieben, zum Ausgleich dienten. Die Aufstellung zeigt, welche Spiegel bei den einzelnen Versuchen verwendet wurden; die nicht benutzten wurden um horizontale Achsen aus dem Strahlengang herausgeklappt. Fest montiert waren nur die Spiegel 2, 10 und 14.

Vergleich	Benutzte Spiegel	Benutzter Luftkeil	Entfernte Spiegel
$E$ (6,25 cm) mit $D$ (12,5 cm) . . . . .	10, 11, 12	$G$	1, 4, 7, 13, 8, 6, 15
$D$ (12,5 cm) mit $C$ (25 cm) . . . . .	7, 8, 9	$F$	1, 4, 13, 6, 12, 3, 16
$C$ (25 cm) mit $B$ (50 cm) . . . . .	4, 5, 6	$G$	1, 3, 9, 12, 15
$B$ (50 cm) mit $A$ (1 m) . . . . .	1, 2, 3	$F$	5, 9, 16
Auswertung des Etalons $E$ (6,25 cm) . . . . .	13	—	7, 8, 11
Auswertung des Keiles $F$ . . . . .	14, 16	—	7, 8, 13, 15
Auswertung des Keiles $G$ . . . . .	14, 15	—	7, 8, 13

Der 1 m-Etalon  $A$ , der mit dem Meterprototyp  $S$  verglichen wurde, bestand aus einem Invarstab von U-Form, gegen dessen Enden planparallele, durchsichtig versilberte Glasplatten angedrückt wurden. Für den Lichtdurchgang war in dem  $5 \times 5$  cm<sup>2</sup> messenden Querschnitt eine Höhlung von  $3 \times 3$  cm<sup>2</sup> freigelassen. Nahe den versilberten Flächen waren auf der Oberfläche der Glasplatten Striche angebracht, derart, daß der Abstand zweier passend gewählter Striche nahezu 1 m betrug. Während also der Abstand der versilberten Glasflächen durch Interferenzen bestimmt und der Strichabstand durch Transversalkomparator mit dem Meterprototyp verglichen werden konnte, war noch die Differenz zwischen Strichabstand und optischer Länge des Etalons zu ermitteln. Zu diesem Zweck wurden mit den Glasplatten des 1 m-Etalons nacheinander zwei Etalons von nahezu 1 cm und 2 cm Dicke hergestellt, so daß der Abstand der beiden gewählten Striche bei dem größeren Etalon doppelt so groß war als bei dem kleineren. Eine einfache Rechnung zeigt, daß dann die auszumessende Differenz gleich der Dicke der Luftschicht des 2 cm-Etalons, vermindert um die doppelte Dicke des 1 cm-Etalons ist.

Notwendig ist bei allen Messungen (siehe S. 132) die Berücksichtigung des Einflusses der Temperatur, des Druckes und der Feuchtigkeit der Luft auf die Größe der Wellenlängen (die Dispersion der Luft kann im allgemeinen vernachlässigt werden, da sich bei Dichteänderungen der Luft um  $1 \cdot 10^{-5}$  das Verhältnis der Wellenlängen  $0,6438 \mu$  und  $0,508 \mu$  des Cadmiumlichtes um weniger als  $1 \cdot 10^{-7}$  ändert). Die Messung von Fabry und Perot führte zu dem Wert:

$$1 \text{ m} = 1\,553\,164,13 \cdot \lambda_R^1 \quad \text{oder} \quad \lambda_R = 0,643\,846\,96 \mu$$

bei 15° des Wasserstoffthermometers, 760 mm und trockener Luft, und nach Korrektur wegen der benutzten Arbeitsnormalen (4a)

$$1 \text{ m} = 1\,553\,163,7 \cdot \lambda_R \quad \text{oder} \quad \lambda_R = 0,643\,847\,03 \mu.$$

Die von Michelson gefundenen Zahlen würden nach der (etwas unsicheren) Umrechnung auf die Bedingungen von Fabry und Perot (korrigiert)

$$1 \text{ m} = 1553\,164,1 \quad \lambda_R = 0,643\,846\,91 \mu,$$

also eine Übereinstimmung auf  $0,26 \mu$  und somit innerhalb der Genauigkeit des Prototyps geben.

Während die Auswertung von Luftstrecken in Wellenlängen nach beiden Verfahren außerordentlich genau durchzuführen ist, weil der Brechungsindex der Luft selbst auf größere Strecken als konstant betrachtet werden kann, treten Schwierigkeiten auf, sobald der Abstand zweier Flächen eines durchsichtigen festen Körpers gemessen werden soll, weil hier nicht mit einer Konstanz des Brechungsindex gerechnet werden darf, selbst dann nicht, wenn Stücke von einigen Millimetern Abmessung in Frage kommen. Auch der meist als streng homogen betrachtete Bergkristall zeigt Abweichungen; Macé de Lépinay (8, 9) konnte bei einem Stück von wenigen Zentimetern Durchmesser noch Brechungsindexdifferenzen von  $4 \cdot 10^{-6}$  nachweisen. Es ist jedoch möglich, für beliebige durchsichtige Körper eine einwandfreie Dickenmessung vorzunehmen, wenn man außer den Interferenzen gleicher Neigung noch die Aragoschen Interferenzen benutzt.

Macht man die von der Lichtquelle  $L$  (Abb. 581) ausgehenden Strahlen durch das Objektiv  $O_1$  parallel und bringt in den parallelen Strahlengang die zu untersuchende planparallele Platte  $P$  von der Dicke  $d$  und dem Brechungsindex  $n$ , so werden die Strahlen, wenn sie durch das Objektiv  $O_2$  eines Fernrohres  $F$  vereinigt werden, zur Interferenz kommen (Aragosche Anordnung). Der Gangunterschied zwischen den beiden Teilen der von  $L$  ausgehenden Welle beträgt dann

$$(p - \varepsilon) \lambda = (n - 1) d, \quad (13)$$

Abb. 581. Interferenzmessung von durchsichtigen Körpern.

wobei  $p$  den ganzzahligen,  $\varepsilon$  den Bruchteil der Ordnungszahl darstellt. Der Bruchteil ist negativ zu setzen, weil die Interferenzen niedrigster Ordnung für senkrechten Einfall entstehen, entgegengesetzt wie bei den Kurven gleicher Neigung. Die Ordnung ist, wenn  $d$  und  $n$  näherungsweise bekannt sind, nach dem Benoitschen Verfahren unter Benutzung mehrerer Wellenlängen zu bestimmen. Der Bruchteil der Ordnungszahlen wird dabei entweder durch mikrometrische Messung oder durch Neigen der Platte gegen den Strahl ermittelt. Bezeichnet man mit  $i_0$  den Winkel, welchen die den kleinsten Interferenzring  $F$  bildenden Strahlen zwischen  $O_1$  und  $O_2$  mit der Achse des Beobachtungsfernrohres bilden (Abb. 581), so wird der Gangunterschied dieser Teilwellen ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge, und es folgt, wenn der zu  $i_0$  gehörige Brechungswinkel gleich  $r_0$  gesetzt wird,

$$p \lambda = \frac{d}{\cos r_0} \cdot [n - \cos(i_0 - r_0)] = d \cdot (n - 1) \cdot \left(1 + \frac{i_0^2}{2n}\right) \quad (14)$$

bei der Kleinheit von  $i_0$  und  $r_0$  kann an Stelle des Sinus der Winkel gesetzt und das Brechungsgesetz in der Form  $i_0 = n r_0$  angenommen werden). Aus Gleichung (13) und (14) folgt dann

$$\varepsilon = \frac{p}{2} \cdot \frac{i_0^2}{n}. \quad (15)$$

Für eine bestimmte Wellenlänge  $\lambda$  ergeben also die Aragoschen Interferenzen eine Bestimmungsgleichheit für  $d$  und  $n$  in der Form

$$(n - 1) \cdot d = (p_1 - \varepsilon_1) \cdot \lambda = q_1 \cdot \lambda,$$

während aus den Interferenzen gleicher Neigung an derselben Platte die zweite folgt:

$$2n \cdot d = (p_2 + \varepsilon_2) \cdot \lambda = q_2 \cdot \lambda.$$

Auf diese Weise findet man

$$2d = (q_1 - 2q_2) \cdot \lambda \dots \quad (16)$$

$$n = \frac{q_2}{q_1 - 2q_2}.$$

Es läßt sich also sowohl  $d$  als auch  $n$  durch die experimentell zu ermittelnden Ordnungszahlen  $q_1$  und  $q_2$  bestimmen. Diese Methode ist anwendbar bis zu Dicken von etwa 3,6 cm<sup>1</sup>.

Für denselben Zweck ist von Chappuis der Michelsonsche Apparat benutzt worden, wobei hinter dem Würfel eine Planfläche aufgestellt wurde und die Auswertung ähnlich wie bei den Michelsonschen Etalons vorgenommen wurde (2, 16).

Soll bei Interferenzmessungen eine Genauigkeit von 0,01  $\mu$  erzielt werden, so muß, wenn die Lage eines Interferenzstreifens gegenüber einer Marke mit einem Höchstfehler von 0,2 mm bestimmbar ist, die Parallelität der Flächen auf  $1 \cdot 10^{-4}$  eingestellt werden. Im allgemeinen kann nur eine Genauigkeit von 0,03  $\mu$  erreicht werden, weil eine Reihe von Fehlerursachen einwirkt, von denen neben den schon erwähnten Temperatur- und Druckeinflüssen noch die physiologischen Gesetzmäßigkeiten (vgl. auch S. 154) zu beachten sind. Gerade bei Interferenzmessungen der geschilderten Art handelt es sich nicht um die Wahrnehmung von Lagenunterschieden scharf begrenzter Gegenstände, sondern um die Lage der Intensitätsmaxima und -minima, zwischen denen ein zwar stetiger aber meist kein vollkommen symmetrischer Übergang vorhanden ist. In diesem Falle kann, wie Kühl (7) nachgewiesen hat, die physiologische Bildgrenze recht erheblich von der geometrischen abweichen.

Immerhin bilden die Interferenzen ein ausgezeichnetes Mittel, ein zeitlich konstantes, an allen Orten wieder herstellbares Maß für Längen zu schaffen. Fizeau, der als erster dies klar erkannte, schreibt: „Un rayon de lumière avec ses séries d'ondulations d'une ténuité extrême mais parfaitement régulière peut être considéré comme un micromètre naturel de la plus grande perfection, parfaitement propre à déterminer des longueurs.“ Die Lichtwellen geben die Möglichkeit, sich von allen materiellen, zeitlichen Änderungen unterworfenen Maßstäben freizumachen, wobei noch besonders hervorzuheben ist, daß eine Zusammensetzung dieser kleinsten Urnormalen ohne jeden Fehler erfolgen kann.

---

<sup>1</sup> Sie ist von Macé de Lépinay benutzt worden, um mit Hilfe eines Quarzwürfels die Masse eines Kubikdezimeters Wasser bei 4° C zu bestimmen.

# Literaturverzeichnis<sup>1</sup>.

## I. Die Entwicklung des Meßwesens.

### B. Die Entwicklung der Längenmaße.

1. Berndt, G.: Präz. Bd. 1, S. 523, 538. 1922.
2. Böckh, A.: Metrologische Untersuchungen über Geschichte der Münzfüße und Maße des Altertums in ihren Zusammenhängen. Berlin 1838.
3. Gehreke u. Norden: Einleitung in die Altertumswissenschaft. Bd. 3.
4. Hultzsck, Fr.: Griech. u. röm. Metrologie. Berlin 1862.
5. Kwang-chi Wang: Wiss. Beil. d. Dresdner Anz. vom 9. III. 1926.
6. Lenk, B.: Meßgerät. Wiss. Vorträge während d. Kölner Herbstmesse am 30. IX. u. 1. X. 1925. S. 77.
7. Rauda, F.: Wiss. Beil. d. Dresdener Anz. v. 15. III. 1927.
8. Wille, W.: Z. V. d. I. Bd. 35, S. 405, 435. 1891.
9. Zeulmann, St.: Das Maß- u. Gewichtswesen. Diss. Würzburg 1914.

### C. Die Entwicklung des metrischen Systems.

#### 1. Frankreich.

1. Berndt, G.: Präz. Bd. 1, S. 523, 538. 1922.
2. Bond, G. M.: J. Frankl. Inst. Bd. 87, S. 281, 357. 1884.
3. Erhard, L.: Mitt. Oenig Bd. 1, S. 120. 1921.
4. Karsten, G.: Maß u. Gewicht im alten u. neuen System. Berlin 1871.
5. Peters, C. F. W.: Metronom. Beitr., herausgeg. von der K. Normaleichungs-Komm. 1885, Nr. 5.
6. Pregél: Dingler Bd. 75, S. 1, 35, 79. 1894.
7. Schmidt, M.: Münch. Ber. 10. V. 1924.
8. Wolff, C.: Ann. Chim. Phys. Bd. 1. 1881 (nach Z. Instrumentenk. Bd. 3, S. 64, 176, 248, 393. 1883).
- 8a. Zeulmann, St.: Das Maß- u. Gewichtswesen. Diss. Würzburg 1914.
9. Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 30, I, S. 358. 1907.

#### 2. Deutschland.

1. Bessel, F. W.: Darstellung d. Unters. und Maßregeln, welche im Jahre 1835—1838 durch die Einheit des preuß. Längenmaßes veranlaßt worden sind. Berlin 1839.
2. Bessel, F. W.: Populäre Vorlesungen, 1848.
- 2a. Bopp, C.: Die intern. Maß-, Gewichts- u. Münzeinigung durch d. metr. System. Stuttgart 1869. [Zitiert nach (7)].
3. Karsten, G.: Vorschläge z. allg. deutschen Maß-, Gewichts- u. Münzregulierung. Berlin 1848.
4. Pensky, B.: Dt. Mech. Zg. 1899, S. 1, 9.
5. Plato, F.: Dt. Mech. Zg. 1915, S. 89.
6. Zachmann: Noch nicht veröffentl.
7. Zeulmann, St.: Das Maß- u. Gewichtswesen. Diss. Würzburg 1914.

### D. Die Meterkonvention.

1. Guillaume, Ch. Ed.: La convention du mètre et le BIPM. Paris 1902.
- 1a. — La création d. BIPM et son œuvre. Paris 1927.
2. Landolt-Börnstein: Physik.-Chem. Tabellen. 5. Aufl. 1922.
3. Pensky, B.: Dt. Mech. Zg. 1899, S. 1, 9.
4. Plato, F.: Dt. Mech. Zg. 1916, S. 17.
5. Proc. Verb. d. Séances du Com. IPM 1921.
6. Proc. Verb. d. Séances d. Com. IPM 1923.
7. V. D. I. Nachr. 24. III. 1926.

<sup>1</sup> Abkürzung: BIPM für Bureau International des Poids et Mesures.

**E. Das internationale Urmeter.**

## 1. Die Herstellung des Urmeters.

1. Guillaume, Ch. Ed.: La convention du mètre et le BIPM. Paris 1902.
2. — Trav. et Mém. BIPM. Bd. 16, 1917.
- 2a. — La création d. BIPM et son œuvre. Paris 1927.
3. Kaye, G. W. C.: Proc. Roy. Soc. Bd. 85, S. 430. 1911.
4. Nat. Phys. Labor., Report f. the year 1921.
- 4a. Pérard, A.: in Guillaume: La création d. BIPM et son œuvre. Paris 1927.
5. Sears, J. E.: J. Roy. Soc. of Arts Bd. 71, S. 793, 819. 1923.
6. — Engg. Bd. 121, S. 652. 1926.
7. Stein, S.: Verh. d. Ver. z. Beförd. d. Gewerbefleißes 1875, S. 551.
8. Weinstein, B.: Handbuch d. physik. Maßbestimmungen, 2 Bd., 1888.

## 2. Das Urmeter.

1. Bearce, H. W.: Sc. Papers Bur. of Stand. Nr. 535.
2. Benoît, R., A. Fabry u. Ch. Perot: Trav. et Mém. BIPM Bd. 15, S. 131. 1913.
3. Berndt, G.: Loewe Not. Bd. 6, S. 38. 1921.
4. — Ing. Zg. Bd. 17, S. 148. 1926.
- 4a. Guillaume, Ch. Ed.: La création d. BIPM et son œuvre. Paris 1927.
5. Pérard, A.: Comptes Rendus Bd. 184, S. 84. 1927.
- 5a. — in Guillaume: La création d. BIPM et son œuvre. Paris 1927.
6. Weber: Vortrag a. d. Dt. Ges. f. Techn. Physik, 20. IX. 1927 in Kissingen. Pkysik. Z. Bd. 29, S. 223. 1928.
7. Proc. Verb. d. Séances d. Com. IPM 1920, S. 16.
8. Proc. Verb. d. Séances d. Com. IPM 1921.
9. Proc. Verb. d. Séances d. Com. IPM 1923.
10. Z. Instrumentenk. Bd. 44, S. 75. 1924.

**F. Das technische Maßsystem.**

1. Leman, A.: Sitzber. d. Ver. z. Beförd. d. Gewerbefleißes 1904, S. 245.
2. Petavel, J. E.: Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 53, S. 186 E. 1921.

**G. Das Zollsystem.**

## 1. Das englische Zollsystem.

1. Bearce, H. W.: Sc. Papers Bur. of Stand. Nr. 535.
2. Berndt, G.: Loewe Not. Bd. 6, S. 37, 89. 1921.
3. Bond, G. M.: J. Frankl. Inst. Bd. 87, S. 281, 357. 1884.
4. Fischer, L. A.: Misc. Publ. Bur. Stand. 1925, Nr. 64.
5. Goodeve, F. M., u. B. P. Shelley: Die Meßmasch. von Whitworth; deutsch von M. Schröder. Jena 1879.
6. Guillaume, Ch. Ed.: Trav. et Mém. BIPM Bd. 16. 1917.
7. Nat. Physic. Labor., Report f. the year 1921.
- 7a. Nat. Physic. Labor., Report f. the year 1927. Engg. Bd. 126, S. 205. 1927.
8. Sears, J. E.: J. Roy. Soc. of Arts Bd. 71, S. 793, 819. 1923.
9. — Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 33, S. 209, 222, 235. 1925.
10. — Engg. Bd. 121, S. 652. 1926.
- 10a. —, W. A. Johnson u. H. L. P. Jolly: Phil. Trans. (A) Bd. 227, S. 281. 1928.
11. Shelley, C. B. P.: Workshop Appliances. London 1873.
12. Whitworth, J.: Papers on Mechan. Subjects, Part I. London 1882.
13. V. D. I. Nachr. 3. III. u. 29. V. 1926.

## 2. Das amerikanische Zollsystem.

1. Bearce, H. W.: Sc. Papers Bur. of Stand. Nr. 535.
2. Bond, G. M.: J. Frankl. Inst. Bd. 87, S. 281, 357. 1884.
- 2a. Dale, S. S.: The Mendenhall Conspiracy To Discredit English Weights And Measures. A Statement Of The Facts. Boston, Mass. USA, 1927.
3. Fischer, L. A.: Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 29 I, S. 46. 1906.
4. — Misc. Publ. Bur. Stand. 1925. Nr. 64.
5. Mendenhall, T. C.: Science (NS) Bd. 56, S. 377. 1922.
6. Physik. Techn. Reichsanstalt, Tätigkeitsbericht für 1926. Z. Instrumentenk. Bd. 46, S. 219. 1927.
7. V. D. I. Nachr. 3. III. u. 29. V. 1926.
8. Circ. Bur. of Stand. Nr. 332. 1927.

**H. Die staatliche Regelung des Meßwesens in Deutschland.**

## 1. Maß- und Gewichtsordnung.

1. Drewitz, C.: Genauigkeitsanforderungen im Eichwesen. Berlin 1913.
2. Plato, F.: Die Maß- u. Gewichtsordnung vom 30. V. 1908. Berlin 1908.
3. Eichordnung f. d. Deutsche Reich vom 8. XI. 1911. Neudruck 1923.
4. Instruktion z. Eichordnung f. d. Deutsche Reich vom 8. XI. 1911.

## 2. Eichordnung.

1. Reichsgesetzblatt vom 20. III. 1925, Nr. 10.

**J. Die Entwicklung der technischen Messungen.**

1. Berndt, G.: Präz. Bd. 1, S. 498, 1922; Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 34, S. 30, 93, 112, 113, 126, 157. 1926.
2. — Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 33, S. 183, 192. 1925.
3. — Meßgerät. Wiss. Vorträge während d. Kölner Herbstmesse am 30. IX. u. 1. X. 1925. S. 15.
4. Bond, G. M.: J. Frankl. Inst. Bd. 87, S. 368. 1884.
5. Buxbaum, F.: Betrieb, Bd. 2, S. 18. 1919.
6. — Die Entwicklungsgrundsätze der spanabhebenden Metallbearbeitungsmasch. im 18. u. 19. Jahrhundert. Berlin 1920.
7. — Betrieb Bd. 3, S. 542. 1921.
8. Darmstaedter, L.: V. D. I. Nachr. Bd. 6, Nr. 7. 1926.
9. — V. D. I. Nachr. Bd. 7, Nr. 5. 1927.
10. Dreger, M.: Beitr. z. Gesch. d. Technik u. Ind. Bd. 46, S. 86. 1926 (Jahrbuch d. V. D. I.).
11. Feldhaus, F. M.: Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 32, S. 219. 1924.
12. — Tage der Technik. 1927.
13. Giebel, K.: Die Normung im Uhrengewerbe. Berlin 1926.
14. Gramenz, K.: Passungen; DIN-Buch 4, 2. Aufl. 1925.
15. Hijmans, E. (nach einem Vortrage).
16. Mattschoß, C.: Männer der Technik, S. 191. Berlin 1925.
17. Pregél: Dingler Bd. 75, S. 1, 35, 79. 1894.
18. Reuleaux, F.: Verh. d. Ver. z. Beförd. d. Gewerbefleißes 1894, S. 142, 187, 225.
19. Schlesinger, G.: Forsch.-Arb. Ing. H. 193/4.
20. Thwing, L. L.: Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 54, S. 224. 1921.
21. Woodsworth, J. V.: Die Herstellung von Werkzeugen und die Massenfabrikation nach amerik. System; deutsch von L. Heine. 1910.
22. Zimmermann-Brinkmann: Die Dinormen. Berlin 1926.

**II. Strichmaße und ihre Messung.****A. Strichmaße.**

## 1. Holz- und Gelenkmaßstäbe.

1. Berndt, G.: Betrieb Bd. 2, S. 218. 1920.
- 1a. Eberlin, L. W., u. A. M. Burgess: J. Frankl. Inst. Bd. 203, S. 588. 1927.
2. Hendershof, O. P.: Science (NS), Bd. 60, S. 456. 1924.
3. Hildebrandt, R.: Wied. Ann. Bd. 34, S. 361. 1888.
4. Hofe, Ch. v.: Z. techn. Phys. Bd. 1, S. 95. 1920.
5. Martens, A.: Handbuch d. Materialienprüfung f. d. Maschinenbau, Bd. 1, S. 435ff. Berlin 1898.
6. Moye, A.: Dt. Mech.-Zg. 1913, S. 113.
7. Parkhurst, D. L.: J. Sc. Instr. Bd. 4, S. 284. 1927.
8. Souder, W. H. u. P. Hilmert: Sc. Papers Bur. Stand. Bd. 15, S. 387. 1919.
9. Machinery Bd. 32, S. 71. 1925.
10. Mitt. N.D.I. Bd. 11, S. 148. 1928.

## 2. Stahlmaßstäbe.

1. Berndt, G.: Betrieb Bd. 2, S. 218. 1920.
2. Dimmer, G.: Wien. Ber. Bd. 129 (IIa), S. 223. 1920.
3. Lüdemann, K.: Betrieb Bd. 4, S. 292. 1922.
4. Physik. Techn. Reichsanstalt, Tätigkeitsbericht f. d. Jahr 1919.
5. Rieder, G.: Werk.-Tech., Bd. 15, S. 179. 1921.
6. Scheel, K.: Grundlagen d. prakt. Metronomie. Braunschweig 1911.

7. Toussaint, E.: *Werkz.-Masch.* Bd. 22, S. 87, 111, 205. 1918.
8. Weinstein, B.: *Handbuch der physik. Maßbestimmungen.* 1888.
9. Wild, H.: *Pogg. Ann. Jubelbd.* 61. 1874.

### 3. Andere Werkstoffe.

1. Benedicks, C.: *C. R. d. 5. Congrès d. Chim. Ind.* 1925.
2. — u. Sederholm: *Ark. f. Mat. Astron. och Fys.* Bd. 19 (B), Nr. 1, 1925.
3. Berndt, G.: *Z. Feinmech. u. Präz.* Bd. 35, S. 141. 1927.
4. Glazebrook, R. T.: *Engg.* Bd. 85, S. 409. 1908.
5. Göpel, F.: *Dt. Mech.-Zg.* 1898, S. 153.
6. — *Z. Instrumentenk.* Bd. 32, S. 33. 1912.
7. Guillaume, Ch. Ed.: *Trav. et Mém. BIPM* Bd. 16. 1917.
8. — *Comptes Rendus* Bd. 171, S. 1039. 1920.
9. — *Arch. sc. phys. et nat.* (5) Bd. 9, S. 5. 1927.
- 9a. — *Trav. et Mém. BIPM* Bd. 17. 1927.
10. Kaye, G. W. C.: *Proc. Roy. Soc.* Bd. 85, S. 430, 1911 (nach Beob. von M. Thiesen, K. Scheel u. L. Sell: *Wiss. Abh. d. PTR.* Bd. 2, S. 73, 1895).
11. Lewis, H. B. u. C. G. Peters: *Am. Mach. (Europ. Ed.)* Bd. 61, S. 925. 1924.
12. Lindmann, K. F.: *Acta Soc. Fenn.* Bd. 46, Nr. 5. 1916.
13. Lüdemann, K.: *Betrieb* Bd. 4, S. 292. 1922.
14. *Nat. Physic. Labor., Report f. the year 1925.*
15. *Nat. Physic. Labor., Report f. the year 1926.*
- 15a. *Nat. Physic. Labor., Report f. the year 1927.* *Engg.* Bd. 126, S. 205. 1928.
16. *Physik.-Techn. Reichsanstalt, Tätigkeitsbericht f. d. Jahr 1919.*
17. Pulfrich, C.: *Z. Instrumentenk.* Bd. 27, S. 369. 1907.
18. Riefler, S.: *Präz. Pendeluhren und Zeitdienstanlagen für Sternwarten*, S. 16. München 1907.
19. Sears, J. E.: *J. Roy. Soc. of Arts* Bd. 71, S. 793, 819. 1923.
20. Souder, W. H. u. P. Hilmert: *Phys. Rev.* Bd. 17, S. 372. 1921.
- 20a. Volet, Ch.: *Trav. et Mém. BIPM* Bd. 17. 1927.
- 20b. — in Guillaume: *La création d. BIPM et son œuvre.* 1927.
21. *Engg.* Bd. 93, S. 413. 1912.
22. *Trav. et Mém. BIPM* Bd. 15, S. 131. 1913.
23. *Engg.* Bd. 98, S. 76. 1914.
24. *Circ. Bur. Stand.* 1916, Nr. 58 (siehe *Z. Dt. Ges. f. Mech. u. Optik* 1918, S. 6).
25. *Proc. Verb. d. Séances d. Com. IPM* 1921.
26. *Proc. Verb. d. Séances d. Com. IPM* 1925.

### 4. Bandmaße.

1. Lüdemann, K.: *Allg. Vermessungs-Nachr.* 1922, Nr. 23—25.
2. *Nat. Physic. Labor., Report f. the year 1924.*
3. Reilley, G. C.: *Am. Mach. (Europ. Ed.)* Bd. 62, S. 26, 1925; *Machinery* Bd. 33, S. 172, 1926.
4. *Circ. Bur. of Stand.* Nr. 328. 1927.
5. *Mitt. N.D.I.* Bd. 11, S. 154. 1928.

## B. Komparatoren.

### 1. Visierinstrumente.

1. Bond, G. M.: *J. Frankl. Inst.* Bd. 87, S. 281, 351. 1884.
- 1a. Eppenstein, O.: *Das Fernrohr (Handbuch d. Physik, herausg. v. H. Geiger u. K. Scheel, Bd. 18, S. 593).*
2. Förster, W.: *Proc. Verb. d. Séances d. Com. IPM* 1877, S. 271.
3. Hirsch, A.: *Proc. Verb. d. Séances d. Com. IPM* 1877, S. 253.
4. Steinle: *Masch.-B.* Bd. 5, S. 445. 1926.
5. *Machinery* Bd. 32, S. 695. 1926.

### 2. Messung von Strichmaßen.

1. Bopp, F. H.: *Z. Feinmech. u. Präz.* Bd. 34, S. 123. 1926.
2. Pensky, B.: *Z. Instrumentenk.* Bd. 1, S. 138. 1881.
3. — *Z. Instrumentenk.* Bd. 15, S. 333, 352. 1895.
4. *Proc. Verb. d. Séances d. Com. IPM* 1921.

### 3. Komparatoren.

1. Abbe, E.: *Z. Instrumentenk.* Bd. 10, S. 446. 1890.
2. Gottschau, M.: *Machinery.* Bd. 31, S. 791. 1925.

3. Kösters, W.: Wiss. Abh. d. K. Normal-Eichungskomm. Bd. 8, S. 87, 1912; Z. Instrumentenk. Bd. 33, S. 233. 1912.
4. Kurtz, H. F.: Mech. Engg. Bd. 47, S. 987. 1925.
5. Scheel, K.: Grundlagen der prakt. Metronomie. Braunschweig 1911.
6. Schumann, R.: Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 35, S. 62, 1927; DOW 1927, S. 151.
7. Werkst.-Techn. Bd. 20, S. 479. 1921.

### III. Endmaße und ihre Messung.

#### A. Endmaße.

##### 1. Endmaße mit Kugel- und Zylinderflächen.

1. Berndt, G.: Loewe Not. Bd. 6, S. 12. 1921.
2. — Z. techn. Phys. Bd. 3, S. 14, 82. 1922.
- 2a. — Z. Instrumentenk. Bd. 48, S. 422. 1928.
3. Bochmann, H.: Diss. Techn. Hochschule Dresden, 1917; Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 35, S. 95, 110, 122, 134, 161, 175, 1927; Stock Z. Bd. 1, S. 14, 1928.
4. Chubb, J. W.: Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 37, S. 1. 1912.
5. Goodman, J.: Engg. Bd. 116, S. 133, 244. 1923.
- 5a. Guillaume, Ch. Ed.: Trav. et Mém. BIPM Bd. 14, S. 258 (nach Pérard u. Maudet: Trav. et Mém. BIPM Bd. 17, 1927).
6. Hertz, H.: Ges. Werke Bd. 1, S. 155, 183.
- 6a. Lafay, A.: Ann. Chim. Phys. (7) Bd. 23, S. 241. 1901.
7. Nat. Physic. Labor., Report f. the year 1921.
8. Nat. Physic. Labor., Engg. Bd. 114, S. 212. 1922.
9. Nat. Physic. Labor., Report f. the year 1923.
10. Ôkubo, J.: Sc. Rep. Tôhoku Univ. (1) Bd. 11, S. 454. 1922.
11. Pérard, A.: Rev. d'Optique Bd. 1, S. 209. 1922.
- 11a. — u. Maudet: Trav. et Mém. BIPM Bd. 17. 1927.
- 11b. Perot u. Fabry: Ann. Chim. Phys. (7) Bd. 24, S. 133, 1901 (nach Pérard u. Maudet: Trav. et Mém. BIPM Bd. 17, 1927).
12. Physik.-Techn. Reichsanstalt, Tätigkeitsber. f. d. Jahr 1926; Z. Instrumentenk. Bd. 47, S. 226. 1927.
13. Rasch, E.: Z. Werkzeugmasch. u. Werkzeuge 1900.
14. Engg. Bd. 89, S. 434. 1910.

##### 2. Die Entwicklung der Parallelendmaße.

1. Budgett, H. M.: Proc. Roy. Soc. Bd. 86, S. 25. 1912.
2. Chubb, J. W.: Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 37, S. 1. 1912.
3. Ford, H.: Das große Heute, das größere Morgen. Leipzig 1926.
4. Goldschmidt, V. M.: Z. Metallographie Bd. 13, S. 449. 1921.
- 4a. Guillaume, Ch. Ed.: Les récents progrès du système métrique, S. 11. 1921.
5. Holm, R.: Z. techn. Phys. Bd. 3, S. 324. 1922.
6. Johansson: Vortrag i. d. Physik. Ges. d. Hochschule Stockholm, November 1917; Dagens Nyheten 12. XI. 1917, S. 7.
7. Johansson: Automot. Ind. 1919, S. 608, 611.
8. Kanek, M. E.: Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 53, S. 884. 1921.
- 8a. Mougín, H. u. E. K. Rideal: Proc. Roy. Soc. London (A), Bd. 114, S. 690. 1927.
9. Nat. Physic. Labor., Report f. the year 1925.
10. Nat. Physic. Labor., Report f. the year 1926.
- 10a. Nat. Physic. Labor., Report f. the year 1927. Engg. Bd. 126, S. 205. 1928.
- 10b. Pérard u. Maudet: Trav. et Mém. BIPM Bd. 17. 1927.
11. Peters, C. G. u. H. S. Boyd: Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 53, S. 627, 674. 1921.
12. — Sc. Pap. Bur. of Stand. Bd. 17, S. 677. 1922.
13. Physik.-Techn. Reichsanstalt, Tätigkeitsbericht f. d. Jahr 1926; Z. Instrumentenk. Bd. 47, S. 226. 1927.
14. Pietzsch, H.: Diss. Techn. Hochsch. Dresden 1928.
- 14a. Rolt, F. H. u. H. Barrett: Proc. Roy. Soc. London (A), Bd. 116, S. 401. 1927.
15. Sears, J. E.: Engg. Bd. 121, S. 652. 1926.
16. Shelley, C. B. P.: Workshop Appliances. London 1873.
17. Terzaghi, Ch.: Phys. Rev. (2) Bd. 16, S. 54. 1920.
18. Whitworth, J.: Papers on Mech. Subjects, Part I. London 1882.
19. Worthington: Phil. Trans. (A), Bd. 133, S. 385, 1893 (nach F. H. Rolt u. H. Barrett: Proc. Roy. Soc. London (A), Bd. 116, S. 401. 1927).

## 3. Werkstoff und seine Behandlung.

- 1α. Aitchison u. Woodvine: Engg. 1926, S. 339.
1. Bain, E. C. u. M. A. Grossman: Am. Mach. (Europ. Ed.), Bd. 65, S. 523. 1921.
- 1a. Barnden, J.: Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 67, S. 176 E, 1927 und die sich daran schließende Diskussion von Gigli (S. 191 E), Glasgow (S. 192 E), Woodhams (S. 192 E), Bailey (S. 192 E), Lines (S. 208 E), Bonsall (S. 212 E), George (S. 217 E), Henry (S. 220 E), Gordon-Sale (S. 220 E), Jensen (S. 221 E), Guyler (S. 238 E), Barnden (S. 243 E), Vose (S. 247 E), Muirhead (S. 272 E), Buston, Griffiths u. Co. (S. 301 E).
2. Barus u. Brant: Phys. Rev. Bd. 29, S. 485. 1909.
3. Berndt, G.: Dingler Bd. 102, S. 185. 1921.
4. — Loewe Not. Bd. 8, 45. 1923.
5. — Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 35, S. 141. 1927.
- 5a. Birnbaum, H.: Stahleisen Bd. 48, S. 1125. 1928. Arch. f. Eisenhüttenw. Bd. 2,
- S. 41. 1928/9. Bericht Nr. 127 d. Werkstoffaussch. d. Ver. Dt. Eisenhüttenl.
6. Bloxam, H. P. u. E. Buckley: J. Sc. Instr. Bd. 2, S. 9. 1924.
7. Blum, W.: Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 65, S. 948. 1927.
8. Brush, Ch. F.: Am. Phil. Soc. Philadelphia Bd. 54, S. 154. 1915.
- 8a. Brush u. Headfield: Proc. Roy. Soc. Bd. 95, S. 120. 1918.
- 8b. — u. Main: Proc. Roy. Soc. Bd. 97, S. 820. 1920.
9. Buisson, H.: Comptes Rendus Bd. 142, S. 881. 1906.
10. Cahn, E.: Diss. Techn. Hochsch. Dresden, 1928.
- 10a. Dearden, W. H. u. C. Benedicks: J. Iron Steel Inst. Bd. 113, S. 193. 1926.
- 10b. Eilender, W. u. W. Oertel: Stahleisen Bd. 47, S. 1558. 1927.
11. Fraenkel u. Heymann: Z. anorg. Chem. Bd. 134, S. 137. 1924.
12. French, H. J.: Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 55, S. 768, 1921; Chem. Metallurg Engg. Bd. 25, S. 155. 1921.
13. French, W. H. u. H. K. Herschman: Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 65, S. 530, 1926; Vortrag a. Am. Soc. f. Steel Testing, Chicago 20.—24. IX. 1926; Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 67, S. 462. 1927.
14. Fry, A.: Stahleisen, Bd. 43, S. 1271. 1921; Kruppsche Monatshefte Bd. 4, S. 137. 1923.
- 14a. — Kruppsche Monatshefte Bd. 7, S. 17. 1926.
- 14b. — Stahleisen Bd. 47, S. 2169. 1928.
15. Gill u. Bowman: Stahleisen Bd. 44, S. 826. 1924.
- 15a. Guillaume, Ch. Ed.: La Nature 1910; Génie civil Bd. 80, S. 88. 1922.
- 15b. — La création d. BIPM et son œuvre. Paris 1927.
- 15c. — Arch. sc. phys. et nat. (5) Bd. 9, S. 5. 1927.
16. Guillet, L.: Comptes Rendus Bd. 183, S. 933. 1926.
- 16a. — Comptes Rendus Bd. 184, S. 1296. 1927.
17. Groocok, W. G.: Z. Masch.-Bau Bd. 8, S. 208. 1919.
18. Hanemann, H. u. A. Schrader: Bericht Nr. 61 des Werkstoffaussch. d. Ver. Dt. Eisenhüttenleute.
19. — u. E. H. Schulz: Stahleisen 1914.
20. — u. L. Traeger: Stahleisen Bd. 46, S. 1508. 1926.
- 20a. Hofmann, A.: Loewe Not. Bd. 13, S. 73. 1928.
- 20b. Honda, K.: Stahleisen, Bd. 48, S. 263. 1928.
21. — u. K. Iwasé: Sc. Rep. Tôhoku Univ. Bd. 16, S. 1. 1927.
- 21a. — u. S. Sekito: Sc. Rep. Tôhoku Univ. (1) Bd. 17, S. 743. 1928.
22. Irons, H. F.: Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 53, S. 1144. 1921.
23. Keuren, H. L. van: Z. Masch.-Bau Bd. 8, S. 291. 1919.
24. — Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 52, S. 1045. 1920.
25. Lemman, A. u. A. Werner: Werkst.-Techn. Bd. 5, S. 453, 1911; Dt. Mech.-Zg. 1911, S. 87.
26. Marre: Bull. Soc. d'Encouragement (5) Bd. 3, S. 77. 1898.
27. Matsushita, T.: Proc. Tokyo Math. Phys. Soc. Bd. 9, S. 312. 1917/8.
28. — Sc. Rep. Tôhoku Univ. Bd. 7, S. 43. 1918.
- 28a. — u. K. Nagasawa, K.: Sc. Rep. Tôhoku Univ. Bd. 16, S. 901. 1927.
29. Maurer: Mitt. Eisenforsch. Bd. 1, S. 39. 1920.
- 29a. — u. Hauffe: Stahleisen Bd. 44, S. 622. 1924.
- 29b. Merz, A. u. C. Pfannenschmidt: Z. anorg. Chem. Bd. 167, S. 241. 1927.
30. Nat. Physic. Labor., Report f. the year 1921.
31. Nat. Physic. Labor., Engg. Bd. 116, S. 155. 1923.
32. Nat. Physic. Labor., Engg. Bd. 118, S. 128. 1924.
- 32a. Nat. Physic. Labor., Report f. the year 1927. Engg. Bd. 126, S. 205. 1928.

33. Pensky, B.: Z. Instrumentenk. Bd. 8, S. 185. 1888; Dt. Mech.-Zg. 1895, S. 513; 1898, S. 81, 99.
- 33a. Pérard u. Maudet: Trav. et Mém. BIPM Bd. 17. 1927.
- 33b. — J. d. Phys. et Le Radium (6) Bd. 8, S. 344. 1927.
34. Peters, C. G. u. H. S. Boyd: Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 53, S. 627, 674. 1921.
35. — Sc. Pap. Bur. Stand. Bd. 17, S. 677. 1922.
36. Pfannhauser, W.: Das Verchromungsverfahren 1926.
37. Philipps, W. N.: Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 66, S. 168. 1927.
38. Portevin, A.: Comptes Rendus Bd. 175, S. 959. 1922.
39. Pratt u. Whitney: Machinery, Juli 1920.
- 39a. Rolt, F. H. u. H. Barrett: Proc. Roy. Soc. London (A) Bd. 116, S. 401. 1927.
- 39b. Schottky: Ferrum Bd. 10, S. 274. 1912/13.
40. Schröder, R. P. (Briefliche Mitteilung).
41. Schulz, E. H.: Forsch.-Arb. Ing. 1914, Nr. 164; Z. V. d. I. 1915, S. 66, 112.
42. Scott, H.: Trans. Am. Soc. Steel Testing Bd. 9, S. 277, 1926; Technol. Pap. Bur. of Stand. 1926.
43. Sears, J. E.: J. Roy. Soc. of Arts, Bd. 71, S. 793, 819. 1923.
44. — Engg. Bd. 121, S. 652. 1926.
45. Souder, W. H. u. P. Hilmert: Phys. Rev. Bd. 17, S. 372. 1921.
46. Stadthagen, H.: Z. V. d. I. 1911, S. 1525.
47. Steinheil: Münch. Ber. 1863 I, S. 329.
- 47a. Tamaru, K.: Bull. Inst. Phys. Chem. Research Tokyo Bd. 7, S. 1028. 1928.
48. Tammann, G. u. E. Scheibe: Z. anorg. Chem. Bd. 157, S. 1. 1926.
49. Traeger, L.: Diss. Techn. Hochsch. Berlin 1927; Forsch.-Arb. Ing. Nr. 294. Z. V. d. I. Bd. 71, S. 891. 1927.
50. Weber, A.: Diss. Techn. Hochschule München 1925.
51. Wood, Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 62, S. 873. 1925.
52. Mitt. d. K. Normal-Eichungskomm. Bd. 1, S. 13. 1886—1893.
- 52a. Mitt. d. K. Normal-Eichungskomm. Bd. 1, S. 116. 1886—1893.
53. Am. Nach. (Europ. Ed.) Bd. 54, S. 133 E. 1921.
- 53a. Am. Mach. (Europ. Ed.) 1921, S. 625.
54. Proc. Verb. d. Séances d. Com. IPM 1921.
55. Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 56, S. 131 E. 1922.
56. La Machine Moderne Bd. 16, S. 30. 1922.
57. Chem. Metallurg. Engg. Bd. 26, S. 701. 1922.
58. Engg. Bd. 117, S. 773. 1923.
59. Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 61, S. 607. 1924.
60. Engg. Bd. 118, S. 128. 1924.

#### 4. Endmaßsätze.

1. Ford, H.: Das große Heute, das größere Morgen. Leipzig 1926.
2. Hommel-Werke, D. R. P.
3. Hommel-Werke, Prospekt.
4. Preger, E.: Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 35, S. 169. 1927.

#### 5. Zubehör und Verwendung von Endmaßen.

1. Loewe Not. Bd. 13, S. 62. 1928.

#### 6. Genauigkeit der Endmaße.

1. Physik.-Techn. Reichsanst., Tätigkeitsbericht f. d. Jahr 1926; Z. Instrumentenk. Bd. 47, S. 226. 1927.
2. Pietzsch, H.: Diss. Techn. Hochsch. Dresden 1928.
3. Reichsanstalt f. Maß u. Gew., Werkst.-Techn. Bd. 7, S. 151. 1913.
- 3a. Weber: Phys. Z. Bd. 29, S. 233. 1928.
4. Engg. Bd. 87, S. 445. 1909.
5. Mitt. d. betriebstechn. Abt. Bd. 3, S. 133. 1921.
6. Mitt. N. D. I. Bd. 8, S. 969. 1925.

#### B. Messung von Endmaßen durch Vergleich mit Strichmaßen.

1. Berndt, G.: Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 35, S. 245. 1927.
2. Bigourdan, G.: Le système métrique des poids et mesures. Paris 1901.
3. Eppenstein, O.: Präz. Bd. 1, S. 345. 1922.
4. Galatzin, A.: Rev. Mécanique Bd. 13, S. 27. 1903.
5. Krüß, H.: Z. Instrumentenk. Bd. 40, S. 33. 1920.
6. Nat. Physic. Labor., Rep. f. the year 1921.

7. Nat. Physic. Labor., Engg. Bd. 118, S. 128. 1924.
8. Pérard, A.: Trav. et Mém. BIPM, Bd. 15, 1913.
- 8a. — u. Maudet: Trav. et Mém. BIPM Bd. 17. 1927.
- 8b. Physik. Techn. Reichsanstalt, Tätigkeitsbericht f. d. Jahr 1927; Z. Instrumentenk. Bd. 48, S. 145. 1928.
9. Shaw, E.: Proc. Roy. Soc. Bd. 84, S. 589. 1910.

### C. Interferenzkomparatoren.

#### I. Interferenzen gleicher Dicke.

1. Berndt, G.: Betrieb Bd. 2, S. 389. 1921.
- 1a. Mabboux, G.: Rev. d'Opt. Bd. 6, S. 470. 1927.
- 1b. Physik.-Techn. Reichsanstalt: Z. Instrumentenk. Bd. 48, S. 273. 1928.
2. Schulz, H.: Verh. d. Dt. Phys. Ges. Bd. 15, S. 286. 1913.
3. — Z. Instrumentenk. Bd. 34, S. 252. 1914.

#### 2. Vergleich von Endmaßen mittels Interferenzen gleicher Dicke.

1. Berndt, G.: Betrieb Bd. 3, S. 389, 1921; Loewe Not. Bd. 9, S. 2, 1924; DOW 1924.
2. Keßler, K.: Zentralbl. Optik u. Mech. Bd. 43, Nr. 24 u. 25. 1922.
3. Kösters, W.: Vortrag i. d. Dt. Ges. f. Techn. Phys. 30. I. 1920.
4. — Präz. Bd. 1, S. 2, 17, 39. 1922.
5. Pérard, A.: Rev. d'Optique Bd. 1, S. 209. 1922.
6. Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 62, S. 124 E. 1925.

#### 3. Absolutmessung in Lichtwellenlängen.

1. Fabry u. Perot: Ann. Chim. Phys. Bd. 16, S. 115. 1879.
- 1a. Fukuda, M.: Sc. Pap. Inst. Physic. Chem. Res. Tokyo Bd. 4, S. 167. 1926.
2. Gehrcke, E. u. L. Janicki: Ann. Phys. (4) Bd. 81, S. 314. 1926.
3. Glaser, C. L.: Verh. d. Physik.-Med. Ges. Würzburg (N. F.) Bd. 52, S. 14. 1927.
4. Kösters, W.: Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 34, S. 55. 1926.
5. Meggers, F. W.: J. Opt. Soc. Am. Bd. 5, S. 308. 1921.
6. Pérard, A.: Rev. d'Optique Bd. 1, S. 209. 1922.
7. — Comptes Rendus Bd. 183, S. 1101. 1926.
- 7a. — u. Maudet: Trav. et Mém. BIPM Bd. 17. 1927.
- 7b. — Rev. d'Optique Bd. 7, S. 1. 1928.
- 7c. — in Guillaume: La création d. BIPM et son œuvre. Paris 1927.
8. Physik.-Techn. Reichsanstalt, Tätigkeitsbericht f. d. Jahr 1926; Z. Instrumentenk. Bd. 47, S. 226. 1927.
- 8a. Physik.-Techn. Reichsanstalt: Tätigkeitsbericht f. d. Jahr 1927; Z. Instrumentenk. Bd. 48, S. 145. 1928.
9. Pietzsch, H.: Diss. Techn. Hochsch. Dresden 1928.
- 9a. Takamine, T. u. T. Suga: Phil. Mag. Bd. (7) 5, S. 141. 1928.
10. Weber: Phys. Z. Bd. 29, S. 233. 1928.
11. Trav. et Mém. BIPM Bd. 15, S. 131. 1913.
12. Sc. Pap. Bur. Stand. 1916—1918, S. 159.
13. Sc. Pap. Bur. Stand. 1922, Nr. 441.

#### 4. Korrekturen bei der Messung in Lichtwellenlängen.

1. Hamy, M.: Comptes Rendus Bd. 117, S. 659. 1893 (nach S. Ambron: Handb. d. astron. Instrumentenk. Bd. 1, S. 288).
2. Hansen, H.: Arch. Wärmewirtsch. Bd. 8, S. 87. 1927 (nach Techn. Z.-Schau 1927, Nr. 7).
3. Kösters, W.: Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 34, S. 55. 1926.
4. — im Handbuch der physik. Optik, herausg. v. E. Gehrcke. 1927.
5. Nat. Physic. Labor., Report f. the year 1921.
- 5a. Nat. Physic. Labor., Report f. the year 1927. Engg. Bd. 126, S. 205. 1928.
6. Pérard, A.: Trav. et Mém. BIPM Bd. 16. 1917.
7. — Comptes Rendus Bd. 170, S. 390. 1920.
8. — J. Phys. et Le Radium (6) Bd. 6, S. 217. 1925.
9. Physik.-Techn. Reichsanstalt, Tätigkeitsbericht f. d. Jahr 1926; Z. Instrumentenk. Bd. 47, S. 226. 1927.
- 9a. Physik.-Techn. Reichsanstalt, Tätigkeitsbericht f. d. Jahr 1927; Z. Instrumentenk. Bd. 48, S. 145. 1928.
10. Pietzsch, H.: Diss. Techn. Hochsch. Dresden 1928.
11. Skinner, C. A.: Gen. El. Rev. Bd. 29, S. 528. 1926 (nach Phys. Ber. Bd. 7, S. 1927, 1926).

12. Teusz, J. u. G. Hornung: Z. Techn. Phys. Bd. 8, S. 338. 1927.
13. Weber: Phys. Z. Bd. 29, S. 233. 1928.
14. Proc. Verb. d. Séances d. Com. IPM 1925.
15. Machinery 5. IV. 1928.

#### 5. Interferometer zur Messung in Lichtwellenlängen.

1. Kösters, W.: Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 34, S. 55. 1926.
2. Physik.-Techn. Reichsanstalt: Tätigkeitsbericht f. d. Jahr 1926; Z. Instrumentenk. Bd. 47, S. 226. 1927.

#### 6. Weitere Interferenzmeßmethoden.

1. Berndt, G.: Betrieb, Bd. 2, S. 121. 1920.
2. Göpel, F.: Werkst. Techn. 1919, II. Sonderheft, S. 1.
3. Hendershof, O. P.: Science (NS), Bd. 60, S. 456. 1924.
4. van Keuren, H. L.: Z. Masch.-Bau Bd. 8, S. 291. 1919.
- 4a. Pérard u. Maudet: Trav. et Mém. BIPM Bd. 17. 1927.
5. Peters, C. G. u. H. S. Boyd: Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 53, S. 627, 674. 1921.
6. Pratt u. Whitney: Machinery, Juli 1920.
7. Rolt, F. H. u. C. H. Knoyle: J. Sc. Instr. Bd. 4, S. 42. 1926.
8. Sears, J. E.: Engg. Bd. 121, S. 652. 1926.

#### 7. Andere Verfahren.

1. Bazzoni, C. B.: J. Frankl. Inst. Bd. 202, S. 35. 1926 (nach Phys. Ber. Bd. 7, S. 1865. 1926).
- 1a. Cioffi, P. P.: Instruments Bd. 1, S. 99. 1928.
2. Dowling, J. J.: Engg. Bd. 112, S. 395, 1921; Phil. Mag. (6) Bd. 46, S. 81. 1923.
3. Ettenreich, R.: Verh. d. Dt. Physik. Ges. (3) Bd. 2, S. 12. 1921.
- 3a. Leber, H. Diss. Darmstadt 1927.
- 3b. Loebe, W. W. u. C. Samson: Z. techn. Phys. Bd. 9, S. 414. 1928.
- 3c. Obata, J.: J. Opt. Soc. Am. Bd. 16, S. 419, 1928 (nach Z. Instrumentenk. Bd. 48, S. 614, 1928).
- 3d. Sachsenberg, Osenberg u. Gruner: Z. V. d. I. Bd. 71, S. 1609, 1927; Bd. 72, S. 469, 1928.
4. Tomlinson, G. A.: Phil. Mag. (6) Bd. 44, S. 870. 1922.
5. Whiddington, R.: Phil. Mag. (6) Bd. 40, S. 634. 1920.

### D. Die Genauigkeit technischer Messungen.

1. Berndt, G.: Betrieb Bd. 2, S. 121. 1920.
2. — Betrieb Bd. 4, S. 1. 1921.
3. — Loewe Not. Bd. 9, S. 33, 1924; Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 32, S. 169. 1924.
4. — Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 33, S. 139. 1925.
5. — Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 34, S. 11, 1926; Loewe Not. Bd. 10, S. 145, 1925.
6. Block, W.: Wiss. Abh. d. K. Normal-Eichungskomm. Bd. 8, S. 59, 73. 1912.
7. Dittenberger, W.: Z. V. d. I. Bd. 46, S. 1532. 1902.
8. Finkelstein, A.: Werkst.-Techn. Bd. 4, S. 618, 664, 1910; Bd. 5, S. 4, 72, 127, 305. 1911.
- 8a. Gramenz, K.: Masch.-Bau Bd. 7, S. 1036ff. 1928.
9. Ford, H.: Das große Heute, das größere Morgen. Leipzig 1926.
10. Herb, Ch. O.: Machinery Bd. 33, S. 241. 1926.
11. van Keuren, H. L.: Z. Masch.-Bau Bd. 8, S. 291. 1919.
12. Kleinschmidt, B.: Schleifind. Kalender 1927, S. 92.
13. Landolt-Börnstein: Physik-Chem. Tabellen. 5. Aufl. 1922.
14. Leman, A.: Sitzungsber. d. Ver. z. Beförd. d. Gewerbefleißes 1904, S. 245.
- 14a. Mütze, K.: Diss. Techn. Hochsch. Dresden 1928.
15. Nat. Physic. Labor., Report f. the year 1921.
16. Obeltshäuser, K.: Diss. Techn. Hochsch. Braunschweig 1926; Masch.-Bau Bd. 6, S. 324, 1927; Bd. 7, S. 527, 1928.
17. Peters, C. G. u. H. S. Boyd: Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 53, S. 627, 674. 1921.
18. Physik.-Techn. Reichsanstalt, Tätigkeitsber. f. d. Jahr 1926; Z. Instrumentenk. Bd. 47, S. 226. 1927.
19. Pietzsch, H.: Diss. Techn. Hochsch. Dresden 1928.
- 19a. Savin, N. N.: Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 67, S. 721, 1927; Engg. Bd. 15, S. 373, 1928.

20. Scheffer: Loewe Not. Bd. 10, S. 145. 1925.
21. Schlippe, O.: Diss. Techn. Hochsch. Dresden 1927; Masch.-Bau. Bd. 7, 1928.
22. Stadthagen, H.: Z. V. d. I. 1908, S. 2070.
23. Stribeck, R.: Z. V. d. I. Bd. 51, S. 1445, 1500, 1542, 1907.
24. Machinery Bd. 32, S. 390. 1926.
25. Machinery Bd. 33, S. 164. 1926.
26. Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 34, S. 286. 1926.

## IV. Technische Meßgeräte mit Maßanzeige.

### A. Meßgeräte mit Strichmaßstab.

#### 1. Taster und Zirkel.

1. Kurtz, H. F.: Mech. Engg. Bd. 47, S. 987. 1925.

#### 2. Schieblehre und Nonius.

1. Berndt, G.: Betrieb Bd. 2, S. 219. 1920.
2. — Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 35, S. 235. 1927.
3. Buxbaum, B.: D. Entwicklungsgrundzüge d. spanabhebenden Metallbearbeitungstechnik im 18. u. 19. Jahrh. Berlin 1920.
4. Cohn u. Weylandt: Dt. Mech.-Zg. 1898, S. 118.
5. Feldhaus, F. M.: Werkz.-Masch. Bd. 26, S. 246. 1922.
6. Hommel-Werke, Prospekt.
7. Kienzle, O.: Monatsbl. Berlin. Bez.-V. d. I. 1920, S. 1; Techn. Versuchsamt Wien Bd. 10, S. 9. 1921.
8. Kluesmann, W.: Vereinsbl. d. Dt. Ges. f. Mech. u. Optik Bd. 6, S. 12. 1896.
9. Kohl, H.: D. R. P. Anm., Kl. 42b, Nr. 72138.
10. Krupp A.G.: Kruppsche Monatsh. Bd. 1, S. 23. 1920.
11. Kurrein, M.: Werkst.-Techn. Bd. 19, S. 245. 1925.
- 11a. Schmidt, A.: Masch.-Bau, Bd. 7, S. 720. 1928.
12. Toussaint, E.: Werkst.-Techn. 1915, S. 529, 555, 575; Werkz.-Masch. Bd. 22, S. 87, 111, 205. 1918.
13. Präzis. Bd. 2, S. 123. 1923.
14. Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 32, S. 41. 1924.
15. Mitt. N. D. I. Bd. 10, S. 94. 1927.
16. Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 69, S. 123E. 1928.

#### 4. Tiefenmaße.

1. Werkst.-Techn. Bd. 21, S. 598. 1927.

#### 5. Höhenreißer.

1. Kesper, F.: Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 35, S. 65. 1927.
2. Krupp A.G.: Kruppsche Monatsh. Bd. 1, S. 27. 1920.

#### 6. Keillehren.

1. Daschmann, P.: D. R. P. Anm.
2. Kurrein, M.: Werkst.-Techn. Bd. 14, S. 320. 1920.
3. Woodworth, J. V.: Gages and Gaging Systems, 1908.
4. Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 34, S. 225. 1926.

### B. Fühlhebel.

#### 1. Einfache Fühlhebel.

1. Buxbaum, B.: D. Entwicklungsgrundzüge d. spanabhebenden Metallbearbeitungstechnik im 18. u. 19. Jahrh. Berlin 1920.
2. Creuzburg, R.: D. R. P. Anm., Kl. 42b, C 28019.
3. Daimler Motoren A.G.: D. R. G. M. Anm., Kl. 42b, Nr. 794398.
4. Feldhaus, F. M.: Werkz.-Masch. Bd. 26, S. 246. 1922.
5. Wahlgren, A.: Machinery. Bd. 31, S. 830. 1925.
6. Werkst.-Techn. Bd. 14, S. 112. 1920.

#### 2. Mehrfache Fühlhebel.

1. Berndt, G.: Werkst.-Techn. Bd. 15, S. 347. 1921.
2. — Betrieb Bd. 1, S. 471. 1922.
3. Société Genevoise d'Instruments de Physique, Katalog.

## 3. Meßuhren.

1. Bartholdy, M.: Persönliche Mitteilung.
2. Büttner, C.: Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 35, S. 61. 1927.
3. Gribben, W.: Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 31, S. 551. 1915.
4. Houston, P. L. u. D. R. Miller: Technol. Pap. Bur. of Stand. 1922, Nr. 17.
5. Siebel, E. u. F. Körber: Mitt. Eisenforsch. z. Düsseldorf Bd. 7, S. 113. 1925.
6. Zeiß, C.: D. R. P., Kl. 42b, Nr. 424152, vom 14. V. 1924.
7. Dingler Bd. 74, S. 49, 150. 1893.
8. Engg. Bd. 113, S. 55. 1922.
9. Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 62, S. 555. 1925.
10. Engg. Bd. 120, S. 259. 1925.
11. Machinery Bd. 31, S. 583. 1925.
12. Werkst.-Techn. Bd. 19, S. 428. 1925.

## 4. Feinzeiger und Passameter.

1. Capstan, Engg. Bd. 111, S. 322. 1921.
  2. Kühn, W.: Präzision, Bd. 2, S. 34. 1923.
  3. — Werkst.-Techn. Bd. 19, S. 298. 1925.
  4. Wahlgren, A.: Machinery Bd. 31, S. 830. 1925.
  5. Machinery Bd. 31, S. 1010. 1925.
5. Fühlhebel mit Schneidenlagerung (Verkürzung des kleinen Hebelarms).
    1. Bartholdy, M.: Kruppsche Monatsh. Bd. 6, S. 202. 1925.
    2. Fortuna-Werke: D. R. P., Kl. 42b, Nr. 354175, 378277, 385977.
    3. Holde, F. u. R. Schachenmeyer: Z. techn. Phys. B. 7, S. 484. 1926.
    4. Krupp-A.G.: D. R. G. M., Kl. 42b, Nr. 833042, vom 5. XII. 1919.
    5. Nat. Physic. Labor., Report f. the year 1924.
    6. Norton, F. H.: Rep. Nr. 94 Nat. Advisory Com. of Aeronautics. Washington 1920.
    7. Pfeleiderer: Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 32, S. 38. 1924.
    8. — Meßtechnik. Bd. 1, S. 54. 1925.
    9. Webster, A.: Machinery Bd. 31, S. 899. 1925.
    10. Präzision Bd. 2, S. 46. 1923.
    11. Werkst.-Techn. Bd. 19, S. 226. 1925.

## 6. Sonderkonstruktionen.

1. Atkins, H. F.: Z. prakt. Masch.-Bau 1911, S. 1444.
2. Bernlöhr, P.: Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 33, S. 81. 1925; Werkst.-Techn. Bd. 19, S. 578. 1925.
- 2a. Böttcher, K.: Z. Instrumentenk. Bd. 48, S. 116, 178. 1928.
3. Deutsche Waffen- u. Munitionsfabrik: D. R. P., Kl. 42b, Nr. 276611.
4. Martens, A.: Handb. Materialkunde f. d. Masch.-Bau I, S. 435ff. Berlin 1898.
5. Rohmann, H.: Phys. Z. Bd. 21, S. 417. 1921.

## 7. Minimometer und Mikrotast, Gestaltung.

1. Bartholdy, M.: Kruppsche Monatsh. Bd. 7, S. 115. 1926.
- 1a. — Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 35, S. 250. 1927.
- 1b. — Werkst.-Techn. Bd. 22, S. 118. 1928.
2. Herb, Ch. O.: Machinery Bd. 33, S. 185. 1926.
- 2a. Nat. Physic. Labor., Report f. the year 1927. Engg. Bd. 126, S. 205. 1928.
3. Pfeleiderer: Präzision Bd. 2, S. 213. 1923.
4. — Masch.-Bau Bd. 5, S. 74. 1926.
- 4a. Tomlinson, G. A.: Proc. Opt. Conv. London 1926 Part I, S. 311.
5. Präzision Bd. 1, S. 395. 1922.
6. Werkst.-Techn. Bd. 19, S. 867. 1925.
7. Instruments Bd. 1, S. 421. 1928.

## 8. Optische Fühlhebel (Verlängerung des großen Hebelarms).

- 1a. Bochmann, H.: Diss. Dresden 1927.
1. Bond, G. M.: J. Frankl. Inst. Bd. 67, S. 281, 357. 1884.
2. Eden, G. M.: Engg. Bd. 108, S. 33. 1919 (Z. Instrumentenk. Bd. 40, S. 61. 1920).
3. Fennel, O.: Z. Instrumentenk. Bd. 42, S. 283. 1922.
4. Göpel, F.: Werkst.-Techn. Bd. 14, S. 625. 1920.
5. Nat. Physic. Labor., Engg. Bd. 118, S. 128. 1924.
- 5a. Oelschläger, J.: Werkst.-Techn. Bd. 22, S. 267. 1928.
6. Sears, J. E.: Engg. Bd. 121, S. 652. 1926.

7. Steinheil: Münch. Ber. 1863, I, S. 329.
8. Whibley, R. J.: Machinery Bd. 27, S. 242. 1920.
9. Engg. Bd. 120, S. 447. 1925.
10. Engg. Bd. 124, S. 577. 1927.
11. Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 68, S. 123 E. 1928.
12. Instruments Bd. 1, S. 257. 1928.

#### 9. Interferenz- und Libellenfühlhebel.

1. Buxbaum, B.: D. Entwicklungsgrundzüge d. spanabhebenden Metallbearbeitungstechnik im 18. u. 19. Jahrh. Berlin 1920.
2. Hartmann, A.: Comptes Rendus Bd. 120, S. 1024. 1895.
3. Löwenherz, L.: Ber. über wiss. Instr. a. d. Berl. Gewerbe-Ausstellung 1879. Berlin 1880.
- 3a. Lüdemann, K.: Z. Instrumentenk. Bd. 48, S. 31. 1928.
4. Nat. Physic. Labor., Report f. the year 1921.
5. — Engg. Bd. 114, S. 230. 1922.
6. Wanach, B.: Z. Instrumentenk. Bd. 46, S. 221. 1926.
7. Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 59, S. 14 E. 1923.

#### 10. Meßdose.

1. Kurrein, M.: Werkst.-Techn. Bd. 10, S. 193. 1915.
2. Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 66, S. 101 E. 1927.

#### 11. Innenfühlhebel, Konstruktionsgrundlagen.

1. Bartholdy, M.: Präzision, Bd. 1, S. 4. 1922.
2. Berndt, G.: Glasers Ann. Bd. 90, S. 103. 1922.
3. Crain, R.: Werkst.-Techn. Bd. 5, S. 337, 429, 461, 505, 565, 626, 712. 1911.
4. Fortuna-Werke: D. R. P., Kl. 42 b, Nr. 314502; Betrieb, Bd. 2, S. 408. 1920.
5. Pfeleiderer: Glasers Ann. Bd. 92, S. 79. 1923.

#### 12. Innenfühlhebel, Ausführungen.

1. Bartholdy, M.: Präzision Bd. 1, S. 4. 1922.
2. — Kruppsche Monatsh., Bd. 6, S. 218, 239. 1925; Bd. 7, Juli 1926.
3. Hommel-Werke: D. R. P., Kl. 42 b, Nr. 424971, vom 6. VII. 1924.
4. Velesik, J.: Werkst.-Techn. Bd. 7, S. 348. 1914.
5. Zeiß, C.: D. R. P., Kl. 42 b, Nr. 13019, vom 29. III. 1922.
6. Werkst.-Techn. Bd. 19, S. 428. 1925.
7. Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 66, S. 389. 1927.
8. Instruments Bd. 1, S. 421. 1928.

#### 13. Andere Verfahren zum Messen von Bohrungen.

1. Berndt, G.: Glasers Ann. Bd. 90, S. 103. 1922.
2. Brandt, Th.: Betrieb Bd. 1, S. 371. 1919.
3. Sears, J. E.: J. Roy. Soc. of Arts Bd. 71, S. 293, 819. 1923.
4. Tomlinson, G. A.: Engg. Bd. 112, S. 558. 1921.
5. Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 55, S. 516. 1921.
6. Machinery Bd. 31, S. 451. 1925.
7. Machinery Bd. 32, S. 76. 1925.

#### 14. Beispiele für die Verwendung von Fühlhebeln.

- 1α. Bartholdy, M.: Werkst.-Techn. Bd. 22, S. 118. 1928.
- 1β. Damm, Th.: Werkst.-Techn. Bd. 22, S. 115. 1928.
1. Gerdien, H. u. W. Jubitz: Wiss. Veröff. a. d. Siemens-Konzern Bd. 4, S. 59. 1925.
- 1a. Grothkopp, W.: Prospekt (DRP).
2. Holtsema, C.: Dt. Mech.-Zg. 1904, S. 43.
3. Kleinschmidt, B.: Schleifindustrie Kal. 1927, S. 94.
4. Zensky, B.: Z. Instrumentenk. Bd. 1, S. 51. 1881.
- 4a. Preger, E.: Masch.-Bau Bd. 7, S. 453. 1928.
- 4b. Schlesinger, G.: Prüfbuch für Werkzeugmaschinen. Berlin 1927. Werkst.-Techn. Bd. 21, S. 577, 643. 1927.
5. Wilde, H.: Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 34, S. 186. 1926.
6. Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 66, S. 129 E. 1927.
7. Loewe Not. Bd. 13, S. 31. 1928.
8. Werkst.-Techn. Bd. 22, S. 487. 1928.
9. Werkst.-Techn. Bd. 22, S. 512. 1928.

**C. Schraublehren.**

## 1. Ausführung.

1. Burlingame, L. D.: Machinery Bd. 21, S. 777. 1915.
2. Buxbaum, B.: D. Entwicklungsgrundzüge d. spanabhebenden Metallbearbeitungstechnik im 18. u. 19. Jahrh. Berlin 1920.
3. Engelmann, M.: Arch. Gesch. d. Math., d. Naturwiss. u. d. Techn. Bd. 10, S. 294. 1927.
4. Feldhaus, F. M.: Werkz.-Masch. Bd. 26, S. 246. 1922.
5. Matschoß, C.: Z. V. d. I. Bd. 56, S. 339. 1912.
6. Slocomb: Am. Mach. (Europ. Ed.) 5 VI. 1920.
7. Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 30 I, S. 351. 1907.
8. Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 62, S. 832. 1925.
9. Machinery Bd. 32, S. 161. 1925.
10. Engg. Bd. 121, S. 60. 1926.

## 2. Abnutzung und Meßdruck.

1. Berndt, G.: Betrieb Bd. 2, S. 46. 1919.
2. — Betrieb Bd. 4, S. 574. 1921.
3. Czapski, S.: Z. Instrumentenk. Bd. 7, S. 296. 1887.
4. Dähne, O.: Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 33, S. 93. 1925.
5. Eppenstein, O.: Masch.-Bau Bd. 4, S. 1036. 1925.
6. Friedrich, K.: Z. Instrumentenk. Bd. 12, S. 50. 1892.
7. Himoff, M.: Z. prakt. Masch.-Bau 1911, S. 337.
8. Hommel-Werke: D. R. P.
9. Koch, K. R.: Ann. Physik, N. F. Bd. 3, S. 611. 1878.
10. Martens, A.: Handb. Materialienk. f. d. Masch.-Bau I, S. 435 ff. Berlin 1898.
11. Nat. Phys. Labor., Engg. Bd. 115, S. 155. 1923.
12. Rudge-Whitworth: Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 54, S. 69 E. 1921.
13. Schröder, R. P.: Betrieb Bd. 3, S. 97. 1920.
14. Shelley, C. B. R.: Workshop Appliances. London 1873.
15. Machinery Bd. 13, S. 342. 1907.
16. Am. Mach. (Europ. Ed.) 1911, S. 282.
17. Werkst.-Techn. 1919, II. Sonderheft, S. 19.

## 3. Schraubenfehler und Parallelität der Meßflächen.

1. Berndt, G.: Präzision Bd. 1, S. 471. 1922.
2. — Betrieb Bd. 4, S. 281. 1922.
3. — Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 35, S. 245. 1927.
4. Eppenstein, O.: Präzision Bd. 1, S. 120. 1922.
5. Hubbell, C. A.: Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 53, S. 209. 1920.
6. Keil, E.: Z. Instrumentenk. Bd. 28, S. 243. 1908.
7. Kienzle, O.: Werkst.-Techn. Bd. 14, S. 426, 442. 1920.
8. Knorre, V.: Z. Instrumentenk. Bd. 1, S. 213. 1881.
9. Koch, K. R.: Ber. Naturforsch.-Ges. Freiburg Bd. 8, S. 23. 1882.
10. Repsold, A.: Z. Instrumentenk. Bd. 1, S. 282. 1881.
11. — Z. Instrumentenk. Bd. 45, S. 276. 1925.
12. Reuleaux, F.: Verh. Ver. z. Beförd. d. Gewerbefleißes 1894, S. 142, 187, 225.
13. Schlesinger, G.: Forsch.-Arb. Ing. Heft 193/4.
14. Shaw, P. E.: Proc. Roy. Soc. Bd. 77, S. 340, 1906; Engg. Bd. 81, S. 865. 1906.
15. Sheldon, E.: Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 55, S. 562. 1921.
- 15a. Twyman, F. u. J. H. Dowell Proc. Opt. Conv. London 1926, Part. I, S. 50.
16. Vogel, H. C.: Z. Instrumentenk. Bd. 1, S. 391. 1881.
17. Zeiß, C.: D. R. P., Kl. 42b, Nr. 362918.
18. Engg. Bd. 108, S. 104. 1919.

## 4. Ausführungsformen von Schraublehren für Außenmessungen.

- 1a. Hagen, P.: Instr. World Bd. 1, S. 141. 1928.
1. Hanson, B. M. W.: Machinery Bd. 27, S. 657. 1921.
2. Hinz, G.: Betrieb Bd. 2, S. 228, 1920; Werkst.-Techn. Bd. 14, S. 121, 1920; Z. Masch.-Bau 1920, S. 230.
3. Inou: Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 26, S. 1402. 1903.
4. Junghans: D. R. G. M., Kl. 42b, Nr. 762452.
5. Kugler, Ch.: Machinery Bd. 32, S. 403. 1926.

6. Lang, Ch.: D. R. P. Anm., Kl. 42b, Nr. 53593.
7. Nat. Physic. Labor., Engg. Bd. 117, S. 773. 1924.
8. Rowell, H. S.: J. Sc. Instr. Bd. 2, S. 17. 1924.
9. Schmierer, E.: Z. Masch.-Bau 1920, S. 276.
10. Stock, R. u. Co.: Z. prakt. Masch.-Bau, 1914, S. 32.
11. Werner, M. u. O. Nasemann: D. R. P. Anm., Kl. 42b, Nr. 61053.
12. Wilde, H.: Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 34, S. 2. 1926.
13. Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 52, S. 969. 1920.
14. Z. Masch.-Bau Bd. 9, S. 45. 1920.
15. Machinery Bd. 29, S. 68. 1922.
16. Engg. Bd. 116, S. 174. 1923.
17. Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 62, S. 861. 1925.

#### 5. Innenschraublehren.

1. Burlingame, L. D.: Machinery Bd. 21, S. 777. 1915.
2. Haase, A.: D.R.P., Kl. 42b, Nr. 351161.
3. Hommel-Werke: D. R. P., Kl. 42b, Nr. 376369.
4. Sautter u. Meßner: Z. Instrumentenk. Bd. 12, S. 112. 1892.

### D. Meßmaschinen.

#### 1. Endmaßmeßmaschinen, Bett und Führung.

1. Berndt, G.: Z. Feinmech. u. Präz., Bd. 35, S. 279, 295. 1927.
2. — Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 35, S. 245. 1927.
3. Goodeve, T. M. u. C. B. P. Shelley: Die Meßmaschine von Whitworth, deutsch von M. Schröter. Jena 1879.
4. Mütze, K.: Diss. Techn. Hochschule Dresden. 1928.
5. Nat. Physic. Labor., Engg. Bd. 114, S. 212. 1922.
6. Whitworth, J.: Papers on Mechanical Subjects, Part I. London 1882.
7. Engg. Bd. 110, S. 366, 400. 1920.
8. Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 65, S. 930. 1927.

#### 2. Endmaßmeßmaschinen, Spindelköpfe.

1. Golden, A.: Machinery Bd. 27, S. 258. 1920.
2. Leman, A.: Sitzber. Ver. z. Bef. d. Gewerbefleißes 1904, S. 245.
3. — Dt. Mech.-Zg. 1913 S. 33, 45.
4. Nat. Physic. Labor., Engg. Bd. 117, S. 773. 1924.
5. Pfeleiderer: Präzision Bd. I, S. 299. 1922.
6. Pregél: Dingler Bd. 75, S. 1, 35, 79. 1894.
7. Reuleaux, F.: Verh. Ver. z. Bef. d. Gewerbefleißes 1894, S. 142, 187, 225.
8. Schlesinger, G.: Forsch.-Arb. Ing. Heft 193/4.
9. Shaw, P. E.: Proc. Roy. Soc. Bd. 77, S. 340. 1906; Engg. Bd. 81, S. 865. 1906.
10. Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 26, S. 964. 1903.
11. Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 28, S. 734. 1905.
12. Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 53, S. 51. 1920.
13. Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 61 II, S. 521. 1924.

#### 3. Endmaßmeßmaschinen, Meßdruckanzeiger.

1. Baker, H.: Engg. Bd. 134, S. 81. 1922.
2. Berndt, G.: Betrieb Bd. 4, S. 280. 1921.
3. Breithaupt, W.: Z. Instrumentenk. Bd. 33, S. 226. 1913.
4. Crain, R.: Werkst.-Techn. Bd. 5, S. 337, 429, 461, 505, 565, 626, 712. 1911.
5. Galatzin, A.: Rev. Méc. Bd. 13, S. 27. 1903.
6. Goodeve, T. M. u. C. B. P. Shelley: Die Meßmaschine von Whitworth, deutsch von H. Schröter. Jena 1879.
7. Göpel, F.: Z. Instrumentenk. Bd. 37, S. 142. 1917.
8. — Z. Instrumentenk. Bd. 39, S. 190. 1919.
9. Hommel-Werke: Werkst.-Techn. Bd. 16, S. 307. 1922.
10. Leman, A.: Sitzber. Ver. z. Bef. d. Gewerbefleißes 1896, S. 113.
11. Nat. Physic. Labor., Report f. the year 1924.
12. — Engg. Bd. 117, S. 773. 1924.
13. Pregél: Dingler Bd. 75, S. 1, 35, 79. 1894.
14. Reuleaux, F.: Verh. Ver. z. Bef. d. Gewerbefleißes 1894, S. 142, 187, 225.
15. Sautter u. Meßner: Werkst.-Techn. 1919, II. Sonderheft S. 14.

16. Shaw, P. E.: Proc. Roy. Soc. Bd. 77, S. 340. 1906; Engg. Bd. 81, S. 865. 1906.
17. Whibley, R. J.: Machinery Bd. 27, S. 242. 1920.
18. Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 26, S. 964. 1903.
19. Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 28, S. 734. 1905.
20. Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 53, S. 72. 1920.
21. Engg. Bd. 110, S. 366, 400. 1920.
22. Mitt. betriebstechn. Abtlg. Bd. 3, S. 133. 1921.
23. Werkst.-Techn. 1923, S. 116.
24. Werkz.-Masch. Bd. 27, S. 155. 1923.
25. Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 61 II, S. 521. 1924.

#### 4. Endmaßmeßmaschinen, Ausführungsformen.

1. Göpel, F.: Z. Instrumentenk. Bd. 32, S. 229. 1912; Bd. 34, S. 180. 1914.
- 1a. Guillaume, Ch. Ed.: La création d. BIPM et son œuvre 1927.
2. Hartmann, A.: Comptes Rendus Bd. 120, S. 1024. 1895.
3. Herbert, A.: Accurate measurements and its commercial value. 1. Edit. 1924; Interchangeable threaded work, 3. Edit. 1924.
4. van der Kerehove: Engg. Bd. 58, S. 696. 1914.
5. Moon, Ch.: J. Opt. Soc. Amer. Bd. 11, S. 453. 1925.
6. Pérard, A.: Trav. et Mém. BIPM Bd. 15. 1913.
7. Machinery Bd. 31, S. 387. 1925.
8. Werkst.-Techn. Bd. 20, S. 37. 1926.

#### 5. Strichmaßmeßmaschinen.

1. Crain, R.: Werkst.-Techn. Bd. 5, S. 337, 429, 461, 505, 565, 626, 712. 1911.
2. Göpel, F.: Dt. Mech.-Z. 1910, S. 1.
3. Kurtz, H. F.: Mech. Engg. Bd. 47, S. 987. 1925.
4. Nat. Physic. Labor., Engg. Bd. 117, S. 773. 1924.
5. Pulfrich, C.: Z. Instrumentenk. Bd. 12, S. 307. 1892.
6. Reuleaux, F.: Verh. Ver. z. Bef. d. Gewerbefleißes 1894, S. 142, 187, 225.
7. Sautter u. Meßner: Z. prakt. Masch.-Bau 1914, S. 323.
8. Wilde, H.: Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 34, S. 265. 1926.
9. Zeiß, C.: D.R.P. Anm., Kl. 42 b, Nr. 12199.
10. — D.R.P., Kl. 42 b, Nr. 390026.
11. — D.R.G.M., Kl. 42 b, Nr. 805 352.
- 11a. — Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 69, S. 561. 1918.
12. Z. Masch.-Bau Bd. 8, S. 42. 1919.
13. Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 64, S. 177. 1926.
14. Machinery Bd. 32, S. 695. 1926.

#### 6. Auflagetische.

1. Göpel, F.: Dt. Mech.-Zg. 1910, S. 1.
2. Nat. Physic. Labor., Report f. the year 1922.

#### 7. Schraubenmeßmaschinen.

1. Anderson: Engg. Bd. 100, S. 642. 1915.
2. Bopp, F. H.: Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 34, S. 123. 1926.
- 2a. Dowell, J. H.: Proc. Opt. Conv., London 1926, part. II, S. 991.
3. Göpel, F.: Z. Instrumentenk. Bd. 35, S. 11. 1915.
4. Kayser, H.: Handb. Spektroskopie Bd. 1, S. 407ff. Leipzig 1900.
5. — Handb. Spektroskopie Bd. 1, S. 644ff. Leipzig 1900.
6. Liddell, D. M.: Z. prakt. Masch.-Bau 1914, S. 1037, 1067.
7. Scheel, K.: Z. Instrumentenk. Bd. 16, S. 321. 1896.
8. Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 64, S. 177. 1926.
9. Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 65, S. 930. 1927.
10. Machinery Bd. 33, S. 310. 1927.
11. Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 66, S. 1112. 1927.
12. Werkst.-Techn. Bd. 22, S. 201. 1928.
13. Instruments Bd. 1, S. 419. 1928.
14. Instruments Bd. 1, S. 425. 1928.

**V. Feste Lehren (Meßgeräte ohne Maßanzeige).****A. Normallehren.****1. Blech- und Drahtlehren.**

1. Feldhaus, F. M.: Werkz.-Masch. Bd. 26, S. 246. 1922.
2. Schuchardt u. Schütte: Techn. Hilfsbuch, 6. Aufl. Berlin 1923.

**2. Normallehrdorn und -ring.**

1. Bath, J.: Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 54, S. 1112. 1921.
2. Berndt, G.: Präzision Bd. 2, S. 210. 1923; Z. Feinmech. u. Präzision Bd. 32, S. 75. 1924.
3. — Festschr. „Rohe Schrauben“ der Bauer u. Schaurte AG. 1926.
4. Kienzle, O.: Betrieb Bd. 2, S. 420. 1920.
5. Kühn, W.: Toleranzen. Berlin 1920.
6. Nat. Phys. Labor., Engg. Bd. 112, S. 150. 1921.
7. Reindl, J.: Masch.-Bau Bd. 4, S. 1230. 1925.
8. Schlesinger, G.: Forsch.-Arb. Ing., 1917, Heft 193/4.
9. Sears, J.: Engg. Bd. 121, S. 652. 1926.
10. Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 54, S. 133 E. 1921.
11. Mitt. N. D. I. Bd. 8, S. 969. 1925.

**B. Grenzlehren, grundsätzliche Betrachtungen.****1. Das Messen mit Grenzlehren.**

1. Bartholdy, M.: Persönl. Mitt.
2. Berndt, G.: Betrieb Bd. 2, S. 365. 1920.
3. — Loewe Not. Bd. 6, Augustheft 1921.
4. — Präzision Bd. 2, S. 210. 1923; Z. Feinmech. u. Präzision. Bd. 32, S. 75. 1924.
5. — Masch.-Bau Bd. 4, S. 567. 1925.
6. — Festschr. „Rohe Schrauben“ der Bauer u. Schaurte AG. 1926.
7. Damm, Th.: Masch.-Bau Bd. 6, S. 761. 1927.
8. Feldhaus, F. M.: Werkz.-Masch. Bd. 26, S. 246. 1922.
9. Füssgen, P.: Masch.-Bau Bd. 2, S. 319. 1923.
10. Gohlke, M.: Masch.-Bau Bd. 2, S. 39. 1922; Bd. 2, S. 319. 1923.
- 10a. Gramenz, K.: Masch.-Bau Bd. 7, S. 1036ff. 1928.
11. Kienzle, O.: Betrieb Bd. 2, S. 142. 1920.
12. — Betrieb Bd. 2, S. 420. 1920.
13. Kirner, J.: Masch.-Bau Bd. 1, S. 459. 1922.
14. Simon, E.: Mitt. N. D. I. Bd. 4, S. 380. 1921.
15. Woodworth, J. V.: Gages and Gaging Systems. 1908.
16. Mitt. betriebstechn. Abtlg. Bd. 3, S. 133. 1921.
17. Misc. Publ. Bur. of Stand. Nr. 75.

**2. Herstellungsgenauigkeit und Abnutzung der Grenzlehren.**

1. Berndt, G.: Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 35, S. 245. 1927.
2. Dixie, A.: Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 53, S. 453. 1920.
3. Keuren, H. L. van: Machinery Bd. 27, S. 902. 1921; Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 54, S. 751. 1921.

**3. Prüflehren.**

1. Bartholdy, B.: Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 34, S. 4. 1926; Kruppsche Monatsh., März 1926.
2. Crain, R.: Werkst.-Techn. Bd. 5, S. 337, 429, 466, 505, 565, 626, 712. 1911.
3. Kleinschmidt, B.: Schleifindustrie Kalender 1927, S. 83.
4. Lehmann: Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 33, S. 176. 1925; Werkst.-Techn. Bd. 19, S. 537. 1925.

**4. Normung der Arbeits-, Abnahme- und Prüflehren.**

1. Hommel-Werke: D.R.P., D.R.G.M.
2. Johansson: Werkst.-Techn. Bd. 12, S. 20. 1918.
3. Keuren, H. L. van: Machinery Bd. 27, S. 902. 1921; Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 54, S. 751. 1921.
4. Keuren, H. L. van: Machinery Bd. 31, S. 835. 1925.
5. Pierce, H. S.: Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 61, S. 783. 1924.
6. Schröder, R. P.: Persönl. Mitt.

7. Windhoff, H.: Betrieb Bd. 3, S. 32. 1920; D.R.P., Kl. 42b, Nr. 322052.
8. Mitt. N. D. I. Bd. 8, S. 967ff. 1925.
9. Mitt. N. D. I. Bd. 11, S. 292. 1928.

### C. Ausführungsformen der Grenzlehren.

#### 1. Wellenlehren.

- 1a. Barnden, J.: Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 66, S. 316 E. 1927.
1. Busse, K.: Betrieb Bd. 3, S. 56. 1920; D.R.P., Kl. 42b, Nr. 321742.
2. Carstens, A.: D.R.G.M., Kl. 42b, Nr. 724389.
3. Chubb, J. W.: Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 34, S. 239. 1911.
4. Conrad, R.: D.R.G.M., Kl. 42b, Nr. 224150, 224735, 224736.
5. Conway, J. B.: Machinery, Bd. 28, S. 556. 1922.
6. Crain, R.: Werkst.-Techn. Bd. 5, S. 337, 429, 466, 505, 565, 626, 712. 1911.
7. — Masch.-Bau Bd. 3, S. 349. 1925.
8. Creager, E. F.: Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 62, S. 547. 1925.
9. Damm, Th.: Masch.-Bau Bd. 6, S. 761. 1927.
10. Darbyshire, H.: Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 55, S. 104 E. 1921.
11. Hackbarth, K.: D.R.P. Anm.
12. Hensel, F.: D.R.P. Anm., Kl. 42b, Nr. 84689.
13. Herbert, A.: Interchangeable Threaded Work, 3. Edit., 1924.
14. Krug, C.: Betrieb Bd. 2, S. 32. 1919.
15. Krupp A.G.: D.R.P., Kl. 42b, Nr. 348421.
16. Kühn, W.: Toleranzen. Berlin 1920.
17. Leue, C.: D.R.G.M., Kl. 42b, Nr. 705248.
18. Liechtenstein, S. u. K. Plötz: Betrieb Bd. 2, S. 55. 1919.
- 18a. Mauser-Werke, Prospekt.
19. Pocher, O.: D.R.G.M., Kl. 42b, Nr. 705248.
20. Pollard, A. F. C.: The Mechanical Design of Scientific Instruments, 1922; Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 32, S. 11, 23, 33, 51, 61. 1924.
21. Ruppert, F.: Z. V. d. I. Bd. 56, S. 1490. 1922.
22. Sandoz-Martin, Ch.: Werkst.-Techn. Bd. 5, S. 386. 1911.
23. Schlesinger, G.: Werkst.-Techn. Bd. 19, S. 1. 1925.
24. Schwarz, B.: Z. prakt. Masch.-Bau 1914, S. 427.
25. Turner, C. M.: Z. prakt. Masch.-Bau 1912, S. 49.
26. Wagner, R.: Machinery, Bd. 31, S. 818. 1925.
27. Woodworth, J. V.: Gages and Gaging-Systems. 1908.
28. Werkst.-Techn. Bd. 11, S. 195. 1917.
29. Z. Masch.-Bau Bd. 8, S. 12. 1919.
30. Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 53, S. 94 E. 1920.
31. Engg. Bd. 110, S. 551. 1920 u. 27. 1. 1922.
32. Z. Masch.-Bau Bd. 9, S. 14. 1920.
33. Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 32, S. 101. 1924.
34. Loewe Not. Bd. 13, S. 62. 1928.

#### 2. Bohrungslehren.

1. Adams, H. G.: Z. prakt. Masch.-Bau, 1914, S. 560.
- 1a. Barnden, J.: Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 67, S. 176 E. 1927 und die daran anschließende Diskussion von Gigli (S. 191 E), Glasgow (S. 192 E), Woodhams (S. 192 E), Bailey (S. 192 E), Lines (S. 208 E), Bonsall (S. 212 E), George (S. 217 E), Henry (S. 220 E), Gordon-Sale (S. 220 E), Jensen (S. 221 E), Guyler (S. 238 E), Barnden (S. 243 E), Vose (S. 247 E), Muirhead (S. 272 E), Buston, Griffiths u. Co. (S. 301 E).
2. Bath, J.: Machinery Bd. 27, S. 795. 1921.
3. Crain, R.: Masch.-Bau Bd. 3, S. 349. 1924.
4. Damm, Th.: Masch.-Bau, Bd. 6, S. 761. 1927.
5. Darbyshire, H.: Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 55, S. 104 E. 1921.
6. Grocock: Masch.-Bau Bd. 6, S. 32. 1927.
7. Hanemann, G. C.: Machinery Bd. 29, S. 396. 1923.
8. Hommel-Werke: D.R.P. Anm., Kl. 42b, Nr. 82819.
9. Keuren, H. L. van: Machinery Bd. 31, S. 835. 1925.
10. KiENZLE, O.: Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 2, S. 255. 1923.
11. Krupp A. G.: D.R.P., Kl. 42b, Nr. 384098.
12. Kühn, W.: Toleranzen. Berlin 1920.
13. Pohl, K.: D.R.P., Kl. 42b, Nr. 356448.
14. Schlesinger, G.: Werkst.-Techn. Bd. 19, S. 1. 1925.

15. Zühle, F. u. K. Ring: Werkst.-Techn. Bd. 8, S. 502. 1914.
16. Machinery Bd. 26, S. 986. 1920.
17. Stock Z. 1928, S. 12.

#### D. Lineale, Touchier- und Anreißplatten.

1. Bartholdy, M.: Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 35, S. 32. 1927.
2. Berndt, G.: Werkst.-Techn. Bd. 22, S. 593. 1928.
3. Bopp, F. H.: Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 34, S. 111. 1926.
4. Ewald, W.: Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 34, S. 173. 1926; DOW 1926, S. 466.
5. Godfrey, J. R.: Am. Mach. (Europ. Ed.) Bd. 65, S. 1059. 1927.
6. Mackensen, O.: Werkst.-Techn. Bd. 20, S. 256. 1926.
7. Nat. Physic. Labor., Engg. Bd. 118, S. 128. 1924.
8. Nat. Physic. Labor., Report f. the year 1926.
9. Preger E.: Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 34, S. 241, 253. 1926.
10. — Werkzeugmach. Bd. 32, S. 361. 1928.
- 10a. Sachsenberg, Osenberg u. Gruner: Z. V. d. I. Bd. 71, S. 1609. 1927.
11. Schulz, H.: DOW Bd. 7, S. 894. 1921.
12. Staeger, F.: Werkst.-Techn. Bd. 20, S. 290. 1926; Z. Feinmech. u. Präz. Bd. 34, S. 162. 1926; DOW 1926, S. 441.
13. Whitworth, J.: Papers on Mechanical Subjects, Part I. London 1882.
14. Z. prakt. Masch.-Bau 1913, S. 839.

### Anhang.

#### A. Physiologische Fehler.

1. Ames, A. u. C. A. Preston: J. Opt. Soc. Amer. Bd. 5, S. 22. 1921.
2. Bourdon, La perception de l'espace. Paris 1903.
3. Dorst, F. I.: Z. Instrumentenk. Bd. 6, S. 383. 1886.
4. Förster, W.: Proc. Verb. d. Séances d. Com. IPM. 1878, S. 227.
5. Hofe, Ch. v.: Z. techn. Phys. Bd. 1, S. 95. 1920.
6. Kritzinger, H. H.: Sirius Bd. 48, S. 3, 35. 1915.
- 6a. Kühl, A.: Z. ophthalm. Optik Bd. 14, S. 129. 1927.
7. Labitzke, P.: Diss. Göttingen 1914.
- 7a. Löhle, F.: Z. f. Phys. Bd. 48, S. 80. 1928.
8. Lüdemann, H.: Z. Instrumentenk. Bd. 42, S. 285. 1922; Bd. 43, S. 33, 113. 1923 (hier auch weitere Literaturangaben).
9. Martin, L. C.: Proc. Opt. Conv. London, 1926, Part. 1, S. 166.
10. Michelson: J. Opt. Soc. Amer. Bd. 8, S. 321. 1924.
11. Reinhertz, J.: Nova Acta K. Leop. Karol. Akad. Bd. 57, Nr. 2. 1893/94.
12. Renqvist: Arch. Physiol. Bd. 42, S. 209. 1922.
13. Schottländer: Z. Instrumentenk. Bd. 43, S. 265. 1923.
14. Schulz, H.: Centralzg. Optik u. Mech. 1919, Nr. 31.
15. — Dt. opt. Wochenschr. Bd. 8, S. 230. 1922.
16. — Präz. Bd. 1, S. 296. 1922.
17. Whippley, R. S.: Engg. Bd. 111, S. 659. 1921.
18. Wülfing, E.: Z. Biol. Bd. 11, S. 199. 1892.

#### Lehrbücher:

- Helmholtz, H. v.: Handb. d. physiol. Optik. Hamburg 1911.  
 Hofe, Ch. v.: Fernoptik. 2. Aufl. Leipzig 1921.  
 Hofmann, F. B.: Die Lehre vom Raumsinn des Auges. Berlin 1920.  
 König, A.: Die Fernrohre und Entfernungsmesser. Berlin 1923.  
 Martin, L. C.: Optical Measuring Instruments. London 1924.  
 Schulz, H.: Das Sehen. Stuttgart 1920.  
 Tuttle, L. u. J. Satterly: The Theory of Measurements. London 1925.

#### B. Die Zurückführung des Meters auf die Wellenlänge des Lichtes.

1. Benoît, R., A. Fabry u. Ch. Perot: Comptes Rendus Bd. 144, S. 1082. 1907; Trav. et Mém. BIPM. Bd. 15, S. 131. 1913.
2. Chappuis, P.: Trav. et Mém. BIPM. Bd. 14. 1910.
3. Culman, P.: Z. Instrumentenk. Bd. 22, S. 293. 1902.
4. Goos, H.: Z. wiss. Phot. Bd. 10, S. 200. 1910; Bd. 11, S. 305. 1912; Z. Instrumentenk. Bd. 32, S. 326. 1912.
- 4a. Guillaume, Ch. Ed.: La création d. BIPM. et son œuvre 1927.

5. John, St. u. Ware: *Astrophys. J.* Bd. 36, S. 14. 1912.
6. Koch, P. P.: *Z. Instrumentenk.* Bd. 31, S. 378. 1911.
7. Kühl, A.: *Phys. Z.* Bd. 29, S. 1. 1928.
8. Lépinay, Macé de: *Comptes Rendus* Bd. 134, S. 898. 1902.
9. — u. H. Buisson: *Comptes Rendus* Bd. 135, S. 283. 1902.
10. Meggers, W. F. u. C. C. Kiess: *Scient. Pap. Bur. of Stand.* 1924, Nr. 479.
11. — u. K. Burns: *Scient. Pap. Bur. of Stand.* 1924 Nr. 478; *J. Opt. Soc. Am.* Bd. 5, S. 308. 1921.
12. Michelson, A.: *Trav. et Mém. BIPM.* Bd. 11, 1895, Anhang III.
13. — *Astrophys. J.* Bd. 18, S. 278. 1903; *Proc. Nat. Acad.* Bd. 6, S. 473. 1920.
14. — u. R. Benoît: *Trav. et Mém. BIPM.* Bd. 11, S. 40. 1895.
15. — u. E. Morley: *Am. J. of Science*, Bd. 38, S. 181. 1889.
- 15a. *Nat. Physic. Labor., Report f. the year 1927*, S. 146.
16. Pérard, A.: *Comptes Rendus*, Bd. 171, S. 1131. 1920; Bd. 184, S. 84. 1927; *Trav. Mém. BIPM* Bd. 17, S. 54. 1921; *Rev. d'Optique* Bd. 7, S. 1. 1928.
17. *Physik.-Techn. Reichsanstalt: Z. Instrumentenk.* Bd. 48, S. 157. 1928.
18. Rowland, H. A.: *A preliminary table of the solar spectrum.* Chicago 1898.
19. Väisälä, Y.: *Veröff. d. Finn. Geodät. Inst.* 1923, Nr. 2; *Z. Instrumentenk.* Bd. 47, S. 399. 1927.
20. Watanabe, N., O. Masaki u. M. Imaizuni, M.: *Proc. Imp. Acad. Tokyo*, Bd. 3, S. 485, 492. 1927.

## Lehrbücher:

- Drude, P.: *Lehrb. d. Optik.* Leipzig 1912.
- Gehrcke, E.: *Die Anwendung der Interferenzen.* Braunschweig 1906.
- *Handb. d. physiol. Optik.* Leipzig 1927.
- Lummer, O.: *Die Lehre von der strahlenden Energie (Optik).* Braunschweig 1926.
- Verdet, E.: *Vorlesungen über die Wellentheorie des Lichts (deutsch von K. Exner).* Braunschweig 1881 u. 1887.
-

**Die Gewinde.** Ihre Entwicklung, ihre Messung und ihre Toleranzen. Im Auftrage von Ludw. Loewe & Co. A.-G., Berlin, bearbeitet von Prof. Dr. G. Berndt, Dresden. Mit 395 Abbildungen im Text und 287 Tabellen. XVI, 657 Seiten. 1925.

Gebunden RM 36.—

Erster Nachtrag. Mit 102 Abbildungen im Text und 79 Tabellen. X, 180 Seiten. 1926.

Gebunden RM 15.75

Namen- und Sachverzeichnis. Herausgegeben auf Anregung und mit Unterstützung der Firma Bauer & Schaurte, Neuß. III, 16 Seiten. 1927.

RM 1.—

---

**Technische Winkelmessungen.** Von Prof. Dr. G. Berndt, Dresden. (Bildet Heft 18 der „Werkstattbücher“, herausgegeben von Dr.-Ing. Eugen Simon.) Mit 121 Textfiguren und 33 Zahlentafeln. 75 Seiten. 1925.

RM 2.—

---

**Maschinentechnisches Versuchswesen.** Von Prof. Dr.-Ing. A. Gramberg, Oberingenieur an den Höchster Farbwerken.

Erster Band: Technische Messungen bei Maschinenuntersuchungen und zur Betriebskontrolle. Zum Gebrauch an Maschinenlaboratorien und in der Praxis. Fünfte, vielfach erweiterte und umgearbeitete Auflage. Mit 326 Figuren im Text. XII, 565 Seiten. 1923.

Gebunden RM 18.—

Zweiter Band: Maschinenuntersuchungen und das Verhalten der Maschinen im Betriebe. Ein Handbuch für Betriebsleiter, ein Leitfaden zum Gebrauch bei Abnahmeversuchen und für den Unterricht an Maschinenlaboratorien. Dritte, verbesserte Auflage. Mit 327 Figuren im Text und auf 2 Tafeln. XVIII, 601 Seiten. 1924.

Gebunden RM 20.—

---

**Die Grenzlehre.** Von Carl Mahr, Spezialfabrik für Präzisions-Meß- und Lehr-Werkzeuge, Eßlingen a. N. Gegründet 1861. Fünfte Auflage. 99 Seiten. 1928. RM 2.80

---

**Meßtechnik.** Von Betriebsingenieur Prof. Dr. Max Kurrein, Berlin. Zweite, verbesserte Auflage. (Bildet Heft 2 der „Werkstattbücher“, herausgegeben von Dr.-Ing. Eugen Simon.) Mit 166 Textfiguren. 79 Seiten. 1923.

RM 2.—

---

**Theorie der zusammengesetzten Waagen.** Waagen mit Gewichtschale, Laufgewichtswaagen, Neigungswaagen, Balkenwaagen, Brückenwaagen. Von Julius Zingler, Oberregierungsrat und Mitglied der Phys.-Techn. Reichsanstalt i. R. Mit 53 Textabbildungen. VIII, 203 Seiten. 1928.

RM 13.50; gebunden RM 15.—

---

**Die Arbeitsgenauigkeit der Werkzeugmaschinen. (Prüfbuch.)**

Von Prof. Dr.-Ing. G. Schlesinger, Berlin. Mit 31 Abbildungsgruppen. 40 Seiten. 1927.

Gebunden RM 6.—; durchschossen RM 7.—

---

**Der Austauschbau** und seine praktische Durchführung. Bearbeitet von zahlreichen Fachleuten. Herausgegeben von Dr.-Ing. Otto Kienzle. (Bildet Band I der „Schriften der Arbeitsgemeinschaft Deutscher Betriebsingenieure.“) Mit 319 Textabbildungen und 24 Zahlentafeln. VIII, 320 Seiten. 1923.

Gebunden RM 8.50

# Zeitschrift für Instrumentenkunde

Organ für Mitteilungen

aus dem gesamten Gebiete der wissenschaftlichen Technik

Herausgegeben unter Mitwirkung der

**Physikalisch-Technischen Reichsanstalt**

von

L. Ambronn in Göttingen, W. Breithaupt in Cassel, M. Edelmann in München, P. Guthnick in Neubabelsberg, O. Günther in Braunschweig, W. Haensch in Berlin, K. Haußmann in Schwäb.-Gmünd, C. Hensoldt in Wetzlar, W. Hildebrand in Freiberg i. S., E. Kohlschütter in Potsdam, A. Köhler in Jena, F. Löwe in Jena, H. Ludendorff in Potsdam, H. Maurer in Berlin, W. Nernst in Berlin, M. v. Rohr in Jena, W. Sartorius in Göttingen, A. Schmidt in Cöln a. Rh., R. Steinheil in München, R. Straubel in Jena, E. Warburg in Berlin, F. Weidert in Berlin, P. Werkmeister in Dresden

Schriftleitung: **F. Göpel-Charlottenburg**

Erscheint monatlich. Vierteljährlich RM 12.—. Einzelheft RM 4.80

Bis Winter 1929 erschienen 48 Jahrgänge

Die Zeitschrift erfreut sich in wissenschaftlichen und technischen Kreisen des In- und Auslandes größten Ansehens. Getreu ihrem im Jahre 1881 veröffentlichten Programm, „ausschließlich der Wiederbelebung eines engeren fruchteinbringenden Verkehrs zwischen den Vertretern der Wissenschaft und denen der mechanischen Kunst sowie der Kritik der Instrumente und Messungsmethoden“ zu dienen, pflegt die „Zeitschrift für Instrumentenkunde“ durch Veröffentlichung von Originalabhandlungen in- und ausländischer Fachleute und durch eingehende Berichte aus anderen Fachzeitschriften vor allem das Gebiet der angewandten exakten Wissenschaften. Der Wert des Inhalts wird erhöht durch vorzügliche Abbildungen und sorgfältigste drucktechnische Ausstattung.