

GIRKE - SPROCKHOFF

**PHYSIKALISCHE
SCHULVERSUCHE**

ERSTER TEIL



VOLK UND WISSEN VOLKSEIGENER VERLAG BERLIN

Physikalische Schulversuche

Ein Hilfsbuch für die Hand des Lehrers

von

Rudolf Girke und Georg Sprockhoff

ERSTER TEIL

Mechanik: Meßkunde - ~~Statik~~ fester Körper

Mit 136 ~~Ab~~ bildungen



VOLK UND WISSEN VOLKSEIGENER VERLAG BERLIN

1 9 5 1

Bestell-Nr. 6016 Preis 2,-DM (1,60 DM bei Lieferung über die Schulen)

Zweite, durchgesehene Auflage, 21.-40. Tausend

Lizenz Nr. 203-4000/51-XIV-57/51

Satz: VEB Leipziger Druckhaus, Leipzig (III/18/203)

Reprodruck: VEB Deutsche Graphische Werkstätten, Leipzig
(III/18/97)

Vorwort

Das vorliegende Heft erscheint als erster Teil eines im Entstehen begriffenen Buches, das den Physiklehrern der neuen Schule beim schulmäßigen Experimentieren eine Hilfe sein will. Es beschränkt sich auf Teile aus der Mechanik und bringt außer einem kurzen Abriß über die Selbsterstellung häufig gebrauchter physikalischer Hilfsgeräte Versuche zur Einführung in die Meßkunde und zum Verständnis der physikalischen Grundeigenschaften der Körper, vor allem aber die grundlegenden Versuche zur Statik fester Körper. Die anschließenden Teile der Mechanik und die übrigen Gebiete der Physik werden in weiteren Heften behandelt.

Das Buch ist aus langjähriger praktischer Schularbeit beider Verfasser hervorgegangen, stützt sich aber keineswegs nur auf ihre eigenen Erfahrungen. Das, was die namhaftesten Vertreter experimentellen Könnens erarbeitet haben, ist im Buch neben eigenen Beiträgen der Verfasser berücksichtigt.

Die Fülle des Stoffes zwang zu einer strengen Auswahl. Das Buch will nicht im entferntesten den Anspruch auf Vollständigkeit erheben oder den Anschein erwecken, als seien allein die dargestellten Versuche unterrichtlich wertvoll. Viele gleichwertige Versuche mußten aus Platzmangel zurückgestellt werden. Maßgebend für die Auswahl war den Verfassern nicht der Gedanke der Effekthascherei, sondern der Grundsatz, an möglichst typischen Beispielen zu zeigen, wie mit bescheidenen Mitteln durchaus überzeugende und nachhaltige Wirkungen zu erzielen sind. Neben reinen Schauversuchen werden auch für die Grundschule einfache messende Versuche in größerem Umfange, als es bisher üblich war, vorgeschlagen.

Wenn es dem Buch gelingt, auf einem begrenzten Gebiet Mittel und Wege zu zeigen, die zum Neuaufbau unserer Schule beitragen, so hat es seinen Zweck erfüllt.

DIE VERFASSER

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	9
Literatur	14

ERSTES KAPITEL: *Werkzeuge, Geräte und Werkstoffe für den Unterricht in der Mechanik*

§ 1. Fertige Hilfsmittel	15
§ 2. Selbstanzufertigende, häufig gebrauchte Hilfsgeräte	17
1. Einfache Rollen	17
2. Lagerzapfen	18
3. Scheren für Rollen	18
4. Starke Rolle	19
5. Stufenrolle	20
6. Scheibe für Drehmomente	20
7. Hebel	20
8. Leichtbeweglicher Wagen	21
9. Geschlitztes Brett	22
10. Hakengewichte	22
11. Kleine Waagschalen	23
12. Brücke für Waagschalen	23
13. Stativhaken für Schnüre	23
14. Unterstellkästen	23
15. Schraubenfedern	24
16. Einfache Stative zum Halten leichter Gegenstände	24
17. Verschiebbarer Zeiger für einen Meterstab	25

ZWEITES KAPITEL: *Maße und Messen*

§ 3. Methodische Bemerkungen	26
§ 4. Längen und Raummessungen	28
1. Einfache Längenmessungen	28
2. Messungen mit dem Spiegelmaßstab	28

3. Modellversuch zur Schieblehre	29
4. Messungen mit der Schieblehre	30
5. Modellversuch zur Mikrometerschraube	30
6. Messungen mit der Mikrometerschraube	31
7. Raummessung von Flüssigkeiten mit Hohlmaßen	31
8. Raummessung fester Körper durch Wasserverdrängung im Meßzylinder .	32
9. Raummessung fester Körper mit dem Überlaufgefäß	32
§ 5. Gewichtsbestimmungen	33
10. Wägung fester Körper	33
11. Bestimmung des Flächeninhaltes einer ebenen Figur durch Wägung	34
12. Bestimmung des Rauminhaltes eines Gefäßes durch Wägung	34
§ 6. Zeitmessungen	35
13. Zeitmessung mit der Sanduhr	35
14. Zeitmessung mit der Wasseruhr	35
15. Vergleich zwischen Sanduhr und Fadenpendel – Zeiteilung	36
16. Zeitmessung mit dem Stabpendel	36
17. Zeitmessung mit dem Metronom	36

DRITTES KAPITEL: *Physikalische Grundeigenschaften der Körper*

§ 7. Methodische Bemerkungen	37
§ 8. Rauminhalt und Gestalt	38
18. Kennzeichen des festen und flüssigen Aggregatzustandes durch Vergleich von Rauminhalt und Form	38
19. Unterscheidung des flüssigen und gasförmigen Aggregatzustandes – Ver- such mit der Knallbüchse	39
20. Gegenseitige Verdrängung fester Körper	39
21. Verdrängung von Flüssigkeiten beim Eintauchen von festen Körpern ...	40
22. Verdrängung von Flüssigkeiten durch Gase – Die Taucherglocke	40
23. Einfüllen von Wasser in eine Flasche	40
§ 9. Gewicht, Masse, Trägheit – Wichte und Dichte	41
24. Äußerungen des Gewichts	41
25. Gewicht und Wichte fester Körper	41
26. Massenvergleich zweier gleich großer Bälle mit verschiedener Füllung ...	41
27. Masse und Dichte fester Körper	42
28. Wichte und Dichte von Flüssigkeiten – Bestimmung mit dem Meßglas ...	42
29. Wichte und Dichte von Flüssigkeiten – Bestimmung mit dem Pyknometer	42

30. Gewicht der Luft – Wichte und Dichte gasförmiger Körper	43
31. Trägheit einer Walze oder einer Kugel	44
32. Trägheit eines Holzklotzes	44
33. Trägheit beim Fortziehen der Unterlage	44
34. Trägheit beim Anheben eines Körpers	45
35. Trägheit einer hängenden Kugel	45
36. Trägheit einer Flüssigkeit	46
37. Trägheit der ruhenden Luft	46
§ 10. Teilbarkeit, Porosität, Verformbarkeit	46
38. Zerkleinern eines festen Körpers	46
39. Zerstäuben einer Flüssigkeit	47
40. Ausbreitung von Gasen	47
41. Gefügemodelle zur Veranschaulichung der Teilbarkeit	47
42. Adhäsion und Kohäsion, gezeigt an einfachen Beispielen	48
43. Adhäsionsplatten	48
44. Aufnahmefähigkeit und Durchlässigkeit für Wasser, Porosität (Modell- versuche)	49
45. Gasdurchlässigkeit eines Ziegelsteines	50
46. Verformbarkeit	51

VIERTES KAPITEL: *Feste Körper in Ruhe*

§ 11. Methodische Bemerkungen	52
§ 12. Statische Kräfte – Zusammensetzung und Zerlegung von Kräften	55
47. Kraft als Ursache einer Verformung	55
48. Kraftmessung mittels einer Federwaage	55
49. Übertragung von Kräften durch ein Seil	56
50. Zusammensetzung zweier Kräfte von gleicher Richtung mit gleichem Angriffspunkt	56
51. Parallelogramm der Kräfte – Benutzung von Federwaagen	57
52. Parallelogramm der Kräfte – Benutzung von Gewichtsstücken	58
53. Zerlegung einer Kraft an waagerechter Bahn	59
54. Zerlegung einer Kraft in zwei parallele Kräfte bei vorgegebenen Angriffs- punkten	59
§ 13. Elastische Kräfte	60
55. Ableitung des Hookeschen Gesetzes an der Schraubenfeder	60
56. Bestimmen eines unbekanntes Gewichtes mit einer Schraubenfeder – Eichung einer Schraubenfeder	61

57. Elastische Dehnung einer Gummischnur	62
58. Elastische Dehnung von Drähten	63
59. Unelastische Dehnung von Drähten – Zugfestigkeit	64
60. Zerreißen eines Glasfadens – Zugfestigkeit und Sprödigkeit	65
61. Versuch mit Bologneser Fläschchen und Glastränen – Hohe Sprödigkeit schnell gekühlter Gläser	65
62. Biegung einer Blattfeder	66
63. Zerbrechen eines Eisendrahtes durch wiederholtes Biegen	66
64. Zerdrehen eines Eisendrahtes	67
§ 14. Schwerpunkt und Gleichgewichtslage – Standfestigkeit	67
65. Balancieren eines flachen Körpers auf der Fingerspitze	67
66. Balancieren eines Papierblattes auf der Bleistiftspitze	67
67. Schwerlinien und Schwerpunkt an waagrecht schwebenden Blechscheiben	68
68. Schwerpunkt und Schwerlinien an hängenden Pappscheiben	68
69. Gleichgewichtslagen eines hängenden Körpers	69
70. Pappfiguren in stabilem Gleichgewicht	70
71. Hängende Körpersysteme in stabilem Gleichgewicht	70
72. Gleichgewichtslagen einer Kugel	71
73. Standfestigkeit eines Quaders	71
74. Standfestigkeit einer Kerze, eines Bleistiftes – Abhängigkeit von der Unterstützungsfläche	72
75. Standfestigkeit einer kleinen Flasche – Abhängigkeit von der Schwerpunkts- höhe	72
76. Standfestigkeit von Schachteln mit verschiedener Füllung – Abhängigkeit vom Gewicht und von der Schwerpunkthöhe	72
77. Messen der Standfestigkeit eines Quaders	73
78. Beispiele für Standfestigkeit	74
§ 15. Kraftumformende Einrichtungen – Drehmoment	74
79. Die Wippe (Modellversuch)	74
80. Vorversuche mit Hebeln	75
81. Zweiseitiger Hebel – Drehmoment	75
82. Einseitiger Hebel	77
83. Waagenmodelle	78
84. Seilmaschinen an einer Standleiter	80
85. Feste und lose Rolle	81
86. Der Klobenzug	81
87. Der Flaschenzug	82
88. Vergleichen von Drehmomenten	82

89. Verbundene Rollen – Wellrad, Kurbel	83
90. Kraftübertragung durch Riemen- oder Seiltrieb	83
91. Schiefe Ebene	84
92. Keil (Modellversuch)	85
93. Erzeugung der Schraubenlinie (Modellversuch) – Schraubenmodell	86
§ 16. Arbeit und Leistung	87
94. Arbeit an der Rolle und am Flaschenzug – Arbeitsdiagramm	87
95. Arbeit an der schiefen Ebene	88
96. Arbeit und Leistung beim Ziehen eines Wagens	89
97. Arbeit und Leistung beim Stangenklettern	90
98. Modellversuch zum Pronyschen Zaum	90
99. Pronyscher Zaum an einer Modelldampfmaschine	91
100. Pronyscher Zaum an einem Elektromotor	91

Einleitung

1. Das Buch ist gedacht als ein Hilfsbuch für die Hand der Physiklehrer an der neuen Schule. Es möchte ihnen bei der Auswahl und bei der Durchführung physikalischer Schulversuche ein Ratgeber sein und trägt der Tatsache Rechnung, daß viele Lehrer vor die Notwendigkeit gestellt sind, auch ohne umfangreiche physikalische Sammlungen einen vollwertigen Unterricht zu geben. Diese Lage ist in erster Linie dadurch bedingt, daß ein nach wissenschaftlichen Gesichtspunkten angelegter Physikunterricht heute nicht mehr ausschließlich Sache der Oberschule ist. Die neue Schule unterscheidet sich darin grundsätzlich von der Schule der früheren Zeit, daß sie der Grundschule einen wesentlichen Anteil am Aufbau des physikalischen Lehrgebäudes zuweist. Dabei handelt es sich im Gegensatz zum Physikunterricht der Oberstufe der früheren Volksschule keineswegs nur um ein vorwissenschaftliches, auf rein elementaren Bahnen sich bewegendes Bekanntmachen mit den Dingen, sondern um eine zwar dem Entwicklungsstande der Schüler angepaßte, aber in zunehmendem Maße wissenschaftlich betonte Unterrichtsform.

Es liegt auf der Hand, daß ein Experimentierbuch, das der neuen Schule dienen soll, diese Verhältnisse zu berücksichtigen hat.

2. Das Buch unterscheidet sich in mancher Hinsicht von älteren Büchern ähnlicher Zielsetzung. So haben die Verfasser im Gegensatz zu der allgemein geübten Gepflogenheit früherer Experimentierbücher davon abgesehen, dem Buch ein besonderes Kapitel über die *Einrichtung von Lehr- und Übungsräumen* beizufügen. Sie halten diese Frage unter den heutigen Verhältnissen für eine solche von sekundärer Bedeutung. Wenn auch das Vorhandensein eines gut eingerichteten physikalischen Unterrichtsraumes seine unbestreitbaren Vorzüge hat, so darf doch das Fehlen eines solchen kein Grund zur Verkümmern des Physikunterrichts sein. Man wird sich daran gewöhnen müssen, mit einem Mindestmaß an Raum und Einrichtung auszukommen. Ein rechteckiger, etwa 200×70 cm großer Tisch, dessen Höhe man auf 90 cm bringen läßt, ein kleinerer, in der Höhe dazu passender Ansatz Tisch, der die zur Verfügung stehende Versuchsfläche unter Umständen zu vergrößern gestattet, eine oder besser zwei Steckdosen, eine behelfsmäßige Verdunkelungseinrichtung, Wasserleitungs- und Stadtgasanschluß, wo die Möglichkeit dafür vorhanden ist, das ist außer den üblichen Schulbänken und einer Wandtafel alles, was der physikalische Lehrraum an Ausstattung braucht. Alles andere muß der Tatkraft und der Findigkeit des Physiklehrers überlassen bleiben. Allgemeine Richtlinien dafür zu geben, scheint den Verfassern müßig, da die Verhältnisse ohnehin überall anders gelagert sind und sich keine Norm aufstellen läßt, die für alle Fälle paßt.

Wer Übungen abhalten will, muß für eine ausreichende Zahl von Tischen sorgen. Sollte man darauf angewiesen sein, die Übungen auf Schulbänken durchzuführen, so ist es

vorteilhaft, diese von vornherein mit horizontalen Tischplatten zu versehen. Einen besonderen Übungsraum braucht man nicht.

3. Auch das Vorhandensein einer mit industriell hergestellten Versuchsgeräten reichlich ausgestatteten Sammlung darf nicht als unerläßliche Vorbedingung für einen vollwertigen physikalischen Unterricht angesehen werden. Fehlen solche Geräte, so wird man *behelfsmäßige Unterrichtsmittel* an ihre Stelle treten lassen. Doch darf man darin keineswegs eine Gefahr für die Leistungsfähigkeit und die Wissenschaftlichkeit des physikalischen Unterrichts erblicken. Die Verfasser sind im Gegenteil der Ansicht, daß es sich hier nicht darum handelt, aus der Not eine Tugend zu machen, sondern daß es wohlerwogene methodische und didaktische Gründe sind, die für eine Vereinfachung des Lehrgerätes sprechen. Sie stehen auf dem Standpunkt, daß ein Versuch um so überzeugender wirkt und somit schulmäßig um so wertvoller ist, mit je einfacheren Mitteln er durchgeführt wird. Entscheidend für den unterrichtlichen Erfolg eines Versuches ist die Möglichkeit, die Versuchsanordnung erst im Laufe des Lehrgespräches vor den Augen der Schüler unter ihrer tätigen Mitwirkung entstehen zu lassen. Und dazu bieten behelfsmäßige Mittel oft eher die Möglichkeit als fertig bezogene Versuchsgeräte. Ihrer Überzeugung entsprechend, haben die Verfasser die im Buch beschriebenen Versuche so ausgewählt, daß man sie mit den üblicherweise zur Verfügung stehenden Mitteln durchführen kann, ohne auf fertige Geräte angewiesen zu sein. Versuche mit werkmäßig hergestellten Geräten bleiben im Buch durchaus im Hintergrund. Freilich sind dieser Einstellung gewisse Grenzen gezogen, die man nicht außer acht lassen darf. Eine Waage, eine Uhr, eine Luftpumpe sind beispielsweise Geräte, die sich nun einmal nicht durch behelfsmäßige Mittel ersetzen lassen, wenn sie nicht ihren Sinn verlieren sollen. Ihre Zahl ließe sich noch bei weitem vergrößern. Man wird nach wie vor in solchen Fällen auf industrielle Erzeugnisse zurückgreifen müssen.

Ganz im Zuge der oben angedeuteten Entwicklung liegt der Gedanke der *Aufbaugeräte*, bei denen einzelne, genormte, leicht untereinander auswechselbare Teile an die Stelle der fertigen Geräte treten, so daß die im Unterricht gebrauchten Geräte erst aus diesen Teilen zusammengesetzt werden. Aufbaugeräte ermöglichen es, die aus ihnen zusammengestellten Versuchsanordnungen nach Bedarf abzuändern und sie vor den Augen der Schüler entstehen zu lassen. Sie sind deshalb fertigen Geräten in methodischer Hinsicht weit überlegen. Darüber hinaus sehen die Verfasser in der Schaffung von Aufbaugeräten eine verheißungsvolle Möglichkeit, Schulen, die über physikalische Sammlungen nicht verfügen, zu brauchbaren physikalischen Lehrmitteln zu verhelfen. Es liegen bereits beachtenswerte Entwicklungen dieser Art vor. Doch kann es nicht Aufgabe dieses Buches sein, diese Erzeugnisse einer Einzelbesprechung zu unterziehen. Wo Aufbaugeräte vorhanden sind, werden sie bei der Durchführung der beschriebenen Versuche wertvolle Dienste leisten.

Hingewiesen sei allein auf das schon fast als klassisch anzusehende *Präzisionsstativ* nach W. Volkmann, das zusammen mit seinen sinnvoll konstruierten Einzelteilen und Zubehörteilen eine ganze Sammlung von Fertiggeräten, vornehmlich auf dem Gebiet der Mechanik und Optik, ersetzt.

Völlig ungezwungen ordnen sich in den Rahmen dieser Ausführungen die sogenannten *Freihandversuche* ein; ihnen ist im Physikunterricht der neuen Schule ein breiter Raum zu gewähren. Abgesehen von der unterrichtlichen Bedeutung, die darin liegt, daß der Schüler sie leicht selbst ausführen kann, sind solche Versuche wegen der Einfachheit

ihrer Mittel in erheblichem Maße dazu berufen, Geräteversuche zu ersetzen. Auch im Buch werden Freihandversuche in großer Zahl beschrieben, ohne daß sie in jedem Einzelfall als solche gekennzeichnet werden.

Versuche mit behelfsmäßigen Mitteln, Freihandversuche, Versuche mit Aufbaugeräten, das sind die Fundamente, auf denen das Buch gegründet ist. Sie verschmelzen im Buch zu einer einheitlichen Grundlage.

4. Der Wille, die für den physikalischen Unterricht erforderlichen Lehrmittel zu schaffen, wird oft zur *Selbstanfertigung von Geräten* anregen. Es besteht darüber kein Zweifel, daß man gerade von den Physiklehrern der neuen Schule Bereitschaft zur Mitarbeit in dieser Richtung erwarten muß. Das Buch wird sie dabei durch reichlich eingestreute Hinweise unterstützen. Nur darf man nicht zu viel von ihm verlangen; seine Bedeutung liegt auf einer anderen Ebene. Das Buch kann und will kein Bastelbuch im engeren Sinne sein. Es ist in erster Linie ein Experimentierbuch, das für die Durchführung physikalischer Schulversuche Anregungen geben will. Die Hinweise auf die Möglichkeit zur Selbstanfertigung von Geräten können daher in der Regel nur allgemein gehalten werden. Nur dort, wo es sich um die Anfertigung häufig gebrauchter Hilfsgeräte handelt, werden genauere Anweisungen gegeben.

Wie das Buch kein Bastelbuch ist, so ist es auch kein Ersatz für ein physikalisches Lehrbuch. Physikalische Begriffsprägungen vorzunehmen, Ableitungen zu bringen, Gesetze zu formen, ist im allgemeinen nicht seine Sache, ebenso wie es die wissenschaftliche Auswertung der Versuche dem Lehrer überlassen muß. Fingerzeige in dieser Hinsicht werden nur an einigen besonders entscheidenden Stellen gegeben. Dagegen glauben die Verfasser, allen Benutzern dieses Buches einen Dienst zu erweisen, wenn Hinweise auf Beispiele, Anwendungen, Beobachtungen eingestreut werden. Wo sie größeren Umfang annehmen, werden sie unter besonderen Nummern geführt.

5. Räumliche Gründe und die allgemeine Zielsetzung des Buches verbieten es, auf *methodische Fragen* mehr als unbedingt erforderlich einzugehen. Methodische Hinweise sind deshalb auf ein Mindestmaß beschränkt. Sie leiten jeweils die einzelnen Kapitel in besonderen Paragraphen ein und erstrecken sich im wesentlichen auf Fragen versuchstechnischer Art.

Da das Buch dem Lehrer durch Anordnung des Lehrstoffes nach methodischen Gesichtspunkten keine Bindung auferlegen will, die er als Fessel empfinden könnte, ist der Stoff nicht methodisch, sondern systematisch gegliedert. Die Versuche reihen sich, nach Sachgebieten geordnet, aneinander. Dem Benutzer wird dadurch das Auffinden der von ihm gesuchten Auskunft erleichtert. Die methodische Eingliederung des Versuches in den Unterricht bleibt ihm überlassen.

Überhaupt darf man nicht in den Fehler verfallen, in den Ausführungen des Buches bindende Vorschriften zu sehen. Das Buch hätte seinen Zweck verfehlt, wenn es den Lehrer in seiner Selbständigkeit beeinträchtigen wollte. Experimentieren ist eine Kunst, in der man nie auslernt. Man kann sich in mühsamer Arbeit manche Fertigkeit aneignen. Zum wahren Können aber wird es nur derjenige bringen, der sich seine Selbständigkeit bewahrt. Jeder Physiklehrer bemühe sich daher, seinen eigenen Stil im Experimentieren zu entwickeln; er halte sich nicht sklavisch an die Vorschläge des Buches gebunden und probiere es auch anders.

6. Aus dem Verzicht auf eine methodisch gebundene Anordnung des Stoffes und aus der Zurückhaltung im Eingehen auf methodische Einzelfragen darf man nicht den

Schluß ziehen, als ob dem Buch eine methodische Ausprägung gänzlich fehle. Die Verfasser sind im Gegenteil der Ansicht, daß man nur bei einer ganz bewußt auf die *Entwicklung des kritischen Denkens* und auf die *Erziehung zur Selbständigkeit* hinielenden methodischen Grundhaltung die bildenden und erzieherischen Kräfte zur Entfaltung bringen kann, die der physikalische Unterricht zu vermitteln hat.

Eine entscheidende Rolle spielt dabei die methodisch richtige Durchführung der physikalischen Versuche. Es ist grundsätzlich in des Wortes weitester Bedeutung den Schülern Gelegenheit zu geben, bei der Entwicklung der Versuche wie bei ihrer eigentlichen Durchführung denkend und handelnd mitzuwirken. Dazu gehört in erster Linie, daß eine Versuchsanordnung, wenn irgend möglich, nicht fertig zusammengefügt vor die Schüler hingestellt wird. Sie muß vielmehr im Laufe des Lehrgespräches auf Grund der Vorschläge der Schüler vor ihren Augen unter ihrer ständigen tätigen Mitwirkung entstehen. Nur in besonders gelagerten Fällen, bei denen es auf eine Feineinstellung ankommt, deren Herbeiführen zu viel Zeit in Anspruch nimmt und Übung voraussetzt, wird man davon absehen. Ebenso wird man es bei Geräten halten, die man wegen ihrer Empfindlichkeit Schülerhänden nicht gern überläßt, oder deren Handhabung eine Gefahr für die Schüler mit sich bringen könnte.

Man scheue sich nicht, gelegentlich auch fehlerhaften oder unzweckmäßigen Vorschlägen der Schüler nachzugeben, soweit sie nicht zu sehr in die Irre führen oder die Versuchsanordnung nicht gefährden. Die Schüler können aus ihren eigenen Fehlern nur lernen und werden so zur Selbstkritik erzogen. So wird es im Laufe des Unterrichts in immer höherem Maße gelingen, die Selbständigkeit der Schüler zu entwickeln und sie, ohne daß es dazu besonderer Worte bedarf, den Wert einer gemeinsamen Arbeit erkennen zu lassen.

7. Eine besonders wichtige Aufgabe haben im Rahmen dieser Zielsetzung die *physikalischen Schülerübungen* zu erfüllen. Es liegt auf der Hand, daß sie noch wirksamer zur Förderung der Selbständigkeit der Schüler beitragen können, als es dem Klassenunterricht möglich ist. Man sollte sie daher einflechten, wo die Verhältnisse es nur immer gestatten. Allerdings wird dies im allgemeinen aus zeitlichen, räumlichen und materiellen Gründen nur gelegentlich geschehen können. Auch bei reichlich vorhandenen Hilfsmitteln ist es nicht möglich, alles in Übungen zu behandeln. Um so sorgfältiger wird man daher bei ihrer Auswahl vorgehen müssen. Im Buch sind Schülerübungen als solche nicht gesondert behandelt. Versuche, die sich hierfür besonders eignen, sind durch ein der Überschrift beigefügtes Zeichen [Ü] gekennzeichnet.

8. Es ist noch kurz auf die Bedeutung von *Modellen* und *Modellversuchen* für den Unterricht hinzuweisen, von denen im Buch mehrfach Gebrauch gemacht wird. Sie dienen meist zur Veranschaulichung sinnlich nicht wahrnehmbarer Zusammenhänge oder zur vereinfachten Wiedergabe komplizierter physikalischer oder technischer Gebilde, die der Schüler nur schwer überschauen kann. Der Wert solcher Modelle und Modellversuche ist umstritten, da sie unter Umständen die Schüler zu dem Glauben verleiten können, sie hätten mit dem Versuch einen Einblick in die wirkliche Natur getan. Es versteht sich von selbst, daß sich eine derartige Denkart in keiner Weise mit wissenschaftlicher Auffassung verträgt, zu der die Schüler hingeführt werden sollen, und daß man sie im Unterricht nicht aufkommen lassen darf.

Wenn man aber die Schüler von vornherein nicht über die dem Modell anhaftenden Mängel, über die ihm eigenen Vergrößerungen und willkürlichen Vereinfachungen im unklaren läßt, wenn man Modellversuchen nicht den Anschein von Erkenntnisversuchen gibt, sondern sie nur zur Ergänzung oder im Gefolge echter Erkenntnisversuche

bringt, dann haben Modelle und Modellversuche durchaus als wertvolle Hilfsmittel der Veranschaulichung schwer erfaßbarer Zusammenhänge zu gelten und werden als solche ihren Platz im Unterricht behaupten. Mittel zur Erweiterung der Erkenntnis können sie nie sein, wohl aber eine wertvolle Stütze bei der Verarbeitung von Erkenntnissen. In diesem Sinne wollen die in diesem Buch enthaltenen Hinweise auf Modelle und Modellversuche verstanden sein.

9. Zur äußeren *Einrichtung des Buches* ist folgendes zu sagen. Das Buch soll der Grundschule wie der Oberschule und der Berufsschule in gleicher Weise dienen. Um den Charakter der Einheitlichkeit zu wahren, ist davon abgesehen worden, das Buch in getrennte Teile für die einzelnen Schularten zu zerlegen. Zur Erleichterung der Übersicht sind Versuche, die vorzugsweise für die Grundschule in Frage kommen, durch das der Überschrift beigefügte Zeichen [G] gekennzeichnet. Versuche, die in erster Linie für die Oberschule geeignet sind, tragen das Zeichen [O]. Das Zeichen [G, O] weist auf solche Versuche hin, die auf beiden Unterrichtsstufen verwendbar sind. Selbstverständlich soll mit dieser Kennzeichnung keine endgültige Normung geschaffen werden. Die Grenzen zwischen beiden Gruppen sind aus mancherlei Gründen fließend. Immerhin werden die gegebenen Hinweise eine Hilfe sein.

Im übrigen hoffen die Verfasser, mit dem Buch auch für den Physikunterricht an der Berufsschule eine Handreichung zu bieten. Denn wenn dieser auch bezüglich der Zielsetzung seine Eigengesetzlichkeit hat, so sind doch seine sachlichen, experimentellen und methodischen Grundlagen die gleichen wie an den anderen Schularten. Mit Rücksicht auf die Vielgestaltigkeit der Berufsschule ist davon abgesehen worden, die für sie in Frage kommenden Versuche besonders zu kennzeichnen. Im allgemeinen werden es die mit dem Zeichen [O] versehenen sein. Es muß dem Lehrer der Berufsschule überlassen bleiben, die ihm geeignet erscheinenden Versuche selbst auszuwählen.

Auf folgende Einzelheiten sei besonders hingewiesen:

Jeder Versuch ist in sich abgeschlossen dargestellt; er ist mit einer besonderen Nummer versehen.

Jede Versuchsbeschreibung wird durch eine Aufzählung der benutzten Geräte und Werkstoffe eingeleitet.

Geräte, deren Selbstanfertigung mit einfachen Mitteln möglich ist und im Buch beschrieben wird, sind durch das Zeichen * gekennzeichnet.

Ausführungen, die zur eigentlichen Versuchsdurchführung nicht gehören oder über sie hinausgehen, sind als Bemerkungen in Kleindruck beigefügt.

Hinweise auf andere Versuche im laufenden Text werden durch die betreffende Versuchsnummer mit vorgesetztem V gegeben, z. B. V 27, V 104.

Bei Hinweisen auf methodische Bemerkungen ist das Zeichen MB unter Beifügung der Seitenzahl angegeben, z. B. MB, S. 26.

Den Dinormen entsprechend werden sämtliche Abmessungen von Geräten (Längen, Breiten, Höhen, Durchmesser usw.) im Text wie in den Abbildungen in mm angegeben.

Meßstrecken, deren Ermittlung zur Versuchsdurchführung erforderlich ist, werden in der Regel in cm, längere in m gemessen.

Literatur

- Angerer, E. von*: Technische Kunstgriffe bei physikalischen Untersuchungen. Braunschweig 1928.
- Dussler, G.*: Spiel und Spielzeug im Physikunterricht. Frankfurt/M. 1933.
- Günther, E.*: Physikalisches Arbeitsbuch, 2 Teile. Frankfurt/M. 1928, 1930.
- Haase, E.*: Physik des Spielzeugs. Leipzig 1921.
- Hahn, H.*: Handbuch für physikalische Schülerübungen. Berlin 1913.
- Hahn, H.*: Physikalische Freihandversuche, 3 Teile. Berlin 1907, 1912, 1926.
- Hahn, K. und Koch, W.*: Physikalische Schülerübungen. Leipzig 1926.
- Maey, E.*: Die physikalischen Schülerübungen in gleicher Front. Berlin 1929.
- Müller, E. C.*: Vereinfachte physikalische Schülerübungen im Lehrzimmer. Braunschweig 1930.
- Müller, F. C. G.*: Technik des physikalischen Unterrichts. Berlin 1926.
- Pfaundler, L. von*: Die Physik des täglichen Lebens. Stuttgart 1919.
- Pohl, F. – Schnippenkötter, J. – Weyres, Th.*: Physik für höhere Lehranstalten, Unterstufe, Handbuch für den Lehrer. Berlin und Bonn 1935.
- Schnippenkötter, J. – Weyres, Th.*: Physik für höhere Lehranstalten, Oberstufe, Handbuch für den Lehrer. Berlin und Bonn 1934.
- Rosenberg, K.*: Experimentierbuch für den Unterricht in der Naturlehre, 2 Bände. Leipzig und Wien 1924, 1929.
- Schütt, K.*: Das Gas in der Schule. Hamburg 1926.
- Volkmann, W.*: Anleitung zu den wichtigsten physikalischen Schulversuchen. Berlin 1912.
- Volkmann, W.*: Elemente physikalischer Experimentierkunst. Berlin und Bonn 1940.
- Wagner, G.*: Physik in Schülerexperimenten. Hildesheim und Leipzig 1929.
- Weinhold, A. F.*: Physikalische Demonstrationen. Leipzig 1931.
- Zeitschrift für den physikalischen und chemischen Unterricht*, begründet 1887 von F. Poske. Berlin.
- Zeitschrift für den mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterricht aller Schulgattungen*, begründet 1869 von J. C. V. Hoffmann. Leipzig.
- Unterrichtsblätter für Mathematik und Naturwissenschaften*. Frankfurt/M. Seit 1894.
- Praktische Schulphysik*, Monatsschrift für den naturwissenschaftlichen Unterricht. Berlin. Seit 1920.
- die neue schule*, Blätter für demokratische Erneuerung in Unterricht und Erziehung. Berlin/Leipzig. Seit 1946.
- die neue schule*, Beihefte für Mathematik und Naturwissenschaften (2 Hefte). Berlin/Leipzig 1948, 1949.
- Mathematik und Naturwissenschaften in der neuen Schule*. Beiträge zum mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterricht. Berlin/Leipzig. Seit 1949.
- Berufsbildung*. Zeitschrift für das berufliche Bildungswesen. Berlin/Leipzig. Seit 1947.
- Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*. Bonn und Frankfurt/M. Seit 1948.
- Praktische Schulphysik*, Jahrbuch für den naturwissenschaftlichen Unterricht. Detmold. Seit 1949.

ERSTES KAPITEL

Werkzeuge, Geräte und Werkstoffe für den Unterricht in der Mechanik

§ 1. FERTIGE HILFSMITTEL

Nach den in der Einleitung geäußerten Leitgedanken kann es nicht Aufgabe des Buches sein, eine lückenlose Aufzählung von Hilfsgeräten für den Unterricht zu geben, geschweige denn eine Musterliste für eine physikalische Sammlung aufzustellen. Andererseits kann man es nicht ganz unterlassen, eine Übersicht über werkstattmäßig oder industriell gefertigte Hilfsmittel zu bieten, die auch ein mit bescheidenen Mitteln arbeitender physikalischer Unterricht nicht völlig entbehren kann.

Die unten folgende Liste ist keineswegs als eine Zusammenstellung unbedingt erforderlicher Geräte zu betrachten, ohne die man nicht auskommen könnte; sie soll nur einen Überblick über das Wünschenswerte an Werkzeugen und Hilfsgeräten vermitteln und ist so knapp wie möglich gehalten. Ein findiger Experimentator wird sich beim Fehlen des einen oder anderen sicher zu helfen wissen.

Werkzeuge:

3 Hämmer (100 - 250 - 500 g)	1 Rohrzange
1 Flachzange	1 Bleischere
1 Kneifzange	3 Schraubenzieher (2,5 - 6 - 8 mm)
1 Kombinationszange	1 Handbohrmaschine
1 Spitzrundzange	Spiralbohrer (1 ... 8 mm)
1 Bohrwinde	2 Stechbeitel (5 mm, 10 mm)
versch. Zentrumsbohrer	1 Raspel
1 Drillbohrer	2 Flachfeilen (mit versch. Hieben)
1 Körner	2 Halbrundfeilen " " "
versch. Vorbohrer	2 Rundfeilen " " "
1 Handsäge	2 Dreikantfeilen " " "
1 Metallsäge	1 Satz Schlüsselfeilen
1 Fuchsschwanz	1 Parallelschraubstock, abnehmbar
1 Stichsäge	1 Feilkloben
1 Laubsäge	1 Satz Schraubenschlüssel (6 ... 20 mm)
1 Schneidlade	1 LötKolben
1 Schlichthobel	1 Senklot
1 Vorschneider	1 Wasserwaage

Stellgeräte, Befestigungsgeräte

2 Bunsenstative mit Zubehör	2 Satz Holzunterlagen
2 Präzisionsstative mit Zubehör	(0,5 - 1 - 2 - 2,5 - 5 - 10 cm hoch)
Federklammern, eine mit Stiel	Unterstellkästen, versch. hoch
(passend für Stativ)	flache Holzkeile, versch. Größe zum Gerade-
2 Schraubzwingen	stellen von Geräten

Geräte für Längen-, Raum-, Winkelmessung

2 Meterstäbe (dm- und cm-Teilung)	1 Schraubenmikrometer
2 Meterstäbe (cm- und mm-Teilung)	1 Überlaufgefäß
1 Gliedermaßstab (Zollstock)	1 Pyknometer
1 Schneiderbandmaß	1 Tafellineal
1 technisches Bandmaß (20 m)	1 Tafeldreieck
2 Meterstäbe mit verschiebbaren Zeigern	1 Tafelwinkelmesser
1 Schieblehre	1 zerlegbarer Würfel (dm ³)

Geräte für Zeitmessung

1 Taschenuhr mit Sekundenzeiger	1 Sanduhr (Eieruhr)
1 Stoppuhr ($\frac{1}{5}$ s)	3 Fadenpendel (verstellbar)
1 Metronom	

Waagen und Zubehör

1 einfache Hebelwaage (1 kg)	eiserne Gewichtsstücke
1 Präzisionswaage (250 g)	(am besten mit Haken;
1 oberhalbige Tafelwaage	0,5 - 1 - 2 - 5 - 10 kp)
2 Trierbecher mit Schrot	1 Federwaage nach Maey (1000 p)
1 Brücke aus Holz	3 Federwaagen „ „ (100 p)
1 Gewichtssatz bis 500 g	2 technische Federwaagen,
1 Gewichtssatz bis 200 g mit Bruchgrammen	Sackwaagen (10 kp, 25 kp)

Einfache Maschinen

3 Lagerzapfen	1 in Spitzen gelagerte Rolle
1 Hebel (Meterstab), dazu mehrere Fadenschlingen	1 starke Rolle aus Metall zum Befestigen am Tisch
2 Rollen für Lagerzapfen	2 Stufenrollen (1:2:3)
2 Rollen mit Scheren	1 Wellrad
1 Flaschenzug mit 4 Rollen	1 schiefe Ebene mit Wagen
1 Flaschenzug mit 6 Rollen	1 Satz Hakengewichte (20 St. je 50 p)

Geräte für Versuche mit Flüssigkeiten und Gasen

1 Litermaß	3 m Laboratoriumsschlauch
je 1 Meßzylinder	1 kg Glasstäbe (\varnothing 5 ... 10 mm)
zu 10 - 50 - 100 - 250 - 500 cm ³	2 kg Glasbiegerohr (\varnothing 5 ... 15 mm)
3 Pipetten (versch. Größen)	versch. Kork- und Gummistopfen
Bechergläser „ „	1 Satz Korkbohrer
Standkolben „ „	2 Glashähne
Erlenmeyerkolben „ „	1 Korkmesser
Rundkolben „ „	1 Korkfeile (Rundfeile)
2 Standzylinder	1 Glasmesser
1 Flasche (2 l) mit seitlichem Tubus	1 Eimer
1 Glastrog (Aquarium)	1 Waschschüssel
2 photogr. Entwicklungsschalen	2 Töpfe aus Leichtmetall
5 Abdampfschalen	mehrere Barometerröhren
5 Uhrglasschalen	2 kg Quecksilber
5 Glastrichter versch. Größe	1 Quecksilbertropfer
Reagenzgläser und Gestell	1 Quecksilberwanne
für 12 Gläser	1 Quecksilberzange
5 T-Stücke (Glas) für 5-mm-Schlauch	1 Dosenbarometer
4 Quetschhähne mit Stellschrauben	1 Kolbenluftpumpe

Geräte für Stadtgasbenutzung

2 Bunsenbrenner
1 Schnittbrenner
2 m Gasschlauch

2 DreifüÙe
2 Drahtnetze (16 cm) mit Asbesteinlage
3 Tondreiecke versch. Größe

Verschiedene Werkstoffe und Materialien

Draht versch. Stärke
Nägel
Schrauben
Stecknadeln
Stopfnadeln
Nähnadeln
Stricknadeln
Reißzwecken (auch mit großem Kopf)
Schreibmaschinenpapier
Zeichenpapier
Kohlepapier
Filtrierpapier
Rundfilter
Pappe, Wellpappe
Igelit
Lederabfälle
Isolierband

Sand
Glasperlen
Bleikugeln
Bleiabfälle
Stahlkugeln (aus Kugellagern)
Sperrholz
Blech
Bretter
Bindfaden
Gummischnur
Klebwachs
Pizein
Siegellack
Alleskleber
Färbemittel für Flüssigkeiten
(Eosin, Fuchsin, Kaliumpermanganat,
Anilinblau, Ketonblau, Fluoreszin)

§ 2. SELBSTANZUFERTIGENDE, HÄUFIG GEBRAUCHTE HILFSGERÄTE

Die Ausführungen dieses Paragraphen sollen zeigen, wie man einige im Unterricht häufig verwendete Hilfsgeräte bei einigem Geschick selbst herstellen kann, wenn sie nicht zur Verfügung stehen sollten. Da es sich um vielgebrauchte, nicht nur für einen Versuch bestimmte Lehrmittel handelt, lohnt sich die aufgewendete Mühe. Die Anweisungen sind absichtlich kurz gehalten und beschränken sich im wesentlichen auf einige Ergänzungen zu den beigefügten Abbildungen, die alle wichtigen Einzelheiten erkennen lassen und die Maße in mm enthalten. Im übrigen sind die Maßzahlen nur als ungefähre Richtzahlen aufzufassen. An Schulen, an denen Werkunterricht erteilt wird, ergibt sich für diesen eine beachtenswerte und von ihm sicher gern benutzte Gelegenheit, dem Physikunterricht durch die Anfertigung dieser Geräte zu helfen. Überhaupt kann eine ständige Fühlungnahme zwischen beiden Fächern für beide nur nützlich sein und ist daher zu fördern, wo sich immer Gelegenheit dazu bietet.

1. Einfache Rollen

Sperrholz oder dünne Brettchen (Dicke 3 mm und 2 mm), dünner Preßspan, harte Pappe, Knopfformen.

Die folgende Beschreibung bezieht sich auf Rollen mit dem Nenndurchmesser 40 mm.

Ausführung a (Abb. 1a): Eine kreisförmige Holzscheibe (\varnothing 40 mm, Dicke 3...4 mm) wird mit der Laubsäge möglichst genau ausgesägt. Säge senkrecht halten! Zwei Kreisscheiben aus sehr dünnem Holz (\varnothing etwa 45 mm, Dicke 2 mm) werden am Rand einseitig schräg gefeilt. Die Achsenbohrung wird bei allen Scheiben mit einem feinen

Drillbohrer vorgebohrt. Die Scheiben werden mit gekreuzten Fasern unter leichtem Druck aufeinandergeleimt (Tischlerleim oder Alleskleber), nachdem sie vorher mittels einer durch die Bohrung gesteckten Nadel zentriert wurden. Nachträglich wird die Achsenbohrung auf 2... 3 mm erweitert, je nach der zum Lagerzapfen (vgl. Nr. 2) verwendeten Achse. Die Rolle wird in der Mitte durch Aufkleben von kleinen halbrunden Holz-scheiben (Knopfformen) verstärkt.

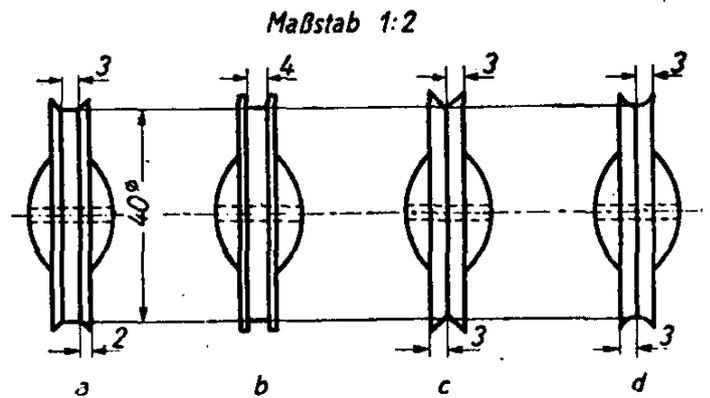


Abb. 1 Einfache Rollen verschiedener Ausführung

Ausführung b (Abb. 1 b): Ähnlich wie *a*. Die seitlichen Holz-scheiben sind durch zwei dünne Scheiben aus Preßspan oder harter Pappe ersetzt.

Ausführung c und d (Abb. 1 c und d): Je zwei sorgfältig ausgesägte kreisförmige Holz-scheiben (\varnothing 45 mm, Dicke 3...4 mm) werden wie bei *a* zentriert und aufeinandergeleimt. In die gekrümmte Randfläche wird mit der Feilenkante eine rechtwinklige oder mit einer feinen Rundfeile (Korkfeile) eine runde Rinne eingefeilt, wobei die Leim-fuge als Richtungsweiser dient. Die Rinne muß überall gleichmäßig tief sein, so daß der Nenndurchmesser der Rolle 40 mm beträgt.

Bemerkung: Es gelingt manchmal nicht gleich, die aufgestellten Genauigkeitsforderungen zu erfüllen. Bei *a* und *b* wird die mittlere Scheibe nicht immer genau kreisförmig mit senkrechter Schnittfläche ausfallen, bei *c* und *d* wird die Gleichmäßigkeit der Rinne nicht immer gewährleistet sein. Bei einiger Sorgfalt und Übung lassen sich aber die Abweichungen von der Kreisform in so engen Grenzen halten, daß die Rollen für die angegebenen Versuche gut verwendbar sind.

2. Lagerzapfen

Rundholz (Hartholz - \varnothing 13 mm), Stricknadeln oder starke Eisenstifte, $2\frac{1}{2}$ "-Nägel.

Die Zapfen (Abb. 2) dienen als Achsen für Rollen und Hebel und werden am Stativ festgeklemmt. Man wählt den Durchmesser des Rundholzes so, daß es in die Muffen des Stativs paßt. Als Achsen sind 60 mm lange Stücke von Stricknadeln oder andere Stahl- oder Eisenstifte geeignet. Auch $2\frac{1}{2}$ "-Nägel, deren Kuppe man abschneidet und deren Schaft man durch eine feine Feile vom Grat befreit und mit Sandpapier glättet, können verwendet werden. Loch im Holzzapfen mit Drillbohrer vorbohren!

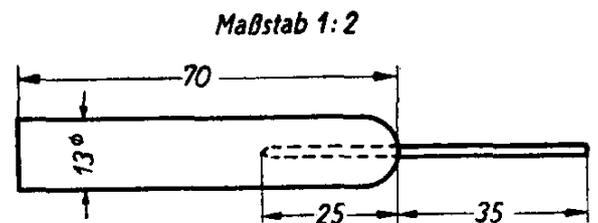


Abb. 2 Lagerzapfen

3. Scheren für Rollen

Hartholzleisten (Breite 15 mm, Dicke 3...4 mm) oder Sperrholzstreifen, Vierkantstücke aus Hartholz ($15 \times 15 \times 20$ mm), kleine Holzschrauben, Schraubhaken, starker Draht, $1\frac{1}{2}$ "-Nägel.

Die Scheren werden nach Maßgabe der Abb. 3 bis 5 aus Vierkantholzstücken und Holz-leisten zusammengesetzt. Einzelteile aufeinanderleimen und verschrauben!

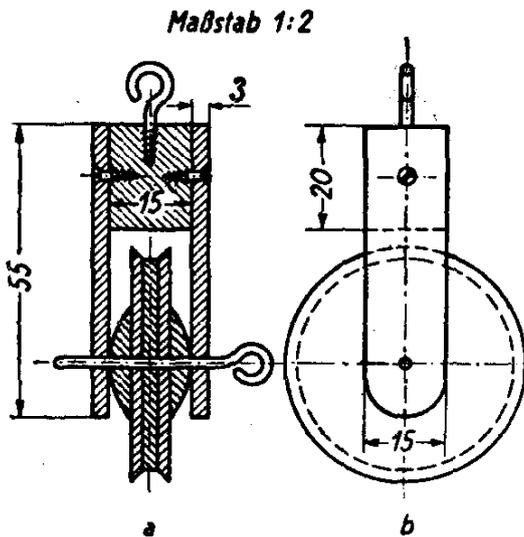


Abb. 3
Schere für einfache Rolle
a) Längsschnitt b) Vorderansicht

Der lichte Spielraum für die Rollen wird mit 15 mm angenommen. Die Rollen sind so zu befeilen, daß sie möglichst reibungslos in den Scheren spielen. Als Achsen dienen starke Drahtstücke ($\varnothing 2$ mm), die auf einer Seite zu einer kleinen Grifföse gebogen sind, oder geblätete Nägel ($\varnothing 2$ mm). Sie dürfen in den Bohrungen der Schere nicht so locker sitzen, daß sie herausfallen können.

4. Starke Rolle

Brettchen (Dicke 5 mm), Knopförmchen, zwei Hartholzleisten ($6 \times 20 \times 110$ mm), Vierkantstücke aus Hartholz ($20 \times 25 \times 40$ mm), Stahlstift ($\varnothing 2,5 \dots 3$ mm), Schraubhaken, Holzschrauben.

Fertigung der Rolle aus drei aufeinandergeleimten Holzscheiben (Dicke je 5 mm, innere Scheibe $\varnothing 80$ mm) nach Art von Nr. 1, Ausführung a (vgl. Abb. 1 a und b).
Fertigung der Schere wie bei Nr. 3, aber unter Zugrundelegung von Abb. 6. Der als Achse dienende, etwa 40 mm lange, 2 mm dicke Stahlstift wird festsitzend in die Seitenwände getrieben.

Bemerkung: Bei manchen Versuchen ist es zweckmäßig, eine starke Rolle aus Metall zu benutzen. Für die Verwendung bei Selbstanfertiigung sind sogenannte *Skalenräder* für Radioempfänger sehr geeignet, die verhältnismäßig leicht zu beschaffen sind. Der Zwischenraum zwischen

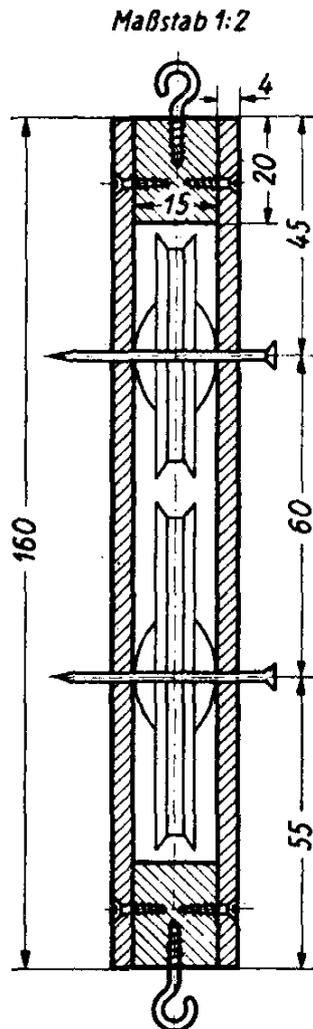


Abb. 4
Schere für Flaschenzug
(Langform)

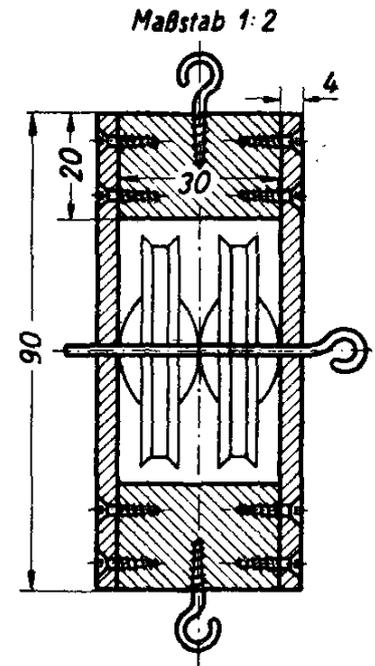


Abb. 5
Schere für Flaschenzug
(Breitform)

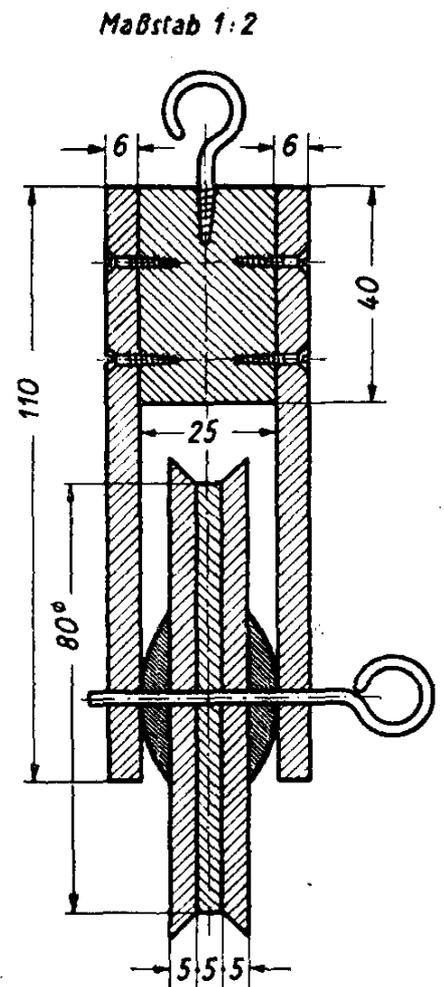


Abb. 6
Starke Rolle in Schere

den Scherenleisten ist entsprechend zu bemessen.

Macht man das Zwischenstück der Schere nicht 40 mm, sondern etwa 120 mm lang und verlängert auch die Seitenleisten entsprechend, so kann man die Schere bequem mit einer Schraubzwinge am Tisch festklemmen.

5. Stufenrolle

Dünne Brettchen (Sperrholz - Dicke 3 mm und 2 mm) oder dünner Preßspan.

Aus dünnen Brettchen (Sperrholz) oder dünnem Preßspan werden nach Nr. 1a drei Rollen mit den Nenndurchmessern 60 mm, 120 mm, 180 mm einzeln hergestellt. Danach werden sie gemeinsam zentriert und zusammengeleimt. Erst dann wird die Bohrung auf Achsenstärke erweitert. Zur Befestigung der Schnur erhält jede Rolle dicht am Rande einige feine Querlöcher, in denen die Schnur verknotet werden kann (Abb. 7).

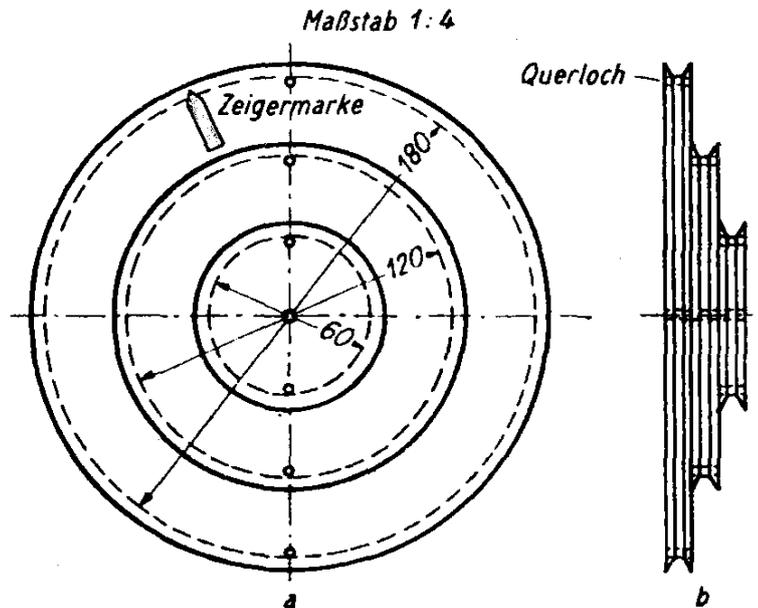


Abb. 7 Stufenrolle a) Vorderansicht b) Seitenansicht

6. Scheibe für Drehmomente

Sperrholz (Dicke 6 mm), Zeichenpapier, Knopfformen, Drahtstifte.

Eine Sperrholzplatte (\varnothing einige mm größer als 340 mm) wird mit Zeichenpapier beklebt. Darauf wird eine Zentimeter-Kreisskala gezeichnet (\varnothing 300 mm - jeder 5. Kreis rot). Erst dann wird die Kreisscheibe mit \varnothing 340 mm sorgfältig ausgesägt (Abb. 8). Der die Skala umgebende freie Randstreifen wird mit Bohrungen zur Aufnahme von Drahtstiften versehen. Verstärkung der Scheibenmitte durch Anleimen von Knopfformen.

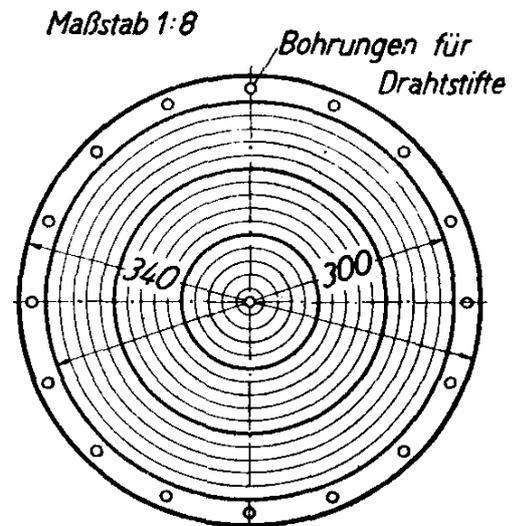


Abb. 8 Scheibe für Drehmomente

7. Hebel

Meterstab, Fadenschlingen, schmale Blechstreifen.

Als Hebel dient ein Meterstab. Er erhält genau in der Mitte der Breitseite, senkrecht zu dieser, eine Bohrung zur Aufnahme der Achse.

Bemerkungen:

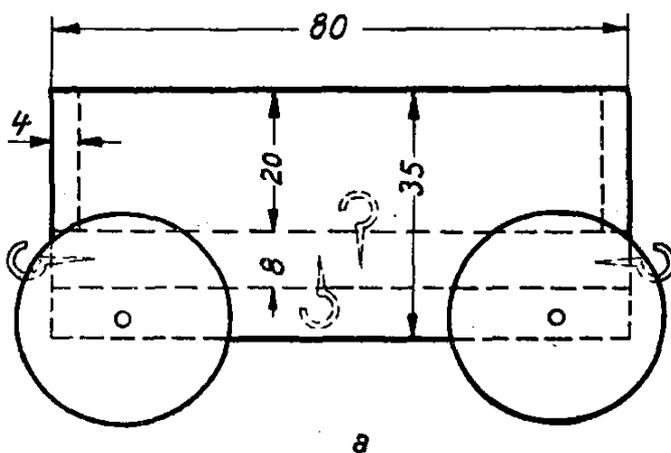
1. Die Gewichtsstücke werden am zweckmäßigsten an Schlingen aus dünnem, aber festem Faden gehängt, die über den Hebel gestreift und festgezogen werden.
2. Um gegebenenfalls geringe Abweichungen vom indifferenten Gleichgewicht auszugleichen, biegt man aus etwa 40 mm langen, 10 mm breiten Blechstreifen einige U-förmige Bügel, die man nach Bedarf an den Hebel klemmt.

8. Leichtbeweglicher Wagen

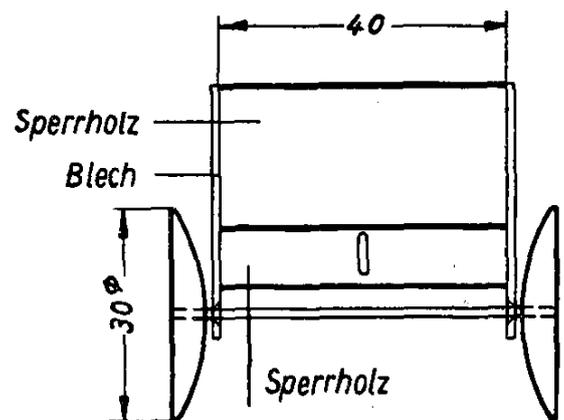
Sperrholzbrettchen ($8 \times 40 \times 80$ mm), 2 Brettchen ($4 \times 20 \times 40$ mm), 2 Blechstücke (35×80 mm), Stricknadel, 4 Kreisscheiben (Hartholz - $\varnothing 30$ mm, Dicke 6 mm), 4 Schraubhaken.

Aus einem Sperrholzbrettchen ($8 \times 40 \times 80$ mm), 2 Brettchen ($4 \times 20 \times 40$ mm) und 2 Blechstücken (35×80 mm) wird der Kasten des Wagens nach Abb. 9 zusammengeleimt und -genagelt. 4 Kreisscheiben aus Hartholz ($\varnothing 30$ mm, Dicke 6 mm) mit einer ebenen und einer gewölbten Seitenfläche und einer gerundeten Laufkante läßt man vom Drechsler drehen. Sie werden mit einer Bohrung versehen, in die als Achse zwei 60 mm lange Stricknadelstücke eingetrieben werden. Um die Achsen mit möglichst geringer Reibung zu lagern, werden die in den Seitenwänden zur Aufnahme der Achsen anzubringenden Bohrungen auf der Innenseite mit einem Spiralbohrer oder mit dem Krauskopf vorsichtig konisch erweitert (Abb. 10). Die Achsen müssen genau parallel liegen. Die Räder dürfen mit ihrer gerundeten Fläche nicht an den Seitenwänden schleifen. Der Boden erhält vorn, hinten, oben und unten je einen Schraubhaken. Es empfiehlt sich, das Gewicht des Wagens auf volle 50 p abzugleichen.

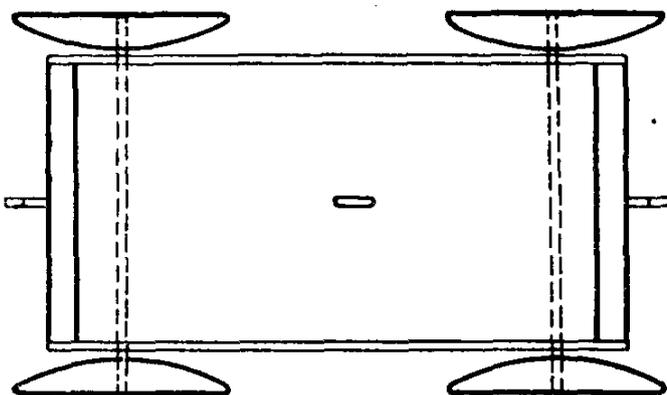
Maßstab 1:1,5



a



b



c

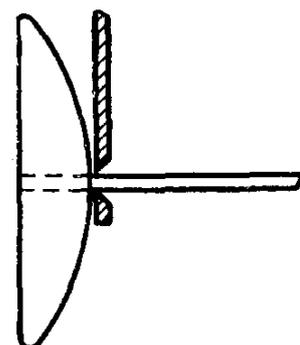


Abb. 9 Leichtbeweglicher Wagen

- a) Seitenansicht
- b) Vorderansicht
- c) Draufsicht

Abb. 10 Achsenlager
am leichtbeweglichen Wagen

9. Geschlitztes Brett

Brett ($15 \times 90 \times 800$ mm) oder zwei Bretter ($8 \times 90 \times 800$ mm), 2 Holzleisten ($15 \times 35 \times 800$ mm), 2 Brettchen ($10 \times 90 \times 100$ mm).

Ausführung a: Das geschlitzte Brett wird gefertigt aus einem gut gehobelten und geglätteten Brett ($15 \times 90 \times 800$ mm) oder zwei unter Druck aufeinandergeleimten dünnen Brettern gleicher Abmessung (Abb. 11). Um den Schlitz anbringen zu können, bohrt man, 100 mm von der Endkante entfernt, längs der Mittellinie mit dem Zentrumsbohrer 3 bis 4 dicht nebeneinanderliegende Löcher ($\varnothing 20$ mm) und stemmt die dazwischen verbleibenden Holzteile heraus, so daß ein 60...80 mm langer Durchbruch entsteht (vgl. Abb. 12).

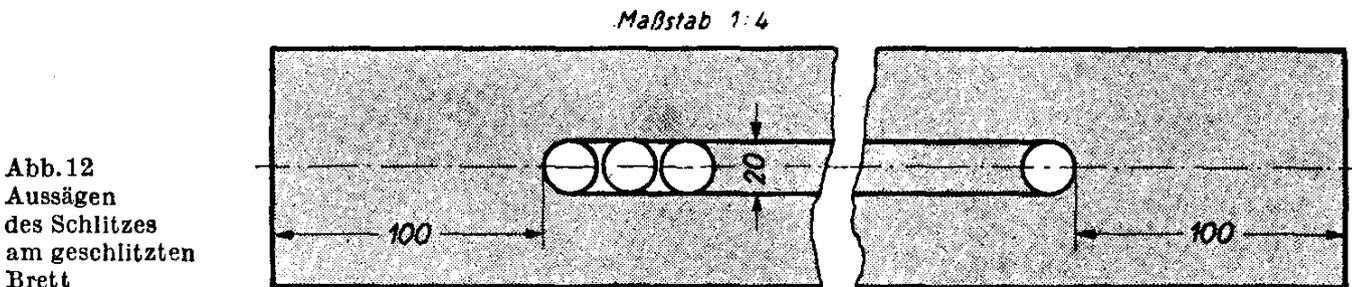
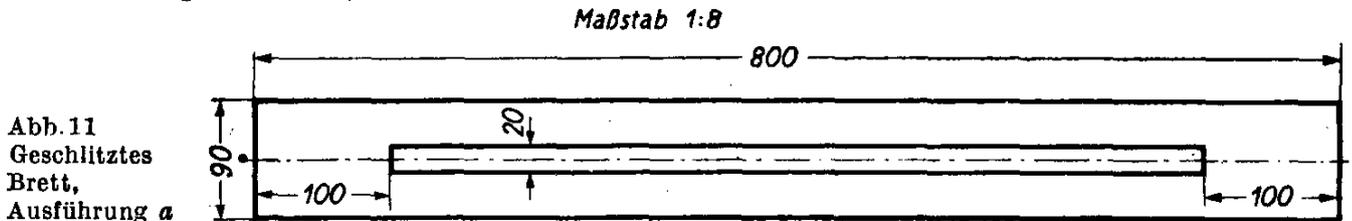
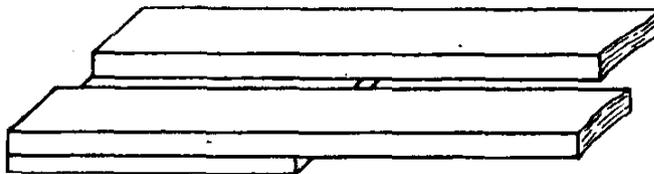


Abb. 13
Geschlitztes Brett,
Ausführung b



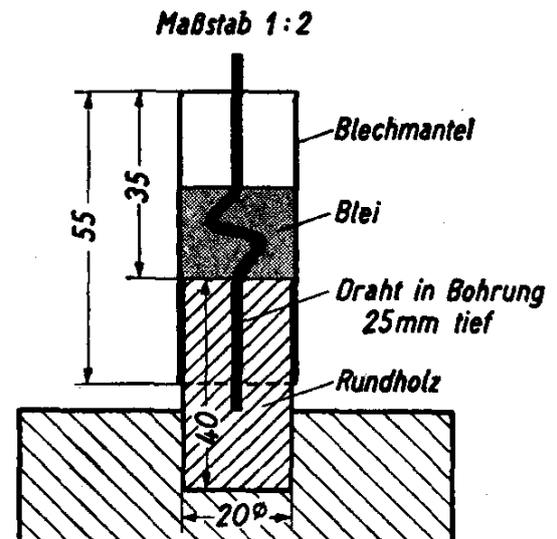
Mit einer Stichsäge sägt man dann den Mittelstreifen heraus, der am anderen Ende ebenfalls durch ein Loch begrenzt wird.

Ausführung b: Zwei gut gehobelte und geglättete Holzleisten ($15 \times 35 \times 800$ mm) werden parallel zueinander an ihren Enden auf je ein 90 mm breites, 100 mm langes Brettchen (Dicke 10 mm) geleimt und genagelt, so daß zwischen ihnen ein 20 mm breiter Abstand verbleibt (Abb. 13).

10. Hakengewichte

Bleiabfälle, Gießlöffel, Rundholz (Hartholz - $\varnothing 20$ mm), Holzklötz, 2 Leisten ($20 \times 30 \times 250$ mm), 4 Brettchen, Blech, starkes Papier, Eisen- oder Messingdraht ($\varnothing 1,5$ mm).

Herstellen der Gießform: Ein etwa 35...40 mm langes Rundholz ($\varnothing 20$ mm) erhält eine 25 mm tiefe axiale Bohrung zur Aufnahme eines Drahtes (\varnothing etwa 1,5 mm). Es wird mit einem 55...60 mm breiten zylindrischen Mantel aus Blech umnagelt oder mit mehreren Lagen



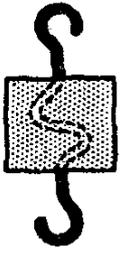


Abb. 15
Hakengewicht

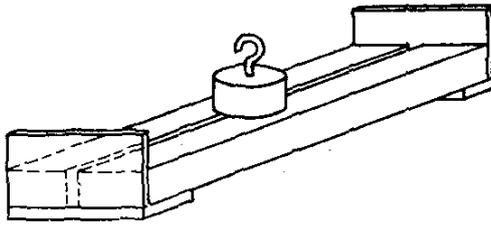


Abb. 16
Leiste zur Aufbewahrung
von Hakengewichten

starken Papiers umklebt und in eine Vertiefung eines Holzklotzes eingelassen (Abb. 14).

Herstellen der Hakengewichte: Ein etwa 9 cm langer, zweimal schleifenartig gebogener starker Eisen- oder Messingdraht wird mit einem Ende in die Bohrung gesteckt. Es werden 50 g Bleiabfälle abgewogen, geschmolzen und in

die Hohlform gegossen. Die erstarrte Masse zieht man an dem eingeschmolzenen Draht aus der Form, gleicht sie durch vorsichtiges Abschneiden von Blei oder Draht auf genau 50 g ab und biegt den herausragenden Draht beiderseits zu einem Haken (Abb. 15). Das Gewicht des Stückes beträgt dann 50 p.

Bemerkung: Zur bequemen und übersichtlichen Aufbewahrung der Hakengewichte ist eine geschlitzte Leiste sehr geeignet, die aus zwei Vierkanthölzern ($20 \times 30 \times 250$ mm) und vier Brettchen nach Abb. 16 in einfacher Weise herzustellen ist und 12 Hakengewichte aufnimmt.

11. Kleine Waagschalen

Dosendeckel aus Blech oder Pappe, Kreisscheiben aus Sperrholz oder Blech, Schnur, Draht.

Man verbindet nach Abb. 17 Dosendeckel aus Blech oder Pappe, deren Rand mit drei kleinen Löchern versehen wurde, durch Schnüre mit einem Drahhaken. Auch einfache Kreisscheiben aus Sperrholz, aus Blech oder notfalls aus Pappe sind verwendbar.

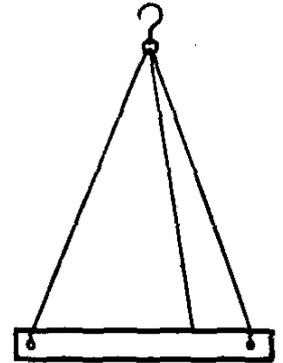


Abb. 17
Kleine Waagschale

12. Brücke für Waagschalen

Brettchen (Breite 60... 100 mm, Dicke 10 mm).

Ein längeres und zwei kürzere Brettchen werden zu einer einfachen Brücke zusammengeleimt und -genagelt. Die Vorrichtung dient zum Überbrücken einer Waagschale und muß so bemessen sein, daß die Waagschale unter ihr ohne Behinderung auf- und niederschwingen kann.

13. Stativhaken für Schnüre

Eisendraht (\varnothing 1,5 mm).

Die Haken werden nach Abb. 18 aus starkem Eisendraht gebogen, so daß sie sich über die Stäbe der Stativteile streifen lassen. Sie dienen zum Aufhängen von Schnüren (z. B. beim Flaschenzug) an Stativen.

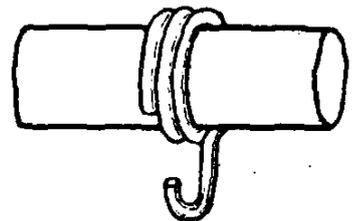


Abb. 18 Stativhaken

14. Unterstellkästen

10... 15 mm dicke Bretter verschiedener Breite.

Unterstellkästen sind vielseitig verwendbare Hilfsmittel zum Hochstellen von Versuchsgerten. Sie sind nichts anderes als offene Holzkästen, die durch eine Schraub-

zwinge leicht am Tisch befestigt werden können. Geeignet sind alle vorhandenen, aus gehobelten Brettern gefertigten Kästen. Bei Selbstanfertigung empfiehlt sich die Herstellung von drei Größen: a) $300 \times 200 \times 140$ mm, b) $400 \times 270 \times 180$ mm, c) $500 \times 350 \times 240$ mm.

15. Schraubenfedern

Klaviersaitendraht.

Man spannt einen eisernen Bolzen (\varnothing etwa 10 mm) in das Futter einer Drehbank und klemmt einen Stahldraht (Klaviersaitendraht) mit ein. Dann spult man den Draht, den man am anderen Ende mit einem Feilkloben festhält, unter gleichmäßigem Zug und Vorspann in einer Lage auf. Um beim Entspannen eine Verwirrung der Windungen zu verhüten, läßt man die Feder sich auf dem Bolzen entspannen. Beide Enden der Feder werden zu halbkreisförmigen Haken umgebogen (Abb. 19); dabei schiebt man eine starke Blechplatte als Widerlager unter die letzte Windung.



Abb. 19
Schraubenfeder

16. Einfache Stative zum Halten leichter Gegenstände

Niedrige Flasche, Sand, Schrot, Korke, Brettchen mit Bohrung, Holzstäbe, Federklammern, Hartholzklötzchen ($4 \times 15 \times 15$ mm).

Als Fuß dient eine mit Sand oder Schrot gefüllte, niedrige Flasche mit größerem Durchmesser. Für viele Zwecke genügt ein Tintenfläschchen. Die Flasche wird mittels eines durchbohrten Korkens verschlossen, in den ein Holzstab als Stativstab gesteckt wird (Abb. 20). Zum Festhalten leichter Gegenstände dienen Federklammern. Es ist zweckmäßig, an einem Schenkel der Klammern auf der Innenseite eine Nut auszufeilen (Abb. 21).

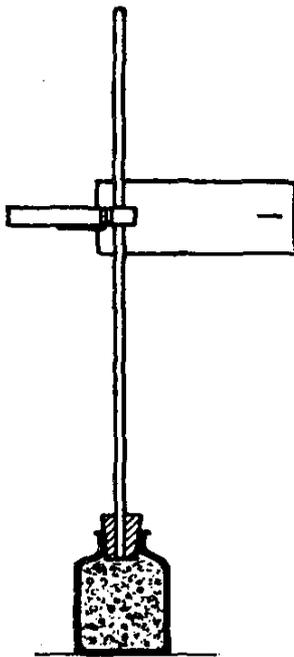


Abb. 20 Behelfsstativ für leichte Gegenstände mit angeklemmter Pappscheibe

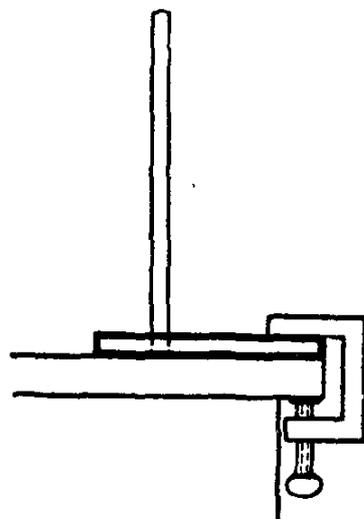


Abb. 22 Behelfsstativ mit Holzplatte

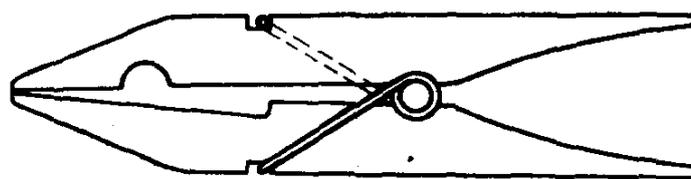


Abb. 21
Zweckmäßige Form für Federklammern als Stativklammern

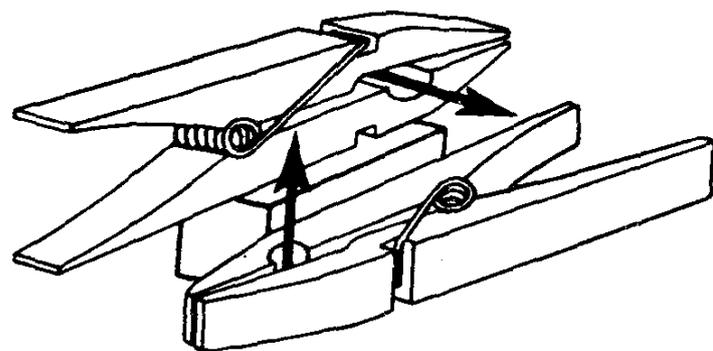


Abb. 23
Kreuzmuffe aus Federklammern (Pfeile zeigen die eingeklemmten Stäbe an)

Als Stativ für etwas schwerere Gegenstände ist ein Brettchen mit gut eingepaßtem und eingeleimtem Holzstab brauchbar; wenn man es beschwert oder am Tisch festklemmt (Abb. 22).

Aus zwei Federklammern läßt sich eine Kreuzmuffe herstellen, indem man die Klammern durch ein dazwischengeleimtes und -geschraubtes Hartholzklötzchen verbindet (Abb. 23).

17. Verschiebbarer Zeiger für einen Meterstab

Kleine Platte aus Sperrholz (etwa 25×60 mm, je nach der Breite des Meterstabes), 2 kleine Holzleisten von der Dicke des Meterstabes, ein durchsichtiges Stück Igelit, Zellon, Film od. dgl., Blechstreifen (etwa 10×120 mm), schmale Wollstoffstreifen.

Eine kleine Sperrholzplatte und zwei Stückchen einer passenden Holzleiste nagelt und leimt man nach Abb. 24 zu einem offenen Rahmen zusammen, dessen Vorderseite man mit einer Scheibe aus durchsichtigem Werkstoff von gleicher Größe wie die Sperrholzplatte überdeckt. Vorher zieht man auf der Innenseite der durchsichtigen Verschlussscheibe mit Tinte oder besser mit Ausziehtusche einen dünnen, scharfen Strich (Reißfeder!) als Index. Auf der Rückseite des Rahmens befestigt man mit kleinen Schrauben einen etwa 120 mm langen, 10 mm breiten, an einer Seite zugespitzten Blechstreifen als Zeiger.

Die Abmessungen des Innenraumes müssen mit der Breite und Dicke des Meterstabes genau übereinstimmen, so daß sich der Rahmen am Meterstab mit leichter Haftreibung verschieben läßt. Man erzielt diese dadurch, daß man die schmalen Seitenflächen des Innenraumes mit Wollstoffstreifen beklebt.

Beim Gebrauch wird der Meterstab von einem Stativ gehalten (vgl. Abb. 74).

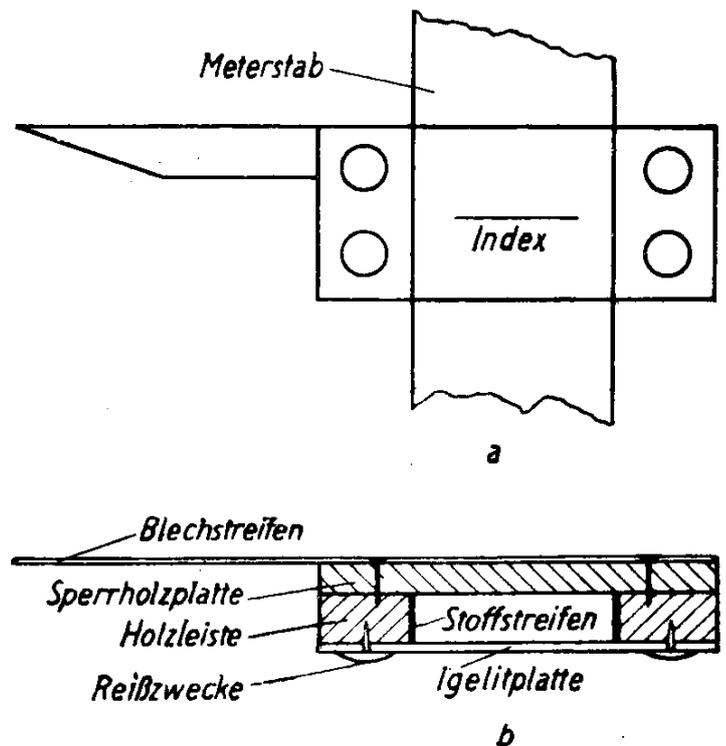


Abb. 24 Verschiebbarer Zeiger für einen Meterstab
a) Vorderansicht b) Querschnitt.

ZWEITES KAPITEL

Maße und Messen

§ 3. METHODISCHE BEMERKUNGEN

1. Maße der verschiedensten Art sind den Schülern aus dem täglichen Leben bekannt. Im physikalischen Unterricht sollen sie den sachgemäßen Gebrauch dieser Maße bei der Lösung von Aufgaben kennenlernen und Verständnis dafür gewinnen, wie man durch besondere *Meßwerkzeuge* und *Meßverfahren* die uns durch die unmittelbaren Sinneswahrnehmungen gegebenen Grenzen erweitern kann.

Die von einer bloßen Maßvergleichung bis zu einer genauen Messung führenden Schritte sind jedesmal beim Einführen einer neuen Größe deutlich zu machen. Zur Belebung des Unterrichtes wird man auch auf die historische Entwicklung des Meßwesens und die große Bedeutung einheitlicher Maße für Handel und Verkehr eingehen. In diesem Zusammenhange sind die Aufgaben der Eichämter und die Normungsbestrebungen als Grundlage einer planmäßigen Wirtschaft zu erörtern.

Zur Kennzeichnung physikalischer Größen und ihrer Einheiten sind die amtlich vorgeschriebenen oder sonst allgemein üblichen Abkürzungen zu verwenden. Im Buch sind, entsprechend den Vorschriften der DIN-Blätter 1301 und 1304, die Kurzzeichen für physikalische Größen, *Formelzeichen*, schräg (kursiv), die Kurzzeichen für Maßeinheiten, *Einheitszeichen*, senkrecht stehend (gerade) gedruckt. Es bedeutet z. B. l eine Länge, G ein Gewicht, t eine Zeit, dagegen m Meter, kg Kilogramm, s Sekunde.

Die Schüler sind anzuhalten, bei einem Meßergebnis die gemessene Größe, ihr Formelzeichen, die Maßzahl und die Maßeinheit anzugeben; Beispiel: „Die Länge des Bolzens beträgt $l = 3,50 \text{ cm}$ “. Die Ergebnisse von Meßreihen schreibt man zweckmäßig in Form von Tabellen, deren Kopf die physikalischen Größen bzw. die Formelzeichen und die Einheiten enthält. In den Spalten erscheinen dann nur die Maßzahlen (vgl. V 55 und V 81).

In physikalischen Formeln werden die Größen nur durch ihr Formelzeichen angegeben; die Einheiten werden nicht ausdrücklich genannt, z. B. $v = \frac{s}{t}$.

Die Schüler müssen damit vertraut werden, daß die Meßergebnisse streuen und daß ihnen nur innerhalb gewisser Grenzen eine verbürgte Genauigkeit zukommt. Die Bildung von *Mittelwerten* ist zu üben. Es ist auf den *absoluten* und den *relativen Fehler* einer Messung hinzuweisen. In dem Ergebnis muß die Genauigkeit der Messung aus der Zahl der angegebenen Dezimalstellen ersichtlich sein.

Dienen die Messungen als Grundlage für Rechnungen, wie z. B. bei der Bestimmung von Flächen- und Rauminhalten aus Längenmessungen, so sind die Ergebnisse der Rechnungen sinngemäß abzukürzen. Bei einer Produktbildung darf man nur so viel Ziffern als sicher ansehen, wie die kleinste Anzahl der sicheren Ziffern in einem der Faktoren beträgt. Sind z. B. die durch Messung bestimmten Seiten eines Rechtecks $a = 11,46 \text{ cm}$ und $b = 6,38 \text{ cm}$, so würde die genaue Rechnung für den Flächeninhalt $F = 73,1148 \text{ cm}^2$ ergeben. Da nur drei Ziffern als sicher gelten können, lautet das

Ergebnis: Der Flächeninhalt beträgt $F = 73,1 \text{ cm}^2$. In solchen Fällen ist es von Vorteil, von Anfang an mit *abgekürzten Dezimalbrüchen* zu rechnen. Bequemer als dieses Verfahren ist die Anwendung des Rechenschiebers. Es bestehen keine Bedenken gegen den Gebrauch dieses Hilfsmittels auch in der Grundschule, wenn man auf die Erörterung der theoretischen Grundlagen verzichtet. Bei der Benutzung des Rechenschiebers wird man von vornherein das Zustandekommen von Meßergebnissen mit einer nur vorgetäuschten Genauigkeit vermeiden. Seine Anwendung ist auch sonst von bildendem Wert, da sie zur Abschätzung der Größenordnung des Ergebnisses nötig ist.

Wenn Logarithmen verwendet werden, so kommen nur vierstellige Tafeln in Frage.

2. Es ist zweckmäßig, für *Längenmessungen* vor der ganzen Klasse einen Meterstab mit dm- und cm-Teilung zu benutzen, auf dem benachbarte Teile durch die Farbe unterschieden sind, so daß die Teilung auch aus der Ferne noch gut zu erkennen ist. Für genaue Messungen verwendet man einen der üblichen Maßstäbe mit mm-Teilung. Man versäume nicht, auch das *Schätzen* von Längen zu üben und Vergleichsmaße am menschlichen Körper und an Gegenständen des täglichen Gebrauchs heranzuziehen. Die Körper, an denen Längen zu messen sind, werden möglichst durch *Zeichnungen* (Schrägbild, Grundriß, Aufriß) veranschaulicht. Die gemessenen Längen werden durch Maßlinien und Maßpfeile bezeichnet.

Besonders einfach ist die *Raummessung* bei Flüssigkeiten. Man kann daher aus methodischen Gründen die Volumbestimmung der Flüssigkeiten an den Anfang stellen. Es ergibt sich dann ungezwungen die Ermittlung des Rauminhaltes fester Körper durch Wasserverdrängung.

Bei festen Körpern von einfacher Gestalt kann man, wie vom Mathematikunterricht her bekannt ist, den Rauminhalt auf Grund von Längenmessungen durch Rechnung bestimmen. Es ist nicht überflüssig, auch im Physikunterricht die Berechtigung dieser Methode zu zeigen und etwa einen zerlegbaren Würfel von 1 dm^3 Inhalt aus Würfeln von 1 cm^3 Inhalt, aus Stäbchen $1 \times 1 \times 10 \text{ cm}$ und aus Platten von $1 \times 10 \times 10 \text{ cm}$ aufzubauen. An diesem Beispiel läßt sich gut veranschaulichen, daß eine Größe immer nur mit einer gleichartigen verglichen und schließlich nur mit einer gleichartigen Einheit gemessen werden kann; die Einheit erscheint hier in greifbarer Form.

Dieser Sachverhalt bleibt unverändert, auch wenn man die zu messende Größe durch eine andere ersetzt, mit der sie funktional eindeutig verbunden ist, z. B. bei der Federwaage das Gewicht durch die Verlängerung der Feder, bei der Uhr die Zeit durch den Drehwinkel des Zeigers.

Die bei der Eichung eines Maßstabes in andersartigen Einheiten vorzunehmenden begrifflichen Operationen werden am Beispiel der Federwaage (V 48) erläutert.

3. Für *Gewichtsbestimmungen* werden benutzt: Federwaage, Hebelwaage, Tafelwaage, Briefwaage. Der Gebrauch dieser Geräte ist den Schülern aus dem täglichen Leben bekannt. Im physikalischen Unterricht werden sie zunächst wie Werkzeuge verwendet, ohne daß man auf die ihrer Wirksamkeit zugrunde liegenden physikalischen Gesetze eingeht. Diese werden erst erörtert, wenn der Unterricht die nötigen Grundlagen geschaffen hat. Es ist zweckmäßig, die ersten Gewichtsbestimmungen mit Federwaagen durchzuführen, damit sich von vornherein die gedankliche Verbindung zwischen den Begriffen Gewicht und Kraft festigt. Das Spannen einer Feder empfindet man unmittelbar als Äußerung einer Kraft.

Über Gewichtseinheiten siehe MB, S. 37!

4. Als *Zeitmesser* kommen in erster Linie die Taschenuhr mit Sekundenzeiger und die vom Sportunterricht her bekannte Stoppuhr in Frage. Wünschenswert ist eine größere Stoppuhr, die von der gesamten Klasse beobachtet werden kann. Für viele Zwecke ist ein Metronom recht brauchbar, weil auf ihm der Ablauf der Zeit eindringlich durch das Ohr wahrgenommen werden kann und die gleichzeitige visuelle Beobachtung eines Vorganges nicht gestört wird. Das Metronom bietet auch den Vorteil, die zur Messung verwendete Zeiteinheit den Bedingungen des Versuchs anzupassen, z. B. beim Fall auf der schiefen Ebene.

Zum Festlegen einer konstanten Zeitspanne ohne Bezugnahme auf Schwingungsvorgänge lassen sich mit Erfolg Sanduhren verwenden.

§ 4. LÄNGEN- UND RAUMMESSUNGEN

1. Einfache Längenmessungen [G-Ü]

Meterstab aus Holz mit dm- und cm-Teilung (benachbarte Teile sind durch die Farbe unterschieden), Meterstab aus Holz mit cm- und mm-Teilung, Gliedermaßstab (Zollstock), Bandmaß aus Stahl (Rollmaß), Schneidermaß, techn. Bandmaß (10 ... 20 m lang), Metallmaßstab (30 cm lang, mit cm- und mm-Teilung).

a) Es werden gemessen:

mit Meterstäben verschiedener Teilung, Gliedermaßstab, Rollmaß: Heftdeckel, Holzquader, Federkasten, Tischplatte, Wandtafel, Papierkasten, Klassenraum;

b) mit Bandmaß aus Stoffgewebe (Schneidermaß): Brustumfang, Umfang eines Becherglases, eines Zylinders, größter Kugelkreis eines Fußballs;

c) mit technischem Bandmaß (Abb. 25): Schulhof, Flurlänge, Straßenbreite, Höhe des Fenstersimses über dem Erdboden.

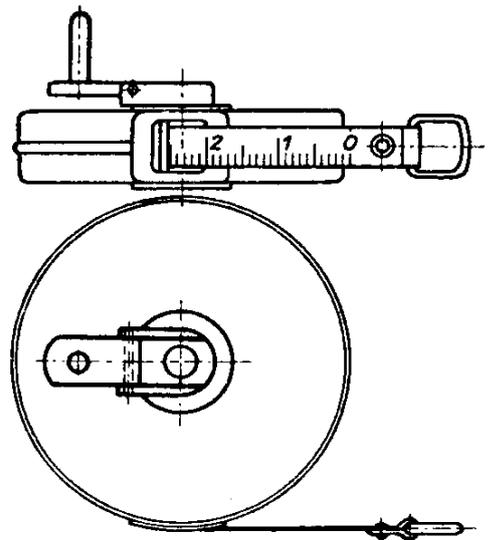


Abb. 25 Technisches Bandmaß

Bemerkungen:

1. Schon auf der Grundschule ist zu beachten, daß jedem Maßstab Fehler anhaften, die durch Unvollkommenheiten des Materials und der Herstellung bedingt sind und jede Messung in gleichem Sinne beeinflussen: *systematische Fehler*. Davon zu unterscheiden sind *subjektive* oder *zufällige* Fehler, die von der Art des Beobachtens und vom Beobachter selbst abhängen. Sie können durch Verbesserung der Meßtechnik verringert werden. Das gleiche gilt für alle anderen Meßgeräte.
2. Um die Begriffe des Mittelwertes, des absoluten und des relativen Fehlers zu entwickeln, ist es zweckmäßig, dieselben Gegenstände mehrfach und mit verschiedenen Maßstäben zu messen.

2. Messungen mit dem Spiegelmaßstab [G-Ü]

Spiegelmaßstab, zylindrischer Bolzen (an dem einen Ende abgerundet, an dem anderen zugespitzt), Nägel, Schrauben und andere Meßkörper.

Der Zweck des Spiegelmaßstabes ist die Vermeidung des durch Schrägablesung entstehenden Fehlers.

Man stellt einen Spiegelmaßstab her, indem man einen Streifen Millimeterpapier oder sonst eine mm-Teilung auf einen Spiegel klebt.

Der Bolzen wird unmittelbar neben die Teilung auf den Spiegel gelegt. Beim Ablesen muß der Blick senkrecht zur Teilung gerichtet sein. Dies wird erreicht, wenn sich das Ende des Bolzens und sein Spiegelbild für den Beobachter decken (Abb. 26).

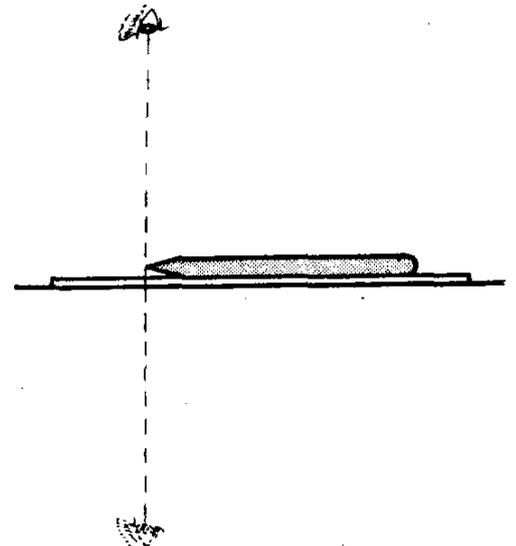


Abb. 26 Ablesen am Spiegelmaßstab

3. Modellversuch zur Schieblehre [G-Ü]

Schieblehre, Modell des Nonius (Selbstanfertigung) mit einer Hauptteilung in cm, wenn möglich auch ein größeres Modell mit dm-Teilung, Meßkörper (Rundholz, Geldstück, Holzklötz).

Die *Schieblehre* (Abb. 27) trägt außer der Hauptteilung auf dem Rande des verschiebbaren Fensters noch eine Nebenteilung, den *Nonius*. Sind die beiden Schenkel zusammen geschoben, so stehen die Anfangsstriche beider Teilungen genau übereinander. Es ist dann ersichtlich, daß 10 Teile auf dem Nonius 9 Teilen der Hauptteilung entsprechen.

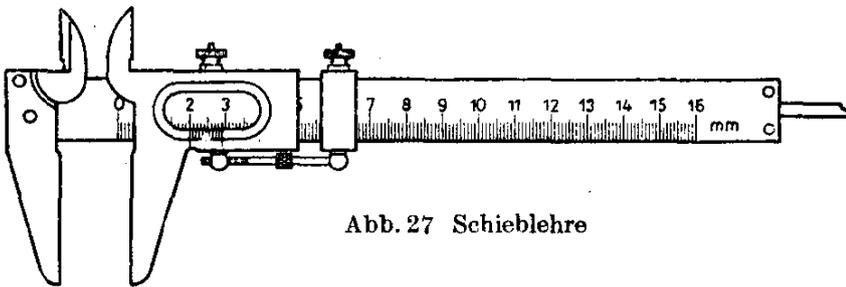
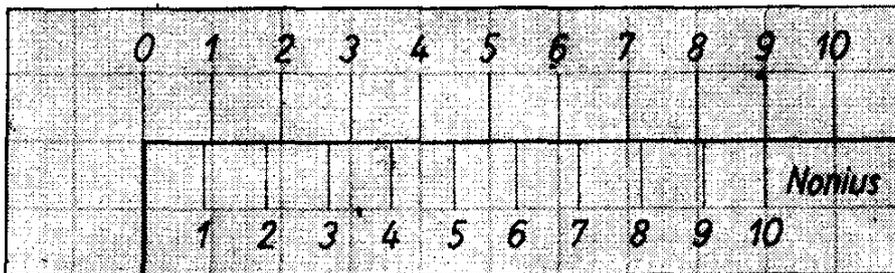


Abb. 27 Schieblehre

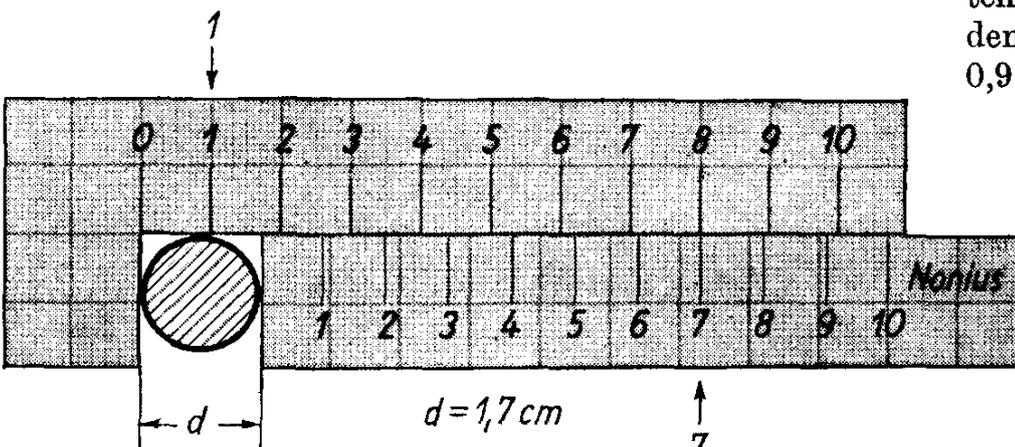
Ein Teil des Nonius ist also $\frac{9}{10}$ eines Teiles der Hauptteilung, und der Unterschied zwischen einem Teil der Hauptteilung und einem Teil der Teilung des Nonius beträgt $\frac{1}{10}$ der Einheit der Hauptteilung.

Ein Modell eines Nonius kann sich jeder Schüler aus Pappe mit aufgeklebtem mm-Papier anfertigen (Abb. 28).

Die Hauptteilung ist dann eine Zentimeterteilung. Eine Einheit auf dem Nonius ist also 0,9 cm lang. Verschiebt



a



$d = 1,7 \text{ cm}$

b

Abb. 28
Modell eines Nonius
a) Nullstellung
b) Schema einer Messung

man den Nonius aus der Nullstellung (Abb. 28a), bis sein erster Teilstrich mit dem Teilstrich 1 der Hauptteilung zusammenfällt, so beträgt der Abstand zwischen den Backen 0,1 cm. Wenn bei einer Verschiebung des Nonius ein anderer Teilstrich mit einem Teilstrich der Hauptteilung zusammenfällt, so braucht man nur abzuzählen, der wievielte Teilstrich dies auf dem Nonius ist, um die Entfernung zwischen den Backen in Zehnteln eines Teiles der Hauptteilung zu erhalten. In Abb. 28b ist die Messung des Durchmessers d einer Walze dargestellt. Es ergibt sich unmittelbar, daß d zwischen 1 cm und 2 cm liegt. Da der 7. Teilstrich des Nonius mit einem Teil der Hauptteilung zusammenfällt, ist $d = 1,7$ cm.

4. Messungen mit der Schieblehre [G-Ü]

Schieblehre, Quader aus Holz oder Glas, Walzen, Röhren, Drähte, rechteckige Blechstücke, Sechskantmutter mit passendem Bolzen.

Gemessen werden alle Längsausdehnungen: Länge, Breite, Höhe, Dicke, Durchmesser, lichte Weite unter Bildung von *Mittelwerten*.

Berechnet werden: Flächen- und Rauminhalte.

Zur Veranschaulichung dienen: Schrägbild, Grundriß und Aufriß; die Maße sind mit Maßlinien und -pfeilen einzutragen.

Beispiele:

1. Messungen an einem Quader (Kanten).
2. Messungen an einem Zylinder (Durchmesser, Höhe).
3. Messungen an einer Sechskantmutter (Schlüsselweite, Spitzkant, Kerndurchmesser, Gewindedurchmesser).
Siehe dazu Abb. 29!

Bemerkung: Um die Dicke eines einzelnen Blattes eines Buches festzustellen, mißt man die Gesamtdicke einer größeren Zahl von Blättern und dividiert das Ergebnis durch die Anzahl der Blätter.

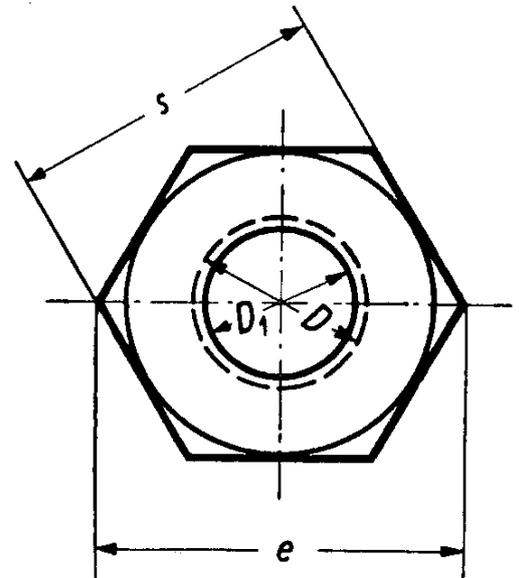


Abb. 29
Sechskantmutter
mit metrischem Gewinde
Beispiel:

Schlüsselweite... $s = 22$ mm
Spitzkant $e = 25,4$ mm
Kerndurchmesser $D_1 = 9,7$ mm
Gewindedurchmesser (am Bolzen gemessen) .. $D = 12,2$ mm

5. Modellversuch zur Mikrometerschraube [G-Ü]

Hölzerne Schraubzwinde, zylindrische Schachtel, Holzklötz.

Der Mantel einer zylindrischen Schachtel wird mit weißem Papier beklebt und der Umfang in 10 gleiche Teile geteilt. Die Schachtel wird in der Achsenrichtung durchbohrt und am Griff auf der Spindel der Schraubzwinde befestigt (Abb. 30). Ein am Körper der Zwinde angebrachter gebogener Blechstreifen dient als Zeiger zum Feststellen der Größe

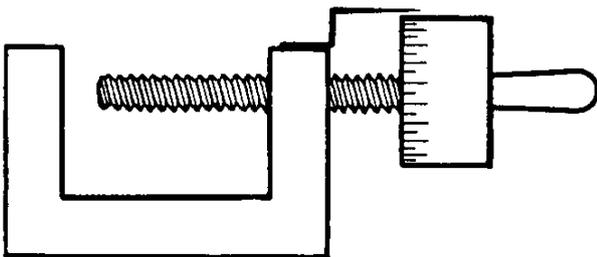


Abb. 30 Modell einer Mikrometerschraube

der Drehung und damit des Vorrückens der Spindel. Bei einer vollen Umdrehung verschiebt sich die Spindel um die Höhe eines Schraubenganges. Mit Hilfe der angegebenen Teilung kann man also eine Verschiebung der Spindel bis auf $\frac{1}{10}$ der Ganghöhe messen. Der tote Gang ist dabei zu beachten. Man zeigt den Meßvorgang an einem Holzklötz.

6. Messungen mit der Mikrometerschraube [O-Ü]

Mikrometerschraube, Objektträger, Deckgläschen, Schablonenblech, Linsen, Drähte, Glasfäden, Haare.

Die Mikrometerschraube (Abb. 31) enthält eine flachgängige Schraube von 1 mm oder 0,5 mm Ganghöhe und gestattet, Dickenunterschiede von 0,02 bzw. 0,01 mm festzustellen. Gegebenenfalls sind Nullpunktabweichungen zu berücksichtigen.

Es ist auf gleichmäßigen Meßdruck zu achten. Der Meßdruck wird gefühlsmäßig nach dem Widerstand beurteilt,

mit dem die Finger beim Einstellen über die Fischhaut der Spindel gleiten. Zur objektiven Einhaltung des gleichen Meßdruckes sind Mikrometerschrauben häufig mit einer Feineinstellung für den Meßdruck versehen.

Die oben angegebenen Gegenstände werden auf gleichmäßige Dicke geprüft.

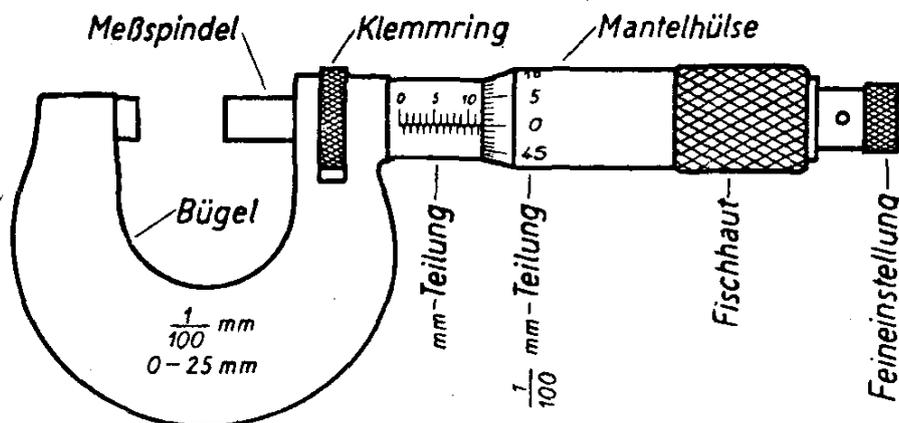


Abb. 31 Mikrometerschraube

7. Raummessung von Flüssigkeiten mit Hohlmaßen [G, O-Ü]

Hohlmaße von 0,5 und 1 l Inhalt (am besten Blechgefäße), Meßzylinder von 10–50–100–250–500 cm³ Inhalt. Bechergläser, Flaschen, Glastrog und andere Gefäße, Eßlöffel, Teelöffel, Tropffläschchen.

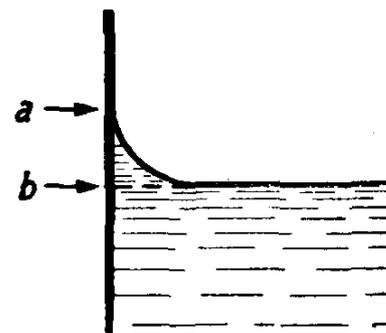
Über das Messen von Rauminhalten siehe MB, S. 27!

Beispiele:

- Feststellen des Rauminhalts von Bechergläsern, Flaschen, eines Glastrogs usw. durch Umgießen von Wasser aus einem Meßzylinder.
- Bestimmen des Fassungsvermögens eines Eßlöffels und eines Teelöffels durch wiederholtes Einfüllen in einen Meßzylinder.
- Ermitteln der Größe eines Tropfens durch Eintropfen der Flüssigkeit in einen kleinen Meßzylinder und Auszählen der Tropfen.

Bemerkungen:

- Beim Umgießen von Flüssigkeit aus dem Meßzylinder in ein Gefäß bleiben unvermeidlicherweise Flüssigkeitstropfen an der Wand des Meßzylinders hängen. Um die dadurch entstehenden Fehler auszugleichen, spült man den Meßzylinder vor Einfüllen der Flüssigkeit mit dieser aus und läßt ihn gut abtropfen.
- Wegen der Randkrümmung der Flüssigkeit ist für die Ablesung nicht der Flüssigkeitsrand, sondern die Mitte der Oberfläche maßgebend (Abb. 32).
- Bei genauen Messungen ist die Temperatur zu berücksichtigen.



Nicht bei a, sondern bei b ablesen!

Abb. 32 Benetzende Flüssigkeit, Berücksichtigung der Randkrümmung

8. Raummessung fester Körper durch Wasserverdrängung im Meßzylinder [G-Ü]

Meßzylinder, Steine, Metallstücke, dünner Draht.

Der Meßzylinder wird zum Teil mit Wasser gefüllt und der Wasserstand abgelesen (vgl. V 7). Der an einem dünnen Draht befestigte Körper wird eingesenkt. Luftblasen sind durch wiederholtes Heben und Senken des Körpers oder mit Hilfe eines Drahtes zu beseitigen. Aus der Differenz zwischen dem neuen und dem alten Wasserstand ergibt sich das Volumen des Körpers. Man gewöhne die Schüler daran, vor der Messung den Rauminhalt abzuschätzen.

9. Raummessung fester Körper mit dem Überlaufgefäß [G-Ü]

Überlaufgefäß, Unterlegklötze, zwei Bechergläser oder Töpfe, Meßzylinder, Stein, Kartoffel, Korken, ein Stück Paraffin, dünner Draht, Blei- oder Eisenstück zum Beschweren, Schrot, kleine Nägel.

Abb. 33 zeigt verschiedene Formen von Überlaufgefäßen. Gefäße mit angeblasenem Abflußrohr sind unzweckmäßig, da ein Ersatz eines abgebrochenen Rohres umständlich ist. Behelfsmäßig kann man ein Überlaufgefäß herstellen, indem man nach Abb. 33 b ein gebogenes Glasrohr mittels einer Schelle und einer Federklammer an einem geeigneten Glasgefäß befestigt. Es ist vor dem Einsetzen in das gefüllte Gefäß vollständig mit Wasser zu füllen. Das Überlaufgefäß wird so hoch gestellt (Abb. 34), daß das Wasser in den Meßzylinder fließen kann. Während des Versuches darf die Lage des Überlaufgefäßes nicht verändert werden. Zu Beginn des Versuchs wird ein Becherglas untergestellt und so viel Wasser in das Überlaufgefäß gegossen, daß es abfließen kann. Wenn kein Wasser mehr ausfließt, wird das Becherglas durch den Meßzylinder ersetzt und der zu messende Körper eingesenkt (Luftblasen entfernen!). Die ausgeflossene Wassermenge gibt das Volumen des Körpers an.

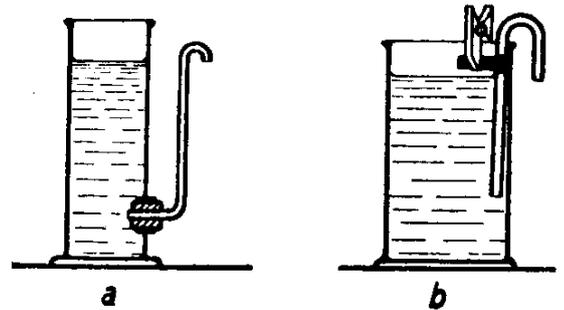


Abb. 33 Verschiedene Formen von Überlaufgefäßen

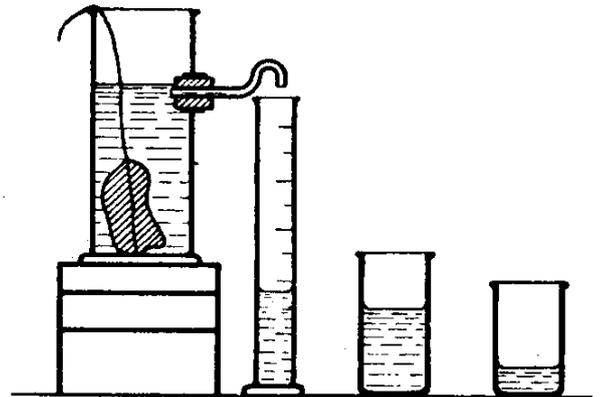


Abb. 34 Raummessung eines festen Körpers mit dem Überlaufgefäß

Bemerkungen:

1. Nach demselben Verfahren kann man auch den durchschnittlichen Rauminhalt einer größeren Zahl gleichartiger kleiner Gegenstände (Schrotkugeln, Nägel) bestimmen, indem man ihren Gesamtrauminhalt bestimmt und durch die Anzahl der Körper teilt.
2. Körper mit einer geringeren Wichte als Wasser (z. B. ein Korke oder ein Stück Paraffin) werden an gegenüberliegenden Stellen mit Drahtösen versehen. Die untere dient zum Anhängen eines Blei- oder Eisenstückes, die obere zum Befestigen des Aufhängedrahtes. Man bestimmt das Volumen des zusammengesetzten Körpers und des Metallstückes. Das Volumen des Versuchskörpers ergibt sich dann aus beiden als Differenz.

§ 5. GEWICHTSBESTIMMUNGEN

10. Wägung fester Körper [G-Ü]

Technische Federwaage (Sackwaage), Federwaage nach Maey, Briefwaage, oberhalbige Tafelwaage, Hebelwaage, Gewichtssatz. Meßkörper verschiedener Art und Größe, z. B. Stein, Kartoffel, Eßlöffel, Kaffeelöffel, Zange, Hammer, Heft, Holzklötz, Nägel, leere Schachtel, Sand, Eimer mit Kohlen, Korb mit Kartoffeln, Becherglas, Schlüssel, Ziegelstein.

Die Versuche sollen die Schüler mit den verschiedenen Arten der Waagen bekannt und mit der Technik des Wägens vertraut machen. Sie sollen ihnen zeigen, daß sich die Wahl der Waage nach dem Gewicht des Meßkörpers, nach dem Zweck der Wägung und nach der gewünschten Genauigkeit richtet.

Beispiele:

Meßkörper	Waage
a) Korb mit Kartoffeln, Eimer mit Kohle	technische Federwaage, 10 kp (Sackwaage)
b) Schlüssel, kleiner Stein an dünnem Draht	Maey'sche Federwaage, 100 p (Abb. 35)
c) Kartoffel, Heft, Kaffeelöffel, Nägel	Briefwaage
d) Schachtel mit Sand, Ziegelstein, Zange, Hammer	oberhalbige Tafelwaage
e) Becherglas, einzelner Nagel, Eßlöffel	Hebelwaage

Für viele Zwecke, insbesondere für Schülerübungen, genügt eine einfache Hornschalenwaage (Abb. 36).

Bei der Tafelwaage und bei der Hebelwaage gewinnt man das Gewicht durch Eingrenzen innerhalb jeder Zehnergruppe des Gewichtssatzes.

Beispiel für eine Wägung: Ein Becherglas ist

schwerer als 100 p – leichter als 200 p
 schwerer als 120 p – leichter als 130 p
 schwerer als 126 p – leichter als 127 p
 schwerer als 126,4 p – leichter als 126,5 p

Die Abweichung von der Nullage ist bei 126,5 p geringer als bei 126,4 p.

Mithin wiegt das Becherglas 126,5 p.

Beim Gebrauch einer empfindlichen Hebelwaage sind zur Vermeidung von Meßfehlern folgende Hinweise zu beachten:

1. Mittelsäule mittels Lot oder Dosenlibelle senkrecht ausrichten.

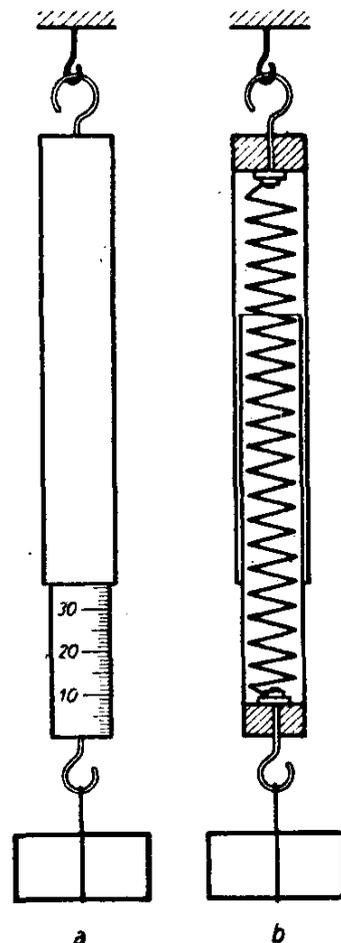


Abb. 35
Maey'sche Federwaage
a) Ansicht b) Schnitt

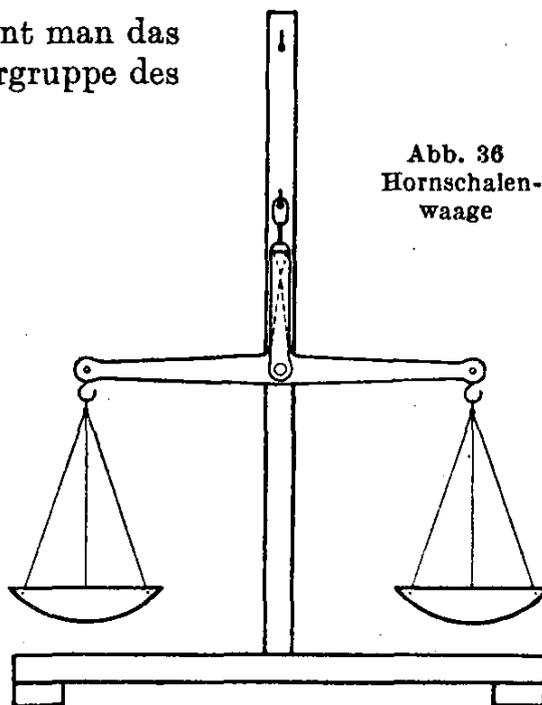


Abb. 36
Hornschalen-
waage

2. Feststellvorrichtung (Arretierung) lösen und Waage auf richtiges Einspielen des Zeigers in die Nullage prüfen. Gegebenenfalls Ausgleich durch aufgelegte Papierstückchen.
3. Vor Auflegen bzw. Abheben des Meßkörpers und der Gewichtsstücke ist die Waage zu arretieren. Freischwingende Waage niemals berühren!
4. Gewichtsstücke nie mit den Fingern anfassen; Pinzette benutzen!
5. Waage nie über ihre Tragfähigkeit hinaus belasten!

11. Bestimmung des Flächeninhaltes einer ebenen Figur durch Wägung [G-Ü]

Eine Tafel aus Pappe oder Blech, Waage, Gewichtssatz, Schieblehre oder kleiner Maßstab.

Aus derselben Papp- bzw. Blechtafel werden ein Stück mit beliebiger Umrandung und ein Rechteck ausgeschnitten. Beide Stücke sind Zylinder bzw. Prismen von gleicher Höhe, nämlich der Dicke der Tafel. Ihre Grundflächen F_1 und F_2 verhalten sich daher wie ihre Rauminhalte und auch wie ihre Gewichte G_1 und G_2 :

$$F_1 : F_2 = G_1 : G_2.$$

Beim Rechteck kann man den Inhalt F_2 aus den Seiten berechnen. Dann gilt für den Flächeninhalt des andern Stückes:

$$F_1 = \frac{G_1}{G_2} \cdot F_2.$$

Bei dieser und bei ähnlichen Aufgaben kann man die Rechnungen auch in Tabellenform durchführen.

Beispiel: Rechtecksseiten $a = 10$ cm, $b = 12$ cm, Flächeninhalt des Rechtecks $F_2 = 120$ cm², Gewicht des rechteckigen Stückes $G_2 = 36,0$ p, Gewicht des anderen Stückes $G_1 = 28,5$ p.

Gewicht p	Flächeninhalt cm ²
36,0	120
1	$\frac{120}{36} = \frac{10}{3}$
28,5	$\frac{10}{3} \cdot 28,5 = 95$

Der gesuchte Flächeninhalt beträgt $F_1 = 95$ cm².

Bemerkung: Man kann in der angedeuteten Weise auch den Inhalt von Kreisen mit gegebenen Durchmessern bestimmen und dann einen Näherungswert für π berechnen.

12. Bestimmung des Rauminhaltes eines Gefäßes durch Wägung [G-Ü]

Tafelwaage, Tarierbecher, Schrot, Gewichtssatz, Standkolben, Standzylinder, Becherglas.

Man bringt an dem Gefäß eine Marke an und tariert es, füllt bis zur Marke Wasser ein und bestimmt dessen Gewicht. Die Maßzahl des Gewichtes in p ist dann mit einer meist hinreichenden Genauigkeit gleich der Maßzahl des Rauminhaltes in cm³. Bei genaueren Messungen muß die Temperatur berücksichtigt werden.

§ 6. ZEITMESSUNGEN

13. Zeitmessung mit der Sanduhr [G-Ü]

Trichter, Stativ mit Ring oder einer anderen Haltevorrichtung für den Trichter, feiner trockener Sand (Seesand), feines Drahtsieb, Gefäß zum Auffangen des Sandes, Meßzylinder, käufliche Sanduhr, zwei gleich große Erlenmeyerkolben mit einmal durchbohrtem Stopfen und passendem Glasrohr.

Ausführung a: Vor dem Versuch wird der Sand gesiebt. Man verschließt das Trichterrohr (Abb. 37) mit dem Finger und schüttet in den Trichter eine abgemessene Menge Sand. Nach Freigabe der Öffnung läuft der Sand aus. Das Ausfließen beansprucht eine gewisse Zeit. Man kann dieser einen willkürlich gewählten Namen geben, z. B. „Sandminute“. Dann kann man dieses Maß zur Beurteilung der Dauer eines Vorganges benutzen.

Ausführung b: Aus zwei kleinen Erlenmeyerkolben kann man eine Sanduhr zusammensetzen (Abb. 38). Wenn hier auch der Sand nicht vollständig ausfließt, so ist das Gerät zur Veranschaulichung doch brauchbar, da jedesmal annähernd die gleiche Sandmenge zurückbleibt.

Die Angaben käuflicher Sanduhren prüft man mit Hilfe einer Taschenuhr nach.

14. Zeitmessung mit der Wasseruhr [O]

Flasche mit seitlichem Tubus, zwei Gummistopfen mit je einer Bohrung, gerades Glasrohr, rechtwinklig gebogenes Glasrohr mit Hahn oder Gummischlauch und Quetschhahn, Unterstellkasten*, Schale zum Auffangen des Wassers, Meßzylinder, Taschenuhr oder Stoppuhr.

Wir setzen aus den genannten Geräten eine Mariottesche Flasche zusammen und lassen aus ihr Wasser tropfenweise ausfließen. Durch Eintropfen in einen Meßzylinder und Auszählen der Tropfen finden wir, daß in gleichen Zeiten gleiche Wassermengen aus der Flasche fließen. Die Zeitspanne zwischen zwei Tropfen gibt eine behelfsmäßige kleine Zeiteinheit. Durch Einstellen des Hahnes kann man diese Einheit willkürlich ändern und so abgleichen, daß sie zur Sekunde in einer einfachen Beziehung steht.

Bemerkung: Am Ende des senkrechten Rohres (Abb. 39) ist der Druck stets gleich dem äußeren Luftdruck. Die Luft in der Flasche steht unter einem geringeren Druck als außen, und zwar ist der Unterschied zwischen Außen- und Innendruck gleich dem Druck, der einer Wassersäule von der Höhe h entspricht. Es wird durch diese Vorrichtung erreicht, daß das Wasser immer mit der gleichen Geschwindigkeit ausfließt.

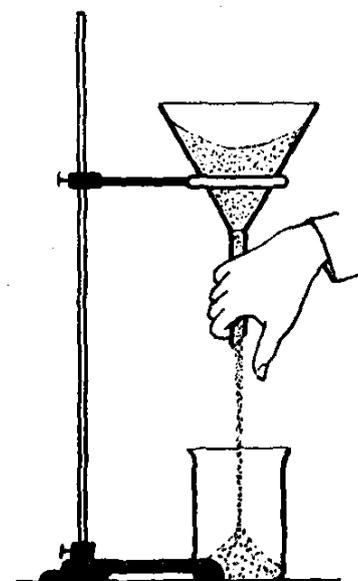


Abb. 37 Zeitmessung durch ausfließenden Sand

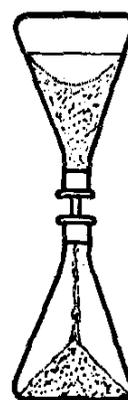


Abb. 38 Modell einer Sanduhr

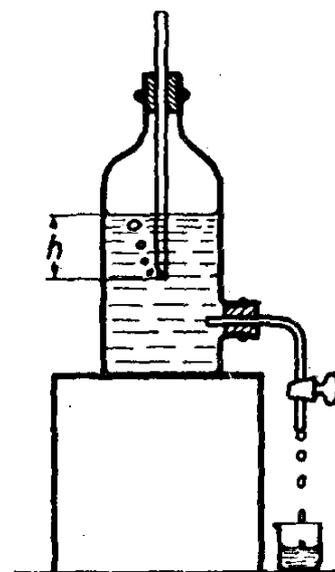


Abb. 39 Zeitmessung durch ausfließendes Wasser

15. Vergleich zwischen Sanduhr und Fadenpendel – Zeiteilung [G, O]

Sanduhr, Fadenpendel von stetig veränderbarer Länge, Federklammer, Stativ mit Muffe.

Durch eine Sanduhr ist uns ein bestimmtes Zeitmaß gegeben. Wir zählen die Schwingungen eines Pendels in der Zeitspanne, in der die Sanduhr einmal abläuft. Man kann die Länge des Pendels so abgleichen, daß es während der festgelegten Zeiteinheit eine ganze Anzahl von Schwingungen macht. Die Beobachtung zeigt, daß diese Zahl sich bei Wiederholungen des Versuchs nicht ändert, wenn die Ausschläge des Pendels klein sind, daß also eine Schwingung des Pendels stets dieselbe Zeit beansprucht, wenn auch die Schwingungsweite abnimmt. Damit haben wir die Möglichkeit gewonnen, einen Zeitraum genau zu teilen und mit Hilfe eines Fadenpendels verschiedene Zeitspannen recht genau zu vergleichen.

Bemerkung: Der Faden des Pendels wird von einer Federklammer gehalten, die in senkrechter Lage an ein Stativ geklemmt ist.

16. Zeitmessung mit dem Stabpendel [G, O]

Fadenpendel, Sanduhr, Holzleiste mit Bohrungen, Stativ mit Muffe, Lagerzapfen*, Metallstücke, Draht.

Als Stabpendel dient eine an einem Lagerzapfen aufgehängte Holzleiste (Abb. 40). Versuchsablauf wie bei V 15.

Die Beobachtung zeigt, daß auch bei einem Stabpendel die Schwingungsdauer bei kleinen Ausschlägen unabhängig von der Schwingungsweite ist. Das Stabpendel ist daher ein ebenso brauchbarer Zeitmesser wie das Fadenpendel. Man kann an verschiedenen Stellen der Leiste Metallstücke mit Draht befestigen und damit die Schwingungsdauer des Stabpendels beeinflussen. Diese ändert sich auch, wenn man einen anderen Aufhängepunkt wählt. Das Stabpendel kann nach Sekunden geeicht werden.

Bemerkung: Es gibt Stabpendel, bei denen das Ende jeder halben Schwingung durch einen Anschlag hörbar gemacht wird.

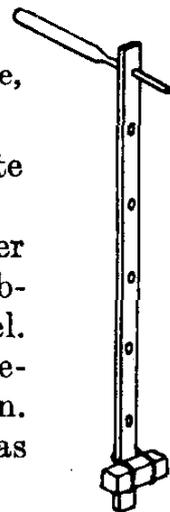


Abb. 40
Stabpendel

17. Zeitmessung mit dem Metronom [G, O]

Metronom, Stabpendel, zwei Blei- oder Eisenstücke, Lagerzapfen*, Stativ mit Muffe, Taschenuhr (Stoppuhr).

Das Prinzip des Metronoms erläutert man durch ein Stabpendel (vgl. V 16), bei dem man beiderseits vom Drehpunkt eine Masse anbringt. Die obere befestigt man mit Draht in der Weise, daß man sie wie ein Laufgewicht verschieben kann. Wir stellen das Metronom mit Hilfe der Taschenuhr (Stoppuhr) auf $\frac{1}{2}$ s und auf 1 s ein.

Als Zeiteinheit gilt bei Messungen mit dem Metronom die Dauer zwischen zwei Schlägen, also die Hälfte der Schwingungsdauer.

DRITTES KAPITEL

Physikalische Grundeigenschaften der Körper

§ 7. METHODISCHE BEMERKUNGEN

1. Die Versuche über die *physikalischen Grundeigenschaften* der Körper werden hier aus rein systematischen Gründen geschlossen dargeboten, um dem Lehrer einen Überblick über vorhandene Möglichkeiten zu geben und ihm das Auffinden geeigneter Versuche zu erleichtern. Auf eine zusammenhängende Behandlung im Unterricht soll damit keineswegs hingedeutet werden.

Gerade die Grundeigenschaften der Körper erfordern zu ihrer Klärung ein erhebliches Maß an Abstraktion und sind unmittelbarer Beobachtung nur zum geringen Teil zugänglich. Ein geschickter Unterricht wird daher bei der Darbietung dieses an sich etwas spröden Stoffes jede starre Systematik vermeiden. Er wird die Erarbeitung der Grundeigenschaften in den übrigen physikalischen Lehrstoff einflechten und jeweils das von ihnen bringen, was zum Verständnis des gerade behandelten Sachgebietes erforderlich ist. Es darf dabei nicht übersehen werden, daß der Schüler im Laufe des physikalischen Gesamtunterrichts in mehreren Erkenntnisstufen zur Klarheit vordringt, was an der allmählichen Entwicklung des Molekül- und Atombegriffes, aber auch des Massenbegriffes besonders sinnfällig wird.

2. Eine besondere Bedeutung kommt dem § 9 zu, der die experimentelle Behandlung der Begriffe *Gewicht* und *Masse*, sowie *Wichte* und *Dichte* zum Gegenstand hat. Ein klar angelegter physikalischer Unterricht wird von vornherein darauf hinarbeiten, völlige Einsicht in die Gleichwertigkeit der Begriffe *Gewicht* und *Kraft* einerseits, *Masse* und *Trägheit* andererseits zu erreichen. Unklarheiten in dieser Hinsicht wirken sich später verhängnisvoll aus. Auf der Grundschule werden dabei die Begriffe *Masse* und *Dichte* zunächst weniger hervortreten.

Es ist daher kein Zufall, sondern wohlüberlegte Absicht, wenn beim ersten Versuch, der zur Bekanntschaft mit dem Begriffspaar *Gewicht* und *Wichte* führt – mag es nun Versuch 25 oder ein anderer sein – eine Federwaage, beim ersten zum Begriffspaar *Masse* und *Dichte* führenden Versuch (V 27) eine Hebelwaage als Meßgerät verwendet wird. Obwohl beide Versuche sonst in ihrem Ablauf einander völlig gleichen, ist doch ihre Durchführung nebeneinander dringend zu empfehlen. Der erste Versuch will die Vorstellung der Gewichtsermittlung als einer Kraftmessung, der zweite die Vorstellung der Wägung als eines Massenvergleiches erwecken und festigen. Durch die Wahl des Meßgerätes soll dieser Unterscheidung Rechnung getragen werden. Es ist einleuchtend, daß diese Erwägungen bei zunehmender Vertrautheit der Schüler mit den Begriffen *Gewicht* und *Masse* zurücktreten können und daß bei praktischen Wägungen – Massen- wie Gewichtsbestimmungen – die Hebelwaage das vorherrschende Gerät sein wird.

3. Leider wird die Begriffsbildung durch die Zwiespältigkeit, die im Gebrauch des Wortes *Kilogramm* zur Bezeichnung der *Massen-* wie der *Gewichtseinheit* liegt, erheblich erschwert. Das *Kilogramm* ist seinem Ursprung nach eine *Masseneinheit* und wird

als solche in der Physik verwendet. In der Technik aber und in der Umgangssprache hat sich seine Bedeutung verlagert; es dient dort als Gewichtseinheit und zur Angabe von Stoffmengen.

Dieses Nebeneinander im Gebrauch desselben Wortes zur Bezeichnung der Einheiten für so heterogene Größen, wie es Masse und Gewicht sind, muß notwendigerweise die Verständigung über diese Dinge erschweren und bringt die Gefahr der begrifflichen Unklarheit mit sich. Die Schule aber kann ihre in der Erziehung zum wissenschaftlichen Denken liegende Aufgabe nur dann erfüllen, wenn sie von vornherein jede Unklarheit vermeidet.

Das Buch stellt sich eindeutig auf den Standpunkt, daß für Massen- und Gewichtseinheiten unterschiedliche Bezeichnungen zu verwenden sind. Es schließt sich damit einer Regelung an, die im neueren physikalischen Schrifttum allgemeine Verbreitung gefunden hat und auch von den Lehrbüchern der Physik für die Oberschule wie für die Grundschule übernommen worden ist. Danach bezeichnen *Kilogramm* und *Gramm* ausschließlich Masseneinheiten. Als Gewichts- und Krafteinheiten dagegen werden das *Kilopond* und das *Pond*¹⁾ – abgekürzt kp und p – eingeführt. Das Kilopond ist gleichbedeutend mit dem Gewichtskilogramm; es ist das in Meereshöhe und bei einer geographischen Breite von 45° festgestellte Gewicht eines in Paris als Prototyp aufbewahrten Vergleichskörpers aus Platin-Iridium, der die Masse von 1 kg hat. Durch die Wahl einer neuen Bezeichnung für die Gewichtseinheit wird der Unterschied zwischen Masse und Gewicht nach außen hin stark betont.

Es gilt für das Buch folgende Festsetzung:

<i>Masseneinheiten:</i>	Kilogramm	(kg)
	Gramm	(g)
<i>Gewichtseinheiten:</i>	Kilopond	(kp)
	Pond	(p)

§ 8. RAUMINHALT UND GESTALT

18. Kennzeichnen des festen und flüssigen Aggregatzustandes durch Vergleich von Rauminhalt und Form [G]

Holzklötz, Glasschale; Litermaß, Meßglas, Glasgefäße möglichst verschiedener Form.

1. Ein Holzklötz wird in wechselnder Lage auf den Tisch gelegt: flach liegend, hochkant stehend, schräg angelehnt, seitlich überstehend, in einer Schale liegend. Feste Körper haben einen unveränderlichen Rauminhalt und eine eigene, unveränderliche Gestalt.
2. In einem Litermaß wird $\frac{1}{2}$ l Wasser abgemessen und in verschiedene Gefäße umgegossen. Flüssige Körper haben einen unveränderlichen Rauminhalt, aber eine veränderliche Gestalt. Die Zusammendrückbarkeit der Flüssigkeiten wird hierbei vernachlässigt, da sie nur bei höheren Drucken unter Verwendung besonderer Hilfsmittel wahrnehmbar wird. Ebenso bleibt der Einfluß von Temperaturänderungen auf den Rauminhalt unberücksichtigt.

¹⁾ Nach dem etwas anders lautenden Vorschlag von F. Hoffmann (1934): pondus.

19. Unterscheidung des flüssigen und gasförmigen Aggregatzustandes Versuch mit der Knallbüchse [G]

Glasrohr (\varnothing 10...15 mm, Länge 250...300 mm), 2 gutsitzende Korke, Holzstab.

Die Veränderlichkeit der Form bedarf bei Gasen keiner experimentellen Behandlung. Die Veränderlichkeit des Rauminhalts läßt sich gut mit einem knallbüchsenähnlichen, nach Abb. 41 a und b aus einer Glasröhre und zwei Korke leicht zusammenstellbaren Gerät veranschaulichen. Die Korke müssen dicht schließen, trotzdem aber verschiebbar sein. (Vor Gebrauch auskochen!)

Man stößt einen Korke in die Röhre etwa bis zu ihrer Mitte hinein und füllt die eine Röhrenhälfte mit gefärbtem Wasser. Dann verschließt man den gefüllten Teil mit einem zweiten Korke, wobei man es vermeiden muß, daß Luft unter den Korke tritt. Die Wassersäule läßt sich durch Druck auf einen der beiden Verschlüßkorke ohne Längenänderung hin und her schieben (Abb. 41 a). Luft als Füllung läßt sich dagegen erheblich zusammendrücken, bis der Verschlüßkorke beim Erreichen einer gewissen Druckgrenze herausfliegt (Abb. 41 b).

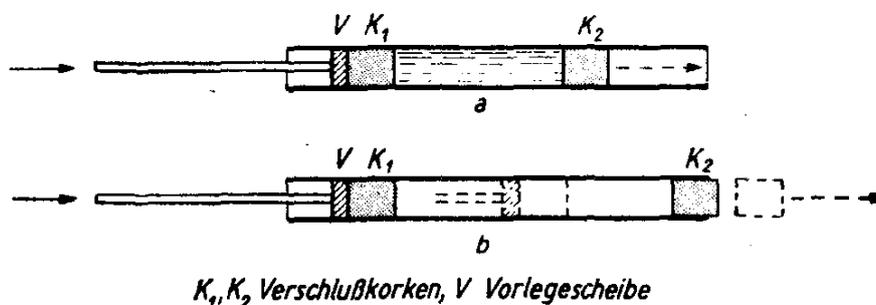


Abb. 41 Knallbüchse a) mit Wasserfüllung b) mit Luftfüllung

Bemerkungen:

1. Es empfiehlt sich, zum Drücken einen möglichst dicken Holzstab zu wählen, oder eine Scheibe aus Holz vorzulegen, damit der Korke nicht zerdrückt wird.
2. Als Ersatz für die mit Korke verschlossene Glasröhre kann man mit gutem Erfolg eine Korkbohrer-Röhre verwenden, mit der man aus einer etwa 10 mm dicken Kartoffelscheibe zwei Verschlüßstopfen aussticht. In gleicher Weise ist der geradlinige Teil einer Federpose zu gebrauchen.
3. Man beachte die beim Herausfliegen des Verschlüßkorke entstehende Nebelbildung, die auf die adiabatische Entspannung der Luft und die damit verbundene Abkühlung des in der Luft enthaltenen Wasserdampfes unter den Taupunkt zurückzuführen ist.

20. Gegenseitige Verdrängung fester Körper [G]

Dickwandiges Glasgefäß, Sand, Glasperlen, Kieselsteine; keilförmiges Holzstück, zugespitzter Holzstab.

Drückt man ein keilförmig zugeschärftes Holzstück oder einen zugespitzten Holzstab in einen Behälter mit Sand, Glasperlen, Kieselsteinen od. dgl., so werden die den Behälter füllenden Kleinkörper beiseite gedrängt. Der Versuch stellt zugleich modellmäßig die Verdrängung einer Flüssigkeit durch einen festen Körper dar.

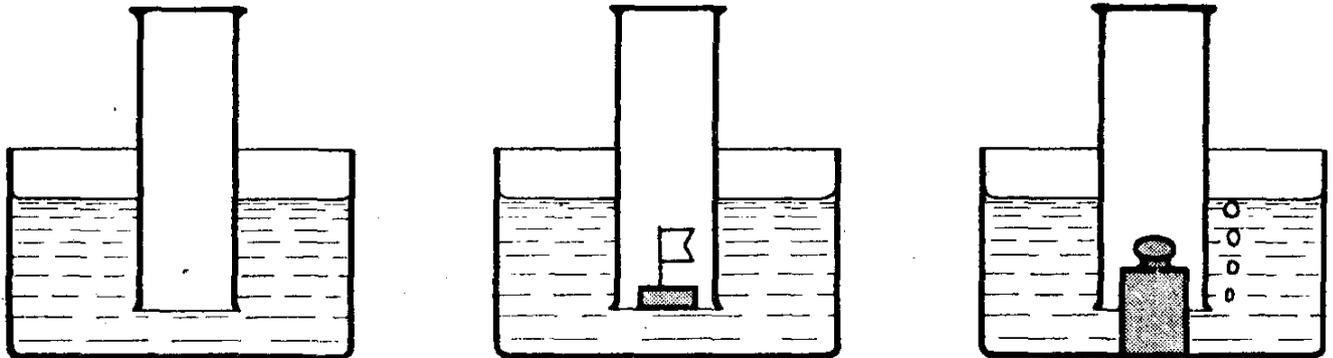
Weitere Beispiele: Einschlagen eines Nagels in die Wand, in ein Brett, Einschlagen eines Pfostens in den Erdboden. Gebrauch des Spatens, des Messers, der Axt.

21. Verdrängung von Flüssigkeiten beim Eintauchen von festen Körpern [G]

Weites und enges Meßglas, Überlaufgefäß, Versuchskörper (Gewichtsstück, Schlüssel, Stein), Unterlegklötze.

Durchführung des Versuches wie bei V 8 und 9.

Die beim Eintauchen des Versuchskörpers auftretende Wasserverdrängung läßt die gegenseitige Verdrängung fester und flüssiger Körper erkennen (vgl. Abb. 34).



a) Einfache Taucherglocke

b) Schwimmender Körper unter der Taucherglocke

c) Verdrängung der Luft durch einen festen Körper

Abb. 42 Standzylinder als Taucherglocke

22. Verdrängung von Flüssigkeiten durch Gase – Die Taucherglocke [G]

Glastrog (Aquarium), Standzylinder, breiter Korken, Papierfahne, Gewichtsstück.

Man taucht, wie es Abb. 42a bis c wiedergibt, einen Standzylinder wie eine Taucherglocke mit der Öffnung nach unten in ein mit Wasser gefülltes Becken. Zu achten ist auf das

Senken des Wasserspiegels unter dem Zylinder und das Heben der äußeren Wasserfläche.

Ein unter dem Zylinder schwimmender Korken mit Papierfahne erleichtert die Beobachtung.

Durch einen auf den Boden gestellten festen Körper wird Luft aus dem Zylinder verdrängt.

23. Einfüllen von Wasser in eine Flasche [G]

Standkolben (1 l), doppelt durchbohrter Korken oder Gummistopfen, langes Trichterrohr, gewinkelte Hahnöhre.

Die angeführten Teile werden nach Abb. 43 zusammengefügt. Man kann Wasser (färben!) nur bei geöffnetem Hahn durch den Trichter in die Flasche gießen. Schließen des Hahnes unterbricht den Wasserzufluß augenblicklich.

Bei heftigem Eingießen gelangt meist etwas Wasser infolge seiner Wucht beim Hinabstürzen bis in die Flasche. Die Luft wird dadurch vorübergehend leicht zusammengepreßt, entspannt sich jedoch im nächsten Augenblick wieder. Sie drängt dabei das Wasser aus dem Rohr des Trichters in diesen zurück und entweicht in einigen Blasen. Die Vorgänge wiederholen sich mehrere Male.

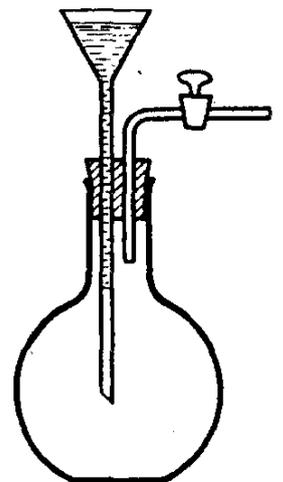


Abb. 43 Einfüllen von Wasser in eine Flasche mittels eines Trichters

§ 9. GEWICHT, MASSE, TRÄGHEIT – WICHTE UND DICHT

24. Äußerungen des Gewichts [G]

Gewichtsstück, Schlüssel, Radiergummi, Stein, Hebelwaage (Tafelwaage, Briefwaage); ein etwa 300 mm langer, 40 mm breiter Pappstreifen, 2 Holzklötze; Schraubenfeder, Faden, Gummischnur, Stativ mit Muffe und Klemme.

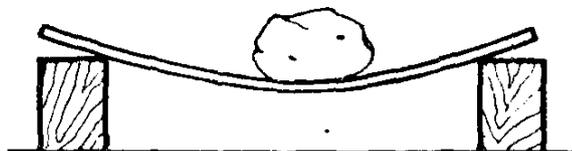


Abb. 44 Durchbiegung eines belasteten Pappstreifens

1. Ein auf eine Waagschale gelegter Versuchskörper ruft infolge seines Druckes auf die Unterlage einen Ausschlag hervor. Ein an beiden Seiten aufliegender Pappstreifen biegt sich bei Belastung durch (Abb. 44).
2. Eine Schraubenfeder wird durch einen angehängten Körper gedehnt (Abb. 45). Ein Faden – eine Gummischnur – wird durch einen darangeknüpften Körper senkrecht zur Erdoberfläche hin gespannt (Senklot).
3. Ein hochgehobener Körper fällt beim Öffnen der Hand unter dem Einfluß seines Gewichtes zu Boden.

Jeder Körper hat ein Gewicht. Es äußert sich entweder in einem Druck auf die Unterlage oder in einem Zug an einer Aufhängevorrichtung oder im Auftreten einer Fallbewegung.

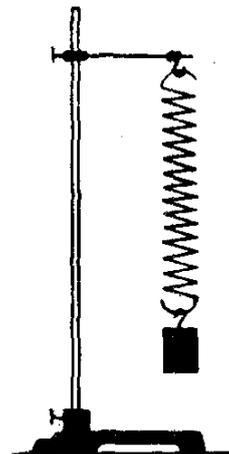


Abb. 45 Elastische Dehnung einer belasteten Schraubenfeder

25. Gewicht und Wichte fester Körper [G-Ü]

Federwaage, Überlaufgefäß, Meßglas, verschiedene Versuchskörper: Hausschlüssel aus Eisen und Leichtmetall, Porzellanring (Vorhangring), Steine, Kartoffel; Stativ mit Klemme.

Beachte MB, S. 37!

Der Versuchskörper wird mittels eines Zwirnfadens an eine Federwaage gehängt und sein Gewicht G als Zugkraft, gemessen in p, festgestellt. Sein Rauminhalt V wird nach V 9 durch Wasserverdrängung ermittelt. Aus beiden Messungen ergibt sich die Wichte γ als Verhältnis des Gewichtes zum Rauminhalt, gemessen in p/cm³:

$$\text{Wichte} = \frac{\text{Gewicht}}{\text{Rauminhalt}},$$

$$\gamma = \frac{G}{V}.$$

Bemerkung: Veranschaulichung der Wichte wie der Dichte durch eine Zusammenstellung von 1-cm³-Würfeln verschiedener Stoffe!

26. Massenvergleich zweier gleich großer Bälle mit verschiedener Füllung [G, O]

2 selbst hergestellte Bälle mit Füllungen von möglichst verschiedener Dichte.

Man fertigt aus je 4 Stoffresten (Abb. 46a) zwei möglichst gleich große Bälle nach Art von Abb. 46b (\varnothing etwa 60...70 mm) an und füllt den einen mit Papier oder Stroh, den anderen mit Bleischrot, Eisenfeilspänen oder notfalls mit trockenem Sand.

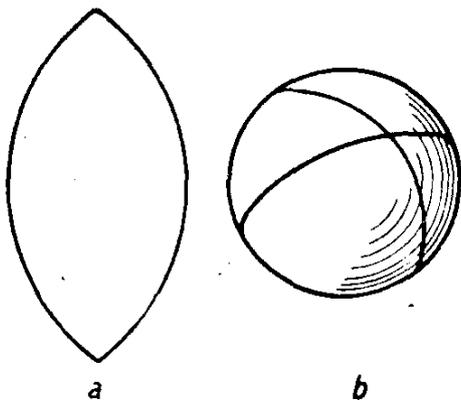


Abb. 46 Stoffball
a) Einzeltell b) Ansicht

Versetzt ein Schüler beiden auf dem Tisch liegenden Bällen mit einer Holzleiste einen leichten Schlag, so rollt der „leichte“ Ball weit davon, während der „schwere“ Ball nach kurzer Rollstrecke zum Stillstand kommt. Da beide Bälle durch ihre Lage dem Einfluß der Schwerkraft entzogen sind, ist als Grund für die Verschiedenheit ihres Verhaltens die Unterschiedlichkeit der Masse und damit der Trägheit anzusprechen.

Bemerkung: Als sehr brauchbar erweisen sich alte Tennisbälle, von denen man den einen anbohrt und mit einer Füllmasse möglichst großer Dichte füllt (siehe oben!). Korkbohrer benutzen; herausgebohrte Scheibe als Verschuß wieder einkleben!

27. Masse und Dichte fester Körper [G, O – Ü]

Hebelwaage oder Tafelwaage, Gewichtssatz, Überlaufgefäß, Meßglas, verschiedene Versuchskörper wie bei V 25.

Beachte MB, S. 37!

Die Durchführung des Versuches erfolgt wie bei V 25. Die Masse m des Versuchskörpers wird in g bestimmt, sein Rauminhalt durch Wasserverdrängung in cm^3 gemessen.

Aus beiden Messungen ergibt sich die Dichte ρ als Verhältnis der Masse zum Rauminhalt, gemessen in g/cm^3 :

$$\text{Dichte} = \frac{\text{Masse}}{\text{Rauminhalt}},$$

$$\rho = \frac{m}{V}.$$

28. Wichte und Dichte von Flüssigkeiten – Bestimmung mit Meßglas [G, O – Ü]

Hebelwaage oder Tafelwaage, Gewichtssatz, Tarierebecher, Tarierschrot, Meßglas (cm^3 -Teilung), Versuchsflüssigkeiten (Salzlösungen, Glycerin, Petroleum, Benzin, Brennspritus).

Nach Trieren eines Meßglases wird in ihm eine beliebige Menge einer Versuchsflüssigkeit gewogen. Es werden so das Gewicht in p und mit gleicher Maßzahl die Masse in g ermittelt. Gleichzeitig wird der Rauminhalt der Flüssigkeit in cm^3 abgelesen. Division des Gewichts bzw. der Masse durch den Rauminhalt liefert wie bei den Versuchen V 25 und V 27 die Wichte, gemessen in p/cm^3 , und die Dichte, gemessen in g/cm^3 .

Bemerkung: Von dem Einfluß der Temperatur auf den Rauminhalt wird hier abgesehen.

29. Wichte und Dichte von Flüssigkeiten – Bestimmung mit Pyknometer [O – Ü]

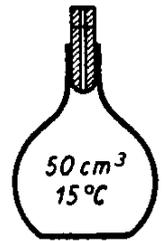
Hebelwaage, Gewichtssatz, Tarierebecher, Tarierschrot, Pyknometer; Versuchsflüssigkeiten wie bei V 28.

Das Pyknometer (Abb. 47) wird auf der Waage tariert und dann mit der Versuchsflüssigkeit gefüllt. Die Durchführung des Versuches und die Berechnung der Wichte

wie der Dichte erfolgt wie bei V 25 bzw. V 27. Eine Raumbestimmung erübrigt sich, da der Rauminhalt durch das Fassungsvermögen des Pyknometers gegeben ist.

Bemerkung: Bezüglich der Temperaturabhängigkeit gilt das gleiche wie bei V 28. Zur Vermeidung von Meßfehlern darf das gefüllte Pyknometer nur am Flaschenhals angefaßt werden.

Abb. 47 Pyknometer



30. Gewicht der Luft – Wichte und Dichte gasförmiger Körper [G, O–Ü]

Hebelwaage, Gewichtssatz, Tarierbecher, Tarierschrot, starkwandiger Rundkolben (1 l), Gummistopfen mit Bohrung, Hahnrohr, Luftpumpe, Vakuumschlauch, Eimer.

Vorversuch: Ein durch einen gut passenden Gummistopfen und ein Hahnrohr dicht verschlossener starkwandiger Rundkolben wird auf der Waage tariert. Da er sich nicht auf die Waagschale legen läßt, hängt man ihn zweckmäßig mit einer Drahtschlinge am Tragbügel der Waagschale auf (Abb. 48). Saugt man mit dem Munde kräftig Luft aus, so ist eine deutliche Gewichtsabnahme zu erkennen.

Hauptversuch: Nach vorangegangenem Trieren wird der Kolben mit einem Vakuumschlauch an eine Luftpumpe angeschlossen und ein Teil der Luft herausgesaugt. Das Gewicht der herausgesaugten Luft wird durch Wägung festgestellt.

Die Ermittlung des Rauminhalts der herausgesaugten Luft erfolgt durch Wasserfüllung, indem man den Hahn unter Wasser vorsichtig öffnet und Wasser bis zum völligen Druckausgleich einströmen läßt (Abb. 49). Ist dieser erreicht, so schließt man den Hahn, nimmt den Rundkolben aus dem Wasser und gießt das eingedrungene Wasser – einschließlich des noch im Rohr befindlichen – in ein Meßglas um.

Die Berechnung der Luftwichte bzw. -dichte erfolgt wie bei Flüssigkeiten (vgl. V 28 und V 29).

Bemerkungen:

1. Die Drahtschlinge wird in einfacher Weise mit einem Stück Isolierband am Kolbenhals befestigt.
2. Um nicht ein sehr großes Gefäß mit Wasser füllen zu müssen, empfiehlt es sich, den herausragenden Teil des Hahnrohres möglichst kurz zu wählen.
3. Sollte eine Luftpumpe nicht zur Verfügung stehen, so kann man den Versuch auch durchführen, indem man wiederholt kräftig mit dem Munde saugt. Es leuchtet ein, daß der Versuch dann nur grobe Annäherungswerte für Gewicht, Wichte bzw. Dichte der Luft liefert.
4. Genau so wie mit Luft läßt sich der Versuch mit anderen Gasen, z. B. Leuchtgas, Kohlendioxyd, Sauerstoff, Wasserstoff, durchführen, mit denen man den Kolben vorher bis zur völligen Luftverdrängung füllt. Ein Absaugen mit dem Munde kommt dann erklärlicherweise nicht in Frage.

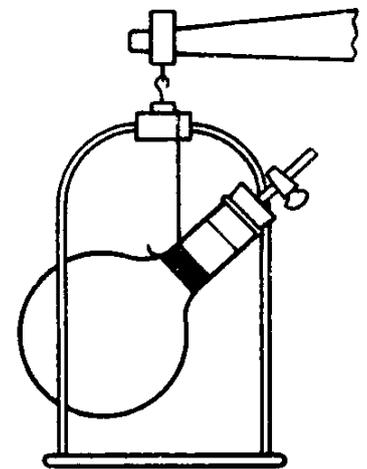


Abb. 48 Rundkolben an einer Waage hängend

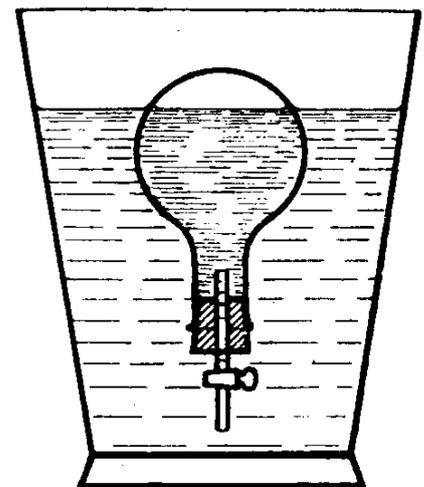


Abb. 49 Gleichstand der Flüssigkeiten bei Druckausgleich

31. Trägheit einer Walze oder einer Kugel [G]

Holzwalze, kleine zylindrische Flasche, Puderbüchse, Kugel; Brett (etwa 200×300 mm) oder Papptafel, Faden.

Ein Brett oder eine Papptafel dient als Unterlage, die an einem Faden über den Tisch gezogen wird. Legt man darauf eine Walze oder Kugel, so gerät diese infolge ihrer Trägheit bei plötzlichem Anziehen und Anhalten in der in Abb. 50 a und b angedeuteten Weise gegenüber der Unterlage in Bewegung. Ein hinter die Walze gelegter Klotz verhindert beim Vorwärtsziehen das Zurückrollen.

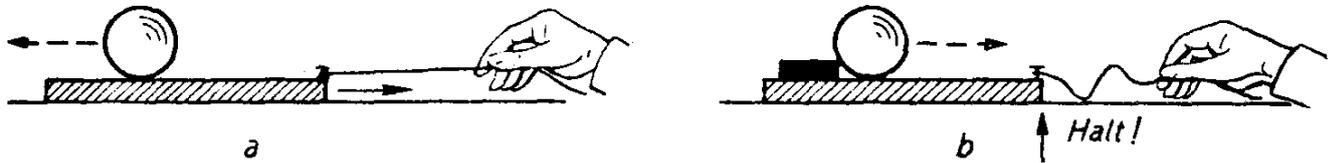


Abb. 50 Trägheit einer Walze a) beim Anziehen b) beim Anhalten

32. Trägheit eines Holzklotzes [G]

Quaderförmiger Holzklotz, Streichholzschachtel, Zigarettenschachtel; Brett (etwa 200×300 mm) oder Papptafel, Faden.

Durchführung des Versuches wie bei V 31. Der Holzklotz kippt bei ruckartigem Anziehen der Unterlage nach hinten, bei plötzlichem Anhalten nach vorn (Abb. 51 a und b).

Bemerkungen:

1. Man führe den Versuch auch bei genügend langsamer Änderung der Geschwindigkeit aus.
2. Hinweis auf das Verhalten eines in einem Straßenbahn- oder Lastkraftwagen frei stehenden Fahrtteilnehmers bei plötzlichem Anfahren und Anhalten.

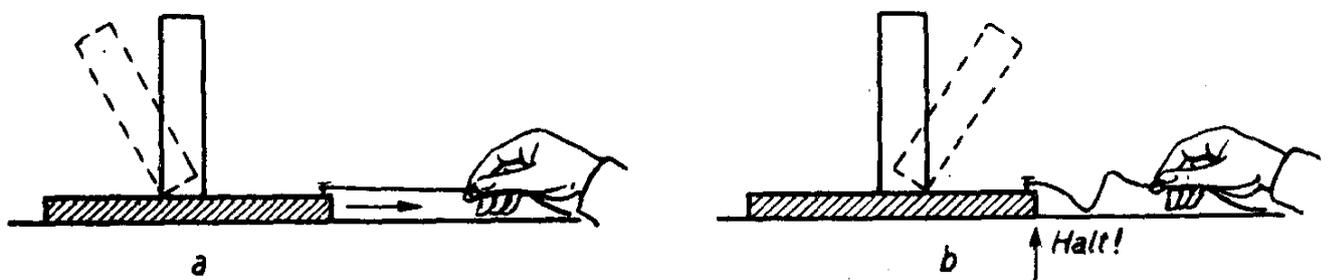


Abb. 51 Trägheit eines Holzklotzes a) beim Anziehen b) beim Anhalten

33. Trägheit beim Fortziehen der Unterlage [G]

Standzylinder, Kartonblatt oder Postkarte, Münze; Pulverflasche, Ring aus Kartonstreifen ($\varnothing 150 \dots 260$ mm, Breite etwa 20 mm).

Bekannt sind die Versuche, bei denen die Trägheit eines Körpers in Erscheinung tritt, wenn man ihm plötzlich die Unterlage entzieht. Von den zahlreichen Versuchen sind einige durch die Abb. 52 a bis c wiedergegeben.

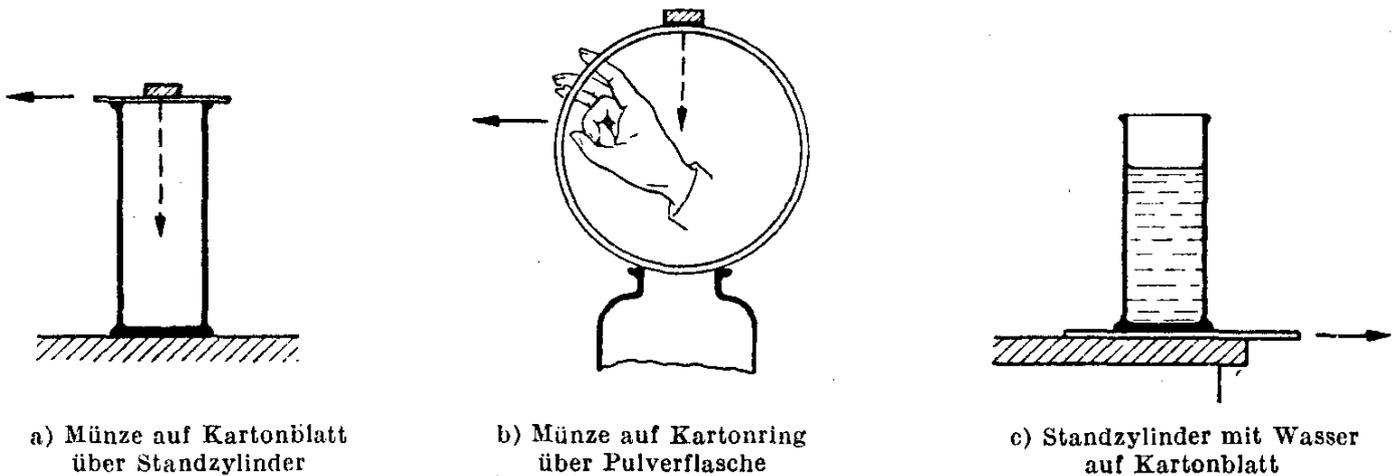


Abb. 52 Trägheit beim Fortziehen der Unterlage

- Eine Münze fällt in einen Standzylinder, wenn man das als Unterlage dienende Kartonblatt schnell wegzieht.
- Eine Münze, die über einer Pulverflasche auf einem aus einem Kartonstreifen gefertigten Ring ruht, fällt in die Flasche, wenn man den Ring beiseite schnell.
- Ein mit Wasser gefüllter Standzylinder bleibt stehen, wenn man das als Unterlage dienende Kartonblatt ruckartig fortzieht.

34. Trägheit beim Anheben eines Körpers [G]

Gewichtsstück, Stein oder dgl. (Masse etwa 2 kg), Zwirnfaden.

Ein an einen Zwirnfaden gebundener Körper mit einer Masse von etwa 2 kg läßt sich am Faden hochheben, wenn man die Bewegung genügend langsam ausführt. Bei ruckartigem Anheben reißt der Faden infolge der Trägheit des Körpers.

35. Trägheit einer hängenden Kugel [O]

Kugel mit 2 Haken (Masse etwa 2 kg) oder ein anderer geeigneter Versuchskörper (s. Bemerkung), Zwirnfaden, Holzgriff, starker Bindfaden.

Eine mit zwei Haken versehene Kugel wird mittels eines Zwirnfadens an einem in den Türrahmen geschraubten Haken aufgehängt. An ihr hängt an einem zweiten Zwirnfaden ein hölzerner Handgriff (Abb. 53 a und b). Bei gleichmäßig zunehmendem Zug nach unten reißt schließlich der obere Faden, da er durch das Gewicht der Kugel zusätzlich beansprucht wird. Bei ruckartigem Zug reißt infolge der Trägheit der Kugel der untere Faden.

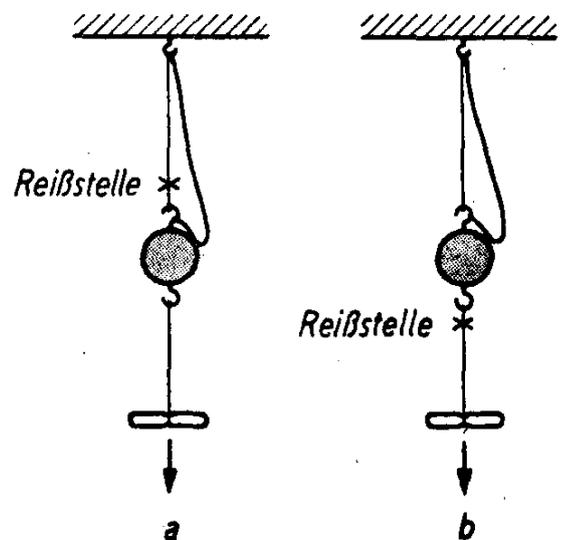


Abb. 53 Zerreißen eines Fadens
a) bei langsam zunehmendem Zug
b) bei ruckartigem Zug

Bemerkungen:

1. Zur Vermeidung von Unfällen befestige man neben dem oberen Zwirnfaden einen zunächst noch schlaff herabhängenden starken Bindfaden, der ein Herabfallen der Kugel verhütet.
2. An Stelle der Kugel kann jeder andere geeignete Versuchskörper verwendet werden, den man mit einer Umschnürung aus starkem Bindfaden oder Draht versieht, um daran den Zwirnfaden anknüpfen zu können.

36. Trägheit einer Flüssigkeit [G]

Flache Glasschale (Entwicklerschale) mit Wasser.

Eine flache Glasschale mit Wasser wird mit möglichst konstanter Geschwindigkeit über den Tisch gezogen. Bei ruckartigem Anfahren fließt das Wasser, seiner Trägheit folgend, über den hinteren Rand, bei plötzlichem Anhalten über den vorderen Rand der Schale.

37. Trägheit der ruhenden Luft [G]

Dünnes, schmales Brettchen (Weichholz, kein Sperrholz - etwa $2 \times 50 \times 300$ mm), Zeitungspapier, Hammer.

Die Trägheit der Luft läßt sich eindrucksvoll an einem Brettchen nachweisen, das man mit etwa einem Drittel seiner Länge über die Tischkante ragen läßt. Ein Schlag gegen den überragenden Teil schleudert das Brettchen mühelos fort. Bedeckt man es nach Abb. 54 mit einem Bogen Zeitungspapier, so läßt es sich mitsamt dem Papier durch allmählich zunehmenden Druck leicht anlüften. Vollführt man dagegen mit einem flach gehaltenen Hammer einen kräftigen Schlag gegen den überstehenden Teil, so zerbricht das Brett infolge der Trägheit der Luft, die auf dem Papier lastet. Das Papier bleibt unbeschädigt.

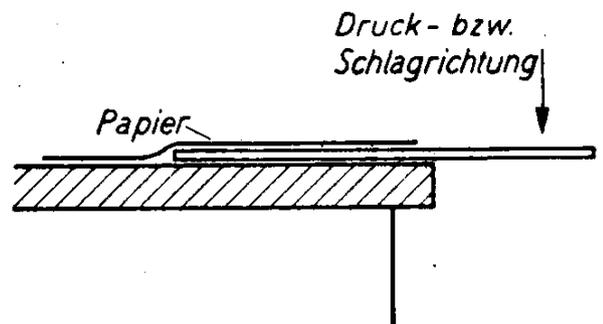


Abb. 54 Brettchen, mit Papierbogen bedeckt, zum Nachweis der Trägheit der Luft

§ 10. TEILBARKEIT, POROSITÄT, VERFORMBARKEIT**38. Zerkleinern eines festen Körpers [G]**

Kreide, Gips, Unterlegbrett, Hammer, Mörser.

Die Teilbarkeit fester Körper weist man sehr sinnfällig an einem Stück Kreide nach, wobei man etwa folgende Teilbarkeitsstufen unterscheiden kann:

1. Zerbrechen in große Stücke,
2. Zerbröckeln mit der Hand in erbsengroße Stücke,
3. Zerstoßen mit einem Hammer auf einer festen Unterlage zu senfkorngroßen Stücken,
4. Zerreiben in einem Mörser zu Pulver.

Bemerkung: Noch geeigneter für diesen Zweck, weil härter, ist ein aus steifem Gipsbrei hergestellter, gut getrockneter Gipsklumpen, etwa von der Größe einer Streichholzschachtel.

39. Zerstäuben einer Flüssigkeit [G, O]

Becherglas mit Wasser, Zerstäuber; 2 Glasröhrchen, großer Korken.

Zum Veranschaulichen der Feinverteilung einer Flüssigkeit ist der bekannte Flüssigkeitszerstäuber gut zu gebrauchen. Er ist nach Abb. 55 aus zwei Glasröhrchen und einer größeren Korkscheibe leicht herzustellen.

Man unterscheidet

Zersprühen – gröbere Tropfenbildung,
Zerstäuben – feine Tröpfchenbildung.

Anwendungs- und Erfahrungsbeispiele: Blumenspritze, Baumspritze, Rasensprenger, Desinfektionszerstäuber, Parfümzerstäuber – Regen, Sprühregen, Nebel, Dunst.

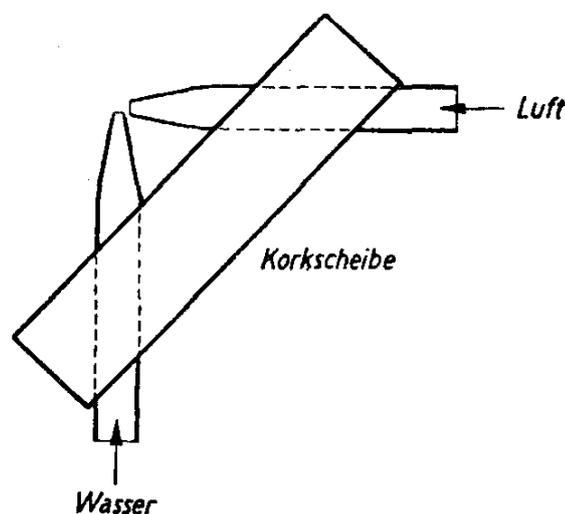


Abb. 55 Selbstgefertigter Zerstäuber

40. Ausbreitung von Gasen [G, O]

Flaschen mit Schwefelkohlenstoff, Salzsäure, Ammoniak; Schwefelfaden, Schwefel-eisen, Fließpapier, Lappen, Reagenzglas.

Zum Nachweis der Ausbreitung von Gasen am Geruch sind geeignet:

1. Schwefeldioxyd – Verbrennen eines Schwefelfadens,
2. Schwefelkohlenstoff – Ausgießen einer geringen Menge von Schwefelkohlenstoff auf Fließpapier,
3. Schwefelwasserstoff – Übergießen einiger Stückchen Schwefeleisen mit Salzsäure im Reagenzglas,
4. Ammoniak – Tränken eines Lappens mit Ammoniakwasser,
5. Leuchtgas – Vorsicht beim Ausströmenlassen!

41. Gefügemodelle zur Veranschaulichung der Teilbarkeit [G, O]

Kleine Holzwürfel, Baukastensteine, leere Streichholzschachteln, Becherglas oder Glastrog, kleine Kieselsteine, Glasperlen, kleine Stahlkugeln, trockener Sand (Seesand), Bärlappsporen (Lycopodium), Blütenstaub von Hasel und Kiefer.

1. *Modell für feste Körper:* Aufbau eines Körpermodells aus Holzwürfeln oder anderen geeigneten Bauteilen (s. oben). Die einzelnen Schichten dürfen nicht gegeneinander verschoben sein, sondern müssen fugenweise übereinander liegen. Vergleich mit dem Raumgittermodell der Kristallographie [O], Hinweis auf die Starrheit des Gefüges!
2. *Modell für flüssige Körper:* Kleine Kieselsteine, Glasperlen (oder Erbsen), trockener Sand, Bärlappsporen, Blütenstaub von Hasel und Kiefer in einem Glas. Auffallend ist die Zunahme der Verschiebbarkeit der Teilchen mit abnehmender Größe. Feiner trockener Sand und erst recht Bärlappsporen und Blütenstaub lassen sich fast flüssigkeitsartig in geschlossenem „Strahl“ umgießen. Oberfläche beachten!

Sehr geeignet für das Flüssigkeitsmodell sind kleine magnetisierte Stahlkugeln, da diese bis zu einem gewissen Grade, wenn auch in anderer Ausprägung, die zwischenmolekularen Kräfte modellartig wiedergeben.

Bemerkung: Abschnitt 8 der Einleitung ist unbedingt zu beachten. Insbesondere gilt hier für beide Arten der Veranschaulichung folgendes:

- a) Die Gestalt der Modellkörper berechtigt keinesfalls zu einem Schluß auf die Gestalt der Moleküle.
- b) Es fehlen am Modell gänzlich die Molekularkräfte, die die Moleküle zusammenhalten.
- c) Es fehlt am Modell jede Eigenbewegung der Moleküle.

Auf die Veranschaulichung des Molekulargefüges gasförmiger Körper wird hier verzichtet, da sich diese zwangloser bei der Behandlung der kinetischen Gastheorie einfügen läßt.

42. Adhäsion und Kohäsion, gezeigt an einfachen Beispielen [G, O]

Becherglas, Glasplatte, Glasstab, paraffiniertes Papier, Lycopodium, Quecksilber, Quecksilberwanne (flacher Kartondeckel).

Quecksilbertröpfchen auf einer gut gereinigten Glasplatte verraten durch ihre kugelige Gestalt das Wirken starker Kohäsionskräfte (Abflachen bei zunehmender Größe!).

Ähnlich verhalten sich Wassertropfen auf paraffiniertem Papier oder auf einer mit einem leicht geölten Lappen überstrichenen Glasplatte. Auch eine mit Bärlappsporen eingestäubte Glasplatte zeigt dieselben Erscheinungen. Dagegen ist am Verlaufen des Wassers auf einer gut gereinigten Glasscheibe, an seinem Haftenbleiben am eingetauchten Glasstab, am Finger, das Überwiegen der Adhäsionskräfte zu erkennen.

Bemerkung: Quecksilberversuche nur über einer Quecksilberwanne oder einem flachen Kartondeckel durchführen! Unter Umständen Quecksilbertropfer benutzen (Abb. 56)!

Weitere Beispiele für Adhäsion und Kohäsion:

Haften von Siegellack, Paraffin, Stearin an Glas,
Zusammenkitten zweier Holzstücke mit Siegellack,
Verwenden von Klebmitteln aller Art (Klebpapier),
Zusammendrücken zweier Stearinkerzen,
Zusammenschweißen zweier Eisenstücke, Löten,
Zusammenschweißen zweier Glasröhren,
Haften von Kreide an der Tafel, von Farbe an der Wand.

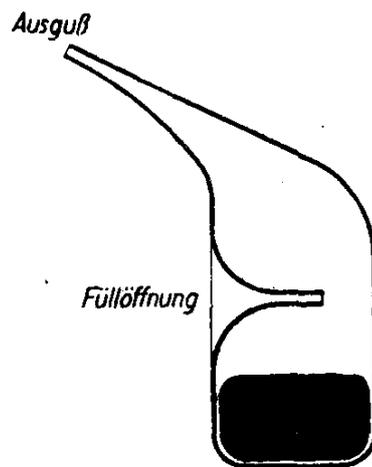


Abb. 56 Quecksilbertropfer

43. Adhäsionsplatten [G, O]

2 Adhäsionsplatten, 2 Bleizylinder (\varnothing 30 mm) mit geglätteten Endflächen, 2 Adhäsionsendmaße, Hebelwaage, Gewichtssatz, Tarierbecher, Tarierschrot, Holzbrücke*, Glasschale, Stativ mit Muffe und Klemme.

1. *Schauversuche:*

- a) Zwei mit ihren geschliffenen Flächen gegeneinandergedrückte Adhäsionsplatten aus Glas oder Messing bleiben bei horizontaler Lage aneinander haften (Abb. 57) und vermögen unter Umständen noch ein leichtes zusätzliches Gewichtsstück zu tragen.
- b) Aus Bleiabfällen gießt man einen Zylinder (\varnothing 30 mm, Länge 100 mm). Zur Gießform siehe § 2, Nr. 10; Blechman-

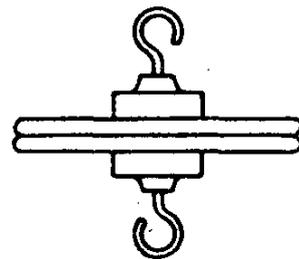


Abb. 57 Adhäsionsplatten

tel verwenden! Man zersägt den Zylinder in zwei etwa gleich lange Stücke; die Schnittflächen werden durch Schaben mit einem Messer geglättet. Wenn man die Stücke mit diesen Flächen gegeneinander drückt und dabei das eine gegen das andere dreht, so haften sie fest aneinander. Vor jedem Gebrauch sind die Endflächen erneut glatt zu schaben.

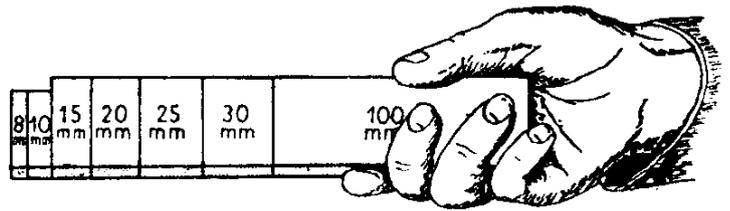


Abb. 58 Aneinanderhaftende Adhäsionsendmaße
Nach Grimsehl-Tomaschek, Lehrbuch der Physik
Bd. I (1944), Abb. 3

Bemerkung:

In der Technik verwendet man sogenannte *Adhäsionsendmaße*. Aus solchen lassen sich durch bloßes Zusammendrücken der hochpolierten Endflächen beliebige Meßstrecken mit großer Genauigkeit zusammenstellen, wobei die einzelnen Teile fest aneinander haften (Abb. 58). Da hierbei die Abweichungen der Endflächen von einer Ebene nicht größer sein dürfen als $3 \cdot 10^{-4}$ mm, so gewinnt man aus der Tatsache des Aneinanderhaftens eine Vorstellung von der Größenordnung der Reichweite der Molekularkräfte.

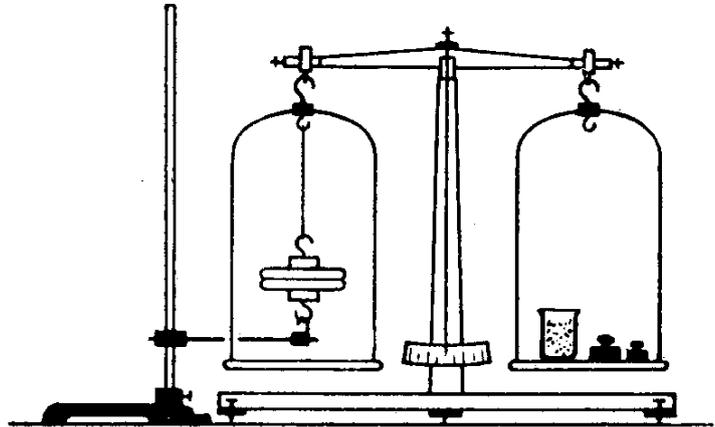


Abb. 59 Messung der Adhäsion
zwischen zwei Metallplatten

2. *Messende Versuche:* [O]:

a) Man hängt die eine Adhäsionsplatte mit einem Faden an eine Hebelwaage und tariert sie. Die andere, horizontal an ein Stativ geklemmte Platte stellt man dicht darunter und drückt beide Platten zusammen (Abb. 59). Die zum Trennen beider Platten erforderliche Kraft wird bestimmt.

b) Der Versuch kann dahin abgeändert werden, daß man an die Stelle der unteren Platte eine Schale mit Wasser treten läßt (Abb. 60). Überbrücken der Waagschale durch eine Holzbrücke!

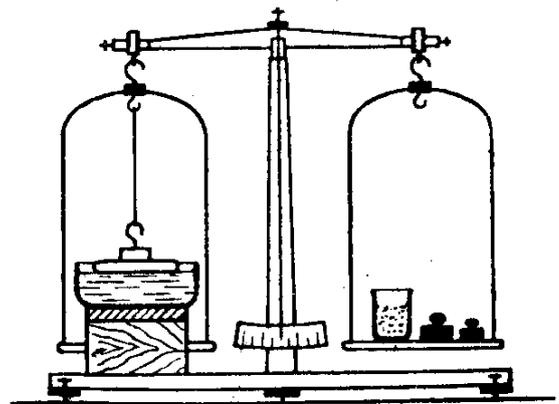


Abb. 60 Messung der Adhäsion
zwischen einer Metallplatte und Wasser

Bemerkung zu 2b: Auch gegenüber Quecksilber ist in gleicher Weise eine Adhäsion nachweisbar, wenn auch von geringerer Stärke als gegenüber Wasser.

44. Aufnahmefähigkeit und Durchlässigkeit für Wasser, Porosität (Modellversuche) [G, O]

Schwamm, Fließpapier, gefärbtes Wasser; Trichter, Filter, Holzkohlenpulver, Becherglas; Gläser mit Sand und Glasperlen, Gipsblock.

1. Gute Veranschaulichungsmittel für die Porosität der Körper sind Schwamm und Fließpapier (gefärbtes Wasser verwenden!). Um eine Vorstellung von der Größen-

ordnung der Poren des Filtrierpapiers zu vermitteln, rühre man dem gefärbten Wasser Holzkohlenpulver bei und filtriere. Während die Farblösung (molekulare oder kolloide Zerteilung) durchs Filter tritt, bleiben die Holzkohlenteilchen (grob disperse Zerteilung) auf dem Filter zurück.

2. Geeignete Modelle poröser Körper sind Gläser mit Glasperlen oder Sand, in die man etwas Wasser gießt. Sie lassen deutlich den Einfluß des Teilchengefüges auf die Aufnahmefähigkeit für Wasser erkennen.
3. Besonders auffallend ist die Porosität eines Gipsblockes mit glatter Oberfläche. Läßt man auf die glatte Fläche einige Tropfen Wasser fallen, so kann man sehen, daß es vom Gips vollkommen aufgesaugt wird.

Bemerkungen:

1. Alle geschilderten Versuche haben im Bereich molekularer Größenordnung nur die Bedeutung von Modellversuchen.
2. Man stellt einen für den 3. Versuch geeigneten Gipsblock her, indem man gut durchgerührten zähen Gipsbrei auf einer gut gereinigten Glasplatte zu einem Quader (etwa $60 \times 60 \times 20$ mm) formt und mehrere Tage trocknen läßt.

45. Gasdurchlässigkeit eines Ziegelsteines [G, O]

Ziegelstein, 2 große Glas- oder Metalltrichter, 2 Holzscheiben, Glaserkitt (Siegelack), Wachs (Paraffin, Stearin), Kerze; zugespitzte, gewinkelte Glasröhre, Schlauch, Schnur.

Zur Durchführung des in der ursprünglichen Form von Pettenkofer angegebenen Versuches benötigt man einen nicht hart gebrannten, vollkommen trockenen, mörtelfreien Ziegelstein. An seinen beiden großen Flächen befestigt man, achsengleich gegenüberstehend, zwei große Glas- oder Metalltrichter. Man sägt zu diesem Zweck aus zwei Holzscheiben etwa von der Größe der Ziegelsteinfläche je ein kreisförmiges Loch heraus, so daß sich die Scheiben über die Trichter stülpen lassen. Durch herum-

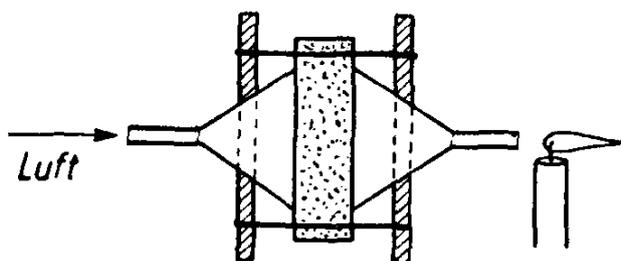


Abb. 61 Hindurchblasen von Luft durch einen Ziegelstein

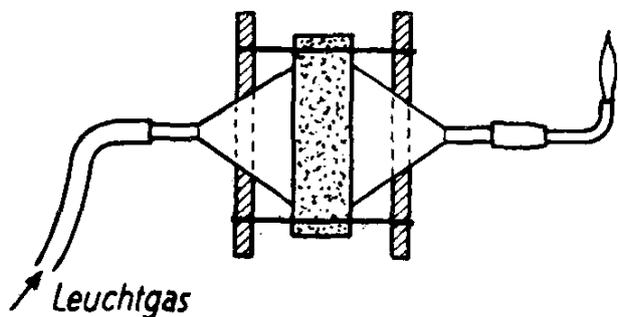


Abb. 62 Hindurchtreten von Leuchtgas durch einen Ziegelstein

gebundene kräftige Schnüre werden sie mitsamt den Trichtern fest gegen die Steinflächen gepreßt. Durch Glaserkitt oder Siegelack wird die Fuge zwischen Trichter und Stein luftdicht abgeschlossen und durch Wachs, Paraffin oder Stearin die ganze freie Oberfläche des Steines abgedichtet. Die Porosität des Ziegelsteines macht es möglich, durch den Stein hindurch eine Kerze auszublasen (Abb. 61).

Schließt man den einen Trichter mit einem Schlauch an die Gasleitung an und setzt auf den anderen eine gewinkelte, zugespitzte Röhre, so kann man den hindurchtretenden Leuchtgasstrom entzünden (Abb. 62).

Vorsicht beim Anzünden; bis zum völligen Verdrängen der Luft aus dem Trichter warten!

46. Verformbarkeit [G, O–Ü]

Glasstab, dünne Glasplatte (mikroskopisches Deckglas), Stahldraht, Uhrfeder dünner Eisendraht (Bindedraht), dicker Eisendraht, Eisenblech, Gußeisen, Schmiedeeisen, Kupferblech, Kupferdraht, Blei, Siegellack, Schwefel, Töpferton oder Plastilin, Wachs oder Stearin, Gummischnur, Holzstäbe, Unterlegbrett, Schraubstock, Feilkloben, Hammer, Zange, Feile, Bunsenbrenner.

Mit den angegebenen Hilfsmitteln lassen sich viele einfache Versuche zur Verformbarkeit durchführen. Alle Versuche werden zunächst bei Zimmertemperatur ausgeführt.

Beispiele:

1. Glas und Stahl sind elastisch. Die Formänderung geht nach Aufhören der Kräfte vollständig zurück, wenn diese einen gewissen Betrag nicht überschritten haben.
2. Eine dünne Glasplatte (mikroskopisches Deckglas) kann man mit den Fingern verbiegen und die Veränderung der Form und ihre Wiederherstellung durch Lichtreflexe der ganzen Klasse sichtbar machen.
3. Dünnes Eisenblech und Kupferblech kann man so verbiegen, daß die Formänderung bestehen bleibt; sie sind biegsam.
4. Einen dünnen Eisen- oder Kupferdraht kann man zwischen Schraubstock und Feilkloben beträchtlich in die Länge ziehen; er ist dehnbar.
5. Ein Glasfaden ist elastisch. Er zerbricht aber, wenn man ihn zu stark biegt. Die Bruchstücke zeigen dabei nichts mehr von der vorangehenden Formänderung; Glas ist sehr spröde.
6. Gußeisen ist spröde, es läßt sich nicht durch Hämmern verformen.
7. Schmiedeeisen und Stahl dagegen sind zäh: man kann sie durch starke Kräfte verformen, ohne daß der Zusammenhang der Teile verlorengeht.

Führt man die Versuche 1 und 5 oder entsprechende Versuche mit Siegellack, Schwefel, Wachs oder Stearin bei erhöhter Temperatur durch, so erkennt man, daß die Formveränderlichkeit wesentlich von der Temperatur abhängt, was für die technische Verwendbarkeit der Stoffe von großer Bedeutung ist.

Bemerkung: Die bei manchen Verformungsversuchen auftretende starke Erwärmung weist auf den Zusammenhang zwischen Arbeit und Wärme hin. Die Veränderung der Oberfläche (Rauhwerden) läßt auf molekulare Umordnung schließen.

VIERTES KAPITEL

Feste Körper in Ruhe

§ 11. METHODISCHE BEMERKUNGEN

1. Im Vordergrund der Lehre vom Ruhezustand der festen Körper steht der *statische Kraftbegriff*, dessen anschaulicher und gesetzmäßiger Erfassung die im § 12 zusammengestellten Versuche dienen. Es sind ausschließlich Muskelkräfte, Gewichte und Federkräfte, die dabei wirksam werden. Einheit der Kraft ist das Pond (p) bzw. das Kilopond (kp) (vgl. MB S. 38).

Von grundlegender Bedeutung für das Verständnis der Statik ist der Begriff des *Kräftegleichgewichts*, da ein unter der Einwirkung von Kräften stehender freibeweglicher Körper nur dann im Ruhezustand verbleibt, wenn sämtliche Kräfte sich ausgleichen oder, wie man sagt, sich das Gleichgewicht halten. Es versteht sich daher von selbst, daß der Unterricht auf die klare Erfassung dieses wichtigen Begriffes nachdrücklich hinarbeiten muß.

Die Notwendigkeit dazu ergibt sich bereits bei den einfachsten Versuchen und Überlegungen, bei der Messung und Übertragung von Kräften. Denn die Messung einer Kraft, z. B. einer Muskelkraft, mittels einer Federwaage beruht auf dem Eintreten des Gleichgewichts zwischen der zu messenden Kraft und der durch das Spannen der Feder ausgelösten elastischen Kraft. Eine Kraft kann unmittelbar nur durch eine Kraft gemessen werden!

Besondere Bedeutung gewinnt die Vorstellung vom Kräftegleichgewicht bei der Ableitung des Satzes vom *Parallelogramm der Kräfte*, die nur auf dieser Grundlage möglich ist. Denn nur unter der Voraussetzung, daß zwischen drei auf einen Punkt einwirkenden Kräften Gleichgewicht besteht, darf man bei V 51 und 52 den Schluß ziehen, daß man je zwei von ihnen zu einer Kraft, der Resultierenden, zusammenfassen kann, die der dritten Kraft gleich, ihr aber entgegengesetzt gerichtet ist.

2. Die Versuche des § 13 sollen in erster Linie die Kenntnis des *Hookeschen Gesetzes* vermitteln und im Zusammenhang damit die Begriffe der Elastizität, der Dehnbarkeit, der Zähigkeit und Sprödigkeit sowie der Festigkeit klären. Die Schüler werden zunächst geneigt sein, Gummi als das Musterbeispiel eines elastischen Körpers anzusehen, weil sie, wie es gemeinhin geschieht, die außerordentlich große Dehnbarkeit von Gummi als besonderes Kennzeichen des elastischen Zustandes betrachten. Sie werden erst lernen müssen, daß Stoffe wie Stahl und Glas im physikalischen Sinn sehr elastisch sind, auch wenn an ihnen selbst durch große Zugkräfte nur geringe Deformationen hervorgerufen werden können. Die elastischen Verformungen einer Gummischnur sind auch bei mäßigen Zugkräften unmittelbar wahrnehmbar, aber die Längenänderung ist hierbei nur in engen Grenzen der wirkenden Kraft proportional und gehorcht bei stärkeren Dehnungen keinem einfachen Gesetz.

Die elastische Dehnung von Drähten dagegen wird durch das Hookesche Gesetz beschrieben. Doch sind die Längenänderungen eines Drahtes selbst bei großen Belastungen so gering, daß sie nur durch besondere Hilfsmittel, über die man in der

Schule im allgemeinen nicht verfügen wird, aus der Ferne erkannt werden können. Aus methodischen Erwägungen wird es daher vorzuziehen sein, das Hookesche Gesetz an der Verlängerung einer belasteten Schraubenfeder zu entwickeln. Es handelt sich hierbei zwar um eine zusammengesetzte Erscheinung (vgl. Bemerkung V 55), aber die Längenänderungen der Feder sind auch bei geringen Belastungen unmittelbar zu beobachten und in weiten Grenzen der Belastung proportional.

Die Versuche mit der Schraubenfeder sind über ihren sachlichen Inhalt hinaus noch recht wertvoll für die allgemeine Methodik des physikalischen Unterrichts, denn sie sind ein besonders anschauliches Beispiel dafür, wie man aus der *graphischen Darstellung* einer Meßreihe zur Vermutung und schließlich zur Bestätigung eines mathematischen Zusammenhanges zwischen den gemessenen Größen geführt werden kann. Sie kennzeichnen zugleich die Anwendung des induktiven Verfahrens im Unterricht.

Die Versuche über elastische Kräfte geben Anlaß, die Eigenschaften der in der Technik benutzten Baustoffe zu erörtern. Es kann sich in der Schule aber nicht um eine möglichst genaue Bestimmung der Materialkonstanten handeln (Elastizitätsmodul, Torsionsmodul), sondern um einzelne Beispiele, wie die Ansprüche, die an technische Bauelemente (z. B. Schienen, Kurbelwellen, Balken, Seile) gestellt werden, durch ein geeignetes Material und eine besondere Form erfüllt werden können.

3. Im § 14 bildet der *Schwerpunktsbegriff* den methodischen und sachlichen Mittelpunkt. Man wird ihn auf der Grundschule so einfach und anschaulich wie möglich einführen. Der Schwerpunkt ist in enger Anlehnung an die bei zahlreichen Versuchen angestellten Beobachtungen als der Punkt anzusehen, in dem man den Körper unterstützen muß, um ihn der Wirkung der Schwerkraft zu entziehen. Die Definition des Schwerpunktes als des Angriffspunktes der Schwerkraft im Sinne eines Massenmittelpunktes, in dem man sich die Masse aller Massenteilchen des Körpers vereinigt denken kann, stellt an das Abstraktionsvermögen der Schüler erhebliche Anforderungen und hat erst in einem weiterführenden Unterricht Platz.

Bei der Behandlung des *Gleichgewichtes* ist es sachlich unbegründet, zwischen dem Gleichgewicht eines hängenden Körpers und der *Standfestigkeit* bei stehenden Körpern einen wesentlichen Gegensatz zu konstruieren. Definiert man die Gleichgewichtslage als eine Körperlage, bei der ein nur der Schwerkraft ausgesetzter, anderen Kräften sonst nicht unterworfenen Körper sich nicht bewegt, so trifft das für hängende wie für stehende Körper zu. Wie bei einem stabil hängenden Körper befindet sich auch bei einem stabil stehenden Körper der Schwerpunkt in einer relativ tiefsten Lage und kehrt bei nicht zu starken Erschütterungen in diese zurück, wenngleich die Größe der Standfestigkeit bisweilen sehr gering sein kann.

4. Die erste der *kraftumformenden Einrichtungen*, der sogenannten *einfachen Maschinen*, mit denen der Schüler bekannt wird, ist der *Hebel*. Man begegnet vielfach der Ansicht, daß das Einspielen des Hebels in die waagerechte Lage eine notwendige Voraussetzung für den Nachweis des Hebelgesetzes sei. Um eine stabile waagerechte Gleichgewichtslage zu erreichen, befindet sich bei vielen Hebelmodellen die Drehachse etwas oberhalb des Schwerpunktes. Die von der Hebelwaage her vertraute, in der Eigenart ihrer Meßtechnik begründete Gewohnheit hat offenbar Anlaß zu dieser Bauart gegeben. Mag dies auch eine gewisse Erleichterung für den Unterricht mit sich bringen, so liegt darin doch eine Gefahr, auf die ausdrücklich hingewiesen werden soll. Beim Schüler stellt sich leicht die irriige Auffassung ein, als sei die

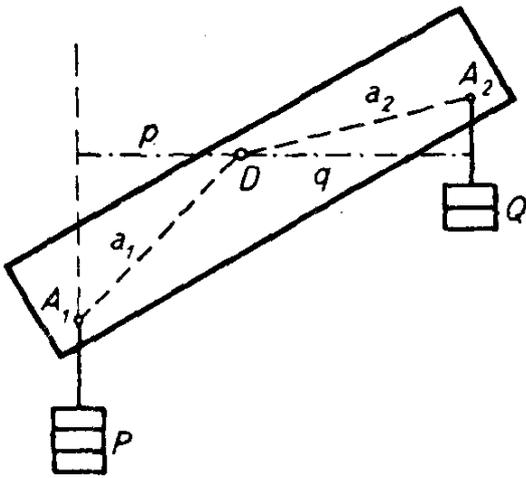


Abb. 63 „Gleicharmiger“ Hebel bei ungleichmäßiger Belastung in schräger Gleichgewichtslage

Der Hebel ist nur scheinbar gleicharmig ($a_1 = a_2$). Die wirklichen Kraftarme p und q sind verschieden groß. (Der Hebel ist übertrieben breit gezeichnet)

Gültigkeit des Hebelgesetzes an die waagerechte Lage des Hebels gebunden. Dem ist aber nicht so. Das Hebelgesetz ist auch für jede schräge Gleichgewichtslage erfüllt. Nur dürfen bei einem Hebel, dessen Drehpunkt oberhalb des Schwerpunktes liegt, nicht die Strecken zwischen den Aufhängepunkten der Gewichte und der Drehachse, sondern die senkrechten Abstände der Kraftrichtungen von der Drehachse als Kraftarme betrachtet werden. Abb. 63 gibt darüber Aufschluß.

Ist der Hebel um seinen Schwerpunkt drehbar, so ist er bei Erfüllung des Hebelgesetzes in jeder Lage im Gleichgewicht. Für das Eintreten des Gleichgewichts ist dann nicht die waagerechte Lage maßgebend, sondern der Umstand, daß der Hebel in jeder beliebigen Lage, also auch in der waagerechten, verbleibt, wenn man ihn nicht anstößt.

Bei der Behandlung der *Rolle* und der aus Rollen zusammengesetzten kraftumformenden Einrichtungen versäume man nicht, auf die entscheidende Bedeutung hinzuweisen, die dem Seil bei diesen Vorrichtungen zukommt. Die Kraftübertragung erfolgt ausschließlich durch das Seil. Kraftumformend wirkt die Rolle nur insofern, als sie die Richtung der Kraft ändert; die Größe der Kraft wird durch sie nicht beeinflusst. Die Rolle ist mit einem gleicharmigen Hebel vergleichbar, an dem eine Kraftänderung ebenfalls nicht eintritt. Man sollte daher Einrichtungen dieser Art, zu denen auch der Flaschenzug gehört, treffender als *Seilmaschinen* bezeichnen.

Es sei darauf aufmerksam gemacht, daß eine befriedigende Erklärung der an der *schiefen Ebene* auftretenden Kraftzerlegung nur mit Hilfe des Kräfteparallelogramms gegeben werden kann. Da dieses nicht zum Lehrgegenstand der Grundschule gehört, wird man dort auf eine Erklärung der Wirkungsweise der schiefen Ebene im eigentlichen Sinne verzichten müssen. Man muß sich damit begnügen, sie anschaulich verständlich zu machen. Es geschieht dies durch den Hinweis, daß beim Hinaufrollen einer Last über eine schiefe Ebene diese einen Teil der Last trägt, der um so größer ist, je weniger die Ebene gegen die Waagerechte geneigt ist.

Keil und Schraube sind auf der Schule einer experimentellen quantitativen Behandlung kaum zugänglich. Insbesondere gilt dies für die Schraube. Man kann sich nur darauf beschränken, Modelle für das Entstehen einer Schraubenlinie bzw. einer Schraubensfläche und für die Schraube selbst vorzuweisen und an ihnen den Zusammenhang der Schraube mit der schiefen Ebene verständlich zu machen.

5. Die Versuche zur Einführung des *Arbeits- und Leistungsbegriffes* sind im Buch aus systematischen Gründen von den kraftumformenden Einrichtungen getrennt in einem besonderen Paragraphen angegeben. Im Unterricht wird man sie zweckmäßigerweise an die betreffende Vorrichtung anschließen, zu der sie gehören. Zur Einführung des Arbeitsbegriffes gut geeignet sind die Seilmaschinen und die schiefe Ebene, weil bei ihnen die Verhältnisse in dieser Hinsicht besonders einfach liegen.

Für die Berufs- und Oberschule sei auf die Versuche mit dem Pronyschen Zaum (V 98, 99, 100) besonders hingewiesen.

§ 12. STATISCHE KRÄFTE, ZUSAMMENSETZUNG UND ZERLEGUNG VON KRÄFTEN

47. Kraft als Ursache einer Verformung [G, O]

Dünne Holzleiste, Blattfeder, Unterlegklötze, Gewichtsstücke, Gummifaden, Schraubenfeder*, Stativ mit Muffe und Klemme.

Möglichkeiten von Verformungen unter dem Einfluß von Kräften:

Biegen, Dehnen, Drillen, Stauchen (Knicken), Scheren.

Die experimentelle Behandlung im Unterricht beschränkt sich in der Regel auf die leicht zugänglichen Fälle:

- a) Biegen, vgl. V 24, 1, Abb. 44: belasteter Pappstreifen;
- b) Dehnen, vgl. V 24, 2, Abb. 45: belastete Schraubenfeder.

Außerdem kommt in Frage die Biegung einer einseitig eingespannten, belasteten, schmalen Holzleiste oder Blattfeder (Abb. 64).

Alle Versuche lassen deutlich die Bedeutung des Gewichts als einer Kraft hervortreten.

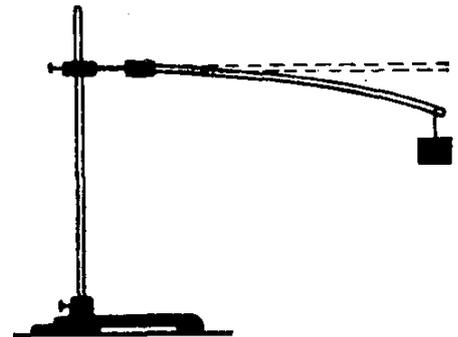


Abb. 64 An einem Ende belastete Holzleiste

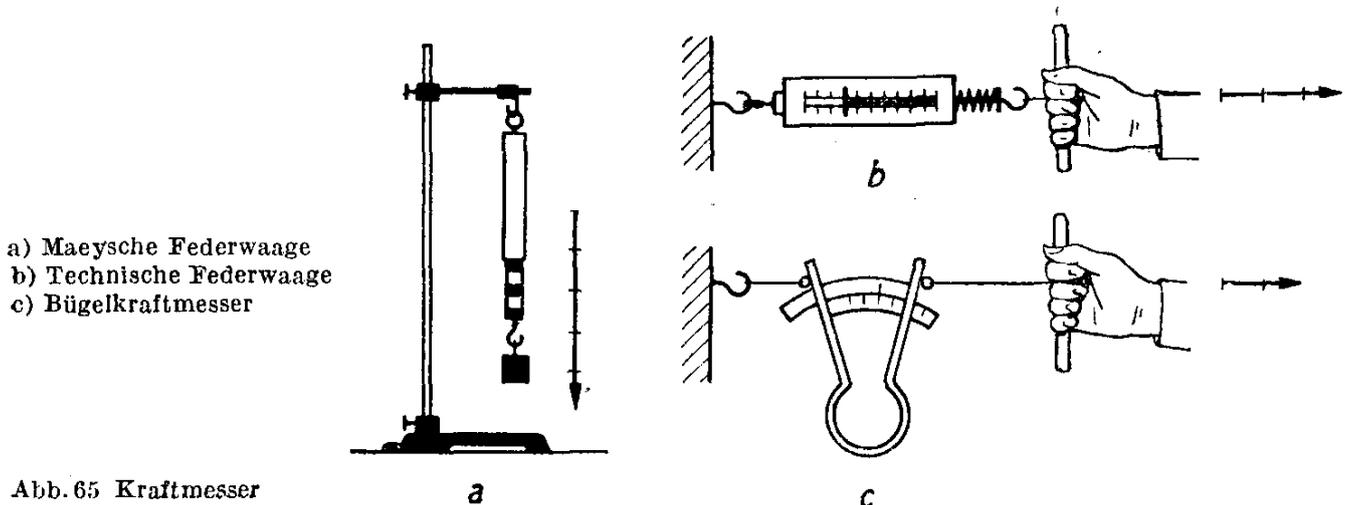
48. Kraftmessung mittels einer Federwaage [G, O]

Maeyische Federwaagen verschiedener Meßbereiche, technische Federwaagen (10 kp und 25 kp), Bügelkraftmesser, Gewichtsstücke, Stativ mit Muffe und Klemme.

Die bei der Verformung eines Körpers auftretenden elastischen Gegenkräfte können zum Messen der verformenden Kräfte dienen. Vergleiche dazu § 13.

Gewichte und Muskelkräfte werden durch Maeyische Federwaagen, technische Federwaagen und Bügelkraftmesser (Abb. 65 a bis c) gemessen. Gleichzeitig erkennt man daraus, daß sich gespannte Federn und Gewichte oder irgendwelche anderen Kräfte gegenseitig vertreten können.

Die zeichnerische Wiedergabe der Versuche führt zwanglos zur Darstellung der Kraft als *Vektor*. Bezüglich des Kräftegleichgewichts ist MB, S. 52 zu beachten.



- a) Maeyische Federwaage
- b) Technische Federwaage
- c) Bügelkraftmesser

Abb. 65 Kraftmesser

Bemerkung: Die Verwendung der Federwaage als Kraftmesser bietet ein lehrreiches Beispiel für die bei der Eichung eines Maßstabes zu beachtende Gedankenfolge:

1. *Maßvergleichung:* Kräfte sind gleich groß, wenn sie dieselbe Federwaage gleich stark dehnen.
2. *Festsetzung der Maßeinheit:* Als Kräfteinheit gilt diejenige Kraft, die eine Federwaage um das gleiche Stück dehnt, wie das Gewicht eines darangehängten Vergleichskörpers mit der Masse von 1 kg (in der geogr. Breite von 45° und in Meereshöhe). Die Einheit der Kraft ist 1 Kilopond (kp).
3. *Maßeichung:* Dehnt eine Kraft die Federwaage n mal so stark wie eine Kraft von 1 kp, so hat sie die Größe von n kp.

49. Übertragung von Kräften durch ein Seil [G, O]

2 Rollen*, 2 Federwaagen, Hakengewichte*, 2 Lagerzapfen*, Schnur, 2 Stative mit Muffen und Klemmen, Holzstab.

Zur Veranschaulichung des Seiles als eines häufig gebrauchten Hilfsmittels zur Kraftübertragung dienen die in Abb. 66 a bis c dargestellten einfachen Versuche. Sie wollen die Erkenntnis vermitteln, daß die Größe der übertragenen Kraft von der Seilführung unabhängig ist (Abb. 66 a u. b) und daß das Seil an allen Stellen gleich stark auf Zug beansprucht wird (Abb. 66 c).

Der Gedanke des Kräftegleichgewichts kommt bei allen Versuchen in der Gleichheit von Gewicht und Federkraft zum Ausdruck (siehe dazu MB, S. 52).

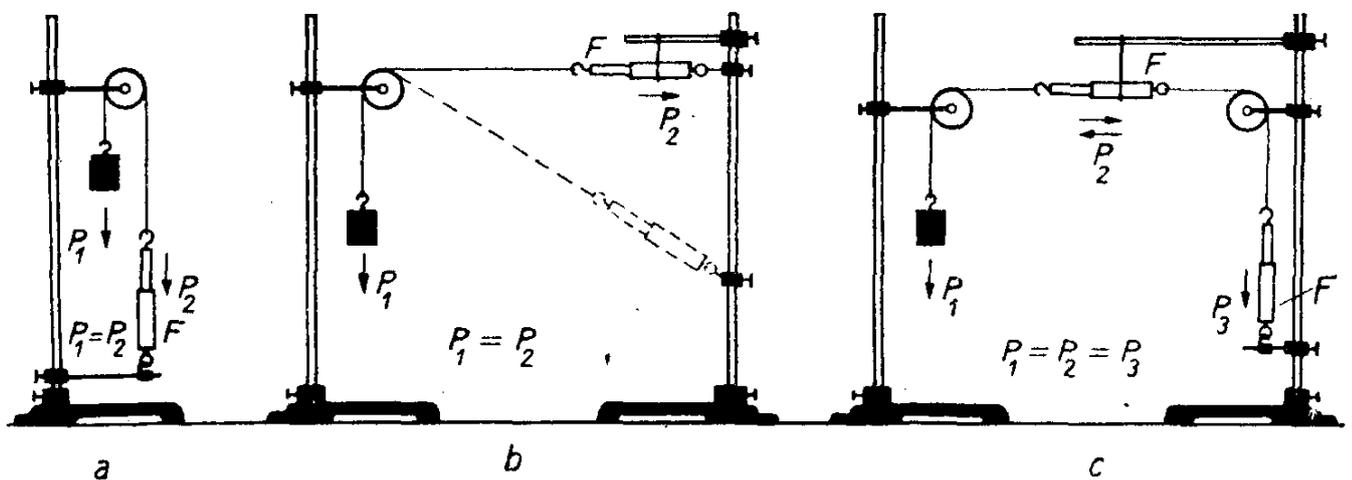


Abb. 66 Kraftübertragung durch Seil
a) Richtungsumkehr der Kraft

b) Seitliche Richtungsänderung der Kraft
c) Gleichmäßige Beanspruchung der Schnur

Bemerkung zu Abb. b und c: Um den Durchhang der oberen Federwaage zu vermeiden, empfiehlt es sich, sie mit einer Schnurschlinge an einem darüber eingespannten Stab aufzuhängen.

50. Zusammensetzung zweier Kräfte von gleicher Richtung mit gleichem Angriffspunkt [O]

2 Rollen*, 2 Lagerzapfen*, Hakengewichte*, Federwaage, Schnur, 2 Stative mit Muffen und Klemmen, schwerer Körper (großes Hakengewicht) als Halteklötz.

Der mit einfachen Mitteln nach Abb. 67 leicht ausführbare Versuch zeigt sehr eindringlich, daß sich zwei im gleichen Punkt angreifende, gleichgerichtete Kräfte P_1

und P_2 zu einer Kraft P_3 , der Summe von P_1 und P_2 , zusammensetzen:

$$P_3 = P_1 + P_2.$$

Es empfiehlt sich, die Kräfte erst abwechselnd und dann gleichzeitig wirken zu lassen.

Bemerkungen:

1. Die an der Federwaage gemessene Kraft ist die Gegenkraft zu P_3 . Siehe dazu MB, S. 52!
2. Der Versuch schließt in sich auch die Zusammensetzung zweier Kräfte von entgegengesetzter Richtung mit gleichem Angriffspunkt:

$$P_1 = P_3 - P_2.$$

3. Wegen seiner Einfachheit ist der Versuch gut zur Einführung der Zusammensetzbarkeit von Kräften geeignet.

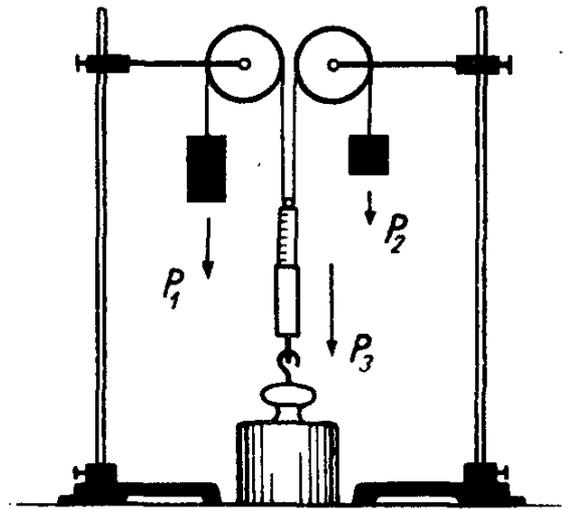


Abb. 67 Parallele Kräfte mit gleichem Angriffspunkt

51. Parallelogramm der Kräfte – Benutzung von Federwaagen [O – Ü]

3 Federwaagen, Schnur, 2 Nägel, Wandtafel.

Die ausziehbaren Teile dreier Federwaagen werden, wie in Abb. 68 dargestellt, durch Schnüre untereinander verbunden. Zwei der Federwaagen werden am oberen Tafelrand mit zwei Nägeln befestigt, während auf die dritte und damit auf das ganze System mit der Hand ein Zug ausgeübt wird. Die drei durch die Federwaagen gemessenen Kräfte halten dabei einander das Gleichgewicht.

Die Kräfte werden entsprechend den Anzeigen der Federwaagen durch Kreidestriche in den Richtungen der Schnüre als Vektoren dargestellt (in Abb. 68 seitlich daneben gezeichnet). Zeichnet man vom gleichen Angriffspunkt aus einen Vektor R von gleicher Größe, aber entgegengesetzter Richtung wie einer der drei Vektoren, etwa entgegengesetzt zu P_1 , so stellt er den Vektor der Gegenkraft zu P_1 dar, die mit P_1 im Gleichgewicht ist.

Andrerseits erkennt man aus der Zeichnung, daß R die Diagonale des aus den Vektoren der beiden Seitenkräfte P_2 und P_3 gebildeten Parallelogramms ist. Da zwischen diesen beiden Seitenkräften und P_1 ebenfalls Gleichgewicht herrscht, muß R die beiden Kräfte P_2 und P_3 in ihrer Gesamtwirkung ersetzen. Es folgt daraus, daß der Vektor der resultierenden Kraft gleich der geometrischen Summe der Vektoren der Seitenkräfte ist.

Andrerseits erkennt man aus der Zeichnung, daß R die Diagonale des aus den Vektoren der beiden Seitenkräfte P_2 und P_3 gebildeten Parallelogramms ist. Da zwischen diesen beiden Seitenkräften und P_1 ebenfalls Gleichgewicht herrscht, muß R die beiden Kräfte P_2 und P_3 in ihrer Gesamtwirkung ersetzen. Es folgt daraus, daß der Vektor der resultierenden Kraft gleich der geometrischen Summe der Vektoren der Seitenkräfte ist.

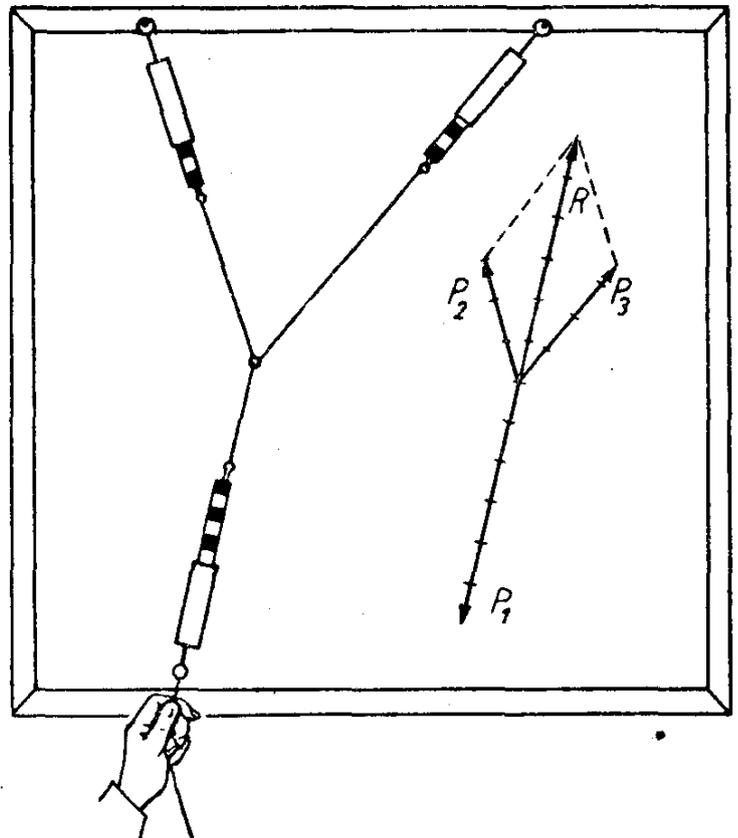


Abb. 68 Gleichgewicht zwischen drei nichtparallelen Kräften Benutzung von drei Federwaagen

Bemerkungen:

1. Zweckmäßigerweise verbindet man die beiden an den Nägeln befestigten Federwaagen durch eine Schnur, auf der die zur dritten Federwaage hinführende Schnur mit einer Endöse unter Reibung gleiten kann. Man ermöglicht auf diese Weise eine empfindliche Einstellung.
2. Der Versuch eignet sich vorzüglich für Schülerübungen. Man benutzt dabei Zeichenbretter als Unterlage.
3. Die durch V 50 dargestellte Zusammenfassung paralleler, in einem Punkt angreifender Kräfte ist in dem durch V 51 wiedergegebenen allgemeinen Fall als Sonderfall enthalten. Das Vektorenparallelogramm entartet dabei zu einer Strecke. Die geometrische Summe der Vektoren der Seitenkräfte geht in die algebraische Summe über.

52. Parallelogramm der Kräfte — Benutzung von Gewichtsstücken [O — Ü]

2 Rollen*, 2 Lagerzapfen*, Hakengewichte*, Schnur, 2 Stative mit Muffen und Klemmen, Tafellineal; Kartonblätter mit vorgezeichneten Kräfteparallelogrammen.

Der Versuch gleicht im Prinzip und in seiner Gedankenführung völlig dem Versuch V 51, nur wird das Kräftegleichgewicht zwischen drei durch Schnüre untereinander verbundenen Gruppen von Gewichtsstücken hergestellt (Abb. 69). Man ordnet den Versuch so an, daß die Schnüre in einer Ebene parallel zur Tafel Ebene liegen, und überträgt die Schnurrichtungen auf die Tafel, was sich durch Parallelhalten des Tafellineals nach Augenmaß hinreichend genau erreichen läßt. Noch zuverlässiger und überzeugender wirkt der Schattenwurf der Versuchsanordnung auf die Tafel mittels einer geeigneten Lichtquelle. Nachdem man die gewählten Gewichte als Vektoren dargestellt und die Zeichnung zu einem Parallelogramm ergänzt hat, führen dieselben Gedankengänge wie bei V 51 zur Aufstellung des Satzes vom Kräfteparallelogramm.

Bemerkung: Soll der Versuch lediglich zur Wiederholung dienen, so genügen zur Veranschaulichung des Kräfteparallelogramms vorgezeichnete Parallelogramme auf Kartonblättern, die man hinter die Schnüre hält (Abb. 70).

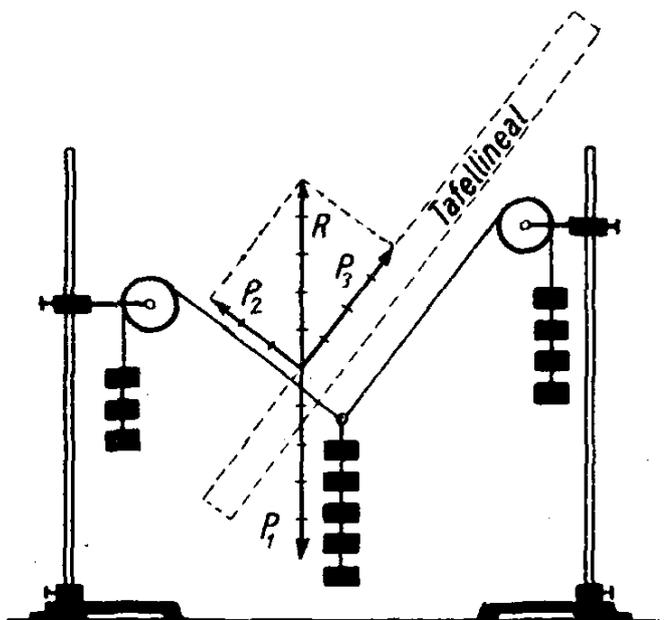


Abb. 69 Gleichgewicht zwischen drei nichtparallelen Kräften. Benutzung von Gewichtsstücken

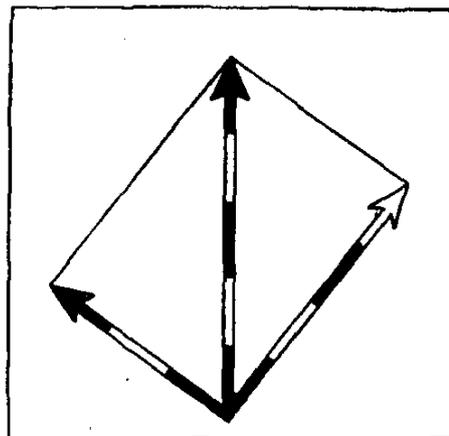


Abb. 70 Kartonblatt mit aufgezeichnetem Kräfteparallelogramm

53. Zerlegung einer Kraft an waagerechter Bahn [0]

Geschlitztes Brett*, 2 Lagerzapfen*, leicht beweglicher Wagen*, 2 Rollen*, Haken-gewichte*, Holzleiste mit aufgeklebtem Winkelmesser. 3 Stative mit Muffen und Klemmen, Schnur, 2 Federwaagen.

Ein auf einem horizontal gelagerten, geschlitzten Brett ruhender leichtbeweglicher Wagen ist der Kraftwirkung zweier Schnurzüge ausgesetzt. Einzelheiten der Versuchsanordnung sind der Abb. 71 zu entnehmen. Befinden sich die am Wagen angreifenden Kräfte im Gleichgewicht, so erweist sich nach dem Parallelogrammsatz die durch die Gegenkraft P_1' gemessene, in Richtung der Bahn wirkende Komponente P_1 als Projektion der schräg nach unten gerichteten Kraft P . Es ist

$$P_1 = P \cdot \cos \alpha$$

(Projektionssatz der Mechanik).

Zur Messung des Winkels dient ein Winkelmesser aus Pappe, der auf eine an das Brett zu haltende Holzleiste geklebt ist.

Bezüglich des Kräftegleichgewichts beachte MB, S. 52!

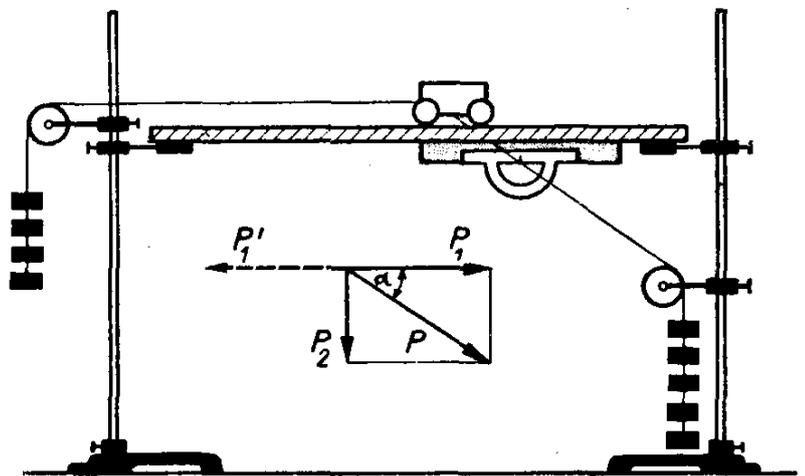


Abb. 71 Zerlegung einer Kraft an waagerechter Bahn

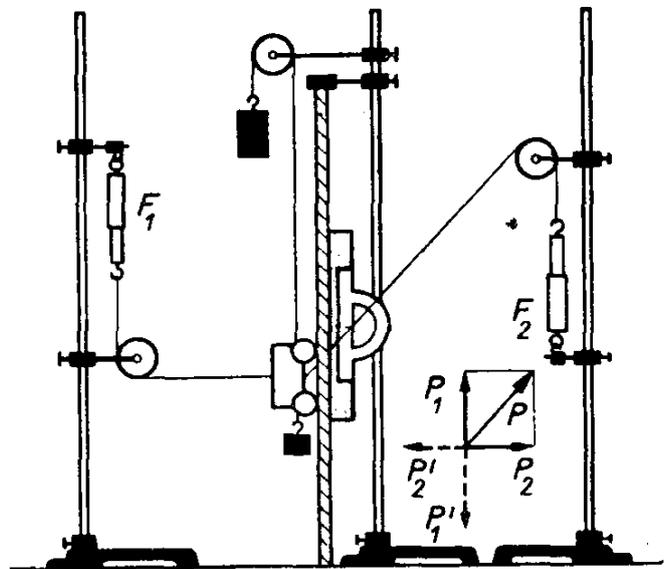


Abb. 72 Zerlegung einer Kraft an senkrechter Bahn

Bemerkungen:

1. Die als Druckkraft P_2 senkrecht gegen die Bahn wirkende Komponente von P wird vom Brett aufgenommen und tritt beim Versuch nicht in Erscheinung.
2. Abb. 72 zeigt die Ausführung des entsprechenden Versuches an senkrechter Bahn. Ist α wie in Abb. 71 der Winkel zwischen P und P_1 , so gilt:

$$P_1 = P \cdot \cos \alpha, \quad P_2 = P \cdot \sin \alpha, \quad P = \sqrt{P_1^2 + P_2^2}.$$

54. Zerlegung einer Kraft in zwei parallele Kräfte bei vorgegebenen Angriffspunkten [0-Ü]

Meterstab, 2 Federwaagen, Haken-gewichte*, 2 Stative mit Muffen und Klemmen, Fadenschlingen zum Aufhängen.

Der Versuch benutzt einen nach Abb. 73 mit Fadenschlingen an zwei Federwaagen gehängten Meterstab, an dem ein Gewichtsstück verschiebbar befestigt wird. Die beiden Seitenkräfte, in die sich das Gewicht zerlegt, stellen sich selbständig so ein, daß sie

sich umgekehrt verhalten wie die Entfernungen a_1 und a_2 ihrer Angriffspunkte von dem des Gewichtes:

$$P_1 : P_2 = a_2 : a_1.$$

Ihre Summe ist dabei stets gleich dem verschiebbaren Gewicht P :

$$P_1 + P_2 = P.$$

Bemerkungen:

1. Als Aufhängepunkte des Stabes wählt man zweckmäßigerweise die Teilstriche 10 cm und 90 cm; nutzbare Stablänge 80 cm.
2. Bei den Messungen ist das Eigengewicht des Stabes zu berücksichtigen, das sich auf beide Federwaagen gleichmäßig verteilt.
3. Nach Anhängen des Gewichtsstückes sind die Stativso zu verschieben, daß die Federwaagen senkrecht hängen. Die Tragklammern werden soweit gehoben bzw. gesenkt, bis der Meterstab waagrecht liegt.

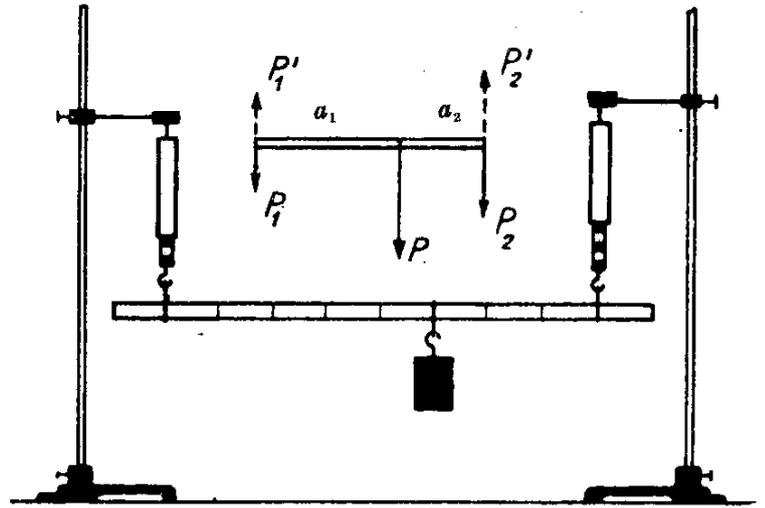


Abb. 73 Parallele Kräfte am waagrecht hängenden Stab

§ 13. ELASTISCHE KRÄFTE

55. Ableitung des Hookeschen Gesetzes an der Schraubenfeder [G, O-Ü]

Schraubenfeder*, 2 Stativ mit Muffen und Klemmen, Stativhaken*, Hakengewichte*, Meterstab mit verschiebbarem Zeiger*, Millimeterpapier.

Man hängt eine Schraubenfeder an einen Stativhaken, stellt den Maßstab daneben senkrecht auf den Tisch, richtet den Zeiger auf das untere Ende der Feder ein und liest die Zeigerstellung in cm ab. Dabei stellt man den Maßstab so, daß die Zahlen nach unten wachsen (Abb. 74). Dann belastet man die Feder der Reihe nach mit 1, mit 2, mit 3 und mehr Gewichtsstücken zu je 50 p, ermittelt jedesmal die Zeigerstellung und trägt die Meßergebnisse in eine Tabelle nach folgendem Muster ein:

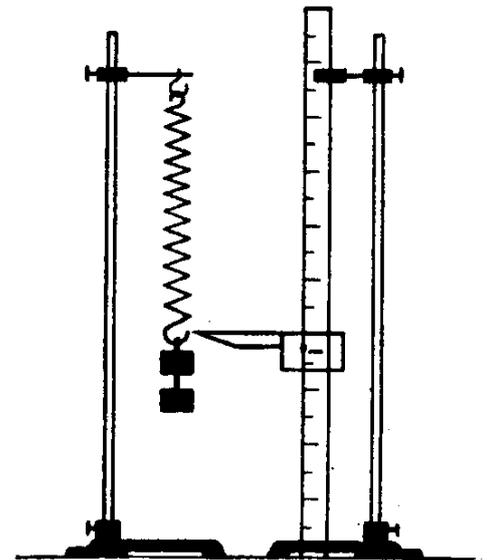


Abb. 74 Elastische Dehnung einer Schraubenfeder

Belastung (P) p	Zeigerstellung cm	Gesamtverlängerung (s) cm	Zuwachs der Verlängerung (Δs) cm	Federkonstante (P/s) p/cm
0	52,1	0	0	
50	53,6	1,5	1,5	33,3
100	55,1	3,0	1,5	33,3
150	56,7	4,6	1,6	32,6
200	58,2	6,1	1,5	32,8
250	59,8	7,7	1,6	32,5

Die Ergebnisse werden durch eine graphische Darstellung auf Millimeterpapier veranschaulicht. Auf der waagerechten Achse (x -Achse) wird die Belastung, auf der senkrechten (y -Achse) die Zeigerstellung – nach unten! – abgetragen (Abb. 75).

Es ergibt sich als Schaubild mit großer Annäherung eine gerade Linie. Die Feder verlängert sich beim Vergrößern der Belastung um je 50 p jedesmal nahezu um den gleichen Betrag.

Dasselbe lehrt ein Blick in die letzte Spalte der Tabelle, nach der sich der Quotient aus Belastung und Gesamtverlängerung als annähernd konstant erweist (Mittelwert 32,9 p/cm). Genaue Messungen ergeben das Gesetz: *Die elastische Dehnung einer Schraubenfeder ist proportional der Belastung* (Hooke'sches Gesetz).

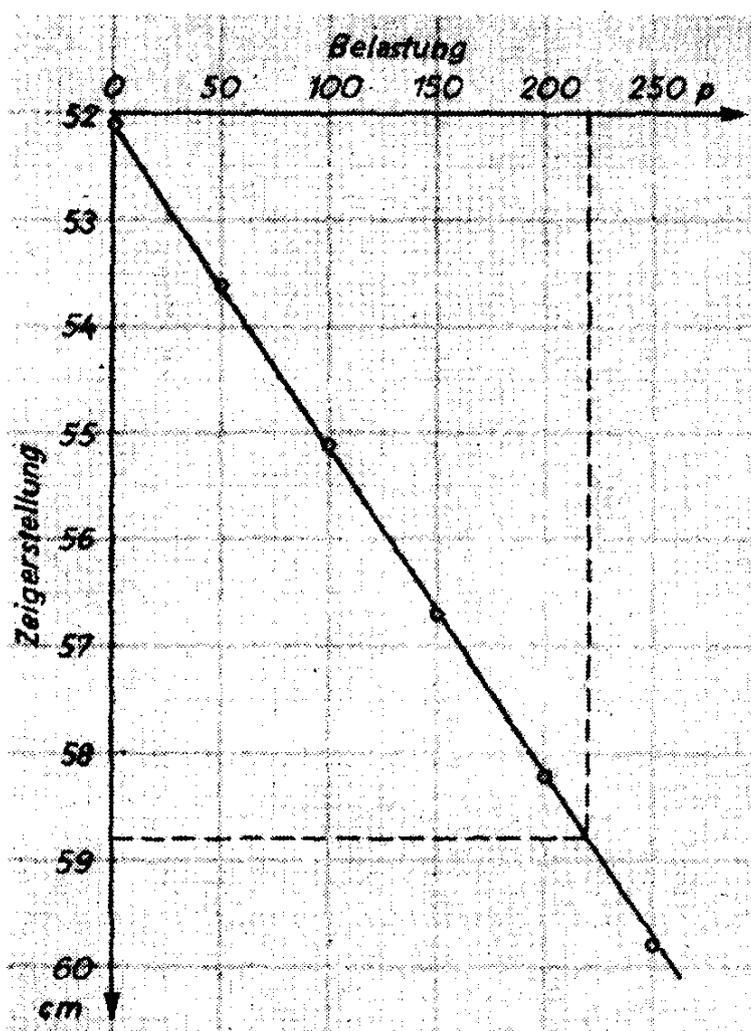


Abb. 75 Schaubild zur elastischen Dehnung einer Schraubenfeder

Bemerkungen:

1. Bei der Verlängerung einer belasteten Schraubenfeder handelt es sich nicht um eine Dehnung des Drahtes, sondern um einen aus einer Drillung (Torsion) und einer Biegung zusammengesetzten Vorgang. Die Drillung kann man sichtbar machen, wenn man am unteren Ende der Feder einen leichten Zeiger befestigt.
2. [O] Bezeichnet man die Belastung mit P und die dadurch hervorgerufene Verlängerung der Feder mit s , so ist $P = k \cdot s$, worin k eine die Feder kennzeichnende Konstante, die sogenannte *Federkonstante* ist. Sie ist zahlenmäßig gleich der Kraft, die die Feder um eine Längeneinheit dehnt.
Die 5. Spalte der Tabelle enthält nichts anderes als die Federkonstante der benutzten Feder.

56. Bestimmen eines unbekanntes Gewichtes mit Hilfe einer Schraubenfeder Eichung einer Schraubenfeder [G, O-Ü]

Dieselben Geräte wie bei V 55, ein Stück Blei oder ein anderer Versuchskörper mit Haken.

- a) Es ist zweckmäßig, den Versuch an den vorhergehenden anzuschließen. Das Bleistück mit dem unbekanntes Gewicht x möge die Feder bis zur Zeigerstellung 58,8 cm verlängern. Aus der graphischen Darstellung (Abb. 75) ergibt sich durch Dazwischenschalten (Interpolation) $x = 220$ p.

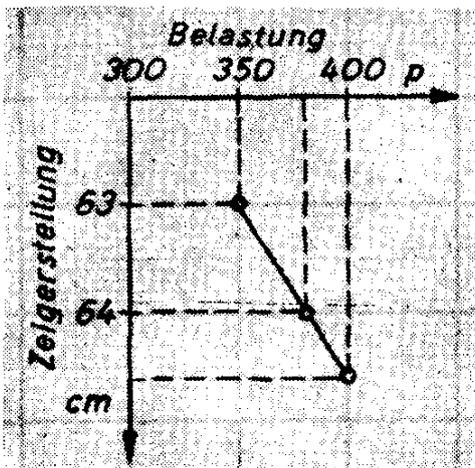


Abb. 76 Schaubild zur Bestimmung eines unbekannten Gewichtes mittels einer Schraubenfeder

b) Steht eine graphische Darstellung nicht zur Verfügung, so belastet man die Feder zunächst mit dem zu wägenden Körper, bestimmt die Zeigerstellung und grenzt sie mit 50-g-Stücken ein. Man braucht dann an Stelle der Gesamtdarstellung nur einen Ausschnitt zu zeichnen (Abb. 76).

Beispiel:

Belastung p	Zeigerstellung cm
x	64,0
350	63,0
400	64,6

Es ergibt sich $x = 380$ p

57. Elastische Dehnung einer Gummischnur [O-Ü]

Gummischnur oder dünner Gummischlauch (Länge etwa 500 mm), 2 Stative mit Muffen und Klemmen, Federklammer, kleine Waagschale*, Gewichtssatz, Meterstab mit verschiebbarem Zeiger*, Millimeterpapier.

Die Schnur wird mittels einer Federklammer an einem Stativ befestigt (Abb. 77). An das untere Ende der Gummischnur hängt man eine kleine Waagschale. Diese wird in Stufen von je 20 p belastet. Im übrigen wird der Versuch wie bei V 55 durchgeführt. Die Ergebnisse werden wie dort in eine Tabelle eingetragen und graphisch dargestellt.

Beispiel:

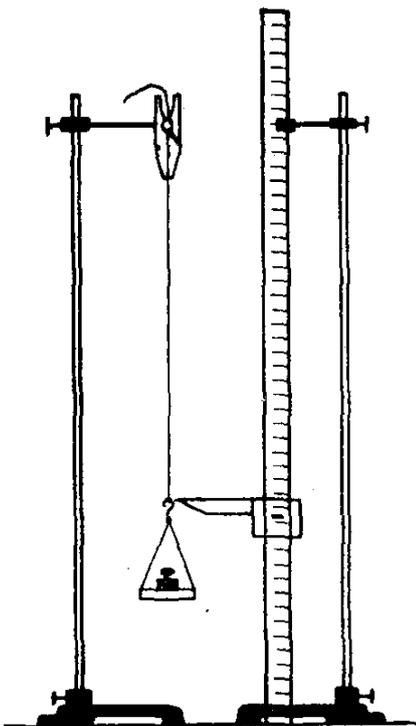


Abb. 77 Nachweis der elastischen Dehnung einer Gummischnur

Belastung (P) p	Zeigerstellung cm	Gesamt- verlängerung (s) cm	Zuwachs der Verlängerung (Δs) cm
0	71,8	0	0
20	73,5	1,7	1,7
40	75,4	3,6	1,9
60	77,6	5,8	2,2
80	80,0	8,2	2,4
100	82,7	10,9	2,7
120	86,2	14,4	3,5

Wenn man die Belastung entfernt, so erreicht die Schnur, wenn auch erst nach einigen Minuten, wieder ihre ursprüngliche Länge. Es handelt sich in dem angeführten Beispiel um eine *elastische* Verformung, da die Gestaltsveränderung vollkommen zurückgeht. Die Dehnung ist aber nicht der Belastung proportional. Bei der graphischen Darstellung ergibt sich keine gerade Linie. Das Hookesche Gesetz gilt nicht mehr, wenn die Belastung wie in dem vorliegenden Fall gesteigert wird.

58. Elastische Dehnung von Drähten [0-Ü]

Stativ mit Muffen und Klemmen, dazu Verlängerungsstab, Lagerzapfen*, Kupferdraht mit Endösen (Ø etwa 0,3 mm, Länge 800 mm), 1-kg-Stück, Hakengewichte*, dünne Holzleiste als Zeiger (Länge etwa 600 mm) mit Bohrung an einem Ende, Zentimeterskala auf senkrechter Holzleiste mit Fuß.

An ein verlängertes Stativ wird mittels einer Muffe ein etwa 800 mm langer Kupferdraht gehängt und durch ein Gewicht von 1 kp gespannt. Nahe seinem unteren Ende wird am Stativ, um einen Lagerzapfen drehbar, eine dünne, möglichst leichte, etwa 600 mm lange Holzleiste als Zeiger befestigt. Der Draht wird, etwa 20 mm vom Drehpunkt entfernt, in einer flachen Auskerbung einmal um den Zeiger gewunden. Die Zeigerspitze spielt vor einer auf dem Tisch stehenden Zentimeterskala (Abb. 78).

Durch Anhängen von Hakengewichten (50 p) wird die Belastung allmählich gesteigert. Wird die Elastizitätsgrenze dabei nicht überschritten, so nimmt der Zeigerausschlag gleichmäßig zu; bei Fortnahme der Gewichtsstücke geht er wieder auf den Ausgangswert zurück (Hookesches Gesetz).

Beim Überschreiten der Elastizitätsgrenze dehnt sich der Draht stärker, als es dem Hookeschen Gesetz entspricht; er beginnt zu „fließen“. Die Länge des Drahtes geht bei Entlastung nicht wieder auf den alten Wert zurück.

Bemerkungen:

1. Damit die Ösen auch größeren Zugkräften standhalten, wird nach Bilden einer einfachen Öse das freie Ende des Drahtes durch die Öse gesteckt (Abb. 79) und nochmals mit dem Draht verdreht.
2. Unter Berücksichtigung des Übersetzungsverhältnisses läßt sich aus dem Zeigerausschlag die Drahtverlängerung Δl errechnen.
3. Benutzt man statt des ersten Drahtes einen solchen mit gleichem Querschnitt, aber anderer nutzbarer Länge oder einen solchen von gleicher nutzbarer Länge, aber anderem Querschnitt, so kann man in grober Annäherung feststellen, daß die Verlängerung Δl im Bereich der elastischen Dehnung der Länge l und der spannenden Kraft P proportional, dem Querschnitt F umgekehrt proportional ist:

$$\Delta l \sim \frac{P \cdot l}{F}.$$

Bei Einführung eines Proportionalitätsfaktors, den man mit $1/E$ bezeichnet, ist

$$\Delta l = \frac{1}{E} \cdot \frac{P \cdot l}{F}.$$

E ist eine Materialkonstante und heißt *Elastizitätsmodul*. Er wird in kp/mm^2 gemessen. Vergleichsweise gilt

$$\begin{aligned} \text{für Stahl } E &= 20000 \dots 22000 \text{ kp/mm}^2 \\ \text{für Kupfer } E &= 10000 \dots 13000 \text{ kp/mm}^2 \end{aligned}$$

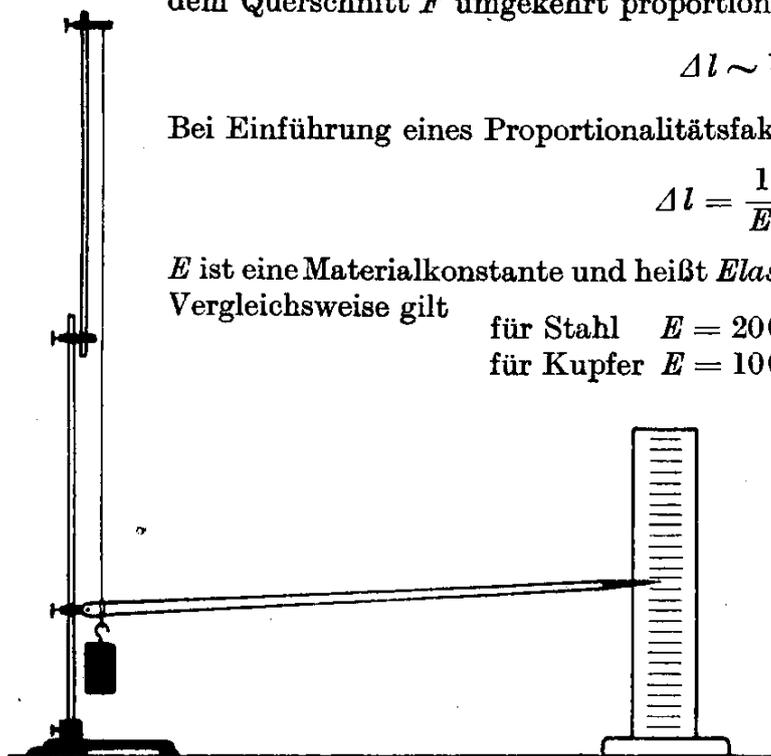


Abb. 78
Zeigergerät
zum Nachweis
der elastischen
Dehnung
eines Drahtes

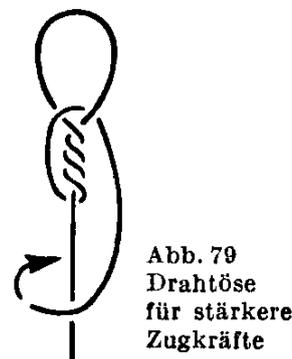


Abb. 79
Drahtöse
für stärkere
Zugkräfte

59. Unelastische Dehnung von Drähten – Zugfestigkeit [O]

Drähte aus Eisen, Kupfer, Messing (\varnothing etwa 0,3 ... 0,7 mm) mit Endösen, 2 starke Rundhölzer mit Haken in der Mitte, Federwaage (25 kp), Meterstab, Mikrometerschraube.

Ein Draht wird, nachdem man seinen Durchmesser bestimmt und den Querschnitt berechnet hat, unter Zwischenschalten einer Federwaage mit seinen Enden an zwei kräftigen Rundhölzern befestigt (vgl. V 58, Bem. 1). Durch zwei dicht an den Drahtenden aufgeklebte Papiermarken wird eine bestimmte Länge begrenzt, die gemessen wird. Das eine Rundholz wird mit den Füßen gegen den Boden gedrückt, das andere mit den Händen hochgezogen bzw. hochgestemmt (Abb. 80).

Beim Überschreiten der Elastizitätsgrenze kann man ohne merklichen Kraftzuwachs eine deutlich sichtbare Verlängerung des Drahtes beobachten. Er beginnt zu „fließen“. Beim Nachlassen des Zuges geht die Länge nicht mehr auf den alten Wert zurück. Der Draht hat eine unelastische Dehnung erfahren.

Beim Überschreiten der Festigkeitsgrenze zerreißt der Draht.

Der Quotient aus der im Augenblick des Zerreißen wirkenden Zugkraft und dem Drahtquerschnitt beim Beginn des Versuches gibt die *Zugfestigkeit* in kp/mm^2 an (vgl. Tabelle).

Stoff	Zugfestigkeit kp/mm^2
Eisen	40 ... 60
Stahl	38 ... 220
Kupfer	22 ... 38
Messing	35 ... 52
Bronze	20 ... 35

Bei manchen Legierungen ist die Zugfestigkeit größer als bei den reinen Metallen.

Bemerkungen:

1. Um die im Augenblick des Zerreißen wirkende Zugkraft festzustellen, klemmt man zu Beginn des Versuches ein Korkstückchen in den Schlitz der Federwaage. Es wird vom Zeiger mitgenommen, verbleibt beim Entspannen an seiner Stelle und läßt so die größte wirksam gewesene Zugkraft erkennen.
2. Nach dem Zerreißen des Drahtes bestimmt man aus den Längen der Stücke die Größe der Längenänderung. Die in Prozenten der ursprünglichen Länge angegebene Verlängerung gibt einen Anhalt zur Beurteilung der *Dehnbarkeit* des Materials. Sie beträgt bei Eisen etwa 20%, bei Kupfer 40%.
3. Die Erfahrung lehrt, daß ein über die Elastizitätsgrenze hinaus beanspruchter Draht nach Aufhören des Fließens eine größere Last als im ungereckten Zustand tragen kann, ohne sich weiter zu verformen. Bei der unelastischen Dehnung verfestigt sich also das Material zunächst von selbst. Diese Eigenschaft sowie die selbst bei großem Kraftaufwand nur geringe elastische Dehnung und die große Zugfestigkeit geben Baustoffen wie Eisen und Stahl eine ganz besondere Bedeutung.

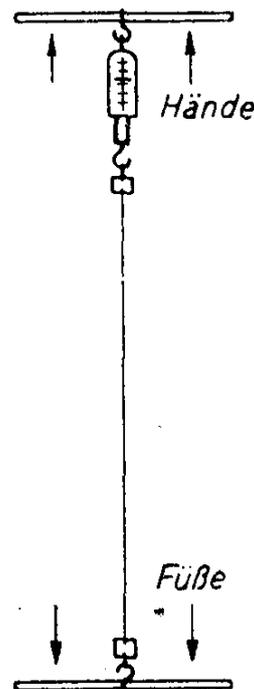


Abb. 80 Gerät zum Nachweis der unelastischen Dehnung eines Drahtes

60. Zerreißen eines Glasfadens – Zugfestigkeit und Sprödigkeit [O – Ü]

Glasstäbchen, 2 Holzklötzchen (etwa $20 \times 20 \times 60$ mm) mit axialen Bohrungen und Ösen aus starkem Draht, Siegelack, 2 starke Rundhölzer, Federwaage (25 kp), Meterstab, Mikrometerschraube.

Man kittet das Glasstäbchen mit Siegelack in die Bohrungen der beiden Holzklötzchen, zieht es nach genügender Erwärmung in der Mitte zu einem Glasfaden aus, bestimmt dessen Querschnitt und mißt die freie Länge zwischen den Holzstücken. Die weitere Versuchsdurchführung erfolgt wie bei V 59. Man spannt den Glasfaden, bis er zerreißt und bestimmt die Zugfestigkeit. Sie beträgt etwa 20 kp/mm^2 .

Durch Ausmessen der Längen der Bruchstücke und Vergleichen mit der ursprünglichen Länge stellt man fest, daß der Glasfaden sich nicht verlängert hat. Glas zeigt also keine unelastische Dehnung, es ist *spröde*. Die Elastizitätsgrenze und die Bruchgrenze fallen zusammen.

Bemerkung: Ein hoch erhitztes Glasstäbchen läßt sich unter Anwendung geringer Kräfte beliebig verformen, es ist *plastisch*. Das Beispiel des Glases zeigt besonders deutlich die Abhängigkeit der elastischen Eigenschaften von der Temperatur.

61. Versuche mit Bologneser Fläschchen und Glastränen – Hohe Sprödigkeit schnell gekühlter Gläser [O]

Bologneser Fläschchen, Glastränen, Reagenzglas, Standzylinder, ausgekochtes Wasser, Kieselstein, Pappstück, 2 Hämmer, 2 Flachzangen.

Wird Glas schnell und ungleichmäßig gekühlt, so bilden sich im Innern starke Spannungen; dadurch wird die Sprödigkeit erhöht. Eindrucksvolle Beispiele liefern *Bologneser Fläschchen* (Abb. 81 a) und *Glastränen* (Abb. 81 b). Zerschlägt man einen Kieselstein (Hammer als Unterlage) und wirft einen kleinen scharfkantigen Splitter in ein Bologneser Fläschchen, so wird die Innenwand des Bodens geritzt; das Fläschchen zerspringt sofort.

Glastränen zeigen sehr auffällig, daß Elastizität und Sprödigkeit miteinander vereinbare Eigenschaften sind. Das fadenförmige Ende einer Glasträne federt innerhalb gewisser Grenzen wie Stahldraht; bricht man es aber mit einer Zange ab, so zerfällt der ganze Körper sofort zu weißlichem Pulver (Vorsicht!). Bei diesem Versuch hält man die Glasträne am besten mit einer Flachzange über ein Reagenzglas. Ein über einen Standzylinder gelegtes durchbohrtes Stück Pappe dient als Halter für das Reagenzglas. Füllt man bei einem zweiten Versuch das Reagenzglas mit ausgekochtem Wasser und taucht eine am fadenförmigen Ende mit einer Zange gehaltene Glasträne hinein, so wird beim Abbrechen der Spitze das Reagenzglas zertrümmert (Abb. 82). Man ersieht

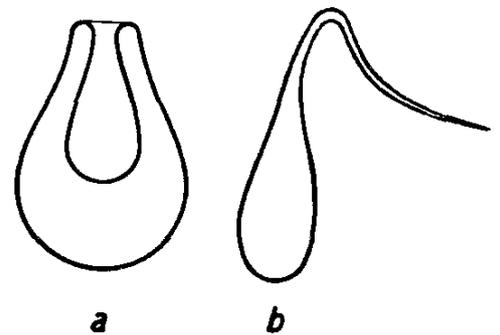


Abb. 81 Schnell gekühlte Gläser
a) Bologneser Fläschchen
b) Glasträne

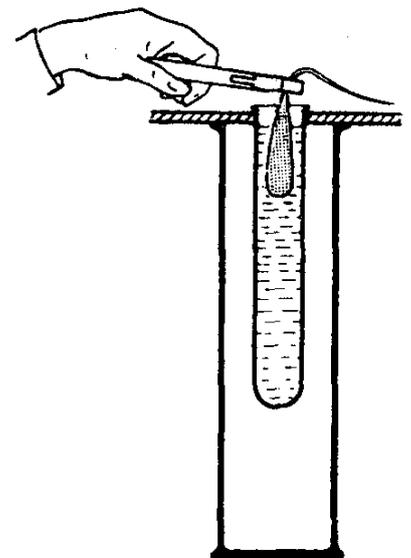


Abb. 82 Glasträne in wasser-gefülltem Reagenzglas

daraus, daß bei dem plötzlichen Zerfall der Glasträne stoßartig erhebliche Druckkräfte im Wasser auftreten, die auf die Glaswand übertragen werden. (Der Standzylinder dient als Schutz gegen Splitterwirkung.)

Bemerkung: Infolge der unausgeglichenen Spannungen ist das Glas in einer Glasträne doppelbrechend. In polarisiertem Licht kann man die Spannungen nachweisen.

62. Biegung einer Blattfeder [G, O-Ü]

Flacher Stahlstreifen, 2 Schraubzwingen, Drahtschlinge, Haken-gewichte*, Unterstellkasten*, Meterstab mit verschiebbarem Zeiger*, Stativ mit Muffe und Klemme.

Der Kasten wird mit einer Schraubzwinde am Tisch befestigt und auf ihm das eine Ende der Feder festgeklemmt. An das andere Ende hängt man eine Drahtschlinge (Abb. 83). Damit sie nicht abgleiten kann, ist der Stahlstreifen am Ende ein wenig eingekerbt. Man steigert die Belastung des freien Endes stufenweise und mißt die Senkung, den sogenannten *Biegungspfeil* (s) mit Hilfe eines senkrecht auf den Tisch gestellten Maßstabes. Die Ergebnisse trägt man wie bei V 55 in eine Tabelle ein und stellt sie graphisch dar. Es ergibt sich das Gesetz: *Die Senkung des freien Endes eines einseitig belasteten Stahlstreifens ist proportional der Belastung.* Auch für die Biegung gilt das Hookesche Gesetz.

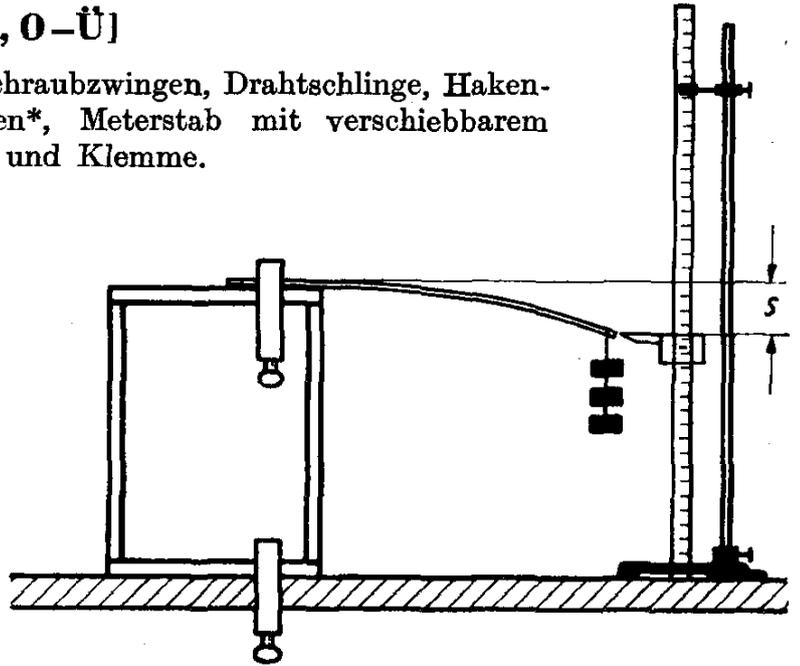


Abb. 83 Biegung eines einseitig eingeklemmten Stahlstreifens

63. Zerbrecen eines Eisendrahtes durch wiederholtes Biegen [G, O]

Schraubstock, Eisendraht (\varnothing 4 mm, Länge etwa 200 mm), Feilkloben.

Der Draht wird mit dem einen Ende in den Schraubstock gespannt; am anderen Ende wird der Feilkloben angeklemt. Mit Hilfe dieser Handhabe wird der Draht hin und her gebogen. Zunächst zeigt sich seine Zähigkeit darin, daß er diese Deformationen aushält. Schließlich zerbricht er aber. Er ist also durch die fortgesetzten Verbiegungen spröde geworden. An der Bruchstelle hat er sich beträchtlich erwärmt, wie man durch Anfassen feststellen kann; außerdem ist die vorher glatte Oberfläche rauh geworden. Diese Erscheinungen deuten auf eine Umlagerung der Moleküle bei den wiederholten unelastischen Verbiegungen und auf eine dabei auftretende erhebliche innere Reibung hin.

Bemerkung: [O] Wenn ein Werkstoff auch ohne Überschreitung der Elastizitätsgrenze zahlreichen Wechselbeanspruchungen ausgesetzt wird, kann Bruch eintreten. Man spricht dann von einer *Ermüdung* des Materials. Sie beruht auf einer Veränderung des inneren Gefüges. Die Kenntnis dieser Erscheinung ist sehr wichtig für den Maschinenbau, z. B. bei Ventildedern, Kurbelwellen u. dgl.

64. Zerdrehen eines Eisendrahtes [G, O]

Eisendraht (\varnothing 4 mm, Länge 200 mm), Schraubstock, Feilkloben, Feile.

Der Draht wird an den Enden rechtwinklig umgebogen und im mittleren Teil ausgeglüht. Dann klemmt man das eine Ende in den Schraubstock und zieht auf dem Draht mit der Feile einen Längsstrich. Das andere Ende faßt man mit dem Feilkloben und dreht diesen um die Längsachse des Drahtes. Der Feilenstrich nimmt dabei die Form einer Schraubenlinie an und läßt die Drillung (Torsion) gut erkennen. Man setzt den Versuch bis zum Zerschneiden des Drahtes fort. Die Zahl der hierzu erforderlichen Umdrehungen gibt ein Maß für die Zähigkeit des Materials. Der Draht erwärmt sich stark; seine Oberfläche wird rau (vgl. V 63).

Bemerkungen:

1. Holzschrauben können zerdreht werden, wenn man versucht, sie in nicht genügend vorgebohrte Löcher einzudrehen.
2. Durch Torsion können bei geeigneter Konstruktion sehr große Kräfte ohne bleibende Deformation des Materials übertragen werden, z. B. beim Antrieb der Schraube eines großen Schiffes.

§ 14. SCHWERPUNKT UND GLEICHGEWICHTSLAGE STANDFESTIGKEIT

65. Balancieren eines flachen Körpers auf der Fingerspitze [G]

Holzleiste, Heft, Buch, Brett; eine mit Sand gefüllte Schachtel.

Vorversuch zur Veranschaulichung der Schwerpunktlage und des Gleichgewichts:

Man läßt eine Holzleiste oder einen anderen geeigneten flachen Körper, z. B. ein Heft, ein Buch, ein Holzbrettchen, in waagerechter oder schräger Lage auf der Fingerspitze schweben (Abb. 84). Man kommt zur Vorstellung des Schwerpunktes als eines Punktes, durch dessen Unterstützung das Fallen des Körpers verhindert wird.

Bemerkungen:

1. Der Versuch gestattet in primitiver Form eine erste näherungsweise Ortsangabe des Schwerpunktes.
2. Durch einseitige Belastung der Holzleiste mit einem Radiergummi oder dgl. wird leicht eine Schwerpunktsverschiebung bewirkt.
3. Man versuche, einen etwas höheren Körper, z. B. eine mit Sand gefüllte, gut verklebte Schachtel in der Schwebelage zu halten.

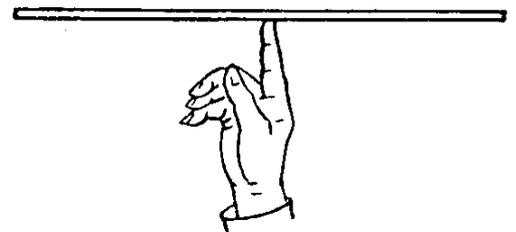


Abb. 84

Holzleiste auf der Fingerspitze schwebend

66. Balancieren eines Papierblattes auf der Bleistiftspitze [G, O-Ü]

Papierblätter verschiedener Form, Bleistift.

Der Versuch ist eine Weiterentwicklung des vorigen Versuches. Man schneidet aus nicht zu steifem Papier einige Blätter in geometrisch einfacher Form, z. B. Kreis, Quadrat, Rechteck. Die durch den vorigen Versuch nahegelegte Vermutung, daß sich

der Schwerpunkt „in der Mitte“ befinde, wird nachgeprüft, indem man die Blätter im Kreismittelpunkt bzw. im Schnittpunkt der Diagonalen auf einer Bleistiftspitze schweben läßt (Abb. 85). Um der Spitze Halt zu gewähren, legt man die Blätter über eine Fingerkuppe und beult sie durch Druck mit einem stumpfen Bleistift gegen den markierten Unterstützungspunkt vorsichtig aus, ohne sie zu durchstoßen.

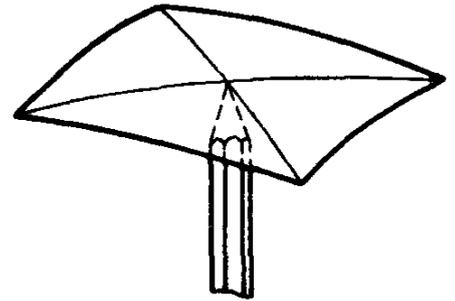


Abb. 85 Papierblatt auf Bleistiftspitze schwebend

Bemerkungen:

1. [O] Beim Dreieck wird der Schwerpunkt in der bekannten Weise mittels zweier Seitenhalbierenden festgelegt. Sie schneiden sich im Schwerpunkt. Bestätigung durch den Versuch!
2. Daß der Schwerpunkt auf der Seitenhalbierenden liegt, wird daran erkennbar, daß ein dreieckiges Papierblatt bei Unterstützung längs einer Seitenhalbierenden mittels einer Messerschneide od. dgl. in der Schwebelage bleibt. Man bezeichnet die Seitenhalbierende daher auch als *Schwerlinie*.

67. Schwerlinien und Schwerpunkt an waagrecht schwebenden Blechscheiben [G, O-Ü]

Blechscheiben verschiedener Form, Dreikantfeile, Schraubstock.

Die Feile wird mit dem Heft so in den Schraubstock geklemmt, daß eine Kante waagrecht liegt. Auf dieser wird die Blechscheibe ausbalanciert. Dann zieht man die Scheibe in der Richtung der Kante über diese hinweg und ritzt auf diese Weise eine Schwerlinie ein. Der Versuch wird dann bei einer anderen Lage der Scheibe noch einmal ausgeführt. Der Schwerpunkt ergibt sich als Schnittpunkt der Schwerlinien wie bei V 66.

68. Schwerlinien und Schwerpunkt an hängenden Pappscheiben [G-Ü]

Schwarze Pappscheiben oder Holztafeln verschiedener Form, Lagerzapfen*, Faden mit kleiner Kugel als Lot, Stativ mit Muffe, Federklammer, Pinzette, Kreide.

Der Versuch gestattet das Auffinden des Schwerpunktes bei Papp- oder Holztafeln auf experimentellem Wege. Schwarze Papptafeln verschiedener Form (Kreis, Quadrat, Rechteck, Trapez, unregelmäßige Form) werden in beliebig am Rande verteilten Löchern an einem Lagerzapfen aufgehängt. Um die durch den Aufhängepunkt gehende

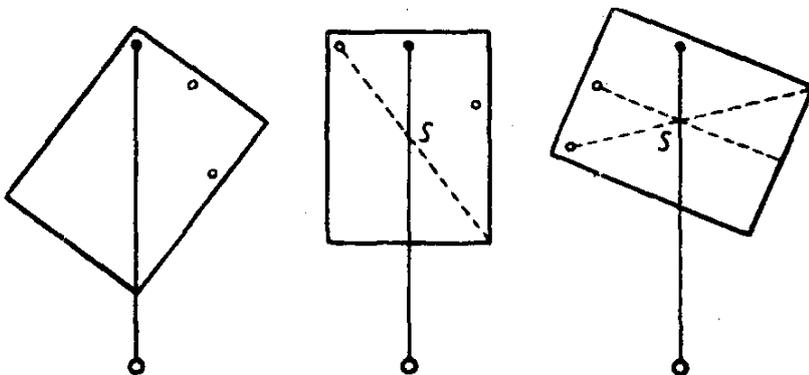


Abb. 86 Schwerpunkt als Schnittpunkt der Schwerlinien
(Das Stativ ist fortgelassen)

Senkrechte festzulegen, hängt man vor die Tafeln ein kleines Fadenlot, dessen Faden man gut mit Kreide einreibt (Abb. 86). Den ruhig hängenden Faden klemmt man an seinem unteren Ende mit einer Federklammer an der Tafel fest, zieht ihn mit einer Pinzette etwas von der Tafel fort und läßt ihn gegen diese schnellen. Er kennzeichnet dadurch eine „Schwerlinie“ als Kreidestrich auf

der Papptafel. Man wiederholt den Versuch mit anderen Aufhängepunkten und erkennt, daß die Schwerlinien sich in einem Punkt schneiden. Unterstützt man die waagrecht gehaltene Tafel im Schnittpunkt der Schwerlinien, indem man sie etwa auf einem daruntergehaltenen Bleistift schweben läßt, so verbleibt sie im Gleichgewicht. Der Schnittpunkt der Schwerlinien ist der Schwerpunkt.

69. Gleichgewichtslagen eines hängenden Körpers [G]

2 Holzleisten (etwa $15 \times 40 \times 300$ mm) mit Bohrungen ($\varnothing 10 \dots 15$ mm), runder Holzstift (\varnothing etwas kleiner als der der Bohrungen), Stativ mit Muffe und Klemme.

Die eine Holzleiste wird in der Nähe eines Endes, die andere in der Mitte mit einer Bohrung versehen, in der sich ein Holzstift drehen läßt, ohne zu klemmen. An der in der Nähe des Endes durchbohrten Leiste wird die Lage des Schwerpunktes durch einen Farbpunkt auf der Oberfläche gekennzeichnet.

Man klemmt den Holzstift waagrecht an einem Stativ fest und steckt die Holzleisten nacheinander darauf (Abb. 87). Es lassen sich folgende Gleichgewichtsarten unterscheiden:

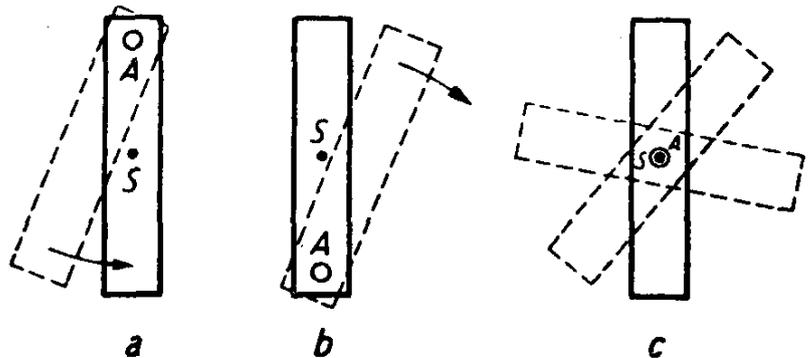


Abb. 87 a) Stabiles, b) labiles, c) indifferentes Gleichgewicht eines hängenden Körpers

a) *stabiles* (sicheres) Gleichgewicht: Schwerpunkt S in tiefster Lage senkrecht unter dem Aufhängepunkt A ; bei Störungen des Gleichgewichts kehrt der Körper in die ursprüngliche Lage zurück.

b) *labiles* (unsicheres) Gleichgewicht: Schwerpunkt S in höchster Lage senkrecht über dem Aufhängepunkt A ; bei geringster Störung geht der Körper in eine stabile Gleichgewichtslage über.

c) *indifferentes* Gleichgewicht: Aufhängepunkt im Schwerpunkt; der Körper befindet sich in jeder Lage im Gleichgewicht.

Bemerkungen:

1. Es empfiehlt sich, den Durchmesser des Holzstiftes nicht zu klein zu wählen. Eine geringfügige Reibung ist für die Ausführung des Versuches förderlich, da dann das Vorführen des labilen Gleichgewichts weniger Mühe macht.
2. Die Versuche zeigen, daß ein hängender Körper, der unter dem Einfluß der Schwerkraft im Gleichgewicht ist, seine Gleichgewichtslage behält, sofern er nicht angestoßen wird.

Beispiele:

- a) *Stabiles Gleichgewicht*: Wandbilder, Hängelampe, Pendel, Schaukel, Senklot, Waagebalken und Waagschalen der Hebelwaage, Wandvase, Kirchenglocke, Verkehrsampel, schwebende Last am Kran.
- b) *Indifferentes Gleichgewicht*: Schwungräder von Maschinen, Räder eines Fahrrades, alle Arten von Wagenrädern, Schleifsteine, Propeller eines Flugzeuges, Schaufelrad einer Turbine.
- c) *Labiles Gleichgewicht*: Stock, Stange, Besen auf der Fingerspitze im Gleichgewicht gehalten, Funkmast auf Spitze stehend (durch Spannseile in stabiler Lage gehalten).

70. Pappfiguren in stabilem Gleichgewicht [G–Ü]

Pappe, Karton, Stricknadel.

Aus dünner Pappe oder Karton lassen sich leicht spielzeugartige Pappfiguren ausschneiden, an denen sich die stabile Gleichgewichtslage mühelos veranschaulichen läßt.

Beispiele:

- Schwebender Vogel (Abb. 88). Flügel und Schnabelspitze leicht nach unten biegen! Modell schwebt waagrecht, mit Schnabelspitze auf umgekehrt gehaltenem Bleistift aufliegend.
- Sitzender Vogel, Kakadu (Abb. 89). Stricknadel als Sitzstange.
- Seilläufer (Abb. 90). Stricknadel als Laufstange.



Abb. 88 Schwebender Vogel

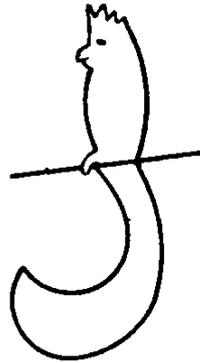


Abb. 89 Sitzender Vogel

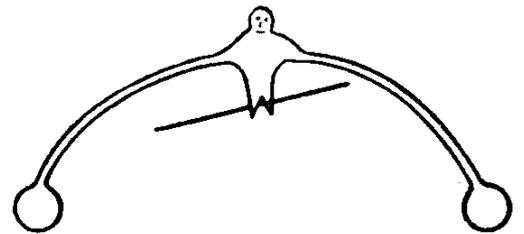


Abb. 90 Seilläufer

71. Hängende Körpersysteme in stabilem Gleichgewicht [G, O–Ü]

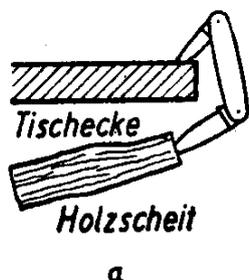
2 Taschenmesser, Holzstücke, 2 Gabeln, Münze, Nähnaedel, Flasche mit Korken, Kartoffeln, Holzstäbchen (Wurstspeile) oder Stricknadeln.

Aus den genannten Teilen lassen sich leicht Körpersysteme zusammensetzen, die sich, auf einer Spitze schwebend, in stabilem Gleichgewicht befinden. Abb. 91 bis 93 geben einige Beispiele wieder. Sie lassen sich in mannigfacher Weise abändern und regen den Schüler zum Selbsterfinden ähnlicher Vorrichtungen an.

Alle Zusammenstellungen lassen die Notwendigkeit erkennen, den Schwerpunkt unter den Unterstützungspunkt zu verlegen, wenn das Gleichgewicht stabil sein soll. Ebenso ist dazu vollkommene Starrheit des Systems erforderlich.

Bemerkungen:

- Besonders zu beachten sind die Fälle, bei denen sich der Schwerpunkt außerhalb des schwebenden Körpers befindet. Hingewiesen sei auf Abb. 91 b, 92, 93 b. Durch vorsichtiges Verschieben der Kartoffeln kann man sich bei der Anordnung nach Abb. 93 b weitgehend der indifferenten Gleichgewichtslage nähern.



a



b

Abb. 91 Taschenmesser
an einer Tischecke schwebend

- Wenn auch Versuchsanordnungen der angegebenen Art zunächst hauptsächlich dem Spieltrieb zu entspringen scheinen, so ist ihnen doch ein erheblicher unterrichtlicher Wert zuzuschreiben. Man kann an ihnen besonders deutlich feststellen, daß jede Störung des Gleichgewichts mit einer Hebung der Schwerpunktslage verbunden ist.

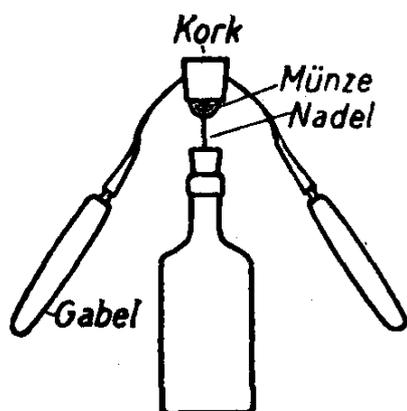


Abb. 92 Zwei Gabeln auf einer Nadelspitze schwebend

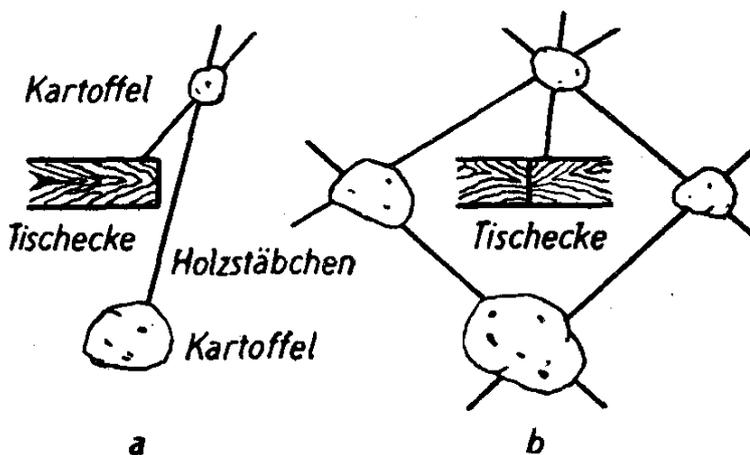


Abb. 93 Kartoffel an der Tischcke schwebend

72. Gleichgewichtslagen einer Kugel [G]

Holzkuugel, Ball od. ähnl., Abdampfschale, Sandbadschale.

Die Gleichgewichtslagen einer Kugel lassen sich nach Abb. 94 in einfachster Weise mittels einer gewölbten Schale darstellen. Die stabile und labile Lage haben mit den entsprechenden Lagen eines hängenden Körpers den Umstand gemeinsam, daß sich der Schwerpunkt in der tiefsten bzw. höchsten möglichen Lage befindet. Bei indifferenten Gleichgewichtslage bewegt sich der Schwerpunkt der Kugel bei einer durch Anstoß herbeigeführten Verschiebung auf einer Waagerechten; die Kugel verbleibt dabei in jeder Lage im Gleichgewicht, sie kann nicht umkippen.

Bemerkung: Steht eine am Boden etwas nach innen gewölbte Schale zur Verfügung (Abb. 95), so läßt sich zeigen, daß es bei der Beurteilung der Gleichgewichtslage nicht auf die absolute, sondern auf die relative Schwerpunktshöhe ankommt.

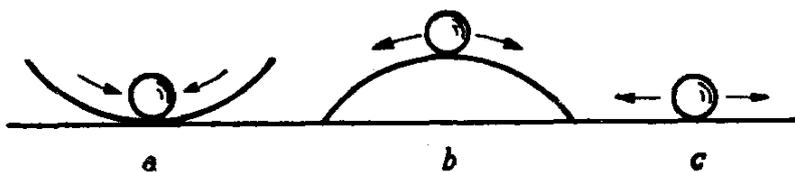


Abb. 94

a) Stabiles, b) labiles, c) indifferentes Gleichgewicht einer Kugel



Abb. 95 Kugel in relativ stabiler Gleichgewichtslage

73. Standfestigkeit eines Quaders [G-Ü]

Holzquader (etwa $40 \times 80 \times 160$ mm) oder zugeklebte, mit Sand gefüllte Schachtel (auch Streichholzsachtel).

Vorversuch zur Veranschaulichung der Standfestigkeit:

Ein Schüler versucht, den vor ihm auf seiner kleinsten Fläche stehenden Quader durch einen leichten Stoß gegen die Mitte einer Seitenfläche umzuwerfen. Ist die Erschütterung nicht zu stark, so kehrt der Quader in seine alte Lage zurück. Er befindet sich demnach in stabilem Gleichgewicht (vgl. V 69). Bei genügend kräftigem Stoß kippt der Quader um und geht in eine andere stabile Gleichgewichtslage über. Man erkennt, daß der Quader auf seiner kleinsten Fläche am unsichersten, auf der größten dagegen

am sichersten ruht. Seine Standfestigkeit nimmt mit der Größe der Unterstützungsfläche zu.

Bemerkung: Beim Quader ist mit der Vergrößerung der Unterstützungsfläche zwangsläufig eine Abnahme der Schwerpunktshöhe und damit wieder eine Zunahme der Standfestigkeit verbunden. Die folgenden Versuche gestatten, beide Einflüsse getrennt zu untersuchen.

74. Standfestigkeit einer Kerze, eines Bleistiftes – Abhängigkeit von der Unterstützungsfläche [G]

Kerze, Bleistift, Pappscheibe bzw. Holzscheibe (\varnothing 60 mm).

Eine Kerze und ein Bleistift, die mit ihren Endflächen auf die Tischplatte gestellt werden, fallen schon bei geringen Erschütterungen um. Erweicht man die Kerze an ihrer Endfläche und klebt sie auf eine kleine Pappscheibe, so nimmt die Standfestigkeit erheblich zu. Dasselbe erreicht man beim Bleistift, wenn man ihn mit seinem stumpfen Ende durch eine durchbohrte Holzscheibe steckt und auf dieser aufstellt.

75. Standfestigkeit einer kleinen Flasche – Abhängigkeit von der Schwerpunktshöhe [G]

Tintenflasche mit Korken, Sand, Stricknadel, Wurstspeil, Kartoffel.

Eine Tintenflasche wird mit Sand gefüllt und verkorkt. Durch den Korken wird senkrecht eine Stricknadel oder ein Wurstspeil gestoßen, auf den eine Kartoffel gesteckt wird (Abb. 96). Je höher die Kartoffel geschoben wird, desto leichter läßt sich die Flasche umstoßen. Bei tiefster Lage der Kartoffel steht sie am sichersten.

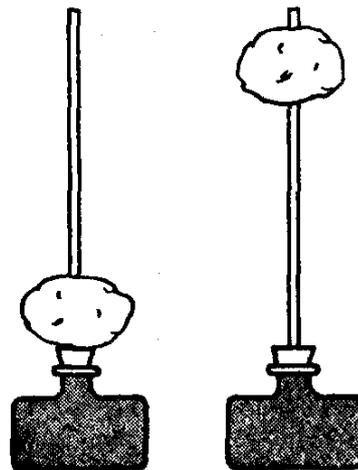


Abb. 96 Abhängigkeit der Standfestigkeit einer Flasche von der Schwerpunktshöhe

76. Standfestigkeit von Schachteln mit verschiedener Füllung – Abhängigkeit vom Gewicht und von der Schwerpunktshöhe [G]

3 Schachteln gleicher Größe, Sand, Eisen- oder Bleikörper.

Von drei Schachteln gleicher Größe bleibt die eine leer, die zweite wird vollständig mit Sand gefüllt. In der dritten Schachtel wird an der kleinsten Wandfläche ein geeigneter Eisen- oder Bleikörper mit Draht befestigt. Alle Schachteln werden so beklebt, daß sie sich äußerlich nicht unterscheiden. Sie werden mit ihren kleinsten Flächen auf den Tisch gestellt. Ein Schüler versucht, sie wie bei V 73 durch einen leichten seitlichen Stoß umzuwerfen (Abb. 97).

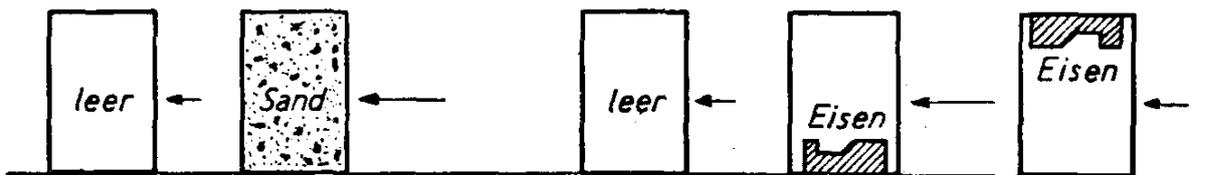


Abb. 97 Standfestigkeit einer Schachtel

Er vergleicht das Verhalten beim Umkippen

- a) der leeren Schachtel und der mit Sand gefüllten,
- b) der leeren Schachtel und der mit Eisen beschwerten.

Der Versuch läßt erkennen, daß die Schachtel um so sicherer steht,

- a) je schwerer sie ist,
- b) je tiefer ihr Schwerpunkt liegt.

77. Messen der Standfestigkeit eines Quaders [O]

Holzquader (etwa $40 \times 80 \times 160$ mm) mit Ösen, leichte Waagschale*, Gewichtssatz, Holzkeil (30°), Stativ mit Muffe und Klemme, feste Rolle*, Schnur.

Als Maß für die Standfestigkeit eines Körpers kann die waagrecht im Schwerpunkt angreifende, senkrecht zur Kippkante wirkende Kraft dienen, die den Körper gerade zum Kippen bringt. Um sie zu ermitteln, wird der Quader in der Mitte zweier benachbarter Flächen mit Ösen versehen und auf seine kleinste Fläche gestellt. Man läßt senkrecht zur Kippkante eine waagerechte Kraft einwirken (Abb. 98), die man so bemißt, daß der Quader gerade ankippt. Die Kippkante wird durch einen Holzkeil festgelegt. Auf den Schwerpunkt wirken zwei Kräfte ein, nämlich das Gewicht G des Körpers und die seitliche Zugkraft P . Im Augenblick des Ankippens sind ihre Momente einander gleich. Nach Abb. 99 ist

$$P \cdot y = G \cdot x \quad \text{oder} \quad P = G \cdot \frac{x}{y}$$

Hierin bedeuten y die Höhe des Schwerpunktes, x den Abstand seines Fußpunktes von der Kippkante. P ist das *dynamische Maß der Standfestigkeit*.

Bemerkungen:

1. Der Versuch zeigt, daß es im Grunde nicht auf die Größe der Unterstüztungsfläche, sondern auf den Abstand der Senkrechten durch den Schwerpunkt von der Kippkante ankommt.
2. Eine zweite Möglichkeit zur quantitativen Beurteilung der Standfestigkeit bietet sich in der Messung des Winkels α , um den der Abstand des Schwerpunktes von der Kippkante (\overline{SK} in Abb. 99) gedreht werden muß, damit der Schwerpunkt die höchste Lage S' erreicht (*geometrisches Maß der Standfestigkeit*). Vgl. Abb. 100.
3. Ein drittes Maß für die Standfestigkeit ergibt sich aus der Angabe der Arbeit, die zum Heben des Schwerpunktes in die höchste Lage S' erforderlich ist (*energetisches Maß der Standfestigkeit*). Wie aus Abb. 99 leicht ersichtlich, ist

$$A = G \cdot (\overline{SK} - y)$$

oder

$$A = G \cdot (\sqrt{x^2 + y^2} - y).$$

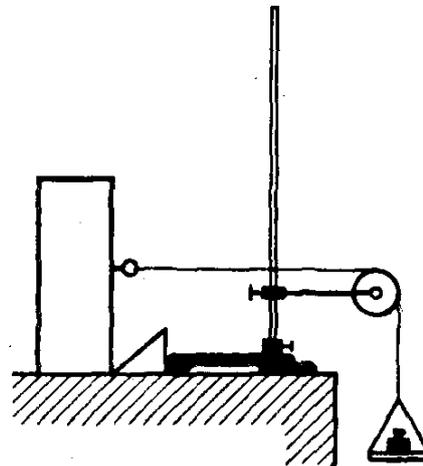


Abb. 98 Messen der Standfestigkeit eines Quaders

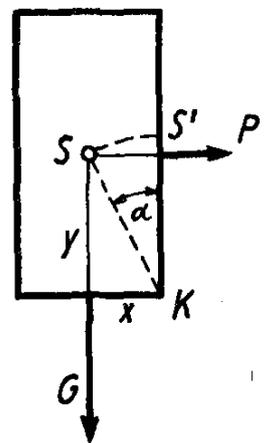


Abb. 99 Gleichheit der Kraftmomente beim Kippen

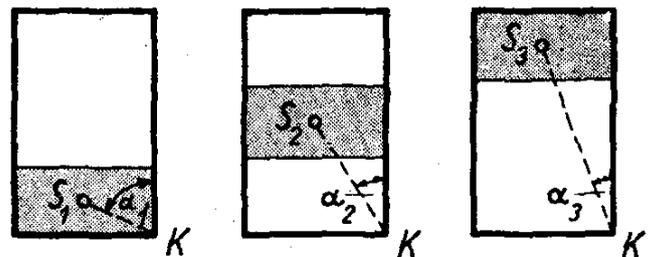


Abb. 100 Abhängigkeit des Kippwinkels von der Schwerpunkthöhe

78. Beispiele für Standfestigkeit [G]

Einfluß der Unterstützungsfläche: Grundplatten von Tischlampen, von Stehlampen, Füße von Weingläsern, von Biergläsern, Kaffeekannen mit kleiner, mit großer Grundfläche, Grundplatten von Kleiderständern, Grundplatten von tragbaren Verkehrszeichen, Grundplatten an Säulentischen.

Einfluß der Schwerpunktshöhe: Bleifüllung in Lampensockeln, schwere Grundplatten an physikalischen Stativen, Fundamente von Bauwerken, tiefe Schwerpunktshöhe bei freien und schienengebundenen Kraftfahrzeugen mit hoher Geschwindigkeit (Rennwagen, Motor-Triebwagen der Eisenbahn), hohe Schwerpunktshöhe bei hochbeladenen Erntewagen.

Einfluß des Gewichts: Voller und leerer Wassereimer, gefüllte und leere Flaschen, leere Kiste, Kiste mit Sandfüllung, mit Eisenfüllung.

Standfestigkeit von Möbeln und Stellgeräten (vgl. Bemerkung):

- Drei Unterstützungspunkte: eindeutige Festlegung der Unterstüzungsebene (kein Wackeln) beim dreibeinigen Tisch, dreibeinigen Stuhl, Photographenstativ, Volkmann-Stativ mit Winkelfuß;
- Mehr als drei Unterstützungspunkte: keine eindeutige Festlegung der Unterstüzungsebene (Wackeln auf unebenem Boden) beim vierbeinigen Tisch, vierbeinigen Stuhl, Schrank, Regal, Bunsenstativ mit rechteckiger Grundplatte.

Körperhaltung beim Tragen von Lasten: Tragen eines schweren Rucksackes auf dem Rücken, Tragen eines schweren Koffers oder gefüllten Eimers mit einer Hand, Tragen einer schweren Kiste mit beiden Händen.

Stehauf aus runder Schuhzwecke und Holunder- bzw. Sonnenblumenmark (Abb. 101).

Bemerkung: Ein auf einer Unterlage stehender Körper braucht diese nicht in einer zusammenhängenden Fläche zu berühren. Es genügen einzelne, mindestens drei Berührungspunkte. Als Unterstüzungsfäche gilt in diesem Falle die Fläche, die von dem kürzesten in sich geschlossenen geradlinigen oder gekrümmten Linienzug umrandet wird, der sämtliche möglichen Berührungspunkte umschließt.

Sind nur drei Unterstützungspunkte vorhanden, so gilt das durch sie bestimmte Dreieck als Unterstüzungsfäche.

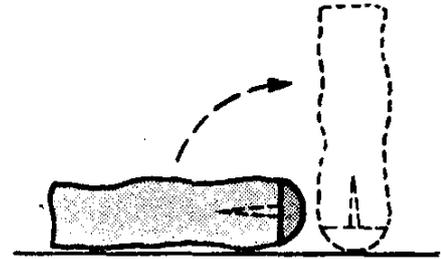


Abb. 101 Einfacher Stehauf

§ 15. KRAFTUMFORMENDE EINRICHTUNGEN DREHMOMENT

79. Die Wippe (Modellversuch) [G]

Dünne Holzleiste ($5 \times 30 \times 400$ mm) oder Lineal; 2 Brettchen (60×100 mm und 50×60 mm, Dicke 10 mm), 4 Streichholzsachteln, Sand, Papier.

Die jedem Schüler bekannte Wippe wird in einem Modellversuch nachgeahmt. Das Modell besteht aus einer dünnen, etwa 400 mm langen Holzleiste, die man in der Mitte mit einem kleinen Gestell aus zwei senkrecht aufeinanderge nagelten Brettchen unterstüzt (Abb. 102). Als „wippende Personen“ dienen zwei gleich schwere, mit Sand gefüllte, gut verklebte Streichholzsachteln. Legt man sie in gleichen Abständen vom

Auflager auf die Leiste und stößt diese leicht an, so wippen die Enden einige Zeit auf und nieder, bis sie zur Ruhe kommen.

Ersetzt man die eine Streichholzschachtel durch zwei zusammengeklebte, mit Sand gefüllte Streichholzschachteln so muß man diese entsprechend näher an das Auflager heranschieben, um das Modell wippfähig zu machen.

Der Versuch läßt als Vorversuch andeutungsweise den Inhalt des Hebelgesetzes erkennen.



Abb. 102 Modell einer Wippe

80. Vorversuche mit Hebeln [G]

Holzleisten verschiedener Stärke, Ziegelstein, kleine Kiste mit Sand, starkes Brett, Nagel, Draht, Hammer, Axt, Beißzange, Nuß.

1. Anheben eines Ziegelsteines oder einer kleinen, mit Sand gefüllten Kiste mittels einer daruntergeschobenen Holzleiste; diese wird dabei als zweiseitiger und als einseitiger Hebel gebraucht.
2. Anheben eines Möbelstückes mit einer daruntergesteckten starken Holzstange.
3. Anheben einer geöffneten Tür in den Angeln mit Hilfe einer daruntergeklebten, am Stiel seitlich angehobenen Axt.
4. Ausziehen eines in ein starkes Brett geschlagenen Nagels mittels einer Beißzange oder eines geschlitzten Hammers.
5. Aufbrechen einer Nuß mit Hilfe eines behelfsmäßigen Nußknackers. Er besteht aus zwei starken Holzleisten, die an einem Ende mehrfach mit Draht umwunden sind (Abb. 103).

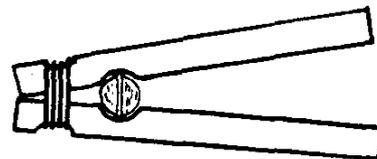


Abb. 103
Behelfsmäßiger Nußknacker

Bemerkung: Man veranlasse in jedem Falle die Schüler auch zur Arbeitsleistung mit der bloßen Hand und fordere sie zu einem Vergleich des Kraftaufwandes auf.

81. Zweiseitiger Hebel – Drehmoment [G, O – Ü]

Meterstab aus Holz als Hebel*, Lagerzapfen*, Hakengewichte*, U-förmige Bügel*, Stativ mit Muffe und Klemme, Schnurschlingen.

Der Versuch dient zur Ableitung des Hebelgesetzes für den gleicharmigen und den ungleicharmigen Hebel. Der als Hebel verwendete Meterstab wird mit seiner Bohrung auf einen waagrecht an ein Stativ geklemmten Lagerzapfen gesteckt. Die die angreifenden Kräfte verkörpernden Gewichtsstücke werden an dünne Schnurschlingen gehängt, die über den Hebel gestreift und festgezogen werden.

Man belastet den Hebel auf einer Seite mit einem beliebigen Gewicht Q (Last), das man bei jeder Versuchsreihe unverändert läßt. An die andere Seite des Hebels hängt man ein Gegengewicht P (Kraft) von wechselnder Größe und verschiebt den Aufhängepunkt jeweils so weit, bis Gleichgewicht eintritt. Man unterscheidet:

- a) *gleicharmige Hebel* (Abb. 104a) bei gleich großen Kräften und gleichen Hebelarmen,
- b) *ungleicharmige Hebel* (Abb. 104b) bei ungleichen Kräften und ungleichen Hebelarmen.

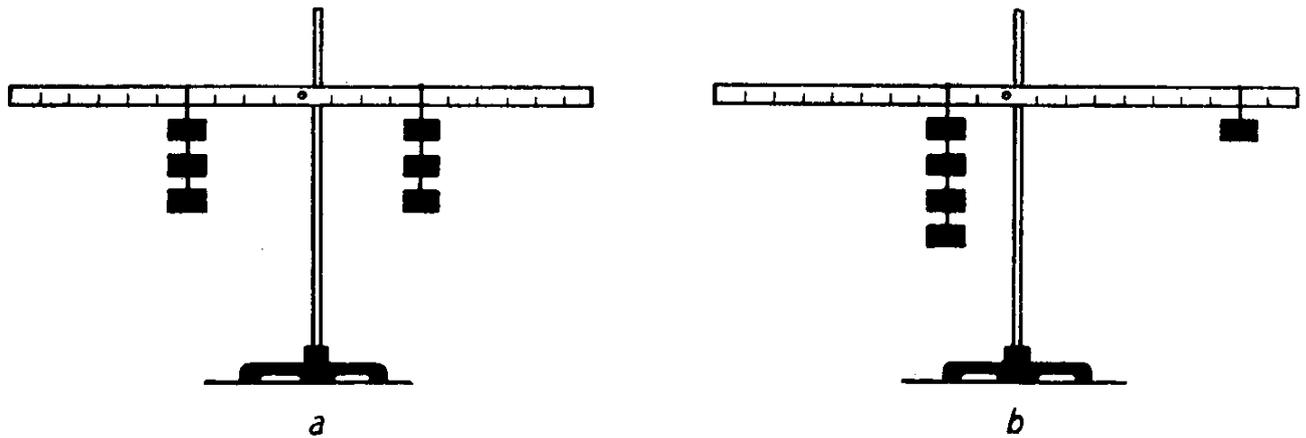


Abb.104 Zweiseitiger Hebel a) gleicharmig b) ungleicharmig

Zusammengehörige Werte der Kräfte und ihrer Arme werden in einer Tabelle übersichtlich zusammengestellt. Die Tabelle läßt erkennen, daß am Hebel Gleichgewicht herrscht, wenn das Produkt aus Kraft und Kraftarm gleich dem Produkt aus Last und Lastarm ist. Hierin ist das Gesetz für den gleicharmigen Hebel (Gleichheit von Kraft und Last bei gleich großen Hebelarmen) als Sonderfall enthalten.

Beispiel einer Tabelle zum Hebelgesetz:

Linke Hebelseite			Rechte Hebelseite		
Last (Q) p	Lastarm (b) cm	Last × Lastarm (Q · b) pcm	Kraft (P) p	Kraftarm (a) cm	Kraft × Kraftarm (P · a) pcm
50	48	2400	50	48	2400
			100	24	2400
			150	16	2400
			200	12	2400
			250	9,6	2400
150	14,4	2160	150	14,4	2160
			100	21,6	2160
			50	43,2	2160

Allgemeine Form des Hebelgesetzes:

$$Q \cdot b = P \cdot a.$$

Bemerkungen:

1. Für die Gewinnung des Hebelgesetzes ist die waagerechte Lage des Hebels keineswegs erforderlich. Das Gesetz gilt bei einem um den Schwerpunkt drehbaren Hebel auch für jede beliebige Lage. Siehe dazu MB, S. 53!
2. Beim unbelasteten Hebel gleicht man geringfügige Abweichungen vom indifferenten Gleichgewicht durch Verwendung leichter, aus U-förmig gebogenen Blechstreifen hergestellter Reiter aus. Vgl. § 2, Nr. 7!
3. [O] Der Versuch am zweiseitigen Hebel führt zur Prägung des Begriffs vom *Drehmoment*. Auf einen um O drehbaren Hebel (Abb. 105) wirke in seiner Drehebene senkrecht nach unten eine schräg zum Hebel gerichtete Kraft P (Vektor AB) ein. Da sich A nur auf einem Kreis bewegen kann, wird lediglich die Kraftkomponente P_1 von P wirksam, die bei Projektion von P auf die Tangente durch A in deren Richtung fällt (Vektor AC). Man zieht $OE \perp AB$ und außerdem die Hilfslinien OC und OB . Es ist $BC \parallel OA$. Mithin sind

die Dreiecke OAB und OAC flächengleich. Es ist

$$\overline{AB} \cdot \overline{OE} = \overline{AC} \cdot \overline{OA}$$

oder

$$P \cdot a = P_1 \cdot a_1.$$

Man erkennt: Das Produkt aus der senkrecht zum Hebel wirkenden Kraft P_1 und dem Hebelarm a_1 ist gleich dem Produkt aus der schräg zum Hebel wirkenden Kraft P und dem senkrechten Abstand a der Krafrichtung vom Drehpunkt. Das Produkt aus einer Kraft und ihrem senkrechten Abstand vom Drehpunkt heißt *Drehmoment*. Es ist für die Größe der Drehwirkung maßgebend.

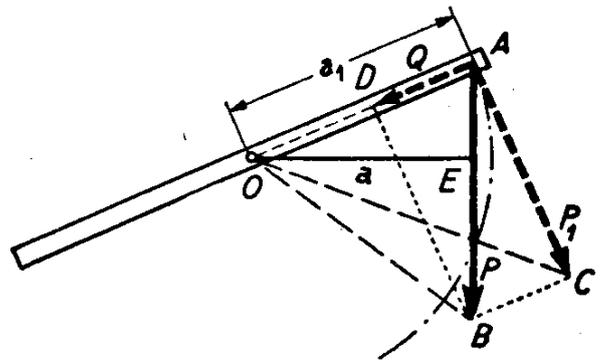


Abb. 105 Das Drehmoment

Beispiele für zweiseitige Hebel:

Hebebaum	Zangen aller Art	Elektrischer Kippschalter
Brechstange	Kurbeln aller Art	Trittbrett an der Nähmaschine
Türklinke	Scheren aller Art	Handbremse am Fahrrad
Fensterriegel	Schraubenschlüssel	Gashebel am Kraftwagen
Schlüssel	Pumpenschwengel	Kuppelungshebel am Kraftwagen
Wippe	Kaufmannswaage	Griff am Schraubstock
Spaten	Schnellwaage	Pedal am Klavier
Schlagbaum	Briefwaage	Signalhebel bei der Eisenbahn
Winkelhebel	Tafelwaage	Ventilhebel am Wasserspülkasten
Steuerruder	Dezimalwaage	Gashahn am Gaskocher

Schalthebel des Wechselgetriebes am Kraftwagen
 Tastenhebel am Klavier und an der Schreibmaschine
 Seilspanner beim Stellwerk der Eisenbahn

82. Einseitiger Hebel [G, O-Ü]

Geräte wie bei V 81; dazu Stativ mit Muffe und Klemme, feste Rolle, Schnur, Federwaage.

Aufstellen des Hebels wie bei V 81. Beide Gewichte wirken auf derselben Seite des Hebels, das eine nach unten, das andere mittels einer Schnur über eine Rolle nach oben (Abb. 106). Zusammenstellen der Tabelle und Ableiten des Hebelgesetzes wie bei V 81.

Bemerkung: An die Stelle der nach oben wirkenden Zugkraft kann die Spannkraft einer Federwaage treten (Abb. 107). Es bietet sich so in bequemer Weise durch Heben und Senken der Federwaage die Möglichkeit zu zeigen, daß das Hebelgesetz für jede Stellung des Hebels erfüllt ist. Voraussetzung ist, daß die Federwaage senkrecht hängt.

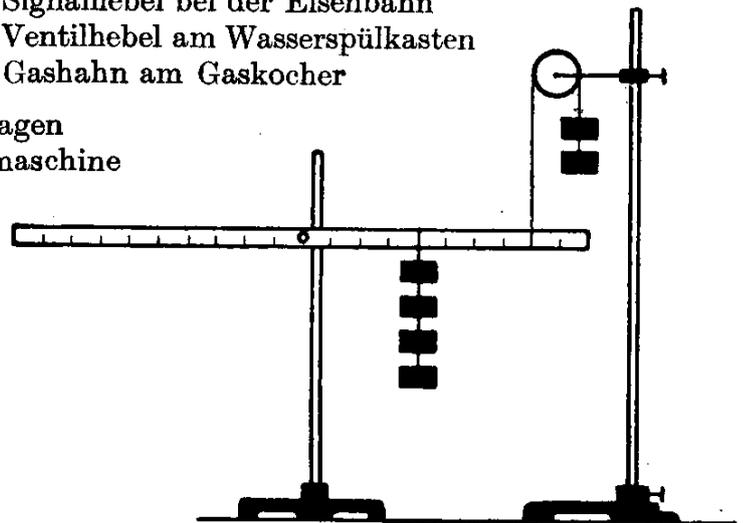


Abb. 106 Einseitiger Hebel in waagerechter Lage

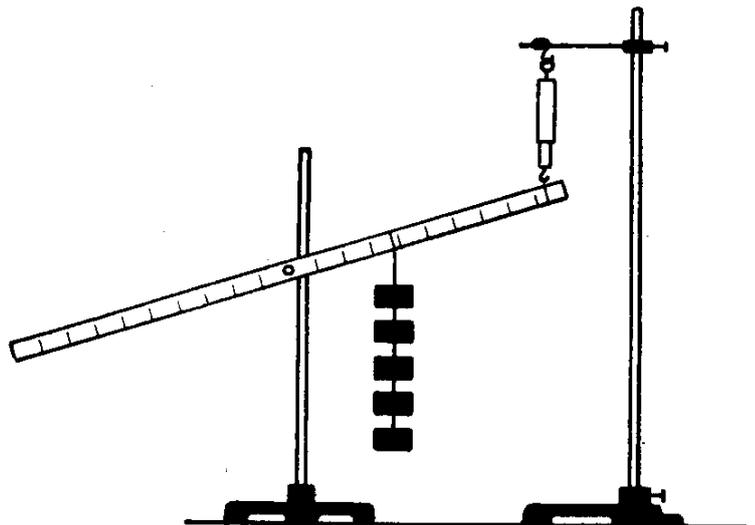


Abb. 107 Einseitiger Hebel in schräger Lage

Beispiele für einseitige Hebel:

Brechstange	Kartoffelquetsche	Hebelschalter an der Schalttafel
Kistenöffner	Häckselmesser	Stange am Sicherheitsventil
Holzspalter	Papierschneidemesser	Locher für Schnellhefter
Nußknacker	Tabakschneidemesser	Vorreiber (Fensterriegel)
Büchsenöffner	Weichenstellhebel	Unterarm (Geschwindigkeitshebel)
Blasebalg	Wagenbremse	Fuß (beim Zehenstand)
Schubkarre	Ruder	Hebel am Bierflaschenverschluß

83. Waagenmodelle [G, O]

Holzleisten verschiedener Länge (Querschnitt 10×30 mm und 10×20 mm), dünne Brettchen, Blechdosendeckel oder runde Blech- oder Pappscheiben ($\varnothing 100$ mm) als Waagschalen*, harter Draht, Stricknadeln, Schnur, Blechabfälle, 2 Lagerzapfen*, Stativ mit Muffen und Klemmen.

Bei den nachfolgend beschriebenen Modellen wurde verzichtet auf die Nachahmung feinmechanischer Einzelheiten, wie Lagerung in Pfannen und Schneiden, Arretierung u. dgl., die mit unzulänglichen Mitteln doch nur unvollkommen wiedergegeben werden können. Wert wurde nur darauf gelegt, daß die Herstellung der Modelle auch wenig geübten Händen keine Schwierigkeiten bereitet, daß die Modelle in ihrem Aufbau einfach und übersichtlich sind und den Grundgedanken des Gerätes klar hervortreten lassen, und daß sie vor den Augen der Schüler zusammengestellt werden können. Aus diesem Grunde wurde auch davon abgesehen, sie mit festen Gestellen auszurüsten. Sie werden in einfacher Weise mittels der bei anderen Versuchen häufig verwendeten Lagerzapfen an Stativen aufgehängt. Die bei den einzelnen Abbildungen angegebenen Längenmaße sind nur als Richtzahlen anzusehen.

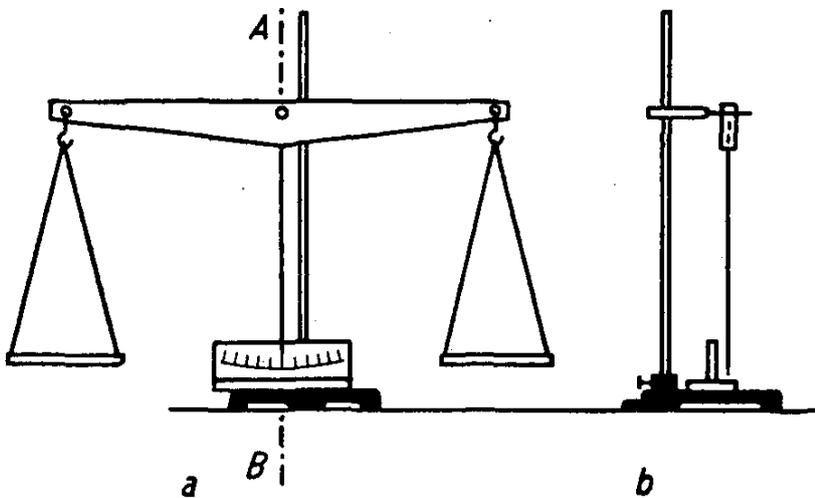


Abb. 108 Modell einer Hebelwaage
a) Vorderansicht b) Schnitt A-B

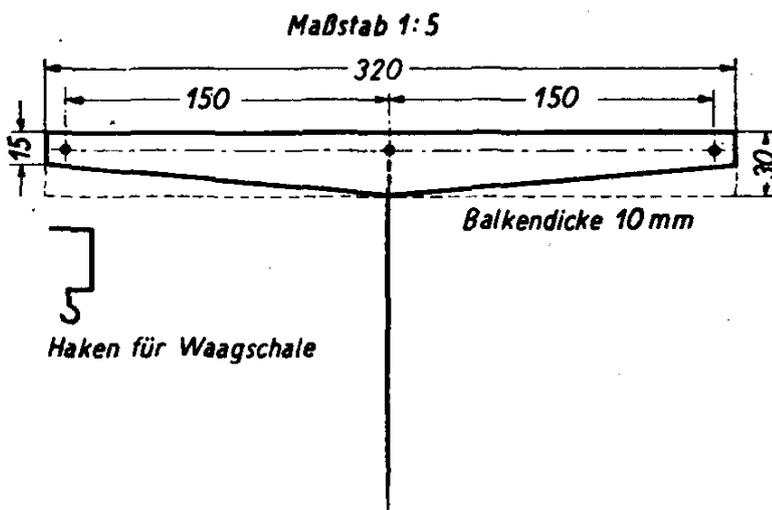


Abb. 109 Waagebalken für das Modell der Hebelwaage

unzulänglichen Mitteln doch nur unvollkommen wiedergegeben werden können. Wert wurde nur darauf gelegt, daß die Herstellung der Modelle auch wenig geübten Händen keine Schwierigkeiten bereitet, daß die Modelle in ihrem Aufbau einfach und übersichtlich sind und den Grundgedanken des Gerätes klar hervortreten lassen, und daß sie vor den Augen der Schüler zusammengestellt werden können. Aus diesem Grunde wurde auch davon abgesehen, sie mit festen Gestellen auszurüsten. Sie werden in einfacher Weise mittels der bei anderen Versuchen häufig verwendeten Lagerzapfen an Stativen aufgehängt. Die bei den einzelnen Abbildungen angegebenen Längenmaße sind nur als Richtzahlen anzusehen.

a) *Hebelwaage* (Abb. 108 a und b): Der Waagebalken wird aus einer Holzleiste ($10 \times 30 \times 320$ mm) nach Abb. 109 ausgesägt. Aus der Abbildung sind auch alle erforderlichen Einzelheiten bezüglich der Bohrungen (Abstände genau einhalten - alle drei Bohrungen auf einer Geraden!) und des Zeigers (Stricknadel)

sowie der Aufhängehaken für die Waagschalen zu entnehmen. Die Skala befindet sich auf einem besonderen Brettchen mit Grundplatte. Zur Herstellung der Waagschalen siehe § 2, Nr. 11.

Der Waagebalken und ebenso die Waagschalen sind so abzugleichen, daß das Gleichgewicht beim Vertauschen der Waagschalen erhalten bleibt.

b) *Römische Schnellwaage* (Abb. 110 a und b): Anfertigen des Waagebalkens aus einer Holzleiste ($10 \times 30 \times 480$ mm) nach Abb. 111. Gewichtsausgleich wird hergestellt durch zwei seitlich an den kurzen Hebelarm geleimte Brettchen (siehe Abb. 110b). Anbringen der Bohrungen und der Skala nach Abb. 111; Abstand der beiden Bohrungen voneinander und Breite der Skalenteile je 30 mm.

Der Waagebalken ist mitsamt dem Aufhängehaken für die Last so abzugleichen, daß er in die waagerechte Ruhelage einschwingt. Als Vergleichsgewicht dient ein an einer Fadenschlinge hängendes 100-g-Stück.

c) *Oberschalige Tafelwaage, vereinfachtes Modell* (Abb. 112 a, b, c): Anfertigen je zweier Waagebalken und Tafelträger nach Maßgabe der Abbildungen. Die Waagebalken werden mittels zweier Lagerzapfen an ein Stativ gehängt und durch die Tafelträger gelenkig verbunden. Verwendung von starken Nägeln als Gelenkachsen. Jeder der beiden Waagebalken sowie die beiden Tafelträger sind für sich abzugleichen.

d) *Dezimalwaage, Fadenmodell* (Abb. 113): Anfertigen des Modells aus Holzleisten und Schnüren nach Abb. 113; Aufhängen an der Wandtafel. Das Modell unterscheidet sich von der üblichen Ausführung der Dezimalwaage dadurch, daß die Brücke nicht auf dem einseitigen Hebel ruht, sondern an ihm hängt. Das Grundsätzliche des Baues und der Funktion der Waage wird dadurch nicht berührt.

Es empfiehlt sich, den langen Arm des Waagebalkens vorsorglich etwas länger zu wählen und erst nach dem vollständigen Zusammenstellen des Modells durch Abfeilen abzugleichen.

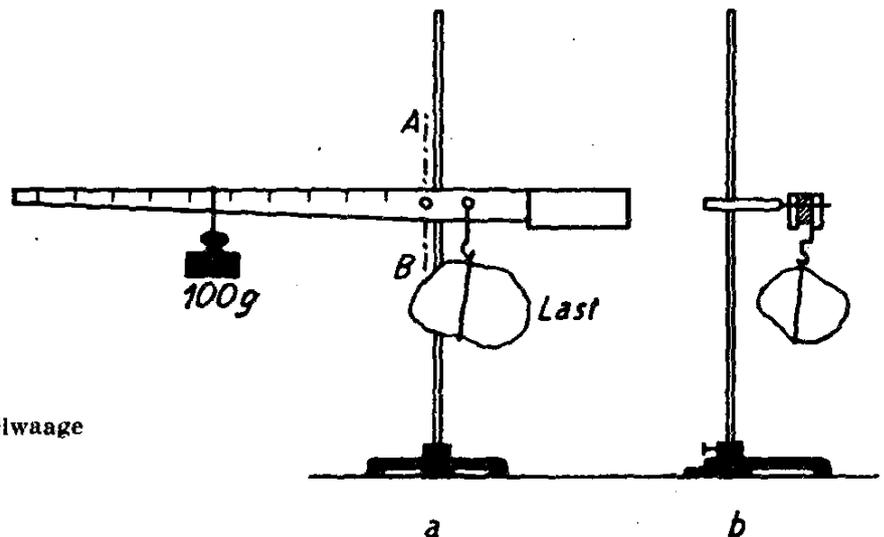


Abb. 110 Modell einer römischen Schnellwaage
a) Vorderansicht
b) Schnitt A-B

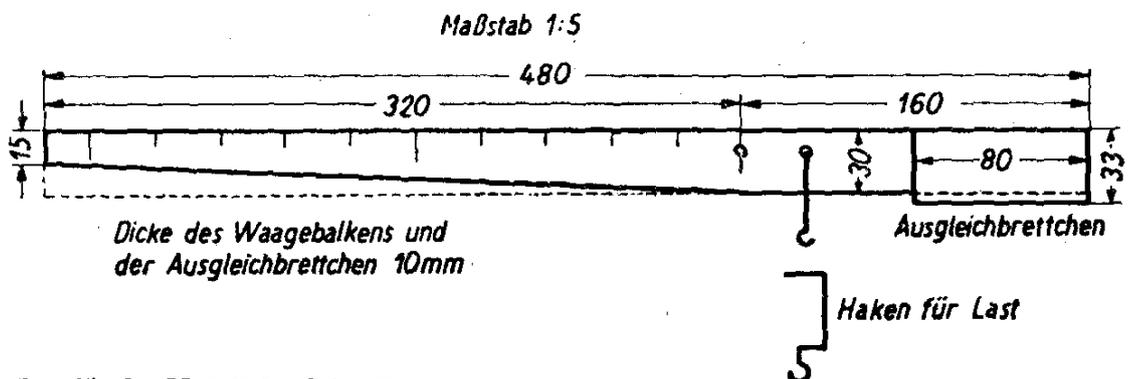


Abb. 111 Waagebalken für das Modell der Schnellwaage

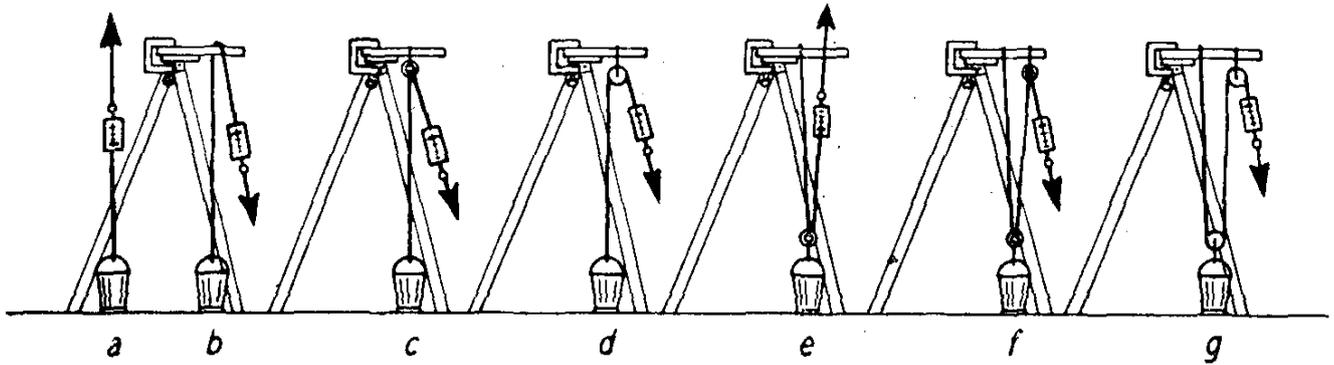


Abb. 114 Seilmaschinen an einer Standleiter

- a) Einfachès Emporziehen der Last, Standort auf der Leiter
- b) Seilführung über ein Rundholz, Standort auf dem Boden
- c) Seilführung durch einen festen Porzellanring, Standort auf dem Boden
- d) Seilführung über eine feste Rolle, Standort auf dem Boden

- e) Seilführung durch einen losen Porzellanring, Standort auf der Leiter
- f) Seilführung durch einen festen und einen losen Porzellanring, Standort auf dem Boden
- g) Seilführung über eine lose und eine feste Rolle, Standort auf dem Boden

85. Feste und lose Rolle [G-Ü]

2 Rollen mit Scheren*, Hakengewichte*, Stativhaken*, 2 Federwaagen, Schnur, 2 Stative mit Muffen und Klemmen, langer Stativstab.

Die Versuchsreihe führt in bekannter Weise zur Herleitung der Gleichgewichtsbedingungen für die feste und die lose Rolle: $P = Q$ bzw. $P = \frac{Q}{2}$. Abb. 115 zeigt in der üblichen Form die einzelnen Entwicklungsstufen der Versuchsanordnung.

Bemerkungen:

1. Da die Versuche im Unterricht selten nebeneinander, sondern zeitlich nacheinander gezeigt werden, sind der lange Querstab und das eine Stativ meist entbehrlich.
2. Der Gewichtsausgleich der losen Rolle erfolgt durch ein kleines Gegengewicht A.

86. Der Klobenzug [G-Ü]

2 Brettchen (10 × 60 × 120 mm), Eimer, 4 Vorhangringe aus Porzellan, starker Draht, starke Schnur, technische Federwaage.

In folgerichtiger Weiterentwicklung der unter V 84 wiedergegebenen Versuchsreihe läßt sich mit den angegebenen Hilfsmitteln gemäß Abb. 116 leicht ein rollenloser Flaschenzug (Klobenzug) zusammensetzen, der den Entwicklungsgedanken der Seilmaschine klar zum Ausdruck bringt. Die Kraftmessung erfolgt wie bei V 84 durch eine technische Federwaage. Aufhängen am Türrahmen!

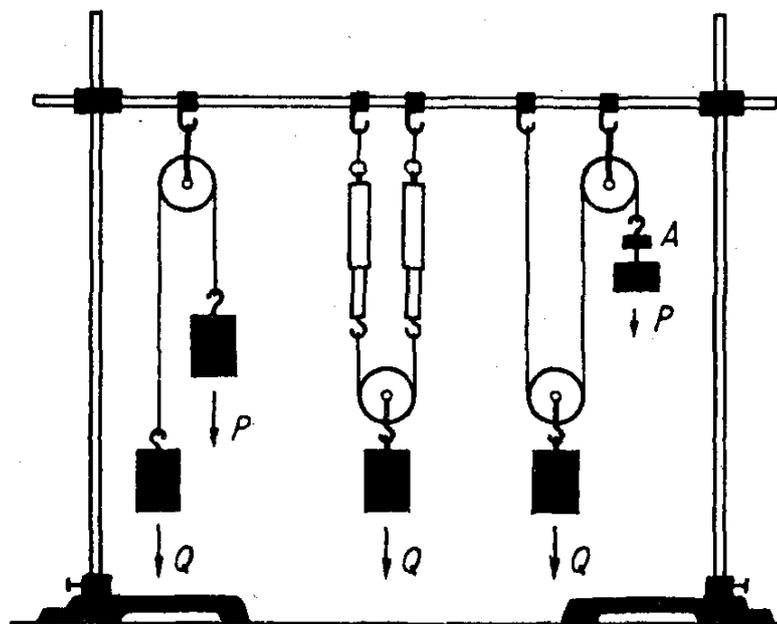


Abb. 115 Feste und lose Rolle A Ausgleichsgewicht

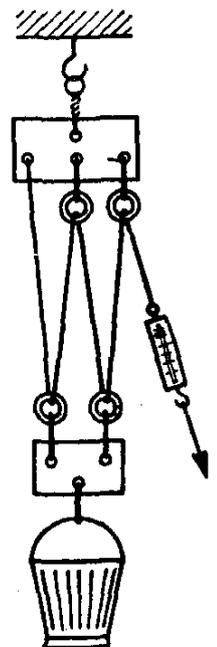


Abb. 116 Klobenzug

87. Der Flaschenzug (Modell) [G-Ü]

2 Scheren* mit je zwei Rollen* (unter- oder nebeneinanderliegend), Rolle*, Lagerzapfen*, Hakengewichte*, Stativ mit Muffen und Klemmen, Schnur.

Der aus zwei Scheren mit je zwei neben- oder untereinanderliegenden Rollen bestehende vierteilige Flaschenzug (Abb. 117) ist bekannt und bedarf keiner Erläuterung. Gleichgewichtsbedingung $P = \frac{Q}{4}$. Gewichtsausgleich der losen Rollen erfolgt durch Anhängen eines kleinen Gewichtsstückes an das freie Schnurende.

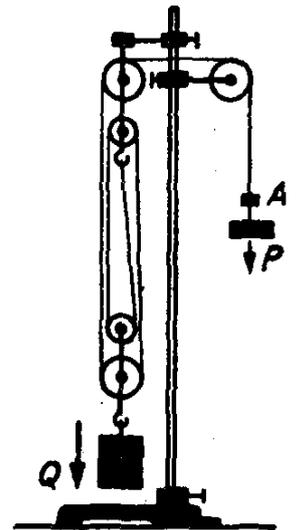


Abb. 117 Vierteiliger Flaschenzug
A Ausgleichsgewicht

88. Vergleichen von Drehmomenten [O-Ü]

Holz- oder Metallscheibe ($\varnothing 340$ mm) mit cm-Ring-Skala*, dazu Drahtstifte*, Schnurverlängerer* (250 mm lang) aus Pappe oder Igelit, 2 Rollen*, 3 Lagerzapfen*, Hakengewichte*, 3 Stative mit Muffen und Klemmen.

Anweisung zur Selbstanfertigung der Scheibe für Drehmomente siehe § 2, Nr. 6. Die Versuchsanordnung wird nach Abb. 118 zusammengestellt; die Scheibe wird mittels eines Lagerzapfens an einem Stativ befestigt.

Man läßt zwei oder mehr belastete Schnüre auf die am Rand der Scheibe eingesteckten Drahtstifte einwirken und liest entweder unmittelbar oder mittels Schnurverlängerer (s. u.) die Abstände der Krafrichtungen von der Drehachse ab. Ein Vergleich der Drehmomente im Falle des Gleichgewichts führt zum Satz von der Gleichheit der rechts- und der linksdrehenden Momente bzw. ihrer Summen:

$$\sum P_r \cdot a_r = \sum P_l \cdot a_l$$

oder

$$\sum P_k \cdot a_k = 0.$$

Bemerkung: Zur Vermeidung unstabiler Gleichgewichtslagen wird man meist die in der Zugrichtung vorn liegenden Drahtstifte als Angriffspunkte benutzen. In diesem Falle ist die Verwendung von sogenannten Schnurverlängerern angebracht, die sich leicht nach Abb. 119a bzw. b aus Pappe oder besser aus durchsichtigem Igelit ausschneiden lassen.

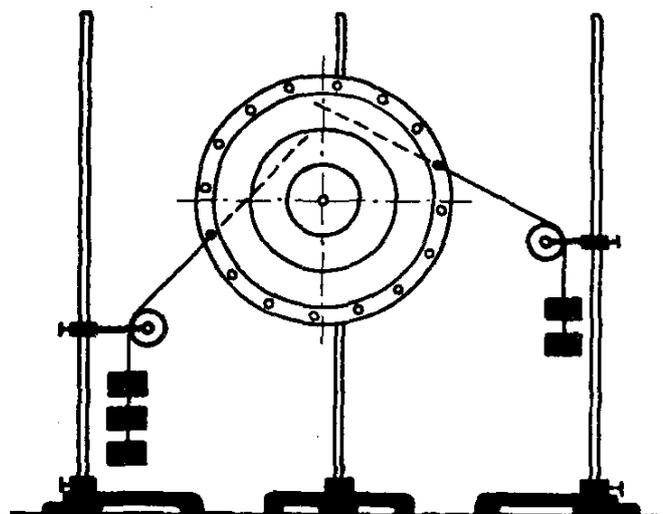


Abb. 118 Scheibe für Drehmomente
(Schnurverlängerer gestrichelt angedeutet)

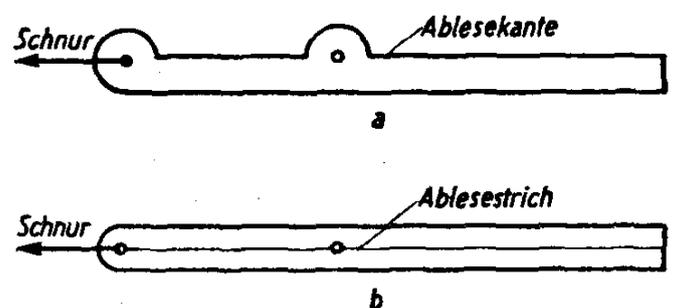


Abb. 119 Schnurverlängerer
a) aus Pappe b) aus Igelit

89. Verbundene Rollen – Wellrad, Kurbel [G, O – Ü]

Stufenrolle aus Holz* (\varnothing 60:120:180 mm), Lagerzapfen*, Hakengewichte*, Schnur, Stativ mit Muffe und Klemme, Holzleiste (10 × 30 × 400 mm) mit Bohrungen und Drahtstiften (Stiftabstand 360 mm).

Als Modell des *Wellrades* dient die Stufenrolle. Anweisung zur Selbstanfertigung aus Holz siehe § 2, Nr. 5. Sie wird nach Abb. 120 mittels eines Lagerzapfens an einem Stativ befestigt und mit Hakengewichten belastet. Die innere Rolle vertritt die Welle. Es gelten dieselben Gleichgewichtsbedingungen wie bei V 88. Mögliche Übersetzungsverhältnisse 1:2; 1:3; 2:3. Um die *Kurbel* zu veranschaulichen, kann man auf die Achse des Lagerzapfens eine dazu hergerichtete Holzleiste stecken und sie durch Drahtstifte mit der Stufenrolle verbinden.

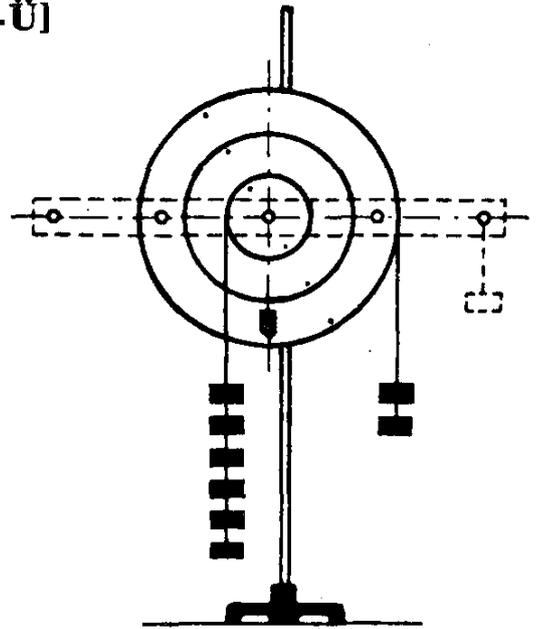


Abb. 120 Stufenrolle als Wellradmodell

Bemerkung: Zum Befestigen der Schnüre dienen kleine, durch den Rand der Rollen gebohrte Löcher, in denen die Schnurenden zu verknoten sind.

90. Kraftübertragung durch Riemen- oder Seiltrieb [G, O]

2 Stufenrollen aus Holz* (\varnothing 60:120:180 mm), 2 Lagerzapfen*, Schnur, Hakengewichte*, 2 Stative mit Muffen und Klemmen.

Aus zwei Stufenrollen wird das Modell eines Riemen- oder Seiltriebes nach Abb. 121 zusammengestellt. Es ermöglicht in einfacher Weise das Nachprüfen der für die Kraftübertragung durch Riementrieb geltenden Gleichgewichtsbedingung

$$P_1 : P_2 = r_1 : r_2.$$

Hierin bedeuten r_1 und r_2 die Radien der verwendeten Rollen und P_1 und P_2 die bei beiden Stufenrollen an Wellen gleichen Durchmessers angreifenden Kräfte.

Wichtig ist für den Schüler das Erkennen folgender Zusammenhänge:

- Untersetzung:* $r_1 : r_2 = 2 : 3$.
Kraftgewinn – Geschwindigkeitsverlust.
- Übersetzung:* $r_1 : r_2 = 3 : 2$.
Kraftverlust – Geschwindigkeitsgewinn.

Bemerkungen:

- Vgl. Bemerkung V 89!
- Ähnlich wie beim Riemen- oder Seiltrieb liegen die Verhältnisse beim Zahnradtrieb. Auch für die Kraftübertragung durch Zahnräder gilt die Gleichung

$$P_1 : P_2 = r_1 : r_2.$$

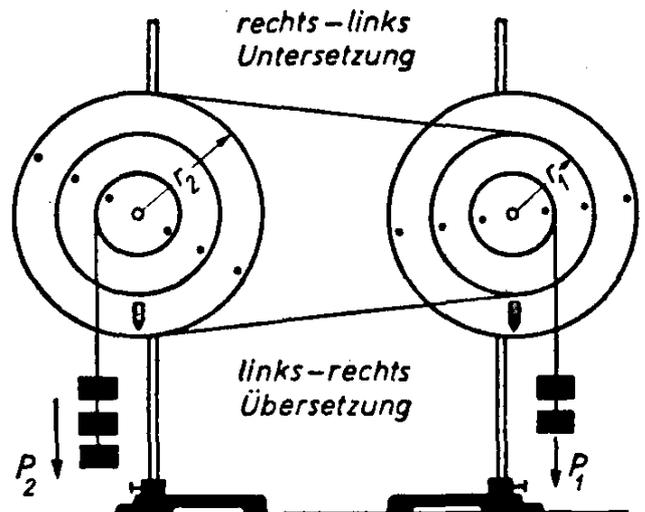


Abb. 121 Modell eines Riemen- oder Seiltriebes

Ist die Zahl der Zähne des ersten Zahnrades Z_1 , die des zweiten Z_2 , so gilt

$$P_1 : P_2 = r_1 : r_2 = Z_1 : Z_2.$$

Die Bedingung für die Drehzahlen n_1 und n_2 ist

$$n_1 : n_2 = Z_2 : Z_1.$$

Beispiele: Nähmaschine, Fahrrad, Riemenübertragung an Maschinen.

91. Schiefe Ebene [G, O – Ü]

Brett ($15 \times 80 \times 800$ mm), leicht beweglicher Wagen*, Holzklötz, Rolle*, Lagerzapfen*, Stativ mit Muffen und Klemmen, Meterstab, Hakengewichte*, Schnur, Waagschale*, Gewichtssatz, Federwaage, Tafelwinkelmesser, Unterstellkasten*, Schraubzwinge, Unterlegbrett.

Methodisch wertvoller als fertige Modelle der schiefen Ebene, wie sie in physikalischen Sammlungen vielfach anzutreffen sind, ist eine nach Art von Abb. 122 aus behelfsmäßigen Mitteln zusammengestellte Versuchsanordnung. Ein ebenes, glattes Brett dient als schiefe Ebene. Es wird gegen einen Holzklötz oder – insbesondere bei größerem Neigungswinkel – gegen einen Unterstellkasten oder gegen die Klemme eines Stativs gelehnt. Mit dem unteren Ende stößt es gegen einen Anschlag. Als Last findet ein leicht beweglicher Wagen aus Holz (siehe § 2, Nr. 8) oder ein Kastenwagen einer Modelleisenbahn Verwendung. Die parallel zur schiefen Ebene wirkende Zugkraft wird durch Gewichte oder durch die Spannkraft einer Federwaage dargestellt. Bei Verwendung von Hakengewichten (50 p) wird das Gewicht des Wagens zweckmäßigerweise auf ein Vielfaches von 50 p abgeglichen.

Gemessen werden für verschiedene Neigungen der schiefen Ebene die Last Q und die Zugkraft P . Die Länge (l) der schiefen Ebene wird vorher festgestellt; ihre Höhe (h) wird durch einen senkrecht an das Ende der Ebene gehaltenen Meterstab ermittelt (Abb. 123). Die Messung des Neigungswinkels erfolgt mit Hilfe eines Tafelwinkelmessers aus Holz, der so an die Ebene gehalten wird, daß die Unterkante der Ebene durch seinen Mittelpunkt geht (vgl. Abb. 122).

Die Meßergebnisse werden wie bei V 81 in einer Tabelle nach folgendem Muster zusammengestellt.

Neigungswinkel (α) Grad	Last (Q) p	Kraft (P) p	$\frac{\text{Kraft } (P)}{\text{Last } (Q)}$ –	Länge der schiefen Ebene (l) cm	Höhe der schiefen Ebene (h) cm	$\frac{\text{Höhe } (h)}{\text{Länge } (l)}$ –

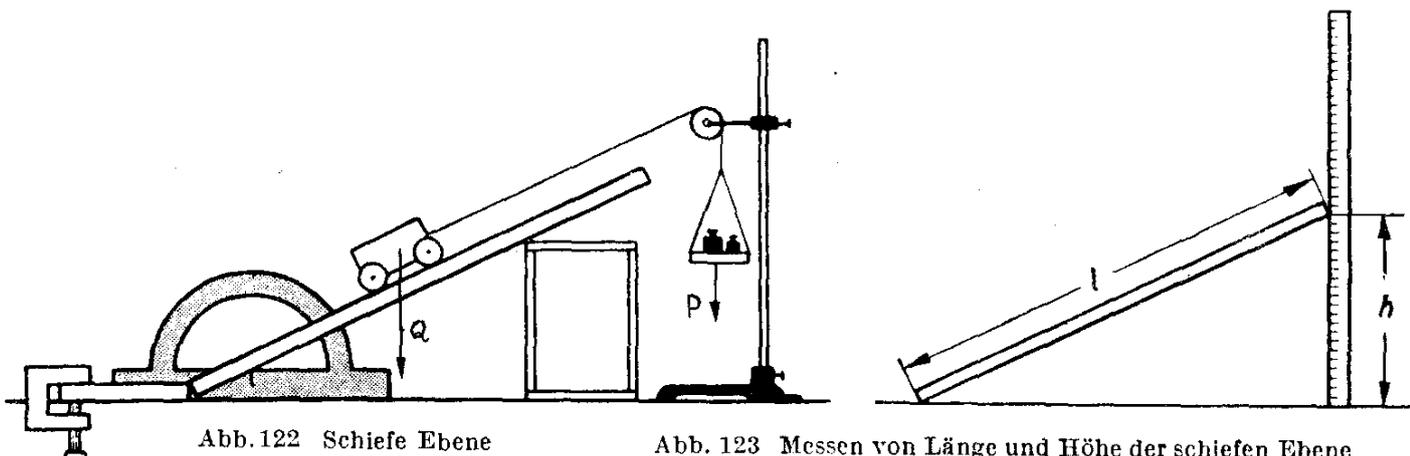


Abb. 122 Schiefe Ebene

Abb. 123 Messen von Länge und Höhe der schiefen Ebene

Der Vergleich zusammengehöriger Zahlenwerte führt zur Feststellung, daß die Quotienten aus Kraft und Last wie aus Höhe und Länge im Falle des Gleichgewichts einander gleich sind:

$$\frac{P}{Q} = \frac{h}{l}.$$

Geringe Abweichungen von diesem Gesetz, insbesondere bei kleinen Neigungswinkeln, finden ihre Erklärung in der auftretenden Reibung.

Bemerkung: [O] Die Herleitung der gefundenen Gleichgewichtsbedingung folgt aus dem Parallelogramm der Kräfte (Abb. 124).

Die Ähnlichkeit der Dreiecke ABC und SUW führt zu der Beziehung

$$\frac{P'}{Q} = \frac{h}{l} = \sin \alpha.$$

Aus der Gleichgewichtsbedingung $P' = P$ folgt

$$\frac{P}{Q} = \sin \alpha.$$

Die Übereinstimmung von P/Q mit $\sin \alpha$ kann durch Auswerten der Tabelle bestätigt werden. Man erkennt, daß $P \leq Q$ sein muß.

Beispiele für die Anwendung der schiefen Ebene: Schrotleiter, Rampenauffahrt, Garagen-einfahrt, Schrägaufzug am Hochofen, Förderbahn einer Tongrube, Bremsberg (im Bergwerk), Ablaufberg (Verschiebebahnhof), Bergstraße, Serpentinweg, Zahnradbahn, Drahtseil-schienenbahn, Bergschwebbahn.

92. Keil (Modellversuch) [O]

Flacher, glatter Holzkeil, 2 Vorhänger aus Porzellan mit je 3 Löchern, Glasstab oder glatter Holzstab, Korken, runde Holzscheibe ($\varnothing 50$ mm), Stativ mit Muffen und Klemmen, 500-g-Stück, Federwaage, Schnur, 5 Glasstäbchen gleichen Durchmessers.

Der Versuch ist nur als Modellversuch zu werten, doch vermittelt er in anschaulicher Weise mit leicht zugänglichen Hilfsmitteln einen Einblick in das Kräftespiel am Keil. Seine Meßergebnisse geben nur größenordnungsmäßig einen Anhalt für das am Keil auftretende Kräfteverhältnis.

Zwei Vorhänger aus Porzellan mit drei Schnurlöchern werden an einem Stativ so festgeklemmt, daß zwei Löcher genau senkrecht übereinanderliegen. Sie dienen zur Führung eines Glasstabes oder glatten Holzstabes, der sich in ihnen möglichst reibungslos verschieben lassen soll. Der Stab ist unten abgerundet und trägt oben einen Korken mit einer daraufgeklebten kleinen Holz-scheibe (Abb. 125). Schiebt man

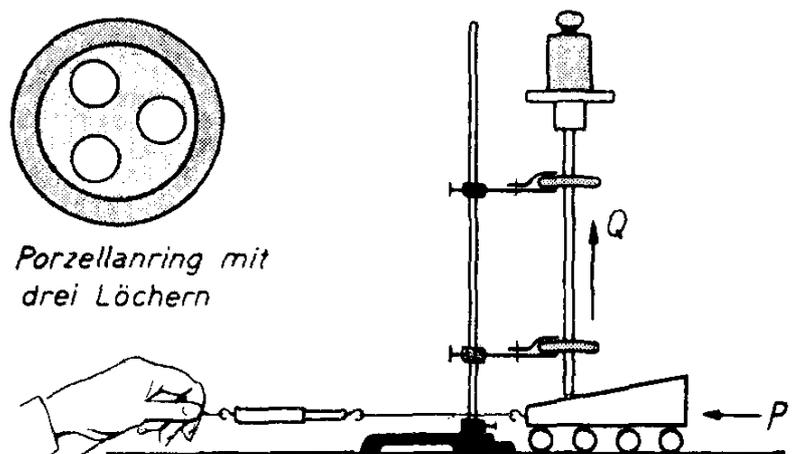


Abb. 125 Wirkung des Keils

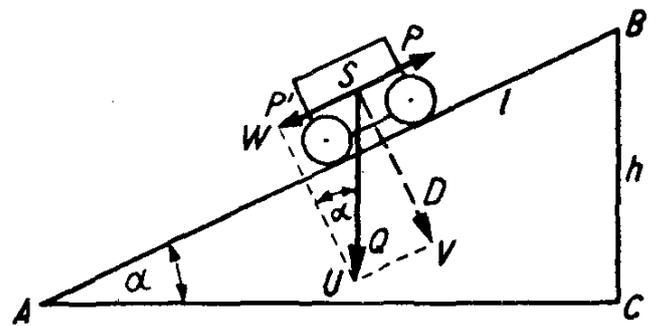


Abb. 124 Kraftzerlegung an der schiefen Ebene

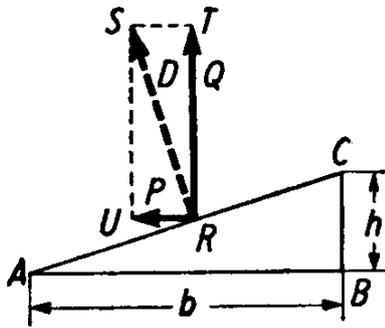


Abb. 126
Kraftzerlegung am Keil

unter ihn von der Seite her einen flachen Holzkeil, so wird ein auf die Holzscheibe gestelltes Gewichtsstück (500 p oder 1000 p) mit geringem Kraftaufwand emporgehoben. Zur Verminderung der Reibung werden Glas- oder Rundholzstäbchen gleichen Durchmessers unter den Keil gelegt. Die Schubkraft P wird durch eine Federwaage gemessen.

Bemerkungen:

1. Etwa vorhandene raue Stellen im Innern der Löcher sind vorher mit einer Rundfeile zu glätten.
2. Die Beziehungen zwischen den Kräften folgen aus dem Kräfteparallelogramm für einen Punkt R der Breitseite des Keils (Abb. 126). Die Ähnlichkeit der Dreiecke ABC und RST führt zur Proportion

$$P : Q = h : b.$$

Man erkennt, daß die senkrecht zur Grundfläche des Keils wirkende Druckkraft Q größer ist als die senkrecht gegen den Rücken gerichtete Druckkraft P .

93. Erzeugung der Schraubenlinie (Modellversuch) – Schraubenmodell [G, O]

Runder Bleistift, Reagenzglas, Rundhölzer ($\varnothing 15 \dots 20$ mm), Papier, starke Pappe, Drahtstifte.

- a) Das Entstehen einer Schraubenlinie wird mit einem Blatt Papier von der Gestalt eines rechtwinkligen Dreiecks veranschaulicht. Man wickelt es so um einen Bleistift oder einen anderen zylindrischen Gegenstand, daß die kurze Kathete parallel zur Achse liegt. Hypotenuse durch einen breiten schwarzen Strich hervorheben! (Abb. 127.)
- b) Schneidet man aus starker Pappe einen 1 cm breiten Streifen und zieht ihn unter Druck einige Male über eine Tischkante, so läßt sich daraus leicht das Modell einer Schraubenlinie formen (Abb. 128).
- c) Mit einem solchen Pappstreifen kann man mühelos das Modell einer Schraube herstellen, indem man den Streifen um ein Rundholz windet und mit einigen Drahtstiften festnagelt (Abb. 129). Man macht die Lücke zwischen zwei Windungen etwas breiter als den Streifen und paßt dessen Breite dem Durchmesser des Rundholzes an.

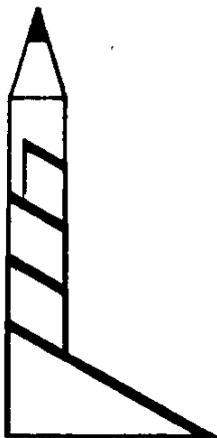


Abb. 127 Papiermodell einer Schraubenlinie

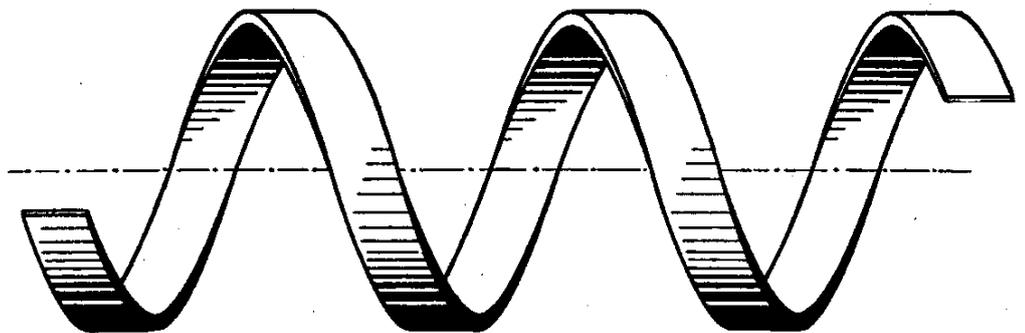


Abb. 128 Pappstreifen als Modell einer Schraubenlinie

Beispiel: \varnothing 15 mm, Streifenbreite 5 mm; \varnothing 25 mm, Streifenbreite 10 mm.

Bemerkungen:

1. Umfaßt man das Schraubenmodell mit drei Fingerspitzen als „Mutter“, so erkennt man anschaulich, daß durch eine Drehung des Rundholzes eine Verschiebung in der Richtung der Achse bewirkt wird.
2. Man versäume nicht, auf den Unterschied zwischen einer *Schraubenfeder* (Federwaage) und einer *Spiralfeder* (Uhrfeder) hinzuweisen. Die Schraubenlinie ist eine Raumkurve, die Spirale eine ebene Kurve. Man kann durch einen Pappstreifen nicht nur eine Schraubenlinie, sondern auch eine Spirale darstellen.
3. [O] Lötet man einen in Form einer Schraubenlinie gebogenen Draht an einen geraden Draht als Achse (Abb. 130) und taucht ihn in Seifenlösung, so bildet sich beim Herausziehen eine Schraubenfläche.

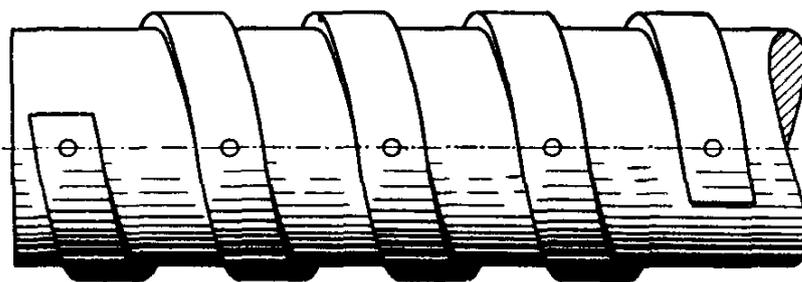


Abb. 129 Schraubenmodell aus Rundholz und Pappstreifen

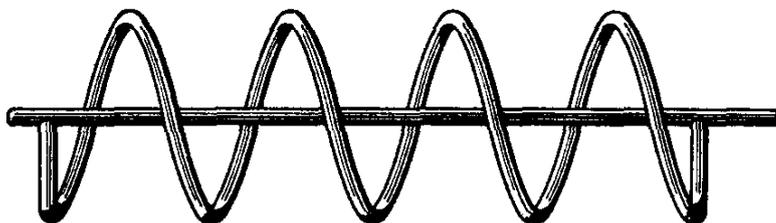


Abb. 130 Drahtgestell zur Erzeugung einer Schraubenfläche mittels Seifenlösung

§ 16. ARBEIT UND LEISTUNG

94. Arbeit an der Rolle und am Flaschenzug – Arbeitsdiagramm [G, O]

3 Rollen* (davon eine mit Schere), 2 Lagerzapfen*, Flaschenzug mit 4 Rollen, Flaschenzug mit 6 Rollen, Hakengewichte*, Schnur, Stativ mit Muffen und Klemmen, Meterstab, Holzklötz, Unterstellkasten*.

Mit Hilfe der bekannten Seilmaschinen wird jeweils die gleiche Last Q (beispielsweise 600 p) um die gleiche Strecke ($h = 10$ cm), den *Lastweg*, gehoben; die Last wird durch ein Gegengewicht P ausgeglichen. Zur Erhöhung der Anschaulichkeit wird die Last bei allen Versuchen auf die Deckfläche eines Holzklötzes oder Kastens emporgehoben und dort abgelegt. Dadurch wird die Tatsache unterstrichen, daß jedesmal die gleiche Arbeit verrichtet wird.

Die Versuchsanordnung wird so aufgestellt, daß das absinkende Gegengewicht durch die Tischkante nicht behindert wird (Abb. 131). Die Sinkstrecke (*Kraftweg* s) wird gemessen.

Eine Tabelle faßt die Meßergebnisse übersichtlich zusammen.

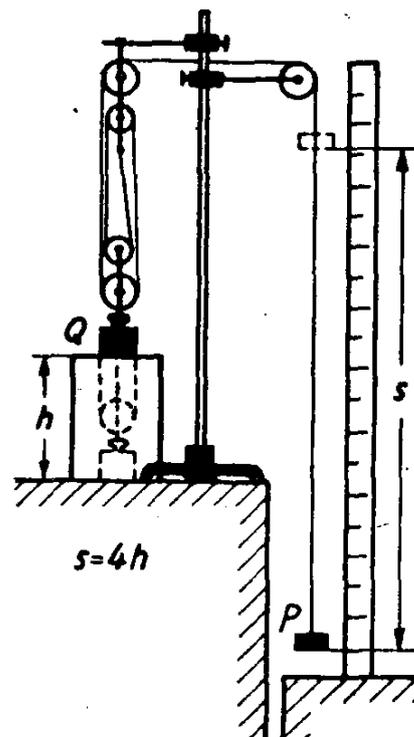


Abb. 131 Arbeit am Flaschenzug mit 4 Rollen

Seilmaschine	Last (Q) p	Lastweg (h) cm	Last \times Lastweg ($Q \cdot h$) pcm	Kraft (P) p	Kraftweg (s) cm	Kraft \times Kraftweg ($P \cdot s$) pcm
Feste Rolle	600	10	6000	600	10	6000
Lose Rolle mit fester Rolle	600	10	6000	300	20	6000
Flaschenzug mit 4 Rollen ..	600	10	6000	150	40	6000
mit 6 Rollen ..	600	10	6000	100	60	6000

Die Versuche lassen erkennen, daß die Produkte aus Kraft und Kraftweg von der gewählten Hebevorrichtung unabhängig sind. Sie ändern sich nur, wenn sich Last oder Lastweg ändern, und werden als Maß für die Arbeit angesehen.

Man setzt die *Arbeit* im physikalischen Sinne gleich dem Produkt aus Kraft und Kraftweg:

$$A = P \cdot s.$$

Bemerkungen:

1. Zur Einführung des Arbeitsbegriffes im Zusammenhang mit der Herleitung der Gleichgewichtsbedingungen an den Seilmaschinen siehe MB, S. 54!
2. [O] Man kann die Arbeit als Produkt von Kraft und Kraftweg durch die Fläche eines Rechtecks veranschaulichen, das man erhält, wenn man den Weg als Abszisse und die Kraft als Ordinate in ein Koordinatensystem einträgt. Es entsteht so ein *Arbeitsdiagramm* (Abb. 132).

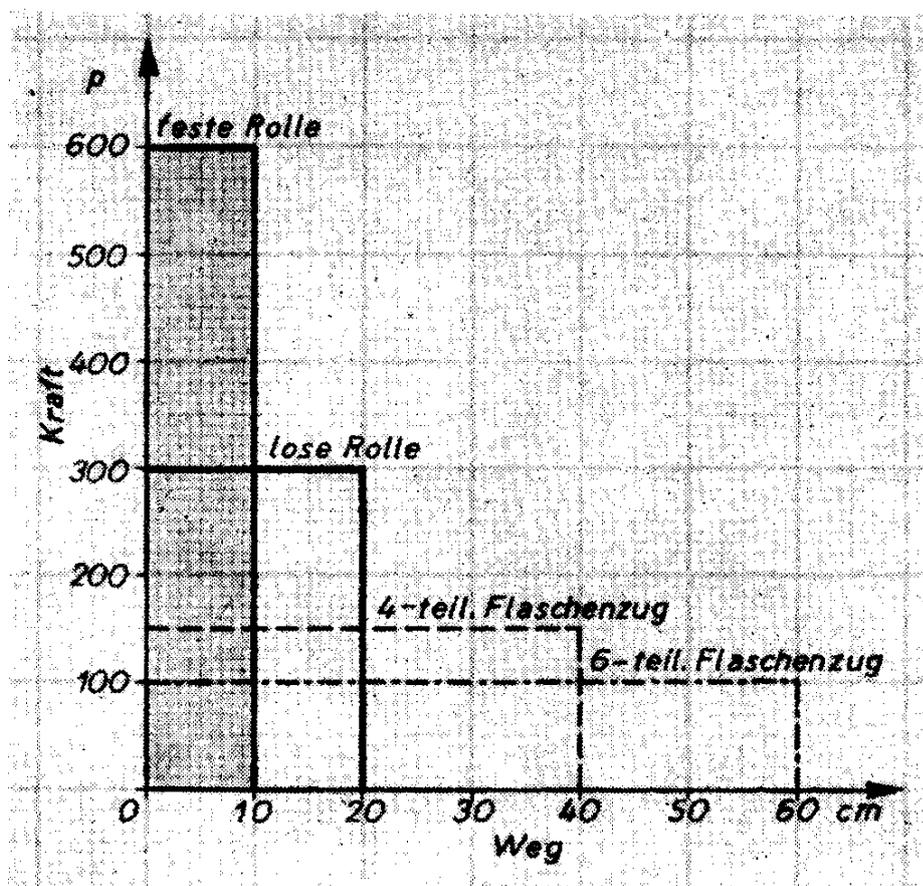


Abb. 132 Arbeitsdiagramme

95. Arbeit an der schiefen Ebene [O]

Geschlitztes Brett* (800 mm lang), leicht beweglicher Wagen*, Unterstellkasten*, Rolle*, Lagerzapfen*, Stativ mit Muffe und Klemme, Meterstab, Waagschale*, Gewichtssatz, rechteckiges Brett (etwa 150 \times 300 mm), Tafelwinkelmesser, Schraubzwinge, Unterlegbrett.

Versuchsordnung und Durchführung des Versuches wie bei V 91.

Zwei verschiedene Höhenlagen des Wagens werden dadurch eindeutig festgelegt, daß man ein rechteckiges Brett (etwa 150 \times 300 mm) erst breitkant (Stellung I), dann

hochkant (Stellung II) senkrecht in den Längsschlitz der schiefen Ebene stellt und den Wagen darauf aufsitzen läßt (Abb. 133). Beim Übergang von I zu II wird der Wagen (Last Q) um den Höhenunterschied der Brettkanten (Lastweg h) gehoben. Gleichzeitig verschiebt er sich längs der Ebene um die Strecke s . Das auf der Waagschale liegende Gegengewicht (Kraft P) senkt sich dabei um die gleiche Strecke (Kraftweg s), die durch einen Meterstab ermittelt wird.

Als Beispiel sind die bei einer Versuchsreihe für verschiedene Neigungswinkel gemessenen Werte in einer Tabelle zusammengestellt.

Neigungswinkel (α) Grad	Last (Q) p	Lastweg (h) cm	Last \times Lastweg ($Q \cdot h$) pcm	Kraft (P) p	Kraftweg (s) cm	Kraft \times Kraftweg ($P \cdot s$) pcm
30°	350	15	5250	175	30	5250
37°	350	15	5250	210	25	5250
43°	350	15	5250	240	21,9	5256
48°	350	15	5250	260	20,2	5252

Die Tabelle läßt erkennen, daß, von geringfügigen Abweichungen abgesehen, die Produkte aus Kraft und Kraftweg von der Neigung der schiefen Ebene unabhängig und dem Produkt aus Last und Lastweg gleich sind:

$$Q \cdot h = P \cdot s.$$

Wie bei den Seilmaschinen und dem Hebel gilt auch hier das Produkt aus Kraft und Kraftweg als Maß für die Arbeit:

$$A = P \cdot s.$$

Bemerkungen:

1. Zur Frage der methodischen Eingliederung des Versuchs vgl. MB, S. 54!
2. Zeichnung von Arbeitsdiagrammen wie bei V 94.

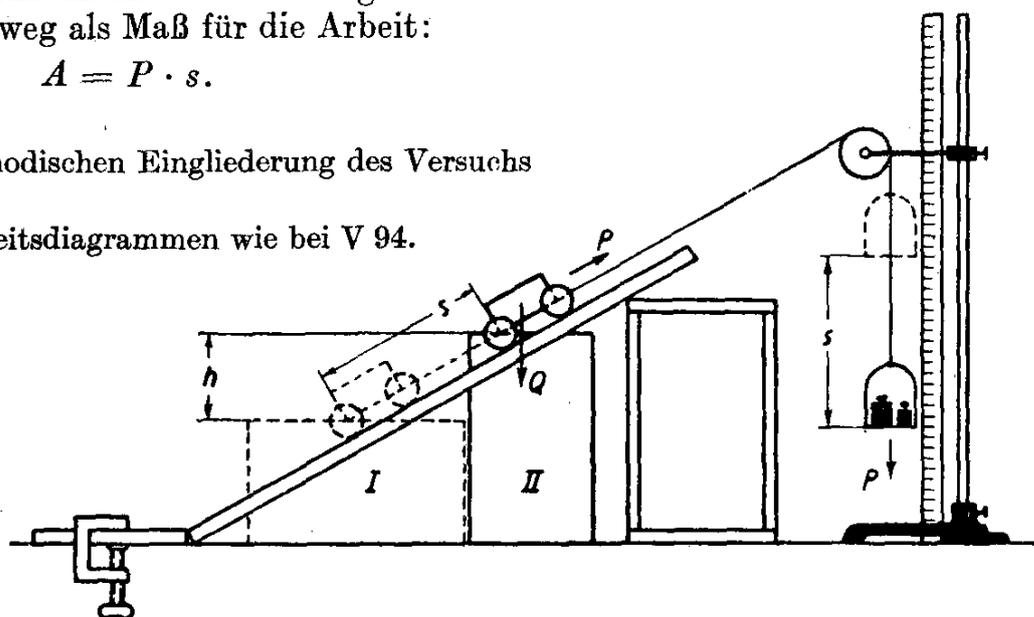


Abb. 133
Arbeit an der schiefen Ebene

96. Arbeit und Leistung beim Ziehen eines Wagens [G, 0]

Vierrädriger Handwagen, Kiste mit Steinen, technische Federwaage, Strick, Bandmaß (20 m), Stoppuhr.

Eine Kiste mit Steinen wird auf einem Handwagen von einem Schüler auf dem Schulhof längs einer vorher in m abgesteckten Strecke gezogen. An einer an die Deichsel gebundenen technischen Federwaage wird die Zugkraft in kp abgelesen. Bei genügend langer Deichsel – unter Umständen durch Strick verlängern! – kann die Abweichung der Zugrichtung von der Waagerechten vernachlässigt werden. Die während des Zu-

rücklegens der Strecke verflossene Zeit t wird mit der Stoppuhr (Taschenuhr mit Sekundenzeiger) in Sekunden ermittelt.

Das Produkt aus Kraft und Weg liefert die *Arbeit* A in kpm:

$$A = P \cdot s.$$

Der Quotient aus Arbeit und Zeit ergibt die *Leistung* N in kpm/s:

$$N = \frac{P \cdot s}{t}.$$

Bemerkung: Man wiederhole den Versuch mehrmals und lasse den Wagen durch verschieden kräftige Schüler ziehen. Auch ändere man die Länge der Fahrstrecke.

97. Arbeit und Leistung beim Stangenklettern [G, O]

Kletterstangen der Turnhalle, Bandmaß (20 m), Stoppuhr, Dezimalwaage oder Personenwaage.

Der Versuch ist deswegen besonders eindrucksvoll, weil er die Arbeit bzw. die Leistung bei einer turnerischen Übung am Körper der Schüler selbst bestimmt. Die Schüler, deren Körpergewicht G bekannt sein muß, klettern eine Kletterstange bekannter Höhe bis zum Querbalken empor (Kopf in Balkenhöhe!). Als Kletterhöhe h gilt die Differenz aus Stangenhöhe und Körperhöhe. Die Kletterzeit t wird mit der Stoppuhr ermittelt. Die Meßgenauigkeit einer Taschenuhr ist für diesen Versuch nicht ausreichend.

Das Produkt aus Körpergewicht und Kletterhöhe ergibt die verrichtete Arbeit, gemessen in kpm:

$$A = G \cdot h.$$

Der Quotient aus diesem Produkt und der Kletterzeit liefert die Leistung, gemessen in kpm/s:

$$N = \frac{G \cdot h}{t}.$$

Leistung umrechnen in kW und in PS!

Bemerkung: Man wiederhole den Versuch mehrmals und wähle Schüler dazu aus, die sich in ihrem Körpergewicht, ihrer Größe und ihren Körperkräften möglichst unterscheiden.

98. Modellversuch zum Pronyschen Zaum [O]

Stufenrolle aus Holz*, Rolle*, Lagerzapfen*, Federwaage, Hakengewichte*, Schnur, 2 Stative mit Muffen und Klemmen, 2 Schraubzwingen, Taschenuhr.

Die Stufenrolle gestattet in anschaulicher Weise die Durchführung eines Modellversuches zum Pronyschen Zaum nach Abb. 134. Die Anordnung stellt einen sogenannten *Seilzaum* dar. Die große Rolle, auf die ein beliebiges Fallgewicht G einwirkt, verkörpert den Motor, die kleine Rolle, an der der Zaum angreift, die Motorachse (Radius r). Im Ruhezustand ist die durch die Federwaage angezeigte Kraft P_1 gleich dem Spann-

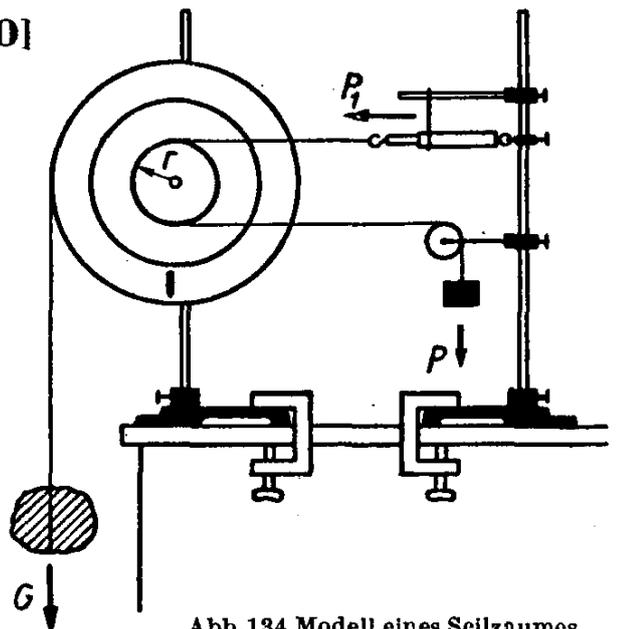


Abb. 134 Modell eines Seilzaumes

gewicht P . Bei laufendem „Motor“ ist $P_1 > P$. Bei n Umdrehungen in t Sekunden findet man als Leistung

$$N = (P_1 - P) \cdot 2\pi r \cdot \frac{n}{t},$$

gemessen in pcm/s bzw. in kpm/s. Zum Bestimmen von t genügt eine Taschenuhr mit Sekundenzeiger; n wird durch unmittelbares Auszählen der Umläufe ermittelt. (Strichmarke beobachten!)

Bemerkungen:

1. Das Durchhängen der Federwaage wird durch eine wie bei V 49 am Stativ befestigte Schnurschlinge verhindert.
2. P muß so gewählt werden, daß das Fallgewicht nicht beschleunigt, sondern langsam mit konstanter Geschwindigkeit absinkt.
3. Man erhält den Wirkungsgrad η der „Maschine“, indem man die gewonnene Arbeit mit der in gleicher Zeit beim Absinken des Fallgewichts G um die Höhe h verbrauchten Arbeit vergleicht:

$$\eta = \frac{(P_1 - P) \cdot 2\pi r \cdot n}{G \cdot h}.$$

99. Pronyscher Zaum an einer Modelldampfmaschine [O]

Modelldampfmaschine, Federwaage, Hakengewichte*, Schnur, Rolle*, Lagerzapfen*, Stativ mit Muffen und Klemmen, Schraubzwinge, Schublehre, Taschenuhr.

Der in Abb. 135 wiedergegebene Versuch gleicht in Anlage und Durchführung völlig dem Modellversuch V 98. Er findet bei den Schülern stets Interesse, da es für sie reizvoll ist, die Leistung der von ihnen zur Verfügung gestellten Modelldampfmaschine zu bestimmen. Zum Feststellen der Drehzahl benutzt man zweckmäßigerweise akustische Zeichen, die von einem an das Schwungrad gebundenen Papierstreifen durch Anschlag gegeben werden. Zur Zeitnahme genügt eine Taschenuhr mit Sekundenzeiger. Der Durchmesser der Schnurscheibe, an der der Seilzaum angreift, wird mit der Schublehre ausgemessen.

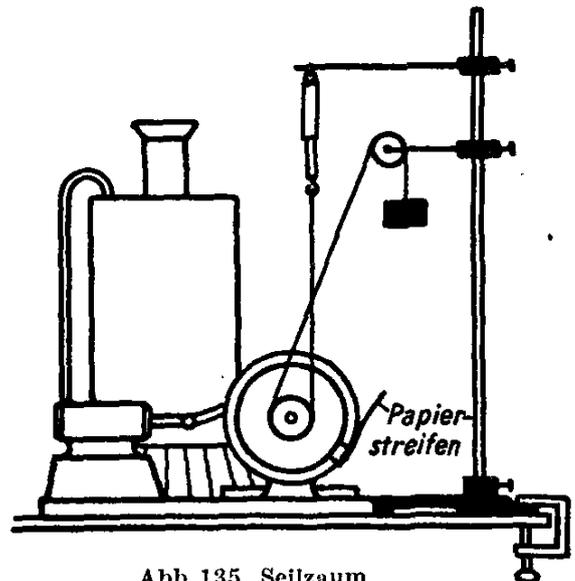


Abb. 135 Seilzaum an einer Modelldampfmaschine

100. Pronyscher Zaum an einem Elektromotor [O]

Elektromotor, Backenbremse aus Holz, Federwaage, 2 Stative mit Muffen und Klemmen, Drehzahlmesser, Stoppuhr.

Obwohl der Versuch, dessen Anordnung aus Abb. 136 zu ersehen ist, einige Geräte erfordert, über die die Schule nicht immer verfügen wird, ist er wegen seiner Eindringlichkeit und seiner hohen praktischen Bedeutung in diese Sammlung mit aufgenommen worden. Als Versuchsmaschine geeignet ist jeder Experimentiermotor, wie er im Unterricht vielfach verwendet wird. Die als Zaum dienende Backenbremse läßt sich aus einer

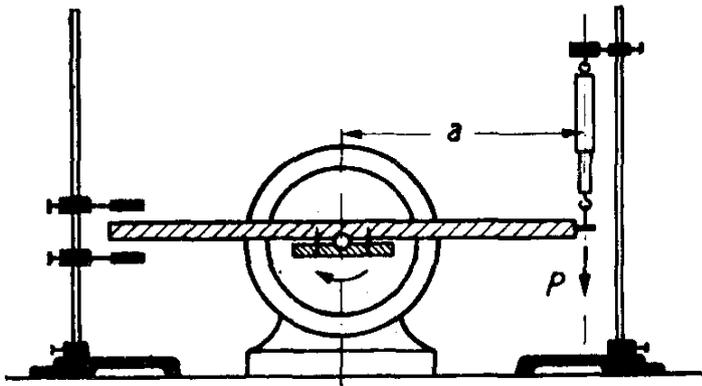


Abb. 136 Backenzaum am Elektromotor

etwa 500 mm langen Holzleiste und einem mit zwei Holzschrauben daran befestigten Backenstück leicht herstellen. Die Aushöhlung muß der Motorachse angepaßt sein. Zum Ermitteln der Zahl n der Umdrehungen während der Zeit t sind ein gegen die Achse zu drückender Drehzahlmesser und eine Stoppuhr unerlässlich, wenn man nicht die hier nicht näher zu beschreibenden stroboskopischen und akustischen Verfahren (Tonhöhebestimmung mit Lochsirene) anwenden will.

Bedeutet Q die an der Achse auftretende Reibungskraft, r den Radius der Motorachse, n_1 die Drehzahl, d. h. die Zahl der Umdrehungen je Sekunde, so beträgt die Motorleistung

$$N = Q \cdot 2 \pi r \cdot n_1.$$

Es sei P die von der Federwaage angezeigte Kraft und a der Hebelarm des Zaumes. Dann ist im Falle des Gleichgewichts

$$Q \cdot r = P \cdot a,$$

und es ergibt sich

$$N = P \cdot 2 \pi a \cdot n_1 = P \cdot 2 \pi a \cdot \frac{n}{t}.$$

Bemerkungen:

1. Durch Einstellen der Stativklemme ist dafür zu sorgen, daß während des Versuches die Federwaage senkrecht zur Holzleiste steht.
2. Zwei an ein Stativ geklemmte Holzstücke dienen als Anschläge, um ein Mitdrehen des Zaumes zu verhüten.