

GIRKE-SPROCKHOFF

**PHYSIKALISCHE  
SCHULVERSUCHE**

---

DRITTER TEIL



VOLK UND WISSEN VOLKSEIGENER VERLAG BERLIN

# Physikalische Schulversuche

Ein Hilfsbuch für die Hand des Lehrers

Herausgegeben von

Georg Sprockhoff

~~D~~**RI**~~T~~**T~~E~~**R~~T~~**E**~~I~~**L******

*Mechanik der ~~F~~**l**~~u~~**i**~~d~~**e**~~n~~ und Gase*

Mit ~~140~~**145** ~~Ab~~**bi**~~l~~**d**~~u~~**n**~~g~~**e**~~n~~



VOLK UND WISSEN VOLKSEIGENER VERLAG BERLIN

1 9 5 4

Als Verfasser arbeiteten mit:

Rudolf Girke

Josef Fischer, Dr. Otto Joachimi, Dr. Kurt Knitter,  
Dr. Egon Kupfer, Dr. Franz Meißner, Hans Reichelt,  
Dr. Ernst Schneider, Dr. Karl Stoye, Reinhold Wolf

Redaktionelle Bearbeitung:

Hans Reichelt, Alfred Schubert

Zeichnungen von Kurt Dornbusch

Redaktionsschluß: 1. Oktober 1954

Bestell-Nr. 02 003-1

3,— DM · Lizenz Nr. 203 · 1000-P-02 54 02 (E)

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

## Vorwort

Die Weiterführung der Buchreihe *Physikalische Schulversuche* erfuhr dadurch eine längere Unterbrechung, daß Rudolf Girke schwer erkrankte und am 25. Dezember 1952 seiner Krankheit erlag. Es ist erklärlich, daß der Tod eines so hervorragenden Pädagogen für das begonnene Werk nicht ohne Folgen bleiben konnte. Eine Verzögerung der Arbeit war unausbleiblich.

Inzwischen ist die Arbeit an dem Buche von einem Autorenkollektiv wieder aufgenommen worden; sie wird im alten Sinne weitergeführt werden. Dieses Buch ist das erste Ergebnis der Arbeit des neuen Kollektivs. Eine große Zahl hinterlassener Beiträge aus der Hand *Rudolf Girkes* wurden mit aufgenommen.

Dem dritten Teil wird in Kürze ein weiteres Heft folgen.

Möge das Büchlein wie seine beiden Vorgänger dazu beitragen, den Lehrern unserer Schulen bei der Durchführung des Physikunterrichtes zu helfen; dann hat es seine Aufgabe erfüllt.

DER HERAUSGEBER

## *Inhaltsverzeichnis*

<i>Einleitung</i> .....	1
<b>ERSTES KAPITEL: <i>Mechanik der Flüssigkeiten</i></b>	
§ 1. <i>Methodische Bemerkungen</i> .....	5
§ 2. <i>Flüssigkeiten mit freier Oberfläche — Verbundene Gefäße</i> .....	11
1. Prüfen von Gestalt und Lage der freien Oberfläche einer Flüssigkeit durch Visieren .....	11
2. Prüfen von Gestalt und Lage der freien Oberfläche einer Flüssigkeit durch Abtasten .....	12
3. Beständigkeit der Größe des Rauminhaltes beim Umgießen einer Flüssigkeit .....	12
4. Flüssigkeitsmodelle .....	13
5. Schauversuch zur Unveränderlichkeit des Wasservolumens .....	13
6. Ausdehnung des Wassers bei Druckentlastung .....	14
7. Standzylinder mit eingetauchtem Glasrohr als Beispiel verbundener Gefäße .....	14
8. Flüssigkeitsstand in zwei durch einen Schlauch verbundenen Röhren ..	15
9. Flüssigkeitsstand in einem in Wasser eingetauchten, mit einer Öffnung versehenen U-Rohr .....	16
10. Schauversuch zur Erklärung der Wirkungsweise verbundener Gefäße ..	16
11. Modell eines Wasserstandsanzeigers .....	16
12. Modell einer Schlauchwaage .....	17
13. Modell einer Kanalwaage .....	18
14. Modell einer Röhrenlibelle .....	19
15. Modell einer Dosenlibelle .....	20
§ 3. <i>Der Kolbendruck in einer allseitig abgeschlossenen Flüssigkeit — Die Druckübertragung</i> .....	21
16. Vorversuch zur Druckübertragung in einer Flüssigkeit .....	21
17. Allseitige Druckübertragung in der Kugelspritze .....	21
18. Druckübertragung durch einen wassergefüllten Gummischlauch .....	22
19. Hydraulische Druckübertragung auf ein Druckgefäß mit offenem Manometer .....	22
20. Modellversuch zur Druckübertragung .....	23

21. Verschiebung einer Wassersäule in einem Zylinder mit angeschlossenem Steigrohr .....	25
22. Zwei verbundene Kolbenprober als Druckübertragungsgerät .....	26
23. Fußballblase als behelfsmäßiges Druckübertragungsgerät .....	27
24. Modell einer hydraulischen Presse .....	28
25. Druckübertragung durch einen mit Wasser gefüllten Fahrradschlauch ..	29
<b>§ 4. Der Schweredruck .....</b>	<b>30</b>
26. Glasröhren als Drucksonden .....	30
27. Drucksonde, bestehend aus einem offenen Manometer mit angeschlossener behelfsmäßiger Druckkapsel .....	31
28. Drucksonde, bestehend aus einem Glasrohr mit angebundener Gummiblase .....	32
29. Nachweis der Bodendruckkraft mittels der Pascalschen Waage .....	33
30. Nachweis der Bodendruckkraft am Bodendruckgerät nach Haldat ...	34
31. Nachweis der Bodendruckkraft mit Hilfe eines aus Aufbauteilen zusammengestellten Bodendruckgerätes .....	35
32. Nachweis der Seitendruckkräfte mittels austretender Wasserstrahlen ..	38
33. Nachweis seitlich gerichteter Druckkräfte an einer Abklärflasche .....	39
34. Nachweis einer aufwärts gerichteten Druckkraft im Innern einer Flüssigkeit .....	39
35. Untersuchungen an einem behelfsmäßig hergestellten Springbrunnen ..	40
36. Bestimmung der Wichte einer mit Wasser mischbaren Flüssigkeit mittels eines Tauchrohres .....	42
37. Bestimmung der Wichte einer mit Wasser nicht mischbaren Flüssigkeit mittels eines Standrohres .....	43
38. Bestimmung der Wichte von Spiritus durch Vergleich der Saughöhen zweier Flüssigkeiten .....	44
39. Bestimmung der Wichte des Quecksilbers mit Hilfe eines U-Rohres ...	46
<b>§ 5. Der Auftrieb .....</b>	<b>47</b>
40. Auftrieb einer luftdicht verschlossenen Blechbüchse oder eines Gummihalls	47
41. Modell zur Veranschaulichung des Auftriebs mittels eines Holzquaders .	47
42. Vergleich des Auftriebs und der Wasserverdrängung eines Körpers unter Verwendung einer Federwaage .....	48
43. Vergleich des Auftriebs und der Wasserverdrängung eines Körpers unter Verwendung einer Balkenwaage .....	49
44. Vergleich des Auftriebs und der Wasserverdrängung eines Körpers vermittels einer Tafelwaage .....	50
45. Änderung des Gewichtes und des Auftriebs einer schwimmenden brennenden Kerze .....	51
46. Ausbleiben des Auftriebs beim Fehlen des Aufdrucks .....	51

47. Bestimmung der Wichte fester Körper mittels des Auftriebs in Wasser .	52
48. Ermittlung der Wichte einer Flüssigkeit durch Bestimmen des Auftriebs eines festen Körpers .....	54
49. Bestimmung der Wichte einer Flüssigkeit mit Hilfe der Mohrschen Waage für Wichtezahlen zwischen 0 und 2 .....	54
50. Vorversuch zur Untersuchung der Schwimmfähigkeit eines Körpers ...	56
51. Absinken, Aufsteigen, Schweben einer geschlossenen Flasche in Abhängigkeit vom Gewicht .....	56
52. Bestätigung des Archimedischen Prinzips mit Hilfe gleich großer Stücke von Profilstäben .....	57
53. Behelfsmäßig hergestellter kartesischer Taucher .....	57
54. Kaltwasserschwimmer .....	59
55. Modellversuch zum Schwimmen eines festen Körpers .....	59
56. Schwimmen von Metallkugeln auf Quecksilber .....	60
57. Schwimmfähigmachen eines nicht schwimmenden festen Körpers .....	60
58. Veränderung der Schwimmlage eines Dreikantholzes in reinem und in salzhaltigem Wasser .....	61
59. Bestimmung der Wichte des Bernsteins im Schwebeverfahren .....	61
60. Schweben eines Hühnereies in einer Kochsalzlösung .....	62
61. Schrotgefüllte Reagenzgläser als Aräometer — Vorversuch für die Verwendung von Aräometern .....	62
62. Bestimmung der Wichte von Flüssigkeiten mit Aräometern .....	63
§ 6. Wasserkraftmaschinen .....	64
63. Modell eines oberflächigen Wasserrades .....	64
64. Modell eines unterflächigen Wasserrades .....	65
65. Modell einer Freistrahlturbine (Pelton-turbine) .....	66
66. Modell einer Propellerturbine (Kaplanturbine) .....	68
 ZWEITES KAPITEL: <i>Mechanik der Gase</i>	
§ 7. Methodische Bemerkungen .....	70
§ 8. Wirkungen und Nachweis des Luftdrucks .....	74
67. Wirkung des Luftdrucks auf einseitig verschlossene und mit Wasser gefüllte Gefäße .....	74
68. Nachweis des Luftdrucks mit Hilfe einer Filtrierflasche .....	75
69. Nachweis des Luftdrucks mit Hilfe eines Blasensprengers .....	75
70. Nachweis der Gleichheit des Luftdrucks in allen Richtungen .....	76
71. Wirkung des Luftdrucks auf ein mit der Öffnung nach unten gehaltenes, mit Wasser gefülltes Gefäß .....	77

72. Nachweis des Luftdrucks an zwei ineinander gesteckten Reagenzgläsern	77
73. Nachweis des Luftdrucks mit Hilfe einer in einer Abklärflasche befindlichen Gummiblase	78
74. Nachweis der Spannkraft der Luft an einer unter einem Rezipienten befindlichen Gummiblase	79
75. Heronsball unter einem Rezipienten	79
76. Heronsball in einem Einweckglas	80
77. Nachweis der Spannkraft der Luft mit Hilfe einer umgekehrten Kochflasche unter einem Rezipienten	80
78. Nachweis der Spannkraft der Luft mit Hilfe einer Kochflasche und einer damit verbundenen Saugflasche	81
79. Nachweis der im Holz und im Wasser befindlichen Luft	81
80. Vorversuch zum Saugheber	82
81. Der einfache Saugheber	83
82. Saugheber im luftverdünnten Raum	84
83. Modellversuch zum Saugheber	85
84. Selbstanlaufender Heber	86
85. Modell eines Gifthebers	87
86. Modell eines Ventilhebers	88
<b>§ 9. Luftdruckmessungen — Barometer und Manometer</b>	<b>88</b>
87. Der Torricelli-Versuch — Das Quecksilberbarometer	88
88. Der Guericke-Versuch — Das Wasserbarometer	90
89. Modellversuch zum Huygensschen Kontrabarometer	91
90. Bestimmung des Luftdrucks mit Hilfe der Meldeschen Röhre	92
91. Messen niedriger Drucke mit Hilfe eines verkürzten Barometers	93
92. Nachweis der Abhängigkeit des Luftdrucks von der Höhe über dem Erdboden mit Hilfe eines Variometers	94
93. Nachweis der Veränderlichkeit der Druckdifferenz zwischen Luft und Stadtgas mit Hilfe des Behnschen Rohres	95
94. Modell eines Dosenbarometers	96
95. Höhenmessung mittels eines Aneroidbarometers	97
96. Offenes Manometer — Messen des Überdrucks einer Stadtgasleitung	98
97. Geschlossenes Manometer — Bestimmung des Wasserdrucks einer Wasserleitung	99
98. Herstellen eines Mikromanometers mit verstellbarer Empfindlichkeit für geringe Drucke	100
<b>§ 10. Das Boylesche Gesetz</b>	<b>101</b>
99. Ableitung des Boyleschen Gesetzes mit Hilfe der Meldeschen Röhre	101
100. Nachweis des Boyleschen Gesetzes mittels einer Bürette	103
101. Nachweis des Boyleschen Gesetzes mittels eines Manometers und einer Gasmeßglocke	104

102. Nachweis des Boyleschen Gesetzes mit Hilfe eines Kolbenprobers ..	105
103. Nachweis des Boyleschen Gesetzes mit Hilfe eines ungleichschenkligen U-Rohres .....	107
§ 11. Der Auftrieb in Gasen .....	108
104. Auftrieb eines Körpers in Kohlendioxyd .....	108
105. Nachweis des Auftriebs eines Körpers in Luft — Benutzung eines Dasymeters .....	109
106. Bestimmung der Wichte von Stadtgas mit Hilfe eines Dasymeters ..	110
107. Vergrößerung des Auftriebs einer Gummiblaste durch Dampfzuführung ..	111
108. Bestimmung des Auftriebs eines Kinderluftballons .....	111
109. Bestimmung des Auftriebs eines mit Stadtgas gefüllten Ballons mit Hilfe des Halteschnurgewichts .....	112
110. Der Auftrieb mit Stadtgas gefüllter Seifenblasen in Luft .....	113
111. Auftrieb einer mit Kohlendioxyd gefüllten Seifenblase in verschiedenen Gasen .....	113
112. Nachweis des Auftriebs erwärmter Luft .....	114
113. Modell einer Montgolfiere .....	114
114. Füllen eines Luftballons mit Stadtgas — Benutzung einer Abklärflasche	116
115. Herstellen von Seifenlösungen für Seifenblasenversuche .....	117
§ 12. Luft- und Wasserpumpen .....	118
116. Luftpumpen für den Schulgebrauch und ihre Behandlung .....	118
117. Modell einer Kolbenluftpumpe .....	121
118. Modell einer Wasserpumpe — Saug-Hub-Pumpe .....	122
119. Abhängigkeit des Luftdrucks in einer Flasche von der Saugzeit der Luftpumpe .....	123
<i>Sachverzeichnis</i> .....	126
<i>Quellenverzeichnis der Abbildungen</i> .....	127

## Einleitung

1. Der nunmehr vorliegende dritte Teil der Physikalischen Schulversuche bildet die Fortsetzung der beiden ersten Teile des von *Rudolf Girke* und *Georg Sprockhoff* begonnenen Gesamtwerkes. Er behandelt in zwei Kapiteln die *Mechanik der Flüssigkeiten und Gase*. Das an sich dazugehörige 3. Kapitel über die *molekularen Eigenschaften der Flüssigkeiten und Gase* mußte aus technischen und redaktionellen Gründen abgetrennt werden. Es folgt als vierter Teil der Physikalischen Schulversuche und gibt als Anhang einige Ratschläge zur Förderung manueller Fertigkeiten, die gerade für die Durchführung von Versuchen zur Mechanik der Flüssigkeiten und Gase besonders nützlich sind, wie das Ausführen von einfachen Glasarbeiten und das Reinigen von Quecksilber.

Auch die *Strömungslehre*, die ja ebenfalls zur Mechanik der Flüssigkeiten und Gase gehört, wurde abgegliedert. Die Versuche zur Strömungslehre einschließlich der flugphysikalischen Versuche bilden den fünften Teil der Physikalischen Schulversuche.

2. Die *methodischen Grundsätze*, die für die beiden ersten Teile des Werkes bestimmend waren, und der äußere Aufbau des Buches wurden unverändert beibehalten. Eine kleine Änderung tritt insofern ein, als mit der Zählung der Versuche, der Paragraphen, der Kapitel neu begonnen wird. Dort, wo auf Versuche der vorangehenden Buchteile verwiesen wird, ist der Versuchsnummer zur Kennzeichnung des Buchteils eine römische Ziffer vorangesetzt, so etwa VI 41.

Wie die beiden ersten Teile der Buchreihe, will auch der dritte Teil kein Lehrbuch sein. Das Buch wendet sich nicht an Schüler, sondern an die Physiklehrer selbst und setzt die Kenntnis der rein physikalischen Zusammenhänge voraus. Die Aufgabe des Buches ist es lediglich, den Lehrern eine Hilfe bei der Auswahl und bei der Durchführung von Versuchen zu geben. Wer sich darüber hinaus über diese oder jene physikalischen Zusammenhänge genauer unterrichten will, muß zu einem der bekannten physikalischen Lehrbücher greifen. Wo den einzelnen Versuchsbeschreibungen Ableitungen in Form von Bemerkungen beigelegt wurden, geschah es, um dem Leser Hinweise zu geben, wie er den Sachverhalt im Unterricht in methodisch zweckmäßiger Weise behandeln kann. Aus demselben Grunde wurden hier und da Zahlenbeispiele und mathematische Ableitungen beigelegt. Insbesondere dort, wo es sich um das scharfe Unterscheiden der Dichte, der Wichte und der Dichte- bzw. Wichtezahl handelt, oder wo die mathematischen Überlegungen einen Bestandteil der Versuchsdurchführung selbst bilden. Auch die vielfach den Versuchsbeschreibungen beigelegten Meßwerttabellen sollen lediglich einen Fingerzeig geben, wie man das betreffende Naturgesetz, zu dessen Auffindung der Versuch

dienen soll, unter Bevorzugung des induktiven Unterrichtsverfahrens aus den Versuchsergebnissen herleitet. Selbstverständlich brauchen die im Unterricht gefundenen Meßwerte keineswegs mit den als Beispiel angeführten Werten übereinzustimmen. Sie richten sich ganz nach den örtlichen Versuchsbedingungen. Im übrigen aber sind die im Buch angegebenen Werte an keiner Stelle künstlich zu rechtgemachte Zahlen. Sie sind sämtlich aus durchgeführten Versuchsreihen erwachsen.

3. Auch in diesem Buche wird jedes Kapitel durch einen Paragraphen *Methodische Bemerkungen* eingeleitet. In diesen Paragraphen wird aber auf allgemeine methodische Fragen nicht eingegangen, da dies nicht die Aufgabe dieses Buches ist, sondern in ein besonderes methodisches Handbuch gehört. Die methodischen Bemerkungen dieses Buches beziehen sich vielmehr auf die in dem betreffenden Kapitel behandelten Versuche. Sie geben Hinweise allgemeiner Art, die für das Gelingen der Versuche zu beachten sind und dem unterrichtenden Lehrer bei der Durchführung der Versuche nützlich sein können.

4. Wie die vorangehenden Teile will auch dieses Buch seinen Benutzern nicht einen ganz bestimmten methodischen Gang aufzwingen. Im allgemeinen wird man dem *induktiven Unterrichtsverfahren*, und zwar auf der Grundschule in noch höherem Maße als auf der Oberschule, den Vorzug geben. Dies ist schon darin begründet, daß das induktive Unterrichtsverfahren im allgemeinen am besten die Art und Weise wiedergibt, wie die Wissenschaft selbst zu ihrem Ziele gelangt ist. Doch wäre es zweifellos falsch, wenn das Buch seinen Lesern in methodischer Hinsicht bindende Vorschriften machen wollte.

Dieser Gedanke kommt schon dadurch zum Ausdruck, daß das Buch nicht nach methodischen, sondern nach systematischen Gesichtspunkten gegliedert ist. Andererseits ist aber auch die systematische Bindung keineswegs als starr zu bezeichnen. Die einzelnen Versuche sind in zwangloser Weise nach sachlich zusammenhängenden Stoffgebieten geordnet. Die Reihenfolge der Paragraphen und damit der Stoffgruppen muß sich keineswegs mit der Reihenfolge der Stoffgebiete im Lehrplan oder mit der Folge der Unterrichtseinheiten decken. Es muß den Physiklehrern überlassen werden, aus den nach rein sachlichen Gesichtspunkten zusammengestellten Versuchsgruppen die methodisch zweckmäßigste Auswahl zu treffen.

Damit hängt noch eine andere Überlegung eng zusammen. Das Buch bietet zu jeder Unterrichtseinheit weit mehr Versuche, als man etwa im Unterricht bringen könnte. Wenn das Buch diesen Weg beschreitet, so geschieht es deshalb, um den Lehrern viele Versuchsmöglichkeiten zu bieten, aus denen sie die Versuche auswählen müssen, die sich je nach den örtlichen Verhältnissen am besten für den Unterricht eignen. Die Ausstattung der Sammlung wird dabei jeweils von ausschlaggebender Bedeutung sein. Auf keinen Fall soll sich ein Benutzer des Buches von der falschen Vorstellung leiten lassen, als müßte er seinen Schülern möglichst alle beschriebenen Versuche zeigen. Wenige, wirklich gut durchgeführte und von den Schülern in allen Einzelheiten verstandene Versuche sind methodisch wirkungsvoller als eine Fülle halbverstandener und mit unzureichenden Mitteln ausgeführter Versuche. Am sichersten erreicht man das Lehrziel, wenn man die Schüler an der Durchführung der Versuche teilnehmen läßt.

5. Bei der Auswahl und der Beschreibung der Versuche waren die Verfasser darauf bedacht, in erster Linie solche Versuche zu bringen, bei denen sich die Versuchsanordnungen unter Verwendung einfacher Glasteile und anderer im allgemeinen in den Schulen vorhandener Ausrüstungsgegenstände unter Zuhilfenahme von Stativteilen zusammenstellen lassen. Dem Gedanken der Durchführung von Versuchen unter *Verwendung von Aufbauteilen* wird weitgehend Rechnung getragen. Selbstverständlich müssen für wichtige Einzelversuche bestimmte gute Sondergeräte vorhanden sein. Dazu gehören in erster Linie eine für hydrostatische Versuche brauchbare Waage und eine gute Luftpumpe.

Größter Wert wurde auf die Darbietung von ganz einfachen Versuchen (Vorversuchen) und von Freihandversuchen gelegt, wenn sie im Buch als solche auch nicht immer besonders bezeichnet sind. Gerade diese Versuche sind besonders dazu geeignet, die Schüler zum eigenen Experimentieren anzuregen und sie zur kritischen Naturbetrachtung zu erziehen. Auch guten Modellversuchen ist im Buche Raum gegeben; hingewiesen sei insbesondere auf V 4, V 20, V 55, V 83.

6. Der Rahmen des Buches wäre zu eng gesteckt, wenn es sich lediglich auf die Beschreibung von Versuchsdurchführungen beschränken würde. Alles was zur experimentellen Gestaltung des Unterrichts förderlich ist, gehört in dieses Buch. Deshalb ist auch in bescheidenem Umfange der *Bau von Modellen* mit aufgenommen. Die Modellbeschreibungen sind so gehalten, daß die Modelle von den Schülern unter Anleitung ihres Lehrers hergestellt werden können. Die Modelle sollten deshalb in erster Linie in etwa bestehenden Schülerarbeitsgemeinschaften angefertigt werden. Die Schüler lernen dabei nicht nur die physikalischen Zusammenhänge besser verstehen, sondern haben noch in der Entwicklung manueller Fertigkeiten einen Gewinn, was im Hinblick auf den Gedanken der polytechnischen Bildung zweifellos von hohem Wert ist.

Zur Vermeidung einer unnötigen Komplizierung in der Gliederung des Buches sind die Modellbeschreibungen nicht in besonderen Abschnitten untergebracht, sondern in die Paragraphen mit eingegliedert, in die sie nach den Sachzusammenhängen hineingehören. Sie sind, wie die Versuche, mit einer laufenden V-Nummer versehen. Das gilt auch für Anweisungen allgemeiner Art, die das Buch für den Gebrauch von Luftpumpen vorsieht.

7. Damit die Benutzung des Buches den Lesern erleichtert wird, die nicht im Besitz der schon vorher erschienenen Buchteile sind, sei noch einmal auf folgende Einzelheiten hingewiesen:

1. Jeder Versuch ist in sich abgeschlossen dargestellt; er ist mit einer laufenden Nummer versehen.
2. Die der Versuchsüberschrift in eckigen Klammern beigefügten Zeichen bringen zum Ausdruck, für welche Schulart der Versuch vorzugsweise geeignet ist. Es bedeuten
  - [G] für die Grundschule geeignet,
  - [O] für die Oberschule, aber auch für die Berufsschule geeignet,
  - [G, O] für Grund- und Oberschulen geeignet,
  - [Ü] für Schülerübungen geeignet.
3. Jede Versuchsbeschreibung wird durch eine Aufzählung der benutzten Geräte und Werkstoffe eingeleitet.

4. Ausführungen, die die eigentliche Versuchsdurchführung nicht betreffen oder über sie hinausgehen, sind als Bemerkungen in Kleindruck beigefügt.
5. Hinweise auf andere Versuche werden durch das Zeichen V mit darauffolgender Versuchsnummer gegeben. Zum Beispiel: V 27, V I 41.
6. Bei Hinweisen auf methodische Bemerkungen ist das Zeichen MB unter Beifügung der Seitenzahl angegeben, zum Beispiel: MB, S. 26.
7. In Anlehnung an das in der Technik übliche Verfahren werden sämtliche Abmessungen von Geräten (Längen, Breiten, Höhen, Durchmesser u. ä.) im Text wie in den Abbildungen in Millimeter angegeben. Es sei bei dieser Gelegenheit darauf hingewiesen, daß die meisten angegebenen Abmessungswerte nur Richtzahlen darstellen.

## ERSTES KAPITEL

### *Mechanik der Flüssigkeiten*

#### § 1. METHODISCHE BEMERKUNGEN

1. Bei der Behandlung der Flüssigkeitseigenschaften empfiehlt es sich, von *Flüssigkeiten mit freier Oberfläche* auszugehen. Nachdem diese bei einer ruhenden Flüssigkeit als horizontale Ebene erkannt ist, lassen sich ungezwungen die Erscheinungen an *verbundenen Gefäßen* verständlich machen, ohne daß man zunächst auf den Zusammenhang mit dem Schweredruck eingeht. Man kann an zahlreichen Beispielen zeigen, daß verbundene Gefäße als ein einziges zusammenhängendes Gefäß aufgefaßt werden können. Um die Erscheinungen nicht zu komplizieren, wird man die Versuchsanordnungen am Anfang so wählen, daß keine störenden Kapillarkwirkungen auftreten.

Zur Demonstration des Gesetzes der verbundenen Gefäße wurde früher oft ein Gerät benutzt, bei dem mehrere Glasröhren verschiedener Gestalt an eine Röhre angeschmolzen waren. Diese Ausführungsform ist wegen ihrer Starrheit nicht zu empfehlen. Demgegenüber haben die unter V 7, V 8, V 9, V 10 vorgeschlagenen Versuchsanordnungen den Vorzug der Beweglichkeit und lassen sich ohne Schwierigkeiten abändern. Sie erleichtern dadurch das Verständnis der Anwendungen verbundener Gefäße.

Zur Erhöhung der Anschaulichkeit ist es zu empfehlen, bei Schauversuchen mit Wasser, wenn irgend angängig, *gefärbtes Wasser* zu verwenden. Wegen der Selbstverständlichkeit dieser Maßnahme ist sie im Buch nur in einigen besonders dringlichen Fällen erwähnt. Man benutzt zum Färben von Wasser wegen seiner starken Färbekraft oft Kaliumpermanganat, da wenige Kristallsplitterchen dieses Salzes genügen, um einen ganzen Eimer Wasser intensiv rot zu färben. Doch ist Vorsicht beim Verwenden von Kaliumpermanganatlösung in engen, schwer zugänglichen Gefäßen geboten. Bei längerem Gebrauch dieser Lösung scheidet sich aus ihr infolge Reduktion etwas Mangandioxyd ab, das die Gefäßwand schwach braun färbt und schwer zu beseitigen ist.

Zum Färben von Wasser sind folgende *Farbstoffe* gut geeignet, von denen man immer kleine Mengen in alkoholischer oder wäßriger Lösung bereithalte:

1. Fuchsin in Alkohol (Brennspiritus): tief dunkelrot. Wenige Tropfen dieser Lösung färben einen Liter Wasser.
2. Methylenblau in destilliertem Wasser: dunkelblau.
3. Fluoreszein in destilliertem Wasser unter Zusatz einiger Tropfen Natronlauge: grün fluoreszierend.
4. Phenolphthalein in Alkohol unter Zusatz einiger Tropfen Natronlauge: rot. Geringe Mengen dieser Lösung färben größere Mengen Wasser.
5. Drachenblut, ein tropisches Harz: rot. Geeignet zum Färben von Benzin, Petroleum, Benzol.

2. Besondere Sorgfalt ist auf die Klärung des Begriffs *hydrostatischer Druck* zu verwenden. Von Anfang an ist zwischen der Kraft und dem Druck scharf zu unterscheiden. Diese beiden Begriffe treten bereits in der Mechanik fester Körper auf. Bei der Behandlung der Flüssigkeiten wird man auf die Ähnlichkeiten und das unterschiedliche Verhalten von festen Körpern und Flüssigkeiten ausführlich eingehen und auch Modellversuche heranziehen (vgl. V 20). Grundsätzlich sei an folgendes erinnert:

Wenn auf ein Flächenstück  $F$  an der Oberfläche eines festen Körpers in Richtung auf den Körper hin eine Kraft einwirkt, dann heißt die senkrecht zur Fläche wirkende Komponente  $P$  dieser Kraft die *Druckkraft*. Die in der Richtung der Fläche wirkende Komponente  $Q$  der ursprünglichen Kraft ist die *Schubkraft*. Die auf die Flächeneinheit bezogene Druckkraft, mithin der Quotient  $\frac{P}{F}$ , wird als *Druck*  $p$  definiert:

$$p = \frac{P}{F}.$$

Als Druckeinheit wird bei rein physikalischen Messungen meist die *physikalische Atmosphäre* (Atm) verwendet:

$$1 \text{ Atm} \triangleq 760 \text{ Torr} \approx 1013 \text{ mb.}$$

Die technische Einheit des Druckes ist ein Kilopond je Quadratcentimeter oder eine *technische Atmosphäre* (at):

$$1 \text{ kp} \cdot \text{cm}^{-2} = 1 \text{ at.}$$

Der so definierte Druck ist eine gerichtete Größe; er hat dieselbe Richtung wie die Kraft selbst.

Bei einem festen Körper macht sich die Wirkung einer Druckkraft nur in der Richtung dieser Kraft bemerkbar. Schlägt man zum Beispiel mit einem Hammer einen Nagel in ein Brett, so spürt die den Nagel haltende Hand keinerlei Einwirkung, während in der Schlagrichtung eine große Kraft übertragen wird (vgl. V 20).

Läßt man auf eine allseitig abgeschlossene Flüssigkeit mittels eines Kolbens eine Kraft  $P$  einwirken, so kann man für die an die Flüssigkeit grenzende Kolbenfläche  $F$  einen Druck  $p = \frac{P}{F}$  definieren, der senkrecht zur Fläche wirkt und in die Flüssigkeit hinein gerichtet ist. Man bezeichnet diesen Druck als *Kolbendruck*.

Versuche mit Flüssigkeiten zeigen (§ 3), daß sich eine eingeschlossene Flüssigkeit ganz anders verhält als ein fester Körper, da beim Hineindrücken eines Kolbens an allen Stellen der Wandung Druckkräfte auftreten; Schubkräfte werden dabei nicht wirksam.

Bestimmt man an beliebigen Stellen der Wand die auf die Flächeneinheit bezogene Kraft, den Wanddruck, so findet man, daß er an allen Stellen der Wandung dieselbe Größe hat wie der durch den Kolben aufgeprägte Druck  $p$ . Der an der Kolbenfläche erzeugte Druck ist durch die Flüssigkeit von Molekül zu Molekül nach allen Richtungen in gleicher Stärke übertragen worden. Man kommt zu der Einsicht, daß unter den gegebenen Versuchsbedingungen an jeder Stelle im Innern der Flüssigkeit nach jeder beliebigen Richtung hin der gleiche Druck herrscht. Er hat dieselbe Größe wie der der Flüssigkeit von außen aufgeprägte Kolbendruck und kann an jeder Stelle der Gefäßwand senkrecht zur Wand festgestellt werden.

3. Auch bei einer ruhenden, von einer freien Oberfläche begrenzten Flüssigkeit, auf die lediglich die Schwerkraft einwirkt, kann man an den Gefäßwänden Druckkräfte nachweisen, die senkrecht zur Wand gerichtet sind (V 32, V 33). Der Quotient aus der Druckkraft und der gedrückten Fläche ergibt dann den *Wanddruck* in den besonderen Wirkungsformen des *Bodendrucks*, des *Seitendrucks* und des *Aufdrucks*. Der Wanddruck einer Flüssigkeit ist wie der Druck bei einem festen Körper eine gerichtete Größe.

Es zeigt sich, daß bei waagerechter Bodenfläche der Bodendruck an allen Stellen des Bodens den gleichen Wert hat. Der Seitendruck ist proportional der mittleren Höhe der Flüssigkeitsoberfläche über der untersuchten Stelle. Ein Aufdruck wird wirksam an allen Stellen der Gefäßwand, die die Flüssigkeit von oben her begrenzen. Sofern eine solche Fläche waagrecht liegt, ist der Aufdruck entsprechend dem Bodendruck an allen Stellen der Begrenzungsfläche gleich groß.

Da der Bodendruck, der Seitendruck und der Aufdruck durch die Schwere der Flüssigkeit verursacht werden, bezeichnet man diese Druckarten auch als *Schweredruck*.

Während bei einer allseitig eingeschlossenen und einem Kolbendruck ausgesetzten Flüssigkeit der Zustand im Innern nicht ohne weiteres veranschaulicht werden kann, ist bei einer Flüssigkeit mit freier Oberfläche das Innere leicht zugänglich. Der dort herrschende Druckzustand läßt sich ohne Schwierigkeiten unmittelbar veranschaulichen. Man verwendet zu diesem Zwecke *Drucksonden* verschiedener Ausführung (V 26, V 27, V 28). Mit Hilfe derartiger Drucksonden kann man an jeder Stelle im Innern Kräfte und dementsprechend einen Druck nachweisen. Dieser hat aber nicht wie der Wanddruck eine bevorzugte Richtung, sondern macht sich an jeder beliebigen Meßstelle nach allen Seiten hin in gleicher Stärke bemerkbar. Der Druck im Innern hat in jeder horizontal durch die Flüssigkeit gelegten Ebene den gleichen Wert wie der Wanddruck in derselben Tiefe und ist im übrigen proportional der mittleren Höhe der Flüssigkeitsoberfläche über der Meßstelle.

Da bei keinem Versuch die Schwerkraft ausgeschaltet werden kann, so herrscht im Innern einer allseitig eingeschlossenen und einem Kolbendruck ausgesetzten Flüssigkeit ein Druckzustand, der sich aus Kolbendruck und Schweredruck zusammensetzt. Man nennt ihn den *hydrostatischen Druck*. Dieser hat keine bevorzugte Richtung. Will man ihn nachweisen, so muß man an der Meßstelle durch eine geeignete Versuchsanordnung eine nach irgend einer Richtung hin bewegliche Wand schaffen.

Bei Flüssigkeiten mit freier Oberfläche entfällt der Kolbendruck. In diesem Falle ist der hydrostatische Druck gleich dem Schweredruck.

Aus methodischen Gründen wird man bei der ersten Erörterung des Flüssigkeitsdruckes solche Versuche an den Anfang stellen, bei denen es sich vorzugsweise um den Kolbendruck handelt, wie es zum Beispiel bei der Kugelspritze und der hydraulischen Presse der Fall ist.

Es ist eine erhebliche Schwierigkeit für den Schulunterricht, daß das Wort Druck nicht in allen begrifflichen Zusammensetzungen denselben anschaulichen Sinn hat. Der *Wanddruck* (als Bodendruck, Seitendruck und Aufdruck) ist eine gerichtete Größe, der *hydrostatische Druck* dagegen nicht. Dieser Begriff kennzeichnet den *Zustand* im Innern einer Flüssigkeit und besagt, daß man an jeder

Stelle im Innern nach jeder beliebigen Richtung hin Druckkräfte auslösen kann. Man könnte daran denken, für diesen Zustand im Innern einer Flüssigkeit eine Bezeichnung zu verwenden, in der das Wort Druck nicht vorkommt, denn mit diesem Begriff ist schon vom festen Körper her zwangsläufig die Vorstellung einer bestimmten Richtung verbunden. Geeignet wäre etwa die Bezeichnung *hydrostatische Spannung*. Es kann aber nicht die Aufgabe dieses Buches sein, in der Begriffsbildung grundsätzlich neue Wege zu gehen. Die Hauptsache ist, daß die Schüler von den Eigenschaften der Flüssigkeiten eine klare Vorstellung gewinnen. Wir werden in diesem Buche den Ausdruck Druckzustand verwenden, um hervorzuheben, daß der hydrostatische Druck keine bestimmte Richtung hat.

Dabei ist es für das Verständnis sehr förderlich, die Dimension des hydrostatischen Druckes in eine geeignete Form zu bringen. Dazu führt folgende Überlegung:

Der hydrostatische Druck wird durch die auf die Fläche von  $1 \text{ cm}^2$  ausgeübte Druckkraft gemessen. Er hat daher wie der Wanddruck die Dimension  $[\text{Kraft}/\text{Fläche}] = [K \cdot l^{-2}]$ . Erweitert man diesen Quotienten mit der Dimension  $[\text{Länge}] = [l]$ , so nimmt die Dimension des hydrostatischen Druckes die Form an:

$$[K \cdot l^{-2}] = [K \cdot l \cdot l^{-2} \cdot l^{-1}] = [K \cdot l \cdot l^{-3}] = [\text{Energie}/\text{Volumen}].$$

Der hydrostatische Druck hat daher formal dieselbe Dimension wie die *Energiedichte*.

Eine derartige Überlegung erleichtert das Verständnis des hydrostatischen Druckes und leistet Vorarbeit für die Erklärung der später zu besprechenden Druckzustände in strömenden Flüssigkeiten.

4. Eine wichtige Aufgabe des Unterrichtes in der Hydrostatik ist die Vermittlung der Erkenntnis, daß die von einer Flüssigkeit auf den Boden ausgeübte Kraft zwar von der Größe der Bodenfläche und der Flüssigkeitshöhe abhängt, dagegen von der Gefäßform unabhängig ist. Außerdem wird die Größe dieser Kraft durch die Wichte der Flüssigkeit mitbestimmt. Den Kernpunkt dieses Stoffgebietes bildet das *hydrostatische Paradoxon*. Es gehört zu den unabdingbaren Forderungen des Unterrichtes, daß den Schülern die Erscheinungen des hydrostatischen Paradoxons in überzeugender Weise experimentell vermittelt werden. Dazu dienen die *Bodendruckgeräte*, die in den Schulen in mannigfacher Form vorhanden sind.

Das bekannteste dieser Geräte ist die Pascalsche Waage, bei der eine den Boden des Versuchsgefäßes bildende Platte von einem Waagebalken getragen und durch die auf der Waagschale befindlichen Gewichtsstücke gegen den Gefäßrand gedrückt wird. Das Flüssigkeitsniveau im Versuchsgefäß wird durch einen verschiebbaren Zeiger markiert und die Flüssigkeitshöhe an einer Höhenskala abgelesen. Leider befriedigt die Pascalsche Waage experimentell meist nur wenig. Der Austritt des Wassers ist bei den meisten Geräten dieser Art nicht genau fixiert. Er beginnt häufig schon weit vor dem Eintritt des Kräftegleichgewichts. Der Versuch wirkt infolgedessen nicht überzeugend.

Eine Verbesserung der Konstruktion stellt eine Ausführungsform dar, bei der die Versuchsgefäße auf einem Zylinder aufsitzen. In ihm ist ein Kolben leicht verschiebbar angeordnet, der gegen die Zylinderwand durch einen Quecksilberring gut abgedichtet ist. Die gegen den Boden gerichtete Kraft wird bei diesem Gerät auf eine Zeigerwaage übertragen.

Bei anderen Bodendruckgeräten ist die abhebbare Bodenplatte durch eine Gummimembran ersetzt, die gegen eine Zeigerwaage wirkt. Sie arbeiten recht befriedigend, haben aber den Nachteil, daß die Gummimembran allmählich erhärtet und brüchig wird und infolgedessen öfter ausgewechselt werden muß.

Eine besonders einfache Form der Bodendruckgeräte ist die von *Haldat* angegebene. Bei ihr dient ein mit Quecksilber gefülltes Manometer als Druckanzeiger. Der Umstand, daß zur Herleitung des Bodendruckgesetzes ein Flüssigkeitsmanometer verwendet wird, obwohl dessen Wirkungsweise erst aus den Druckgesetzen heraus erklärt werden kann, braucht in methodischer Hinsicht keine Bedenken zu erregen. Das Manometer dient beim Versuch lediglich als Anzeigegerät, ohne daß man auf seine Funktion einzugehen braucht. Die Erarbeitung seiner Wirkungsweise wird später nachgeholt. Die Situation ist hier eine ganz ähnliche wie bei der Balkenwaage, die man im Unterricht vor der Durchnahme der Hebelgesetze benutzt, wogegen niemand einen Einwand erheben wird.

Alle genannten Bodendruckgeräte haben den Nachteil, daß sie als Einzelgeräte für einen Versuch angeschafft werden müssen. Das Bestreben, auch die so wichtigen Bodendruckversuche mit Hilfe von Aufbaugeräten durchzuführen, veranlaßte die Verfasser zur Erprobung des in V 31 beschriebenen Versuches. Er ermöglicht es in denkbar einfacher Weise, aus Aufbauteilen ein Bodendruckgerät zusammenzustellen, das die Erscheinungen des hydrostatischen Paradoxons nicht nur qualitativ zu zeigen gestattet, sondern auch die quantitative Herleitung des Bodendruckgesetzes zuläßt.

Zu beachten ist, daß alle sogenannten Bodendruckgeräte im Grunde nicht den Bodendruck selbst, sondern die gegen den Boden wirkenden Druckkräfte untersuchen. Die mit Hilfe dieser Geräte gewonnenen Erkenntnisse beziehen sich stets auf die gegen die Bodenplatte wirkenden Kräfte. Das Bodendruckgesetz selbst wird daraus erst durch Abstraktion gefunden. Man darf bei der Benutzung der Bodendruckgeräte die Schüler über diesen Umstand nicht im unklaren lassen.

5. Bei Auftriebsbestimmungen in Flüssigkeiten ist das Wägen von Körpern erforderlich, die in die Flüssigkeiten eintauchen. Der unter der Waagschale befindliche Raum muß dabei für die Durchführung des Versuchs zur Verfügung stehen. Am besten eignet sich für die Durchführung solcher Versuche eine Hebelwaage, bei der sich die Gabel mit dem Lager des Balkens in beliebiger Höhe an einem Stativstab einstellen läßt, denn bei einer solchen Waage kann man die Höhenstellung der Waagschale in einfachster Weise der Versuchsanordnung anpassen. Doch kann man statt dessen ebensogut eine Waage mit ungleich langen Schalen oder eine Waage mit einer überbrückten Schale verwenden (Abb. 10/1). Nicht minder brauchbar sind einfache Hornschalenwaagen, sofern man sie mit einer Aufhängevorrichtung für die anzuhängenden Körper versieht. Im Buch werden alle Waagen der beschriebenen Art, die für die Durchführung von hydrostatischen Versuchen geeignet sind, kurz als *hydrostatische Waagen* bezeichnet.

Zur Bestätigung des *archimedischen Prinzips* wird häufig ein zylindrischer Tauchkörper verwendet, der an einen Hohlkörper mit genau entsprechender Höhlung gehängt werden kann und in Wasser eintaucht. Der Auftrieb kann dann durch Füllung des Hohlraums mit Wasser ausgeglichen werden. Der Versuch mit einem solchen Gerät ist aber nicht zu empfehlen. Er ist nicht exakt durchführbar, da

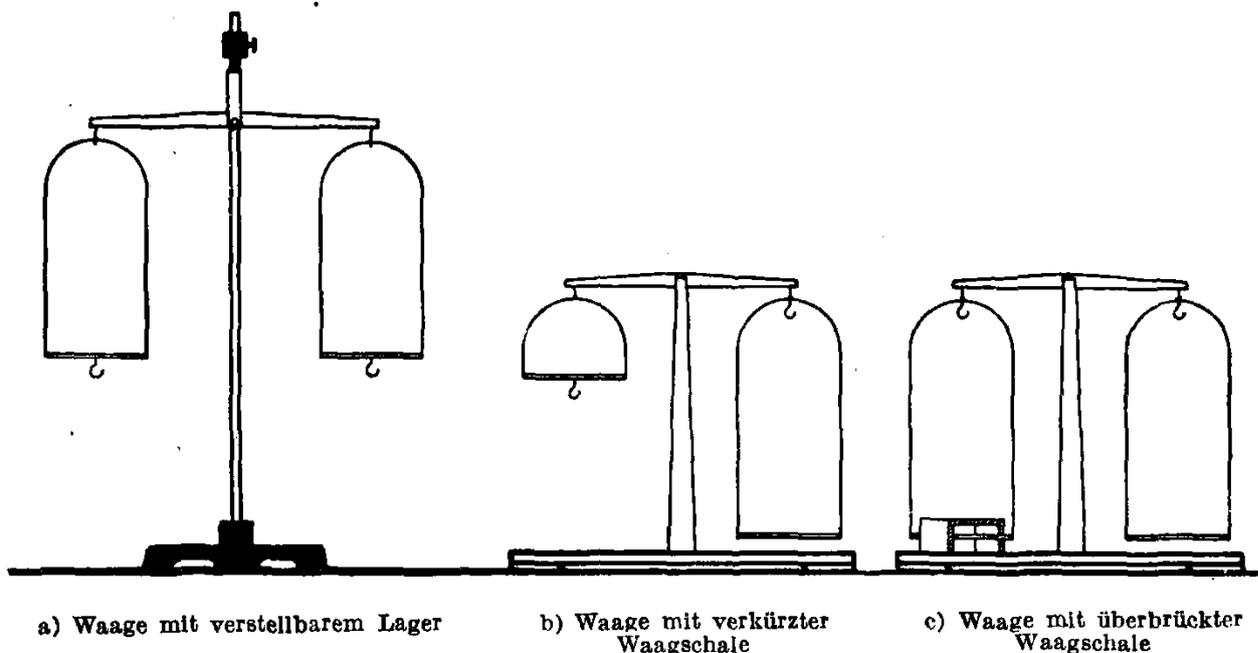


Abb. 10/1. Waagen zur Durchführung hydrostatischer Versuche — Hydrostatische Waagen

das Volumen des eingefüllten Wassers infolge der Oberflächenspannung auch größer als das Volumen des Hohlraums sein kann. Es sind im Buche Versuche angegeben, die das Ziel mit einfacheren Hilfsmitteln einwandfrei erreichen (V 42, V 43, V 44).

Auf das Bestimmen der *Wichte* und der *Dichte* und ihre begriffliche Unterscheidung ist besonderer Wert zu legen. Die *Wichte* und die *Dichte* sind dimensionierte Größen und sind streng voneinander zu unterscheiden, obwohl sie zahlenmäßig fast genau übereinstimmen. Der Begriff der *Wichte* ist an das Gewicht, der Begriff der *Dichte* an die Masse gebunden. Infolgedessen handelt es sich bei allen Berechnungen, die auf einer Gewichtsermittlung beruhen, um *Wichte*bestimmungen. Dies ist insbesondere bei allen Auftriebsuntersuchungen der Fall. Daher wird im Buch bei diesen Versuchen stets von Bestimmungen der *Wichte* gesprochen. Allerdings schließen sie die *Dichte*bestimmungen mit ein, worauf in V 36, Bemerkung 2, besonders hingewiesen wird. Dessen unbeschadet wird man sich aber in der Grundschule zur Vermeidung von begrifflichen Verwechslungen ausschließlich auf die *Wichte* beschränken. In der Oberschule dagegen ist eine Parallelbehandlung beider Begriffe angebracht. Bemerkung 3 des V 36 zeigt eine Möglichkeit, wie man unter Zugrundelegung des *Newtonschen Kraftgesetzes* auch unmittelbar zum *Dichte*begriff gelangen kann, ohne den Umweg über die *Wichte* zu machen.

6. Es gehört zu den selbstverständlichen Forderungen an einen methodisch gut angelegten Unterricht, daß auch die Einführung in die für die polytechnische Bildung so wichtigen *Wasserkraftmaschinen* nach Möglichkeit experimentell an Hand von Modellen erfolgt und sich nicht allein auf das Vorzeigen von Zeichnungen beschränkt. Es werden für diesen Zweck von der Lehrmittelindustrie Modelle verschiedener Art zur Verfügung gestellt. Aus Blech gefertigte Modelle von ober- und unterschlächtigen Wasserrädern sind in vielen Schulen vorhanden. Auch einfache aus Metall und Glas gefertigte Turbinenmodelle, die an die Wasser-

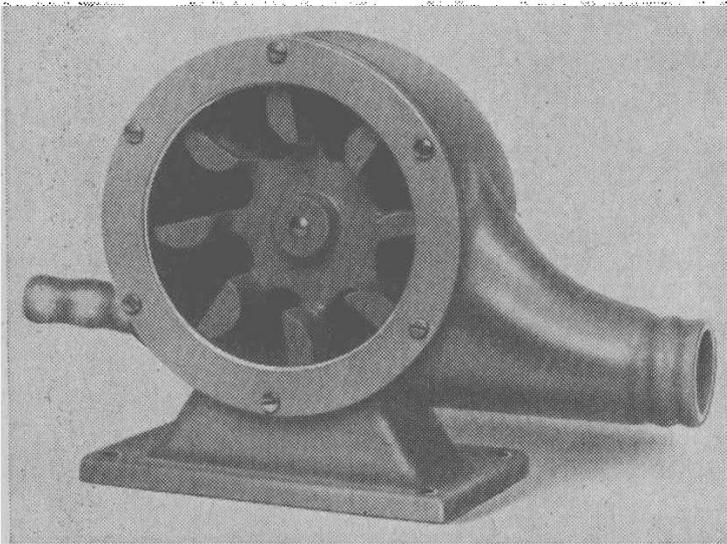


Abb. 11/1. Modell einer Freistrahlturbine

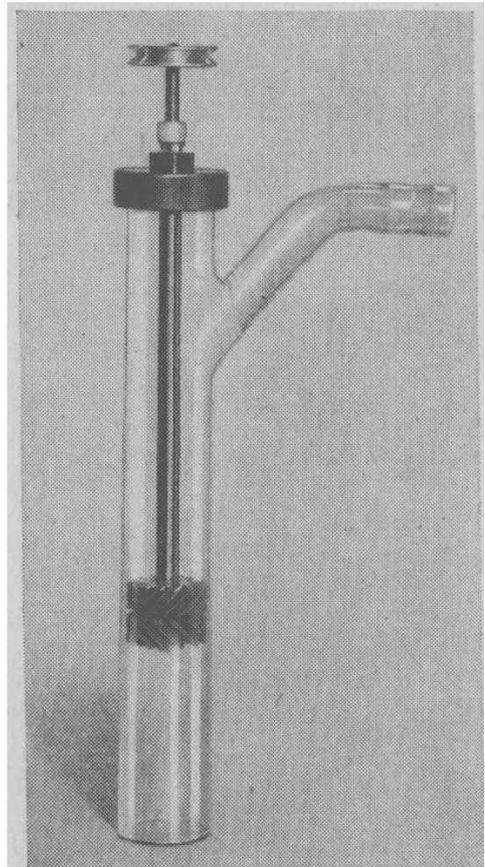


Abb. 11/2. Modell einer Reaktionsturbine

leitung angeschlossen werden, sind hier und da anzutreffen. Meist handelt es sich dabei um Modelle einer Freistrahlturbine (Pelton-Turbine — Abb. 11/1) und einer Reaktionsturbine (Abb. 11/2). Wo solche Modelle fehlen, sollte man sie durch Schüler in technischen Arbeitsgemeinschaften selbst anfertigen lassen. Einige Sperrholztafeln oder andere dünne Holzscheiben und etwas Blech, wobei sich Konservendosenblech

gut verwenden läßt, bilden die leicht zu beschaffenden Werkstoffe. In § 6 sind einige Anleitungen zum Bau solcher Modelle gegeben. Doch wollen die Anweisungen nur als Vorschläge aufgefaßt sein, die sich allerdings bewährt haben. Selbstverständlich besteht durchaus die Möglichkeit, diese Vorschläge noch nach manchen Richtungen hin abzuändern und zu verbessern. Der eigenen Initiative ist dabei ein weiter Spielraum gelassen.

## § 2. FLÜSSIGKEITEN MIT FREIER OBERFLÄCHE — VERBUNDENE GEFÄSSE

### 1. Prüfen von Gestalt und Lage der freien Oberfläche einer Flüssigkeit durch Visieren [G — Ü]

Großes Becherglas oder Glastrog (Aquarienglas), Unterlegklotz, Stativ, Federklammer.

Ein großes Becherglas oder ein Glastrog (Aquarienglas) wird auf eine waagerechte Tischplatte gestellt und mit Wasser gefüllt. Man visiert genau über die Oberfläche des Wassers und markiert die Blickrichtung durch eine Federklammer, die man an den Stab eines auf den Tisch gestellten Stativs klemmt. Es empfiehlt sich, den oberen Rand der Federklammer auf die Wasseroberfläche einzustellen. Bei einer Wiederholung des Versuchs in einer beliebigen anderen Blickrichtung behält die Federklammer ihre Höhenlage bei. Die Wasseroberfläche ist demnach

der Tischplatte parallel, sie ist eine Ebene. Dabei ist vorausgesetzt, daß die Tischplatte selbst waagrecht steht.

Stellt man das Glasgefäß durch einen untergestellten Holzklötzchen schräg, so zeigt ein entsprechender Versuch wieder die waagerechte Lage der Oberfläche des Wassers (Abb. 12/1).

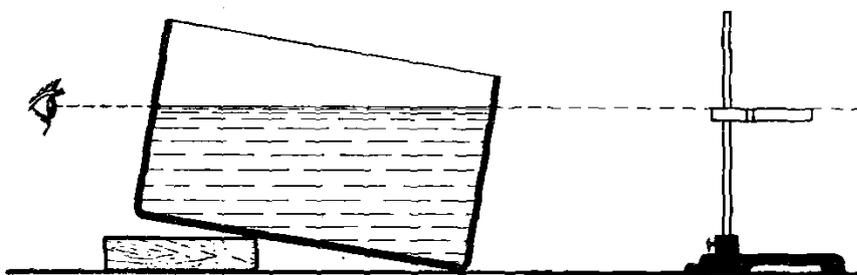


Abb. 12/1. Prüfen von Gestalt und Lage der freien Oberfläche einer Flüssigkeit durch Visieren

*Bemerkung:* Die waagerechte Lage der Tischplatte kann hier mit einer Wasserwaage nicht geprüft werden. Denn bei ihr wird als Hilfsmittel Wasser verwendet, dessen Eigenschaften aber erst untersucht werden sollen. Die Prüfung erfolgt in primitiver Weise mittels einer Kugel. Die Tischplatte ist waagrecht, wenn eine an beliebiger Stelle aufgelegte Kugel nicht fortrollt.

## 2. Prüfen von Gestalt und Lage der freien Oberfläche einer Flüssigkeit durch Abtasten [G – Ü]

Glasgefäß, Stativ, Querstab, 2 Muffen, zugespitzter Holzstab oder Glasstab, Unterlegklötzchen.

Ein Glasgefäß wird wie bei V 1 auf eine waagerechte Tischplatte gestellt und mit Wasser gefüllt. An einem Stativ wird ein waagerechter Querstab befestigt. Dieser hält in senkrechter Lage einen Holz- oder Glasstab, der die Oberfläche des Wassers gerade berührt (Abb. 12/2). An diesem Befund wird nichts geändert, wenn das Stativ verschoben wird.

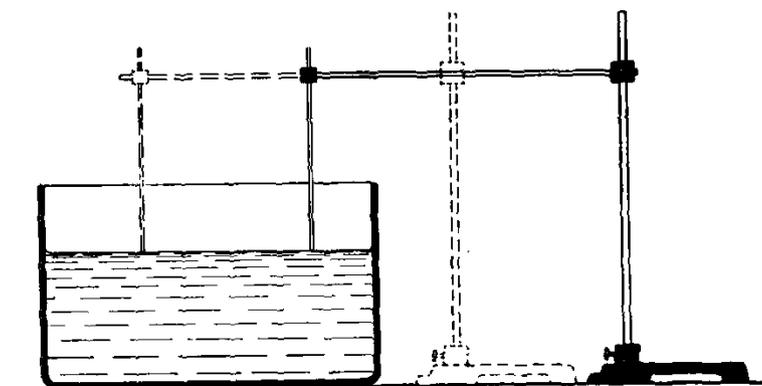


Abb. 12/2. Prüfen von Gestalt und Lage der freien Oberfläche einer Flüssigkeit durch Abtasten

Es ergeben sich auch bei schräg gestelltem Gefäß dieselben Folgerungen wie bei V 1. Die Tischplatte selbst muß waagrecht liegen.

## 3. Beständigkeit der Größe des Rauminhaltes beim Umgießen einer Flüssigkeit [G]

Hohlmaße aus Blech (0,5 l, 1 l), verschiedene Meßzylinder (100 ml, 200 ml, 500 ml), Bechergläser, Kochflaschen, Glastrog und andere Gefäße.

Verschiedene Flüssigkeitsmengen werden abgemessen und in Bechergläser, Kochflaschen, Standzylinder und andere graduierte und nichtgraduierte Gefäße um-

gegossen. Es wird festgestellt, daß sich der Rauminhalt dabei nicht ändert. Von dem geringen Flüssigkeitsverlust, der beim Umgießen durch Adhäsion an der Gefäßwand eintritt, wird abgesehen. Gefäße gut austropfen lassen!

Nützlich ist ein Hinweis auf die mannigfachen Formen des von der Flüssigkeit erfüllten Raumes, die sich bei Lageveränderungen der Gefäße ergeben. Vgl. V I 7 und V I 18, 2!

#### 4. Flüssigkeitsmodelle [G, O]

Glastrog, kleine Kieselsteine, Glas- oder Bleischrot, trockener feiner Sand, Erbsen, Mohnkörner, Bärlappsporen (Lykopodium), Blütenstaub der Hasel oder der Kiefer, kleine magnetische Stahlkugeln, Sanduhr, zugespitztes Holzstäbchen.

In V I 41 ist bereits beschrieben, in welcher Weise man mit den angegebenen körnigen Substanzen eine Flüssigkeit modellmäßig veranschaulichen kann. Zur Ergänzung sei noch auf folgende Versuchsmöglichkeiten hingewiesen: Schüttet man einen dieser Stoffe in ein Gefäß, so kann man durch Rütteln eine annähernd waagerechte Oberfläche herstellen. Stößt man einen angespitzten Holzstab hinein, so fühlt man, daß die Teilchen um so leichter ausweichen, je kleiner sie sind. Hält man eine mit Lykopodium oder Blütenstaub gefüllte Flasche schräg und dreht sie langsam um ihre Achse, so stellt sich fast von selbst eine waagerechte Oberfläche des Inhaltes her. Die einzelnen Körnchen gleiten wie auf einer schiefen Ebene herab und füllen vorhandene Vertiefungen aus, bis die Oberfläche waagrecht ist. Auf der Grundlage dieses Versuches läßt sich die waagerechte Oberfläche einer Flüssigkeit erklären.

*Bemerkungen:*

1. Beachte die Bemerkung zu V I 41!
2. Sporen und Blütenstaub bewahrt man am besten in Pulverflaschen auf.

#### 5. Schauversuch zur Unveränderlichkeit des Wasservolumens [G]

Glasrohr ( $\varnothing$  10... 15 mm, Länge 250... 300 mm), 2 gutsitzende zylindrische Korke, dicker in das Rohr passender Holzstab, gefärbtes Wasser.

Wie bei V I 19 wird der eine Korken in die Röhre etwa bis zu ihrer Mitte hineingestoßen. Man füllt den einen Röhrenteil mit gefärbtem Wasser und verschließt ihn durch den anderen Korken. Drückt man diesen mittels des Holzstabes in die Röhre hinein, so verschiebt sich die Flüssigkeitssäule, ohne daß eine Änderung ihrer Länge zu beobachten ist. Der Versuch zeigt als Vorversuch, daß bei den verwendeten Druckkräften eine Zusammendrückbarkeit des Wassers nicht festzustellen ist.

*Bemerkungen:*

1. Zur Verbesserung ihrer Elastizität sind die Korke vor dem Gebrauch längere Zeit zu kochen.
2. Beachte Bemerkung 1 zu V I 19!

## 6. Ausdehnung des Wassers bei Druckentlastung [O]

Kochflasche mit durchbohrtem Stopfen, doppelt rechtwinklig gebogenes Kapillarrohr ( $\varnothing$  1 mm), kleines Becherglas, gefärbtes ausgekochtes Wasser, Luftpumpe mit Teller, großer Rezipient, mehrere Holzklötzchen.

Die Zusammendrückbarkeit des Wassers läßt sich mit den im Schulunterricht in der Regel zur Verfügung stehenden Mitteln nicht zeigen. Ihre Demonstration erfordert ein von *Oersted* angegebenes besonderes Gerät, ein Piezometer. Man kann aber umgekehrt die Ausdehnung des Wassers bei Druckentlastung durch den im folgenden beschriebenen Schulversuch nachweisen.

Ein Glaskolben wird mit ausgekochtem, gefärbtem Wasser gefüllt und mit einem durchbohrten Stopfen verschlossen. Durch die Bohrung führt man ein doppelt rechtwinklig gebogenes, 1 mm weites Kapillarrohr, dessen waagerechter Schenkel etwa 70 mm lang ist (Abb. 14/1). Man paßt die Kapillare so in den Stopfen, daß die Flüssigkeit im waagerechten Schenkel dicht hinter dem Knick des Rohres steht. Die Vorrichtung wird unter den Rezipienten einer Luftpumpe gestellt, wobei man die Zuführung zur Pumpe durch Unterlegen einiger Klötzchen frei hält. Unter die Ausflußröhre stellt man ein kleines Becherglas, um auf jeden Fall zu verhindern, daß ausfließendes Wasser in die Pumpe gelangt.

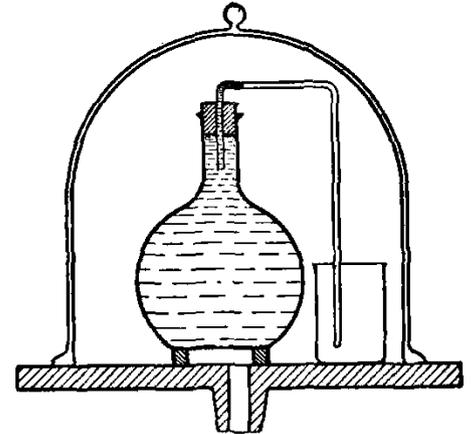


Abb. 14/1. Nachweis der Volumelastizität des Wassers bei Druckverminderung

Beim Auspumpen beobachtet man ein Vorrücken des Flüssigkeitsfadens in der Kapillare. Das Volumen des Wassers hat sich demnach bei der Druckverminderung vergrößert. Wenn man wieder Luft einläßt, geht die Flüssigkeit auf den alten Stand zurück. Wasser verhält sich somit bei Druckänderungen hinsichtlich seines Volumens wie ein elastischer Körper.

### Bemerkungen:

1. Der beschriebene Versuch kann nur als ein Schauversuch gewertet werden. Er zeigt, daß die relative Volumänderung einer Wassermenge bei der Druckentlastung von etwa 1 at sehr gering ist. Für genaue Versuche ist ein Piezometer erforderlich, das Schulen kaum zur Verfügung steht. Versuche mit einem Piezometer haben ergeben, daß die Zusammendrückbarkeit des Wassers von dem Anfangsdruck und der Temperatur abhängt. Bei einem Druck von 50 at und bei einer Temperatur von  $20^{\circ}\text{C}$  läßt sich 1 l Wasser um 48,3 ml zusammendrücken.
2. Voraussetzung für das eindeutige Gelingen des Versuches ist, daß das Wasser durch Auskochen von Luft befreit ist und daß beim Verschließen der Flasche mit dem durchbohrten Stopfen nicht die geringste Luftmenge mit eingeschlossen wird.

## 7. Standzylinder mit eingetauchtem Glasrohr als Beispiel verbundener Gefäße [G]

Standzylinder, Glasrohr.

Taucht man ein Glasrohr in einen mit Wasser gefüllten Standzylinder, so steht das Wasser im Rohr ebenso hoch wie im Zylinder. Das Rohr bildet mit dem

Zylinder ein einziges Gefäßsystem mit zwei Zylinderflächen als Wandungen. In diesem Gefäßsystem ist die freie Oberfläche des Wassers eine waagerechte Ebene.

Der Versuch ist als Vorversuch zur Behandlung der verbundenen Gefäße geeignet.

*Bemerkung:* Das Rohr muß so weit sein, daß die Beobachtungen nicht durch Kapillarkwirkungen gestört werden.

### 8. Flüssigkeitsstand in zwei durch einen Schlauch verbundenen Röhren [G, O]

- \* 2 gleich weite, gerade, an einem Ende mit einer Schlaucholive versehene Glasröhren ( $\varnothing$  etwa 15 mm, Länge etwa 500 mm), großer Glastrichter oder Trichterrohr aus einem Kippschen Apparat, Kugelrohr, Schlauch.

In zwei gleich weite, durch einen Gummischlauch verbundene Glasröhren mit einem Durchmesser von etwa 15 mm füllt man gefärbtes Wasser. Luftblasen werden durch Drücken auf den Schlauch und durch wiederholtes Heben und Senken der Röhren entfernt. Die Wasserspiegel in den beiden Röhren liegen stets in einer waagerechten Ebene unabhängig von der Lage des Schlauches und der Neigung der Röhren, auch wenn man die Röhren gegeneinander kreuzt (Abb. 15/1a bis c). Dasselbe gilt, wenn man eine Röhre oder beide durch Trichter oder irgendwie geformte Röhren ersetzt (Abb. 15/1d und e).

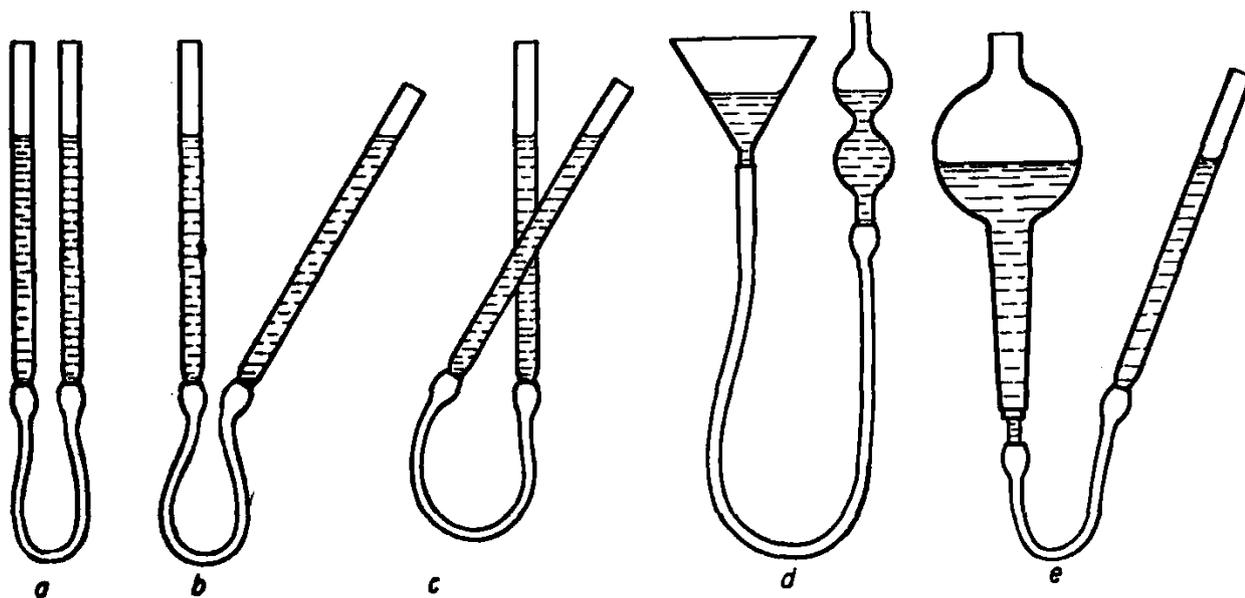


Abb. 15/1

Verschiedene Formen und Stellungen beweglich verbundener Röhren als Beispiele verbundener Gefäße

Die so entstandenen Gefäße kann man als ein einziges Gefäß mit freier Oberfläche ansehen, in welchem der Wasserspiegel waagrecht steht.

*Bemerkung:* Vgl. V 7, Bemerkung!

## 9. Flüssigkeitsstand in einem in Wasser eingetauchten, mit einer Öffnung versehenen U-Rohr [G, O]

U-Rohr ( $\varnothing$  20 mm, Schenkellänge etwa 160 mm), Glastrog (Aquarienglas).

Man versieht ein U-Rohr an seiner Biegung mit einer kleinen Öffnung. Das so vorbereitete Rohr wird in ein mit Wasser gefülltes Gefäß getaucht (Abb. 16/1). Das Wasser dringt durch die Öffnung und steht in beiden Schenkeln in der Höhe des äußeren Wasserspiegels, wie man das U-Rohr auch halten mag.

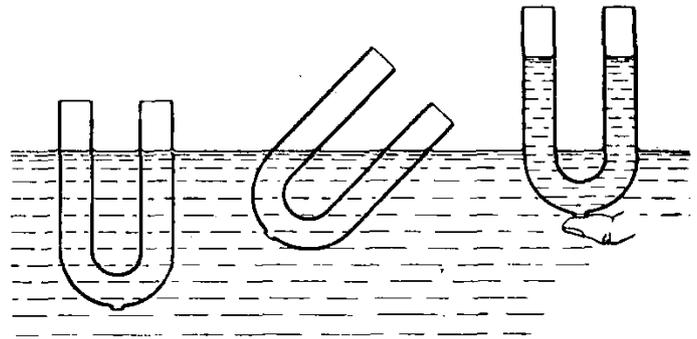


Abb. 16/1. Flüssigkeitsstand in einem mit seitlicher Öffnung versehenem U-Rohr

Verschließt man die untere Öffnung mit dem Finger und hebt das U-Rohr heraus, ohne seine Lage zu ändern, so bleibt der Wasserstand in beiden Schenkeln erhalten. Neigt man das Rohr nachträglich, so stellen sich die Oberflächen in beiden Schenkeln bei jeder Lage immer wieder in ein und dieselbe waagerechte Ebene ein.

*Bemerkung:* Der Versuch zeigt im Prinzip dasselbe wie V 7. Er wirkt aber anregend durch die besondere Anordnung, da die in dem Rohr befindliche Flüssigkeit einen Ausschnitt aus einer größeren Wassermenge darstellt. Hierdurch wird die Möglichkeit geboten, das Gesetz der verbundenen Gefäße ohne Bezugnahme auf den Druck verständlich zu machen.

## 10. Schauversuch zur Erklärung der Wirkungsweise verbundener Gefäße [G]

Glaskrog (Aquarienglas), Brett von der Breite des Troges, Tuchstreifen, in Wasser unlöslicher Klebstoff.

Bei dem Versuch wird ein mit Wasser gefülltes, quaderförmiges Gefäß durch ein eingeschobenes Brett von der Breite des Gefäßes in zwei Räume geteilt, die nur am Boden des Gefäßes in Verbindung stehen (Abb. 16/2). Um das Brett an den Seiten gegen die Gefäßwände abzudichten, klebt man Tuchstreifen mittels eines in Wasser unlöslichen Klebstoffes auf die Schnittflächen des Brettes. Es zeigt sich, daß das Wasser bei jeder Stellung des Brettes, auch bei Schräglage, in den beiden Gefäßräumen gleich hoch steht.

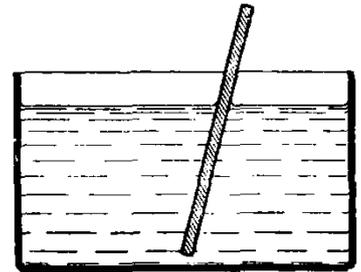


Abb. 16/2. Schauversuch zur Wirkungsweise verbundener Gefäße

*Bemerkung:* Vgl. V 9, Bemerkung!

## 11. Modell eines Wasserstandsanzeigers [G]

Hoher Standzylinder mit 3 übereinanderliegenden seitlichen Tuben, 3 einfach durchbohrte Korken, doppelt gewinkeltes Glasrohr, einfach gewinkeltes Glasrohr, kurzes gerades Glasrohr, Verbindungsschlauch, Schraubhahn, Wasserleitungsschlauch, Stativ mit Muffe und Klemme.

Als Wasserbehälter, der mit einem Wasserstandsanzeiger zu versehen ist, verwendet man einen hohen Standzylinder mit 3 übereinanderliegenden seitlichen

Tuben, wie er in V 32 für den Nachweis der Seitendruckkräfte benutzt wird. Man stellt zwischen den beiden oberen Tuben eine Verbindung her, indem man ein doppelt gewinkeltes Glasrohr mittels zweier einfach durchbohrter Korke in die Tuben einführt. Der Achsenabstand der beiden Schenkel des Verbindungsrohres muß genau gleich dem Mittelpunktsabstand der beiden oberen Tuben sein.

An den unteren Tubus schließt man durch ein

kurzes, in einem Korke steckendes Glasrohr einen Abflußschlauch an, über den man einen Schraubhahn klemmt; dem Zylinder führt man oben Wasser von der Wasserleitung her zu (Abb. 17/1). Den Abfluß regelt man durch Verstellen des Schraubhahnes so, daß sich der Wasserstand im Zylinder zwischen die beiden oberen Tuben einstellt und annähernd unverändert bleibt. Das die beiden oberen Tuben verbindende Glasrohr wirkt als Wasserstandsanzeiger.

Man kann die Wirkung des Versuches noch dadurch erhöhen, daß man den Standzylinder durch eine davor gestellte Pappscheibe verdeckt.

*Beispiele für die praktische Verwendung verbundener Gefäße:*

Gießkanne (Modell einer Gießkanne siehe Abb. 17/2), Kaffeekanne mit tief angesetztem Ausgußrohr, Teekessel, Wasserleitung, Wasserstandsgläser an Dampfkesseln und Flüssigkeitsbehältern, Gärverschluß, Geruchsverschluß bei Abwasserleitungen (Siphon oder Trap).

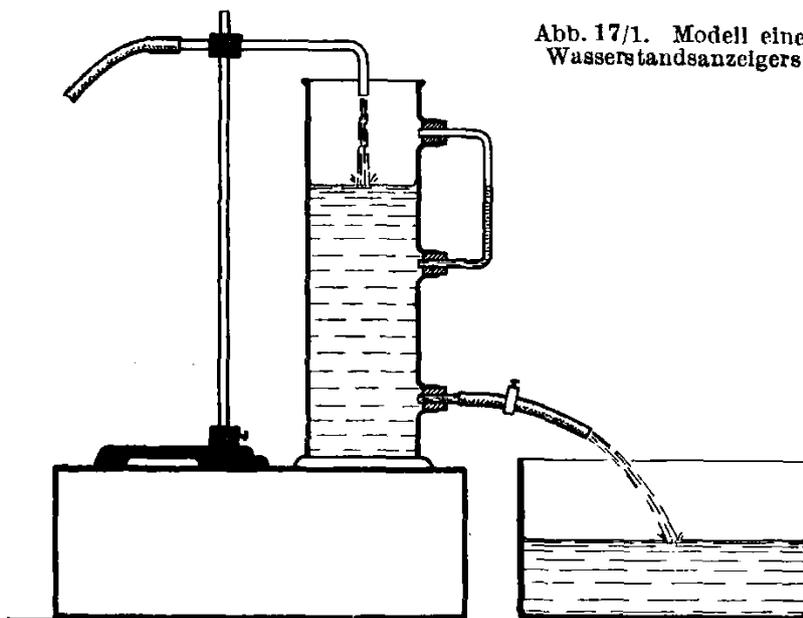


Abb. 17/1. Modell eines Wasserstandsanzeigers

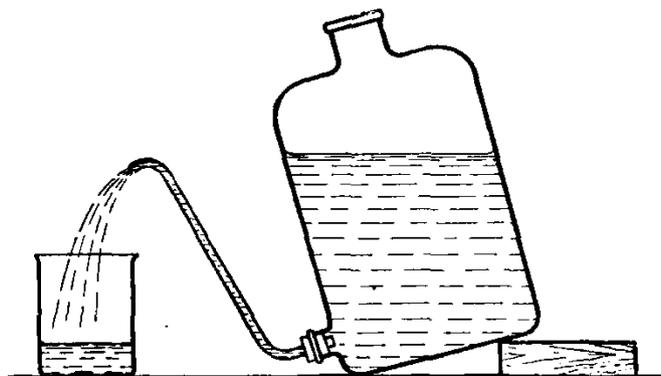


Abb. 17/2. Modell einer Gießkanne, hergestellt aus einer Abklärflasche

## 12. Modell einer Schlauchwaage [G, O]

2 rechtwinklig gebogene Röhren ( $\varnothing$  10 mm, Schenkellängen 90 mm und 200 mm), 2 Klötze (20 mm  $\times$  50 mm  $\times$  70 mm), 4 Leisten (10 mm  $\times$  20 mm  $\times$  70 mm), 2 Brettchen (10 mm  $\times$  30 mm  $\times$  50 mm), Blei zum Beschweren, langer Gummischlauch, gefärbtes Wasser, 2 Unterlegklötze (Höhe 50 mm und 100 mm), 2 Federklammern; 2 gleiche tubulierte Flaschen, 2 durchbohrte Korke, 2 Glasröhren.

Zwei rechtwinklig gebogene Röhren mit den angegebenen Abmessungen werden mit den kurzen Schenkeln auf zwei bleibeschwerten Holzklötzchen nach Abb. 18/1

unter Verwendung von Leisten und Brettchen befestigt. Es ist zweckmäßig, die Fugen mit Siegelack auszufüllen. Die Röhren werden durch einen langen Gummischlauch verbunden und mit gefärbtem Wasser etwa bis zur Hälfte gefüllt. Luftblasen werden dadurch ausgetrieben, daß man das eine Rohr hebt, während man das andere mit dem Finger verschließt. Das so hergerichtete Modell einer Schlauchwaage stellt man auf eine waagerechte Tischplatte und markiert die Höhen der Wassersäulen durch Federklammern. Legt man einen Klotz unter das eine Rohr, so sinkt in ihm der Wasserspiegel um die Hälfte der Höhe des Klotzes, während er in dem anderen um den gleichen Betrag steigt (Abb. 18/2). Mit einer Schlauchwaage kann man den Höhenunterschied zwischen zwei Stellen benachbarter Räume messen, auch wenn die Meßstellen weit voneinander entfernt sind und eine unmittelbare Sicht zwischen ihnen nicht besteht.

*Bemerkung:* An Stelle der Winkelröhren kann man auch zwei gleiche Flaschen mit seitlichen Tuben verwenden, beispielsweise zwei Trockenflaschen, wie man sie im Chemieunterricht gebraucht. In die Tuben werden dann durchbohrte Korken mit kurzen Glasröhren eingesetzt. Den Wasserstand liest man an aufgeklebten Teilungen ab, die am Boden beginnen und die man zweckmäßigerweise mit abwechselnd weißen und schwarzen Feldern von Zentimeterbreite versieht.

*Verwendung der Schlauchwaage:* Ausrichten von Wellenlagern, Grundungsarbeiten beim Fundamentieren eines Gebäudes.

### 13. Modell einer Kanalwaage [G, O]

Glasrohr ( $\varnothing$  10 mm, Länge 1000 mm, an den Enden rechtwinklig umgebogen), Stativ mit Muffe und Klemme, gefärbtes Wasser.

Aus einer etwa 1000 mm langen Glasröhre, die man an den Enden mit einer Schenkellänge von etwa 200 mm winklig umbiegt, fertigt man ein Modell einer Kanalwaage (Abb. 19/1). Die Röhre wird in der Mitte mit Hilfe eines Stativs so gelagert, daß sie um eine waagerechte Achse drehbar ist. Sie wird mit gefärbtem Wasser bis zur halben Höhe der Schenkel gefüllt. Beim Visieren über die beiden

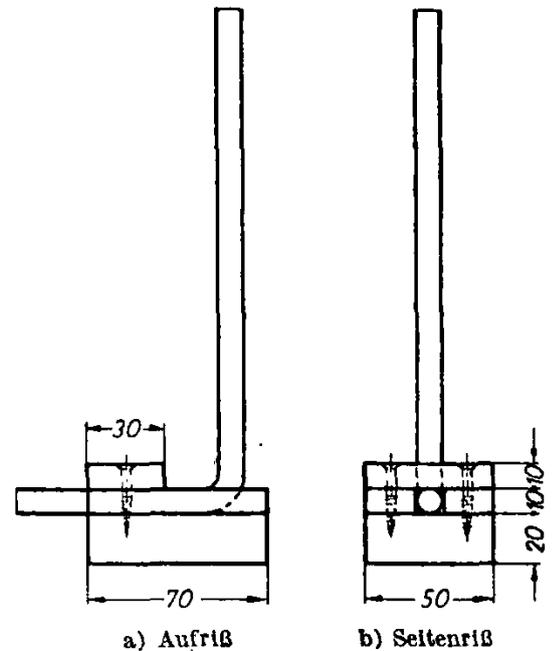


Abb. 18/1. Meßrohr zum Modell einer Schlauchwaage

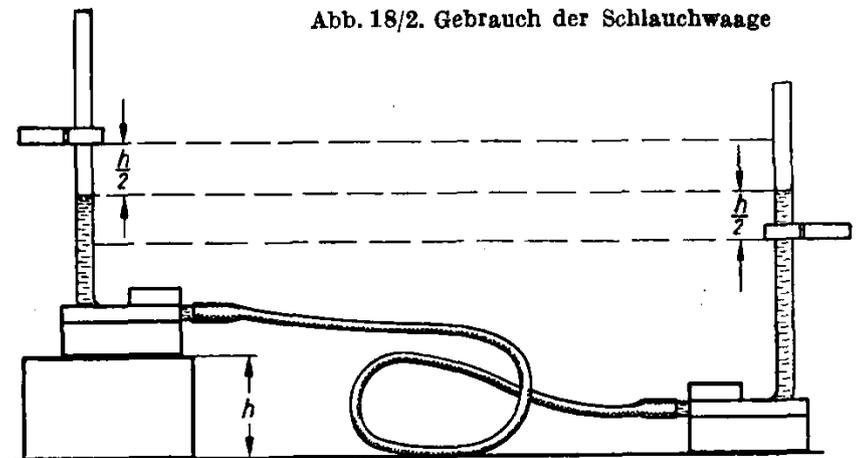


Abb. 18/2. Gebrauch der Schlauchwaage

Flüssigkeitsspiegel ergibt sich stets eine waagerechte Blicklinie.

*Verwendung der Kanalwaage als einfaches Nivelliergerät bei Erdarbeiten.*

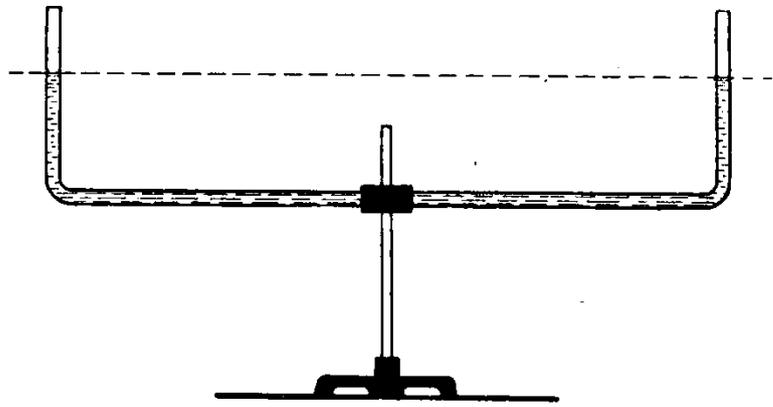


Abb. 19/1. Modell einer Kanalwaage

#### 14. Modell einer Röhrenlibelle [G, O – Ü]

Glasrohr ( $\varnothing$  10 mm, Länge 650 mm), Holzleiste (700 mm  $\times$  60 mm  $\times$  25 mm), 2 Gummistopfen zum Verschließen des Glasrohrs, 2 aus Blechstreifen gebogene Rohrschellen, 4 Holzschrauben, schwach keilförmiges Holzstückchen (25 mm  $\times$  5 mm  $\times$  5 mm), mit Fuchsin rotgefärbter Brennspritus, Millimeterpapier (25 mm  $\times$  200 mm), Klebstoff, Glasstreifen (etwa 20 mm  $\times$  40 mm  $\times$  2,5 mm).

##### 1. Herstellen des Libellenmodells [G, O]

Man füllt ein einseitig verschlossenes, 650 mm langes weites Glasrohr bis etwa 10 mm unterhalb der Rohröffnung mit gefärbtem Brennspritus. Die Öffnung wird mit einem Gummistopfen verschlossen. Neigt man das Rohr, bis es eine annähernd waagerechte Lage einnimmt, so bewegt sich die zwischen Flüssigkeit und Gummistopfen eingeschlossene Luft als Luftblase nach der Mitte des Rohres hin. Durch Herausziehen oder Hineinschieben des Gummistopfens bringt man die Länge der Blase auf etwa 40 mm.

Das Rohr wird an den Enden mittels zweier aus Blechstreifen gebogener Rohrschellen und einiger Holzschrauben auf einer etwa 700 mm langen Holzleiste befestigt. In der Mitte zwischen beiden Schellen drückt man einen etwa 5 mm breiten und 5 mm starken Holzkeil unter die Glasröhre. Das Rohr wird dadurch etwas gebogen (Abb. 19/2).



Abb. 19/2. Modell einer Röhrenlibelle

##### 2. Justieren der Röhrenlibelle [G, O]

Zum Justieren legt man die Libelle auf einen annähernd horizontalen Tisch, schiebt einen etwa 200 mm langen Papierstreifen zwischen den Keil und die Holzleiste und klebt ihn an die Holzleiste. Man markiert die Lage des linken Blasenrandes auf dem Papier. Dann dreht man die Libelle in der Horizontalebene um  $180^\circ$  und markiert die Lage des gleichen Randes von neuem. Die Mitte zwischen beiden Strichen gibt die Mittelstellung des linken Blasenrandes an. Von diesem Punkte aus trägt man nach der Blasenlänge ab. Man markiert ihre Enden und die Blasenmitte durch Querstriche. Von den Endstrichen aus werden, wie es bei Röhrenlibellen üblich ist, nach links und nach rechts weitere Striche im Abstand von 2 mm auf das Papier aufgetragen.

### 3. Bestimmen der Empfindlichkeit der Libelle [O]

Man legt die justierte Libelle auf den Tisch und stellt die Lage eines Blasenrandes fest. Unter die eine Schmalseite der Holzleiste wird ein Karton-, Blech- oder Glasstreifen geschoben, dessen Dicke man vorher mittels einer Feinmeßschraublehre (Mikrometerschraube) gemessen hat. Die durch die Neigung der Libelle veränderte Lage der Luftblase wird nach Teilstrichen gemessen.

Die Größe des Neigungswinkels berechnet man mit Hilfe des Sinuswertes aus der Dicke des untergelegten Streifens und der Länge der Holzleiste (Abb. 20/1). Die Empfindlichkeit ist gleich der Winkeländerung je Teilstrich.

*Beispiel:*

Dicke des untergelegten Streifens  $d = 2,50 \text{ mm}$ , Länge der Libellenleiste  $l = 697 \text{ mm}$ , Verschiebung des Blasenrandes 13 Teilstriche, Anstellwinkel der Libellenleiste  $\alpha$ .

$$\sin \alpha = \frac{2,50}{697} = 0,00359, \text{ mithin } \alpha \approx 0,205^\circ.$$

Empfindlichkeit des Libellenmodells  $\left(\frac{0,205}{13}\right)^\circ \approx 0,016^\circ$  je Teilstrich.



Abb. 20/1. Berechnung der Empfindlichkeit einer Röhrenlibelle

## 15. Modell einer Dosenlibelle [G, O]

Kristallisierschale ( $\varnothing 100 \text{ mm}$ ), Uhrglas ( $\varnothing 88 \text{ mm}$ ), rotgefärbter Brennspritus (etwa 150 ml), Fensterkitt oder Kittifix, Pipette mit Saugball, Fließpapier, Zirkel, Ausziehtusche, Röhrenlibelle.

Man legt ein Uhrglas mit der Öffnung nach unten in eine Kristallisierschale und füllt die Schale etwa zu drei Vierteln mit rotgefärbtem Brennspritus. Das Uhrglas wird mit Hilfe eines Messers an einer Seite etwas angehoben und die Schale so geneigt, daß die Flüssigkeit in den zwischen dem Uhrglas und der Schale vorhandenen Hohlraum eintreten kann. Man läßt so viel Spiritus zufließen, bis die sich unter dem Uhrglas bildende Luftblase etwa die Größe eines 5-Pfennig-Stückes erreicht hat (Abb. 20/2). Mit einer Pipette wird der außerhalb des Uhrglases befindliche Spiritus abgesaugt und der Rest mit Fließpapier entfernt. Den Rand des Uhrglases dichtet man mit Fensterkitt oder mit einem in Spiritus nicht löslichen Klebemittel gegen den Boden der Kristallisierschale ab.

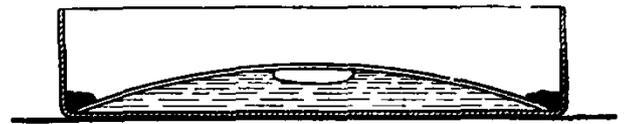


Abb. 20/2. Ein mit rotgefärbtem Brennspritus gefülltes Uhrglas als Dosenlibelle

Als Einstellmarke zeichnet man mit Ausziehtusche einen Kreis auf das Uhrglas. Zu diesem Zweck stellt man die Glasschale auf eine mit einer Röhrenlibelle waagrecht gerichtete Platte und klebt auf den Scheitelpunkt des Uhrglases ein kleines Stückchen Papier, dessen Durchmesser kleiner ist als der der Luftblase. Es dient als Gleitschutz für die Zirkelspitze. Auf dem Papierscheibchen wird der Mittelpunkt der Luftblase markiert und mit dem Zirkel ein Kreis entsprechend der Größe der Luftblase gezogen. Damit die Tusche am Glase haftet, wird an den Anfangspunkt des zu schlagenden Kreises mit einer gewöhnlichen Tuschfeder ein Tuschetöpfchen gebracht. Außerdem empfiehlt es sich, der Tusche zur Erhöhung der Haftfähigkeit etwas Büroleim zuzusetzen. Nachdem der Kreis gezogen und die Tusche getrocknet ist, wird das Papierstückchen wieder entfernt.

### § 3. DER KOLBENDRUCK IN EINER ALLSEITIG ABGESCHLOSSENEN FLÜSSIGKEIT – DIE DRUCKÜBERTRAGUNG

#### 16. Vorversuch zur Druckübertragung in einer Flüssigkeit [G]

Die gleichen Geräte wie bei V 5, außerdem ein gebogenes Glasrohr gleicher Weite mit geraden Schenkeln.

Wie bei VI 19 und bei V 5 wird eine gefärbte Wassersäule in einem Glasrohr zwischen zwei Korken abgesperrt. Sie läßt sich durch Druck mit dem Holzstab auf einen der beiden Verschlusskorken ohne Längenänderung hin- und herschieben. Der Versuch zeigt die Druckübertragung durch das eingeschlossene Wasser. Ein entsprechender Versuch mit einer gebogenen Röhre läßt erkennen, daß der Druck nicht nur in der Bewegungsrichtung des Stabes übertragen wird (Abb. 21/1).

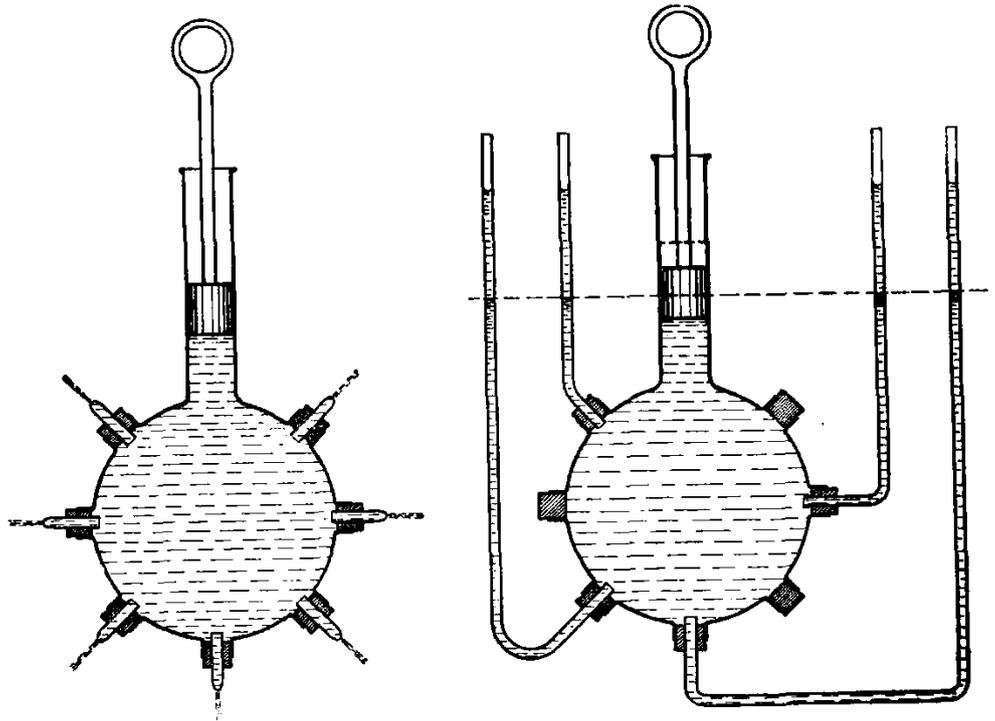
*Bemerkung:* Druckübertragung durch Flüssigkeiten findet man auch bei Lebewesen. So dient beim Wassergefäßsystem (Ambulakralsystem) des Seeigels und des Seesterns Druckwasser zur Betätigung der Saugfüßchen.



#### 17. Allseitige Druckübertragung in der Kugelspritze [G]

Kugelspritze, Eimer.

Die Kugelspritze besteht aus einem Glasrohr ( $\varnothing$  etwa 20 mm) mit angeblasener großer Kugel (Abb. 21/2a). Auf dieser sitzen zahlreiche Tuben zur Aufnahme von durchbohrten Stopfen. In diese werden Glasröhrchen mit zugespitzten Ausflußöffnungen eingesetzt. Bei manchen Kugelspritzen sind die Ausspritzdüsen unmittelbar an die Kugel ohne Zwischentuben angeschmolzen. Mittels eines Kolbens wird das Gerät wie eine gewöhnliche Spritze in einem Eimer vollständig mit Wasser gefüllt. Beim Hineindrücken des Kolbens



a) mit eingesetzten Spritzrohren

b) mit eingesetzten Manometern

Abb. 21/2. Kugelspritze

spritzt dann das Wasser nach allen Richtungen hin gleich stark aus den Öffnungen heraus.

Der Versuch zeigt, daß der im Innern der Kugel erzeugte Druck allseitig in gleicher Stärke wirksam ist.

*Bemerkungen:*

1. Man führt den Versuch am besten im Freien aus.
2. Die Öffnungen in den Spitzen müssen so eng sein, daß das Wasser nicht von selbst ausläuft.
3. [O] In die Bohrungen der Korken kann man an Stelle der Glasspitzen auch gebogene Glasrohre als offene Manometer einsetzen und damit die Gleichheit des Druckes veranschaulichen (Abb. 21/2b).

### 18. Druckübertragung durch einen wassergefüllten Gummischlauch [G]

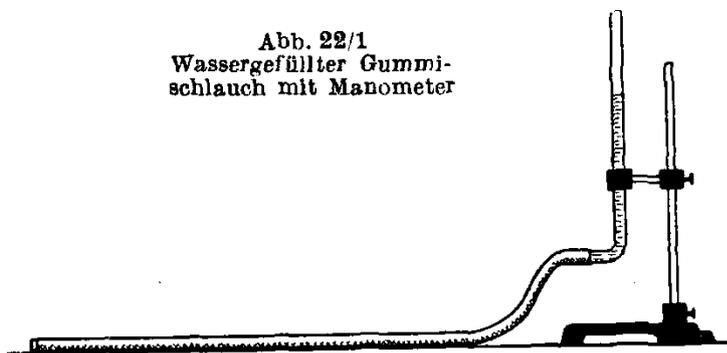
Gummischlauch (Länge etwa 2000 mm), Korken oder Quetschhahn, gewinkeltes Rohr (langer Schenkel 200 mm lang), Stativ mit Muffe und Klemme, gefärbtes Wasser.

Ein gewinkeltes Rohr wird so in ein Stativ gespannt, daß der lange Schenkel senkrecht steht. An den anderen wird ein langer Gummischlauch angeschlossen, dessen Ende durch einen Quetschhahn oder durch einen Korken verschlossen ist. Die Vorrichtung wird unter Vermeidung von Luftblasen (vgl. V 8 und V 12) mit Wasser gefüllt und der Schlauch auf den Tisch gelegt (Abb. 22/1). Drückt man auf den Schlauch an einer beliebigen Stelle, so zeigen die Schwankungen des Wasserstandes im Winkelrohr die Übertragung des Druckes an.

Dadurch, daß man in der Nähe des geschlossenen Endes mit einer Holzleiste gegen den Schlauch schlägt, kann man eine Druckwelle hervorrufen, die durch die gesamte im Schlauch befindliche Flüssigkeit hindurchläuft und am Manometer Schwankungen hervorruft. Man kann dadurch geradezu Morsezeichen übertragen.

Läßt man einige Schüler an den Tisch herantreten und den Schlauch behutsam mit den Fingerspitzen berühren, so werden die Zeichen durch die Schüler abgetastet.

Abb. 22/1  
Wassergefüllter Gummischlauch mit Manometer



### 19. Hydraulische Druckübertragung auf ein Druckgefäß mit offenem Manometer [O]

Zwei 1-l-Flaschen, ein doppelt und ein dreifach durchbohrter Korken, 2 offene Manometer mit 300 mm langen Schenkeln und vertikalem Anschlußrohr, T-Stück aus Glas, kurzes Glasrohr, 3 gewinkelte Glasröhren, Verbindungsschlauch (Länge 1000 mm), Druckballon aus Gummi mit Saug- und Druckventil, Quetschhahn.

Zwei 1-l-Flaschen werden durch einen Gummischlauch unter Verwendung zweier gewinkelter Glasröhren miteinander verbunden (Abb. 23/1). Beide Flaschen werden

etwa zur Hälfte mit Wasser gefüllt. Der Verbindungsschlauch muß ganz mit Wasser gefüllt sein und darf keine Luft enthalten. Die eine Flasche, im Bilde links, erhält einen doppelt durchbohrten, die andere einen dreifach durchbohrten Verschußstopfen. Beide Flaschen werden mit einem mit gefärbtem Wasser gefüllten offenen Manometer versehen. An die dritte Öffnung der rechten Flasche wird der Druckballon aus Gummi

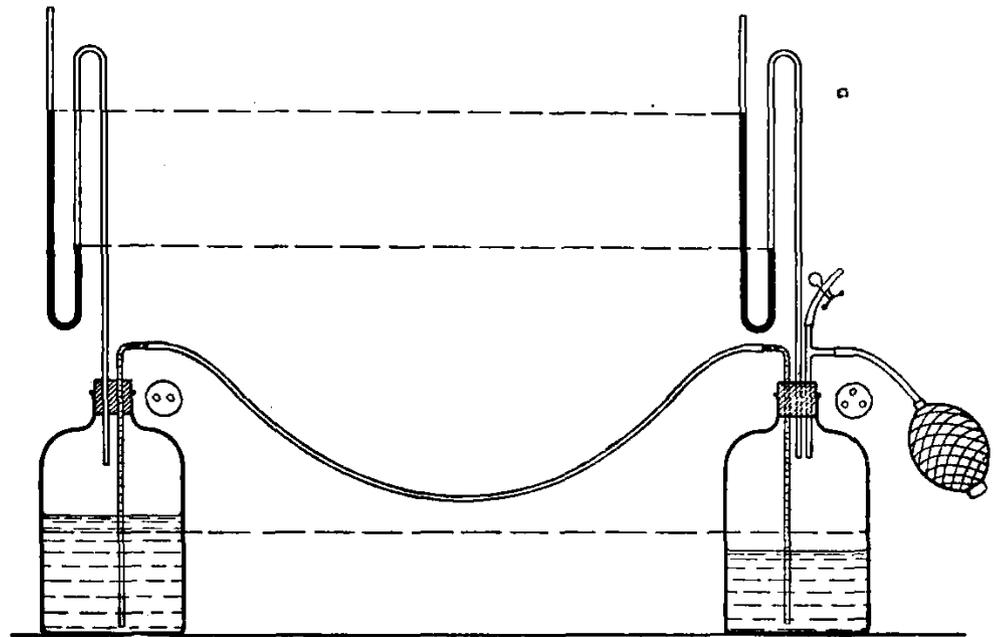


Abb. 23/1. Modellversuch einer hydraulischen Druckübertragung

angeschlossen. In seine Druckleitung wird ein gläsernes T-Rohr gelegt, dessen Querschlenkel durch ein mit einem Quetschhahn versehenes Schlauchstück verschlossen ist.

Setzt man die Luft in der an den Druckballon angeschlossenen Flasche unter Druck, so wird dieser durch das im Schlauch befindliche Wasser auf die andere Flasche übertragen. Die Manometer zeigen beide den gleichen Niveaunterschied. Nimmt man durch Lüften des Quetschhahns einen Druckausgleich vor, so geht der Manometerausschlag auf Null zurück.

*Bemerkungen:*

1. Sollte kein Druckballon vorhanden sein, so kann man sich behelfen, indem man das T-Stück durch ein kurzes Glasrohr ersetzt und an dieses einen Schlauch anschließt, durch den man in die Flasche bläst. Der Blasschlauch wird durch einen Quetschhahn geschlossen.
2. Der Versuch stellt modellartig eine hydraulische Kraftübertragung dar und vermittelt gleichzeitig das Verständnis für die Druckgleichheit in kommunizierenden Druckgefäßen.

*Technische Anwendungen der hydraulischen Kraftübertragung:* hydraulische Kraftwagenbremse, hydraulische Presse, hydraulischer Wagenheber.

## 20. Modellversuch zur Druckübertragung [G, O]

Holzklötz (150 mm × 150 mm × 100 mm) mit zwei sich kreuzenden zylindrischen Bohrungen (Ø 30 mm bzw. 40 mm), 4 in die Bohrungen passende Holzwalzen, Stahlkugeln.

Der Versuch ist dem *Lehrbuch der Experimentalphysik* von Bergmann und Schaefer entnommen. Er ist als Modellversuch vorzüglich geeignet, den Unterschied zwischen der Druckausbreitung in festen Körpern und der Druckausbreitung in einer Flüssigkeit zu zeigen.

*Versuchsordnung:*

Einen Holzklötz von den oben angegebenen Abmessungen mit quadratischen Grundflächen versieht man parallel zu diesen mit einer zylindrischen Bohrung,

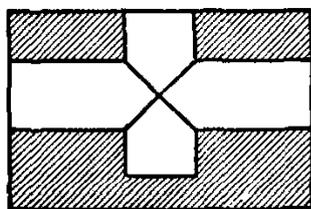
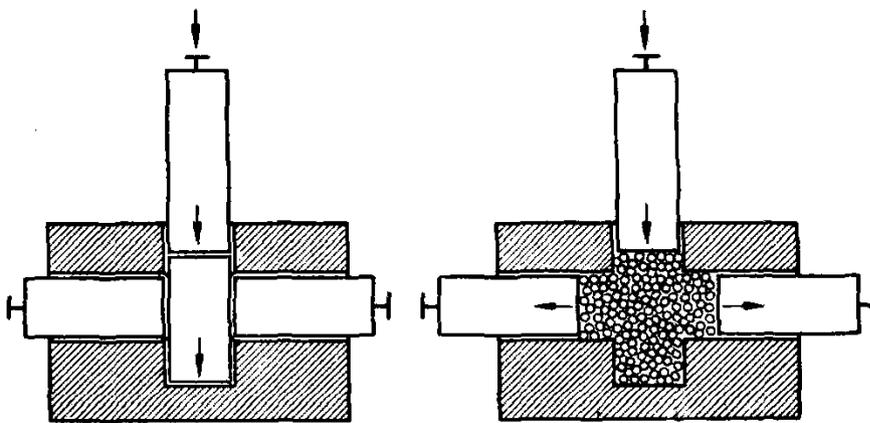


Abb. 24/1. Holzklotz mit zwei sich kreuzenden Bohrungen zur Aufnahme einer Modellflüssigkeit



a) Holzklotz mit fester Füllung. Die von außen ausgeübte Druckkraft wird nur in der Bewegungsrichtung des Stempels übertragen.

b) Holzklotz mit Stahlkügelchen gefüllt. Die Druckkraft wird auf die seitlichen Stempel übertragen.

Abb. 24/2. Holzklotz mit verschiebbaren Kolben zur Übertragung von Druckkräften in einer Modellflüssigkeit

deren Durchmesser etwa 30 mm beträgt. Die Bohrung durchsetzt den Holzklotz der ganzen Breite nach. Eine zweite Bohrung verläuft senkrecht zur Grundfläche und kreuzt die erste Bohrung. Sie hat nur eine Tiefe von etwa vier Viertel der Klotzhöhe und endet blind (Abb. 24/1). Ihren Durchmesser wählt man etwas größer als den der ersten Bohrung, etwa 40 mm. Die Innenwandungen der Bohrungen werden gut geglättet. Zu den Bohrungen passend werden vier in ihnen leicht verschiebbare zylindrische Kolben aus Holz angefertigt. Die zwei für die durchgehende Bohrung bestimmten Kolben sind nur halb so lang wie die Bohrung. An den nach außen gerichteten Grundflächen werden diese Kolben mit einem Griff versehen, damit man sie leicht herausziehen kann. Der dritte Kolben soll die Blindbohrung ganz füllen und noch etwas aus ihr herausragen. Der vierte Kolben ist eine Walze mit demselben Durchmesser, aber nur etwa der halben Länge wie der dritte Kolben, so daß sie die Blindbohrung nur zur Hälfte füllt.

#### Vorversuch:

Man legt den Klotz so auf den Tisch, daß die Blindbohrung senkrecht nach oben zeigt, und schiebt in diese die kurze Walze ein. In die waagrecht liegende Querbohrung führt man von beiden Seiten her die dazu passenden Kolben ein, so daß sie die in der Blindbohrung steckende Walze berühren. Stößt man nun von oben her den langen in die Blindbohrung passenden Kolben in diese hinein, so wird durch ihn gegen die Walze und dadurch gegen den Boden des Klotzes eine Druckkraft ausgeübt, die auf die anderen Teile der Vorrichtung nicht übertragen wird (Abb. 24/2a). Man erkennt daraus, daß in einem festen Körper eine Druckkraft nur in ihrer Wirkungsrichtung weitergegeben wird.

#### Hauptversuch:

Man zieht den Mittelkolben und die kurze Walze heraus und füllt den Innenraum mit einer Modellflüssigkeit. Dazu eignen sich vorzüglich kleine Stahlkügelchen (vgl. VI 41 und V 4). Um den Innenraum etwas zu vergrößern, zieht man die seitlichen Kolben zweckmäßigerweise etwas heraus. Führt man nun den langen

Kolben von oben in die mittlere Bohrung ein, so wird die Druckkraft durch die Kügelchen wie in einer Flüssigkeit auf die Grundflächen der seitlichen kurzen Kolben übertragen und verursacht an diesen eine Verschiebung nach außen (Abb. 24/2b).

*Bemerkung:* Der Versuch weist alle charakteristischen Merkmale eines Modellversuches auf. An Stelle der Wassermoleküle treten die Stahlkugeln. Sie veranschaulichen deutlich die Druckübertragung von einem Teilchen zum anderen. Die zwischen den Molekülen wirkenden Kohäsionskräfte werden allerdings im Modell nicht wiedergegeben. Wegen seiner anschaulichen Wirkung sollte man bemüht sein, diesen Versuch den Schülern zu zeigen.

## 21. Verschiebung einer Wassersäule in einem Zylinder mit angeschlossenem Steigrohr [O]

Weites Rohr ( $\varnothing$  etwa 30 mm, Länge 300 mm) mit angeschmolzenem Schlauchansatz, ein in das Rohr hineinpassender, dichtschießender Kolben, T-Stück aus Glas mit seitlichem Hahn, langes Glasrohr ( $\varnothing$  etwa 8 mm, Länge 1000 mm), Meterstab, Verbindungsschlauch, Stativ mit Muffen und Klemmen.

### Versuchsanordnung:

An ein etwa 300 mm langes Glasrohr mit einem lichten Durchmesser von etwa 30 mm wird ein Schlauchansatz angeschmolzen. In das weite Rohr paßt man einen dichtschießenden, verschiebbaren Kolben ein, unter Umständen eine Holzwalze. Eine hinreichende Dichtung erzielt man durch Umwickeln der Walze mit Wollfäden. Als Handgriff dient eine in die Walze eingelassene Holzstange.

An den Schlauchansatz des weiten Glasrohres wird ein T-Stück angeschlossen, das mit einem seitlichen Hahn versehen ist. Das andere Ende des T-Stückes wird durch einen Schlauch mit einem ungefähr 1000 mm langen Steigrohr verbunden, dessen lichte Weite etwa 8 mm beträgt. Vorher ermittelt man möglichst genau den inneren Durchmesser des weiten Rohres  $d_1$  und den des Steigrohres  $d_2$  und berechnet daraus die Rohrquerschnitte  $F_1$  und  $F_2$ . Sodann befestigt man die ganze Anordnung senkrecht an einem Stativ (Abb. 25/1).

### Versuch:

Man füllt das Rohrsystem bis zum Rande des weiten Rohres mit gefärbtem Wasser. Dann führt man den Kolben in das weite Rohr etwa bis zu einem Drittel der Rohrlänge ein. Man öffnet den Hahn kurzzeitig und läßt so viel Wasser austreten, daß es in beiden Schenkeln gleich hoch steht.

An einem senkrecht neben die Rohre gehaltenen Meterstab liest man den Wasserstand in beiden Schenkeln ab. Senkt man den Kolben um eine kleine Strecke  $h_1$ , so steigt das Wasser im Steigrohr um die Strecke  $h_2$ . Vergleicht man die Verschiebungen der Wasseroberflächen mit den Querschnitten, so findet man, daß sich

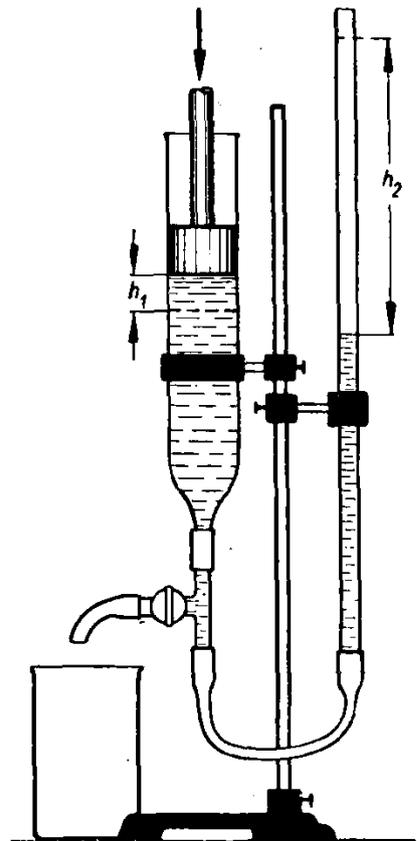


Abb. 25/1. Druckfortpflanzung in einer Flüssigkeit. Abhängigkeit der Steighöhe vom Querschnitt

die Verschiebungen umgekehrt verhalten wie die Querschnitte. Es ist

$$h_1 : h_2 = F_2 : F_1$$

oder

$$h_1 \cdot F_1 = h_2 \cdot F_2.$$

Hieraus folgt, daß die im Steigrohr hochgetriebene Wassermenge gleich der aus dem weiten Rohr herausgedrängten ist.

*Bemerkung:* Für die meisten Fälle reicht die Genauigkeit des Versuches aus. Fehlerquellen ergeben sich mitunter dadurch, daß die etwas primitive Dichtung des Kolbens für quantitative Versuche nicht immer ausreicht. Sie lassen sich vermeiden, wenn man statt des oben angegebenen weiten Rohres einen Kolbenprober verwendet.

## 22. Zwei verbundene Kolbenprober als Druckübertragungsgerät [0]

2 Kolbenprober mit verschiedenen Querschnitten, Gummischlauch, Gewichtssatz, Stativ mit Muffen und Klemmen, 2 Meterstäbe, T-Stück mit seitlichem Hahn — 2 Glasröhren, Wouffsche Flasche, 2 Gummistopfen.

Der Versuch gleicht V 21 und ermöglicht wie dieser die Feststellung des Zusammenhanges zwischen der Kolbenverschiebung und dem Röhrenquerschnitt. Darüber hinaus aber läßt der Versuch einen Vergleich der Druckkräfte zu.

An ein Stativ klemmt man in gleicher Höhe zwei Kolbenprober mit verschiedenen Querschnitten. Diese werden vorher genau ermittelt. Man verbindet die Rohransätze unter Zwischenschalten eines mit einem seitlichen Hahn versehenen T-Stückes durch einen Schlauch. Dann füllt man das Rohrsystem bis zum Rande der Kolbenprober mit Wasser und führt die Kolben etwa bis zur Mitte der Zylinder ein. Dabei ist darauf zu achten, daß sich unter den Kolben keine Luftblasen befinden. Das überschüssige Wasser läßt man durch den Hahn ausfließen. Vor dem Beginn des eigentlichen Versuches schließt man den Hahn (Abb. 26/1).

An Meterstäben, die man neben die Gefäße stellt, kann man die Verschiebungen  $h_1$  und  $h_2$  der Kolben ablesen. Ein Vergleich mit den Querschnitten  $F_1$  und  $F_2$  führt wie in V 21 zur Beziehung  $F_1 : F_2 = h_2 : h_1$ .

Der Versuch läßt sich dahin abändern, daß man auf die Kolbenplatten zur Auslösung von Druckkräften Gewichtsstücke legt. Man wählt sie so, daß sie sich das Gleichgewicht halten.

Vergleicht man die durch die Gewichte  $P_1$  und  $P_2$  dargestellten Druckkräfte mit den Querschnitten, so findet man, daß sich die Druckkräfte ebenso verhalten wie die Querschnitte. Es ist

$$P_1 : P_2 = F_1 : F_2.$$

Hierin liegt eine Bestätigung des Gesetzes, daß ein auf eine Flüssigkeit ausgeübter

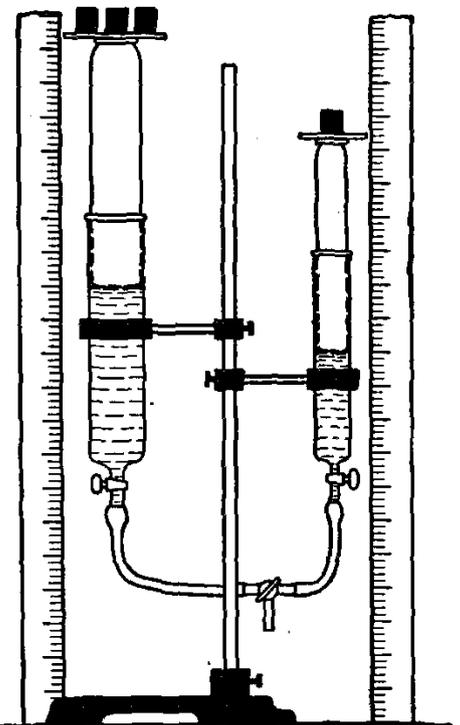


Abb. 26/1. Untersuchung der Druckübertragung in einer Flüssigkeit mit Hilfe zweier verbundener Kolbenprober

Druck senkrecht zu einem Flächenstück eine Druckkraft hervorruft, die der Größe des Flächenstückes proportional ist.

Dementsprechend läßt sich die oben angegebene Gleichung unter Benutzung eines Proportionalitätsfaktors  $a$  auf die Form bringen

$$P = a \cdot F.$$

*Bemerkungen:*

1. Die angegebene Versuchsanordnung läßt sich als Modell einer hydraulischen Presse ansehen. Es ist dabei zweckmäßig, zwei Kolbenprober mit sehr verschiedenen Querschnitten zu benutzen. Das enge Rohr stellt den Pumpenzylinder, das weite Rohr den Druckzylinder dar.
2. Man kann die Versuchsanordnung dadurch ergänzen, daß man zwischen die beiden Kolbenprober eine Woulffsche Flasche einfügt, mit der man die Kolbenprober durch zwei Röhren verbindet. Man bringt dadurch zur Veranschaulichung, daß das Druckausbreitungsgesetz nicht nur für eine unmittelbare Rohrverbindung der beiden Meßstellen, sondern auch für ein beliebig gestaltetes Gefäßsystem gilt. Statt der Woulffschen Flasche ist auch eine mit einem doppelt durchbohrten Stopfen verschlossene weithalsige Pulverflasche verwendbar.

### 23. Fußballblase als behelfsmäßiges Druckübertragungsgerät [G, O]

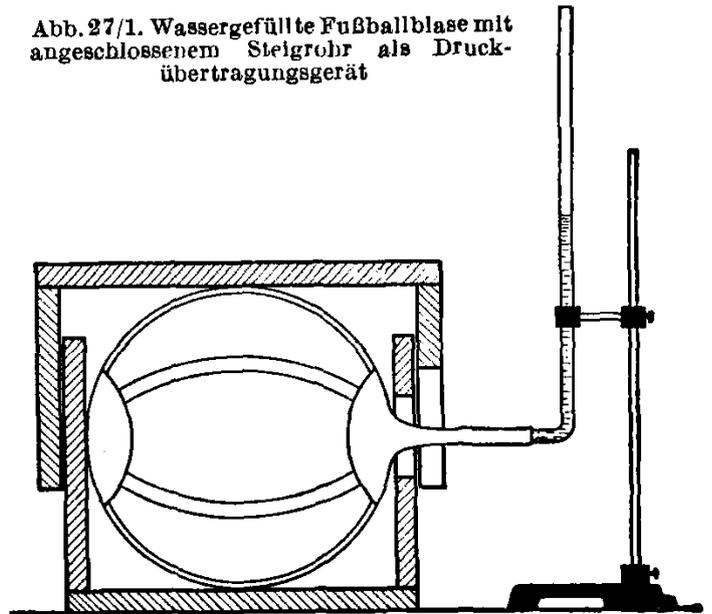
Fußballblase oder Gummiflasche, offener Holzkasten zur Aufnahme der Blase, zum Kasten passender Überwurfdeckel, gewinkeltes Glasrohr (Länge etwa 1000 mm), Verbindungsschlauch, Stativ mit Muffe und Klemme.

*Versuchsanordnung:*

Man stellt einen Holzkasten her, in den eine aufgeblasene Fußballblase gerade hineinpaßt. Die Seitenwände dürfen nicht höher sein als drei Viertel des Durchmessers der prallen Blase. In eine der Seitenwände schneidet man einen Schlitz, durch den man den Schlauchansatz der Gummibläse seitlich hindurchführt. Den Holzkasten verschließt man mit einem Überwurfdeckel aus starkem Holz. Die eine der Seitenwände des Deckels erhält ebenfalls eine dem Schlitz in der Kastenwand entsprechende Aussparung, damit beim Niederdrücken des Deckels eine Beschädigung des Schlauchansatzes vermieden wird (Abb. 27/1).

Man legt die Blase flach zusammen, so daß sie möglichst frei von Luft ist, und füllt sie ganz mit Wasser. Luft, die etwa in der Blase noch enthalten ist, läßt man durch den Schlauchansatz entweichen. An den Schlauchansatz schließt man eine rechtwinklig umgebogene Glasröhre an, an die man eine Schlaucholive angeschmolzen hat. Durch Abbinden des Schlauchendes sorgt man für eine gute Dichtung. Sodann legt man die gefüllte Blase in den Kasten, wobei man den Schlauchansatz durch den Schlitz führt. Die Glasröhre klemmt man senkrecht an ein Stativ.

Abb. 27/1. Wassergefüllte Fußballblase mit angeschlossenem Steigrohr als Druckübertragungsgerät



*Versuch:*

Über die Fußballblase und den Kasten stülpt man den Deckel. Man versucht zunächst dadurch, daß man mit der Hand auf den Deckel drückt, das Wasser im Rohr hochzutreiben. Man kommt zu dem Ergebnis, daß damit nur ein schwacher Wasseranstieg zu erzielen ist.

Legt man auf den Deckel einen großen Stein mit einem Gewicht von etwa 20 kp, so steigt das Wasser in der Röhre etwa 20 cm empor. Infolge der allseitigen Druckausbreitung ist diese Wassersäule ausreichend, um der durch den Stein ausgeübten Druckkraft das Gleichgewicht zu halten.

Es empfiehlt sich, den Versuch dahin abzuändern, daß man die Belastung des Deckels vergrößert. Man kann sogar veranlassen, daß sich ein Schüler vorsichtig auf den Deckel stellt. Es ist für die Schüler überraschend und lehrreich, festzustellen, daß die in der Röhre emporgehobene Wassersäule kaum mehr als 40 bis 50 cm hoch ist.

*Bemerkung:* Den Zahlenangaben der Steighöhen liegt die Annahme einer Druckfläche von 1000 cm<sup>2</sup> zugrunde. Dem entspricht bei einer Belastung des Deckels mit 20 kp eine Wassersäule von 20 cm. Denn ein Druck von 1 kp/cm<sup>2</sup> wird hervorgerufen durch eine Wassersäule von rund 1000 cm.

**24. Modell einer hydraulischen Presse [G, O]**

Fußballblase und Kasten wie bei V 23. Dazu Rohrzwischenstück, starker Gummischlauch, kräftiger, um den Kasten passender Holzrahmen (lichte Höhe des Rahmens etwa 10 cm größer als die Höhe des Kastens), 3 dreiseitige Prismen aus Hartholz, einige fingerstarke Holzscheite.

Man kann den Versuch 23 zu einem Modellversuch zur hydraulischen Presse ausgestalten, indem man den Wasserdruck im Innern der Blase erhöht. Man entfernt die Glasröhre und verbindet den Schlauchansatz mittels eines Rohrzwischenstückes mit einem längeren Gummischlauch. Durch diesen läßt man so viel Wasser aus der Gummiblase auslaufen, bis der Deckel auf dem Kastenrand aufliegt. Dann schließt man den Schlauch an den Hahn einer Wasserleitung an. Sämtliche Schlauchverbindungsstellen werden durch Abbinden gesichert.

Öffnet man den Wasserleitungshahn behutsam, so nimmt der Wasserdruck in der Blase zu. Es kommt dabei zu einer beträchtlichen Kraftwirkung am Deckel. Man kann auf diese Weise einen auf dem Deckel stehenden Schüler etwa einen Zentimeter emporheben.

Die Versuchsanordnung läßt sich dadurch erweitern, daß man den Kasten mit der nur mäßig gefüllten Blase in einen kräftigen Rahmen hineinstellt (Abb. 28/1). Lagert man unter dem Rahmen in dem freien Raum über dem Kastendeckel zwischen drei dreiseitige Holzprismen aus Hartholz ein etwa

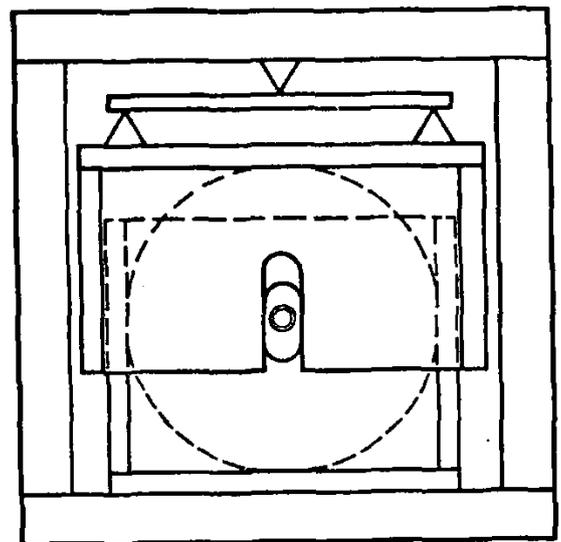


Abb. 28/1. Modellartige Darstellung einer hydraulischen Presse mit Hilfe einer an die Wasserleitung angeschlossenen Fußballblase

fingerstarkes Holzscheit, so wird es zerbrochen, sobald man die Fußballblase unter Wasserdruck setzt.

*Bemerkung:* Der Versuch veranschaulicht modellartig in seiner ersten Form die Wirkungsweise eines Wagenhebers, in der zweiten Form die der hydraulischen Presse. Die Abweichung von den wirklichen technischen Geräten liegt darin, daß bei diesen der durch einen Pumpenkolben hervorgerufene Kolbendruck wirksam wird. Er wird beim Versuch durch den Schwere-  
druck des Leitungswassers ersetzt.

## 25. Druckübertragung durch einen mit Wasser gefüllten Fahrradschlauch [G, O]

Fahrradschlauch, Gummischlauch ( $\varnothing$  zum Ventilstutzen passend, Länge 1000 mm), Glasrohr ( $\varnothing$  zum Gummischlauch passend, Länge 1000 mm), Holzplatte (800 mm  $\times$  800 mm  $\times$  10 mm), Stativ, Schnellklemme, Maßstab, Trichter.

Der Versuch hat große Ähnlichkeit mit V 23, es wird aber ein Fahrradschlauch verwendet.

Man legt einen Fahrradschlauch ohne Ventil neben einen Tisch auf den Fußboden und füllt den Schlauch mit Hilfe eines Trichters mit Wasser. Über den Ventilstutzen schiebt man das eine Ende eines etwa 1 m langen Gummischlauchs, dessen anderes Ende mit einem ebenso langen Glasrohr verbunden ist. Das Glasrohr wird an einem an der Tischkante stehenden Stativ senkrecht befestigt. Auf den Schlauch legt man eine etwa 1 cm starke Holzplatte, die den Schlauch vollständig bedeckt (Abb. 29/1).

Stellt sich ein Schüler auf die Mitte des Brettes, so steigt das Wasser in dem Gummischlauch und Glasrohr so hoch, bis der Druck der Wassersäule gleich dem auf den Fahrradschlauch ausgeübten Druck ist. Stellt man neben oder hinter die Glasröhre einen an einem Stativ befestigten Maßstab, so kann man bei verschiedener Belastung die zugehörigen Drucke in mm WS messen. Die Wassersäule zählt dabei von der Oberseite des Fahrradschlaches an.

*Bemerkungen:*

1. Man betrete vorsichtig das Brett, da bei rascher Bewegung die emporsteigende Wassersäule über das obere Ende des Glasrohres hinauschießt.
2. Will man genaue Meßwerte erhalten, so ist es unbedingt notwendig, daß man sich in die Mitte des Brettes stellt, damit eine gleichmäßige Belastung des Schlauches erfolgt.

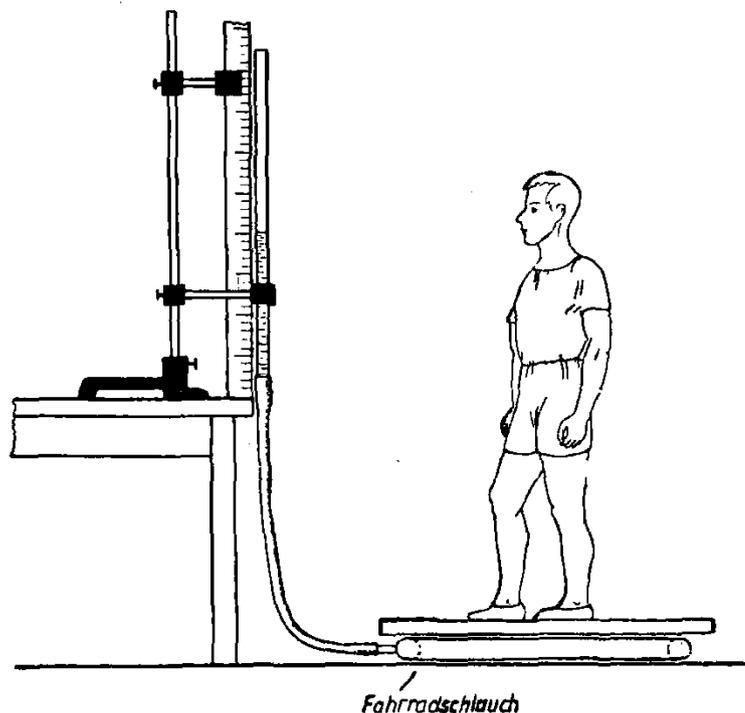


Abb. 29/1. Wassergefüllter Fahrradschlauch mit angeschlossenem Steigrohr als Mittel zur Druckübertragung

## § 4. DER SCHWEREDRUCK

## 26. Glasröhren als Drucksonden [G, O]

Hoher Standzylinder, Glasröhren ( $\varnothing$  5 mm) von verschiedenen Formen (vgl. Abb. 30/1), durchbohrtes Brettchen, Federklammer, Farblösung, Pipette, Schlauchringe.

Die Versuche dienen zur Veranschaulichung des Schweredrucks. In einen hohen, mit Wasser gefüllten Standzylinder taucht man zunächst ein gerades Glasrohr ein, dessen obere Öffnung mit dem Daumen verschlossen gehalten wird. Gibt man diese frei, so steigt das Wasser im Innern der Röhre hoch und stellt sich in gleicher Höhe mit dem äußeren Wasserspiegel ein. Um den Wasserstand im Rohr deutlich sichtbar zu machen, taucht man die Drucksonde vor dem Versuch einige Zentimeter tief in eine starke Farblösung ein, verschließt die obere Öffnung mit dem Daumen und führt den Versuch in der beschriebenen Weise durch. Die Farblösung wird dann von dem hochsteigenden Wasser mitgenommen und markiert deutlich den Wasserstand im Rohr.

Statt des geraden Rohres lassen sich auch Röhre verwenden, deren untere Enden umgebogen sind (Abb. 30/1). Wie in der geraden Röhre steigt das Wasser im Rohr immer wieder bis zur Höhe des äußeren Wasserstandes empor. Man erkennt, daß der Schweredruck unabhängig von der Lage der unteren Öffnung ist und nur von der Höhe des Wasserspiegels über dem Mittelpunkt der Öffnung abhängt. Wenn man das Rohr nicht dauernd mit der Hand halten will, steckt man es durch ein auf den Zylinder gelegtes durchbohrtes Brettchen und hindert es durch eine angeklebte Federklammer am Absinken (Abb. 30/2).

*Bemerkungen:*

1. Es ist unmittelbar zu erkennen, daß die im Innern des Wassers wirksamen Druckkräfte mit der Eintauchtiefe wachsen; denn sie sind imstande, bei größerer Tiefe einer höheren Wassersäule das Gleichgewicht zu halten.
2. Man kann mit Hilfe einer solchen Drucksonde zeigen, daß in waagerechten Schichten des ruhenden Wassers die auf die Rohröffnung wirkenden Druckkräfte gleich groß sind. Eine bestimmte waagerechte Schicht des Wassers im Zylinder kennzeichnet man durch einen außen um den Zylinder gelegten Papierring. Den Flüssigkeitsstand im Rohr markiert man durch einen um das Rohr gelegten, aus einem Schlauch geschnittenen Gummiring. Man tastet die Flüssigkeitsschicht mit der Öffnung der Drucksonde ab. Es ergibt sich, daß in waagerechten Schichten überall der gleiche Schweredruck herrscht.

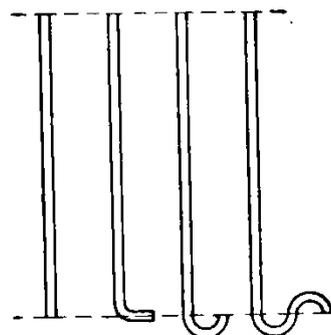


Abb. 30/1. Verschiedene Formen von Drucksonden

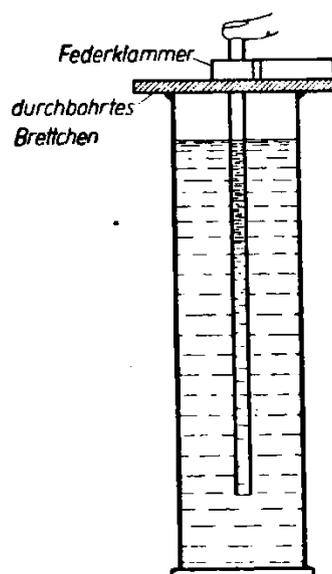


Abb. 30/2. Verwendung einer Drucksonde in einem Standzylinder

## 27. Drucksonde, bestehend aus einem offenen Manometer mit angeschlossener behelfsmäßiger Druckkapsel [G, O]

Offenes Manometer mit parallelen Schenkeln und langem gewinkeltm Anschlußrohr, Kugeltrichter mit kurz abgeschnittenem gewinkeltm Rohr, Gummimembran, Gummilösung, Schnur, Verbindungsschlauch, Holzstäbchen, Manometerflüssigkeit.

### Herstellung der Drucksonde:

Aus einer langen Glasröhre biegt man ein Manometer zurecht, dessen Anschlußrohr so lang ist, daß es seiner ganzen Länge nach in einen hohen Standzylinder hineingesteckt werden kann. Das untere Ende des Anschlußrohrs wird um ein kurzes, etwa 3 cm langes Stück waagrecht umgebogen (siehe Abb. 32/1).

Die Druckkapsel wird in folgender Weise hergestellt. Man biegt das Rohr eines Kugeltrichters dicht an der Trichterkugel rechtwinklig um und schneidet es bis auf etwa 3 cm kurz ab. Aus einer Gummihaut schneidet man eine Kreisscheibe mit einem Durchmesser, der etwa 2 bis 3 cm größer ist als der Durchmesser der Trichteröffnung. Die nach innen gebogene Wand der Trichteröffnung bestreicht man außen mit Gummilösung (Paragummi) und stellt die Trichterkugel konzentrisch auf die flach auf den Tisch gelegte Gummihaut. Den überstehenden Rand der Gummihaut klebt man an der Trichterwand fest (Abb. 31/1). Zur Sicherung wird die Gummihaut durch eine mehrfach herumgelegte Schnur dicht abgebunden.

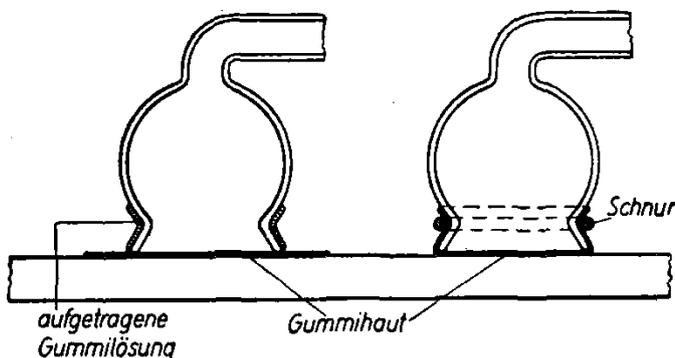


Abb. 31/1. Überziehen der Öffnung eines Kugeltrichters mit einer Gummimembran

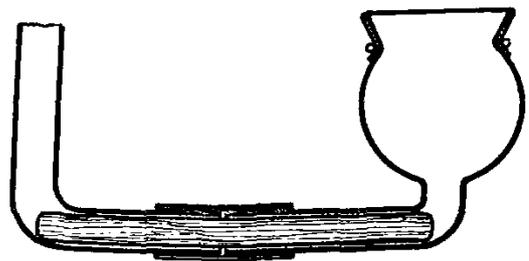


Abb. 31/2. Verbindung der Druckkapsel und des Manometerrohres

Nachdem man das Manometer mit einer Manometerflüssigkeit gefüllt hat, werden das Manometer und die Druckkapsel durch ein Schlauchstück fest miteinander verbunden, so daß sich die beiden Rohrenden berühren. Vorher wird zur Sicherung gegen seitliche Biegekräfte in beide Rohröffnungen ein etwa 5 cm langes Holzstäbchen eingeführt, das in beide Öffnungen paßt, sie aber nicht hermetisch schließt (Abb. 31/2). Durch Drehen des Trichters um das Trichterrohr als Achse kann die Gummimembran nach oben, zur Seite und nach unten gerichtet werden.

### Versuch:

Die Gummimembran der Druckkapsel wird zunächst nach oben gestellt. Dann wird die Druckkapsel in einen hohen, genügend weiten, mit Wasser gefüllten Standzylinder allmählich nach unten gesenkt. Man kann am Manometerausschlag beobachten, daß der Druck entsprechend der über der Gummimembran stehenden Wassersäule zunimmt (Abb. 32/1). Dasselbe ist bei seitlich und bei nach unten

gerichteter Gummimembran festzustellen. Es folgt daraus, daß der Wasserdruck von der Wasserhöhe abhängt.

Lehrreich ist es, wenn die Untersuchungen mit den drei verschiedenen Membranstellungen nacheinander an derselben Stelle vorgenommen werden. Man markiert durch einen um den Standzylinder gelegten Gummiring ein bestimmtes Niveau und bringt die Drucksonde immer wieder an dieselbe Stelle. Der Versuch zeigt, daß an der gleichen Stelle die auf ein und dieselbe Fläche von oben, von der Seite oder von unten her wirkenden Druckkräfte einander gleich sind.

*Bemerkung:* Es empfiehlt sich, das Manometer mit einer Flüssigkeit von größerer Wichte als Wasser zu füllen, da sonst die Manometerschenkel eben so lang sein müssen wie die Höhe des Standzylinders selbst. Dadurch wird aber die Drucksonde unhandlich, abgesehen davon, daß der Versuch überzeugender wirkt, wenn das Manometer als Anzeigergerät kürzer ist als der Standzylinder. Als Sperrflüssigkeit für das Manometer kann man Quecksilber verwenden, doch sind auch

Glyzerin.....	( $\gamma = 1,26 \text{ p/cm}^3$ ),
Chloroform .....	( $\gamma = 1,49 \text{ p/cm}^3$ ),
Tetrachlorkohlenstoff .....	( $\gamma = 1,59 \text{ p/cm}^3$ ),
Methylenjodid .....	( $\gamma = 3,33 \text{ p/cm}^3$ )

als Manometerflüssigkeiten geeignet.

## 28. Drucksonde, bestehend aus einem Glasrohr mit angebundener Gummiblaste [G, O]

Hoher Standzylinder, gerades Glasrohr ( $\varnothing 10 \text{ mm}$ ), Gummiblaste, Gummilösung, durchbohrtes Brettchen, Federklammer, Farblösung, Salzlösung, Spiritus.

An ein gerades Glasrohr wird eine Gummiblaste gebunden und wasserfest abgedichtet. Die Blase wird etwa zur Hälfte mit gefärbtem Wasser gefüllt. Taucht man die Vorrichtung in einen mit Wasser gefüllten hohen Standzylinder, so wird das Wasser in der Blase durch den Schweredruck des umgebenden Wassers hochgetrieben, bis es in gleicher Höhe mit dem äußeren Wasserspiegel steht. Das Rohr wird wie bei V 26 festgehalten (Abb. 32/2).

Die gleiche Höhe des Wasserspiegels stellt sich auch bei tieferem Einsenken immer wieder her, bis die Blase vollständig zusammengepreßt ist. Von der Größe der bei dem Versuch wirksamen Druckkräfte erhält man gefühlsmäßig eine Vorstellung, wenn man das Rohr aus dem Zylinder

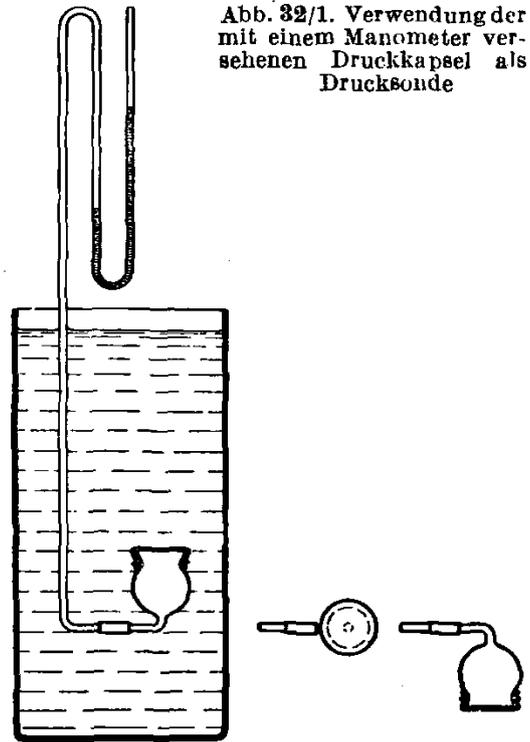


Abb. 32/1. Verwendung der mit einem Manometer versehenen Druckkapsel als Drucksonde

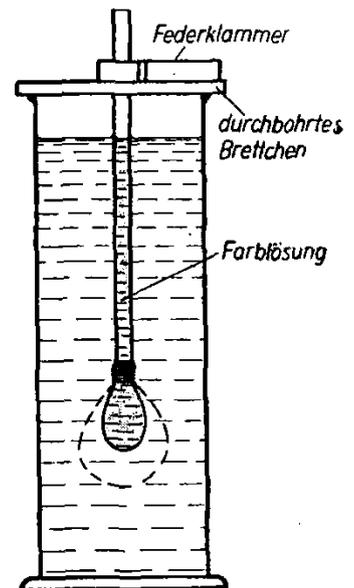


Abb. 32/2. Glasrohr mit Gummiblaste als Drucksonde

entfernt, die gefüllte Blase in die Hand nimmt und das Wasser in das Steigrohr drückt. Bei einem solchen Versuch festigt sich die Einsicht, daß der Schweredruck des Wassers von allen Seiten her wirkt.

Füllt man die Gummiblase mit einer Salzlösung oder mit Spiritus und wiederholt die Versuche, so beobachtet man im Standrohr einen tieferen bzw. höheren Stand der Flüssigkeit als im Standzylinder. Man kann auch den Versuch im umgekehrten Sinne durchführen, indem man den Standzylinder mit einer Salzlösung oder mit Spiritus und die Gummiblase mit Wasser füllt. Derartige Versuche zeigen, daß der Schweredruck mit der Dichte der verwendeten Flüssigkeit wächst.

## 29. Nachweis der Bodendruckkraft mittels der Pascalschen Waage [G, O]

Pascalsche Waage mit verschiedenen aufschraubbaren Gefäßen, Gewichtssatz, Meterstab mit verschiebbarem Zeiger, Meßzylinder (250 ml).

Auf das Gestell der Pascalschen Waage wird als erstes Versuchsgefäß der Zylinder geschraubt. Auf die an einem Ende des Waagebalkens hängende Waagschale wird als Belastung ein Gewichtsstück von 100 p gelegt. Dadurch wird die am anderen Ende gelenkig angebrachte Scheibe fest gegen den Verschlußring gedrückt; der Zylinder wird dadurch nach unten hin abgeschlossen (Abb. 33/1). Dann gießt man vorsichtig Wasser in den Zylinder. Beim Erreichen einer bestimmten Höhe wird die Scheibe durch das Gewicht des Wassers vom

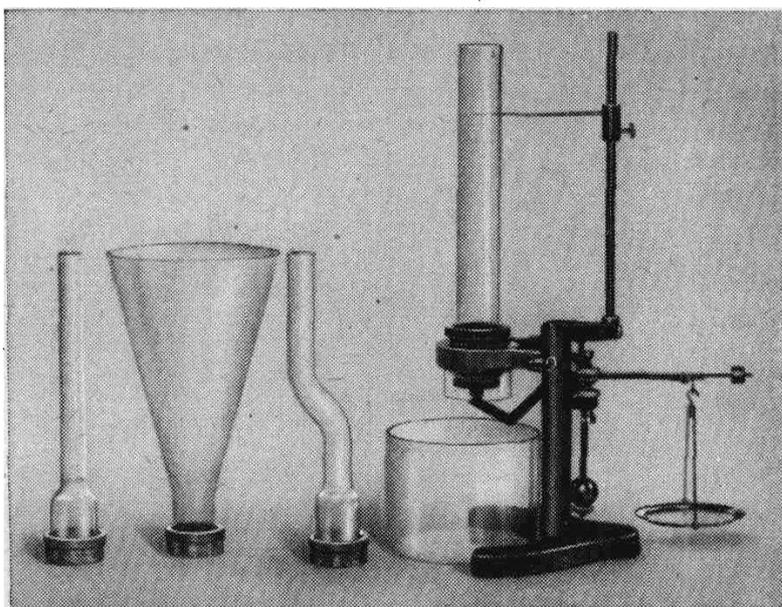


Abb. 33/1. Pascalsche Waage

Ring losgedrückt, so daß das Wasser ausfließt. Die Wasserstandshöhe wird entweder an einer am Gerät selbst befindlichen Skala oder an einem hinter das Gerät gestellten Meterstab mit verschiebbarem Zeiger abgelesen.

Man führt nunmehr den Versuch mit einem sich nach oben erweiternden und sodann mit einem sich nach oben verjüngenden Behälter aus. Die Wasserstandshöhe, bei der die Verschlußplatte abgedrückt wird, ist in beiden Fällen dieselbe wie bei der Verwendung des Zylinders. Man erkennt, daß die Bodendruckkraft abhängig vom Flüssigkeitsstand, dagegen unabhängig von der Form des Gefäßes ist.

Meist ist der Augenblick des Austritts nicht scharf begrenzt, so daß die Grenzhöhe nicht genau feststellbar ist. Man kann dadurch etwas nachhelfen, daß man beim Einfüllen des Wassers die Scheibe von unten her leicht gegen den Ring drückt, sobald sich der Wasserstand der Grenzhöhe nähert. Dann unterbricht man das Zugießen und nimmt den Finger vorsichtig von der Scheibe fort. Bleibt das Wasser im Gefäß, so setzt man das Verfahren fort, indem man von neuem gegen die Scheibe

drückt und das Wasser in ganz geringen Mengen zugießt. So kann man mit ziemlicher Genauigkeit die kritische Höhe erreichen. Sobald sie überschritten wird, bleibt die Scheibe nicht mehr haften, das Wasser fließt aus.

### 30. Nachweis der Bodendruckkraft am Bodendruckgerät nach Haldat [G—Ü]

Bodendruckgerät aus Glas mit konischem Schliff zum Auswechseln der Versuchsgefäße, 3 Versuchsgefäße, Quecksilber, Quecksilberwanne.

Das von *Haldat* angegebene Gerät ist aus Glas hergestellt und hat die Form eines U-Rohres mit zwei ungleich langen Schenkeln. Der kurze Schenkel ist nur 6 cm lang und trägt am Ende einen konischen Schliff, auf den man mühelos eines der beigegebenen Versuchsgefäße aufstecken kann. Diese haben die Form eines zylindrischen, eines nach oben erweiterten und eines nach oben verengten Rohres (Abb. 34/1). Dicht unter dem Konus ist der kurze Schenkel kugelförmig etwas erweitert. Das Gerät ist auf einer Grundplatte so befestigt, daß beide Schenkel vertikal nach oben gerichtet sind. In das U-Rohr gießt man vor der Durchführung des Versuches etwas Quecksilber, so daß es etwa bis zur Mitte der Erweiterung des kurzen Schenkels steht. Sämtliche Versuche müssen daher über einer Quecksilberwanne vorgenommen werden.

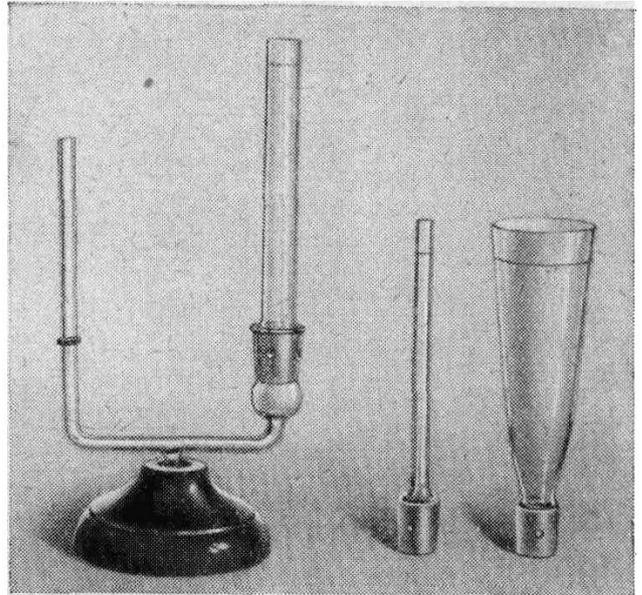


Abb. 34/1. Bodendruckgerät nach Haldat

Man beginnt den Versuch, indem man das zylindrische Rohr aufsteckt und es bis zu einer bestimmten Höhe, die durch eine am Glas angebrachte Marke gekennzeichnet ist, mit Wasser füllt. Durch das auf dem Quecksilberspiegel lastende Gewicht des Wassers wird das Quecksilber im anderen Schenkel etwas angehoben. Die Höhe der Quecksilbersäule ist ein Maß für die Größe der Bodendruckkraft. Die erreichte Quecksilberhöhe wird durch einen um den Schenkel gelegten Gummiring oder durch eine Federklammer markiert.

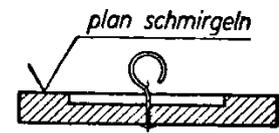
Der Mantelkonus des Rohres und der Kernkonus des Aufsatzgefäßes sind an einer Stelle seitlich durchbohrt. Zum Auswechseln der Gefäße dreht man den Zylinder im Konus so, daß Loch auf Loch steht, so daß das Wasser ausfließen kann. Man ersetzt den Zylinder erst durch das nach oben erweiterte Rohr, sodann durch das nach oben verengte Rohr, und füllt die Rohre bis zur gleichen Höhe wieder mit Wasser. In beiden Fällen wird die freie Quecksilberoberfläche ebenso gehoben wie beim ersten Versuch, sobald die Wasserhöhe in den Versuchsgefäßen dieselbe ist.

#### *Bemerkungen:*

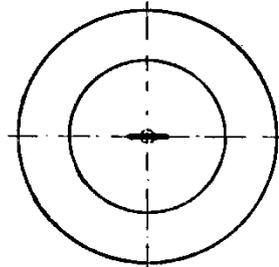
1. Vgl. MB S. 9!
2. Es empfiehlt sich, das für den Versuch gebrauchte Quecksilber, vom übrigen Quecksilbervorrat getrennt, in einer besonderen Flasche aufzubewahren, da es nicht nach jedem Versuch gereinigt zu werden braucht. Nach Beendigung des Versuches ist es sogleich in die Aufbewahrungsflasche zurückzugießen.

### 31. Nachweis der Bodendruckkraft mit Hilfe eines aus Aufbauteilen zusammengestellten Bodendruckgerätes [G, O]

3 an beiden Enden offene Glasgefäße mit plangeschmirgeltem unterem Rand von der Form eines Zylinders, eines sich nach oben erweiternden und eines sich nach oben verjüngenden Kegels (vgl. Abb. 35/2), ein Glaszylinder von gleicher Art mit etwas kleinerem Durchmesser als der erste, 1 Kreisscheibe aus Leichtmetall mit einem auf einer Seite plangeschmirgelten überhöhten Rand mit zentrisch angebrachter Öse (Abb. 35/1), Federwaage (1 kp), kleine Waagschale, Gewichtsstücke, 2 feste Rollen, Schnur, Stativ, 2 Muffen, Rohrklemme mit Stiel, kurzer Stativstab, großes Becherglas, Meßglas (100 ml), Meterstab mit Zeiger an ein Stativ geklemmt.



b) Schnittzeichnung



a) Draufsicht

Abb. 35/1. Scheibe aus Leichtmetall mit plangeschmirgeltem überhöhtem Rand

Die Versuchsanordnung hat gegenüber den bekannten Bodendruckgeräten den großen Vorzug, aus Aufbauteilen zusammenstellbar zu sein. Sie ermöglicht nicht nur den Nachweis der Unabhängigkeit der Bodendruckkraft von der Gefäßform und der Abhängigkeit der Bodendruckkraft von der Wasserhöhe, sondern läßt auch die Untersuchung der Abhängigkeit der Bodendruckkraft von der Bodenfläche zu. Verwendet werden: ein Zylinder und zwei kegelförmige Gefäße von verschiedener Form, aber gleicher Grundfläche, und ein Zylinder von etwas kleinerem Durchmesser als der erste (Abb. 35/2).

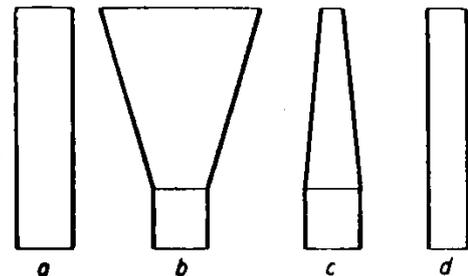


Abb. 35/2. Glasgefäße für den Nachweis der Bodendruckkraft

#### *Versuch 1: Messen der Bodendruckkraft in den Gefäßen a, b, c bei konstanter Federspannung*

Man untersucht zunächst die Bodendruckkraft im Zylinder und stellt die Versuchsanordnung nach Abb. 35/3 zusammen. Dadurch, daß man den Aufhängepunkt der Federwaage am Stativ etwas nach oben verschiebt, wird der Federwaage eine Vorspannung von etwa 200 p gegeben. Man erreicht dadurch, daß die Bodenplatte mit einer bestimmten Kraft gegen den Rand der Öffnung gedrückt wird.

In den Zylinder gießt man vorsichtig Wasser, wobei man das Wasser nicht auf den Boden

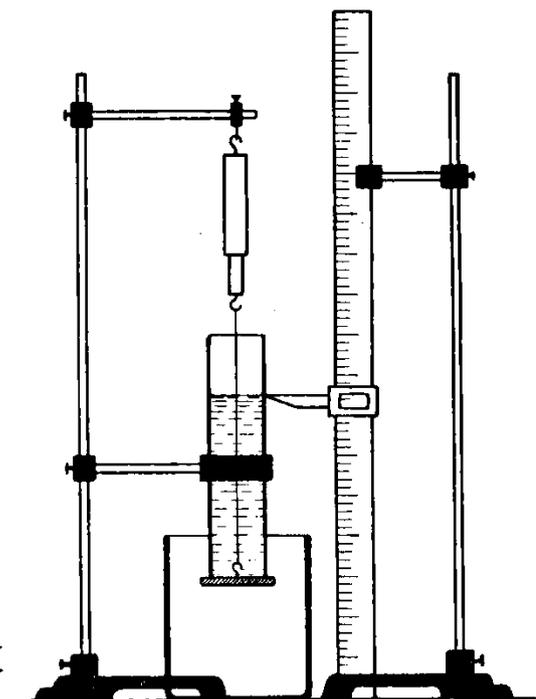


Abb. 35/3. Versuchsanordnung zur Untersuchung der Abhängigkeit der Bodendruckkraft von der Flüssigkeitshöhe, zusammengestellt aus Aufbauteilen

herabfallen, sondern an der Wand herabrinnen läßt. Besonders behütet man verfahren, wenn die Ausflußgrenze nahezu erreicht ist. Schon kurz vor dem Abheben der Scheibe tritt am Gefäßrand etwas Wasser hindurch. Doch beeinträchtigt dies den Versuch nicht, da sich das ausgetretene Wasser wie ein kleiner Wulst um den Zylinderrand legt und durch seine Oberflächenspannung wie eine Dichtung wirkt. Erst wenn die Grenzhöhe der Wassersäule erreicht ist, fließt eine größere Wassermenge ab. Die Grenzhöhe selbst wird an einem dahintergestellten Zeigermaßstab abgelesen. Man wiederholt den Versuch, indem man das Wasser aus einem Meßglas zugießt und dabei feststellt, wieviel Wasser bis zum Erreichen der Grenzhöhe verbraucht wird.

Sodann führt man den Versuch mit dem sich nach oben erweiternden und mit dem sich nach oben verengenden kegelförmigen Gefäß durch, ohne an der Vorspannung der Federwaage etwas zu ändern. Wieder ist die Grenzhöhe, bei der das Wasser auszufließen beginnt, die gleiche wie beim Zylinder. Man erkennt daraus, daß die Bodendruckkraft von der Form des Gefäßes unabhängig ist. Mit Hilfe des Meßglases ist es ein leichtes, die überraschende Tatsache festzustellen, daß dabei von dem sich erweiternden Gefäß eine größere, von dem sich verengenden Gefäß eine kleinere Wassermenge aufgenommen wird als vom Zylinder (Hydrostatisches Paradoxon).

### Versuch 2: Abhängigkeit der Bodendruckkraft von der Wasserhöhe

Man kann den Versuch leicht zu einem quantitativen Versuch ausgestalten, wobei man sich zunächst auf den Zylinder beschränkt. Man steigert die Vorspannung nacheinander, beispielsweise von 200 p auf 300 p und schließlich auf 350 p. In jedem Fall wird die Grenzhöhe der Wassersäule bestimmt. Man berechnet die dabei wirksam werdende Druckkraft. Zu diesem Zweck ermittelt man vor Beginn des Versuches mit Hilfe der Federwaage das Gewicht  $G$  der Bodendruckplatte und subtrahiert es von der Federkraft  $P_0$ . Die Differenz  $P_0 - G$  ist gleich der im Augenblick des Ausfließens wirkenden Bodendruckkraft  $P$ . Als Beispiel werden in Tabelle I die bei einem Versuch ermittelten Meßwerte angegeben.

Der Quotient aus der Bodendruckkraft  $P$  und der Wasserhöhe  $h$  erweist sich, von geringfügigen Abweichungen abgesehen, als konstant. Es ist hier mit großer Annäherung

$$\frac{P}{h} = 18,9 \text{ p/cm}$$

oder

$$P = 18,9 \text{ p/cm} \cdot h.$$

Tabelle I: Bodendruckkraft in einem Zylinder der Form a  
Lichter Öffnungsdurchmesser des Zylinders 4,9 cm  
Bodenfläche 18,9 cm<sup>2</sup>

Federkraft ( $P_0$ ) p	Gewicht der Bodenplatte ( $G$ ) p	Bodendruck- kraft ( $P = P_0 - G$ ) p	Wasserhöhe ( $h$ ) cm	$\frac{P}{h}$ p/cm
200	20	180	9,5	18,9
300	20	280	14,9	18,8
350	20	330	17,5	18,9

Mittelwert: 18,9

Es folgt daraus, daß die Bodendruckkraft  $P$  proportional der Wasserhöhe  $h$  ist.

### Versuch 3: Abhängigkeit der Bodendruckkraft von der Bodenfläche

Bei näherer Betrachtung zeigt sich, daß der in der soeben aufgestellten Gleichung auftretende Proportionalitätsfaktor zahlenmäßig mit dem Wert  $F$  der

Bodenfläche übereinstimmt. Man kann daher der Gleichung die Form geben:

$$P = F \cdot h.$$

Will man die Ableitung der Gleichung noch überzeugender gestalten, so führt man den Versuch mit einem Zylinder von anderem Querschnitt durch. Man benutzt dazu das Gefäß mit der Form  $d$  mit einem etwas kleineren Öffnungsdurchmesser von beispielsweise 4,5 cm. Der Versuch liefert die in der Tabelle II zusammengestellten Meßergebnisse.

Auch bei diesem Zylinder erweist sich der Quotient  $\frac{P}{h}$  als annähernd konstant. Es ist in diesem Fall

$$\frac{P}{h} = 15,9 \text{ p/cm}$$

oder

$$P = 15,9 \text{ p/cm} \cdot h.$$

Wieder ist der Wert des Quotienten im Mittel zahlenmäßig gleich dem Wert der gedrückten Bodenfläche.

Die gleiche Untersuchung kann man an den anderen Gefäßen durchführen. Die Gültigkeit der Gleichung

$$P = F \cdot h$$

wird dadurch bestätigt.

Zu beachten ist, daß die Gleichung in der angegebenen Form nur für Wasser gilt. Verwendet man eine andere Flüssigkeit, etwa eine starke Salzlösung, so fallen die gemessenen Flüssigkeitshöhen etwas kleiner aus. Es ist dem Produkt aus Bodenfläche und Flüssigkeitshöhe noch die Wichte  $\gamma$  der Flüssigkeit als Faktor beizufügen. Man erhält dann die Gleichung

$$P = \gamma \cdot F \cdot h.$$

*Bemerkungen:*

1. An Stelle einer Federwaage lassen sich auch Gewichtsstücke verwenden. Man legt sie auf eine kleine Waagschale und überträgt ihre Zugkraft mittels einer über eine Rolle geführten Schnur auf die Bodenplatte.
2. Beim Einstellen der Federspannung werden die Achse des Versuchsgefäßes und die von der Federwaage zur Bodenplatte führende Übertragungsschnur vertikal gestellt. Es empfiehlt sich aber, vor der Durchführung der Messung durch ein geringfügiges Verstellen der Federwaage nach der Seite hin der Schnur eine ganz geringe Neigung gegen die Gefäßachse zu geben. Die Vorspannung der Federwaage darf dabei nicht geändert werden. Dadurch erreicht man, daß auf die Bodenplatte eine ganz geringe seitliche Kraftkomponente einwirkt. Die beim Erreichen der Grenzhöhe abgehobene Grundplatte wird dadurch zur Seite gezogen und gibt die Öffnung frei, so daß das ganze Wasser ausfließt. Der Eintritt der Druckgleichheit wird auf diese Weise augenfällig gekennzeichnet.
3. [O] Bei der Durchführung der beschriebenen Versuche im Unterricht der Oberschule wird man nicht versäumen, auf die dimensional Zusammenhänge einzugehen. Man wird die Schüler darauf hinweisen, daß die Gleichung

$$P = F \cdot h$$

*Tabelle II: Bodendruckkraft in einem Zylinder der Form d*  
Lichter Öffnungsdurchmesser des Zylinders 4,5 cm  
Grundfläche 15,9 cm<sup>2</sup>

Federkraft ( $P_0$ ) p	Gewicht der Bodenplatte ( $G$ ) p	Bodendruck- kraft ( $P = P_0 - G$ ) p	Wasserhöhe ( $h$ ) cm	$\frac{P}{h}$ p/cm
200	20	180	11,3	15,9
300	20	280	17,7	15,8
350	20	330	20,7	15,9

Mittelwert: 15,9

einen Widerspruch zu enthalten scheint, da auf beiden Seiten ungleiche Dimensionen auftreten.  $P$  hat die Dimension einer Kraft  $[K]$ ,  $F \cdot h$  die Dimension  $[l^2] \cdot [l] = [l^3]$ , mithin die Dimension eines Volumens.

Erst die Beifügung der Wichte  $\gamma$  als Faktor mit der Dimension  $[K \cdot l^{-3}]$  führt zur Dimensionsgleichheit auf beiden Seiten. Doch ist zu bedenken, daß auch die Gleichung in ihrer Urform den Faktor  $1 \text{ p/cm}^3$  als Wichte des Wassers enthält, so daß in der Gleichung

$$P = F \cdot h$$

die Dimensionsgleichheit gewahrt ist.

4. [O] In der Oberschule ist es erforderlich, die Schüler darauf hinzuweisen, daß der Quotient  $\frac{P}{F}$  nichts anderes als den Bodendruck bedeutet. Er ist nur von der Höhe der Flüssigkeit über der Meßstelle und von der Wichte der Flüssigkeit abhängig.

### 32. Nachweis der Seitendruckkräfte mittels austretender Wasserstrahlen [G, O]

Hoher Standzylinder mit drei übereinanderliegenden seitlichen Tuben, 3 Korke, 3 kurze Glasröhren mit Spitzen, Unterstellkasten, große flache Wanne, Schlauch, gewinkeltes Glasrohr, Stativ mit Muffe und Klemme; langes Reagenzglas.

In die drei Tuben eines tubulierten Standzylinders werden Korke eingepaßt, in die kurze, zu einer Spitze ausgezogene Glasröhren gesteckt sind. Füllt man den Zylinder mit Wasser, so treten aus den Röhren Wasserstrahlen aus, deren Reichweiten einen Schluß auf die Abhängigkeit der an den Rohrmündungen wirksamen Seitendruckkräfte vom Wasserstand ermöglichen (Abb. 38/1). Das ausfließende Wasser muß laufend ergänzt werden. Will man den Ersatz des Wassers kontinuierlich gestalten, so kann man dem Zylinder von der Wasserleitung her mittels eines Schlauches und eines an ein Stativ geklemmten Rohres Wasser zuführen. Man regelt den Zufluß so, daß der Wasserstand im Zylinder erhalten bleibt.

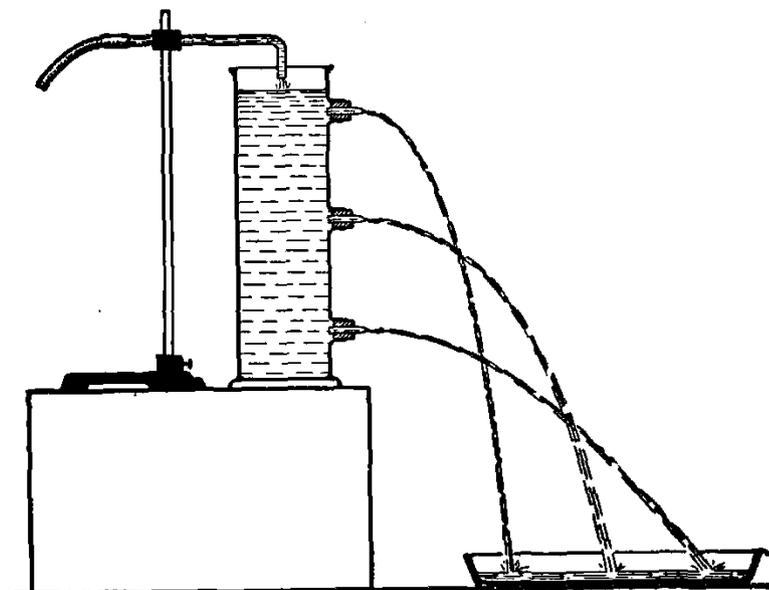


Abb. 38/1. Nachweis der Seitendruckkräfte mittels der aus einem tubulierten Zylinder austretenden Wasserstrahlen

#### Bemerkungen:

1. Als Ausflußgefäß läßt sich behelfsmäßig eine hohe Blechbüchse verwenden. Man schlägt in ihre Seitenwand mehrere übereinanderliegende Öffnungen und kittet darin die Ausflußröhren mit Siegellack fest.
2. Man kann bei einiger Fertigkeit im Glasblasen ein Ausflußgefäß aus einem längeren Reagenzglas herstellen (Abb. 38/2). Man erweicht

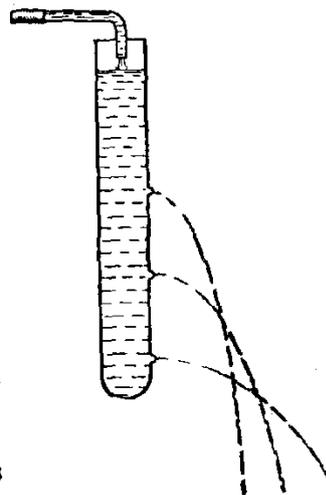


Abb. 38/2. Verwendung eines Reagenzglases als Ausflußgefäß

mit einer spitzen, kleinen Stichflamme nacheinander drei übereinander liegende Stellen der Röhrenwand und treibt die erwärmten Stellen durch kurzes kräftiges Hineinblasen in die Röhre nach außen zu einer spitzen Öffnung auf. Man läßt das Glas zwischendurch immer wieder erkalten und verschließt die erzeugten Öffnungen vorübergehend mit etwas Wachs oder Stearin. Bei Verwendung eines derartig vorbereiteten Röhrchens ist es möglich, den Versuch im Schattenwurf zu projizieren.

### 33. Nachweis seitlich gerichteter Druckkräfte an einer Abklärflasche [G, O]

Abklärflasche (3 l), Gummistopfen, gewinkeltes Glasrohr, kurzes Glasrohr, Verbindungsschlauch, Quetschhahn, gefärbtes Wasser.

#### Ausführung 1:

Aus einer großen Abklärflasche, einem Gummistopfen und einem rechtwinklig gebogenen Glasrohr stellt man die in Abb. 39/1 wiedergegebene Versuchsanordnung zusammen. Gießt man Wasser in die Flasche, so erreicht das Wasser im Rohr denselben Wasserstand wie in der Flasche. Es folgt dabei einer in der Flasche waagrecht gegen die Öffnung des Rohres gerichteten Seitendruckkraft. Die Abhängigkeit der Seitendruckkraft vom Flüssigkeitsstand in der Flasche zeigt man, indem man diesen durch Zufüllen oder Abhebern ändert.

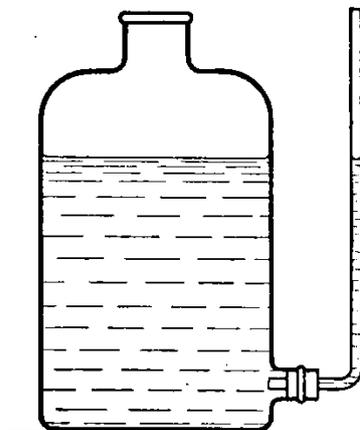


Abb. 39/1. Abklärflasche mit seitlichem Steigrohr zum Nachweis der Seitendruckkraft

#### Ausführung 2:

Die Versuchsanordnung läßt sich dahin abändern, daß man in den Seitentubus der Flasche einen Stopfen mit einem kurzen Glasrohr steckt und an dieses ein Steigrohr mittels eines kurzen Gummischlauchs anschließt. Der Schlauch wird vor dem Füllen der Flasche durch einen Quetschhahn verschlossen. Nachdem man die Flasche mit Wasser gefüllt hat, öffnet man den Hahn. Das Wasser steigt dann ruckartig im Steigrohr bis zur Höhe des inneren Wasserspiegels empor. Durch diesen Bewegungsvorgang wird das Wirken der seitlichen Druckkraft noch sinnfälliger veranschaulicht als durch einen erreichten Gleichgewichtszustand.

*Bemerkung:* Der Versuch zeigt im Endzustand die Eigenschaft verbundener Gefäße. In § 2 wurden Möglichkeiten gezeigt, wie man diesen Unterrichtsgegenstand ohne Eingehen auf den Schweredruck behandeln kann. Man darf aber zum mindesten bei der Behandlung der verbundenen Gefäße in der Oberschule nicht versäumen, den Gleichstand der Flüssigkeitshöhen als Folgeerscheinung des Schweredruckes zu erklären. Dazu bietet dieser Versuch eine vorzügliche Grundlage.

### 34. Nachweis einer aufwärts gerichteten Druckkraft im Innern einer Flüssigkeit [G]

Zylinder mit plangeschmirgeltem Rand, ebene, glattgeschmirgelte Abschlußplatte mit zentrisch angebrachtem Haken, Bindfaden; Lampenzylinder, breiter Korken, spitz ausgezogenes Glasröhrchen; großes Glasgefäß, gefärbtes Wasser.

#### Versuch 1:

Man legt gegen den plangeschmirgelten Rand eines an beiden Enden offenen Zylinders eine Abschlußplatte aus Glas oder Leichtmetall. Mittels eines am Haken

befestigten Fadens zieht man sie fest gegen den Zylinder und taucht diesen mit der geschlossenen Öffnung nach unten senkrecht ins Wasser ein. Läßt man bei hinreichender Eintauchtiefe den Faden los, so fällt die Platte nicht ab, wie es die Schüler zunächst erwarten. Sie wird von der aufwärts gerichteten Druckkraft des Wassers getragen (Abb. 40/1). Gießt man gefärbtes Wasser in den Zylinder, so sinkt die Platte zu Boden, wenn die innere Wassersäule den äußeren Wasserstand nahezu erreicht hat. Der geringe Höhenunterschied der Wassersäulen ist bedingt durch das Gewicht der Abschlußplatte.

Man kann den Versuch dadurch abändern, daß man eine Verschlussplatte mit einem kleinen Loch benutzt. Durch dieses Loch dringt langsam Wasser ein. Hat es die Höhe des äußeren Wasserstands fast erreicht, so fällt die Platte ab.

### Versuch 2:

Der Versuch läßt sich noch einfacher mit einem gewöhnlichen Lampenzylinder oder einem anderen Glasrohr ausführen. Man verschließt die eine Zylinderöffnung mit einem durchbohrten Korken, in dem ein mit einer Spitze versehenes Glasrohr steckt. Man taucht den Zylinder mit dem so verschlossenen Ende senkrecht in Wasser ein. Die an der Rohröffnung wirksame, nach oben gerichtete Druckkraft des Wassers läßt im Zylinder einen kleinen Springbrunnen emporsteigen, der die Höhe des äußeren Wasserstandes nicht ganz erreicht (Abb. 40/2). Der im Zylinder allmählich ansteigende Wasserstand behindert bald die Ausbildung eines Springbrunnens. Der innere Wasserspiegel erreicht schließlich die Höhe des äußeren.

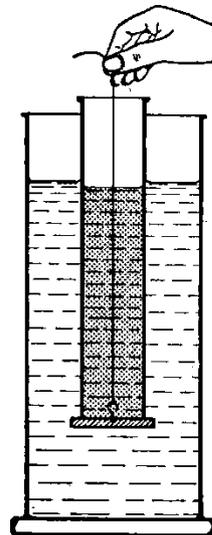


Abb. 40/1  
Zylinder mit Verschlussplatte zum Nachweis der aufwärts gerichteten Druckkraft. Die im Zylinder befindliche Wassersäule wird vom äußeren Wasser getragen

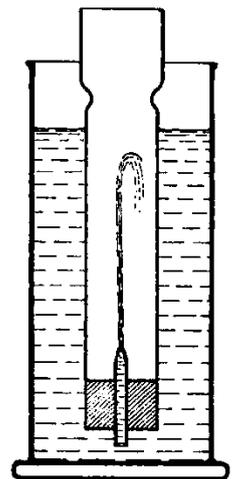


Abb. 40/2  
Springbrunnen in einem Lampenzylinder zum Nachweis der nach oben gerichteten Druckkraft

## 35. Untersuchungen an einem behelfsmäßig hergestellten Springbrunnen [G]

Abklärflasche, 2 gewinkelte Glasröhren, 2 kurze, gerade Glasröhren, 2 zugespitzte Ausflußröhrchen von verschiedenen Durchmesser, langes Glasrohr (1000 mm), 2 einfach durchbohrte Korken, 2 zweifach durchbohrte Korken, Verbindungsschlauch, Quetschhahn, Stativ mit Muffe und Klemme, große flache Blechwanne, großer Unterstellkasten; Blumentopf mittlerer Größe, Tischklemme, 2 lange Stativstangen, 2 Muffen, kurzer Stativstab.

### Versuchsanordnung:

Man stellt als Wasserbehälter eine Abklärflasche auf einen hohen Unterstellkasten und schließt an den Seitentubus mittels eines Korkens und einer kurzen gewinkelten Glasröhre einen Schlauch als Abflußleitung an. Am anderen Ende versieht man den Schlauch mit einer kurzen, zu einer spitzen Öffnung ausgezogenen Glasröhre als Strahlrohr. Dieses wird durch einen Korken gesteckt und von einem Stativ über einer flachen, großen Blechwanne senkrecht zu ihrem Boden gehalten. Der Verbindungsschlauch wird durch einen Quetschhahn geschlossen (Abb. 41/1).

An Stelle der Abklärflasche läßt sich auch mit gutem Erfolg ein Blumentopf mittlerer Größe verwenden, wobei man nach Möglichkeit einen solchen mit verstärktem Rand auswählt. Dicht unter diesen Rand legt man um den Blumentopf eine starke Schnur und verknotet sie fest. An den so entstehenden Schnurring knüpft man 4 nach oben verlaufende Tragschnüre an, die über dem Topf zu einer Schlaufe zusammengebunden werden. Der so vorbereitete Topf wird an einer verlängerten Stativstange aufgehängt, die man am Tischrand mittels einer Tischklemme anklemmt. In die Bodenöffnung führt man mit Hilfe eines Korkens und einer kurzen Glasröhre den Abflußschlauch ein (Abb. 41/2).

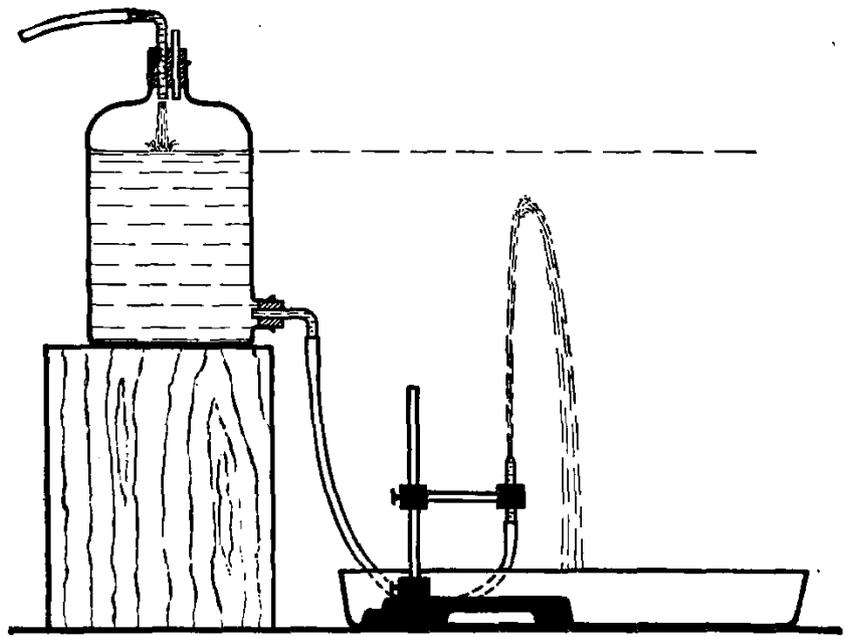


Abb. 41/1. Versuchsanordnung zur Erzeugung eines Springbrunnens  
Verwendung einer Abklärflasche als Wasserbehälter

#### Versuch:

Man füllt den Wasserbehälter etwa zu zwei Drittel seiner Höhe mit Wasser und öffnet den Quetschhahn des Abflußschlauches. Das Wasser spritzt in einem Strahl heraus, der sich nach oben erweitert. Er löst sich dabei in Einzelstrahlen auf, die, jeder für sich, bei unbewegter Luft annähernd die Form steiler Parabeln annehmen. Will man den Betrieb des Springbrunnens längere Zeit aufrechterhalten, so schließt man den Wasserbehälter über einen Schlauch und eine gewinkelte Glasröhre an die Wasserleitung an. Die Wasserzufuhr regelt man so, daß das Wasserniveau in der Flasche annähernd konstant bleibt.

Neigt man das Strahlrohr ein wenig zur Seite, so nimmt die Steighöhe der oberen Randstrahlen etwas zu. Im ganzen aber nimmt die Strahlhöhe dabei ab.

Daß auch auf einen Springbrunnen das Gesetz verbundener Gefäße anwendbar ist, erkennt man, wenn man die Wasserzufuhr unterbricht und auf das Strahlrohr mittels eines kurzen Verbindungsschlauches ein langes Steigrohr aufsetzt. Das Wasser steigt im Steigrohr bis zur selben Höhe an wie im Behälter. Daß der austretende Wasserstrahl die Wasserhöhe im Gefäß nicht ganz erreicht, hat seine Ursache in der Reibung der Wasserteilchen gegeneinander und in der Reibung des Wassers an der Schlauchwand, an der Düsenöffnung und an der Luft.

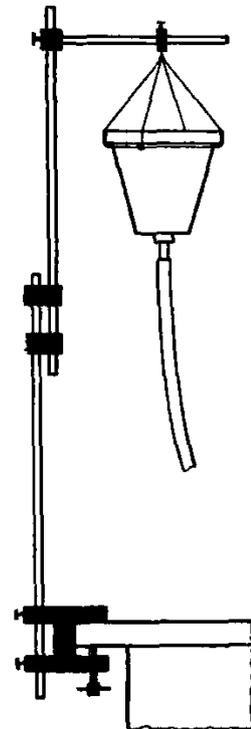


Abb. 41/2. Blumentopf als Wasserbehälter für einen Springbrunnen

Vergleicht man die Steighöhen des Wasserstrahls bei Strahlrohren von verschiedener Öffnung, so findet man, daß sich bei Strahlrohren mit weiten Öffnungen kleinere Steighöhen des Wasserstrahls ergeben als bei Strahlrohren mit verjüngten Öffnungen.

*Bemerkungen:*

1. Wenn auch der Blumentopf etwas primitiv wirkt, so ist seine Verwendung doch zu empfehlen, da die Einfachheit der Versuchsanordnung die Schüler zum Nachbauen anregt.
2. Durch Anstrahlen des Springbrunnens von vorn mit direktem oder reflektiertem Sonnenlicht oder mit Hilfe einer starken Leuchte kann man die Tropfen im Schattenbild deutlich erkennbar machen. Bei Betrachtung des Springbrunnens in der Richtung der Lichtstrahlen kann man die Regenbogenscheinung beobachten.

### 36. Bestimmung der Wichte einer mit Wasser mischbaren Flüssigkeit mittels eines Tauchrohrs [G, O – Ü]

Weiter Standzylinder, gerades Glasrohr ( $\varnothing$  10 mm, Länge 300 mm) mit Ausflußspitze, ebensolches Rohr mit hakenförmig nach oben gebogener Spitze, Stativ mit Muffe und Klemme, Salzlösung, Spiritus, Farblösung, gegen Wasser unempfindlicher Meterstab.

Ein mit einer Ausflußspitze versehenes gerades Glasrohr mit einer Länge von etwa 300 mm füllt man durch Ansaugen mit der zu untersuchenden Flüssigkeit, beispielsweise mit gefärbtem Spiritus. Man verschließt die obere Öffnung mit dem Finger. Dann taucht man das Rohr etwa 200 mm tief in einen mit Wasser gefüllten Standzylinder, hält es durch ein Stativ fest und gibt die Öffnung frei (Abb. 42/1). Es fließt so viel Flüssigkeit aus, bis an der Ausflußöffnung innen und außen der gleiche Schwere- druck herrscht. Damit sich dadurch die Wichte des Wassers nicht wesentlich ändert, wird man zu dem Versuch einen möglichst weiten Stand- zylinder benutzen.

Will man die Wichte der im Rohr befindlichen Flüssigkeit ermitteln, so hat man die Höhe  $h_1$  dieser Flüssigkeitssäule und die Höhe  $h_2$  der Wassersäule über der Ausflußöffnung zu messen. Dies geschieht, indem man einen gegen Wasser unempfindlichen Maßstab hinter die Röhre stellt. Der Zahlenwert der Wichte der Meßflüssigkeit, die Wichtezahl, ist gleich dem Quotienten aus  $h_2$  und  $h_1$ . Die Wichte selbst ist

$$\gamma = \frac{h_2}{h_1} \text{ p/cm}^3.$$

Für Flüssigkeiten mit einer größeren Wichte als Wasser benutzt man ein Tauchrohr mit hakenförmig gebogener Spitze (Abb. 42/1 Nebenbild). Zweckmäßigerweise färbt man die zu untersuchenden Flüssigkeiten.

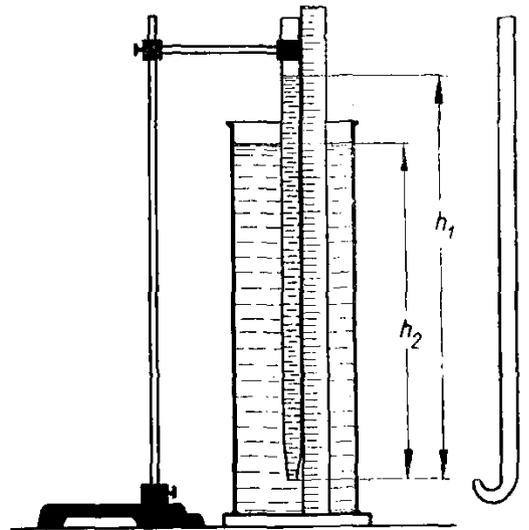


Abb. 42/1. Bestimmung der Wichte einer Flüssigkeit mit einem geraden Tauchrohr, daneben Tauchrohr mit hakenförmig gebogener Spitze

*Bemerkungen:*

1. Im Gegensatz zu den Wichtebestimmungen mit Aräometern werden nur geringe Flüssigkeitsmengen gebraucht. Die beschriebenen Versuche eignen sich daher gut für Übungen.
2. [O] In der Oberschule wird man zum besseren Verständnis der Zusammenhänge folgende Überlegungen vornehmen: Es gilt für die Bodendruckkraft der Meßflüssigkeit an der Austrittsöffnung die Gleichung

$$P_1 = \gamma_1 \cdot F \cdot h_1,$$

für die Druckkraft des Wassers gegen die Austrittsöffnung die Gleichung

$$P_2 = \gamma_2 \cdot F \cdot h_2.$$

Aus der Gleichheit beider Druckkräfte folgt

$$\gamma_1 \cdot F \cdot h_1 = \gamma_2 \cdot F \cdot h_2.$$

Es ergibt sich

$$\gamma_1 = \gamma_2 \cdot \frac{h_2}{h_1}.$$

Da die Wichte  $\gamma_2$  des Wassers gleich  $1 \text{ p/cm}^3$  ist, ist  $\gamma_1 = 1 \cdot \frac{h_2}{h_1} \text{ p/cm}^3$ .

Die Wichtezahl ist im Gegensatz dazu nicht dimensioniert; sie ist gleich dem Zahlenwert des Bruches  $\frac{h_2}{h_1}$ .

Da beim Versuch Wasser als Vergleichsflüssigkeit verwendet wird und bei allen Körpern am gleichen Meßort die Körpergewichte den Massen proportional sind, wird mit der Wichtezahl zugleich auch die Dichtezahl ermittelt. Beide Zahlen sind dimensionslose, reine Zahlen. Für die Dichte der Meßflüssigkeit selbst ergibt sich entsprechend ihrer Wichte:

$$\rho_1 = 1 \cdot \frac{h_2}{h_1} \text{ g/cm}^3.$$

3. [O] Gründet man die Überlegungen der Bemerkung 2 auf das absolute Maßsystem, so führen sie unmittelbar zur Errechnung der Dichte. Nach dem Newtonschen Kraftgesetz ist unter Berücksichtigung der Dichte  $\rho$

$$P_1 = m_1 \cdot g = \rho_1 \cdot V_1 \cdot g = \rho_1 \cdot F \cdot h_1 \cdot g,$$

$$P_2 = m_2 \cdot g = \rho_2 \cdot V_2 \cdot g = \rho_2 \cdot F \cdot h_2 \cdot g.$$

Wegen der Gleichheit von  $P_1$  und  $P_2$  ist mithin

$$\rho_1 \cdot h_1 = \rho_2 \cdot h_2 \quad \text{oder} \quad \rho_1 = \rho_2 \cdot \frac{h_2}{h_1}.$$

Da die Dichte des Wassers  $\rho_2 = 1 \text{ g/cm}^3$  ist, ergibt sich für die Dichte der Meßflüssigkeit

$$\rho_1 = 1 \cdot \frac{h_2}{h_1} \text{ g/cm}^3.$$

### 37. Bestimmung der Wichte einer mit Wasser nicht mischbaren Flüssigkeit mittels eines Standrohres [G, O]

Hoher Standzylinder, ein gerades und ein am Ende U-förmig gebogenes Glasrohr ( $\varnothing 10 \text{ mm}$ ), kleine Glasschale, Quecksilber, Quecksilberbrett, Trichterrohr, durchbohrtes Brettchen, Federklammer, gegen Wasser unempfindlicher Meterstab.

#### Versuch 1:

Auf den Boden eines hohen Standzylinders stellt man eine kleine Glasschale, füllt den Zylinder mit Wasser und stellt ihn auf ein Quecksilberbrett. Durch ein Trichterrohr

gießt man etwas Quecksilber in die Schale. Nachdem man das Trichterrohr wieder herausgenommen hat, stellt man ein langes, gerades Rohr in die mit Quecksilber gefüllte Schale und hält es wie bei V 26 mit einer Federklammer fest (Abb. 44/1). Dann bläst man durch das Rohr und treibt dadurch das über dem Quecksilber stehende Wasser heraus. Das Quecksilber steigt danach im Rohr etwas an. Die Höhe  $h_2$  der über dem Quecksilber in der Schale stehenden Wassersäule und die Höhe  $h_1$  der Quecksilbersäule im Rohr werden an einem hinter das Rohr gestellten Meterstab abgelesen. Sie verhalten sich dann in dieser Reihenfolge wie die Wichte des Quecksilbers zu der des Wassers.

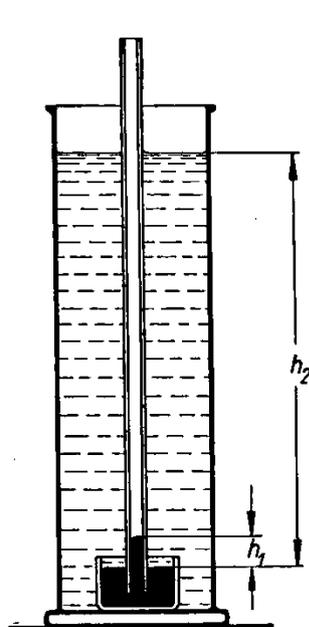


Abb. 44/1. Mit Quecksilber gefülltes Standrohr in Wasser. Analogie zum Gefäßbarometer

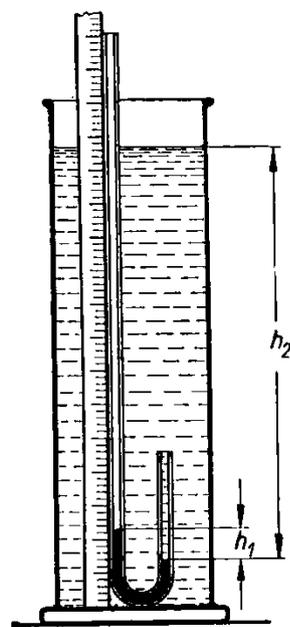


Abb. 44/2. U-Rohr mit Quecksilber, umgeben von Wasser. Analogie zum Heberbarometer

#### Versuch 2:

Wie beim ersten Versuch benutzt man einen mit Wasser gefüllten, auf einem Quecksilberbrett stehenden Standzylinder. In das Wasser taucht man eine am unteren Ende U-förmig gebogene Glasröhre, in die man etwas Quecksilber gegossen hat. Das Quecksilber steigt im langen Schenkel etwas empor (Abb. 44/2). Das Rohr wird wie bei Versuch 1 gehalten. Die Höhe der über dem unteren Quecksilberspiegel stehenden Wassersäule und die Höhe der Quecksilbersäule im langen Rohrschenkel verhalten sich wieder wie die Wichte des Quecksilbers zu der des Wassers.

#### Bemerkungen:

1. In beiden Versuchen handelt es sich um verbundene Gefäße, von denen das eine das andere umschließt.
2. Beide Versuche weisen eine gewisse Analogie zum Gefäß- bzw. Heberbarometer auf. Die Luft wird hier durch das Wasser vertreten.
3. Das im 2. Versuch beschriebene, mit Quecksilber gefüllte Rohr eignet sich auch als Drucksonde.
4. [O] Für die Oberschule schließen sich an den Versuch ähnliche Überlegungen wie die in V 36, Bemerkung 2 und 3, wiedergegebenen an.

### 38. Bestimmung der Wichte von Spiritus durch Vergleich der Saughöhen zweier Flüssigkeiten [O — Ü]

2 Glasrohre ( $\varnothing$  10 mm, Länge 740 mm), T-Stück ( $\varnothing$  9 mm, Schenkel-länge etwa 50 mm), 3 Schlauchstücke ( $\varnothing$  8 mm, Länge 120 mm), Glasrohr ( $\varnothing$  9 mm, Länge 70 mm), Quetschhahn, Stativ mit langem Stab, 2 Klemmen mit Stiel, 5 Muffen, 2 Meterstäbe, 2 Bechergläser (100 ml), Wasser, Spiritus, Thermometer.

#### Versuchsordnung:

Zwei etwa 740 mm lange Glasrohre mit einer lichten Weite von rund 10 mm werden im Abstand von etwa 7 cm lotrecht an einem Stativ befestigt. Man ver-

bindet die oberen Enden der Rohre mit Hilfe zweier Schlauchstücke und eines T-Stückes miteinander. Über den Querschenkel schiebt man ein Schlauchstück, an dessen anderem Ende ein kurzes Glasrohr als Mundstück angesetzt wird. Das Schlauchstück wird durch einen Quetschhahn verschlossen.

Die unteren Enden der Glasrohre läßt man in zwei Bechergläser eintauchen, von denen das eine mit Wasser, das andere mit Spiritus gefüllt wird. Hinter den Rohren werden zwei Meterstäbe mit Hilfe eines kurzen Stativstabes und zweier Muffen an einem Stativ befestigt (Abb. 45/1). Man kann auch statt dessen einen mit einem Zeiger versehenen Meterstab verwenden.

#### Versuch:

Man öffnet den Quetschhahn, saugt am Glasmundstück die beiden Flüssigkeiten bis auf etwa zwei Drittel der Rohrlänge hoch und schließt den Quetschhahn wieder. Man liest die Flüssigkeitsstände in den Bechergläsern und in den Röhren ab und ermittelt durch Differenzbildung die Saughöhe des Wassers  $h_2$  und die des Spiritus  $h_1$ . Der Versuch wird mehrmals mit verschiedenen Saughöhen wiederholt. Die gemessenen Werte werden in eine Tabelle eingetragen.

Der Quotient aus  $h_2$  und  $h_1$  erweist sich als annähernd konstant. Die Steighöhen der Flüssigkeiten verhalten sich umgekehrt wie ihre Wichten:

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{h_2}{h_1}.$$

Da Wasser die Wichte

$$\gamma_2 = 1 \text{ p/cm}^3$$

besitzt, so ist

$$\gamma_1 = 1 \cdot \frac{h_2}{h_1} \text{ p/cm}^3.$$

Aus den Werten der Versuchsreihe wurde die Wichte des Spiritus zu  $0,802 \text{ p/cm}^3$  berechnet.

#### Bemerkungen:

1. An Stelle von Spiritus können auch folgende Versuchsflüssigkeiten verwendet werden: Kochsalzlösungen mit einem Salzgehalt bis zu 20%, Zuckerlösungen mit einem Zucker-gehalt bis zu 60%, Benzin, Petroleum, Paraffinöl, Glycerin.
2. Vgl. V 36, Bemerkungen 2 und 3!

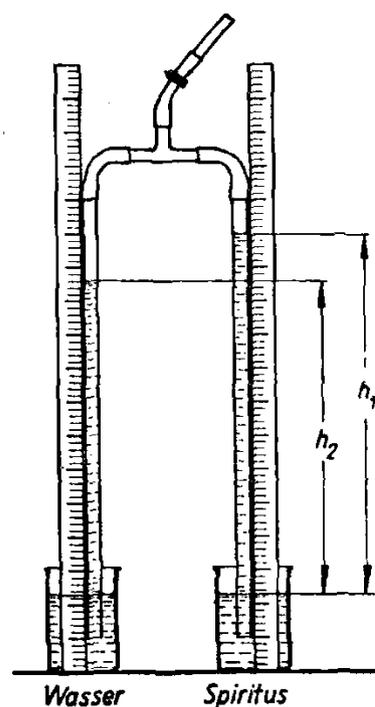


Abb. 45/1. Versuchsanordnung zur Bestimmung der Wichte von Spiritus durch Vergleich der Saughöhen zweier Flüssigkeiten  
 $h_2$  Wasserhöhe  
 $h_1$  Spiritushöhe

#### Beispiel für die Meßwerte beim Ermitteln der Saughöhen von Wasser und Spiritus

Flüssigkeitstemperatur  $19,5^\circ \text{C}$

Wasserhöhe ( $h_2$ ) mm	Spiritushöhe ( $h_1$ ) mm	$\frac{h_2}{h_1}$
521	652	0,799
490	609	0,805
512	639	0,801
366	455	0,804

Mittelwert: 0,802

### 39. Bestimmung der Wichte des Quecksilbers mit Hilfe eines U-Rohres [O – Ü]

U-Rohr (lichte Weite etwa 5 mm, Schenkellängen 600 mm und 200 mm), Stativ mit langem Stab, kurzer Stab, 4 Muffen, 2 Klemmen mit Stiel, 2 Meterstäbe, Quecksilbertropfer, Quecksilber, Wasser, Quecksilberbrett.

Ein U-Rohr mit Schenkellängen von etwa 600 mm und 200 mm und einer lichten Weite von rund 5 mm wird lotrecht an einem Stativ befestigt. Hinter beide Schenkel klemmt man zwei Maßstäbe, auf dem Tisch aufsitzend, an das Stativ. Die ganze Versuchsanordnung stellt man auf ein Quecksilberbrett.

Mit Hilfe eines Quecksilbertropfers füllt man das U-Rohr etwa 8 cm hoch mit Quecksilber. Das Quecksilber steht in beiden Schenkeln gleich hoch. Gießt man in den langen Schenkel luftfreies Wasser, so wird das Quecksilberniveau im kurzen Schenkel etwas gehoben, im langen Schenkel senkt es sich entsprechend (Abb. 46/1). Die im kurzen Schenkel stehende, das untere Quecksilberniveau übertragende Quecksilbersäule hält der im langen Schenkel stehenden Wassersäule das Gleichgewicht. Zur Ermittlung der beiden wirksamen Flüssigkeitshöhen mißt man einzeln die Höhen der drei Flüssigkeitsspiegel über der Tischebene:

- Wasserniveau — Niveauhöhe  $h_a$ ,  
 oberes Quecksilberniveau — Niveauhöhe  $h_b$ ,  
 unteres Quecksilberniveau — Niveauhöhe  $h_c$ .  
 Die Länge der Wassersäule ist dann  $h_2 = h_a - h_c$ ,  
 die Länge der Quecksilbersäule  $h_1 = h_b - h_c$ .

Die Tabelle zeigt als Beispiel die Ergebnisse einer Meßreihe.

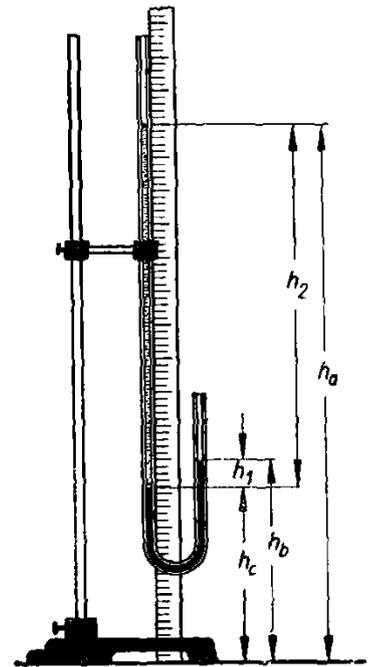


Abb. 46/1. U-förmiges Rohr zur Bestimmung der Wichte des Quecksilbers und anderer Flüssigkeiten

Niveauhöhe über der Tischebene:

- $h_a$  Wasserniveau  
 $h_b$  oberes Quecksilberniveau  
 $h_c$  unteres Quecksilberniveau  
 $h_2$  Länge der Wassersäule  
 $h_1$  Länge der Quecksilbersäule

#### Flüssigkeitshöhen bei einer Wichtebestimmung

Flüssigkeitstemperatur 20° C

Niveauhöhe über der Tischebene			Länge der Wassersäule ( $h_2$ )	Länge der Quecksilbersäule ( $h_1$ )	$\frac{h_2}{h_1}$
Wasserniveau ( $h_a$ ) mm	oberes Quecksilberniveau ( $h_b$ ) mm	unteres Quecksilberniveau ( $h_c$ ) mm			
479	252	234	245	18	13,6
557	255	231	326	24	13,6
659	259	227	432	32	13,5
718	261	225	493	36	13,7
763	263	223	540	40	13,5

Mittelwert: 13,59  $\approx$  13,6

Der Quotient der Wasserhöhe und der Quecksilberhöhe  $\frac{h_2}{h_1}$  ist annähernd konstant, bei der Versuchsreihe im Mittel gleich 13,6. Er gibt die Wichtezahl des Quecksilbers an. Die Wichte selbst ist  $\gamma = 13,6 \text{ p/cm}^3$ .

*Bemerkungen:*

1. Vgl. V 36, Bemerkungen 2 und 3!
2. Bei der Durchführung des Versuchs in Schülerübungen empfiehlt es sich, kein Quecksilber, sondern eine andere Flüssigkeit zu verwenden, die sich mit Wasser nicht mischt und nicht mit ihm chemisch reagiert. Geeignet dafür sind

Bromoform	$\gamma = 2,89 \text{ p/cm}^3$ ,
Chloroform	$\gamma = 1,49 \text{ p/cm}^3$ ,
Schwefelkohlenstoff	$\gamma = 1,27 \text{ p/cm}^3$ .

Doch ist beim Arbeiten mit diesen Stoffen Vorsicht geboten. Man braucht dann zur Durchführung des Versuchs eine U-förmige Röhre mit gleich langen Schenkeln.

## § 5. DER AUFTRIEB

**40. Auftrieb einer luftdicht verschlossenen Blechbüchse oder eines Gummiballs [G]**

Große Blechbüchse mit übergreifendem Deckel, großer Gummiball, Eimer mit Wasser, Leukoplaststreifen oder Isolierband.

An einer durch einen übergreifenden Deckel geschlossenen großen Blechbüchse werden die Fugen verlötet oder mit Leukoplaststreifen bzw. mit Isolierband abgedichtet.

Man versucht, die Büchse in einem mit Wasser gefüllten Eimer unterzutauchen. Der dabei spürbare Widerstand veranschaulicht sehr sinnfällig den Auftrieb. Man kann den Versuch auch mit einem großen Gummiball ausführen.

**41. Modell zur Veranschaulichung des Auftriebs mittels eines Holzquaders [G, O]**

Holzquader (Zigarrenkiste), dünne Holzstäbchen (Speiler).

Man denke sich einen Quader mit den Abmessungen  $60 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  so in eine Flüssigkeit getaucht, daß die längsten Kanten senkrecht verlaufen und die obere Grundfläche  $h_1 = 150 \text{ mm}$  unter dem Flüssigkeitsspiegel liegt. Man fertigt zur Veranschaulichung eine Tafelzeichnung an, die man zu einem Modell ergänzt, indem man den Quader in einer seiner großen Begrenzungsflächen anbohrt und ihn an einem kurzen, in die Tafel geschlagenen Nagel aufhängt (Abb. 47/1). Man erkennt unmittelbar, daß jeder seitlich einwirkenden Druckkraft an der gegenüberliegenden Seitenfläche eine ebenso große, aber in entgegengesetzter Richtung wirkende Druckkraft entspricht. Alle auf die Seitenflächen einwirkenden Druckkräfte heben sich daher in ihrer Gesamtheit auf. Wirksam bleiben nur die auf die Grund- und die Deckfläche einwirkenden Druckkräfte. Es sei  $\gamma$  die Wichte der Flüssigkeit und  $F$  die Größe dieser beiden Flächen. An allen Stellen der Deckfläche hat der Druck  $p_1$  den der Tiefe  $h_1$  entsprechenden Wert  $p_1 = \gamma \cdot h_1$ .

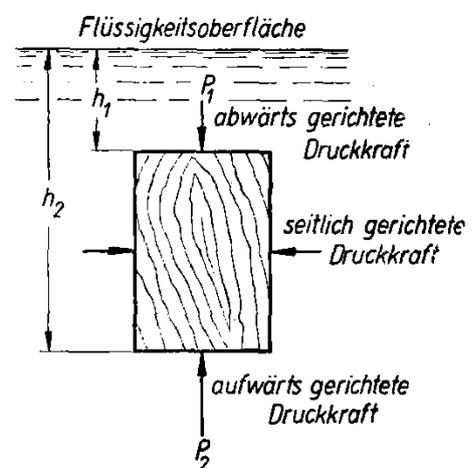


Abb. 47/1. Entwurf eines Tafelbildes zur Veranschaulichung der Verteilung der auf die Oberfläche eines untergetauchten Quaders einwirkenden Druckkräfte

Auf die Deckfläche wirkt daher insgesamt eine im Mittelpunkt angreifende und nach abwärts gerichtete Druckkraft

$$P_1 = F \cdot \gamma \cdot h_1.$$

Eine entsprechende Überlegung zeigt, daß auf die Grundfläche des Quaders eine im Mittelpunkt angreifende und nach oben gerichtete Druckkraft

$$P_2 = F \cdot \gamma \cdot h_2$$

einwirkt.

Man kann diese Druckkräfte modellmäßig veranschaulichen, indem man an dem Quader in den Mittelpunkten der Begrenzungsflächen in vorgebohrten Löchern dünne Holzstäbchen (Speiler) befestigt, deren Längen den Größen  $P_1$  und  $P_2$  der Druckkräfte entsprechen. Die Resultierende dieser beiden Kräfte ist eine nach oben gerichtete Kraft, der Auftrieb

$$A = P_2 - P_1 = F \cdot \gamma (h_2 - h_1).$$

$F (h_2 - h_1)$  ist das Volumen  $V$  des Quaders. Es ist demnach

$$A = \gamma \cdot V.$$

$\gamma \cdot V$  ist aber auch das Gewicht  $G_{Fl}$  einer Flüssigkeitsmenge vom gleichen Volumen wie der Quader. Mithin gilt für den Auftrieb die Gleichung

$$A = G_{Fl}.$$

Der Auftrieb des Quaders ist gleich dem Gewicht der vom Quader verdrängten Flüssigkeitsmenge.

*Bemerkung:* [O] In der Oberschule kann man einen Gedankenversuch anschließen. Denkt man sich irgendeinen abgegrenzten Teil einer ruhenden Flüssigkeit erstarrt, ohne daß sich die Wichte der Flüssigkeit dabei ändert, so wird an dem Gleichgewichtszustand nichts geändert (Abb. 48/1). Man kann sich dann vorstellen, daß die Druckkräfte, die auf die Oberfläche des erstarrt gedachten Teiles durch die umgebende Flüssigkeit ausgeübt werden, den umschlossenen Teil gerade in der Schwebelage halten. Die Resultierende aller von außen einwirkenden Druckkräfte, der Auftrieb  $A$ , muß daher gleich dem Gewicht  $G$  des abgegrenzten Teiles sein und in seinem Schwerpunkt  $S$  senkrecht nach oben wirken.

Ersetzt man den erstarrt gedachten Teil der Flüssigkeit in Gedanken durch irgendeinen festen Körper von gleicher Gestalt, so wird an dem Zustand der umgebenden Flüssigkeit nichts geändert. Sie drückt in derselben Weise wie vorher auf die Oberfläche des Körpers. Er erfährt demnach einen Auftrieb  $A$ , der gleich dem Gewicht der verdrängten Flüssigkeitsmenge ist.

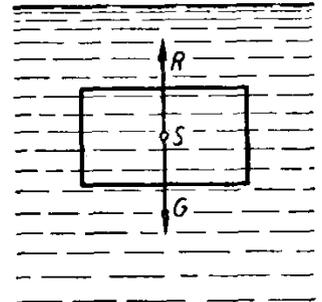


Abb. 48/1. Druckkräfte bei einer abgegrenzten Flüssigkeitsmenge

$S$  Schwerpunkt  
 $G$  Gewicht der abgegrenzten Flüssigkeitsmenge  
 $R$  Resultierende der äußeren Druckkräfte — Auftrieb ( $A$ )  
 $R = G = A$

## 42. Vergleich des Auftriebs und der Wasserverdrängung eines Körpers unter Verwendung einer Federwaage [G — Ü]

Federwaage, Versuchskörper (Gewichtsstück, Stein), Überlaufgefäß, Becherglas, Meßzylinder, Stativ mit Muffe und Querstab, Stativhaken, dünner Faden, Unterlegklötze.

### Vorversuch:

Man hängt einen Versuchskörper, etwa ein Gewichtsstück oder einen Stein, mittels einer Fadenschlinge an eine mit der Hand gehaltene Federwaage und senkt ihn

dann in ein mit Wasser gefülltes Becherglas vollständig ein. Dabei beobachtet man eine Gewichtsverminderung.

*Hauptversuch:*

Man befestigt die Federwaage an einem Stativ und wiederholt den Versuch, wobei man den Körper in ein Überlaufgefäß eintauchen läßt. Das verdrängte Wasser fängt man in einem Meßzylinder auf. Es zeigt sich, daß der Auftrieb, den der eingetauchte Körper erleidet, gleich dem Gewicht der von ihm verdrängten Wassermenge ist. Hierbei wird das Gewicht eines Milliliters Wasser ohne Berücksichtigung der Temperatur näherungsweise als 1 p angenommen. Der Versuch wird mit verschiedenartigen Körpern wiederholt.

**43. Vergleich des Auftriebs und der Wasserverdrängung eines Körpers unter Verwendung einer Balkenwaage [G – Ü]**

Hydrostatische Waage mit verkürzter Waagschale, Tarierebecher, Schrot, Versuchskörper (Gewichtsstück, Stein), dünner Faden, Überlaufgefäß, kleines Becherglas, Salzlösung, Unterlegklötze.

Man ersetzt bei einer Balkenwaage die eine Waagschale durch eine verkürzte Waagschale und hängt ein Gewichtsstück oder einen Stein mit einer Fadenschlinge daran. Auf dieselbe Schale stellt man ein kleines Becherglas und bringt die Waage durch Trieren ins Gleichgewicht (Abb. 49/1). Dann stellt man ein mit Wasser gefülltes Überlaufgefäß unter den Körper und senkt ihn hinein. Das ausfließende Wasser fängt man in dem vorher von der Waagschale genommenen Becherglas auf. Nach dem Einsenken des Körpers überwiegt das Gewicht der Tara. Das Gleichgewicht wird wiederhergestellt, wenn man das mit dem ausgeflossenen Wasser ge-

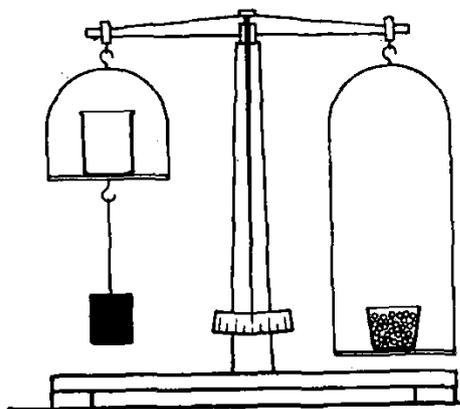


Abb. 49/1. Abwägen eines Körpers auf einer Balkenwaage durch Austarieren

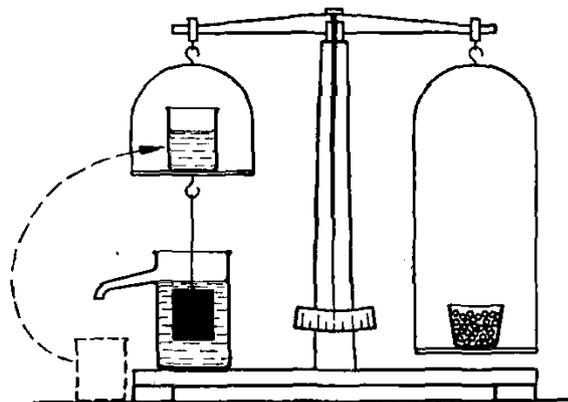


Abb. 49/2. Ausgleichen des Auftriebs durch Aufsetzen der verdrängten Wassermenge auf die Waagschale

füllte Becherglas auf die Waagschale setzt (Abb. 49/2). Damit ist gezeigt, daß der Auftrieb des eingetauchten Körpers gleich dem Gewicht der von ihm verdrängten Wassermenge ist. Bei dem Versuch wird eine Wägung mit Gewichtsstücken vermieden. Der Auftrieb wird unmittelbar durch das Gewicht des verdrängten Wassers veranschaulicht.

*Bemerkung:* Es empfiehlt sich, den Versuch auch mit einer Salzlösung anstatt mit Wasser durchzuführen.

#### 44. Vergleich des Auftriebs und der Wasserverdrängung eines Körpers vermittels einer Tafelwaage [G, O — Ü]

Tafelwaage, großes Becherglas, kleines Becherglas, Tauchkörper mit einer nur wenig über 1 liegenden Wichtezahl (Glas, Stein, Kunstharz), Federwaage, Überlaufgefäß, 3 Trierbecher, Trierschrot, Stativ mit Muffe und Klemme, kurzer Stativstab (250 mm).

Der Versuch ist besonders dazu angetan, die Zusammenhänge zwischen dem Auftrieb eines Körpers und der Wasserverdrängung anschaulich aufzuzeigen. Er ist als Einführungsversuch wie als Bestätigungsversuch in gleicher Weise geeignet. Man führt ihn zweckmäßigerweise in drei Teilversuchen durch. Für die Oberschule ist er besonders lehrreich, da er ein Beispiel für das Wirksamwerden einer Gegenkraft ist (3. Newtonsches Prinzip).

##### Vorversuch:

Man stellt ein mit Wasser gefülltes großes Becherglas auf eine Tafelwaage und tariert es aus. Sodann taucht man von oben her den ausgestreckten Zeigefinger hinein. Die Waagschale senkt sich. Der Ausschlag wird größer, wenn man mehrere Finger oder gar die ganze Faust ins Wasser taucht.

##### Hauptversuch:

1. Man stellt ein Stativ neben eine Tafelwaage und hängt daran über der Waagschale den Tauchkörper an einer Federwaage auf. Auf die Waagschale stellt man ein mit Wasser gefülltes großes Becherglas, auf die Gewichtsschale ein leeres Becherglas und einen Trierbecher. Durch Einfüllen von Trierschrot in den Trierbecher stellt man Gleichgewicht her (Abb. 50/1a). Dann senkt man den Tauchkörper in das Wasser ein. An der Federwaage liest man die Größe des Auftriebs ab. Gleichzeitig

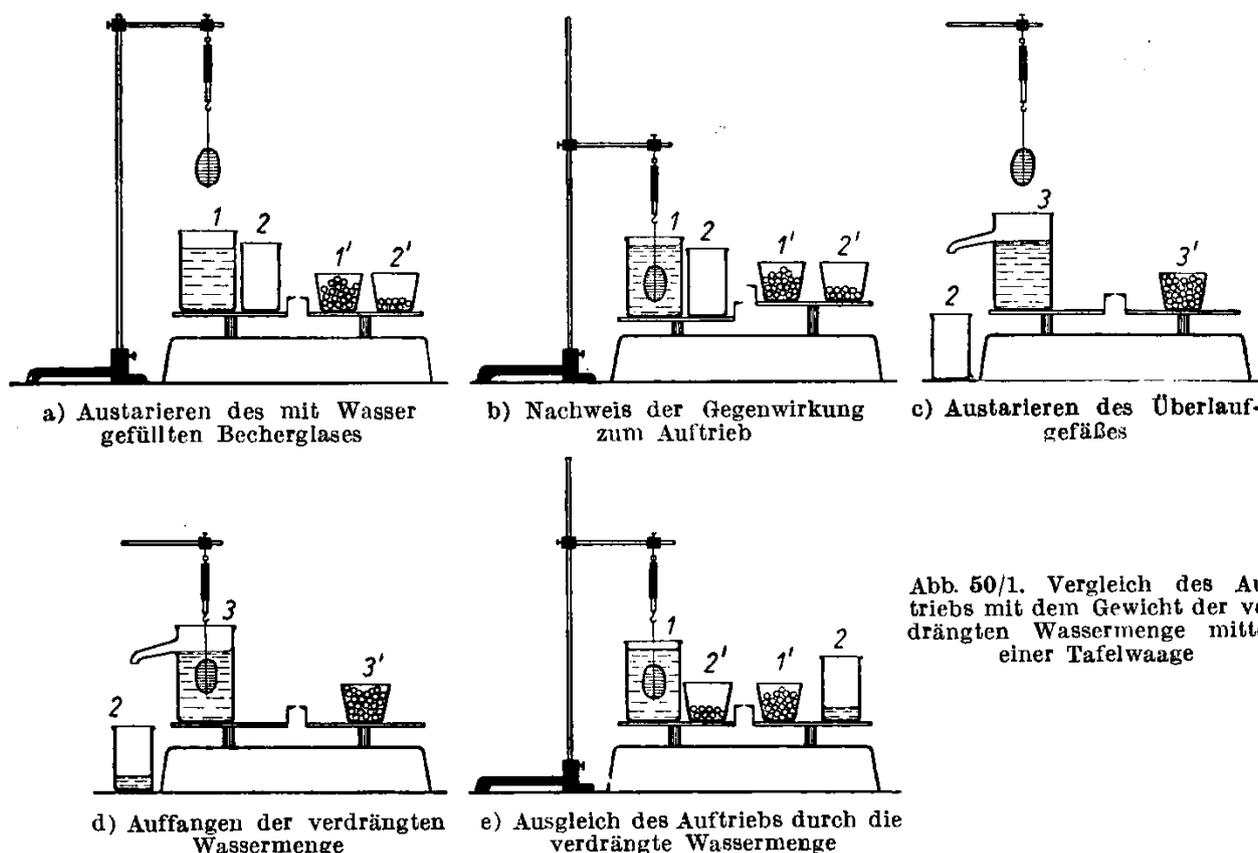


Abb. 50/1. Vergleich des Auftriebs mit dem Gewicht der verdrängten Wassermenge mittels einer Tafelwaage

beobachtet man infolge des Auftretens einer Gegenkraft ein Absinken der Waagschale, auf der das gefüllte Becherglas steht (Abb. 50/1 b).

2. Man hebt den Tauchkörper aus dem Becherglas heraus und nimmt dieses von der Waage, ohne an der Wassermenge etwas zu ändern. Ebenso stellt man die Tara und das leere Becherglas beiseite. Dann stellt man ein gerade bis zum Überlauf gefülltes Überlaufgefäß so auf die Waagschale, daß der Überlauf über den Rand der Waagschale ragt, und tariert es aus (Abb. 50/1 c).

Nunmehr senkt man den Tauchkörper in das Überlaufgefäß ein. Das überlaufende Wasser fängt man auf. Wieder kann man die Größe des Auftriebs an der Federwaage feststellen und ein Senken der Waagschale beobachten. Es läuft so viel Wasser aus dem Überlaufgefäß, wie der Körper verdrängt. Sobald der Ausgleich erreicht ist, geht der Ausschlag der Waage auf Null zurück (Abb. 50/1 d).

3. Zum Schluß wird die 1. Versuchsanordnung noch einmal hergestellt, wobei man wieder den Tauchkörper in das große Becherglas eintauchen läßt. Man gießt das beim 2. Versuch übergelaufene Wasser in das auf der Gewichtsschale stehende leere Becherglas. Dadurch wird das Gleichgewicht wieder hergestellt (Abb. 50/1 e).

Der Versuch zeigt augenfällig, ohne daß eine eigentliche Wägung vorgenommen wird, daß der Auftrieb gleich dem Gewicht der verdrängten Wassermenge ist.

#### 45. Änderung des Gewichts und des Auftriebs einer schwimmenden brennenden Kerze [G, O]

Becherglas, Kerze (Höhe etwa 10 mm).

Man füllt ein Becherglas zur Hälfte mit Wasser und läßt in diesem eine etwa 1 cm hohe Kerze in aufrechter Lage schwimmen. Zündet man die Kerze an, so verkürzt sie sich allmählich. Das Wasser erreicht aber erst die Flamme, wenn das Stearin ganz verbrannt ist. Durch die Verbrennung wird das Gewicht der Kerze geringer, doch verkleinert sich im gleichen Maße auch der Auftrieb. Die Eintauchtiefe vermindert sich und regelt sich selbsttätig so, daß das Gewicht der Kerze und der Auftrieb immer einander gleich sind.

*Bemerkung:* Will man eine etwas längere Kerze verwenden, so muß sie durch einen am Grunde eingelassenen Nagel beschwert werden, damit sie in aufrechter Lage stabil schwimmt. Allerdings wird dadurch auch die Eintauchtiefe etwas vergrößert.

#### 46. Ausbleiben des Auftriebs beim Fehlen des Aufdrucks [G, O]

Wachs, Stearin, Paraffin, großer, von Poren freier Korken, Spiegelglasscheibe, Kachel, Glastrog, Spiritusflamme oder Kerze.

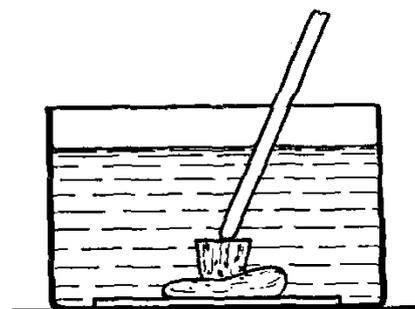
*Herstellen des Versuchsgerätes:*

Über einer Spiritusflamme oder einer Kerzenflamme erwärmt man behutsam etwas Wachs, Stearin oder Paraffin und knetet aus der erweichten Masse einen runden, scheibenartigen Körper mit einem Durchmesser von ungefähr 50 bis 60 mm und einer Dicke von etwa 10 mm. Als Unterlagen benutzt man dabei eine kleine Spiegelglasscheibe oder eine ganz ebene, flache Wandkachel, gegen die man die Knetmasse unter ständiger Bewegung im Kreise drückt. Man erreicht dadurch, daß der entstehende Körper eine möglichst glatte ebene Grundfläche erhält. Als zweckmäßig erweist sich, die Glasscheibe bzw. die Kachel vorher vorsichtig zu erwärmen, damit der Knetkörper besser gleitet.

Solange die Knetmasse noch plastisch ist, drückt man in sie von oben einen großen Korken hinein, dessen Oberfläche möglichst frei von Poren und anderen Öffnungen ist. Er erhält auf diese Weise eine Grundplatte mit ganz ebener Grundfläche, mit der er auf der Unterlage fugenlos aufliegt



a) Herstellen des Versuchskörpers aus Kork und Wachs



b) Der Versuchskörper bleibt unter Wasser am Boden liegen

Abb. 52/1. Ausbleiben des Auftriebs bei einem Korken

(Abb. 52/1a). Man faßt die entstandene Vorrichtung am Korken an und hebt sie von der Glasplatte ab, ohne die ebene Grundfläche dabei zu beschädigen.

#### Versuch:

Man legt die als Knetunterlage benutzte Glasscheibe bzw. Kachel in einen mit Wasser gefüllten Glastrog. Taucht man den Versuchskörper ebenfalls unter Wasser und läßt ihn los, so schnell er infolge seines starken Auftriebes empor und schwimmt.

Drückt man dagegen den Versuchskörper mit seiner glatten Grundfläche unter ständiger kreisender Bewegung gegen die Unterlage und läßt ihn dann vorsichtig los, so steigt er nicht empor, obwohl er eine weit geringere Wichte hat als die des Wassers. Da sich jetzt kein Wasser unter dem Versuchskörper befindet, wird der Aufdruck nicht wirksam; ein Auftrieb kommt nicht zustande (Abb. 52/1b).

Lagert man die Unterlage ein wenig geneigt, so folgt der Versuchskörper dem von unten her überwiegenden Seitendruck und gleitet allmählich nach oben. Sobald seine Grundfläche über die Unterlage hinausragt, steigt er empor.

#### Bemerkungen:

1. Als Versuchskörper sind kleine Büchsen aus Bakelit oder einem anderen Kunstharz sehr geeignet, wie sie häufig als Behälter für Salben, Hautcreme, Suppengewürze oder dgl. verwendet werden. Voraussetzung ist das Vorhandensein einer ganz ebenen, glatten Grundfläche, die aber diese kleinen Büchsen meist aufzuweisen haben.
2. Steht genügend Quecksilber zur Verfügung, so kann man den Versuch auch in folgender Form durchführen:

In einer Glasschale mit ebenem Boden drückt man einen Gummistopfen mit seiner größeren Grundfläche gegen den Boden. Man gießt dann Quecksilber, das ja nicht benetzt, ins Gefäß, bis es die obere Fläche des Gummistopfens überdeckt. Läßt man diesen los, so bleibt er wegen des fehlenden Auftriebs am Boden liegen.

### 47. Bestimmung der Wichte fester Körper mittels des Auftriebs in Wasser [G, 0 – Ü]

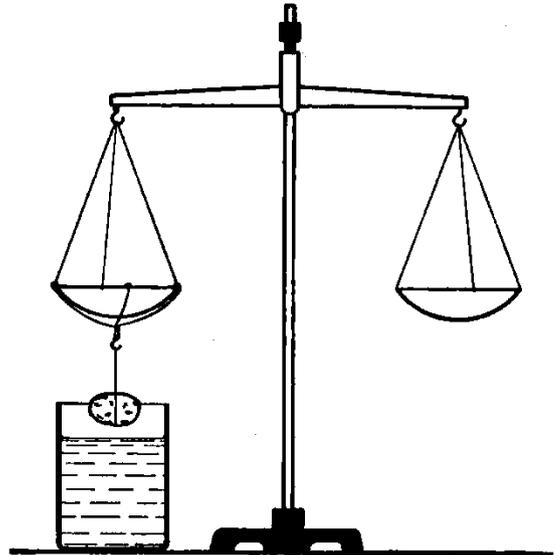
Hydrostatische Waage (verstellbare Hornschalenwaage mit Aufhängevorrichtung), Gewichtssatz, Versuchskörper von unregelmäßiger Form (Metallstücke, Steine, Paraffin), Draht für Aufhängevorrichtung ( $\varnothing 1 \text{ mm}$ ), dünner Draht, Becherglas mit Wasser, Stativ, Stabmuffe, Parallelmuffe.

Bei dem Versuch wird das Volumen eines Versuchskörpers aus dem Auftrieb bestimmt, den der Körper in Wasser erleidet.

Abb. 53/1. Versuchsanordnung zur Bestimmung der Wichte fester Körper mittels des Auftriebs in Wasser

Abb. 53/1 zeigt die Versuchsanordnung bei Verwendung einer verstellbaren Hornschalenwaage.

Die Versuchskörper werden an dünnen Drähten aufgehängt. Es ist nützlich, beim ersten Versuch die einzelnen Schritte ausführlich anzugeben. Bei der sprachlichen Formulierung ist darauf zu achten, daß der Auftrieb eine Kraft ist, also in Pond gemessen wird. Die Beziehung zum Volumen des Körpers ergibt sich daraus, daß das Gewicht von 1 ml Wasser gleich 1 p gesetzt wird.



*Beispiel für die Durchführung des Versuchs:*

Gewicht des Bleistückes in Luft	$G_1 = 141,2 \text{ p,}$
Gewicht des Bleistückes in Wasser	$G_2 = 128,7 \text{ p,}$
Gewichtsverlust oder Auftrieb des Bleistückes	$G_1 - G_2 = 12,5 \text{ p.}$
Das Bleistück hat demnach das Volumen	$V = 12,5 \text{ cm}^3.$

Da die Wichte eines Körpers gleich dem Quotienten aus seinem Gewicht und seinem Volumen ist, ergibt sich als Wichte des Bleis

$$\gamma = \frac{G_1}{V} = \frac{141,2}{12,5} \text{ p/cm}^3 \approx 11,3 \text{ p/cm}^3.$$

Zum Unterschied von der dimensionierten Wichte ist die dimensionslose Wichtezahl eine reine Verhältniszahl:

$$\text{Wichtezahl} = \frac{\text{Gewicht des Körpers in Luft}}{\text{Gewichtsverlust des Körpers in Wasser}} = \frac{G_1}{G_1 - G_2}.$$

*Bemerkungen:*

1. Die eine Schale der Hornschalenwaage ist mit einer Aufhängevorrichtung für den Versuchskörper zu versehen (Abb. 53/2). Diese fertigt man aus einem etwa 1 mm starken Draht an. Bei einem Schalendurchmesser von 90 mm braucht man drei etwa 110 mm lange Drahtstücke. Diese werden an dem einen Ende auf eine Länge von etwa 30 mm so verflochten und verlötet, daß ein Draht etwas herausragt. Dieses Ende wird zu einem Haken umgebogen. Die anderen Drahtenden werden auf gleiche Länge abgeglichen und so gebogen, daß sie sich der Rundung der Schale anpassen und durch Endhaken an ihr befestigt werden können. Das Gleichgewicht wird durch Trieren hergestellt.
2. Bei Körpern mit geringerer Wichte als der des Wassers, z. B. einem Stück Paraffin, verfährt man so, daß man den Versuchskörper mit einem Stück Metall durch einen feinen Faden zusammenbindet. Man wägt vorher jeden Körper einzeln in Luft, bestimmt den Auftrieb der miteinander verbundenen Körper und den des Metallstückes für sich. Der Auftrieb des Versuchskörpers ergibt sich dann durch Differenzbildung aus dem Auftrieb des zusammengesetzten Körpers und dem des Metallstückes.

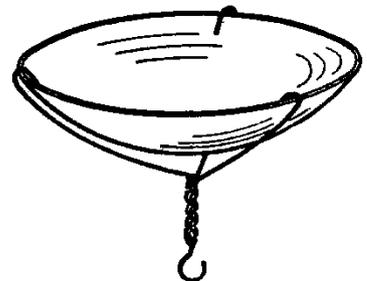


Abb. 53/2. Schale einer Hornschalenwaage mit Aufhängevorrichtung

#### 48. Ermittlung der Wichte einer Flüssigkeit durch Bestimmen des Auftriebs eines festen Körpers [G, 0 — Ü]

Balkenwaage mit Einrichtung für hydrostatische Versuche (vgl. MB. S. 9), Gewichtssatz, Vergleichskörper aus Metall oder Glas, dünner Draht, Becherglas, Wasser, Salzlösung, Brennspritus.

Der Versuch besteht darin, daß man den Auftrieb eines Vergleichskörpers in der zu untersuchenden Flüssigkeit und in Wasser bestimmt und die Wichtezahl der Versuchsflüssigkeit als Quotienten aus dem Auftrieb  $A_1$  des Körpers in der Versuchsflüssigkeit und seinem Auftrieb  $A_2$  in Wasser berechnet:

$$\text{Wichtezahl} = \frac{\text{Auftrieb in der Flüssigkeit}}{\text{Auftrieb in Wasser}} = \frac{A_1}{A_2}.$$

*Bemerkung:* Bei der mathematischen Begründung des Verfahrens geht man von der Tatsache aus, daß der Auftrieb  $A$  eines Körpers in einer Flüssigkeit gleich dem Gewicht  $G_{Fl}$  der verdrängten Flüssigkeitsmenge, mithin gleich dem Produkt aus dem Volumen  $V$  der Flüssigkeit und ihrer Wichte  $\gamma$  ist. Es gilt also

für den Auftrieb in der Versuchsflüssigkeit  $A_1 = G_{Fl_1} = V \cdot \gamma_1$ ,  
für den Auftrieb in Wasser  $A_2 = G_{Fl_2} = V \cdot \gamma_2$ .

Mithin ist  $\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{A_1}{A_2}$  und  $\gamma_1 = \gamma_2 \frac{A_1}{A_2}$ .

Da die Wichte des Wassers  $\gamma_2 = 1 \text{ p/cm}^3$  ist, ergibt sich für die Wichte der Versuchsflüssigkeit

$$\gamma_1 = 1 \cdot \frac{A_1}{A_2} \text{ p/cm}^3.$$

Die Wichtezahl der Versuchsflüssigkeit ist  $\frac{A_1}{A_2}$ .

#### 49. Bestimmung der Wichte einer Flüssigkeit mit Hilfe der Mohrschen Waage für Wichteahlen zwischen 0 und 2 [0 — Ü]

1 Mohrsche Waage,

1 Glaskörper mit eingebautem Thermometer (Auftrieb in Wasser  $G$ ),

2 Reiter je mit dem Gewicht  $G$  (bezeichnet als  $\frac{1}{1}$ -Reiter),

1 Reiter mit dem Gewicht  $\frac{G}{10}$  (bezeichnet als  $\frac{1}{10}$ -Reiter),

1 Reiter mit dem Gewicht  $\frac{G}{100}$  (bezeichnet als  $\frac{1}{100}$ -Reiter),

Standzylinder,

Versuchsflüssigkeiten: destilliertes Wasser bei verschiedenen Temperaturen, Spiritus, Benzin, Petroleum, Kalilauge oder Natronlauge von verschiedener Konzentration, wäßrige Kochsalz- und Kupfervitriollösungen.

Der Glaskörper wird an einen Haken am äußeren Ende des Waagebalkens gehängt, der durch Kerben in 10 gleiche Teile unterteilt ist. Durch das am anderen Ende des Waagebalkens befindliche Gegengewicht wird der Ausschlag kompensiert. Durch Drehen der Einstellschraube am Fuß der Waage wird erreicht, daß die Zungenmarke genau einspielt (Abb. 55/1). Dann wird der Meßzylinder mit Wasser gefüllt und der Glaskörper vollständig eingetaucht. Er erfährt dadurch einen Auftrieb, der durch einen an denselben Haken gehängten  $\frac{1}{1}$ -Reiter ausgeglichen wird. Ersetzt man das Wasser durch eine andere Flüssigkeit mit einer zwischen 1 und 2 liegenden Wichteahl, so genügt der am Haken hängende  $\frac{1}{1}$ -Reiter nicht mehr zum Ausgleich

des Auftriebs. Man hängt den zweiten  $\frac{1}{1}$ -Reiter, von innen nach außen vorgehend, in die einzelnen Kerben des Waagebalkens und beläßt ihn in der letzten Kerbe, bei der noch ein Auftrieb zu beobachten ist. Ebenso verfährt man mit dem  $\frac{1}{10}$ -Reiter und dem  $\frac{1}{100}$ -Reiter. Man

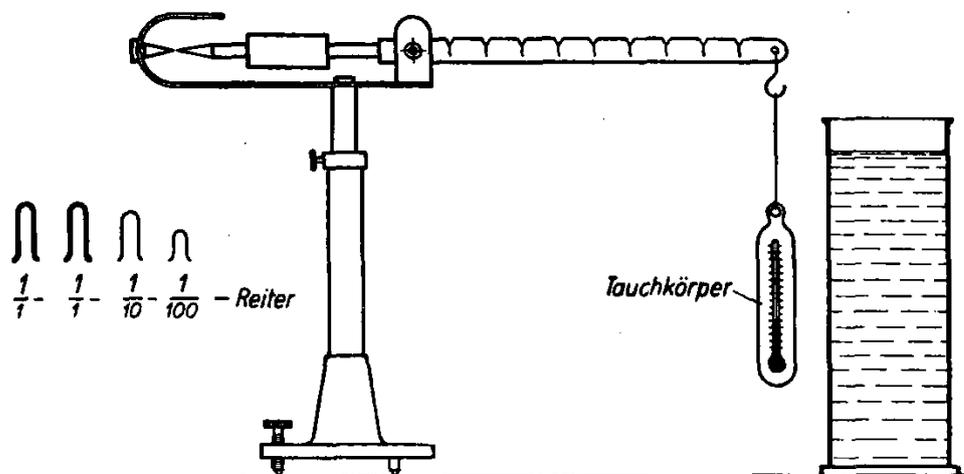


Abb. 55/1. Mohrsche Waage

kann dann die Wichtezahl der Versuchsflüssigkeit aus der Reiterstellung unter Berücksichtigung der Reitergröße unmittelbar ablesen.

*Beispiel:*

Erster	$\frac{1}{1}$ -Reiter am Endhaken	.....	Anteil an der Wichtezahl: 1
zweiter	$\frac{1}{1}$ -Reiter in Kerbe 7	.....	Anteil an der Wichtezahl: 0,7
	$\frac{1}{10}$ -Reiter in Kerbe 2	.....	Anteil an der Wichtezahl: 0,02
	$\frac{1}{100}$ -Reiter in Kerbe 5	.....	Anteil an der Wichtezahl: 0,005
	Wichte der Versuchsflüssigkeit		1,725 p/cm <sup>3</sup>

Bei Flüssigkeiten mit einer Wichtezahl unter 1 verfährt man ebenso, nur entfällt dabei das Anhängen des ersten  $\frac{1}{1}$ -Reiters an den Aufhängehaken des Tauchkörpers.

*Bemerkungen:*

- Zur Erklärung der Wirkungsweise der Mohrschen Waage wird man die Schüler auf folgende Zusammenhänge hinweisen. Der Auftrieb  $G_1$ , den der Tauchkörper in der Flüssigkeit erfährt, ist gleich dem Produkt aus der Wichte  $\gamma_1$  und dem Volumen  $V$  der verdrängten Flüssigkeit:  $G_1 = V \cdot \gamma_1$ . Er wird ausgeglichen durch die Reitergewichte. Legt man das oben gewählte Beispiel zugrunde, so ist das am Ende des Waagebalkens wirksame Gesamtgewicht  $G_1$  unter Berücksichtigung des Hebelgesetzes

$$\begin{aligned} G_1 &= G + 0,7 \cdot G + 0,2 \cdot \frac{G}{10} + 0,5 \cdot \frac{G}{100} \\ &= G + 0,7 \cdot G + 0,02 \cdot G + 0,005 \cdot G \\ &= 1,725 G. \end{aligned}$$

Da das Gewicht  $G$  des Tauchkörpers gleich seinem Auftrieb in Wasser ist, ist die Wichtezahl der Flüssigkeit

$$\begin{aligned} \frac{G_1}{G} &= 1,725. \text{ Demnach ist die Wichte selbst} \\ \gamma_1 &= 1,725 \text{ p/cm}^3. \end{aligned}$$

2. Wasser hat nur bei  $4^{\circ}\text{C}$  die Wichtezahl 1. Sollte die Versuchstemperatur davon abweichen, so besagt das Meßergebnis nur, daß die Wichtezahl der Meßflüssigkeit  $\frac{G_1}{G}$  mal so groß ist wie die Wichtezahl des Wassers bei der gemessenen Temperatur.
3. Messungen an der Mohrschen Waage eignen sich ausgezeichnet für Schülerübungen.

### 50. Vorversuch zur Untersuchung der Schwimmfähigkeit eines Körpers [G, O]

Stein, kleiner Holzklötz, Waage, Gewichtssatz, Überlaufgefäß, kleines Becherglas, Tarierbecher, Tarierschrot, steifer Draht, dünner Faden.

Durch den Versuch wird in quantitativer Weise ein Vergleich zwischen dem Gewicht eines festen Körpers und seinem Auftrieb im Wasser ermöglicht. Es soll dadurch das Verständnis für die Schwimmvorgänge vorbereitet werden. Als Versuchskörper wählt man einen Stein und einen kleinen Holzklötz, die beide in ein Überlaufgefäß hineinpassen müssen.

#### *Versuch 1:*

Man wägt den Stein, hängt ihn an einen dünnen Faden und senkt ihn in ein gefülltes Überlaufgefäß. Das überlaufende Wasser fängt man in einem vorher austarierten Becherglas auf und wägt es. Sein Gewicht erweist sich geringer als das Gewicht des Steins. Der Stein sinkt infolgedessen zu Boden.

#### *Versuch 2:*

Man wägt den Holzklötz ab und legt ihn in das gefüllte Überlaufgefäß, so daß er auf dem Wasser schwimmt. Wieder fängt man die überlaufende Wassermenge in einem vorher austarierten Becherglas auf und wägt sie. Den Holzklötz läßt man dabei im Überlaufgefäß liegen. Man erkennt, daß das Gewicht des schwimmenden Holzklötzes gleich dem Gewicht der verdrängten Wassermenge ist.

#### *Versuch 3:*

Man stellt das Becherglas mit dem übergelaufenen Wasser wieder unter das Überlaufgefäß und taucht den Holzklötz mit Hilfe eines steifen Drahtes ganz unter die Wasseroberfläche. Es läuft noch mehr Wasser aus. Das Gewicht des übergelaufenen Wassers erhöht sich dadurch. Es ist nach Eintritt des Ausgleichs größer als das Gewicht des Holzklötzes. Nach der Wegnahme des Drahtes steigt der Holzklötz wieder empor.

Aus den Versuchen geht hervor: Ein in Wasser vollständig untergetauchter Körper sinkt zu Boden oder steigt empor, je nachdem, ob sein Gewicht größer oder kleiner ist als das der verdrängten Wassermenge.

### 51. Absinken, Aufsteigen, Schweben einer geschlossenen Flasche in Abhängigkeit vom Gewicht [G, O]

Kleine Stöpselflasche, Glasperlen, Bleischrot, Sand, Glastrog.

Der Versuch ist als Einführungsversuch zur Unterscheidung des Aufsteigens, Schwimmens, Absinkens, Schwebens besonders geeignet, da er sämtliche Erscheinungen unter gleichen Vorbedingungen zeigt. Bei allen Versuchen ist der Rauminhalt des Versuchskörpers, einer kleinen Stöpselflasche, mithin auch der Auftrieb der gleiche. Durch Einfüllen von Sand, Bleischrot, Glasperlen oder dgl. kann man

das Gewicht verändern und so ohne große Mühe die drei charakteristischen Fälle vorführen:

- a) Die kleine zugestöpselte Flasche schwimmt, horizontal liegend, auf dem Wasser. Ihr Gewicht ist kleiner als der Auftrieb.
- b) Die gefüllte Flasche sinkt unter und bleibt auf dem Grunde stehen. Ihr Gewicht ist größer als der Auftrieb.
- c) Durch Abgleichen des Ballastes kann man es erreichen, daß die Flasche im Wasser schwebt. Ihr Gewicht ist dann gleich dem Auftrieb.

*Bemerkung:* Man kann den Versuch c dadurch in interessanter Weise abändern, daß man ihn zunächst mit Wasser von Zimmertemperatur durchführt. Dann ersetze man das Wasser durch warmes Wasser, sodann durch kaltes Wasser, dessen Temperatur erheblich unter der Zimmertemperatur liegt. Im warmen Wasser steigt der Versuchskörper, im kalten sinkt er unter.

## 52. Bestätigung des Archimedischen Prinzips mit Hilfe gleich großer Stücke von Profilstäben [G, O]

Hydrostatische Waage (vgl. MB, S. 9), Tarierbecher, Schrot, verschiedene Versuchskörper von gleichem Volumen (gleich große Stücke Eisen, Messing, Aluminium oder Kunststoff), dünner Draht, Becherglas mit Wasser.

Der Versuch soll veranschaulichen, daß Körper von gleichem Volumen ohne Rücksicht auf die Art des Stoffes im Wasser denselben Auftrieb erfahren.

Man hängt an eine Schale einer Balkenwaage ein Stück Flacheisen und belastet die andere Schale mit einem ebensolchen Eisenstück von gleicher Größe. Dann senkt man das hängende Stück in ein Becherglas mit Wasser ein und gleicht den Auftrieb durch Tarieren aus. Wenn man den entsprechenden Versuch mit zwei Messingstücken wiederholt, die dieselben Abmessungen haben wie die Eisenstücke, so bleibt die Tara unverändert. Der Auftrieb ist demnach in beiden Fällen der gleiche.

Der Versuch läßt sich mannigfach abändern, indem man auf jeder Seite der Waage mehrere Versuchskörper aus verschiedenen Stoffen verwendet. Es zeigt sich immer wieder, daß der Auftrieb der gleiche ist, ganz unabhängig davon, ob man auf jeder Seite zwei gleichartige oder zwei ungleichartige Stücke gleicher Größe verwendet. Der Auftrieb von Körpern im Wasser hängt nur vom Volumen der eingesenkten Körper ab.

## 53. Behelfsmäßig hergestellter kartesianischer Taucher [G — Ü]

Glasrohr mit angeblasener Kugel (Länge etwa 120 mm), kurzes Tablettenröhrchen (etwa 60 mm lang), einfach durchbohrter Stopfen zum Tablettenröhrchen passend, kurzes Glasrohr (etwa 70 mm lang), hoher Standzylinder, Gummihaut, einfach durchbohrter dicker Korken zum Standzylinder passend, kurzes Glasrohr, Verbindungsschlauch, Aromaröhrchen, Seltersflasche mit Hebelverschluß.

*Herstellen eines behelfsmäßigen kartesianischen Tauchers:*

Der als Spielzeug bekannte kartesianische Taucher besteht aus einer gläsernen Hohlfigur, die meist die Gestalt eines kleinen Teufels hat. Der kartesianische Taucher vermittelt eine Reihe lehrreicher Zusammenhänge, so daß es sich lohnt, das Gerät behelfsmäßig herzustellen.

*1. Ausführung:*

Man bläst das eine Ende einer Glasröhre zu einer kleinen Kugel auf und schneidet die Röhre auf etwa 120 mm ab. Die Schnitttränder schmilzt man stumpf (Abb. 58/1 a). Man führt das Rohr mit der Öffnung nach unten in Wasser ein, so daß ein wenig davon eindringt. Das Röhrchen soll in aufrechter Stellung so im Wasser schwimmen, daß es mit seinem Scheitel gerade noch die Wasseroberfläche berührt. Sollte es noch zu viel Luft enthalten, so bringt man diese vor dem Einführen des Röhrchens in das Wasser durch Erwärmen mit der Hand zur Ausdehnung, so daß etwas Luft entweicht und mehr Wasser eintreten kann.

*2. Ausführung:*

Man benutzt dazu ein Tablettenröhrchen mit einer Länge von etwa 60 mm. Das Glas verschließt man mit einem einfach durchbohrten Korken. Man führt ein etwa 80 mm langes Glasröhrchen so ein, daß es noch über dem Korken nach innen hineinragt. Man füllt vorher so viel Schrotkugeln in das Tablettenröhrchen, daß der Körper in stabiler aufrechter Lage im Wasser schwimmt und wie bei der 1. Ausführung mit seinem Scheitel gerade die Wasseroberfläche berührt. Das Wasser soll dabei von unten her etwa bis zur Hälfte in das Rohr eindringen (Abb. 58/1 b).

*Versuch:*

Man füllt einen hohen Standzylinder fast ganz mit Wasser und führt den Tauchkörper mit der Öffnung nach unten ein. Die Öffnung des Zylinders verschließt man mit einer Gummimembran, die man darüber spannt und festbindet (Abb. 58/1 c). Drückt man mit der Hand gegen die Gummimembran, so pflanzt sich der dadurch im Zylinder hervorgerufene Druck durch das Wasser bis in das Innere des Tauchkörpers fort. Die im Tauchkörper befindliche Luft wird dadurch etwas komprimiert; das Volumen verkleinert sich. Der Auftrieb des Tauchkörpers nimmt infolgedessen so stark ab, daß der Tauchkörper sinkt. Vermindert man danach den Druck gegen die Gummimembran, so dehnt sich die Luft im Tauchkörper wieder aus. Dieser steigt infolgedessen empor. Man kann den Druck so regeln, daß der Tauchkörper im Wasser schwebt.

Anstatt mit einer Gummimembran kann man die Öffnung des Standzylinders auch mit einem dicken Korken verschließen. Durch ihn wird ein kurzes Glasröhrchen geführt, an das man einen Verbindungsschlauch anschließt. Bläst man in den Schlauch, so vergrößert man dadurch den Innendruck; läßt man die Luft austreten, so sinkt er wieder ab. Mitunter genügt es auch, den Standzylinder mit dem bloßen Handballen abzudecken und durch den Druck des Handballens den Taucher zum Sinken zu bringen, wobei man vorsichtigerweise das Gefäß mit der anderen Hand festhalten muß.

*Freihandversuch:*

Man kann den kartesischen Taucher in einem Freihandversuch vorführen, indem man ein Aromaröhrchen mit der Öffnung nach unten in eine mit Wasser gefüllte Seltersflasche mit einem guten Gummiverschluß einsenkt. Unter Umständen

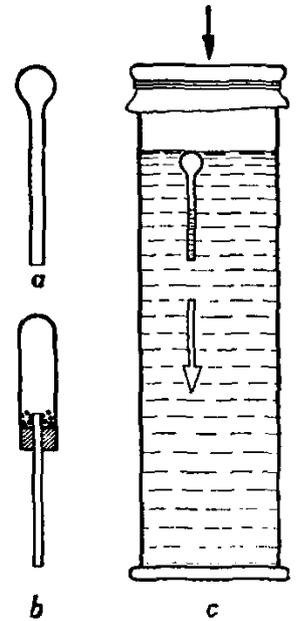


Abb. 58/1. Behelfsmäßig hergestellter kartesischer Taucher  
 a) Glasröhrchen mit angeblasener Kugel  
 b) Kurzes Tablettenröhrchen mit Steigröhrchen  
 c) Durchföhrung des Versuches

muß man vorher etwas Wasser in das Röhrchen füllen, so daß es in aufrechter Lage gerade noch schwimmt. Schließt man die Flasche, so sinkt das Röhrchen ab, beim Öffnen der Flasche steigt es wieder empor. Auch hier kann man es durch behutsames Verstellen des Verschlusses erreichen, daß das Röhrchen im Wasser schwebt.

#### 54. Kaltwasserschwimmer [O]

Kleines Medizinfläschchen, gut dazu passender zylindrischer Korkstöpsel, Glastrog, Schrotkörner.

Man füllt einen Glastrog mit etwa 37° C warmem Wasser. In ein kleines Medizinfläschchen füllt man einige Schrotkörner, setzt es in das Wasser und fügt weiter so lange Schrot hinzu, bis der Wasserspiegel die Kante des Medizinfläschchens erreicht hat. Nun hebt man es aus dem Wasser und gibt noch ein Korn dazu. Das Fläschchen würde jetzt im Wasser untersinken.

Man verstößt es so, daß der Stöpsel noch mit dem größten Teil seiner Länge herausragt. Legt man das Fläschchen so verstößt wieder auf das Wasser, dann wird es gerade noch schwimmen. Nunmehr drückt man den Stöpsel versuchsweise vorsichtig so weit in das Fläschchen hinein, bis es ganz langsam zu sinken beginnt. Kühlt sich das Wasser ab, so steigt seine Dichte. Dadurch bedingt wird der Auftrieb des Fläschchens immer größer und schließlich beginnt das auf dem Boden auf sitzende Fläschchen wieder zu steigen. Erwärmt man das Wasser wieder langsam, so beginnt das Fläschchen wegen der Abnahme der Dichte wieder zu sinken. Die Empfindlichkeit der Anordnung ist so groß, daß schon bei geringen Temperaturdifferenzen ein Wechsel auftritt, so daß die Dichteänderung des Wassers für diese geringe Temperaturdifferenz sehr eindrucksvoll nachgewiesen werden kann.

#### 55. Modellversuch zum Schwimmen eines festen Körpers [G, O]

Großes Becherglas, Wachs- oder Stearinkugel, Holzkugel, Eisenkugel (Ø etwa 10 mm), feinkörniger, trockener Sand.

Man legt auf den Boden eines großen Becherglases eine Wachs- oder eine Stearinkugel, eine Holzkugel und eine Eisenkugel von annähernd gleichem Durchmesser und füllt das Glas zur Hälfte mit feinkörnigem, trockenem Sand. Schüttelt man kurze Zeit das Glas hin und her oder klopft man mit einem Holzstück behutsam gegen die Wandung des Glases, so werden die Wachs- und die Holzkugel bald an der Sandoberfläche sichtbar.

Die Wachskugel liegt vollständig frei auf dem Sand, während die Holzkugel etwa mit drei Viertel ihres Volumens aus dem Sand herausragt (Abb. 59/1). Mit einem dünnen Stäbchen tastet man die Lage der Eisenkugel ab. Sie ist am Boden des Glases liege geblieben.

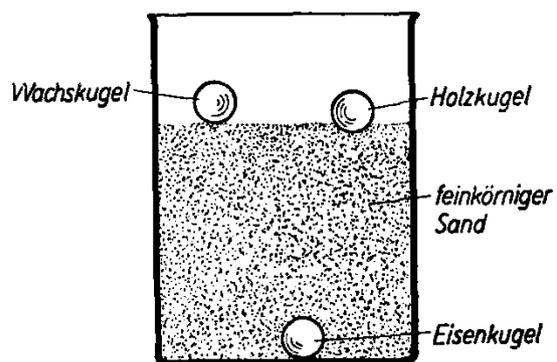


Abb 59/1. Modellversuch zum Schwimmen eines Körpers

*Bemerkungen:*

1. Da die Wichte des Sandes größer ist als die der Wachs- und der Holzkugel, erfahren die Kugeln einen Auftrieb, der größer ist als ihr Gewicht. Sie steigen daher an die Oberfläche auf. Die Eisenkugel bleibt infolge ihrer größeren Wichte am Boden liegen.
2. Man kann den Versuch auch in umgekehrter Reihenfolge ausführen, indem man alle drei Kugeln auf die Sandoberfläche legt. Beim Schütteln des Glases sinkt die Eisenkugel zu Boden, während die Wachs- und die Holzkugel auf dem Sand „schwimmen“.
3. Der Versuch soll zeigen, daß der Auftrieb nicht eine Eigenschaft flüssiger und gasförmiger Körper an sich, sondern eine Auswirkung der Schwerkraft ist.

**56. Schwimmen von Metallkugeln auf Quecksilber [G, O]**

2 oder mehrere Metallkugeln aus Eisen und Messing mit gleichen Durchmessern, flache Glasschale, Quecksilber, Quecksilberbrett, Stativ mit Plattenklemme, Holzleiste.

Man füllt über einem Quecksilberbrett eine flache Glasschale fast ganz mit Quecksilber und legt die beiden gleich großen Metallkugeln unmittelbar nebeneinander auf das Quecksilber. Sie schwimmen auf ihm mit einer geringen Tauchtiefe. Es zeigt sich, daß die Messingkugel infolge ihrer größeren Wichte etwas tiefer eintaucht als die Eisenkugel. Man kann dies leicht erkennbar machen, wenn man eine Holzleiste waagrecht so darüberklemmt, daß sie die Eisenkugel gerade berührt (Abb. 60/1). Sehr überzeugend läßt sich die Verschiedenheit der Eintauchtiefe mit Hilfe der Schattenprojektion deutlich machen.

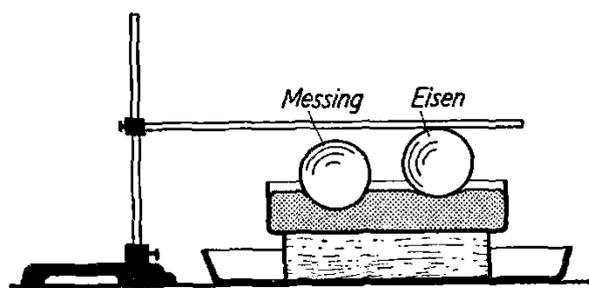


Abb. 60/1. Schwimmen zweier Metallkugeln auf Quecksilber

**57. Schwimmfähigmachen eines nicht schwimmenden festen Körpers [G — Ü]**

Quadratische Blechscheibe (70 mm × 70 mm), Korken (∅ etwa 20 mm), Glastrog.

- a) *Schwimmfähigmachen durch Verwenden eines schwimmenden Körpers als Träger:*

Man schneidet einen zylindrischen Flaschenkorken in drei gleich große Scheiben, die man in Dreieckanordnung auf das Wasser legt. Als nicht schwimmenden Körper verwendet man eine quadratische Blechscheibe und legt sie auf die Korkscheiben. Sie wird von den Korkscheiben getragen. Die Scheibe wird dann unmittelbar auf die Wasseroberfläche gelegt. Sie sinkt zu Boden.

- b) *Schwimmfähigmachen durch Hohlraumbildung:*

Man biegt den Rand der Scheibe mit einer Flachzange ringsherum um 10 mm nach oben. Die Scheibe erhält dadurch etwa die Form eines quadratischen Schachteldeckels (Abb. 60/2). Legt man die Scheibe wieder auf die Wasseroberfläche, so schwimmt sie.

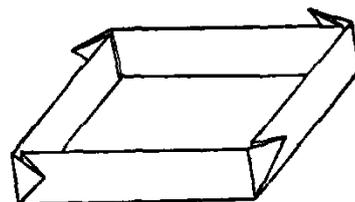


Abb. 60/2. Durch Hohlraumbildung schwimmfähig gemachte Blechscheibe

*Technische Verwendungen:*

- zu a) Flöße, Rettungsringe, Rettungsbälle, Rettungsboote mit Sinkschutz, Heben gesunkener Schiffe durch Anbringen von Luftsäcken,  
 zu b) alle Schiffe, insbesondere eiserne Schiffe, auch Fähren, Schwimmer des Vergasers eines Ottomotors, Schwimmer als Steuerorgan des Wasserventils in einem Spülkasten.

**58. Veränderung der Schwimmage eines Dreikantholzes in reinem und in salzhaltigem Wasser [G, O]**

2 große Bechergläser oder Glastrog, Dreikantholz (Seitenlänge etwa 30 mm, Kantenlänge etwa 50 mm), Wasser, Kochsalz.

Man füllt ein großes Becherglas zu einem Viertel mit Wasser und läßt auf diesem ein Dreikantholz mit einer Seitenlänge von etwa 30 mm schwimmen. Das Holz nimmt die in Abb. 61/1 a dargestellte Schwimmage ein. Man gießt gesättigte Salzlösung hinzu. Die Eintauchtiefe des Holzes verringert sich. Bei einem bestimmten Salzgehalt des Wassers verändert das Dreikantholz plötzlich seine Schwimmage und kippt in die in Abb. 61/1 b angegebene Stellung um.

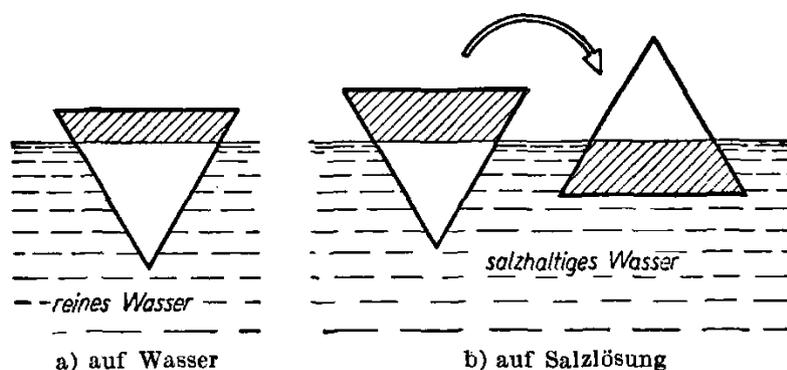


Abb. 61/1. Schwimmage eines Dreikantholzes

bestimmten Salzgehalt des Wassers verändert das Dreikantholz plötzlich seine Schwimmage und kippt in die in Abb. 61/1 b angegebene Stellung um.

*Bemerkung:* Der Versuch zeigt auch modellartig die Veränderung der Schwimmtiefe eines Seeschiffes in Gewässern geringen Salzgehaltes (Flußmündungen).

**59. Bestimmung der Wichte des Bernsteins im Schwebeverfahren [O – Ü]**

Ein Bernsteinstück, als Ersatz auch ein Kunstharzstück, großes Becherglas, konzentrierte Kochsalzlösung, Glasstab, Tropfpipette, Standzylinder, Aräometer.

Als Vorversuch zeigt man, daß ein Stück Bernstein im Wasser untergeht, dagegen auf einer konzentrierten Kochsalzlösung schwimmt. Mischt man beide Flüssigkeiten miteinander, so kann man es bewirken, daß der Bernstein in der Lösung schwebt. Wenn dieser Zustand fast erreicht ist, genügt zu seiner Störung schon ein sehr geringer Zusatz der einen oder der anderen Flüssigkeit. Der Zustand ist sehr labil. Man verwendet zu seiner Einstellung am besten eine Tropfpipette, durch die man der Lösung entweder Wasser oder Salzlösung tropfenweise zusetzt, bis der Bernstein in ihr schwebt, ohne seine Höhenlage zu ändern. Ist dies der Fall, so stimmt die Wichte der Kochsalzlösung mit der des Bernsteins überein. Man braucht mithin die Wichte der Mischung nur durch ein Aräometer zu ermitteln. Man gießt zu diesem Zweck die Mischung in einen Standzylinder.

An Stelle der Kochsalzlösung läßt sich auch eine Lösung von Natriumnitrat verwenden.

## 60. Schweben eines Hühnereies in einer Kochsalzlösung [O – Ü]

Gekochtes Hühnerei, konzentrierte Kochsalzlösung, großes Becherglas, Standzylinder, rundes, in den Standzylinder passendes Holzscheibchen, langer Glasstab.

Wie bei V 59 zeigt man als Vorversuch, daß das Hühnerei im Wasser untergeht, aber auf einer konzentrierten Kochsalzlösung schwimmt. Durch Mischen beider Flüssigkeiten kann man erreichen, daß das Hühnerei in der Lösung schwebt.

Besonders eindrucksvoll verläuft der Versuch, wenn man Wasser und Kochsalzlösung, scharf voneinander getrennt, übereinander schichtet. Man erreicht dies dadurch, daß man einen Standzylinder zur Hälfte mit konzentrierter Kochsalzlösung füllt und darüber das Wasser schichtet. Zu diesem Zweck läßt man auf der Kochsalzlösung ein rundes Brettchen schwimmen, das fast den Durchmesser des Zylinders hat, durch die Zylinderwand aber nicht behindert wird. Auf dieses Brettchen läßt man an einem langen Glasstab Wasser herabrinnen. Man erhält auf diese Weise eine dem Auge nicht erkennbare scharfe Trennfläche zwischen den beiden Flüssigkeiten. Läßt man nun das Ei in die Flüssigkeit hineinsinken, so pendelt es beim Erreichen der Grenzfläche kurze Zeit auf und ab, bis sich die Gleichgewichtslage hergestellt hat.

## 61. Schrotgefüllte Reagenzgläser als Aräometer — Vorversuch für die Verwendung von Aräometern [G – Ü]

2 bis 3 Reagenzgläser, Bleischrot, 2 etwa 200 mm hohe Bechergläser, Millimeterpapier, Kochsalz, Schieblehre oder Lineal.

### Versuchsordnung:

Ein Reagenzglas wird so weit mit Schrot gefüllt, daß es im Wasser, etwa 3 cm aus diesem herausragend, in stabiler, aufrechter Lage schwimmt.

Ein etwa 18 cm langer und 2 cm breiter Streifen Millimeterpapier wird je Zentimeter mit fortlaufenden Zahlen beschriftet, oben umgekniff und in das Reagenzglas eingeführt. Dieses wird mit einem Korken verstopft, der gleichzeitig das Millimeterpapier festklemmt.

### Versuch:

Man führt das Reagenzglas in ein Becherglas mit klarem Wasser ein (Abb. 62/1a). Die Lage des Wasserspiegels wird an der Skala des Millimeterpapiers abgelesen und notiert. Dann nimmt man das Reagenzglas aus dem Wasser heraus und mißt mit einer Schieblehre oder einem Lineal die Eintauchtiefe  $h_2$  des Reagenzglases, mithin die Entfernung vom Boden bis zu der notierten Stelle des Millimeterpapiers.

Man führt nunmehr das Reagenzglas in eine wäßrige Kochsalzlösung ein und liest wieder die Lage des Wasserspiegels auf dem Millimeterpapier ab. In derselben Weise wie vorhin stellt man auch hier die Tauchtiefe  $h_1$  fest (Abb. 62/1b).

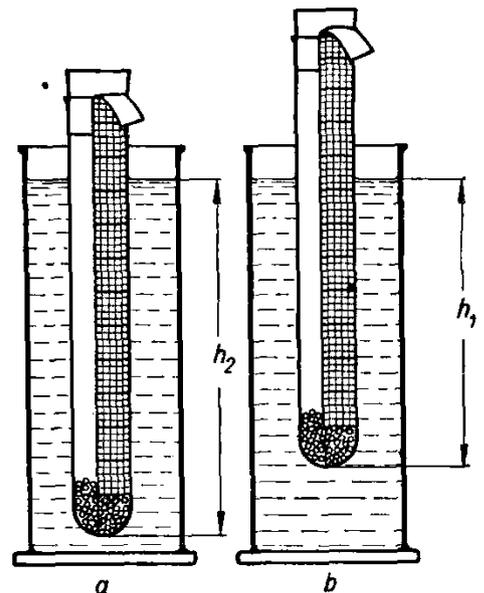


Abb. 62/1. Schrotbeschwertes Reagenzglas als Aräometermodell

Die Tauchtiefen verhalten sich umgekehrt wie die Wichte der Kochsalzlösung zu der des Wassers. Es ist

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{h_2}{h_1} \quad \text{oder} \quad \gamma_1 = \gamma_2 \cdot \frac{h_2}{h_1}.$$

Da Wasser die Wichtezahl 1 hat, ergibt sich für die Wichte der Kochsalzlösung

$$\gamma_1 = 1 \cdot \frac{h_2}{h_1} \text{ p/cm}^3.$$

*Beispiel:*

Eintauchtiefe in Wasser  $h_2 = 140,0$  mm,

Eintauchtiefe in Kochsalzlösung  $h_1 = 133,3$  mm,

Wichtezahl der Kochsalzlösung  $\frac{h_2}{h_1} = \frac{140,0}{133,3} \approx 1,05$ ,

Wichte der Kochsalzlösung  $\gamma_1 \approx 1,05 \text{ p/cm}^3$ .

*Bemerkungen:*

1. Der Versuch ist als Vorversuch zur Einführung des Gebrauchs von Aräometern sehr geeignet.
2. In das Meßergebnis geht dadurch eine geringfügige Ungenauigkeit ein, daß das Reagenzglas nicht durchgängig zylindrisch, sondern am unteren Ende halbkugelig begrenzt ist. Das Ergebnis ist um so genauer, je größer die Tauchtiefe ist.
3. Zur Begründung der Zusammenhänge siehe V48, Bemerkung!

## 62. Bestimmung der Wichte von Flüssigkeiten mit Aräometern [G, O – Ü]

1 Skalen-Aräometer (Wasserpunkt unten), 1 Skalen-Aräometer (Wasserpunkt oben), mehrere Standzylinder oder hohe Bechergläser, Thermometer, verschiedene Versuchsflüssigkeiten (Kochsalzlösungen 5-, 10-, 15- und 20%ig, Kupfervitriollösungen 5- und 10%ig, Spiritus, Petroleum).

Man taucht zunächst jedes der beiden Aräometer in klares Wasser und zeigt, daß beide genau bis zum Wasserpunkt eintauchen. Dann stellt man die einzelnen wäßrigen Lösungen her, mißt jedesmal die Temperatur und liest unmittelbar an den eingetauchten Aräometern die Wichte der Lösung ab. Bei den wäßrigen Lösungen verwendet man das Aräometer mit oben gelegenen Wasserpunkt, bei Spiritus, mithin einer Flüssigkeit, deren Wichte geringer ist als die des Wassers, benutzt man das Aräometer mit unten gelegenen Wasserpunkt. Hat man die erste Messung beispielsweise bei einer Temperatur von  $10^\circ \text{C}$  durchgeführt, dann wiederholt man in einer zweiten Meßreihe für zwei oder drei wäßrige Kochsalzlösungen die Wichtebestimmung mittels des Aräometers bei einer höheren Temperatur, beispielsweise bei  $30^\circ \text{C}$ , nachdem man die Lösungen etwa mit Hilfe des Bunsenbrenners erwärmt hat. Daraufhin vergleicht man die korrespondierenden Werte und erkennt sofort, daß sie differieren, daß also die Angabe der Wichte einer Flüssigkeit ergänzt werden muß durch die Angabe der Temperatur. Eine Erwärmung des Spiritus darf wegen der Brandgefahr nicht vorgenommen werden!

## § 6. WASSERKRAFTMASCHINEN

## 63. Modell eines oberflächigen Wasserrades [G, O]

2 Kreisscheiben aus Sperrholz ( $\varnothing$  200 mm, Dicke 5 mm), 2 Kreisscheiben aus Sperrholz ( $\varnothing$  140 mm, Dicke 5 mm), Blechstreifen (Länge 450 mm, Breite 30 mm), 8 Holztäfelchen ( $30 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ), Rundholz (Hartholz,  $\varnothing$  13 mm, Länge 70 mm), starke Stricknadel oder langer runder Nagel, Stativ mit 2 Muffen, Stielklemme, Rohrklemme, gewinkeltes Glasrohr, Verbindungsschlauch, großer Trog, Unterstellwanne.

Man legt zwei große und zwei kleine Kreisscheiben aus Holz von den oben angegebenen Abmessungen paarweise gut zentriert aufeinander und bringt genau im Mittelpunkt eine Bohrung zur Aufnahme der Achse an ( $\varnothing$  etwa 2 mm). Als solche dient eine starke Stricknadel, ein Metallstift oder ein langer runder Nagel, von dem man den Kopf entfernt und den man mit einer feinen Feile vom Grat befreit. Die Achse selbst treibt man zu ihrer Befestigung in die Stirnseite eines etwa 70 mm langen Rundholzes mit einem Durchmesser von etwa 13 mm ein, so daß ein Lagerzapfen entsteht (vgl. I § 2, 2). Alle Scheiben versieht man außerdem in Abständen von 6 cm vom Mittelpunkt, zentralsymmetrisch um diesen verteilt, mit drei Bohrungen, durch die drei  $1\frac{1}{2}$ ''-Nägel gerade hindurchpassen. Bevor man das Rad zusammenfügt, biegt man den Blechstreifen zu einem Ring, der sich gerade um die kleine Kreisscheibe herumlegen läßt, und lötet die sich überlappenden Enden zusammen.

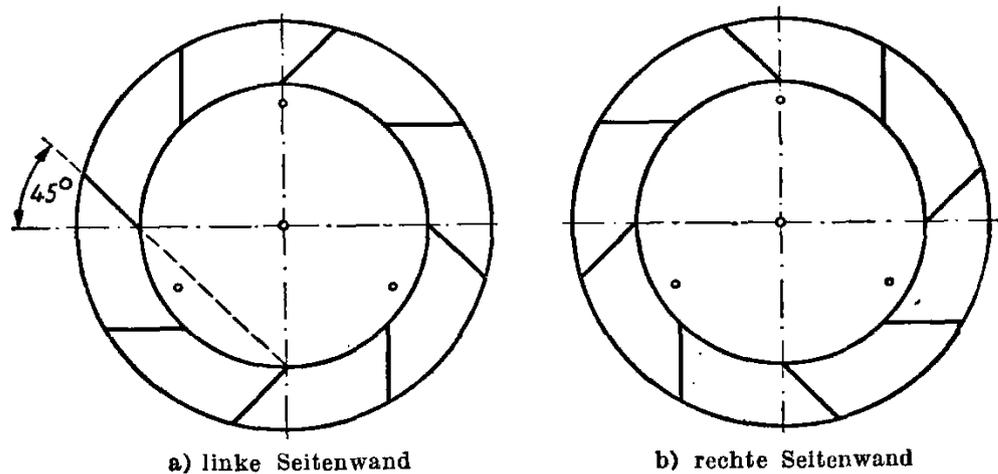


Abb. 64/1. Planzeichnung zur Anordnung der Kammerwände zwischen den Seitenwänden des Radkranzes

Auf die beiden großen Kreisscheiben zeichnet man gegenläufig zueinander die in Abb. 64/1 angegebenen Planzeichnungen, so daß die schrägen Randstrahlen in den Schnittpunkten des kleinen Kreises mit den Radien überall Winkel von  $45^\circ$  bilden. Sodann befestigt man mit Hilfe von Leim und kleinen Nägeln (Drahtstiften) genau zentriert auf je einer großen Kreisscheibe eine kleine, so daß diese sich mit dem aufgezeichneten kleinen Kreise deckt.

Zwischen die so vorbereiteten Doppelscheiben fügt man den Blechring ein, so daß das Gehäuse des Wasserrades entsteht. Das Gehäuse erhält dadurch einen festen Halt, daß man durch die drei dünnen Bohrungen je einen  $1\frac{1}{2}$ ''-Nagel treibt. Man schlägt die Nägel auf der anderen Seite so um, daß ihre Spitzen in das Holz ein-

dringen. Die Kreisscheiben werden vorher so gegeneinander ausgerichtet, daß die auf der Innenseite sichtbaren schrägen Randstrahlen paarweise parallel laufen.

Nun bereitet man die 8 Holztäfelchen zum Einbau in das Gehäuse als Kammerwände vor. Man schrägt sie sämtlich an dem einen Schmalrand auf  $45^\circ$  ab, so daß schräge Endflächen entstehen. Diese sowie die trapezförmigen schmalen Seitenflächen bestreicht man mit wasserunlöslichem Leim und stellt die Holztäfelchen in Richtung der vorgezeichneten Randstrahlen zwischen die Seitenwände. Dann nagelt man sie außerdem noch mit Drahtstiften fest. Nach dem Festwerden der Klebmasse dichtet man sämtliche Fugen der Kammern mit Kitt.

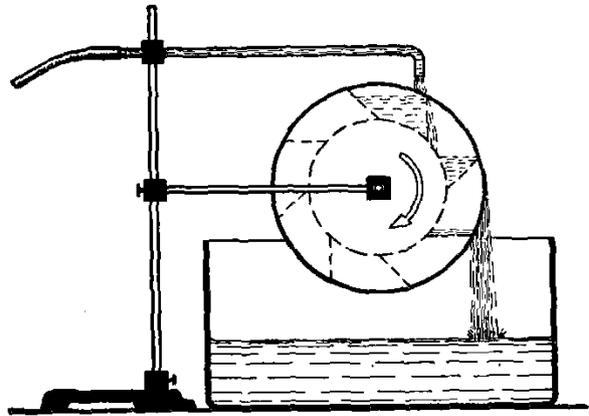


Abb. 65/1. Versuchsanordnung zum Betrieb des Modells eines oberflächlichen Wasserrades

Will man das Modell in Betrieb nehmen, so klemmt man die Achse über einem großen Trog waagrecht an ein Stativ und steckt das Wasserrad darauf. Über dem Wasserradmodell befestigt man am Stativ ein gewinkeltes Glasrohr, das an die Wasserleitung angeschlossen ist (Abb. 65/1). Leitet man dem Rad Wasser zu, so dreht es sich unter dem Einfluß des Gewichtes des darüberlaufenden Wassers.

*Bemerkung:* Als Leim darf nur eine wasserunlösliche Klebmasse verwendet werden. Besonders sind für diesen Zweck schnelltrocknende Alleskleber geeignet wie Kittifix und Duosan. Zur Konservierung empfiehlt es sich, das Modell vor Ingebrauchnahme mit einer wasserfesten Farbe zu streichen.

#### 64. Modell eines unterschlächtigen Wasserrades [G, O]

Eine Kreisscheibe aus Sperrholz ( $\varnothing$  160 mm, Dicke 5 mm), 2 Kreisscheiben aus Holz ( $\varnothing$  60 mm, Dicke etwa 10 mm), 8 rechteckige Blechscheiben (60 mm  $\times$  30 mm), 2 Holzleisten (400 mm  $\times$  40 mm  $\times$  10 mm), eine Holzleiste (400 mm  $\times$  50 mm  $\times$  10 mm), ein Holzplättchen (70 mm  $\times$  40 mm  $\times$  10 mm), ein Rundholz (Hartholz,  $\varnothing$  13 mm, Länge etwa 70 mm), starker langer Nagel, gewinkeltes Glasrohr, Verbindungsschlauch, zwei Stative mit Muffen und Klemmen, Unterlegscheibe, großer Glas-trog, Unterstellwanne.

Eine Kreisscheibe aus Sperrholz mit einem Durchmesser von 160 mm beklebt und benagelt man auf beiden Seiten genau zentriert mit zwei kleinen Holz-scheiben ( $\varnothing$  60 mm) und versieht sie im Mittelpunkt mit einer Bohrung zur Aufnahme der Achse. Diese stellt man in derselben Weise her wie bei V 63. In die so vorbereitete Kreisscheibe sägt man vom Rande her mit einer Laubsäge acht 30 mm lange, radial-liegende Schlitze, die miteinander Winkel von je  $45^\circ$  einschließen (Abb. 66/1). In die Schlitze treibt man rechteckige Blechscheibchen, bei denen man ein an einer Schmalseite liegendes Eckenpaar vorher schräg beschnitten hat. Vor dem Eintreiben bestreicht man jedes Blechplättchen mit wasserunlöslicher Klebmasse. Es entsteht so ein einfaches Modell eines unterschlächtigen Wasserrades.

Zur Wasserführung stellt man aus drei Holzleisten eine Rinne von rechteckigem Querschnitt her. Das eine Ende dieser Rinne verschließt man mit einer rechteckigen

Holzplatte, damit das Wasser nicht rückwärts herausfließt. Die Fugen der Rinne macht man mit Kitt wasserdicht.

Will man das Modell in Betrieb setzen, so steckt man es über einem großen Trog auf die waagrecht an ein Stativ geklemmte Achse. Unter das Rad legt man mit einer ganz geringen Neigung die Rinne so hin, daß das Rad möglichst tief in sie hineinragt. An ihrem oberen Ende schließt man die Rinne mit Hilfe eines gewinkelten Glasrohres und eines Verbindungsschlauches an die Wasserleitung an (Abb. 66/2). Sobald eine ausreichende Wassermenge durch die Rinne herabfließt, beginnt das Rad sich zu drehen.

*Bemerkung:* Beachte Bemerkung zu V 63!

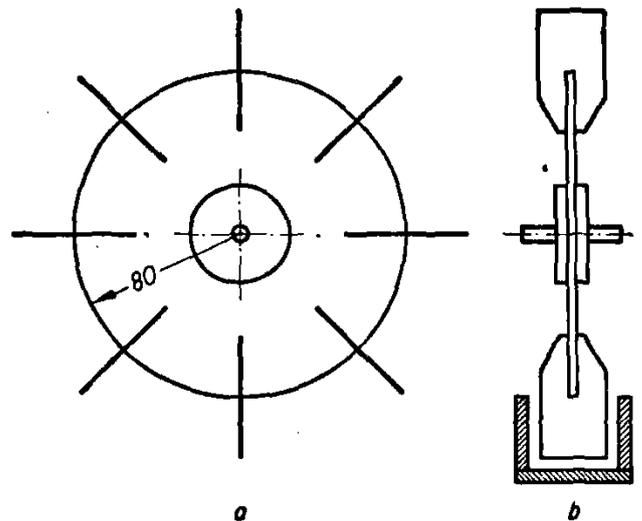
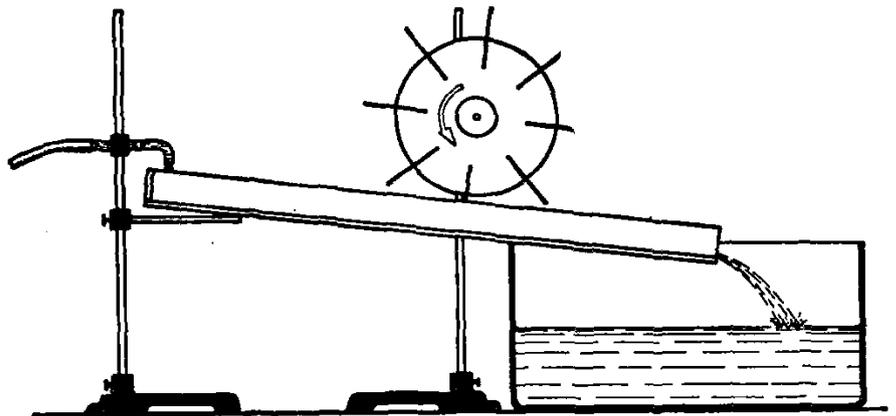


Abb. 66/1. Modellzeichnungen zum unterschlächtigen Wasserrad  
a) Verteilung der Schlitze an der Kreisscheibe  
b) Anordnung der Rinne unter dem Wasserrad

Abb. 66/2. Versuchsanordnung zum Betrieb des Modells eines unterschlächtigen Wasserrades



## 65. Modell einer Freistrahlturbine (Peltonturbine) [G, 0]

Konservendose ( $\varnothing$  etwa 80 mm, Höhe etwa 60 mm), Stück einer Stricknadel ( $\varnothing$  3 mm, Länge 90 mm), Eisenrohr ( $\varnothing$  8 mm, Länge 100 mm), Konservendosenblech für Schaufelrad und Abflußrohr (erforderliche Fläche etwa 250 cm<sup>2</sup>), großer Glastrog, Stativ mit Muffe und Rohrklemme.

Das hier beschriebene Modell einer Peltonturbine ist nicht als Antriebsmodell gedacht, es soll lediglich die Wirkungsweise einer Schaufelradturbine zeigen.

Das Modell besteht aus einem Schaufelrad und dem mit einem Einström- und einem Abflußrohr versehenen Gehäuse. Das Schaufelrad wird aus fünf einzelnen Schaufeln zusammengesetzt, die mit Hilfe zweier Stellringe auf der Turbinenachse befestigt werden. Die Schaufeln werden aus Konservendosenblech gefertigt.

Man schneidet aus dünnem Karton eine Schablone entsprechend Abb. 67/1 und überträgt die Umriss der Schablone durch Umfahren mit einer Reißnadel auf das Blech.

Die gestrichelt gezeichneten Linien stellen die Biegekanten dar. Beim Aufreißen der Figuren ist zu berücksichtigen, daß die Längen  $l$  der einzelnen Schaufelhalter um die doppelte Blechstärke voneinander abweichen. Sie ist in Abb. 67/1 mit 0,3 mm angenommen. Dadurch ist es beim Zusammenstecken der einzelnen Schaufeln auf der Turbinenachse möglich, sämtlichen Schaufeln die gleiche Mittellage zu geben. Mit Hilfe einer Blechschere oder einer für andere Zwecke nicht mehr verwendbaren Papierschere schneidet man die aufgerissenen Figuren aus. Man legt die Bleche erst mit dem linken und dann mit dem rechten Achsenflügel genau übereinander und klemmt sie mit einer Schraubzwinge an einem Brettchen fest. Nachdem man die in Abb. 67/1 angegebenen Bohrungen für die Schaufelradachse angeköhrt hat, bohrt man die Löcher entsprechend dem angegebenen Durchmesser. Man biegt die einzelnen Bleche nach Abb. 67/2. Die Schaufeln werden zusammengesetzt und auf die Schaufelradachse geschoben. Als Schaufelradachse verwendet man ein Stück einer etwa 3 mm dicken Stricknadel. Zur Verhinderung eines seitlichen Verschiebens der Schaufeln schiebt man auf beiden Seiten einen Stellring auf die Achse. Schließlich verteilt man die Schaufeln zentral-symmetrisch um die Achse und verlötet sie untereinander und mit den Ringen.

Als Turbinengehäuse verwendet man eine Konservendose mit abgetrenntem Deckel. Ihre lichte Weite beträgt etwa 8 cm. Die Höhe der Dose soll gleich dem äußeren Abstand der beiden Stellringe auf der Schaufelradachse sein.

Der Boden der Dose wird zentrisch mit einer Bohrung von 3 mm als Schaufelradlager versehen.

Man setzt das Schaufelrad ein und markiert die Bohrung für das Einströmrohr (Abb. 67/3). Nachdem man das Schaufelrad wieder herausgenommen hat, schiebt man die Dose auf eine waagrecht eingespannte Holzleiste und bohrt das Loch für das Einströmrohr. Etwa um  $45^\circ$  gegen diese Bohrung versetzt, schneidet man eine runde Öffnung mit einem Durchmesser von etwa 30 mm für das Abflußrohr in den Blechmantel. Das Abflußrohr biegt man aus Dosenblech und lötet es in die ausgeschnittene Öffnung ein. Als Einströmrohr verwendet man ein Stück

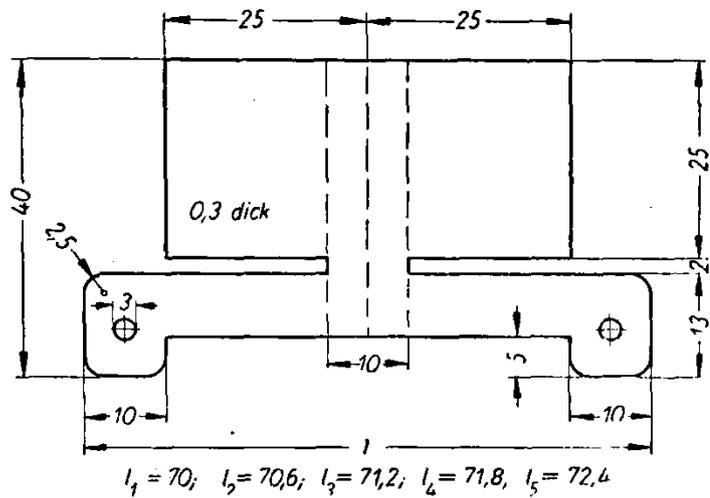


Abb. 67/1. Schablone für die Schaufeln des Modells einer Schaufelradturbine

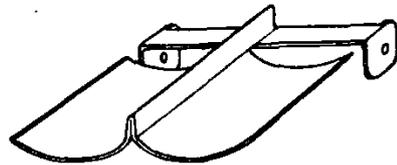


Abb. 67/2. Schaufeln des Turbinenmodells

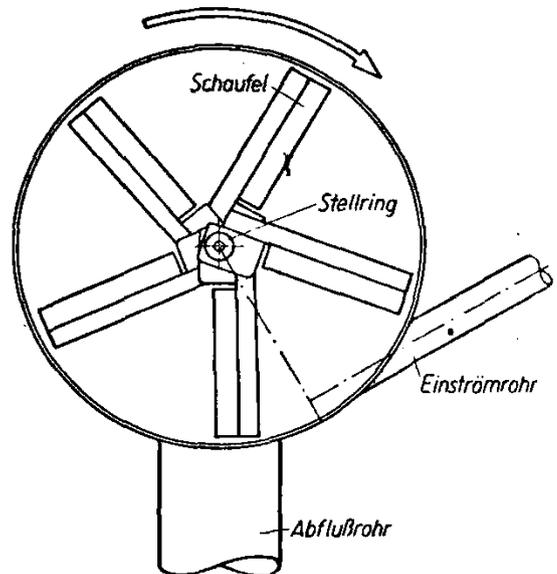


Abb. 67/3. Turbinengehäuse mit eingebautem Schaufelrad

Eisenrohr mit einem Durchmesser von etwa 8 mm. Es wird tangential zur Drehrichtung der Schaufeln in die Mantelbohrung eingelötet, nachdem man es vorher am Ende abgeschrägt hat.

Das Schaufelrad wird wieder eingesetzt. Zur Verringerung der Reibung des Rades gegen die Verschußdeckel streift man an beiden Seiten auf die Achse je eine große Glasperle. Die Länge der Achse ist so zu bemessen, daß sie nach dem Einsetzen des Rades auf der offenen Seite des Gehäuses nicht aus ihm herausragt. Dagegen soll sie die Abschlußwand um etwa 20 mm durchstoßen.

Als zweites Schaufelradlager verwendet man einen etwa 20 mm breiten Blechstreifen, der in seiner Mitte mit einer Bohrung für die Schaufelradachse versehen wird. Durch Verschieben des Streifens wird das Schaufelrad zentriert. In der zentrierten Stellung lötet man den Blechstreifen an das Gehäuse an.

Zur Inbetriebnahme wird das Gehäuse mit einem passend dazu hergerichteten Deckel verschlossen. Der Deckelrand wird mit Isolierband abgedichtet. Die Turbine wird mit senkrecht nach unten gerichtetem Abflußrohr über einem Wassertrog an einem Stativ befestigt. Das Einströmrohr verbindet man mit Hilfe eines Gummischlauchs mit der Wasserleitung (Abb. 68/1).

*Bemerkungen:*

1. Will man die Umdrehung des Schaufelrades nach außen wahrnehmbar machen, so empfiehlt es sich, auf das herausragende Ende der Achse einen Korken aufzusetzen und ihn in radialer Richtung mit einem Speiler als Zeiger zu durchstoßen.
2. Zur Vermeidung von Rostbildung ist es erforderlich, das Turbinenmodell nach jedem Gebrauch in warmer Luft (Fön) gut zu trocknen. Aus dem gleichen Grunde empfiehlt es sich, beim Aufbewahren stets den Deckel abzunehmen.

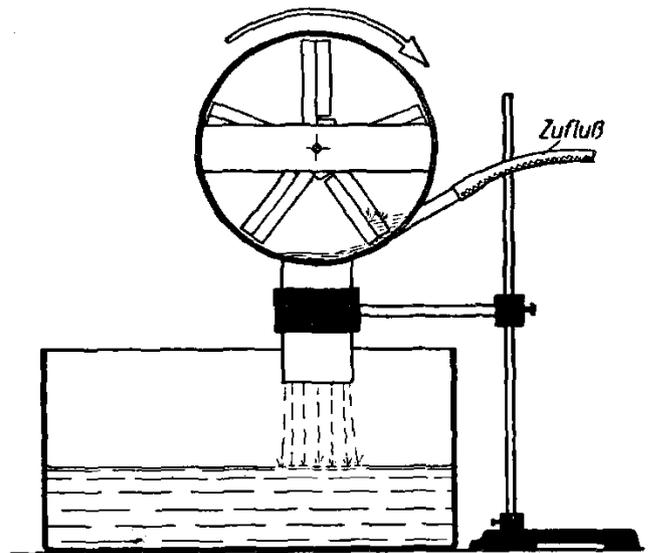


Abb. 68/1. Versuchsanordnung zur Vorführung des Pelton-turbinenmodells

## 66. Modell einer Propellerturbine (Kaplanturbine) [G, O]

Konservenbüchse ( $\varnothing$  etwa 65 mm, Höhe etwa 65 mm), ein Blechstück für das Propellerrad und den Bügel (Dicke etwa 0,3 mm), Eisenrohr ( $\varnothing$  12 mm, Länge etwa 80 mm), Steckbuchse, Stellringe, Schnurrad, Turbinenachse ( $\varnothing$  4 mm, Länge etwa 100 mm), großer Glastrog, Stativ mit Muffe und Rohrklemme.

Die Propellerturbine besteht aus dem Propellerrad und dem Turbinengehäuse (Abb. 69/1). Als Gehäuse wird eine einseitig offene Konservenbüchse mit einem Durchmesser und einer Höhe von etwa 65 mm verwendet. Der Boden der Dose wird mit einer Mittelbohrung als Lager für die etwa 4 mm dicke Achse versehen. Das Gegenlager befindet sich in einem trapezförmig gebogenen Bügel, der auf der Außenseite des Bodens angelötet wird. Der Bügel wird aus einem etwa 0,3 mm dicken und 15 mm breiten Blechstreifen gebogen. 10 mm vom Boden entfernt wird in die Mantelfläche eine Öffnung für das Einströmrohr geschnitten.

Abb. 69/1. Modell einer Propellerturbine, bestehend aus dem Propellerrad und dem mit einem Einströmrohr versehenen Gehäuse

Der Durchmesser des Rohres beträgt etwa 13 mm, die Länge etwa 80 mm. Das Ende des Rohres schrägt man ab und lötet es an die Gehäusewand, so daß das Wasser annähernd tangential einströmt.

Das Propellerrad fertigt man aus etwa 0,3 mm dickem Blech. Man schneidet daraus eine kreisförmige Scheibe mit einem Durchmesser von etwa 65 mm und versieht diese in der Mitte mit einer Bohrung von 4 mm. In die Bohrung drückt man eine Bananensteckerbuchse und lötet sie an der Scheibe fest. Die Scheibe wird durch 4 etwa 25 mm tiefe Einschnitte in vier gleich große Sektoren geteilt, die im gleichen Richtungssinn um  $45^\circ$  windschief verdreht werden, so daß sie gegen die Strömungsrichtung des Wassers anstehen. Es entsteht so das Modell eines Propellerrades (Abb. 69/2). Dieses schiebt man mit der Buchse über das eine Ende der etwa 10 cm langen Turbinenachse und verlötet diese mit der Buchse des Propellerrades. Damit sich die Turbinenachse nicht in der Längsrichtung verschieben kann, werden um die Achse zwei Stellringe gelegt und so verschraubt bzw. verlötet, daß sie den Bügel von innen, den Gehäuseboden von außen berühren. Vorher wird die Turbinenachse so eingestellt, daß sich das Propellerrad etwa 30 mm unterhalb der Mündung des Einströmrohres befindet.

Will man die Turbine in Betrieb nehmen, so befestigt man sie mit Hilfe einer Muffe und einer Rohrklemme über einem Trog an einem Stativ. Die Einströmöffnung schließt man durch einen Verbindungsschlauch an die Wasserleitung an.

*Bemerkung:* Siehe Bemerkungen zu V 65!

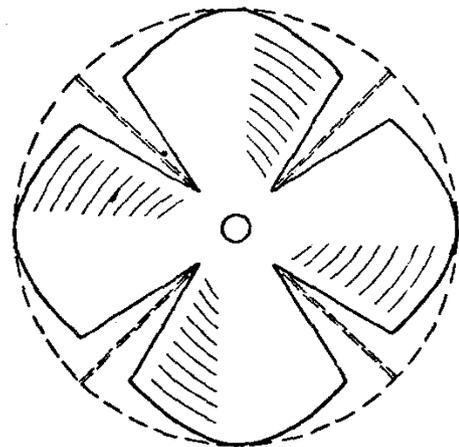
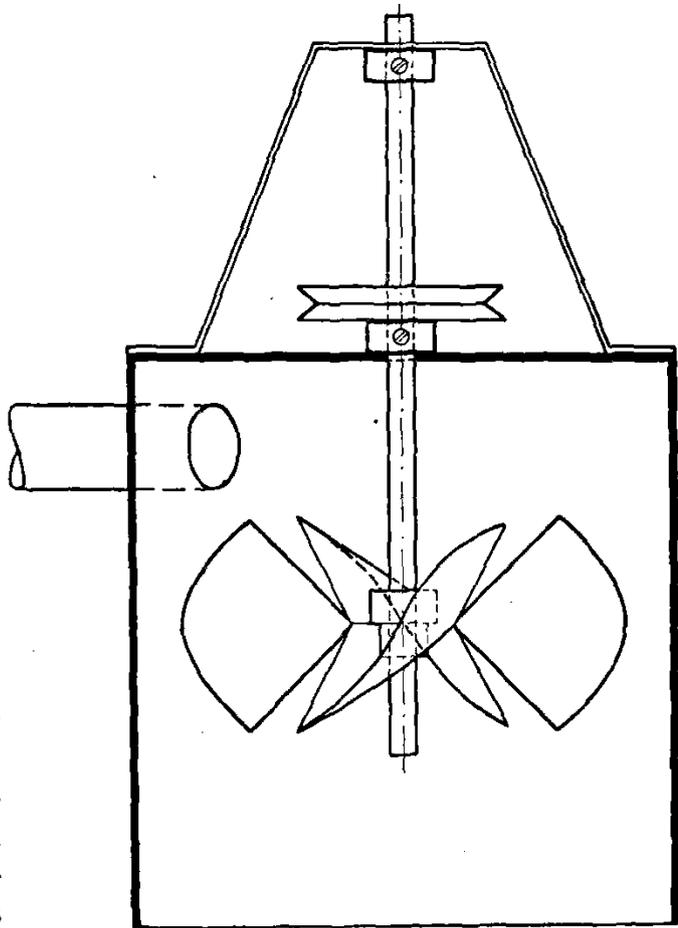


Abb. 69/2. Kreisförmige Scheibe mit in gleichem Richtungssinn gebogenen Sektoren als Propellerrad

## ZWEITES KAPITEL

### *Mechanik der Gase*

#### § 7. METHODISCHE BEMERKUNGEN

1. Solange in der Schule Physikunterricht gegeben wird, ist man bemüht, den Schülern durch möglichst eindrucksvolle Versuche *die Wirkungen des Luftdruckes* nachzuweisen. Die Erkenntnis, daß die scheinbar so leichte Luft auch ein Gewicht besitzt und auf Grund ihres Gewichtes durch den Schweredruck Kraftwirkungen von gewaltiger Größe hervorrufen kann, beeindruckt die Schüler immer wieder von neuem. Die als Luftdruckwirkungen zu beobachtenden Vorgänge sind für viele Menschen genau so überraschend, wie sie es im 17. Jahrhundert waren, als *Otto von Guericke* und *Evangelista Torricelli* sie entdeckten und die Größe des Luftdruckes untersuchten. Gerade die den Luftdruck betreffenden Naturgesetze gehören zu den grundlegenden physikalischen Erkenntnissen. Es gibt kaum einen Naturvorgang, der durch den Luftdruck nicht beeinflußt wird. Man braucht nur an die Wettergestaltung und an den Siedevorgang zu denken. Es ist daher unerläßlich, das Wissen um diese Zusammenhänge bei den Schülern auf möglichst breiter experimenteller Basis sicher zu gründen, zumal sich viele Versuche mit einfachsten Mitteln durchführen lassen.

Das bekannteste Lehrmittel zum Nachweis des Luftdruckes sind die von *Otto von Guericke* erfundenen *Magdeburger Halbkugeln*. Der mit ihnen durchzuführende Versuch ist so einfach und so allgemein bekannt, daß davon abgesehen werden kann, ihn in diesem Buch besonders zu beschreiben. Er gehört unbedingt in den Physikunterricht der Grundschule. Zusätzlich bringt das Buch eine ganze Reihe von Versuchen, deren Zweck es ist, mit einfachen Mitteln die Wirkungen des Luftdruckes nachzuweisen.

Mit dem Vorhandensein des Luftdruckes steht die Wirkung der *Spannkraft* der Luft in engem Zusammenhang. Ihre Wirkungen werden mitunter mit denen des atmosphärischen Luftdruckes selbst verwechselt. Sie sind aber keine Folge des Schweredruckes, sondern der Expansionsfähigkeit, die der Luft im hohen Maße zu eigen ist. In § 8 ist in V 74 bis V 79 eine Reihe von Versuchen angegeben, aus denen die Schüler die Spannkraft der Luft erkennen können.

Als Folgeerscheinungen des Luftdruckes werden in der Schule häufig auch die Vorgänge am Saugheber behandelt, obwohl dem Luftdruck dabei nur eine sekundäre Bedeutung zukommt. Es wäre falsch, die Wirkungsweise des Saughebers, insbesondere sein Anlaufen, lediglich durch den Luftdruck zu erklären. Maßgebend für den Vorgang ist allein das Gewicht der Wassersäulen im Heber. Der Luftdruck verhindert lediglich ein Zerreißen der Wassersäulen. Diese Erkenntnis läßt sich anschaulich durch einen im luftverdünnten Raum arbeitenden Heber vermitteln, wofür V 82 eine Möglichkeit aufzeigt. Der Modellversuch V 83 unterstützt hierbei in wirksamer Weise das Erkennen der Zusammenhänge.

2. Ein besonderes Gewicht ist auf das *Messen des Luftdruckes* und die *Behandlung des Barometers* zu legen. Die Schüler müssen erkennen, daß barometrische Messungen mit besonderer Sorgfalt vorzunehmen sind, da es eine große Anzahl von Messungen, insbesondere in der Mechanik der Gase, in der Wärmelehre und in der Chemie gibt, die durch den Luftdruck beeinflußt werden. Exakte Luftdruckmessungen sind vielfach die Voraussetzungen für die Genauigkeit anderer Meßergebnisse.

Selbstverständlich muß in jeder Klasse der Torricelli-Versuch als einer der fundamentalsten Versuche durchgeführt werden. In V 87 sind genaue Anweisungen dazu gegeben.

Zu beachten ist, daß sämtliche Versuche, bei denen Quecksilber verwendet wird, über einem Quecksilberbrett auszuführen sind. Es muß unter allen Umständen vermieden werden, daß auch nur die geringste Menge Quecksilber verschüttet wird. Die Gefahren für die Gesundheit, die das dauernde Einatmen von Quecksilberdämpfen mit sich bringt, werden leider häufig unterschätzt, da die Wirkungen nicht sogleich wahrnehmbar sind. Um so eindringlicher sei hier davor gewarnt, mit Quecksilber unachtsam umzugehen. Sollte es trotzdem vorkommen, daß einmal ein wenig Quecksilber verspritzt wird, so muß man peinlich darauf bedacht sein, selbst das kleinste Quecksilbertröpfchen wieder zu bergen.

Soll ein Barometer seinen Zweck als Luftdruckmesser wirklich erfüllen, so darf man sich nicht damit begnügen, den Stand der Quecksilbersäule nur an der oberen Quecksilberkuppe abzulesen. Es muß gleichzeitig auch die Höhe des unteren Quecksilberspiegels festgestellt werden. Da dies bei den meisten einfachen Gefäßbarometern nicht möglich ist, sind sie für genaue Luftdruckmessungen nicht zu gebrauchen und daher für Schulen nicht zu empfehlen. Zum Gebrauch in der Schule haben sich die *Heberbarometer* bestens bewährt, da sie ein einwandfreies Ablesen des oberen wie des unteren Quecksilberspiegels zulassen. Denn die wenigsten Schulen werden im Besitz eines mit genauer Spiegelskala und mit Nonius ausgestatteten Stationsbarometers sein.

Obwohl es in den Lehrplan nicht mit aufgenommen ist und auch zweifellos nicht in den Unterricht selbst gehört, ist im Buch ein Versuch dem *Kontrabarometer* gewidmet. Gelegentlich sehen die Schüler ein solches in den Schaufenstern und Auslagen der Verkaufsstellen für feinmechanische und optische Geräte und sind daran interessiert, Aufklärung über seine Wirkungsweise zu erhalten. Für diesen Fall soll V 89 dem Lehrer einen Hinweis geben, wie er durch einen Versuch die Schüler zum Verständnis dieses Barometers führen kann. Als Unterrichtsversuch kommt V 89 aus Mangel an Zeit kaum in Frage, für Arbeitsgemeinschaften aber ist er ausgezeichnet geeignet.

Mit den barometrischen Messungen eng verbunden sind Messungen an *Manometern*. Das Buch sieht für die Einführung der Manometer zwei Versuche vor, nämlich V 96 und V 97. Sie sollen gleichzeitig auf eine Möglichkeit hinweisen, die Behandlung der Manometer in Verbindung mit Fragen der polytechnischen Bildung durchzuführen. Eine Gelegenheit, auf die technischen Manometer einzugehen, bietet sich im Anschluß an die Behandlung des Aneroidbarometers, das man häufig auch als Dosenbarometer bezeichnet. Für den Bau des Modells eines solchen Barometers bietet V 94 eine Unterlage. Die Modellbeschreibung wurde deswegen in das Buch aufgenommen, weil das Innere der meisten Aneroid-

barometer schwer zugänglich ist und weil man bei ihrer Behandlung erfahrungsgemäß meist auf Zeichnungen angewiesen ist. Um so nützlicher ist es, wenn die Schüler die Wirkungsweise des Aneroidbarometers an einem von ihnen selbst in einer Arbeitsgemeinschaft gefertigten Modell verstehen lernen.

3. Alle im § 10 beschriebenen Versuche sind dem *Boyleschen Gesetz* gewidmet. Das Boylesche Gesetz ist für den Unterricht der Oberschule von großer Bedeutung. Es bildet in der Wärmelehre die Grundlage der Gasgesetze und ist gewissermaßen ein Sonderfall der allgemeinen Gasgesetze bei konstanter Temperatur. Von größter Wichtigkeit ist dabei die richtige Auslegung des Druckbegriffes. Auch beim Boyleschen Gesetz wird der Druck in  $\text{p/cm}^2$  bzw. in  $\text{kp/cm}^2$  gemessen. Und doch handelt es sich hier zweifellos nicht um einen Druck im Sinne einer in einer bestimmten Richtung auf die Flächeneinheit wirkenden Kraft, sondern um den Druck als skalare Größe, mithin um eine Zustandsgröße. Man bezeichnet den Druckzustand auch als Spannung, ein Ausdruck, der bei Gasen weit geläufiger ist und anschaulicher wirkt als bei Flüssigkeiten.

Es ist bei Gasen ohne weiteres einleuchtend, daß der Druckzustand gleichbedeutend mit der Energiedichte ist. Schon aus der Betrachtung der Dimensionen geht dies eindeutig hervor, wie man aus der Boyleschen Gleichung ersehen kann. Im Produkt  $p \cdot V$  hat  $p$  die Dimension  $[K \cdot l^{-2}]$ ,  $V$  die Dimension  $[l^3]$ : das gesamte Produkt hat demnach die Dimension  $[K \cdot l^{-2} \cdot l^3] = [K \cdot l]$ , mithin die Dimension einer Energie. Hier wird deutlich klar, daß der Druck im Sinne einer Spannung gleichbedeutend mit der Energiedichte ist. Man braucht nur den Faktor  $p$  mit der Dimension  $[l]$  zu erweitern und erhält  $[K \cdot l \cdot l^{-3}]$ , mit anderen Worten, die Dimension der Energiedichte. Man gibt dem Boyleschen Gesetz in der Regel die Form: Bei gleichbleibender Temperatur ist das Produkt aus dem Druck und dem Volumen einer abgeschlossenen Gasmenge konstant. In diese Aussage ist aber gleichzeitig mit eingeschlossen, daß sich in einer abgeschlossenen Gasmenge bei sich änderndem Volumen auch die Energiedichte entsprechend verändert, nämlich so, daß der Energieinhalt unverändert bleibt. So ist das Boylesche Gesetz im Grunde eine auf Gase umgeprägte andere Form des Energiesatzes. Im Hinblick auf diese für viele Naturerkenntnisse außerordentlich wichtigen Zusammenhänge wird man im Unterricht darauf mit aller Sorgfalt eingehen und darauf bedacht sein, die Schüler zum vollen Verständnis dieser Fragen zu führen. Am sichersten erreicht man dies, wenn man die Schüler das Boylesche Gesetz selbst an Übungsversuchen ableiten läßt, V 99, V 100, V 101, V 102 weisen auf Möglichkeiten dazu hin; V 103 ist wegen der Arbeit mit Quecksilber für Schülerübungen weniger geeignet.

4. Wie bei den Flüssigkeiten infolge der Einwirkung des Schweredruckes auf jeden in der Flüssigkeit befindlichen Körper ein Auftrieb hervorgerufen wird, so ist dies auch bei den Gasen der Fall. Wegen der geringen Wichte der Gase ist der Auftrieb in ihnen allerdings weit schwächer als in Flüssigkeiten und dadurch nicht so leicht zu beobachten wie dort. Deshalb ist in § 11 eine ganze Reihe von Versuchen angegeben, die dem Zweck dienen, den Auftrieb in Gasen nachzuweisen. Besonders eindrucksvoll sind die Versuche mit einem Kinderluftballon und mit Seifenblasen. Man sollte nicht versäumen, den Schülern den einen oder den anderen

der angegebenen Versuche vorzuführen, schon damit sie zu eigenen Versuchen angeregt werden. Auch von diesen Versuchen sind einige ohne weiteres für Schülerübungen geeignet.

Die wichtigste den Schülern durch diese Versuche zu vermittelnde Erkenntnis ist, daß für den Auftrieb in Luft die gleichen Gesetze gelten wie für den Auftrieb in Flüssigkeiten. Aus den in V 107, V 110 und V 111 beschriebenen Versuchen geht dies mit besonderer Deutlichkeit hervor. V 111 erinnert durchaus an den Versuch V 60, bei dem ein Hühnerei in einem Standzylinder auf der Grenze zwischen einer konzentrierten Salzlösung und darüber geschichtetem Wasser schwimmt. Bei der Behandlung des Dasymeters wird man nicht versäumen, auf seine technische Bedeutung als Meßgerät für die Ermittlung von Gasdichten hinzuweisen.

Die beiden Beschreibungen V 114 und V 115 sind nicht als Versuche im eigentlichen Sinne aufzufassen. Sie sind dem § 11 als Hilfsversuche beigelegt und enthalten Anweisungen zur Herstellung von Seifenlösungen und zum Füllen von Gummiblasen mit Stadtgas oder mit Wasserstoff.

5. Eine Sonderstellung nimmt neben V 114 und V 115 auch V 116 ein. Dieser Abschnitt beschreibt ebenfalls keinen besonderen Versuch, er ist der Arbeit mit *Luftpumpen* im allgemeinen gewidmet. Es schien den Verfassern ratsam, daß den an den Schulen mit den Luftpumpen arbeitenden Lehrern das Notwendige darüber gesagt wird. Denn eine gut wirkende Luftpumpe gehört unbedingt in jede Schule. Meist genügt eine ganz einfache *Kolbenpumpe*. In der Grundschule wird die Ausstattung mit einer solchen schon aus methodischen Gründen die Regel sein, da das Verständnis der Kolbenpumpe keine Schwierigkeiten bereitet. Es ist freilich nicht zu bestreiten, daß eine rotierende *Öl-* oder *Kapselluftpumpe* gegenüber einer Kolbenpumpe erhebliche Vorteile bietet und mit der Zeit immer stärkeren Eingang in die Schulen finden wird. Sie erreicht ein Vakuum von etwa 0,001 Torr, das vollständig dazu ausreicht, elektrische Entladungsversuche in gasverdünnten Räumen einwandfrei durchzuführen. Schon aus diesem Grunde sind heute rotierende Luftpumpen in den Oberschulen ein gern benutztes Hilfsgerät.

Trotz aller Vorzüge der rotierenden Ölluftpumpen werden aber die Kolbenpumpen ihre Bedeutung nicht einbüßen, da sie gegen äußere Einflüsse weit unempfindlicher sind als Ölluftpumpen. Dies trifft vor allem für alle Versuche zu, bei denen Wasserdampf oder feuchte Luft abgesaugt wird. Es muß unbedingt vermieden werden, daß feuchte Gase in die Pumpe gelangen. Ein erhebliches Absinken der Leistung wäre sonst die unausbleibliche Folge. Will man empfindliche Luftpumpen dagegen schützen, so wird man beim Arbeiten mit feuchter Luft die Saugleitung stets durch ein Gefäß mit konzentrierter Schwefelsäure leiten, durch die der Wassergehalt der Luft gebunden wird.

Ganz unempfindlich gegen Wasserdämpfe sind erklärlicherweise die *Wasserstrahlpumpen*. Schon aus diesem Grunde sind sie für den Gebrauch an Schulen sehr zu empfehlen, ganz abgesehen davon, daß ihre Saugleistung zur Durchführung vieler anderer Versuche durchaus hinreicht. Wasserstrahlpumpen sind überdies als Gebläse zum Betriebe eines Gebläsebrenners für Glasarbeiten gut zu verwenden.

Auf eine methodische Ungeschicklichkeit sei hier hingewiesen, der man an Schulen hier und da begegnen kann. Bisweilen werden, nachdem die Wirkungsweisen

der Luftpumpen im Unterricht erarbeitet worden sind, im Anschluß daran sämtliche mit Luftpumpen zu zeigenden Versuche hintereinander vorgeführt. Dies mag manchmal durch äußere Umstände begründet sein, methodisch aber ist diese Handlungsweise auf keinen Fall zu vertreten. Die einzelnen Versuche gehören dahin, wo es der Fortgang des Unterrichts und der Lehrstoff erfordern. Nicht die Luftpumpe an sich, sondern die damit anzustellenden Versuche sind das Primäre. Die Luftpumpe ist lediglich ein technisches Hilfsmittel, das zur Durchführung der Versuche benutzt werden muß.

Da zwischen den Luftpumpen und den *Wasserpumpen* hinsichtlich ihrer Wirkungsweise kein grundsätzlicher Unterschied besteht, ist in dem § 12 auch ein Versuch über die Wasserpumpe mit aufgenommen, nämlich V 118. Er erstreckt sich auf die Herstellung eines Modells einer Saug-Hub-Pumpe. Es handelt sich dabei um ein gut arbeitendes Modell, dessen Anfertigung aus einigen leicht zu beschaffenden Glasteilen den Schülern überlassen werden kann und ihnen ebenso wie die in V 117 beschriebene Fertigung einer behelfsmäßigen Luftpumpe erfahrungsgemäß viel Freude macht. Im übrigen wird man sich im Unterricht zur Einführung der Wasserpumpen der bekannten Glasmodelle bedienen, die die Lehrmittelindustrie für diesen Zweck gut und preiswert herstellt.

## § 8. WIRKUNGEN UND NACHWEIS DES LUFTDRUCKS

### 67. Wirkung des Luftdrucks auf einseitig verschlossene und mit Wasser gefüllte Gefäße [G — Ü]

Standzylinder verschiedener Höhen und lichter Weiten, weites Glasrohr, Glasplatten zum Abdecken der Standzylinder, pneumatische Wanne oder Glastrog, Gummistopfen.

#### *Versuch a: Benutzung verschiedener Standzylinder*

Man füllt verschiedene Standzylinder, deren Höhen und lichte Weiten stark voneinander abweichen, mit Wasser. Die Öffnungen werden mit einer Glasplatte abgedeckt. Man kehrt die Zylinder um und taucht sie einige Zentimeter tief in eine mit Wasser gefüllte pneumatische Wanne. Zieht man die Glasplatte weg, so fließt das in den Zylindern befindliche Wasser trotz seines Gewichtes nicht aus. Der auf die Wasseroberfläche wirkende Luftdruck ist größer als der Schweredruck des Wassers und verhindert somit das Ausfließen. Man kann den Versuch auch so durchführen, daß man einen Standzylinder, ein Reagenzglas oder ein ähnliches Gefäß ganz untertauchend flach in die Wanne legt und dann mit der Öffnung nach unten aufrichtet (Abb. 74/1).

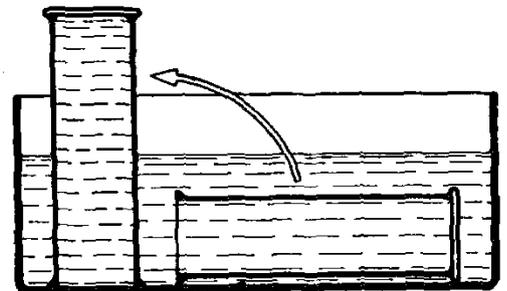


Abb. 74/1. Aufrichten eines mit Wasser gefüllten Zylinders in einer pneumatischen Wanne

#### *Versuch b: Benutzung eines an einem Ende mit einem Gummistopfen verschlossenen weiten Glasrohres*

An Stelle des Standzylinders verwendet man ein an einem Ende mit einem Gummistopfen verschlossenes weites Glasrohr. Man führt den Versuch wie beim

Versuch a durch. Wieder wirkt der Luftdruck nur von unten; das Wasser fließt nicht aus. Entfernt man aber den Gummistopfen, so wirkt der Luftdruck auch von oben auf das im Zylinder befindliche Wasser und hebt sich in seiner Wirkung auf. Das Wasser fließt infolge seiner Schwere sofort aus.

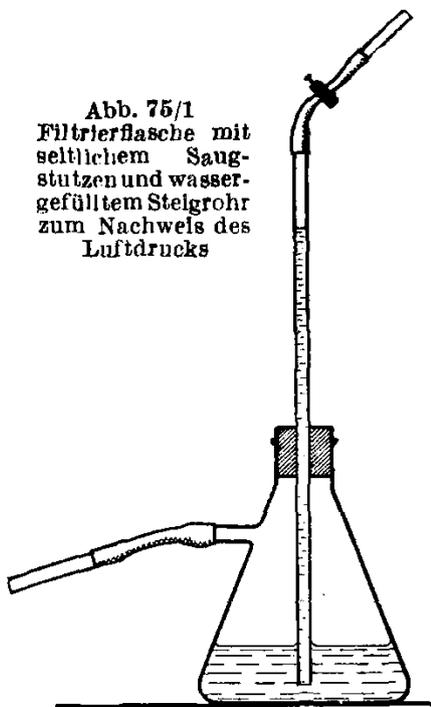
### 68. Nachweis des Luftdrucks mit Hilfe einer Filtrierflasche [G — Ü]

Filtrierflasche mit seitlichem Rohrstopfen, einfach durchbohrter Gummistopfen, Glasrohr ( $\varnothing$  etwa 7 mm, Länge etwa 300 mm bis 500 mm), 2 Gummischlauchstücke, 2 kurze Glasrohre, Quetschhahn.

Man füllt eine Filtrierflasche mit seitlichem Rohrstopfen etwa ein Viertel voll Wasser und verschließt sie mit einem durchbohrten Gummistopfen. Durch die Bohrung steckt man ein etwa 30 cm bis 50 cm langes Glasrohr mit einem Durchmesser von etwa 7 mm, das beinahe bis zum Flaschenboden reicht. Über das obere Rohrende sowie über den seitlichen Stopfen der Flasche wird je ein kurzer Gummischlauch geschoben (Abb. 75/1). Man saugt zunächst am oberen Ende des Steigrohrs das Wasser mit dem Mund bis in Höhe des Gummischlauches und quetscht den Schlauch mit einer Klemme zu.

Hierauf saugt man an dem Gummischlauch des seitlichen Stopfens. Dadurch verringert sich der Luftdruck in der Flasche; das im Rohr stehende Wasser fließt in die Flasche zurück. Läßt man wieder durch das Seitenrohr Luft in die Flasche strömen, so wird das Wasser im Glasrohr hochgedrückt. Verschließt man umgekehrt nach dem Saugen die Seitenöffnung durch einen Quetschhahn und öffnet den oberen Quetschhahn, so strömt Luft in Blasen durch das Wasser in das Innere der Flasche.

Abb. 75/1  
Filtrierflasche mit  
seitlichem Saug-  
stopfen und wasser-  
gefülltem Steigrohr  
zum Nachweis des  
Luftdrucks



### 69. Nachweis des Luftdrucks mit Hilfe eines Blasen Sprengers [G, O]

Kolbenluftpumpe mit Luftpumpenteller, starkwandiger, auf beiden Seiten offener Glaszylinder (innerer Durchmesser etwa 110 mm, Höhe 40 mm) mit verstärkten, plangeschliffenen Rändern oder Metallzylinder von gleicher Größe und Beschaffenheit, feste Schnur, Cellophanhaut oder Schweinsblase, Glasplatte (etwa 100 mm  $\times$  100 mm  $\times$  1 mm), etwas Pumpenfett.

Der oben angegebene Glas- oder Metallzylinder wird allgemein als Blasen Sprenger bezeichnet, weil er üblicherweise mit einer Schweinsblase abgebunden wird. Man kann aber die Wirkung des Luftdruckes auch an einer dünnen Glasscheibe nachweisen.

*Versuch a: Sprengen einer Schweinsblase oder einer Cellophanhaut*

Ein Stück einer eingeweichten Schweinsblase wird straff über den einen Rand des Blasen Sprengers gezogen und festgebunden. Nach dem Trocknen der Blase wird der unbedeckte Rand des Ringes eingefettet und fest auf den Luftpumpenteller

gedrückt. Die innerhalb des Ringes befindliche Luft saugt man mit der Luftpumpe ab. Durch den äußeren Luftdruck wird die Schweinsblase nach innen gedrückt und zerplatzt mit lautem Knall.

#### Versuch b: Sprengen einer Glasplatte

Eine ähnliche Wirkung zeigt der Versuch, bei dem eine Glasplatte statt der Schweinsblase verwendet wird. Beide Ränder des Metallzylinders werden vor dem Aufsetzen auf den Luftpumpenteller gut eingefettet. Nachdem man die Glasplatte fest auf den Ring gelegt hat, wird wie in Versuch a die Luft abgesaugt (Abb. 76/1). Ist der Druck im Innern des Zylinders genügend gesunken, so wird die Glasscheibe durch den äußeren Luftdruck eingedrückt.

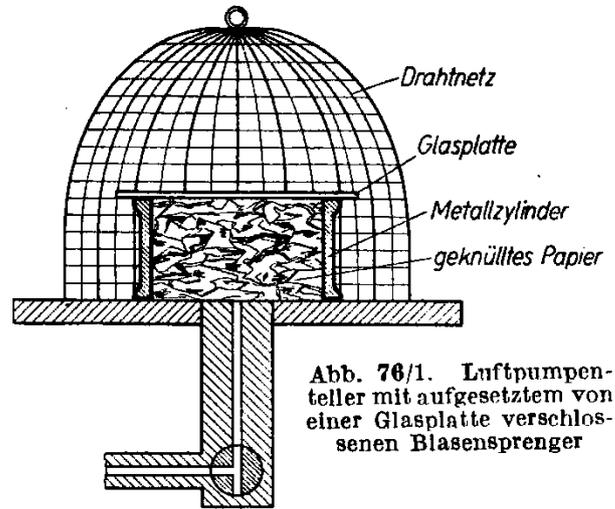


Abb. 76/1. Luftpumpenteller mit aufgesetztem von einer Glasplatte verschlossenen Blasen sprenger

#### Bemerkungen:

1. Damit keine Glassplitter in die Luftpumpenkanäle gelangen, empfiehlt es sich, den Blasen sprenger mit zerknülltem Papier auszufüllen. Auch der Verschluss der Telleröffnung durch eine in einem Gummistopfen steckende halbkreisförmig gebogene starkwandige Glasröhre hat sich als zweckmäßig erwiesen.
2. Zum Schutz der Schüler vor unter Umständen herumfliegenden Glassplittern kann man über die Versuchsanordnung eine Drahtglocke stülpen.

### 70. Nachweis der Gleichheit des Luftdrucks in allen Richtungen [0]

Glasrohr ( $\varnothing$  etwa 7 mm, Längen etwa 300 mm und 30 mm), kurzes Glasrohr ( $\varnothing$  7 mm, nach dem einen Ende zu etwas verjüngt), Gummischlauchstück ( $\varnothing$  zu den Glasrohren passend, Länge 100 mm), Gummistopfen.

Ein kurzes, nach einem Ende zu verjüngtes Glasrohr wird am anderen Ende mit einem längeren Rohr durch ein Schlauchstück verbunden. Dieses versieht man an seinem freien Ende mit einem weiteren kurzen Schlauchstück und füllt beide Rohre durch Ansaugen mit Wasser. Das freie Ende des langen Rohrs verschließt man danach durch einen Quetschhahn. Hält man das lange Rohr senkrecht nach oben, so daß das kurze Rohr mit seinem verjüngten Ende frei herabhängt, so fließt das Wasser nicht aus. Biegt man den Verbindungsschlauch so, daß das kurze Rohr in verschiedene Richtungen zeigt, so bleibt das Wasser unverändert in beiden Rohren stehen (Abb. 76/2). Der Luftdruck wirkt in gleicher Höhe auf die untere Öffnung des Rohres von allen Richtungen her gleich stark.

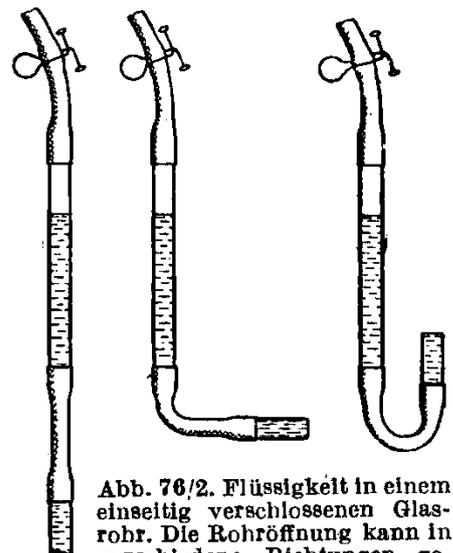


Abb. 76/2. Flüssigkeit in einem einseitig verschlossenen Glasrohr. Die Rohröffnung kann in verschiedene Richtungen gehalten werden.

*Bemerkung:* Die Größe des von allen Seiten wirkenden Luftdrucks ist bei diesem Versuch nicht feststellbar. Deshalb kann bei der Richtungsänderung des kurzen Rohrstückes die Änderung des Niveauunterschieds zwischen der Ausflußöffnung und dem Wasserspiegel vernachlässigt werden.

### 71. Wirkung des Luftdrucks auf ein mit der Öffnung nach unten gehaltenes, mit Wasser gefülltes Gefäß [G, O – Ü]

Trinkglas, Glasrohr (lichte Weite 8 mm, Länge etwa 500 mm und darüber), Gummistopfen, Schreibpapier.

#### *Versuch a: Benutzung eines Trinkglases*

Ein Trinkglas wird bis zum Rand mit Wasser gefüllt und mit einem Stück Schreibpapier abgedeckt. Man erfaßt das Trinkglas mit der einen Hand, drückt das Papierblatt mit der Handfläche der anderen Hand leicht an und kehrt das Glas um. Entfernt man die Hand von dem Papierblatt, so fließt das Wasser nicht aus. Der Luftdruck ist größer als der Schweredruck des Wassers und drückt das Papierblatt fest gegen das Trinkglas.

#### *Versuch b: Benutzung einer Glasröhre*

Eine Glasröhre wird einseitig mit einem Gummistopfen luftdicht verschlossen und mit Wasser gefüllt. Man legt ein Blatt Papier auf die Rohrmündung, drückt es mit der Hand leicht an und kehrt das Rohr langsam um. Entfernt man die Hand vom Papier, so fließt kein Wasser aus, da der äußere Luftdruck das Papier an die Rohrmündung preßt. Wiederholt man den Versuch mit einer etwas engeren Röhre, so fließt das Wasser beim Umkehren auch dann nicht aus, wenn das Papierblatt fortgelassen wird. Die Oberflächenspannung ist so stark, daß sie wie eine Haut wirkt, die die Rohrmündung abschließt.

*Bemerkung:* Der Versuch eignet sich gut zur Einführung in die Wirkungsweise des Stechhebers und der Pipetten verschiedener Art. Man wird zeigen, daß einfache Stechheber nur zum Umfüllen, aber nicht zum Abmessen von Flüssigkeiten verwendet werden. Als quantitativ verwendbare Meßgeräte wird man die Vollpipette und die Röhrenpipette einführen.

### 72. Nachweis des Luftdrucks an zwei ineinandergesteckten Reagenzgläsern [G, O – Ü]

Zwei Reagenzgläser, von denen sich das eine gerade in das andere stecken läßt.

Man wählt für den Versuch zwei Reagenzgläser, von denen sich das eine gerade in das andere einführen und sich in ihm verschieben läßt, ohne zu klemmen. Das größere der beiden Gläser wird zur Hälfte mit Wasser gefüllt. Das kleinere Glas führt man in das größere ein und drückt es einige Zentimeter tief in die Flüssigkeit, so daß das Wasser über den Rand des größeren Glases läuft. Kehrt man jetzt beide Gläser um, so wird das innere Glas durch den Luftdruck in das äußere hineingedrückt und gleitet dabei nach oben (Abb. 77/1). Das im äußeren Glas befindliche Wasser fließt dabei aus, soweit es verdrängt wird.

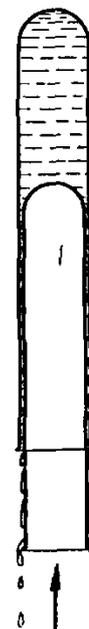


Abb. 77/1. Zwei ineinandergesteckte Reagenzgläser. Der Luftdruck drückt das innere Reagenzglas entgegen der Schwerkraft nach oben.

### 73. Nachweis des Luftdrucks mit Hilfe einer in einer Abklärflasche befindlichen Gummiblase [G, O]

Gummiblase oder Kinderluftballon, Abklärflasche (5 l), 2 einfach durchbohrte Gummistopfen, 3 kurze Glasrohre, Gummischlauch (Länge etwa 200 mm), Quetschhahn, dünne Schnur.

Bei diesem Versuch wird eine Abklärflasche mit einem Inhalt von etwa 5 l als Rezipient verwendet. Ein etwa 10 cm langes Glasrohr wird mit Hilfe eines Eisendorns an einem Ende über einer Flamme etwas konisch erweitert. Über das glatte Ende des Rohrs wird ein zum oberen Tubus der Flasche passender durchbohrter Gummistopfen geschoben. Über das konisch erweiterte Ende zieht man den Schlauchansatz eines Luftballons und bindet ihn nach mehrmaligem Umwickeln mit dünner Schnur fest. Man steckt die Gummiblase in die Flasche und verschließt sie oben mit dem Gummistopfen (Abb. 78/1). Der seitliche Tubus dient als Saugstutzen. Er wird mit einem durchbohrten Gummistopfen verschlossen. In dessen Bohrung steckt man ein kurzes, mit einem Gummischlauch verbundenes Glasrohr.

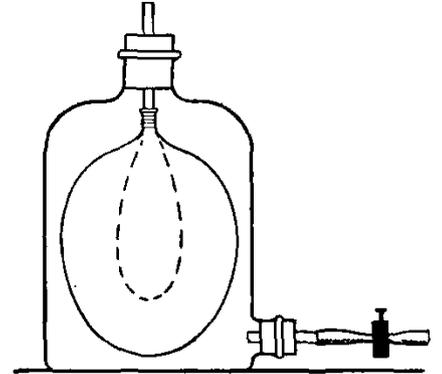


Abb. 78/1. Abklärflasche mit Gummiblase zum Nachweis des Luftdrucks

#### Versuch:

Saugt man mit dem Munde an dem Gummischlauch, so wird dadurch der Luftdruck in der Flasche verringert. Der äußere Luftdruck bläht die Gummiblase so weit auf, bis ihre weitere Ausdehnung durch die Flaschenwand begrenzt wird. Mit Hilfe eines Quetschhahns verschließt man den Saugschlauch. Der unverschlossene Ballon bleibt infolge des einseitig auf ihn wirkenden Luftdrucks aufgeblasen.

Öffnet man den Quetschhahn, so sinkt die Blase wieder in sich zusammen. Die in ihr befindliche Luft entweicht dabei nach oben.

#### Bemerkungen:

1. Der Versuch kann auch in umgekehrter Form durchgeführt werden. Man bläst die in der Flasche befindliche Gummiblase durch das obere Glasrohr auf. Durch den aufgeblasenen Ballon wird die in der Flasche befindliche Luft verdrängt. Verschließt man den seitlichen Tubus luftdicht, so wirkt auch jetzt der äußere Luftdruck einseitig auf den Ballon. Der Ballon bleibt aufgeblasen.

Der Versuch ist deswegen für die Schüler überraschend, weil der Ballon seine Gestalt beibehält, obwohl er unverschlossen ist. Der Versuch ist in seiner Wirkung dem Versuch 74 in gewissem Sinne ähnlich. Während aber in V74 die Gummiblase verschlossen ist, bleibt sie jetzt offen. V74 zeigt die Expansion, die bei der in der Gummiblase eingeschlossenen Luft bei vermindertem äußerem Luftdruck wirksam wird. Hier dagegen ist es der einseitig wirkende Druck der äußeren Luft, der das Aufblähen der Gummiblase verursacht.

2. Auch mit einer Seifenblase kann man den Versuch durchführen. Man zieht den Gummistopfen mit Glasrohr aus dem oberen Tubus und löst die Gummiblase vom Glasrohr. Das erweiterte Ende des Rohrs taucht man in die nach den Angaben des V115 hergestellte Seifenlösung. Hat man den Gummistopfen mit dem Glasrohr wieder in den Tubus eingesetzt, so saugt man am Gummischlauch. An dem Glasrohr bildet sich eine Seifenblase.

Besonders wirkungsvoll ist es, wenn man eine zweite Seifenblase in der ersten entstehen läßt. Zu diesem Zweck steckt man durch das Glasrohr ein zweites Rohr von geringerem Durchmesser, das gerade in das erste Rohr hineinpaßt. Das eingeschobene Ende des Rohres wurde vorher in die Seifenlösung getaucht. Man schiebt das zweite Rohr so weit, bis das benetzte Ende in die Seifenblase des äußeren Rohres hineinragt. Saugt man jetzt am Gummischlauch weiter, so vergrößert sich die bereits vorhandene Seifenblase. Gleichzeitig bildet sich am inneren Rohr in der bereits vorhandenen Blase eine zweite, kleinere Seifenblase, da die schmale Fuge zwischen den beiden Rohren durch die Seifenlösung abgedichtet wird.

#### 74. Nachweis der Spannkraft der Luft an einer unter einem Rezipienten befindlichen Gummiblase [G, O]

Luftpumpe mit Luftpumpenteller, Rezipient, Gummiblase, runzliger Apfel, Fett, Schnur.

Eine kleine, nicht prall aufgeblasene Gummiblase wird mit einer Schnur fest zugebunden und unter den Rezipienten einer Luftpumpe gelegt. Beim Evakuieren des Rezipienten dehnt sich die Gummiblase aus, beim Einströmen der Luft sinkt sie wieder zusammen.

Ersetzt man die Gummiblase durch einen runzligen Apfel, so sieht man beim Herabsetzen des Luftdruckes, wie die Runzeln des Apfels allmählich verschwinden. Bei weiterem Evakuieren nimmt der Apfel an Größe zu, dabei glättet sich die Haut des Apfels vollständig. Läßt man wieder Luft einströmen, so wird der Apfel noch runzliger als vorher, da die Luft aus ihm herausgepumpt wurde.

*Bemerkungen:*

1. Statt des Apfels kann man auch eine runzlige Kartoffel verwenden, bei der noch keine Verhärtung der Schale eingetreten ist.
2. Sehr eindrucksvoll ist es, unter den Rezipienten einen kleinen Becher mit Rasierseifenschaum zu stellen, der sich beim Evakuieren ganz erheblich ausdehnt. Es empfiehlt sich, den Becher in eine Schale zu stellen.

#### 75. Heronsball unter einem Rezipienten [G]

Kochflasche (100 ml), U-förmig gebogenes Glasrohr ( $\varnothing$  etwa 7 mm), Becherglas (250 ml), Gummistopfen, Luftpumpe mit Luftpumpenteller, Rezipient, gefärbtes Wasser.

Eine mit gefärbtem Wasser halb gefüllte Kochflasche wird mit einem durchbohrten Gummistopfen verschlossen. Durch diesen wird der eine Schenkel eines U-förmig gebogenen Glasrohres geschoben, bis er fast den Boden der Kochflasche berührt. Der außerhalb der Kochflasche befindliche Schenkel reicht ebenfalls bis zum Boden eines leeren Becherglases, das neben der Kochflasche steht. Diese Versuchsanordnung stellt man unter den Rezipienten einer Luftpumpe (Abb. 79/1). Sobald die Luft abgesaugt wird, fließt das gefärbte Wasser aus der Kochflasche durch das U-Rohr in das Becherglas. Läßt man die Luft wieder in den Rezipienten strömen, so fließt das Wasser in die Kochflasche zurück.

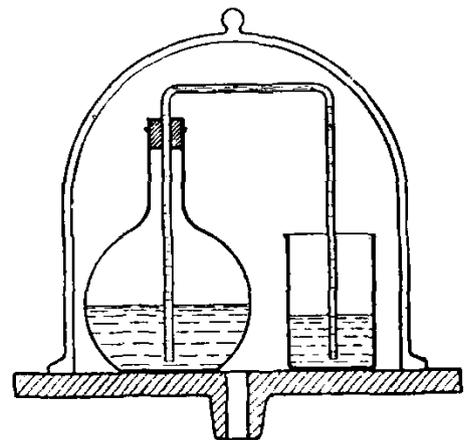


Abb. 79/1. Heronsball unter einem Rezipienten zum Nachweis des Luftdrucks

## 76. Heronsball in einem Einweckglas [G]

Einweckglas mit Deckel und Dichtungsring, Arzneifläschchen mit Korkstopfen, Glasröhrchen ( $\varnothing$  etwa 3 mm, Länge etwa 50 mm), Kerze, Spiritusbrenner oder Bunsenbrenner.

Dieser Versuch gleicht in seiner Wirkung dem Versuch 75. Statt des mit der Luftpumpe verbundenen Rezipienten verwendet man ein Einweckglas. Die Kochflasche wird durch ein Arzneifläschchen ersetzt. Man durchbohrt den Verschlußkorken des Arzneifläschchens und steckt in die Bohrung ein Glasröhrchen, dessen eines Ende annähernd bis zum Boden des Fläschchens reicht. Das Fläschchen wird zur Hälfte mit Wasser gefüllt und auf die Innenseite des zum Weckglas gehörenden mit einem Dichtungsring versehenen Deckels gestellt, den man mit der Innenseite nach oben flach auf den Tisch gelegt hat.

Das Einweckglas wird mit der Öffnung nach unten über eine brennende Kerze, eine Spiritusflamme oder eine Gasflamme gehalten. Hat sich die Luft im Glas fühlbar erwärmt, so stülpt man das Glas über das Arzneifläschchen und drückt das Glas auf den Dichtungsring. Zur besseren Abdichtung beschwert man das Glas durch ein Gewichtsstück von etwa 5 kg (Abb. 80/1). Kühlt sich die Luft im Einweckglas ab, so entsteht in diesem ein Unterdruck gegenüber der Umgebung. Die im Fläschchen unter atmosphärischem Druck stehende Luft drückt das Wasser aus dem Fläschchen hinaus.

*Bemerkung:* Dem Versuch liegt dasselbe Verfahren zugrunde wie das bei dem von *A. Leistler* konstruierten, früher oft verwendeten Vakuumparat. Dieses Gerät ermöglicht, ohne daß eine Luftpumpe verwendet wird, die Durchführung vieler Versuche, bei denen ein Vakuum erforderlich ist, das 280 Torr nicht unterschreitet.

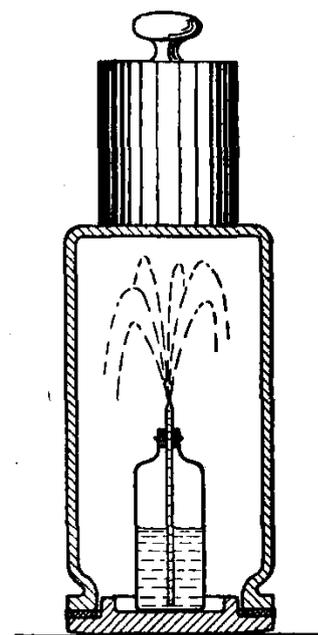


Abb. 80/1  
Arzneifläschchen als  
Heronsball in einem  
Einweckglas

## 77. Nachweis der Spannkraft der Luft mit Hilfe einer umgekehrten Kochflasche unter einem Rezipienten [G, O]

Kleine Kochflasche (100 ml), Becherglas (250 ml), Luftpumpe mit Luftpumpenteller, Rezipient.

Man füllt eine kleine Kochflasche mit gefärbtem Wasser, kehrt die Kochflasche rasch um und legt sie mit der Öffnung nach unten auf ein Becherglas. Das Wasser fließt so lange aus, bis das im Becherglas aufsteigende Wasser die Flaschenmündung erreicht hat. Bringt man diese Anordnung unter einen Rezipienten und saugt mit einer Luftpumpe die Luft aus diesem, so fließt das Wasser weiter aus der Kochflasche in das Becherglas (Abb. 80/2).

Öffnet man den Absperrhahn der Luftpumpe, so drückt die einströmende Luft das Wasser wieder in die Kochflasche zurück.

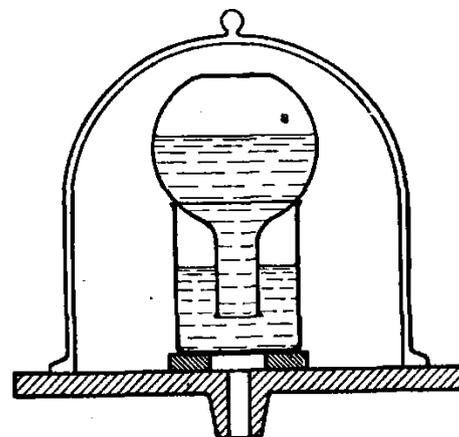


Abb. 80/2. Eine umgekehrt auf  
einem Becherglas ruhende Koch-  
flasche unter einem Rezipienten

### 78. Nachweis der Spannkraft der Luft mit Hilfe einer Kochflasche und einer damit verbundenen Saugflasche [G, O]

Kochflasche (500 ml), Flasche mit weitem Hals (500 ml), U-förmig gebogenes Glasrohr ( $\varnothing$  etwa 6 mm, Schenkel etwas länger als die Flaschenhöhe), rechtwinklig gebogenes Glasrohr ( $\varnothing$  etwa 6 mm), ein einfach durchbohrter und ein zweifach durchbohrter Korken, Schlauch.

Der Versuch zeigt die gleichen Erscheinungen wie V 77. Er ist aber im Gegensatz zu diesem ohne Luftpumpe und Rezipienten durchführbar.

Man füllt die Kochflasche etwa zur Hälfte mit Wasser und verbindet sie durch ein U-Rohr mit einer weithalsigen Flasche. An diese schließt man außerdem einen Saugschlauch an (Abb. 81/1). Man saugt an diesem und ruft dadurch in der Saugflasche eine Luftverdünnung hervor, so daß sich die Luft in der Kochflasche ausdehnt. Das Wasser strömt aus der Kochflasche in die Saugflasche über.

Läßt man in diese wieder von außen Luft Zutreten, so strömt das Wasser in die Kochflasche zurück. Die in dieser befindliche Luft zieht sich wieder auf ihren ursprünglichen Rauminhalt zusammen.

*Bemerkung:* [O] Der Versuch läßt deutlich das Expansionsvermögen der Luft erkennen. Es empfiehlt sich, das Verbindungsrohr schon vor Beginn des Versuches mit Wasser zu füllen und in die Saugflasche soviel Wasser zu gießen, daß die Öffnung der Heberöhre noch eintaucht. Auf diese Weise wird erreicht, daß keine Fremdluft zu der in der Kochflasche befindlichen Luft hinzutritt. Den Anfangsstand des Wasserspiegels in der Kochflasche markiert man durch einen auf die Kochflasche geklebten Papierstreifen.

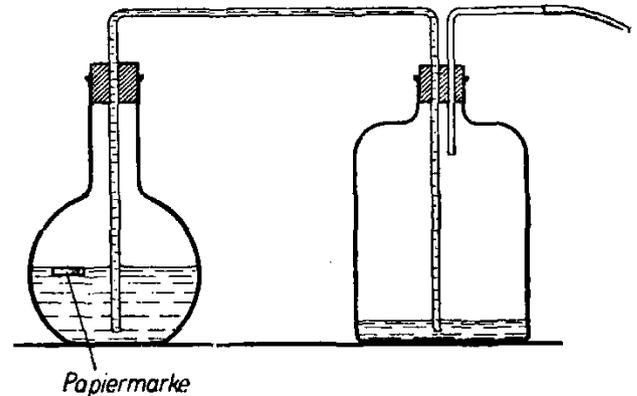


Abb. 81/1. Die Expansion der Luft

### 79. Nachweis der im Holz und im Wasser befindlichen Luft [G, O]

Luftpumpe mit Luftpumpenteller, Rezipient, Becherglas (500 ml), kleines Becherglas, ein trockenes Stück Fichtenholz, ein genügend großes Eisenstück, Bindendraht.

#### Versuch a:

Aus einem trockenen Stück Fichtenholz sägt man senkrecht zu dem Gefäßsystem eine etwa 3 mm bis 4 mm starke Scheibe und spaltet sie in quadratische Stücke mit einer Seitenlänge von 30 mm bis 50 mm.

Ein mit Wasser gefülltes Becherglas wird unter den Rezipienten einer Luftpumpe gestellt. Durch Absaugen der Luft aus dem Rezipienten macht man das Wasser luftfrei. In dieses so vorbereitete Wasser legt man eine oder mehrere der zugeschnittenen Holzscheiben, nachdem man sie vorher mit Draht umwunden und durch ein Eisenstück beschwert hat (Abb. 81/2). Infolge ihrer Schwere sinken sie auf den Boden des Becherglases.

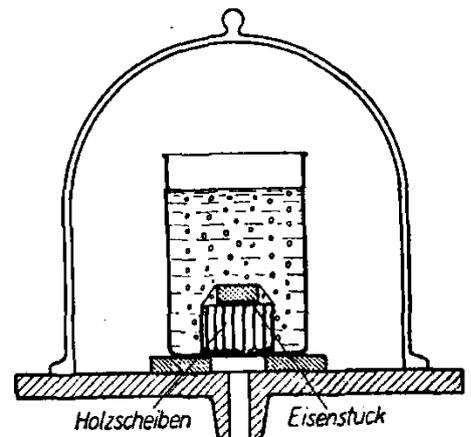


Abb. 81/2. Ein mit Eisen beschwertes Fichtenholzstück in einem Becherglas unter einem Rezipienten

Bei erneutem Evakuieren setzt ein starkes Aufperlen von Luftblasen ein. Das Absaugen der Luft wird so lange fortgesetzt, bis nur noch wenige Luftblasen aufsteigen.

Man läßt die Luft wieder in den Rezipienten einströmen, nimmt das Becherglas mit dem Holzstück aus dem Rezipienten heraus und taucht das ganze Glas in einen mit Wasser gefüllten Glastrog. Man entfernt unter Wasser das Eisen von den Holzstücken. Diese sinken jetzt auch ohne Beschwerung wie ein Stein unter.

#### Versuch b:

Stellt man ein kleines Becherglas mit Wasser unter den Rezipienten und evakuiert ihn, so schließt sich die im Wasser befindliche Luft zu kleinen Blasen zusammen, die in die Höhe steigen. Eindrucksvoll ist es, den Versuch mit abgestandenem Bier durchzuführen. Durch das Evakuieren wird eine kräftige Schaumbildung hervorgerufen, die beim Zuströmen von Luft sofort wieder vergeht.

### 80. Vorversuch zum Saugheber [G]

U-Rohr aus Glas mit zwei gleich langen, zu spitzen Öffnungen ausgezogenen Schenkeln ( $\varnothing$  etwa 8 mm, Schenkellänge 200 mm), U-Rohr von gleicher Beschaffenheit wie das erste, aber mit ungleich langen Schenkeln (Schenkellänge 300 mm und 180 mm), gefärbtes Wasser, Wanne.

#### Versuch 1:

Man füllt zunächst das gleichschenklige U-Rohr der ganzen Länge nach mit Wasser, umfaßt jeden Schenkel mit einer Hand und schließt beide nach oben gerichteten Öffnungen mit dem Daumen. Dann dreht man das U-Rohr um und löst die Daumen behutsam von den Öffnungen. Liegen dabei die Öffnungen in derselben waagerechten Ebene, so fließt das Wasser nicht aus (Abb. 82/1a).

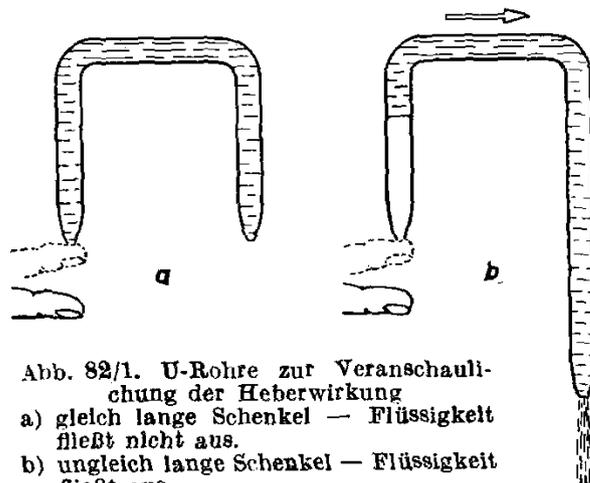


Abb. 82/1. U-Rohre zur Veranschaulichung der Heberwirkung  
a) gleich lange Schenkel — Flüssigkeit fließt nicht aus.  
b) ungleich lange Schenkel — Flüssigkeit fließt aus.

#### Versuch 2:

Man wiederholt den Versuch mit dem ungleichschenkligen U-Rohr. Gibt man nach dem Umkehren zunächst nur eine Öffnung frei, so fließt kein Wasser aus. Sobald man aber auch das andere Ende des Rohres öffnet, fließt das ganze Wasser zum langen Schenkel heraus, und zwar unabhängig davon, welche Öffnung zuerst freigegeben wurde (Abb. 82/1b).

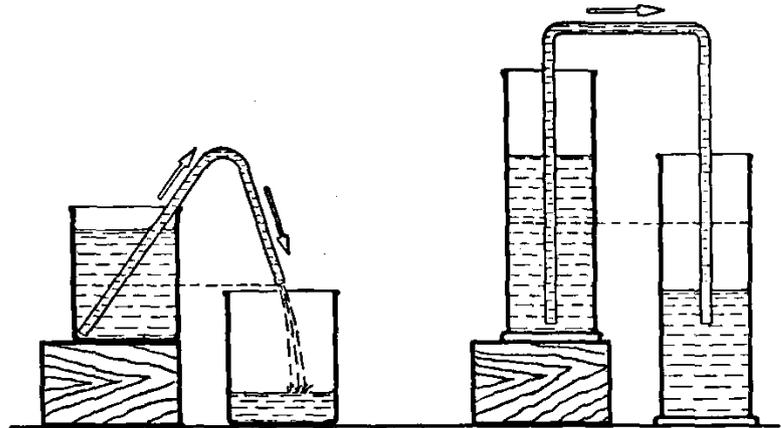
Beim Versuch 1 sind die Wassersäulen gleich schwer; sie werden von dem auf beide Öffnungen gleich stark wirkenden Luftdruck getragen. Beim Versuch 2 ist das Gleichgewicht gestört; es überwiegt das Gewicht der Wassersäule im langen Schenkel, die die kürzere und somit leichtere Wassersäule des kurzen Schenkels nach sich zieht.

## 81. Der einfache Saugheber [G – Ü]

U-Rohr aus Glas ( $\varnothing$  etwa 8 mm, Schenkellänge 250 mm), unter einem spitzen Winkel gebogenes Rohr mit ungleich langen Schenkeln, 2 gleich große Standzylinder (Höhe etwa 250 mm) oder 2 große Bechergläser, U-förmig gebogenes Rohr mit gleich langen Schenkeln, Unterlegklotz, Wassertrog, Schlauch.

### Versuch a:

Man senkt in ein erhöht aufgestelltes, mit Wasser gefülltes Becherglas den langen Schenkel eines Winkelrohres ein, das man durch Ansaugen mit Wasser gefüllt hat und dessen freie Öffnung man zunächst noch verschlossen hält. Gibt man die Öffnung frei, so fließt das Wasser in ein darunterstehendes Becherglas ab (Abb. 83/1a). Sobald das Wasserniveau unter die freie Öffnung sinkt, tritt Luft in diese ein. Das im Rohr befindliche Wasser fließt zurück, der Heber hört auf zu arbeiten.



a) Abhebern einer Flüssigkeit durch einen Winkelheber

b) Zwei durch einen Heber verbundene Gefäße

Abb. 83/1. Saugheber

### Versuch b:

Man stellt zwei gleich große, etwas mehr als bis zur Hälfte mit Wasser gefüllte Standzylinder oder Bechergläser nebeneinander und senkt in beide die Schenkel eines ganz mit Wasser gefüllten U-Rohres. Wenn man den einen Zylinder anhebt und ihn auf einen Unterlegklotz stellt, fließt Wasser in den tiefer stehenden Zylinder über, bis wieder Wassergleichstand in beiden Zylindern vorhanden ist (Abb. 83/1 b). Senkt man den hochgestellten Zylinder wieder, so fließt das Wasser in der umgekehrten Richtung.

### Versuch c (Freihandversuch):

In einen mit Wasser gefüllten Trog taucht man einen etwa 1 m langen Schlauch nach und nach ein, so daß er sich ganz mit Wasser füllt. Man verschließt ein Ende des Schlauchs mit zwei Fingern, hebt es aus dem Wasser heraus und senkt es seitlich bis unter das Wasserniveau. Gibt man das Ende frei, so fließt das Wasser aus.

### Bemerkungen:

1. Zur Erklärung der Erscheinungen ist darauf hinzuweisen, daß das Gewicht der im äußeren Rohrschenkel befindlichen Wassersäule größer ist als das Gewicht der im inneren Rohrschenkel oberhalb des Wasserspiegels stehenden Wassersäule.
2. Zwei durch einen Heber verbundene Gefäße verhalten sich ebenso wie zwei durch ein Rohr unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche verbundene Gefäße.

## 82. Saugheber im luftverdünnten Raum [O]

Rundkolben (250 ml), Destillierkolben (250 ml), 2 Glasrohre ( $\varnothing$  etwa 6 mm, Länge etwa 200 mm), 2 schwach gewinkelte Glasrohre mit kurzen Schenkeln, 2 doppelt durchbohrte Gummistopfen, 2 Vakuumschläuche (Länge etwa je 500 mm), Stativ mit langem Stab, 2 Klemmen, 2 kurze Stativstäbe, Muffe mit Klemme, dünne Schnur, Luftpumpe, gefärbtes Wasser, 2 Unterlegringe.

Der Versuch soll den Schülern zeigen, daß ein Saugheber auch arbeitet, wenn der auf dem Wasser lastende Luftdruck sinkt. Es wird bei diesem Versuch die Schwierigkeit der Anordnung eines Hebers unter einem Rezipienten vermieden.

### Versuchsanordnung:

Man füllt den Rundkolben und den Destillierkolben etwa zur Hälfte mit Wasser, verschließt sie mit je einem doppelt durchbohrten Gummistopfen und stellt sie auf zwei Unterlegringe. In die Stopfen führt man vorher je eine lange, bis auf den Boden der Gefäße reichende Glasröhre und eine kurze gewinkelte Glasröhre ein. Die beiden langen Glasröhren und die beiden gewinkelten Glasröhren verbindet man untereinander durch je einen etwa 0,5 m langen Vakuumschlauch, wobei der die beiden langen Glasröhren verbindende Schlauch und die langen Glasröhren selbst der ganzen Länge nach mit Wasser gefüllt sein müssen. Hierdurch wird erreicht, daß sowohl die beiden mit Wasser gefüllten Teile der Kolben wie die darüber befindlichen Lufträume miteinander kommunizieren (Abb. 84/1). Damit die Schläuche nicht lose herabhängen und auch nicht einknicken, legt man sie etwa in der Mitte über zwei an ein Stativ geklemmte kurze Stäbe und bindet sie daran fest. An den Saugstutzen des Destillierkolbens schließt man eine Luftpumpe an.

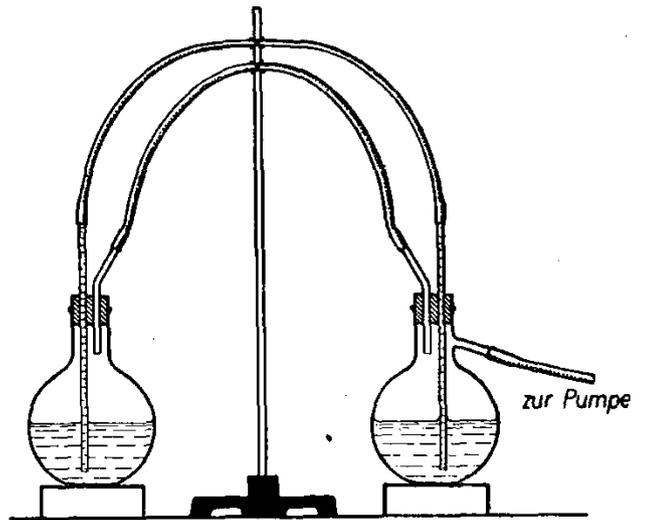


Abb. 84/1. Unter vermindertem Luftdruck arbeitender Saugheber

Hierdurch wird erreicht, daß sowohl die beiden mit Wasser gefüllten Teile der Kolben wie die darüber befindlichen Lufträume miteinander kommunizieren (Abb. 84/1). Damit die Schläuche nicht lose herabhängen und auch nicht einknicken, legt man sie etwa in der Mitte über zwei an ein Stativ geklemmte kurze Stäbe und bindet sie daran fest. An den Saugstutzen des Destillierkolbens schließt man eine Luftpumpe an.

### Versuch:

Man beginnt den Versuch damit, daß man den Rundkolben etwas anhebt. Sobald dies geschieht, wirkt der Verbindungsschlauch der langen Glasröhren als Heber; das Wasser fließt aus dem Rundkolben in den Destillierkolben über. Stellt man den Rundkolben wieder auf den Ring, so fließt das Wasser in den Kolben zurück.

Nunmehr saugt man aus dem Destillierkolben und damit auch aus dem Rundkolben etwas Luft aus. Trotzdem kann man den Versuch wiederholen. Auch bei vermindertem Druck bleibt der Heber in Tätigkeit, sofern der Druck nicht so stark sinkt, daß die Flüssigkeitssäule abreißt. Dies tritt ein, wenn die Kohäsionskräfte des Wassers das Gewicht der Wassersäulen nicht mehr zu tragen vermögen.

*Bemerkungen:*

1. Voraussetzung für das Gelingen des Versuches ist, daß die Gummistopfen dicht schließen und die Schlauchenden fest auf den Glasröhren sitzen, damit die Luftdrucksenkung in den Gefäßen erhalten bleibt.
2. Will man verhüten, daß etwa Wasser in die Luftpumpe gelangt, so wird man in die zur Luftpumpe führende Schlauchleitung eine Flasche mit doppelt durchbohrtem Korken und zwei gewinkelten Glasröhren zwischenschalten; die Flasche dient dazu, mitgerissene Wasserteile aufzufangen.

Noch zweckmäßiger ist es, eine Wasserstrahlpumpe zu verwenden, deren Leistung für den Versuch ausreicht und die durch eindringendes Wasser nicht beschädigt wird.

3. Das Evakuieren muß vorsichtig erfolgen. Der Versuch darf nicht bis an die Festigkeitsgrenze der Glasgefäße getrieben werden, da sonst mit einem Zerspringen der Kolben zu rechnen ist.

Es empfiehlt sich, zur Kontrolle des Drucks und auch zum besseren Erkennen der zu untersuchenden Zusammenhänge an die Saugleitung ein Manometer anzuschließen.

**83. Modellversuch zum Saugheber [G, O]**

Stativ mit langem Stab, leichtbewegliche Rolle, Kette mit dünnen leichtbeweglichen Gliedern, 2 Bechergläser.

Man befestigt am oberen Ende eines langen Stativs eine leichtbewegliche Rolle. Über die Rolle legt man eine etwa 2 m lange, recht schmiegsame Kette. Die Enden der Kette werden zusammengewickelt in zwei untergestellte Bechergläser gelegt (Abb. 85/1). Beim Anheben der beiden Bechergläser verkürzt sich die hängende Kette. Sind beide Seiten der Kette gleich lang, so bleibt die Kette in Ruhe. Hebt man aber eines der Gläser höher als das andere, so rollt die Kette durch das Übergewicht der langen Kettenseite vollständig in das tiefer stehende Glas ab.

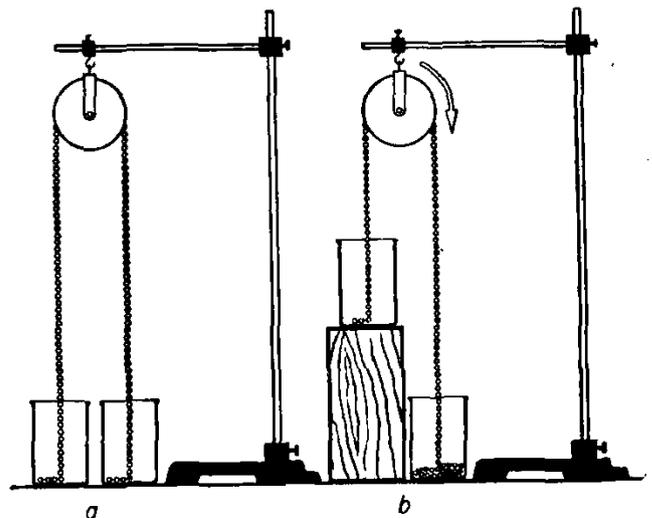


Abb. 85/1. Kette als Modell eines Saughebers

*Bemerkungen:*

1. Die größte Länge, die eine frei herabhängende Kette haben kann, richtet sich nach der Zugfestigkeit des schwächsten Kettengliedes. Überschreitet bei großer Kettenlänge das Gewicht der Kette die Zugfestigkeit, so reißt die Kette. Aus einem ähnlichen Grund sind auch Saugheber nur bis zu einer bestimmten Saughöhe verwendbar. Ist das Gewicht der Flüssigkeitssäule größer als die Kohäsionskraft des Wassers, so reißt die Flüssigkeitssäule ab.
2. Statt mit einer Gliederkette läßt sich der Versuch auch mit einer schweren, aber trotzdem sehr schmiegsamen Schnur durchführen. Auch eine geöffnete, gut geölte Fahrradkette ist geeignet, die man über das Kettenrad eines hochgestellten Fahrrades legt und zu beiden Seiten frei herabhängen läßt.
3. Der Versuch wird am besten an V 81 und V 82 angeschlossen. Er gibt das Kräftespiel am Saugheber unverfälscht wieder, da auch beim Heber ganz ähnliche Verhältnisse vorliegen.

## 84. Selbstanlaufender Heber [O]

Glasrohr ( $\varnothing$  etwa 8 mm, Länge etwa 800 mm), 2 Bechergläser.

Man biegt ein etwa 80 cm langes Glasrohr über der Flamme eines Bunsenbrenners nach Abbildung 86/1.

Taucht man den gewundenen Teil des Rohres ganz in ein mit Wasser gefülltes Becherglas, so steigt das Wasser im Rohrteil 1 empor, stürzt in 2 herab und steigt in 3 von selbst so hoch, daß es nach außen abfließt. Der Heber kommt in Gang, ohne daß er angesaugt zu werden braucht.

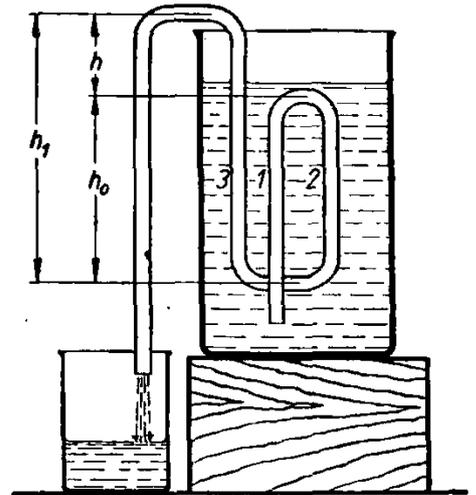


Abb. 86/1. Selbstanlaufender Heber  
1 Steigrohr, 2 Fallrohr,  
3 Überlaufrohr

*Bemerkungen:*

1. Zur Erklärung des Vorganges sei folgendes angegeben:

Der im Wasser befindliche Teil des Heberröhrens füllt sich nach dem Gesetz der kommunizierenden Röhren. Zusätzlich erhält das in das Steigrohr 1 eindringende Wasser beim Herabstürzen im Rohrteil 2 kinetische Energie, die das Wasser in das Rohrstück 3 über das Wasserniveau hochtreibt. Hat es die obere Rohrkrümmung überschritten, so fließt es wie bei einem gewöhnlichen Heber weiter und zieht durch sein Übergewicht das folgende Wasser nach.

Es hat sich erwiesen, daß die größte Steighöhe  $h$ , die über den Wasserspiegel hinaus erreichbar ist, bei durchgehend gleichem Rohrquerschnitt gleich dem 0,4fachen der Fallhöhe  $h_0$  im Rohrteil 2 ist.

2. Es ist für die Schüler interessant, auch die mathematischen Zusammenhänge dieser Vorgänge zu erkennen. Es sei dabei zur Vereinfachung angenommen, daß die Länge des Fallrohres 2 mit der Wasserhöhe  $h_0$  über der unteren Krümmung übereinstimmt. Die größte im Rohre 3 über der unteren Krümmung erreichte Wasserhöhe sei  $h_1$ , der Rohrquerschnitt sei in allen Rohrteilen durchgängig  $F$ . Die Energie, die das zufließende Wasser in der unteren Rohrkrümmung hat, setzt sich aus potentieller Energie  $W_{pot}$  und kinetischer Energie  $W_{kin}$  zusammen. Die potentielle Energie ist bestimmt durch den an der unteren Rohrkrümmung herrschenden Wasserdruck. Da sich die drückende Wassersäule über die ganze Rohrlänge verteilt, ist dabei als Höhe die halbe Rohrlänge in Rechnung zu setzen. Es ist

$$W_{pot} = G \cdot \frac{h_0}{2} = F \cdot h_0 \cdot \frac{h_0}{2} = F \cdot \frac{h_0^2}{2}.$$

Bei dieser und den folgenden Gleichungen ist zu beachten, daß das Produkt  $F \cdot h_0$  bzw.  $F \cdot h_1$  überall den Faktor 1 als Wichte des Wassers enthält.

Die kinetische Energie hat den gleichen Betrag, da sich die vom Wasser beim Hochsteigen im Rohr 1 aufgenommene potentielle Energie in kinetische Energie umwandelt. Es ist

$$W_{kin} = F \cdot \frac{h_0^2}{2}.$$

Die Gesamtenergie des zufließenden Wassers ist demnach:

$$W_1 = W_{pot} + W_{kin} = F \cdot h_0^2.$$

Demgegenüber steht die Energie  $W_2$  des im Steigrohr bis zum höchsten Stand empor-

gehobenen Wassers. Sie beschränkt sich auf die potentielle Energie und ist

$$W_2 = F \cdot \frac{h_1^2}{2}.$$

Wegen der Gleichheit beider Energiegrößen ist

$$\frac{h_1^2}{2} = h_0^2.$$

Es folgt daraus

$$\begin{aligned} h_1^2 &= 2 \cdot h_0^2, \\ h_1 &= h_0 \cdot \sqrt{2}, \\ h_1 &\approx 1,4 \cdot h_0. \end{aligned}$$

Mithin ist

$$h = h_1 - h_0 \approx 0,4 \cdot h_0.$$

Von Reibungsverlusten, die im Wasser beim Strömen auftreten können, wurde bei der Herleitung dieser Gleichungen abgesehen.

### 85. Modell eines Gifthebers [G, O]

2 Glasröhren ( $\varnothing$  etwa 4 mm, Längen 600 mm und 300 mm), kurzes Hahnrohr, ein Stück weites Glasrohr mit stumpfgeschmolzenen Rändern ( $\varnothing$  etwa 16 mm, Länge etwa 80 mm), dazu passend ein einfach und ein zweifach durchbohrter Korken, Schnur, Leim, 2 Bechergläser (400 ml), Unterstellkasten.

#### Herstellen des Modells:

Man biegt ein etwa 30 cm langes Glasrohr auf ein Drittel seiner Länge über einer Flamme um etwa  $45^\circ$ . Ein zweites Rohr gleichen Durchmessers mit einer Länge von etwa 60 cm wird U-förmig gebogen. Beide Rohre steckt man in einen doppelt durchbohrten Korken, mit dem man das eine Ende eines kurzen, weiten Rohrstückes verschließt. In das andere Rohrende wird ein einfach durchbohrter Korken eingepaßt. Er umfaßt ein kurzes Hahnrohr, das mit der inneren Korkenfläche bündig abschließt (Abb. 87/1). An Stelle des Hahnrohres kann auch ein Glasröhrchen verwendet werden, das durch einen an ein kurzes Schlauchstück geklemmten Quetschhahn verschließbar ist. Die beiden langen parallelen Rohre werden durch ein dazwischengeschobenes, beiderseitig halbrund ausgefeiltes Korkstückchen versteift und mit einer dünnen Schnur umwunden.

#### Versuch:

Ein mit Flüssigkeit gefülltes Becherglas wird auf einen Unterstellkasten gestellt und der freie U-Rohr-Schenkel des Hebers in die abzuhebende Flüssigkeit getaucht. Man verschließt die untere Öffnung und saugt an dem angewinkelten Rohr. Wenn die Flüssigkeit in das weite Rohrstück eintritt, gibt man die Ausflußöffnung frei und hört auf zu saugen. Die Flüssigkeit fließt selbsttätig in ein untergestelltes Becherglas.

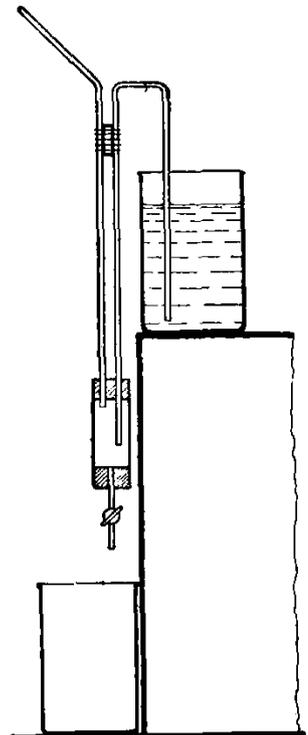


Abb. 87/1  
Modell eines Gifthebers

### 86. Modell eines Ventilhebers [G, O]

Zentrifugenglas, 2 Glasrohre ( $\varnothing$  4 mm, Längen etwa 250 mm und 150 mm), doppelt durchbohrter Korken, eine in das Zentrifugenglas passende Glaskugel, 2 Bechergläser (400 ml und 200 ml), Holzunterlage.

#### Herstellen eines Modells:

Von einem Zentrifugenglas trennt man mit einer Glasfeile den Boden ab. In das Innere des Glases legt man eine Glaskugel, die das konische Ende des Röhrchens verschließt und als Ventilkörper wirkt. Das andere Ende des Zentrifugenglases wird mit einem doppelt durchbohrten Korken verschlossen (Abb. 88/1). In die eine Bohrung steckt man den Schenkel eines kurzen gewinkelten Glasrohres. Ein zweites Glasrohr wird zu einem spitzen Winkel gebogen. Der eine Schenkel hat etwa die Länge des Zentrifugenglases, der andere ist um einige Zentimeter länger. Man führt den durch den Korken geschobenen Schenkel dieses Rohres so weit in das Zentrifugenglas ein, daß die im Zentrifugenglas befindliche Glaskugel noch genügend Spielraum zum Öffnen des Ventils hat.

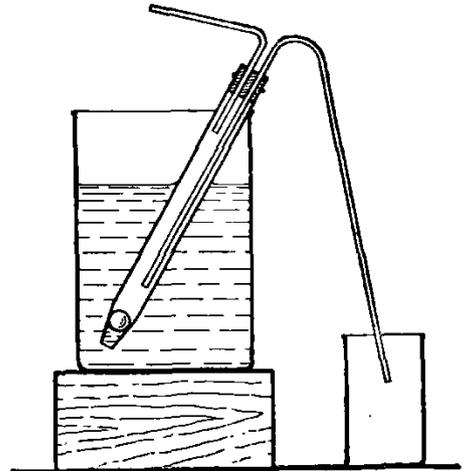


Abb. 88/1. Modell eines Ventilhebers, hergestellt aus einem Zentrifugenglas als Ventilrohr

#### Versuch:

Taucht man das Zentrifugenglas in eine Flüssigkeit, so dringt diese am konischen Ende in das Glas ein und steigt bis zur Höhe der äußeren Flüssigkeitsoberfläche. Bläst man in das kurze Glasrohr, so wird das Ventil geschlossen. Die Flüssigkeit wird in das Ausflußrohr getrieben und fließt aus. Die Flüssigkeit fließt nun wie bei einem Saugheber selbsttätig in das untergestellte Becherglas.

## § 9. LUFTDRUCKMESSUNGEN – BAROMETER UND MANOMETER

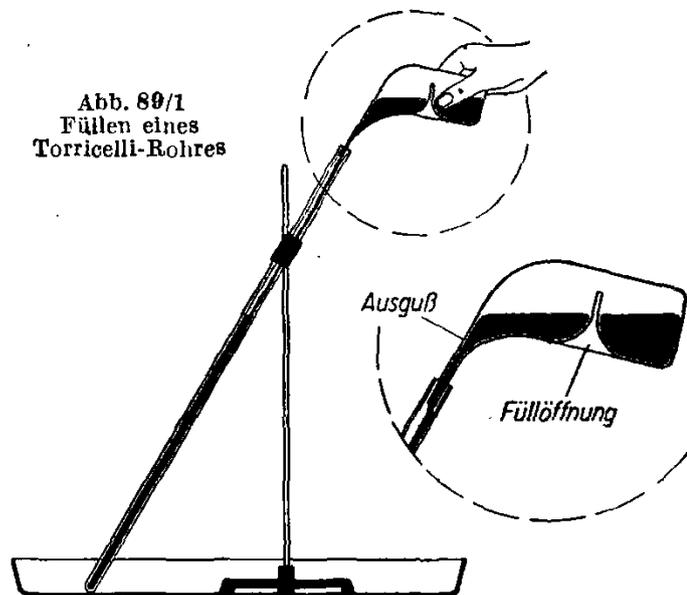
### 87. Der Torricelli-Versuch — Das Quecksilberbarometer [G, O]

Einseitig zugeschmolzenes Glasrohr (lichte Weite 6 mm, Länge etwa 1000 mm), 2 Stative mit langen Stäben, Rohrklemme mit Stiel, 3 Kreuzmuffen, Ring mit Stiel, Quecksilbertropfer, Quecksilberwanne oder Abdampfschale, Quecksilberbrett, Glasschale (250 cm<sup>3</sup>), Quecksilber, gefärbtes Wasser, Pipette mit gebogener Spitze.

#### Füllen des Torricelli-Rohres:

Die Füllung wird am zweckmäßigsten so vorgenommen, daß sich die Öffnung des aufrecht gestellten Torricelli-Rohres etwa in Brusthöhe befindet. Man legt zu diesem Zweck das Quecksilberbrett auf einen Hocker, klemmt das Torricelli-Rohr mit der Öffnung nach oben lose an ein Stativ und stellt dieses auf das Quecksilberbrett. Mit Hilfe eines Quecksilbertropfers (vgl. Teil I, V 42), dessen Spitze man in die Öffnung des Torricelli-Rohres einführt, läßt man vorsichtig in einem dünnen Strahl Quecksilber in das Rohr laufen, das man dabei etwas schräg hält (Abb. 89/1).

Man unterbricht die Füllung, sobald die Quecksilbersäule etwa bis auf 1 cm an die Öffnung heranreicht, und löst die Röhre aus ihrer Befestigung. Dabei umfaßt man sie nahe der Öffnung mit der einen Hand und verschließt sie mit dem trockenen und sauberen Daumen. Kehrt man das Rohr nun langsam um, so steigt die noch im Rohr befindliche Luft als Luftblase nach oben und reißt die noch an der Rohrwand haftenden Luftbläschen mit. Diesen Vorgang wiederholt man mehrmals, bis das Quecksilber luftfrei ist. Dann füllt man mit dem Quecksilbertropfer recht behutsam noch so viel Quecksilber nach, bis sich das Quecksilber ein wenig über den Rand des Rohres wölbt.



#### Hauptversuch:

Nunmehr bringt man das gefüllte Rohr auf den Tisch, wobei man sich von einem Schüler helfen läßt. Man verschließt dabei das gefüllte Rohr mit dem Daumen oder mit dem Zeigefinger, indem man die Fingerkuppe langsam von der Seite her über die Rohröffnung schiebt. Dadurch wird ein Verspritzen des Quecksilbers nach Möglichkeit vermieden. Der helfende Schüler legt das Quecksilberbrett auf den Tisch und stellt eine schon vorher mit Quecksilber gefüllte Quecksilberwanne und das Stativ darauf. Dann kehrt man das Rohr vorsichtig um und taucht, bei schräger Rohrlage, die Rohröffnung in die Quecksilberwanne. Das Rohr wird senkrecht gestellt und an ein Stativ geklemmt. Durch Hin- und Herschieben der Quecksilberwanne zeigt man, daß das Rohrende frei im Quecksilber hängt.

Die Quecksilbersäule sinkt beim Aufrichten so weit, bis der von ihr ausgeübte Druck gleich dem atmosphärischen Luftdruck ist. Ihre Höhe wird mit einem Meterstab gemessen. Sie beträgt durchschnittlich in Meereshöhe 760 mm. Über der Quecksilbersäule hat sich ein luftleerer Raum gebildet, der mit Quecksilberdampf gefüllt ist.

Man stellt seitlich neben das Stativ ein zweites und spannt zwischen beiden Stativen einen Faden parallel und in gleicher Höhe mit dem Quecksilberspiegel im Torricellischen Rohr aus. Neigt man das Rohr, so bleibt der Quecksilberspiegel unverändert in gleicher Höhe, bis das Quecksilber mit metallischem Klang gegen das verschlossene Rohrende stößt (Abb. 89/2).

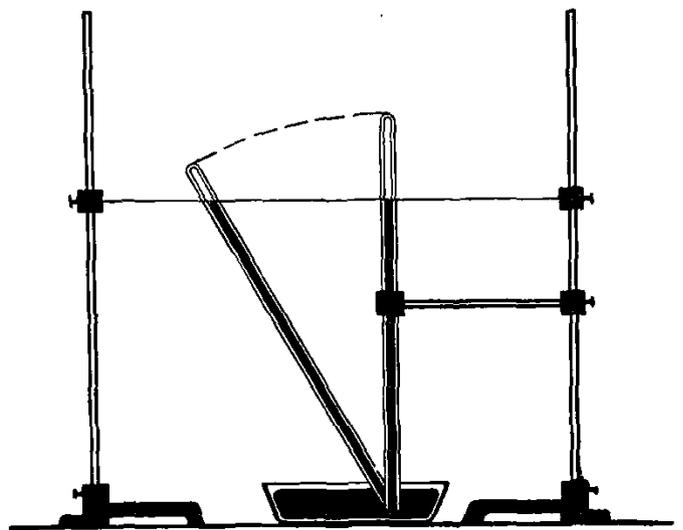


Abb. 89/2. Versuchsanordnung zum Torricelli-Versuch. Die Höhe der Quecksilbersäule bleibt beim Neigen des Rohres unverändert.

*Ergänzungsversuch:*

Man hebt das Rohr kurzzeitig so weit, daß eine geringe Luftmenge in das Rohr eintreten kann. Die eingelassene Luft steigt mit metallischem Rasseln nach dem luftleeren Raum empor. Durch den Druck der eingeschlossenen Luft wird die Quecksilbersäule so weit herabgedrückt, bis wieder Gleichgewicht mit dem äußeren Luftdruck besteht.

Man verschließt das mit Quecksilber gefüllte Rohr wieder mit dem Finger und hebt es aus dem Quecksilber heraus. Die Quecksilberwanne wird durch eine mit Wasser gefüllte Schale ersetzt, in die man die Öffnung des Rohres wieder eintaucht. Gibt man die Öffnung frei, so fließt das Quecksilber in die Schale; das Wasser steigt in der Röhre empor und füllt sie der ganzen Länge nach aus.

*Anweisungen zum Arbeiten mit Quecksilber:*

1. Damit kein danebenfallendes Quecksilber verlorengelht und nicht durch Entwickeln von Quecksilberdämpfen gesundheitliche Schäden verursacht, müssen alle mit Quecksilber auszuführenden Arbeiten und Versuche über einem Quecksilberbrett durchgeführt werden.
2. Quecksilber darf wegen der Amalgambildung nicht mit Metallen außer Eisen in Berührung kommen. Deshalb müssen Fingerringe vor dem Arbeiten mit Quecksilber abgestreift werden.
3. Fallen trotz aller Vorsicht einige Tropfen Quecksilber auf den Tisch, so sind sie mit Hilfe einer Quecksilberzange zu sammeln. Der Rest ist mit Hilfe eines Pinsels vorsichtig in eine unter den Rand des Tisches gehaltene Glasschale zu bringen. Es dürfen unter keinen Umständen winzige Quecksilberkügelchen in den Rillen des Experimentiertisches liegenbleiben oder gar in das Ausgußbecken des Tisches gelangen.
4. Verunreinigtes Quecksilber ist auf jeden Fall zu reinigen und erst dann in die Vorratsflasche zurückzugießen. Die Vorratsflasche ist stets unter Verschluss zu halten.

**88. Der Guericke-Versuch — Das Wasserbarometer [G, O]**

Große Wanne (Länge etwa 1 m) oder Wasserfaß, starkwandiger Gummischlauch (lichte Weite etwa 10 mm, Länge 10 bis 11 m), Glasrohr mit Hahn und Schlauchansatz (innerer Durchmesser 8 mm, Länge etwa 1000 mm), dünnes festes Seil (Länge etwa 15 m), Bandmaß (25 m), Gewichtsstück (5 kg).

Eine etwa 1 m lange Wanne wird im Schacht eines Treppenhauses oder im Freien an der Fensterseite des Schulgebäudes aufgestellt und etwa zu drei Vierteln mit Wasser gefüllt. Ein 10 m langer Gummischlauch mit einer lichten Weite von 10 mm wird neben dem Behälter ausgelegt. Unter dauerndem Auspressen der Luft aus dem Schlauch zieht man diesen über den Rand des Behälters in das Wasser, so daß er sich luftfrei mit Wasser füllt. Ein etwa 1 m langes Glasrohr mit Schlauchansatz und dichtschießendem Hahn wird bei geöffnetem Hahn schräg in das Wasser geschoben. Hat sich das Rohr luftfrei mit Wasser gefüllt, so schließt man den Hahn und steckt unter Wasser den Schlauchansatz des Rohres in den Schlauch. Das Schlauchende wird mehrfach mit Schnur umwunden und fest verknüpft, so daß sich der Schlauch nicht vom Schlauchansatz lösen kann.

Aus einer Höhe von 10 m wird das Ende eines dünnen festen Seils herabgelassen und unterhalb des Glasrohres am Gummischlauch befestigt. Das freie Ende des Schlauches beschwert man durch ein angebundenes großes Gewichtsstück und hält es während des Versuchs unter den Wasserspiegel des Gefäßes. Das andere Ende

zieht man so weit hoch, bis sich in der nach oben gerichteten Glasröhre eine freie Wasseroberfläche zeigt. Der Schlauch und die Glasröhre werden am Treppengeländer festgebunden (Abb. 91/1). Mit Hilfe eines Bandmaßes wird die Höhe der Wassersäule gemessen. Sie beträgt, je nach den örtlichen Luftdruckverhältnissen, etwa 10,3 m.

*Bemerkung:* Wenn die örtlichen Verhältnisse es irgendwie ermöglichen, sollte man es nicht verabsäumen, diesen höchst eindrucksvollen Versuch durchzuführen.

Man kann ihn noch dadurch vervollständigen, daß man am Glasrohr eine etwa 1000 mm lange Millimeterkala anbringt und in Zeitabständen von etwa 6 Stunden den Stand der Wassersäule feststellen läßt. Es wird dabei evident, daß das Wasserbarometer weit empfindlicher ist als das Quecksilberbarometer.

Der Versuch erregt erfahrungsgemäß bei allen Schülern der Schule Interesse. Er kann dazu beitragen, das Gedenken an Otto von Guericke zu beleben, und dient so der patriotischen Erziehung.

### 89. Modellversuch zum Huygensschen Kontrabarometer [0]

Torricelli-Rohr (lichte Weite etwa 6 mm, Länge etwa 1000 mm), zylindrischer Hahntrichter, Verbindungsschlauch für beide Teile (Länge 150 mm), Kapillarrohr (lichte Weite 1 mm, Länge etwa 800 mm), Gummischlauch (Länge etwa 500 mm), Gummistopfen passend zum Trichter, Quecksilber, Quecksilberbrett, Wasser, Petroleum oder Toluol, 2 Stative mit Klemmen und Muffen.

#### *Versuchsordnung:*

Das offene Ende eines Torricellischen Rohres wird durch einen etwa 15 cm langen Gummischlauch mit einem zylindrischen Hahntrichter verbunden. Die so verbundenen Rohre werden über einem Quecksilberbrett mit Quecksilber gefüllt. Steht das eingefüllte Quecksilber dicht über dem Hahn, so schließt man ihn. Beide Rohrteile klemmt man nach Abb. 91/2 in vertikaler Stellung an zwei Stative. Dann öffnet man den Glashahn. Das Quecksilber sinkt im Torricelli-Rohr und füllt den Trichter, bis der Druck der Quecksilbersäule mit dem äußeren Luftdruck im Gleichgewicht steht. Man löst den

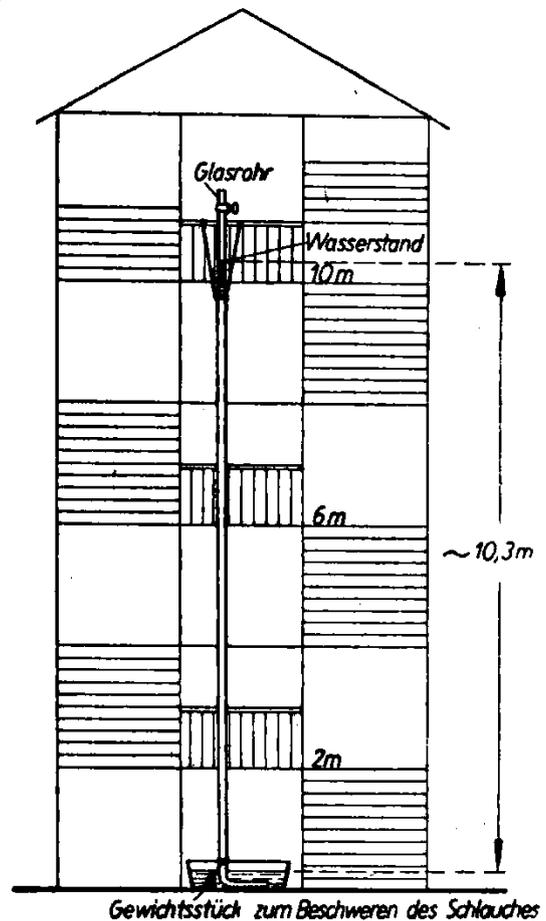


Abb. 91/1. Im Lichtschacht eines Treppenhauses aufgestelltes Wasserbarometer

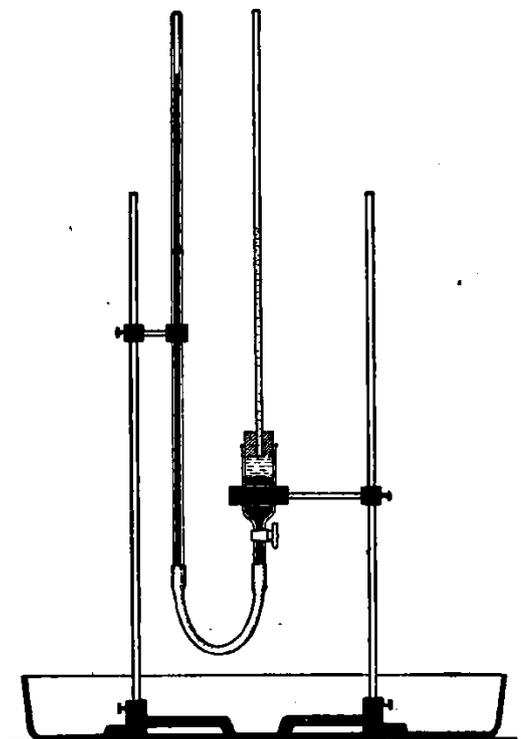


Abb. 91/2. Versuchsanordnung zum Huygensschen Kontrabarometer

Trichter vorübergehend vom Stativ und gießt so viel Quecksilber aus, bis der Quecksilberspiegel im Trichter auf die halbe Höhe des Trichterrohres gesunken ist.

*Versuch:*

Man füllt den Trichter oberhalb des Quecksilbers mit einer gefärbten Flüssigkeit und verschließt ihn mit einem durchbohrten Gummistopfen, in dem ein etwa 80 cm langes Kapillarrohr steckt. Die Flüssigkeit steigt beim Eindrücken des Stopfens in den Trichter bis zur halben Höhe des Kapillarrohres. Wesentlich kleinere oder größere Steighöhen sind durch Zugabe oder Abnahme von Flüssigkeit auf den angegebenen Stand abzugleichen. An das freie Ende des Kapillarrohres schließt man einen etwa 500 mm langen Schlauch an.

Bläst man in den Schlauch, so wird dadurch der auf das Barometer wirkende Druck erhöht. Der Flüssigkeitsspiegel im Kapillarrohr sinkt. Der Quecksilberspiegel im Torricellischen Rohr dagegen steigt. Bei vorsichtigem Saugen kann man das Umgekehrte beobachten. Der Niveauunterschied der Flüssigkeitssäule ist bei gleicher Luftdruckänderung wesentlich größer als der der Quecksilbersäule. Die Niveauunterschiede verhalten sich umgekehrt wie die Querschnitte des Kapillarrohres und des Torricelli-Rohres.

*Bemerkung:* Beim wirklichen Meßgerät befindet sich die Meßskala zwischen dem Torricelli-Rohr und dem Kapillarrohr. Ihre Teilung ist im Verhältnis der Rohrquerschnitte vergrößert und bezieht sich auf den Flüssigkeitsstand in der Kapillare. Die Maßzahlen geben den Luftdruck in Torr an.

## 90. Bestimmung des Luftdrucks mit Hilfe der Meldeschen Röhre [O – Ü]

Meldesche Röhre auf Grundbrett mit Millimeterskala (wie bei V 99).

Der Versuch weist auf eine Möglichkeit hin, mit der Meldeschen Röhre (vgl. Abb. 101/2), die an sich zur Ableitung des Boyleschen Gesetzes benutzt wird (s. V 99), die Größe des atmosphärischen Luftdrucks zu bestimmen. Die Voraussetzung dafür ist, daß den Schülern das Boylesche Gesetz schon bekannt ist und daß dieses Gesetz nicht selbst mit der Meldeschen Röhre abgeleitet wurde.

Die Meldesche Röhre wird zunächst mit der Röhrenöffnung nach oben lotrecht aufgehängt (Abb. 92/1 a). Man liest die Länge  $l_1$  der eingeschlossenen Luftsäule und die Höhe  $h$  der Quecksilbersäule ab. Danach hängt man die Meldesche Röhre so auf, daß die Öffnung senkrecht nach unten zeigt (Abb. 92/1 b). Die Länge der eingeschlossenen Luftsäule beträgt jetzt  $l_2$ , die Höhe der Quecksilbersäule bleibt unverändert. Die Messungen werden mehrmals hintereinander wiederholt und die Mittelwerte von  $l_1$  und  $l_2$  festgestellt.

Nach dem Boyleschen Gesetz ist für die eingeschlossene Luftmenge das Produkt aus Druck und Volumen konstant. Es gilt demnach die Gleichung

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2.$$

Hierin bedeuten, durch Indizes für die beiden Stellungen der Meldeschen Röhre voneinander unterschieden,  $p$  den auf der eingeschlossenen Luftsäule lastenden Druck und  $V$  ihr Volumen.

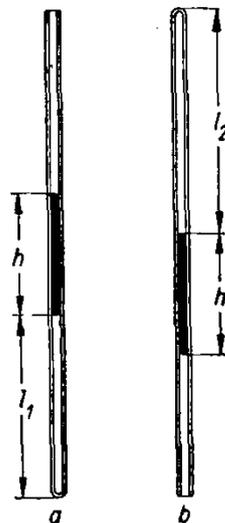


Abb. 92/1  
Meßstellungen  
der Meldeschen  
Röhre  
a) Öffnung nach  
oben  
b) Öffnung nach  
unten

Zwischen dem auf der eingeschlossenen Luftsäule lastenden Druck und dem atmosphärischen Luftdruck  $b$  gelten zahlenmäßig folgende Beziehungen:

$$\text{bei Stellung 1: } p_1 = b + h,$$

$$\text{bei Stellung 2: } p_2 = b - h.$$

Es ist

$$V_1 = F \cdot l_1, \quad V_2 = F \cdot l_2,$$

worin  $F$  den Röhrenquerschnitt bedeutet. Somit gilt die Gleichung

$$(b + h) \cdot F \cdot l_1 = (b - h) \cdot F \cdot l_2$$

oder

$$(b + h) \cdot l_1 = (b - h) \cdot l_2.$$

Für den Luftdruck  $b$  ergibt sich hieraus, gemessen in Torr, der Wert

$$b = h \cdot \frac{l_2 + l_1}{l_2 - l_1}.$$

### 91. Messen niedriger Drucke mit Hilfe eines verkürzten Barometers [0]

U-förmig gebogenes Glasrohr, bei dem der eine Schenkel durch einen Glashahn verschließbar, der andere Schenkel rechtwinklig umgebogen ist (Schenkellänge etwa 300 mm), ausgekehlter Holzklötz, Bindfaden, Schlauchstück, Quecksilberbrett, Quecksilbertropfer, Quecksilber, Stativ mit kurzem Stab und Muffe, Rohrklemme, Meterstab, Luftpumpe, Vakuumschlauch.

Man verwendet zu diesem Versuch ein U-förmig gebogenes Glasrohr, dessen Schenkellänge etwa 300 mm beträgt und bei dem das eine Schenkelende durch einen Hahn verschlossen ist. Damit das Rohr gegen Beschädigungen unempfindlicher wird, klemmt man einen an beiden Enden ausgekehlten Holzklötz zwischen die Rohrschenkel und umwindet die Rohrschenkel an dieser Stelle mehrfach mit Bindfaden.

Man füllt das U-Rohr bei geöffnetem Hahn über dem Quecksilberbrett in lotrechter Lage bis wenig über die Hälfte mit Quecksilber und neigt das Rohr so weit zur Seite, daß etwas Quecksilber durch den Hahn tritt. Dann wird der Hahn geschlossen und das Rohr in lotrechter Lage an ein Stativ geklemmt (Abb. 93/1). Verbindet man den offenen Schenkel mit Hilfe eines Vakuumschlauhes mit einer Luftpumpe und evakuiert, so senkt sich das Quecksilber in dem geschlossenen Schenkel, sobald der Druck unter 300 Torr sinkt. In dem anderen Schenkel steigt das Quecksilber entsprechend. Mit Hilfe eines dahinter gestellten Meterstabes kann man den Niveauunterschied des Quecksilbers in beiden Schenkeln wie bei einem Heberbarometer bestimmen.

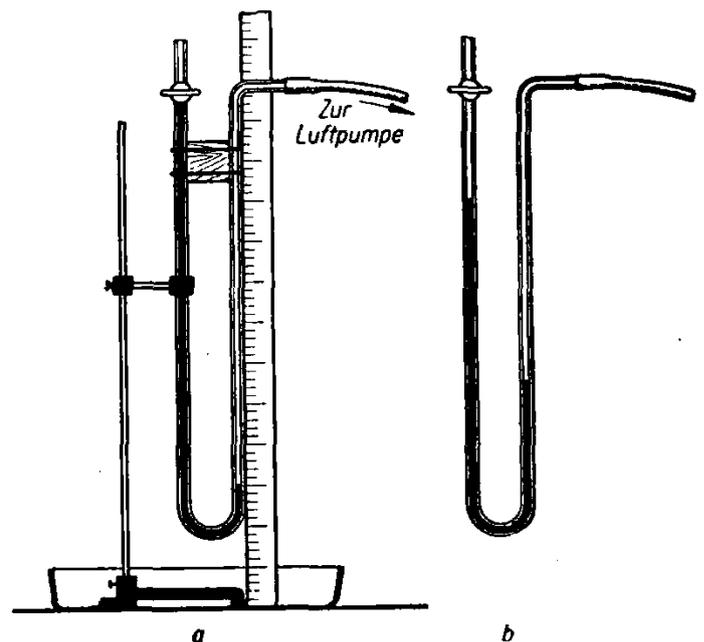


Abb. 93/1. Verkürztes Barometer

*Bemerkungen:*

1. Nach Beendigung der Messung vermeide man ein zu plötzliches Einströmen der Luft in das Manometer. Das Quecksilber schnellt sonst stoßartig in dem leeren Schenkel empor. Dabei kann der Glashahn zerbrechen und das Quecksilber herausspritzen. Der Versuch ist über einem Quecksilberbrett auszuführen.
2. Eine Abart des verkürzten Barometers ist die sogenannte Barometerprobe, die man unter den Rezipienten stellt und zum Messen des Vakuums in diesem verwendet.

## 92. Nachweis der Abhängigkeit des Luftdrucks von der Höhe über dem Erdboden mit Hilfe eines Variometers [G, O]

Flasche (Inhalt etwa 1 bis 3 l), gerades Glasrohr, an einem Ende zu einer sehr feinen Kapillare ausgezogen (Innendurchmesser 4 mm, Länge etwa 60 mm), rechtwinklig gebogenes Glasrohr (Innendurchmesser 2 bis 3 mm, langer Schenkel 150 mm, kurzer Schenkel 50 mm lang), zweifach durchbohrter Gummistopfen, dünner weißer Karton, einige Tropfen Petroleum, Benzol oder Toluol.

*Versuchsordnung:*

Eine Flasche mit einem Inhalt von etwa 1 bis 3 l wird mit einem doppelt durchbohrten Stopfen verschlossen. In die Bohrungen steckt man ein annähernd rechtwinklig gebogenes Glasrohr mit einem Innendurchmesser von 3 mm sowie ein zu einer sehr engen Kapillare ausgezogenes kurzes Glasrohr. Der freistehende Schenkel des gewinkelten Rohres wird vorher über einer Flamme erwärmt und entsprechend Abb. 94/1 leicht eingebogen. In das eingebogene Rohr bringt man einen Tropfen Petroleum, der langsam die tiefste Stelle des Rohres einnimmt. Ein in der Flasche vorhandener Über- oder Unterdruck gleicht sich langsam durch das Kapillarrohr mit dem Außendruck aus.

Zur Bestimmung einer eintretenden Lageveränderung des Tropfens wird hinter dem Glasrohrschenkel ein 5 cm breiter Kartonstreifen angebracht.

Durch vier Einschnitte im Streifen werden zwei Laschen gebildet, durch die man den Glasrohrschenkel hindurchschiebt.

*Versuch a:*

Man stellt die Flasche zunächst auf einen Tisch und wartet, bis der Petroleumtropfen die tiefste Stelle des Rohres eingenommen hat. Dann markiert man diese Stellung auf dem Kartonstreifen. Mit Hilfe einer Tiegelfzange hebt man die Flasche etwa einen Meter hoch. Der Tropfen bewegt sich dabei nach dem äußeren Rohrende, da der äußere Luftdruck geringer geworden ist als der Innendruck in der Flasche. Durch das Kapillarrohr erfolgt nur sehr allmählich der Druckausgleich zwischen dem Innendruck und dem äußeren Luftdruck.

Der Tropfen geht langsam in seine Ruhelage zurück. Nunmehr wird die Flasche auf den Fußboden gestellt. Der Tropfen bewegt sich jetzt auf das Rohrende in der Flasche zu. Der äußere Luftdruck ist größer als der Druck in der Flasche.

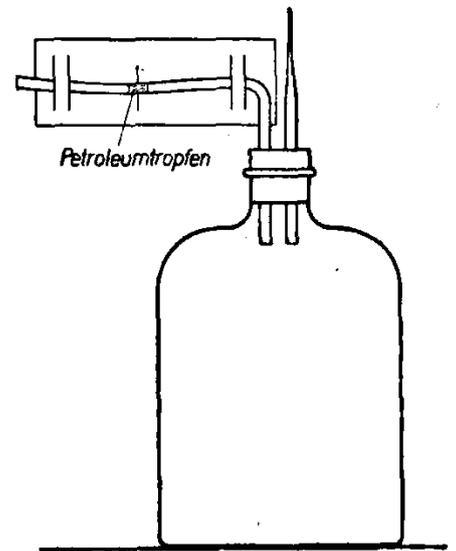


Abb. 94/1. Variometer

*Versuch b: Nachweis von Druckwellen*

Mit Hilfe des Variometers lassen sich Druckunterschiede nachweisen, die durch Öffnen oder Schließen einer Tür entstehen und sich als Druckwellen ausbreiten. Besonders eindrucksvoll wird der Versuch, wenn man eine Tür in einem Nebenraum öffnet. Erfolgt das Öffnen, oder Schließen dieser für den Schüler unsichtbaren Tür geräuschlos, so kann der Schüler nur aus der Druckanzeige des Variometers auf die druckerzeugende Ursache schließen.

*Bemerkungen:*

1. Will man Temperatureinflüsse vermeiden, so umwickelt man die Flasche mit Tüchern oder stellt sie in eine passende Kiste, die mit Sägespänen oder Kieselgur angefüllt ist. An Stelle einer gewöhnlichen Flasche kann man auch eine größere Thermosflasche verwenden.
2. Der Tropfen soll möglichst klein sein und sich im Rohr über nicht mehr als 4 bis 5 mm erstrecken. Die Empfindlichkeit gegen Druckänderungen wird dadurch gesteigert.
3. Das Kapillarrohr darf nicht zu weit sein, damit der Druckausgleich erst im Verlaufe einer längeren Zeitspanne erfolgt.
4. An Stelle des Kapillarrohres kann das Rohr auch mit einem Hahn verschlossen werden. Die Niveauänderungen werden dann bei geschlossenem Hahn durchgeführt. Zum Druckausgleich wird der Hahn vorübergehend geöffnet.
5. Statt Petroleum kann auch Benzol oder Toluol als Tropfenflüssigkeit verwendet werden. Man färbt zweckmäßigerweise die Flüssigkeit mit *Drachenblut*, damit auch von größerer Entfernung die Lageveränderung des Tropfens erkannt werden kann.

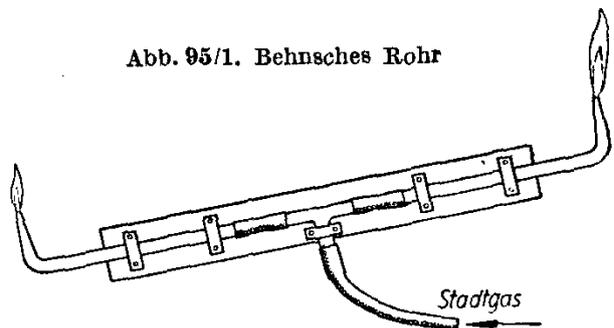
### 93. Nachweis der Veränderlichkeit der Druckdifferenz zwischen Luft und Stadtgas mit Hilfe des Behnschen Rohres [0]

Glasrohr ( $\varnothing$  8 mm, Länge 1500 mm), T-Rohrstück, 2 Gummischlauchstücke, Holzleiste (40 mm  $\times$  5 mm  $\times$  1000 mm), Gasanschlußschlauch mit Hahn, Schnur, Stativ mit Muffe und Klemme.

Die Enden eines etwa 1500 mm langen und 8 mm weiten Glasrohrs werden über einem Bunsenbrenner erwärmt und zu kurzen spitzen Öffnungen ausgezogen (lichte Weite der Öffnungen etwa 2 mm). Man biegt danach die Enden rechtwinklig um. Das Glasrohr wird in der Mitte durchgeschnitten; zwischen beide Rohrteile wird ein T-Rohrstück eingesetzt, so daß die gewinkelten Rohrenden parallel zueinander stehen (Abb. 95/1). Das so vorbereitete Rohr wird mittels einer Schnur oder Schellen an einer Holzleiste befestigt.

Den frei herausragenden Rohrstützen des T-Stückes verbindet man durch einen Gasschlauch mit der Stadtgasleitung. Die Gaszufuhr wird entweder am Leitungshahn selbst oder durch einen in den Schlauch eingefügten Hahn geregelt. Bei waagerechter Lage des Rohres strömt das Gas aus beiden Öffnungen gleichmäßig aus. Entzündet man das Gas, so bilden sich an den Ausströmungsstellen zwei gleich große Flammen. Hebt man das eine Rohrende ein wenig, so nimmt die höher liegende Flamme an Größe zu, während die tiefer liegende Flamme an Größe abnimmt. Das gleiche ist auch zu beobachten, wenn man das eine Rohrende in der gleichen Höhe beläßt und dafür das andere Ende senkt.

Abb. 95/1. Behnsches Rohr



*Bemerkungen:*

1. Es ist darauf hinzuweisen, daß durch diesen Versuch nicht unmittelbar die Abnahme des Luftdrucks mit der Höhe nachgewiesen wird; auch der Gasdruck nimmt ab. Da aber Stadtgas eine geringere Wichte hat als Luft, vermindert sich sein Schweredruck nicht in demselben Maße wie der der Luft. Der Überdruck des Stadtgases wird mit zunehmender Höhe größer, und diese Änderung der Druckdifferenz wird beim Versuch wirksam.
2. Damit man bestimmte Druckverhältnisse einstellen kann, klemmt man das Rohr mittels einer Muffe und einer Klemme drehbar an ein Stativ.

**94. Modell eines Dosenbarometers [G, O]**

Kleine Glasschale (Petrischale  $\varnothing$  etwa 95 mm), Cellophanscheibe ( $\varnothing$  110 mm), Haltebrettchen (190 mm  $\times$  90 mm  $\times$  4 mm), Grundplatte aus Holz (190 mm  $\times$  100 mm  $\times$  10 mm), Millimeterpapier (50 mm  $\times$  10 mm), 2 Strohhalme, 2 Stecknadeln, Zwirnfaden, wasserfester schnelltrocknender Klebstoff, Zeichenpapier (27 mm  $\times$  360 mm), Gummistück, Luftpumpe, Rezipient (5 l), 2 Nägel ( $\varnothing$  2 mm, Länge etwa 27 mm).

Wenn auch das nachstehend beschriebene Modell in vielen Einzelheiten von den technischen Dosenbarometern abweicht, so vermittelt es doch einen Einblick in die Wirkungsweise dieser Geräte. Für die Anfertigung durch die Schüler selbst in Arbeitsgemeinschaften ist es vorzüglich geeignet.

*Herstellen des Modells:*

Man legt ein auf der Oberseite mit warmem Wasser befeuchtetes Cellophanblatt über die Öffnung einer runden Glasschale, einer Petrischale, mit einem Durchmesser von etwa 95 mm und drückt es gegen die Wand fest an. Zur Sicherung der Dichtigkeit des Abschlusses klebt man unter Verwendung eines wasserfesten Klebstoffes aus Zeichenpapier einen etwa 30 mm breiten Ring, dessen Umfang etwa 3 mm kleiner ist als der der Schale, so daß der Ring zunächst nicht um die Schale paßt. Diesen Papierring legt man etwa eine Minute lang in Wasser, trocknet ihn leicht ab und schiebt ihn dann über die mit dem Cellophanblatt bespannte Schale. Beim Trocknen zieht sich der Ring zusammen und preßt das Cellophanblatt luftdicht an die Glasschale. Nachdem das Cellophanblatt und der Papierring gut getrocknet sind, klebt man im Mittelpunkt der Membran ein etwa 1 cm langes Strohalmstück senkrecht zur Membranebene auf.

Eine durch Druckänderung hervorgerufene Membranbewegung wird mit Hilfe eines aus zwei Strohhalmen bestehenden Hebelsystems angezeigt. Als Drehachsen des Hebelsystems werden Stecknadeln verwendet.

Die dafür in den Strohhalmen erforderlichen Löcher bringt man an den in Abb. 96/1 ersichtlichen Stellen durch Einbrennen an. Man sticht die kalte Nadel durch den Halm, hält sie an einem Ende mit einer Zange fest und erhitzt sie am anderen Ende behutsam solange über einer Kerzenflamme, bis der Halm zu sengen anfängt.

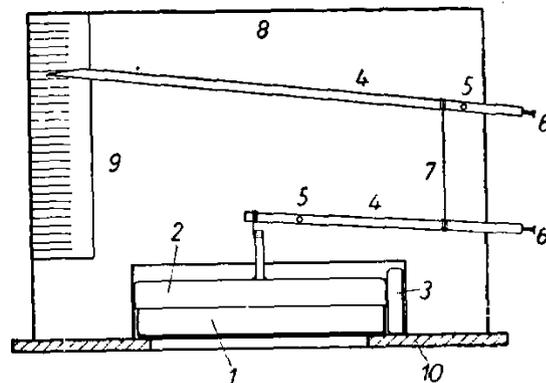


Abb. 96/1. Modell eines Dosenbarometers

1 Glasschale	6 Nägel
2 Cellophan	7 Zwirnfaden
3 Gummistück	8 Haltebrettchen
4 Strohalmstücke	9 Millimeterpapier
5 Stecknadeln	10 Grundplatte

Als Träger des Hebelsystems wird ein etwa 4 mm starkes, 190 mm langes und 90 mm breites Brettchen verwendet. Man sägt auf der einen Längsseite, symmetrisch zur Mitte, ein Stück heraus, in das die Schale der Breite nach gerade hineinpaßt, das aber etwas höher ist als die Schale. Sodann leimt und schraubt man das Brettchen senkrecht auf eine Grundplatte, nachdem man aus dieser vorher eine Kreisscheibe herausgesägt hat, deren Durchmesser etwa 2 cm kleiner ist als der der Glasschale (Abb. 96/1). In die Lücke des Brettchens schiebt man die Schale so weit hinein, daß sich das auf die Membran geklebte Strohalmstück dicht vor dem Brettchen befindet. Man klemmt die Schale mittels eines Gummistückchens am Brettchen fest. An dem Brettchen selbst befestigt man das Hebelsystem entsprechend der Abbildung.

Das senkrechte Strohalmstück wird mittels eines dünnen Zwirnfadens mit dem kurzen Ende des unteren Hebels verbunden. Als Spannungsgewichtsstück für die Hebel verwendet man zwei Nägel mit einem Durchmesser von etwa 2 mm, die man mit etwas Klebstoff in den Strohhalmen befestigt. Die beiden Strohhalme werden mit Hilfe eines dünnen Fadens so miteinander verbunden, daß der als Zeiger dienende obere Strohalm bei normalem Luftdruck waagrecht steht. Auf das Haltebrettchen wird hinter den Zeiger ein Streifen Millimeterpapier geklebt.

#### *Versuch:*

Das so hergestellte Modell eines Dosenbarometers wird unter den Rezipienten einer Kolbenluftpumpe gestellt. Verschiebt man den Kolben der Luftpumpe nur um wenige Zentimeter, so bewegt sich der Zeiger über die ganze Skala.

*Bemerkung:* Das Modell weicht von den gebräuchlichen Dosenbarometern ab, da die Dose nicht evakuiert ist. Infolgedessen ist das Modell gegen Temperaturschwankungen sehr empfindlich. Man kann dies dadurch sichtbar machen, daß man die Glasschale von unten her durch den Ausschnitt der Grundplatte leicht erwärmt.

## 95. Höhenmessung mittels eines Aneroidbarometers [G, O — Ü]

### Aneroidbarometer, Bandmaß.

Man stellt mit Hilfe eines Aneroidbarometers den Luftdruck im Keller eines Gebäudes und anschließend den Luftdruck auf dem Dachboden des Hauses fest. Man erkennt an den Meßergebnissen die Abnahme des Luftdrucks bei zunehmender Höhe über dem Erdboden. Da die Luftdruckänderung bei einem Höhenunterschied von 11 m etwa 1 Torr beträgt, kann man aus dem festgestellten Luftdruckunterschied den Höhenunterschied zwischen den Meßstellen berechnen. Zur Kontrolle des Ergebnisses wird die berechnete Strecke mit einem Bandmaß nachgeprüft.

#### *Bemerkungen:*

1. Bei der Durchführung des Versuches ist das Barometer während des Ablesens senkrecht zu halten.
2. Infolge der elastischen Nachwirkung des Instrumentes muß man jedesmal nach Erreichen der Meßstellen einige Minuten mit der Ablesung warten.
3. Vor dem Ablesen des Meßwertes klopfte man zur Überwindung der Haftreibung leicht an die Instrumentenscheibe.
4. Besonders wirkungsvoll ist es, den Versuch auf Kirchtürmen und hohen Aussichtstürmen durchzuführen, da sich dort infolge des größeren Höhenunterschiedes größere Luftdruckänderungen feststellen lassen.

5. Dem Aneroidbarometer ähneln in ihrer Funktion die Membranmanometer. Man darf nicht versäumen, die Schüler auch mit diesen technisch so wichtigen Geräten sowie mit den auf der Bourdonschen Röhre beruhenden Ausführungsformen technischer Manometer vertraut zu machen. Ein zum Aufsetzen auf den Luftpumpenteller bestimmtes Modell einer Bourdonschen Röhre wird als Lehrmittel hergestellt. Man wird auf den Vorzug der linearen Skala hinweisen, der den technischen Manometern wie dem Aneroidbarometer zu eigen ist.

## 96. Offenes Manometer — Messen des Überdrucks einer Stadtgasleitung [G, O — Ü]

2 Glasrohre (lichte Weite 8 mm, Länge 150 mm und 750 mm), Gummischlauch (passend zum Durchmesser der Glasrohre, Länge etwa 400 mm), T-Rohr, kurzes Schlauchstück, Quetschhahn, Stativ, Millimeterpapier, Becherglas, Gummiring.

### Versuch a: Verwendung eines U-förmig gebogenen Glasrohres als Manometer

Man biegt ein etwa 750 mm langes Glasrohr mit einer lichten Weite von etwa 8 mm U-förmig und winkelt den einen Schenkel des Rohres rechtwinklig ab. Das Rohr wird etwa zur Hälfte mit Wasser gefüllt und an ein Stativ geklemmt (Abb. 98/1). Man verbindet den gewinkelten Schenkel unter Zwischenschalten eines T-Rohrs mit der Stadtgasleitung. Auf den offenen Schenkel des T-Rohres wird ein kurzes Schlauchstück gesteckt und dieses mittels eines Quetschhahnes verschlossen.

Bei geöffnetem Quetschhahn steht das Wasser in beiden Schenkeln des U-Rohres gleich hoch. Man schließt den Quetschhahn und öffnet den Gashahn. Entsprechend dem Gasdruck zeigt das als Manometer wirkende U-Rohr einen Niveauunterschied der Wasseroberflächen. Dieser wird mit Hilfe eines an das Rohr angeklebten Millimeterpapierstreifens gemessen. Der Überdruck des Gases beträgt etwa 40 mm bis 70 mm Wassersäule (40 bis 70 mm W. S.).

### Versuch b: Verwendung eines geraden Glasrohres als Manometer

Man schiebt über das eine Ende eines etwa 150 mm langen Glasrohres einen mit der Gasleitung verbundenen Gummischlauch. Über das andere Ende streift man einen schmalen Gummiring. Das Rohr wird lotrecht in ein mit Wasser gefülltes Becherglas getaucht und so weit gesenkt oder gehoben, daß das im Rohr befindliche Gas das eingedrungene Wasser gerade bis zum unteren Rand des Rohres drückt (Abb. 98/2). Den auf dem Glasrohr befindlichen Gummiring verschiebt man, bis er den äußeren Wasserspiegel berührt. Nachdem man das Rohr aus dem Wasser gezogen hat, mißt man die Entfernung zwischen dem Gummiring und dem freien Rohrende. Die Rohrlänge gibt wieder den Überdruck in mm W. S. an.

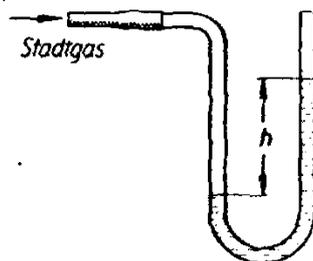


Abb. 98/1. Beiderseitig offenes, U-förmig gebogenes Glasrohr zum Messen des Überdrucks in einer Stadtgasleitung

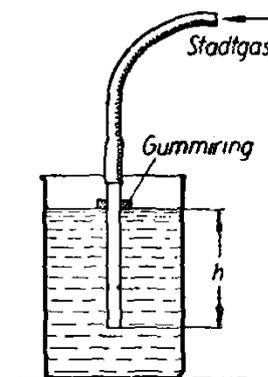


Abb. 98/2. Messen des Überdrucks in der Stadtgasleitung durch ein daran angeschlossenes, in Wasser getauchtes Glasröhrchen

### 97. Geschlossenes Manometer — Bestimmung des Wasserdrucks einer Wasserleitung [0]

Starkwandiges Glasrohr ( $\varnothing$  8 mm, Länge 750 mm), auf das Glasrohr passender Druckschlauch (Länge 400 mm), Schraubansatz zu dem mit Gewinde versehenen Wasserhahn, Stativ mit Muffe und Klemme, Millimeterpapier, starker Bindfaden.

#### Versuchsordnung:

An das eine Ende eines etwa 750 mm langen Glasrohres, mit einem Durchmesser von etwa 8 mm, bläst man zwei Schlaucholiven an und schmilzt das andere Ende zu. Das Rohr wird über einem Schlitzbrenner U-förmig so gebogen, daß die Länge des geschlossenen Schenkels etwa 400 mm beträgt. Den offenen Schenkel biegt man in der Hälfte seiner Länge im rechten Winkel nach außen. Man füllt so viel Wasser in das U-Rohr, bis im geschlossenen Schenkel eine Luftsäule mit einer Länge von etwa 300 mm eingeschlossen ist. Über den olivenförmigen Ansatz des offenen Schenkels schiebt man das eine Ende eines zur Wasserleitung führenden Druckschlauches. In das andere Ende des Schlauches steckt man einen Schraubansatz, der auf einen mit Gewinde versehenen Wasserhahn paßt. Beide Schlauchenden werden fest mit Bindfaden umwickelt. Der Schraubansatz wird an den Leitungshahn geschraubt und das als Manometer wirkende U-förmig gebogene Glasrohr so an ein Stativ geklemmt, daß der Wasserspiegel im geschlossenen Schenkel annähernd in der Höhe des Wasserhahns liegt (Abb. 99/1).

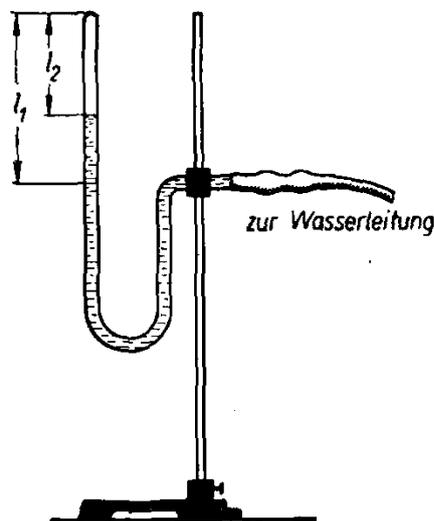


Abb. 99/1. Geschlossenes Manometer zum Messen des Druckes einer Wasserleitung

#### Versuch:

Nachdem man zunächst noch einmal vorübergehend den Schraubansatz gelockert hat, um einen etwa vorhandenen Überdruck auszugleichen, mißt man die Länge  $l_1$  der eingeschlossenen Luftsäule und schraubt dann den Ansatz fest. Der Wasserhahn wird sehr vorsichtig geöffnet. Man mißt die Länge  $l_2$  der zusammengepreßten Luftsäule, schließt den Hahn und mißt zur Kontrolle die Länge  $l_1$  noch einmal.

#### Auswertung:

Bei geschlossenem Leitungshahn steht die eingeschlossene Luftsäule, deren Volumen  $V_1$  sei, unter dem Luftdruck  $p_1$ . Bei geöffnetem Hahn wirkt zusätzlich der Wasserdruck  $p$  auf die eingeschlossene Luftsäule und verringert ihr Volumen auf das Volumen  $V_2$ .

Nach dem Boyleschen Gesetz ist

$$p_1 \cdot V_1 = (p_1 + p) \cdot V_2$$

oder

$$p_1 \cdot l_1 \cdot F = (p_1 + p) \cdot l_2 \cdot F,$$

worin  $F$  den Querschnitt des Rohres bedeutet. Es folgt daraus

$$p = p_1 \cdot \frac{l_1 - l_2}{l_2}.$$

Vernachlässigt man die atmosphärischen Luftdruckschwankungen, so kann man  $p_1 = 1 \text{ atm} \approx 1 \text{ at}$  setzen.

Man erhält dadurch für den Überdruck des Wassers an der Ausflußöffnung die vereinfachte Gleichung

$$p = \frac{l_1}{l_2} - 1.$$

Da  $p$  der über den Luftdruck hinausgehende Überdruck ist, ist  $p$  in atü zu messen.

Beispiel:  $l_1 = 304 \text{ mm}$ ;  $l_2 = 65 \text{ mm}$ ,

$$p = \left( \frac{304}{65} - 1 \right) \text{ atü} = 3,7 \text{ atü}.$$

*Bemerkungen:*

1. Da 1 at etwa dem Druck einer 10 m hohen Wassersäule entspricht, kann man aus dem berechneten Druck den Niveauunterschied zwischen dem Wasserhochbehälter und dem Leitungshahn ermitteln. Er beträgt bei dem angegebenen Beispiel etwa 37 m.
2. Da es sich bei diesem Versuch um das Messen eines hohen Druckes handelt, bietet sich die Gelegenheit, auf den Vorteil einzugehen, den technische Manometer gegenüber Glasmanometern besitzen. Neben der größeren Betriebssicherheit wird man auf den Vorzug der linearen Skala hinweisen. Vgl. V 95, Bemerkung 5!

### 98. Herstellen eines Mikromanometers mit verstellbarer Empfindlichkeit für geringe Drucke [0]

Glasrohr (lichte Weite 2 mm, Länge 400 mm), Brettchen (400 mm  $\times$  60 mm  $\times$  10 mm), Sperrholzbrettchen (350 mm  $\times$  50 mm  $\times$  3 mm), Holzklotz (40 mm  $\times$  40 mm  $\times$  80 mm), Millimeterpapier, Schraube mit Flügelmutter, 2 Blechschellen, Drahtstifte, prismatische Holzklötzchen, Abklärflasche (1 l), 2 Gummistopfen, 2 kurze Glasröhren, kurzer Gummischlauch, Muffe, Stativ mit kurzem Stab.

Auf ein etwa 400 mm langes Brettchen leimt und nagelt man an einem Ende einen aufrecht stehenden Vierkantklotz und befestigt an diesem drehbar ein Sperrholzbrettchen an einem seiner Enden. Das freie Ende dieses Brettchens ruht auf einem Holzdreikant.

Auf dem Sperrholzbrettchen wird parallel zu seinen Längsseiten eine etwa 40 cm lange Glasröhre mit einer lichten Weite von 2 mm mittels zweier Rohrschellen befestigt, nachdem man vorher einen 20 mm breiten Streifen aus Millimeterpapier auf das Brettchen geklebt hat. Verschiebt man den Holzdreikant, so ändert sich die Steigung der Röhre und damit die Empfindlichkeit des Manometers (Abb. 100/1). Der obere und der seitliche Tubus einer Abklärflasche werden mit durchbohrten Gummistopfen verschlossen, in die kurze Glasröhren luftdicht eingepaßt sind. Das Rohr des seitlichen Tubus wird mit Hilfe eines weichen Gummischlauchs mit dem am Drehpunkt der Brettchen liegenden Ende des Manometerrohres verbunden.

Man füllt die Flasche so hoch mit Wasser, daß

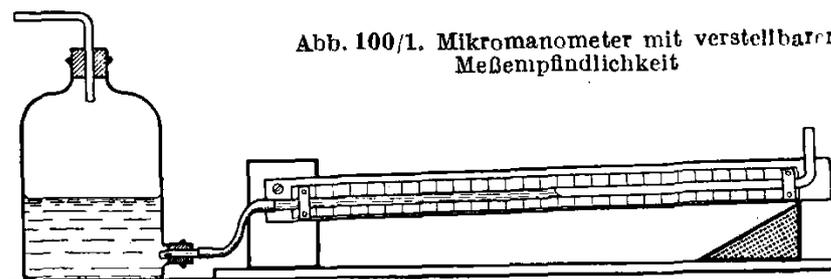


Abb. 100/1. Mikromanometer mit verstellbarer Meßempfindlichkeit

bei sehr geringer Neigung des Rohres etwa ein Viertel der Glasröhre mit Wasser gefüllt ist. Wirkt durch den Tubus der Flasche auf den Wasserspiegel in der Flasche ein auch nur wenig erhöhter Druck, so wird ein Teil des Wassers entsprechend dem Druck in der Flasche in das Manometerrohr gedrückt.

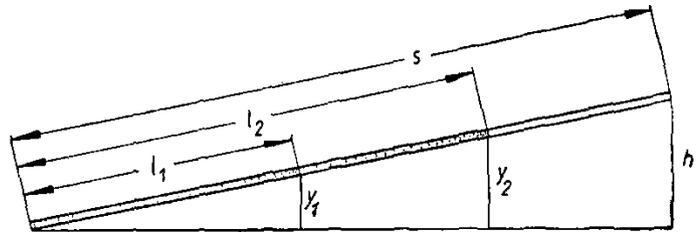


Abb. 101/1. Fadenveränderung eines Mikromanometers

Die Längenänderung der Wassersäule ist der Druckänderung proportional.

*Bemerkung:* Wie die Verstellbarkeit der Empfindlichkeit des Manometers mathematisch begründet ist, geht aus Abb. 101/1 hervor. Der Anfangslänge  $l_1$  des Fadens entspricht die senkrecht gemessene Höhe  $y_1$  der wirksamen Wassersäule. Wächst  $l_1$  auf den Betrag  $l_2$  an, so geht dabei gleichzeitig  $y_1$  zu dem Werte  $y_2$  über. Die Wertzunahme beider Größen erfolgt in dem durch die Rohrlänge  $s$  und die Endhöhe  $h$  bestimmten Verhältnis. Es ist

$$\frac{y_2 - y_1}{l_2 - l_1} = \frac{h}{s},$$

mithin

$$y_2 - y_1 = (l_2 - l_1) \cdot \frac{h}{s}.$$

Je geringer die Rohrneigung ist, d. h. je länger die Strecke  $s$  gewählt wird, desto größer ist auch die Fadenverlängerung  $l_2 - l_1$  und desto größer die Empfindlichkeit des Manometers.

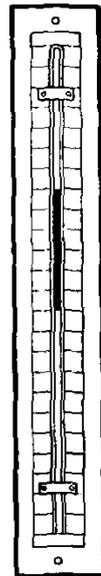
## § 10. DAS BOYLESCHES GESETZ

### 99. Ableitung des Boyleschen Gesetzes mit Hilfe der Meldeschen Röhre [O — Ü]

Meldesche Röhre, Unterstellkasten, Tafelwinkelmesser, Quecksilberbarometer.

Das nach seinem Urheber als Meldesche Röhre bezeichnete Gerät dient zur Ableitung des Zusammenhanges zwischen dem Volumen einer abgeschlossenen Gasmenge und dem Druck. Es ist für die Verwendung in Schülerübungen ausgezeichnet geeignet. Das Kernstück des Gerätes ist eine etwa 80 cm lange Kapillarröhre mit einer lichten Weite von 2 mm. Das eine ihrer beiden Enden ist zugeschmolzen, das andere Ende ist offen. Im mittleren Teil der Röhre befindet sich ein etwa 20 cm langer Quecksilberfaden. Die Röhre ist auf einer Holzleiste befestigt und mit einer Millimeterskala unterlegt (Abb. 101/2). In der Nähe der beiden Enden sind in der Leiste Bohrungen angebracht, die dazu dienen, die Röhre wahlweise mit der Öffnung nach oben oder nach unten aufzuhängen.

Man legt zunächst die Röhre flach auf die horizontale Tischfläche. Die eingeschlossene Luftmenge steht dann unter dem äußeren Luftdruck, man liest die Länge des Luftfadens ab. Hängt man die Röhre mit der Öffnung nach oben auf, so vermehrt sich der auf dem Luftfaden lastende Druck um den Schweredruck des Quecksilberfadens. Der Luftfaden verkürzt sich dadurch etwas. Hängt man die Röhre

Abb. 101/2  
Meldesche Röhre

mit der Öffnung nach unten auf, so tritt das Umgekehrte ein. Der Luftfaden verlängert sich ein wenig, da der äußere Luftdruck jetzt um den Schweredruck des Quecksilberfadens vermindert wird.

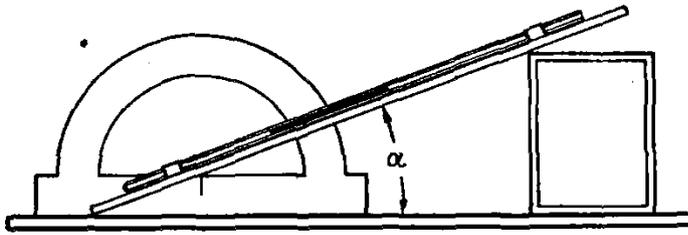


Abb. 102/1. Meldesche Röhre in schräger Lage

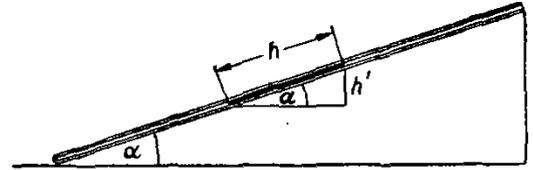


Abb. 102/2. Schemazeichnung zur Schräglage der Meldeschen Röhre

Zusätzlich zu diesen extremen Lagen nimmt man noch Messungen in beliebigen schrägen Lagen der Meldeschen Röhre vor. Man lehnt sie zu diesem Zweck schräg gegen einen Unterstellkasten (Abb. 102/1). Den Neigungswinkel  $\alpha$  gegen die Tischfläche, den man durch Verschieben des Unterstellkastens ändern kann, mißt man mit Hilfe eines Tafelwinkelmessers. Für jede Stellung liest man die Länge des Luftfadens ab. Die Länge des Quecksilberfadens bleibt unverändert. Da es aber nur auf die senkrechte Quecksilberhöhe ankommt, muß man die Länge des Quecksilberfadens jedesmal mit  $\sin \alpha$  multiplizieren (Abb. 102/2). Befindet sich dabei die Öffnung der Röhre oben, so wird der Winkel positiv, im anderen Falle negativ gerechnet. Sämtliche Meßwerte werden in einer Tabelle zusammengefaßt. Die beigefügte Tabelle gibt ein Beispiel für die bei einer Meßreihe gewonnenen Meßwerte.

### Abhängigkeit der Länge der eingeschlossenen Luftsäule vom Gesamtdruck

Äußerer Luftdruck 755 Torr

Neigungswinkel ( $\alpha$ )	$\sin \alpha$	Länge des Quecksilberfadens ( $h$ )	Schweredruck des Quecksilberfadens ( $p_1 \cong h \cdot \sin \alpha$ )	Länge der eingeschlossenen Luftsäule ( $l$ )	Gesamtdruck ( $p = p_0 + p_1$ )	$p \cdot l$
Grad		mm	Torr	mm	Torr	Torr · mm
90	1,00	182	182	230	937	$215,5 \cdot 10^3$
42	0,67	182	122	246	877	$215,7 \cdot 10^3$
0	0,00	182	0	285	755	$215,1 \cdot 10^3$
—39	—0,63	182	—115	336	640	$215,0 \cdot 10^3$
—90	—1,00	182	—182	377	573	$216,0 \cdot 10^3$

Man erkennt aus der Tabelle, daß das Produkt aus der Länge der eingeschlossenen Luftsäule und dem darauf lastenden Druck, von geringfügigen Abweichungen abgesehen, konstant ist. Da die Röhre überall denselben Querschnitt hat, ergibt sich das gleiche für das Produkt aus dem Volumen der Luftsäule und dem darauf lastenden Druck. Damit ist das Boylesche Gesetz gefunden:

$$p \cdot V = \text{const.}$$

*Bemerkungen:*

1. Bei der Durchführung des Versuches darf die Röhre nicht mit der Hand berührt werden, da sonst die Länge des Luftfadens durch die Handwärme geändert und dadurch das Ergebnis gefälscht wird.
2. Man kann eine Meldesche Röhre auf verhältnismäßig einfache Weise aus einer etwa 800 mm langen Kapillarröhre ( $\varnothing$  2 mm), einer 900 mm langen Holzleiste und einem Streifen Millimeterpapier selbst herstellen. Man saugt vorsichtig Quecksilber in die Röhre, so daß sich ein etwa 20 cm langer Quecksilberfaden bildet, neigt sie so, daß der Quecksilberfaden in die Mitte wandert und schmilzt sie dann an einem Ende zu. Mit Hilfe zweier Blechschellen befestigt man die Röhre auf einer Leiste.

**100. Nachweis des Boyleschen Gesetzes mittels einer Bürette [O – Ü]**

Hahnbürette (50 ml), hoher Standzylinder, Meterstab mit verschiebbarem Zeiger, Meßzylinder (15 ml), 2 Stative mit Muffen und Klemmen.

Vor dem Zusammenstellen der Versuchsanordnung ermittelt man das zwischen dem Hahn und dem untersten Skalenstrich einer Bürette befindliche Volumen. Zu diesem Zweck füllt man Wasser bis zum untersten Skalenstrich der Bürette und läßt dieses dann durch Öffnen des Hahnes in einen engen Meßzylinder abfließen. Man wiederholt die Messung mehrere Male.

Dann wird ein hoher Standzylinder mit Wasser gefüllt, die Bürette bei geöffnetem Hahn mit der weiten Öffnung nach unten um einige Teilstriche in das Wasser getaucht und an einem Stativ befestigt. Die Wasserspiegel im Standzylinder sowie in der Bürette stellen sich auf gleiche Höhe ein. Hebt oder senkt man nun die Bürette bei geschlossenem Hahn, so ändert sich auch die Höhe des Wasserspiegels in ihr (Abb. 103/1).

Man bestimmt für verschiedene Stellungen der Bürette das Volumen  $V$  der eingeschlossenen Luft, indem man zu dem an der Bürettenskala abgelesenen Meßwert das Volumen zwischen dem Hahn und dem Skalenende hinzuzählt. Die Differenz der Wasserspiegeln innerhalb und außerhalb der Bürette wird an einem danebengestellten Meterstab mit verschiebbarem Zeiger gemessen.

Den auf die eingeschlossene Luftsäule wirkenden Gesamtdruck  $p$  errechnet man durch Addition des äußeren

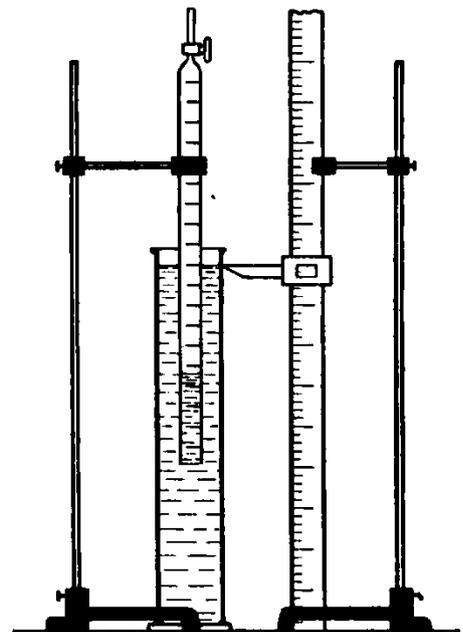


Abb. 103/1. Versuchsanordnung zum Nachweis des Boyleschen Gesetzes mittels einer Bürette

*Beispiel für die bei einer Meßreihe ermittelten Werte*  
Luftdruck  $p_1 = 756$  Torr, Temperatur  $20^\circ \text{C}$

Höhenunterschied der Wasser-niveaus ( $h$ ) mm	Schweredruck des Wassers ( $p_2$ ) Torr	Gesamtdruck ( $p = p_1 + p_2$ ) Torr	Luftvolumen in der Bürette ( $V$ ) cm <sup>3</sup>	$p \cdot V$ Torr · cm <sup>3</sup>
0	0	756	54,0	$40,8 \cdot 10^3$
95	7	763	53,5	$40,8 \cdot 10^3$
190	14	770	53,0	$40,8 \cdot 10^3$
230	17	773	52,8	$40,8 \cdot 10^3$
—80	—6	750	54,5	$40,8 \cdot 10^3$

Luftdrucks  $p_1$  und des auf die Luftsäule wirkenden Schweredruckes  $p_2$  des Wassers. Der Schweredruck des Wassers muß dabei auf Torr umgerechnet werden. Sämtliche Meßwerte trägt man in eine Tabelle ein.

### 101. Nachweis des Boyle'schen Gesetzes mittels eines Manometers und einer Gasmeßglocke [O – Ü]

Flasche (2 l), offenes Quecksilbermanometer, Müllersche Gasmeßglocke (250 ml), Standzylinder, Meßzylinder, Glasrohr-T-Stück, 2 Gummistopfen, 3 Glashähne, davon 2 mit gewinkelttem Rohr, kurzes Glasrohr, Schlauchverbindungsstücke.

#### Versuchsordnung:

Eine Flasche mit einem Inhalt von etwa 2 l, deren Rauminhalt  $V_1$  man durch Ausfüllen mit Wasser genau feststellt, wird mit einem doppelt durchbohrten Gummistopfen verschlossen. Durch die eine Bohrung des Gummistopfens steckt man ein Hahnrohr, an das man mittels eines Schlauchstückes noch ein kurzes Glasrohr anschließt. Durch die andere Bohrung schiebt man den Querschenskel eines T-Rohres. Die eine Seite des Rohres wird mit einem offenen Manometer, die andere Seite über ein Hahnrohr mit einer Meßglocke verbunden, die noch mit einem zweiten Hahnrohr versehen ist (Abb. 104/1).

#### Versuch:

Die Gasmeßglocke wird bei geöffneten Hähnen der Versuchseinrichtung bis zur Nullmarke in einen mit Wasser gefüllten Standzylinder getaucht. Man schließt

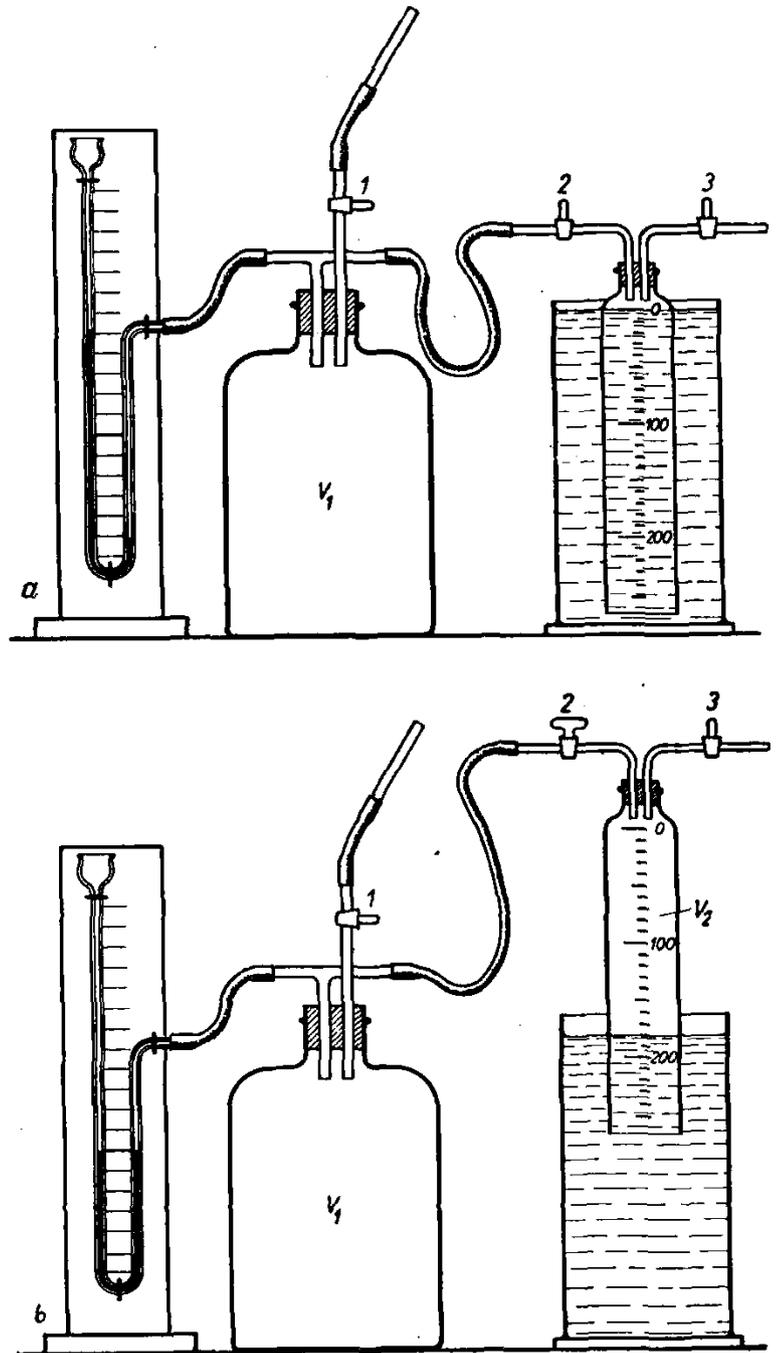


Abb. 104/1. Versuchsanordnung zur Ableitung des Boyle'schen Gesetzes

a) Die Gasmeßglocke ist gesenkt und mit Wasser gefüllt. Das Manometer zeigt einen Überdruck an.

b) Die Gasmeßglocke ist gehoben und mit Luft gefüllt. Das Manometer zeigt Druckgleichheit an.

1, 2, 3 Glashähne

die Hähne 2 und 3 der Gasmeßglocke und bläst durch das Glasrohr 1 zusätzlich Luft in die Flasche. Dadurch entsteht in der Flasche ein Überdruck, den man am angeschlossenen Manometer abliest (Abb. 104/1a). Öffnet man den Hahn 2, so strömt Luft aus der Flasche in die Meßglocke über. Der Wasserspiegel in der Gasmeßglocke sinkt. Hebt man die Meßglocke so weit an, bis wieder Niveaugleichheit zwischen dem Wasser außerhalb und innerhalb der Glocke besteht, so ist der Innendruck in den Gefäßen gleich dem äußeren Luftdruck (Abb. 104/1b). Das Quecksilber im Manometer steht in beiden Schenkeln gleich hoch. Man liest das Volumen  $V_2$  der Luft in der Meßglocke ab.

Der Versuch wird mehrmals wiederholt. Dabei kann man auch Luft aus der Flasche saugen, so daß in der Flasche ein Unterdruck entsteht. Durch Öffnen des Hahnes 3 und Heben der Meßglocke läßt man in diesem Falle etwa 200 cm<sup>3</sup> Luft in die Meßglocke strömen und schließt den Hahn wieder. Beim Öffnen des Hahnes 2 strömt Luft aus der Meßglocke in die Flasche. Durch Senken der Meßglocke bewirkt man den Druckausgleich. Der Unterdruck  $p_2$  und die Volumabnahme in der Meßglocke  $V_2$  erscheinen in der Auswertung als negative Werte.

Der atmosphärische Luftdruck wird mit Hilfe eines Quecksilberbarometers festgestellt.

#### Meßwerte dreier Versuchspaare

Luftdruck  $p_1 = 755$  Torr, Volumen der Flasche  $V_1 = 2020$  cm<sup>3</sup>

Versuch Nr.	Druckunterschied ( $p_2$ ) Torr	Gesamtdruck ( $p = p_1 + p_2$ ) Torr	Volumen der Luft in der Meßglocke ( $V_2$ ) cm <sup>3</sup>	Gesamtvolumen ( $V = V_1 + V_2$ ) cm <sup>3</sup>	$p \cdot V$ Torr · cm <sup>3</sup>
1a	79	835	—	2020	$16,9 \cdot 10^5$
1b	—	755	215	2235	$16,9 \cdot 10^5$
2a	68	823	—	2020	$16,6 \cdot 10^5$
2b	—	755	180	2200	$16,6 \cdot 10^5$
3a	—56	699	—	2020	$14,1 \cdot 10^5$
3b	—	755	—150	1870	$14,1 \cdot 10^5$

Die Tabelle zeigt, daß die Produkte  $p \cdot V$  für jedes Versuchspaar den gleichen Wert haben. Daraus folgt, daß das Produkt aus Druck  $p$  und Volumen  $V$  konstant ist:

$$p \cdot V = \text{const.}$$

*Bemerkung:* An Stelle der Glashähne können auch Quetschhähne verwendet werden. Das Volumen der Glasröhren und Schlauchverbindungen ist im Verhältnis zum Volumen der Flasche sehr klein und kann vernachlässigt werden.

## 102. Nachweis des Boyleschen Gesetzes mit Hilfe eines Kolbenprobers [O — Ü]

Kolbenprober mit Hahnverschluß (Inhalt 50 ml), auflegbarer Holzteller, Stativ mit Muffe und Rohrklemme, Gewichtssatz, Vaseline oder Maschinenöl.

Ein mit Hahnverschluß versehener Kolbenprober mit aufgelegtem Teller wird mittels einer Rohrklemme so an einem Stativ befestigt, daß der Hahnverschluß

lotrecht nach unten zeigt (Abb. 106/1). Man ermittelt vorher das Gewicht des Kolbens und des Tellers mit Hilfe einer Federwaage. Bei abgenommenem Tischchen und bei geöffnetem Hahn wird der Kolben auf den Strich 50 cm<sup>3</sup> eingestellt. Nachdem der Hahn wieder geschlossen und der Teller aufgelegt ist, belastet man den Kolben durch Auflegen von Gewichtsstücken und liest jedesmal das Volumen der zusammengedrückten Luft ab. Die gemessenen Werte werden in eine Tabelle eingetragen. Dabei muß man berücksichtigen, daß sich die Druckkraft aus dem Gewicht des Kolbens, des Tellers und der Gewichtsstücke zusammensetzt. Den auf die eingeschlossene Luft wirkenden Druck erhält man aus dem Quotienten der Druckkraft und der Kolbenfläche.

Die wiedergegebene Tabelle enthält als Beispiel die Ergebnisse einer Meßreihe. Man erkennt mit hinreichender Deutlichkeit, daß das Produkt aus Druck und Volumen bei jeder Messung konstant ist. Es ergibt sich das Boylesche Gesetz

$$p \cdot V = \text{const.}$$

Eine entsprechende Meßreihe läßt sich auch bei einer Druckerniedrigung aufstellen. Man klemmt dazu den Kolbenprober mit dem Kolben nach unten an das Stativ und belastet den Kolben, indem man die Gewichtsstücke mit einer Schnur an den Kolben bindet, und beginnt mit einem entsprechend geringen Anfangsvolumen, etwa mit 10 cm<sup>3</sup>.

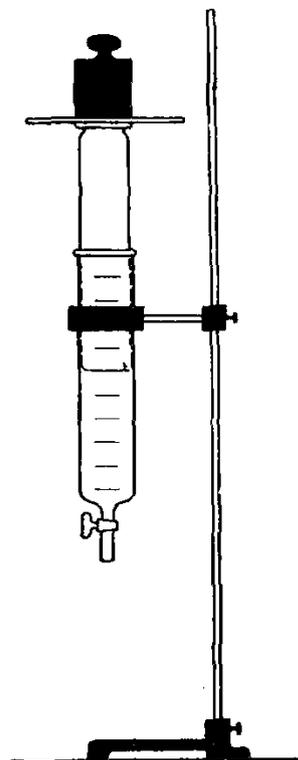


Abb. 106/1. Kolbenprober zum Nachweis des Boyleschen Gesetzes bei Druckerhöhung

#### Meßreihe zum Boyleschen Gesetz

Luftdruck  $p_1 = 765$  Torr = 1,04 kp/cm<sup>2</sup>, Gewicht des Kolbens und des Tellers  $G = 0,36$  kp, Kolbenfläche  $F = 4,9$  cm<sup>2</sup>

Belastung des Kolbens ( $P_1$ ) kp	Gesamte Druckkraft ( $P = P_1 + G$ ) kp	Kolbendruck ( $p_2 = \frac{P}{F}$ ) kp/cm <sup>2</sup>	Gesamtdruck ( $p = p_1 + p_2$ ) kp/cm <sup>2</sup>	Volumen ( $V$ ) cm <sup>3</sup>	$p \cdot V$ kp · cm <sup>3</sup>
0,0	0,36	0,07	1,11	50	55,5
0,5	0,86	0,18	1,22	45	54,9
1,0	1,36	0,28	1,32	41	54,1
1,5	1,86	0,38	1,42	39	55,4
2,0	2,36	0,48	1,52	36	54,7

#### Bemerkungen:

1. Durch die Druckerhöhung wird die Luft im Kolbenprober adiabatisch erwärmt. Es ist deshalb, notwendig, nach der Belastung des Kolbens mit der Ablesung des Luftvolumens so lange zu warten, bis die eingeschlossene Luft die Außentemperatur wieder angenommen hat.
2. Vor dem Ablesen erschüttere man das Stativ durch einige kurze Schläge mit einem Holzstab, damit die zwischen Kolben und Kolbenzylinder bestehende Haftreibung überwunden wird.

3. Schließt der Kolben nicht luftdicht, so feuchtet man ihn mit Wasser an oder fettet ihn etwas mit Vaseline oder Maschinenöl ein. Der Schliff des Kolbens soll glasklar erscheinen.

### 103. Nachweis des Boyleschen Gesetzes mit Hilfe eines ungleichschenkligen U-Rohres [0]

Gerät zum Nachweis des Boyleschen Gesetzes, bestehend aus einem mit Trichter und Hahn versehenen langen U-Rohr, das auf einer Holzleiste befestigt ist (vgl. Abb. 107/1), großer Stativfuß, Stielmuffe, Quecksilber, Quecksilberbrett.

Das Gerät wird mittels einer Stielmuffe lotrecht auf einen großen Stativfuß gestellt (Abb. 107/1). Über einem Quecksilberbrett wird bei geöffnetem Hahn zunächst so viel Quecksilber eingegossen, daß in beiden Schenkeln Niveaugleichheit im Nullpunkt herrscht. Dann wird der Hahn geschlossen. Der Druck in der eingeschlossenen Luftsäule ist zunächst gleich dem äußeren Luftdruck, den man mit einem Barometer mißt. Die Länge  $l$  der eingeschlossenen Luftsäule wird an der Millimeterskala abgelesen. Der auf die eingeschlossene Luftsäule wirkende Druck  $p$  wird durch Zugießen von Quecksilber nach und nach vergrößert, so daß die Länge der Luftsäule stufenweise abnimmt. Die Größe des Gesamtdruckes  $p$  ist dabei gleich der Summe aus dem atmosphärischen Druck  $p_1$  und dem Schweredruck  $p_2$  der Quecksilbersäule.

Sämtliche Meßwerte werden in einer Tabelle zusammengefaßt.

*Beispiel für die bei einer Meßreihe ermittelten Meßwerte*  
Luftdruck  $p_1 = 750$  Torr

Quecksilbersäule		Gesamtdruck $p = p_1 + p_2$ Torr	Länge der eingeschlossenen Luftsäule ( $l$ ) cm	$p \cdot l$ Torr · cm
Höhe ( $h$ ) mm	Schweredruck ( $p_2$ ) Torr			
0,0	0,0	750,0	20,0	$15,0 \cdot 10^3$
67,0	67,0	817,0	18,2	$14,9 \cdot 10^3$
153,0	153,0	903,0	16,5	$14,9 \cdot 10^3$
258,0	258,0	1008,0	14,8	$14,9 \cdot 10^3$
451,0	451,0	1201,0	12,4	$14,9 \cdot 10^3$

Es zeigt sich, daß das Produkt aus dem Gesamtdruck und der Länge der eingeschlossenen Luftsäule annähernd konstant ist.

Da bei konstantem Rohrquerschnitt

$$V \sim l$$

ist, ergibt sich aus dem Versuch, daß

$$p \cdot V = \text{const. ist.}$$

*Bemerkungen:*

1. Man kann sich das Gerät mit einfachen Mitteln selbst herstellen. Eine 1,25 m lange Glasröhre mit einer lichten Weite von etwa 5 mm wird an einem Ende zugeschmolzen und im Abstand von etwa 22 cm vom zugeschmolzenen Ende U-förmig gebogen. Das Rohr wird

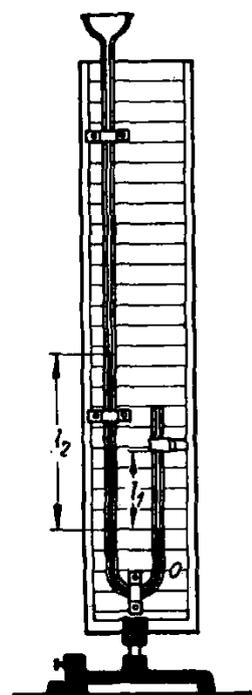


Abb. 107/1  
Ungleichschenkliges U-Rohr zum Nachweis des Boyleschen Gesetzes

mittels mehrerer Rohrschellen an einer mit Millimeterpapier beklebten Holzleiste befestigt. Das offene Rohrende wird mit einem Trichter verbunden.

Beim Einfüllen des Quecksilbers muß man das Rohr wiederholt zur Seite neigen, damit durch Aus- oder Eintreten von Luftblasen in das geschlossene Rohrstück Niveaugleichheit des Quecksilbers hergestellt wird.

2. In ähnlicher Weise verläuft der Versuch, wenn statt des starren U-Rohres zwei lotrecht in zwei Stative geklemmte Röhren verwendet werden, deren untere Enden durch einen Druckschlauch miteinander verbunden und deren obere Enden mit einem Trichter bzw. einem Hahn versehen sind. Der Schlauch muß so lang sein, daß er ein Heben und Senken der einen Röhre in einem ausreichenden Maße zuläßt. Nachdem man den Schlauch und die Röhre so weit mit Quecksilber gefüllt hat, daß das Quecksilber in beiden Röhren auf einem gleichen tiefen Niveau steht, ändert man bei geschlossenem Hahn den Druck durch Heben der nichtgeschlossenen Röhre. Im übrigen verläuft der Versuch wie der oben beschriebene.

## § 11. DER AUFTRIEB IN GASEN

### 104. Auftrieb eines Körpers in Kohlendioxyd [G, O]

Verstellbare Waage, Flasche (250 ml), Gummistopfen, Becherglas (2000 ml), Tarierschrot, Tarierbecher, Gewichtssatz, Kohlendioxydentwickler, Gummischlauch, Waschflasche, geschlitzte Kartonscheibe zum Abdecken des Becherglases, rechtwinklig gebogenes Glasrohr, Stativ mit Muffe und Klemme.

#### Versuch a:

Man hängt eine mit einem Gummistopfen verschlossene Flasche mittels einer dünnen Schnur so an die eine Schale einer verstellbaren Waage, daß die Flasche frei hängend in ein darunter gestelltes Becherglas ganz eintaucht (Abb. 108/1). Die Flasche wird austariert. Auf das Becherglas wird eine Kartonscheibe gelegt, die mit einem vom Rande bis zur Mitte reichenden, etwa 1 cm breiten Schlitz versehen ist. Über ein rechtwinklig gebogenes Glasrohr, das durch einen Schlauch mit einem Kohlendioxydentwickler verbunden ist, leitet man dem Becherglas Kohlendioxyd zu. Die Waage zeigt deutlich einen scheinbaren Gewichtsverlust der Flasche an, der dadurch verursacht wird, daß der Auftrieb in Kohlendioxyd wegen der größeren Wichte dieses Gases größer ist als in Luft.

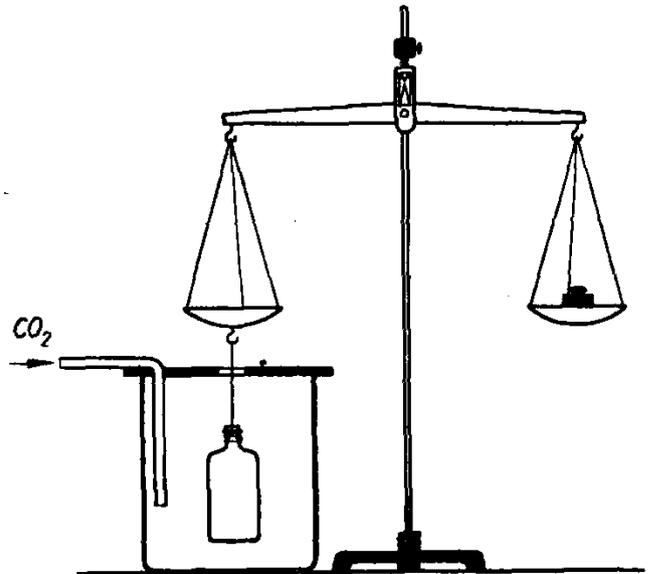


Abb. 108/1. Nachweis des Auftriebs einer Flasche in Kohlendioxyd

#### Versuch b [O]:

Man kann den Versuch in einfacher Weise zu einem quantitativen Versuch ausgestalten, indem man die Flasche erst in Luft und dann in Kohlendioxyd wägt

und durch Differenzbildung den scheinbaren Auftrieb in Kohlendioxyd ermittelt. Man muß aber dabei beachten, daß der so gefundene Auftriebswert  $A$  nicht der Auftrieb in Kohlendioxyd  $A_{\text{CO}_2}$  selbst, sondern die Differenz zwischen  $A_{\text{CO}_2}$  und dem Auftrieb  $A_{\text{Luft}}$  in Luft ist. Es ist

$$A = A_{\text{CO}_2} - A_{\text{Luft}}.$$

Das äußere Volumen  $V$  der Flasche ermittelt man durch Wasserverdrängung. Bildet man den Quotienten  $\frac{A}{V}$ , so gibt er den Betrag an, um den die Wichte des Kohlendioxyds  $\gamma_{\text{CO}_2}$  die Wichte der Luft  $\gamma_{\text{Luft}}$  übertrifft. Es ist

$$A_{\text{CO}_2} = A_{\text{Luft}} + A,$$

mithin

$$\frac{A_{\text{CO}_2}}{V} = \frac{A_{\text{Luft}}}{V} + \frac{A}{V}$$

oder

$$\gamma_{\text{CO}_2} = \gamma_{\text{Luft}} + \frac{A}{V}.$$

*Beispiel:* Scheinbarer Auftrieb der Flasche in Kohlendioxyd  $A = 0,21$  p. Äußeres Volumen der Flasche  $V = 315$  cm<sup>3</sup>.

$$\frac{A}{V} = \frac{0,21}{315} \text{ p/cm}^3 \approx 0,00067 \text{ p/cm}^3.$$

$$\gamma_{\text{CO}_2} = (0,00129 + 0,00067) \text{ p/cm}^3 = 0,00196 \text{ p/cm}^3.$$

### 105. Nachweis des Auftriebs eines Körpers in Luft — Benutzung eines Dasymeters [G, O]

Dasymeter, Luftpumpe mit Rezipienten — Holzspeiler, Weihnachtsbaumkugel, starker Draht, 10-g-Stück, Tintenfläschchen, Sand.

Man stellt ein Dasymeter unter den Rezipienten einer Luftpumpe und pumpt die Luft aus. Die Glaskugel des Dasymeters senkt sich. Läßt man die Luft wieder in den Rezipienten einströmen, so geht der Waagebalken des Dasymeters wieder auf die Ausgangsstellung zurück.

*Bemerkungen:*

1. Man lasse die Luft vorsichtig in den Rezipienten einströmen, da sonst das Dasymeter beschädigt werden kann.
2. Falls ein fertiges Dasymeter nicht vorhanden sein sollte, kann man ein solches mit einfachen Mitteln behelfsmäßig selbst herstellen. Man fertigt aus einem mit Sand gefüllten Tintenfläschchen und einem durch den Korken gesteckten starken Draht ein behelfsmäßiges Stativ (Abb. 109/1). Daran hängt man als Waagebalken mittels eines Zwirnfadens ein Stück eines Holzspeilers. An das eine Ende des Speilers bindet man eine Weihnachtsbaumkugel, an das andere Ende ein kleines Gewichtstück. Die Mittelöse verschiebt man so,

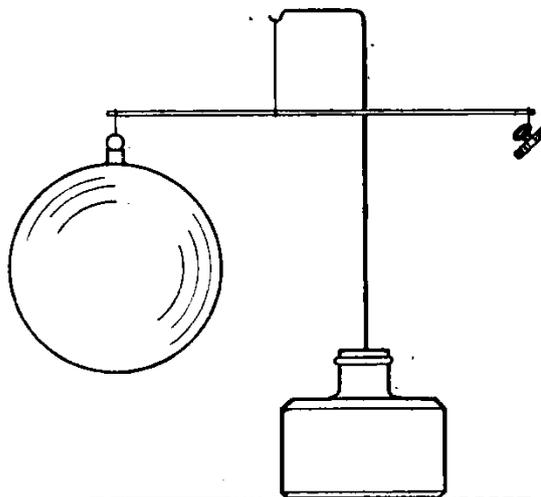


Abb. 109/1. Behelfsmäßiges Dasymeter

daß der Waagebalken horizontal einspielt. Da der Versuch nur gelingt, wenn das Innere der Kugel luftdicht abgeschlossen ist, muß man die Kappe der Kugel vor dem Zusammenbau durch Überziehen mit etwas Siegelack oder durch wiederholtes Eintauchen in flüssiges Paraffin luftdicht verschließen.

### 106. Bestimmung der Wichte von Stadtgas mit Hilfe eines Dasymeters [0]

Dasymeter mit einer in mp geteilten Skala, Luftpumpe mit Rezipient und Dreiwegehahn, Stadtgasleitung, Gasschlauch.

Das für diesen Versuch zu verwendende Dasymeter muß mit einer aus einem Zeiger und einer Skala bestehenden Anzeigevorrichtung ausgestattet sein, die es ermöglicht, die beim Evakuieren auftretende Auftriebsverminderung in mp festzustellen. Man stellt das Dasymetermodell unter den Rezipienten einer Luftpumpe und liest die Stellung  $a_0$  des Zeigers ab. Dann pumpt man die Luft aus dem Rezipienten und stellt die Größe des Zeigerausschlages  $a_1$  fest. Man verbindet den evakuierten Rezipienten über den Dreiwegehahn durch einen Schlauch mit der Stadtgasleitung und läßt vorsichtig Stadtgas in den Rezipienten strömen. Man wartet den Temperaturengleich ab und liest den Ausschlag  $a_2$  ab.

Die Differenz zwischen dem Ausschlag  $a_2$  und  $a_1$  ist gleich dem Auftrieb  $A_G$ , den die Dasymeterkugel in Stadtgas erhält. Die Differenz  $a_1$  und  $a_0$  gibt den Auftrieb  $A_L$  der Kugel in Luft an.

Nach dem Archimedischen Gesetz ist das Verhältnis der Wichte der Luft zu der des Stadtgases gleich dem Verhältnis der Auftriebe, die der gleiche Körper in ihnen erfährt.

$$\frac{\gamma_L}{\gamma_G} = \frac{A_L}{A_G}.$$

Daraus folgt

$$\gamma_G = \gamma_L \cdot \frac{A_G}{A_L}.$$

Beispiel:

$$a_1 - a_0 = 36 \text{ mp}$$

$$a_2 - a_1 = 20 \text{ mp}$$

$$\gamma_G = \frac{a_2 - a_1}{a_1 - a_0} \cdot \gamma_L.$$

Demnach ist

$$\begin{aligned} \gamma_G &= \frac{20}{36} \cdot 1,29 \text{ p/dm}^3 \approx 0,72 \text{ p/dm}^3 \\ &= 0,00072 \text{ p/cm}^3. \end{aligned}$$

Es ergibt sich daraus näherungsweise das Litergewicht des Stadtgases zu 0,72 p.

Bemerkungen:

- Abb. 110/1 gibt eine Anregung zur Selbstanfertigung eines zu quantitativen Versuchen dienenden behelfsmäßigen Dasymeters. Als Auftriebskörper verwendet man eine selbstgeblasene Glaskugel oder eine Weihnachtsbaumkugel. Als Waagebalken

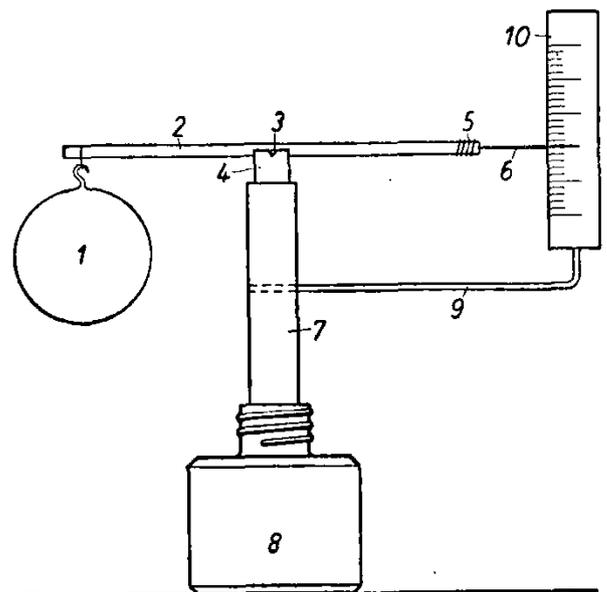


Abb. 110/1. Behelfsmäßiges Dasymeter für quantitative Versuche

- 1 Dünnwandige Glaskugel
- 2 Strohhalm als Waagebalken
- 3 Nähnadel als Achse
- 4 U-förmig gebogener Blechstreifen als Lager
- 5 Umgewickelter Kupferdraht als Gegengewicht
- 6 Nadel als Zeiger
- 7 Holzsäule
- 8 Mit Sand gefülltes Tintenfläschchen
- 9 Drahtbügel
- 10 Mit Millimeterpapier beklebter Kartonstreifen

dient ein Strohhalm, dessen Achse durch eine hindurchgesteckte Nadel gebildet wird. Die Einteilung der Skala wird durch Auflegen von Bruchgrammen auf die Kugel vorgenommen.

2. Der Versuch veranschaulicht die Wirkungsweise der Gaswaage, eines Meßgerätes, das in Gasanstalten und chemischen Fabriken bei der technischen Betriebskontrolle zur Untersuchung von Gasen allgemein verwendet wird. Der Wert dieses Versuches für die polytechnische Bildung wird dadurch evident.

### 107. Vergrößerung des Auftriebs einer Gummiblase durch Dampffüllung [G, O]

Reagenzglas, Gummiblase eines Kinderluftballons, Bindfaden, Hornschalenwaage, Bunsenbrenner, etwa 30 mm breiter Kartonstreifen, Tarierschrot, Tarierbecher.

Man füllt ein Reagenzglas etwa zu einem Drittel mit Wasser und zieht über die Öffnung des Glases den Schlauchansatz der Gummiblase eines Kinderluftballons. Beide Teile werden durch Umwickeln des Ballonmundstückes mit dünner Schnur luftdicht miteinander verbunden. Man legt das Reagenzglas auf die Waagschale einer Hornschalenwaage und stellt es durch Unterlegen eines gekniffen Kartonstreifens etwas schräg, damit das Wasser nicht in den Ballon fließen kann (Abb. 111/1). In dieser Lage bindet man das Glas an der Waagschale fest. Das Reagenzglas ragt etwa zu einem Viertel über die Waagschale heraus. Die Waage wird austariert.

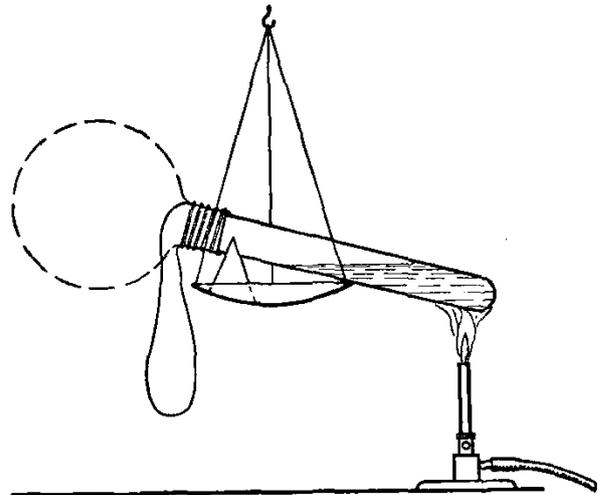


Abb. 111/1. Ein mit einer Gummiblase verschlossenes, wassergefülltes Reagenzglas auf einer Waagschale

Mit der Flamme eines Bunsenbrenners erhitzt man vorsichtig den herausragenden Teil des Reagenzglases, bis das Wasser verdampft und der Ballon sich aufbläht. Da die Vorrichtung jetzt einen größeren Raum einnimmt, ohne daß sich ihr Gewicht vergrößert, erfährt sie einen Auftrieb. Das Gleichgewicht der Waage wird gestört.

### 108. Bestimmung des Auftriebs eines Kinderluftballons [G, O – Ü]

Gummiblase eines Kinderluftballons, 5-g-Stück, Federwaage (Meßbereich 10 p), Briefwaage, dünne Schnur.

#### *Versuch a: Benutzung einer Federwaage*

Die leere Gummiblase eines Kinderluftballons wird mittels einer dünnen Schnur an ein 5-g-Gewichtsstück gebunden. Beides hängt man an eine senkrecht an einem Stativ befestigte Federwaage und bestimmt das gemeinsame Gewicht  $G_1$ . Dann füllt man die Gummiblase mit Stadtgas oder Wasserstoff. Die Federwaage zeigt ein geringeres Gewicht  $G_2$  des Gewichtsstückes und der Gummiblase an (Abb. 112/1).

Diese scheinbare Gewichtsverminderung wird durch den Auftrieb  $A$  des Gases in der Luft hervorgerufen. Der Auftrieb ist gleich der Differenz aus  $G_1$  und  $G_2$ .

$$A = G_1 - G_2.$$

*Versuch b: Benutzung einer Briefwaage*

Die Versuchsdurchführung ist ähnlich wie in Versuch a. Statt einer Federwaage verwendet man eine Briefwaage (Abb. 112/2). Der Umstand, daß die Briefwaage nicht mit einer p-Skala, sondern mit einer g-Skala ausgestattet ist, ist in diesem Falle belanglos.

*Bemerkung:* Die Füllung des Ballons wird wie in V 114 durchgeführt.

Abb. 112/1. Ein an einer Federwaage befestigter mit Gas gefüllter Kinderballon zur Bestimmung seines Auftriebs in der Luft

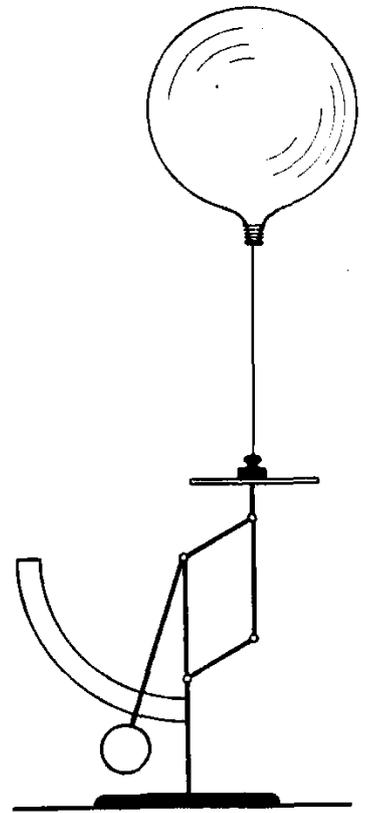
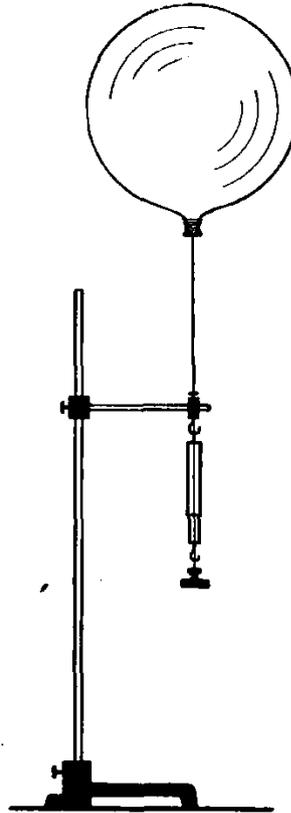


Abb. 112/2. Bestimmung des Auftriebs eines mit Gas gefüllten Kinderballons mit Hilfe einer Briefwaage

### 109. Bestimmung des Auftriebs eines mit Stadtgas gefüllten Ballons mit Hilfe des Halteschnurgewichts [G, 0 – Ü]

Luftballon, dünne Schnur (Länge etwa 2000 mm), Maßstab, Waage mit Gewichtssatz.

Man wägt die leere Hülle eines Gummiballons sowie eine 200 cm lange Halteschnur. Der Ballon wird wie in V 114 mit Stadtgas gefüllt und mit einem Ende der Schnur zugebunden.

Man läßt den Ballon über dem Tisch steigen. Dabei hebt er so viel von der Länge der Halteschnur, bis das Gewicht des gehobenen Schnurstückes und das der Ballonhülle zusammen gleich dem Auftrieb des Ballons ist (Abb. 112/3). Die Länge der gehobenen Schnur wird gemessen und mit dem Gewicht der Schnur je Zentimeter multipliziert.

*Beispiel:*

Gewicht der Ballonhülle

$$G_b = 1,57 \text{ p,}$$

Gewicht der gesamten Halteschnur

$$G_s = 1,02 \text{ p,}$$

Länge der gesamten Halteschnur

$$l_s = 200 \text{ cm,}$$

Länge der gehobenen Halteschnur

$$l_h = 111 \text{ cm,}$$

Gewicht der gehobenen Halteschnur

$$G_h = \frac{l_h}{l_s} \cdot G_s = \frac{111}{200} \cdot 1,02 \text{ p} \approx 0,57 \text{ p,}$$

Auftrieb

$$A = G_h + G_b = 0,57 \text{ p} + 1,57 \text{ p} = 2,14 \text{ p.}$$

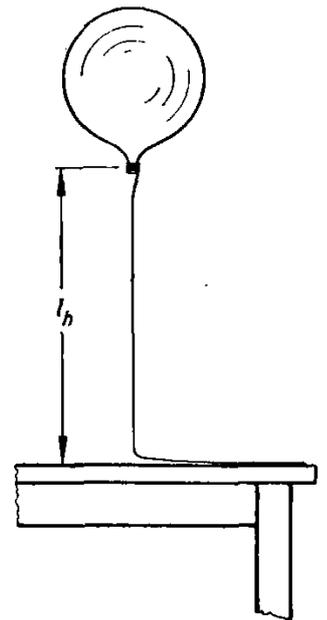


Abb. 112/3. Mit Stadtgas gefüllter Ballon. Der Auftrieb des Ballons ist gleich dem Gewicht der gehobenen Schnur.

**110. Der Auftrieb mit Stadtgas gefüllter Seifenblasen in Luft [G — Ü]**

Stadtgas, Gasschlauch, Verbindungsschlauch, Schlauchverbindungsstück, schwach trichterförmig erweitertes Glasrohr, Schraubquetschhahn; Schale mit Seifenlösung.

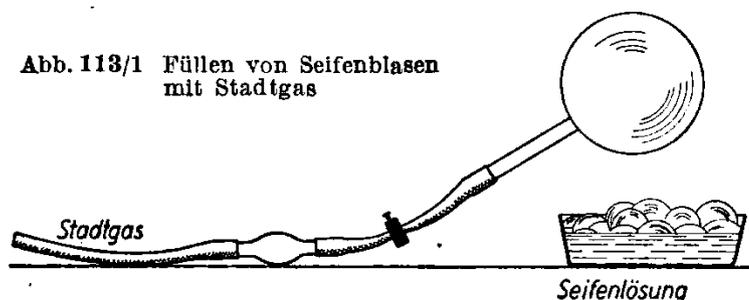
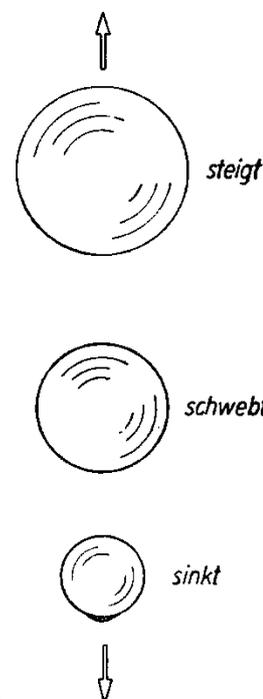


Abb. 113/2. Steigfähigkeit von Seifenblasen verschiedener Größe



Ein dünnes Glasrohr wird an einem Ende über einer Flamme trichterförmig erweitert. Über das röhrenförmige Ende schiebt man einen dicht ansitzenden, dünnen Gummischlauch und verbindet ihn mit Hilfe eines Verbindungsstückes mit einem zur Stadtgasleitung führenden Schlauch. Man taucht das Glasrohrende in eine Schale mit Seifenlösung und regelt mit Hilfe eines um den Schlauch gelegten Schraubhahnes die für die Seifenblasenbildung günstigste Strömungsgeschwindigkeit ein (Abb. 113/1). Bei kurzzeitigem Öffnen des Gashahns bilden sich, entsprechend der Strömungsdauer des Gases, Seifenblasen verschiedener Größe. Bewegt man die Glasröhre ruckartig, so lösen sich die Blasen vom Rohr.

Dabei kann man folgende Feststellung machen:

1. Kleine Seifenblasen sinken in der Regel schnell zu Boden. Ihr Gasinhalt ist klein und ihre Hülle dick, deshalb ist ihr Auftrieb kleiner als ihr Gewicht.
2. Mittelgroße Seifenblasen sinken oder steigen in ruhiger Luft nur ganz langsam oder sie schweben. Ihr Auftrieb ist annähernd gleich ihrem Gewicht.
3. Große Seifenblasen steigen rasch. Ihr Auftrieb ist größer als ihr Gewicht (Abb. 113/2).

*Bemerkung:* Nach dem Ablösen einer Seifenblase bilden sich meist ohne vorheriges Eintauchen noch weitere Blasen am Glasrohrende. Sie haben eine dünne Hülle. Ihr Auftrieb ist immer größer als ihr Gewicht. Bläst man von der Seite her in die entstehenden Seifenblasen, so lösen sich zahlreiche kleine Seifenblasen rasch nacheinander ab. Die zuerst entstehenden sinken, die folgenden schweben und die letzten steigen.

**111. Auftrieb einer mit Kohlendioxyd gefüllten Seifenblase in verschiedenen Gasen [G, O]**

Versuchsgerät wie in V 110, außerdem Gasentwickler für Kohlendioxyd, pneumatische Wanne, Brom, Äther.

Man stellt Seifenblasen nach V 115 her. Zum Füllen der Blasen verwendet man Kohlendioxyd, das in einem Kippschen Apparat erzeugt wird. Die Seifenblase wird bis zu einem Durchmesser von etwa 5 bis 6 cm aufgeblasen. Löst man die Seifenblase mit einem kurzen Ruck vom Blasrohr, so fällt sie sofort zu Boden. Läßt man

dagegen die Seifenblase in eine Wanne fallen, die zum Teil mit Bromdämpfen gefüllt ist, so bleibt sie auf der Grenzfläche zwischen Luft und Brom liegen. Sie schwimmt auf dem Bromdampf. Die gleiche Erscheinung beobachtet man, wenn man einige Tropfen Äther innerhalb der Wanne verdampfen läßt.

*Bemerkungen:*

1. Da das Brom chemisch auf die Seifenhaut einwirkt, werden die Blasen verhältnismäßig schnell zerstört.
2. Mit dem bei der Gasentwicklung erzeugten Druck lassen sich Seifenblasen bis zu einem Durchmesser von etwa 6 cm aufblasen.

### 112. Nachweis des Auftriebs erwärmter Luft [G, O – Ü]

Aus dünnem Papier hergestellter Quader, Briefwaage, Holzspeiler, Plastilin, dünner Faden, Kerze oder Bunsenbrenner, Unterstellkasten.

Man fertigt aus dünnem Papier einen Quader mit quadratischer Grund- und Deckfläche. Seine Seitenkanten macht man 30 cm, seine Grundkanten 20 cm lang. Zur Versteifung des Quaders wird unter die Deckfläche ein Kreuzgerüst aus dünnem Karton aufgeklebt, wie Abbildung 114/1 zeigt.

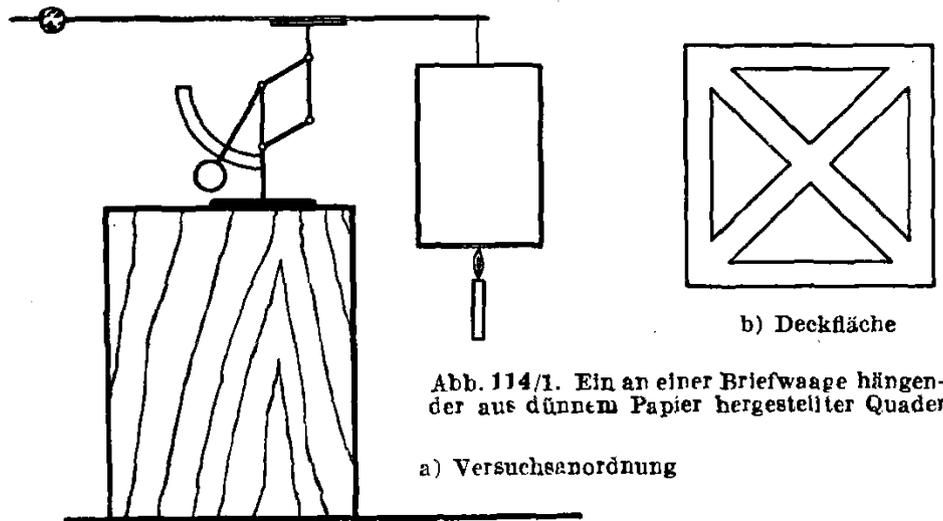


Abb. 114/1. Ein an einer Briefwaage hängender aus dünnem Papier hergestellter Quader

a) Versuchsanordnung

In die Grundfläche schneidet man eine quadratische Öffnung mit einer Seitenlänge von 8 cm. Mittels eines Fadens hängt man den Quader an das eine Ende eines Speilers, an das andere Ende klebt man als Gewichtsausgleich ein Stückchen Plastilin. Der Speiler wird auf eine am Rande eines Unterstellkastens stehende Briefwaage gelegt und ausbalanciert. Bringt man eine brennende Kerze oder eine kleine Bunsenflamme unter die Quaderöffnung, so geht der Ausschlag der Briefwaage zurück. Die Verminderung des Ausschlages ist gleich dem Auftrieb, den die von der Kerze erwärmte Luft erhält.

### 113. Modell einer Montgolfiere [G – Ü]

Seidenpapier, Zeitungspapier, Klebstoff, Schnur, Klebestreifen, Watte, Blumendraht, Brennspritus.

Man stellt das Modell einer Montgolfiere durch Zusammenkleben von Seidenpapierstreifen her. Kleinere Abmessungen als die in Abb. 115/1 angegebenen zu wählen, ist zwecklos, da der Ballon dann nicht die genügende Steigfähigkeit besitzt. Zunächst fertigt man sich aus Zeitungspapier eine Schablone nach den Angaben der Abb. 115/1 und schneidet nach ihr 12 Streifen aus Seidenpapier aus.

Man legt drei Streifen nebeneinander auf den Tisch, bestreicht bei zwei Streifen je den gleichen Rand etwa 5 mm breit mit Klebstoff und klebt den benachbarten Rand des danebenliegenden Streifens darauf (Abb. 115/2). Man läßt sich dabei von einem Schüler helfen, der die Spitzen der Streifen anhebt. Nachdem man so die Streifen zu Dreiergruppen zusammengeklebt hat, läßt man sie gründlich trocknen, da das Seidenpapier leicht einreißt, solange es noch vom Klebstoff feucht ist. Danach werden noch die entstandenen vier Streifengruppen zusammengeklebt, wobei sich das Zusammenfügen der letzten Klebkante als das Schwierigste erweist. Es empfiehlt sich, hierbei den Ballon von einem Helfer halten zu lassen und mit der einen Hand in den Ballon hineinzugreifen und von innen gegen den Klebrand zu drücken.

Die geraden Streifenstücke, die den schlauchartigen Abschluß bilden, klebt man zuletzt zusammen. Man läßt die Ballonhülle von einem Helfer mit beiden Händen halten und streift den Schlauchansatz über ein mittels einer Schraubzwinde am Tisch befestigtes, etwas über seine Kante ragendes schmales Brett. Den oberen und den unteren Rand des Schlauchansatzes versteift man durch einen von außen herumgeklebten derben Klebstreifen (Abb. 115/3).

Da am Ballonscheitel infolge der schwierigen Art der Klebearbeit meist noch Undichtigkeiten vorhanden sind, dichtet man ihn durch Aufkleben einer größeren Seidenpapierscheibe. Auf diese klebt man noch eine Scheibe aus derbem Papier, die vorher mit einem zentrischen Loch versehen worden ist. Durch dieses zieht man eine Schnurschleufe, deren Enden mit der Papierscheibe gut verklebt werden. Die Schleufe dient bei der Durchführung des Versuchs zum Aufhängen des Ballons. Das Aufkleben der Papierscheiben kann man dadurch erleichtern, daß man einen gläsernen Rundkolben auf eine Stange stülpt und ihn zum Erzeugen des Gegendruckes von unten her in den Ballon einführt.

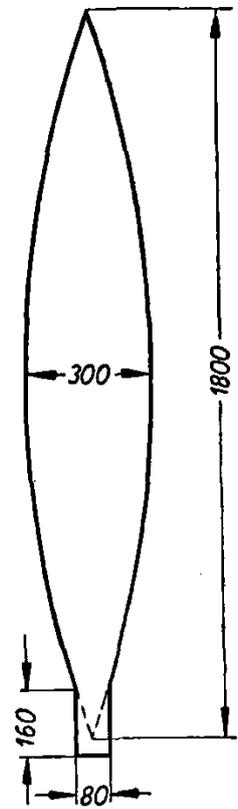


Abb. 115/1  
Schablone für  
die Seidenpapier-  
streifen  
(Maßstab 1:25)

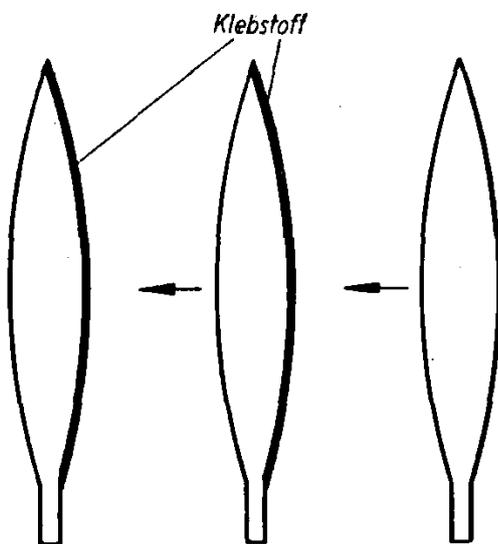


Abb. 115/2. Zusammenkleben der  
Seidenpapierstreifen zu Dreiergruppen

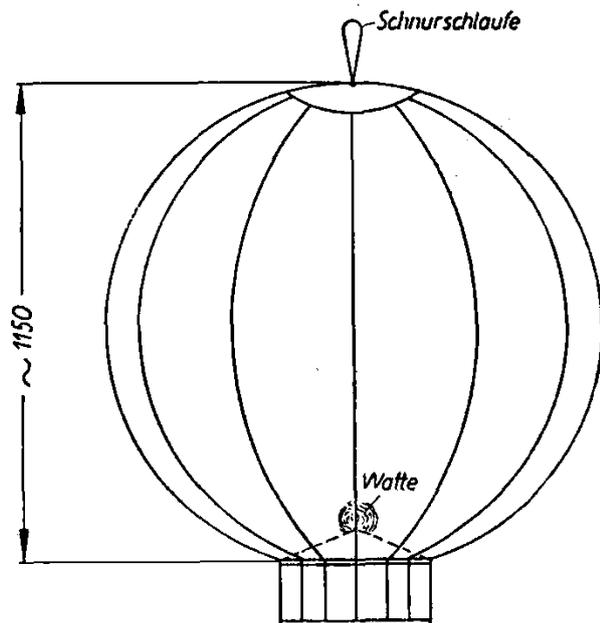


Abb. 115/3. Modellzeichnung einer Montgolfiere  
(Maßstab 1:25)

Zum Schluß sticht man in zwei zueinander senkrechten Richtungen durch den oberen Klebstreifen des Ansatzes zwei Drahtstücke, die im Innern des Ansatzes ein Kreuz bilden und zum Festhalten eines Wattebauschs dienen (vgl. Abb. 115/3).

Den Versuch selbst führt man im Freien durch (Schulhof, Sportplatz). Man hängt zu diesem Zweck die Ballonhülle mit der dafür vorgesehenen Schlaufe an eine waagrecht gehaltene Stange (Abb. 116/1). An dem Drahtkreuz bindet man mit Draht einen etwa walnußgroßen Wattebausch fest, den man vorher mit Brennspritus getränkt hat. Es empfiehlt sich, die Größe des Wattebauschs durch einen Vorversuch vorher auszuprobieren, damit man sicher ist, daß die Papierhülle nicht durch die Spiritusflamme gefährdet wird. Kurze Zeit nachdem man den Wattebausch entzündet hat, beginnt sich der Ballon infolge der sich bildenden warmen Luft aufzublähen. Sobald die Schnurschlaufe anfängt, locker zu werden, hat der Ballon genügend Auftrieb. Durch ruckartiges Herausziehen der Stange aus der Schlaufe gibt man ihn frei. Der Ballon steigt empor. Will man die Stabilität der Fluglage erhöhen, so empfiehlt es sich, am unteren Klebstreifenring durch drei Drahtstücke als „Gondel“ einen kleinen Stein zu befestigen. Gleichzeitig kann man dadurch die Steighöhe begrenzen und so den Ballon vor dem Entfliegen sichern.

*Bemerkung:* Der Versuch darf wegen der Feuersgefahr nur vom Lehrer durchgeführt werden. Er darf nur bei windstillem Wetter und nur dort vorgenommen werden, wo ein genügend großes Freigelände zur Verfügung steht. Die verwendete Spiritusmenge ist nur so groß zu wählen, daß der Auftrieb gerade ausreicht, um den Ballon kurze Zeit einige Meter zu heben.

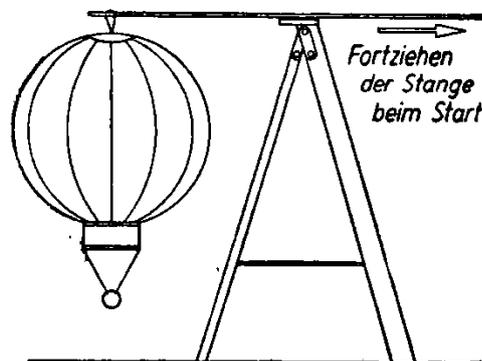


Abb. 116/1. Start des Modells einer Montgolfiere

Als Unterlage für die waagrecht aufgehängte Stange der Ballonhülle dient ein Standleiter. Die Stange wird im Augenblick des Starts ruckartig beiseite gezogen

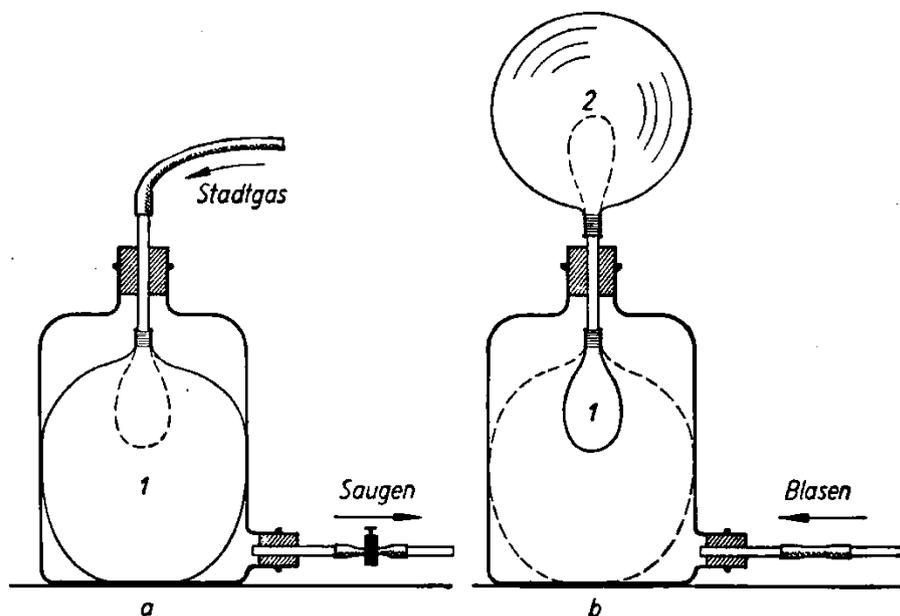
#### 114. Füllen eines Luftballons mit Stadtgas — Benutzung einer Abklärflasche [G, O]

Versuchsgeräte wie in V 73, zusätzlich Gummischlauch für Stadtgas und Gummiblase, Druckball mit Saug- und Druckventil.

Man verwendet zum Füllen eines Gummiballons mit Stadtgas die in V 73 angegebene Versuchsanordnung. Das Glasrohr des oberen Tubus wird mit Hilfe eines Gummischlauchs mit der Stadtgasleitung verbunden.

Abb. 116/2. Füllen einer Gummiblase mit Stadtgas mit Hilfe einer Abklärflasche

- Einsaugen des Gases in den Ballon 1
- Aufblasen des Ballons 2 durch Einblasen von Luft in die Flasche



Saugt man wie in V73 an dem seitlichen Tubus die Luft aus der Flasche, so füllt sich der Ballon mit Gas. Nachdem man den Quetschhahn und den Gasleitungshahn geschlossen hat, zieht man den Schlauch

vom Glasrohr, ohne daß man Luft in dieses gelangen läßt, und verbindet das Rohr mit dem zu füllenden Ballon.

Öffnet man den Quetschhahn und bläst in die Saugleitung, so schrumpft der in der Flasche befindliche Ballon zusammen. Der außerhalb der Flasche am Rohr befestigte Ballon bläht sich auf und füllt sich mit Gas (Abb. 116/2). Man schließt den Quetschhahn, bindet den Schlauchansatz des Ballons zu und löst den Ballon vom Glasrohr. Der Ballon schwebt langsam empor.

*Bemerkung:* Man kann die Füllung auch dadurch vornehmen, daß man die zu füllende Blase über einen mit einem Saug- und einem Druckventil ausgestatteten Druckball an die Stadtgasleitung anschließt (Abb. 117/1). Man umfaßt den Druckball mit der Hand. Durch wiederholtes Öffnen und Schließen der Hand pumpt man Stadtgas in die Gummiblase. Zum Füllen des Ballons sind etwa 120 bis 150 Stöße erforderlich.

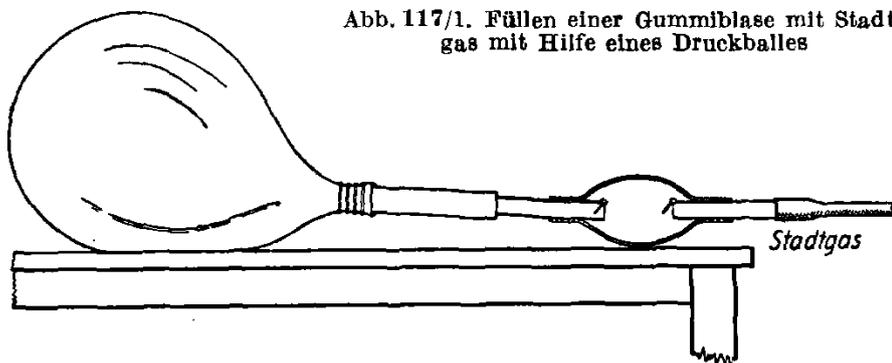


Abb. 117/1. Füllen einer Gummiblase mit Stadtgas mit Hilfe eines Druckballes

## 115. Herstellen von Seifenlösungen für Seifenblasenversuche

### a) Verwendung von Kernseife, Zucker und Wasser

Etwa 25 g dünne Kernseifenspäne werden in 500 cm<sup>3</sup> warmem Wasser gelöst. In einer Abdampfschale werden 25 g Zucker unter dauerndem Umrühren über einer Bunsenflamme langsam hellbraun gebrannt. Man löst den Zucker ebenfalls in 500 cm<sup>3</sup> warmem Wasser. Die Seifen- und die Zuckerlösung werden im Verhältnis 1 : 1 miteinander gemischt.

### b) Verwendung von medizinischer Seife, Kandiszucker und Wasser

5 g aus medizinischer oder venetianischer Seife hergestellte Späne werden in 100 cm<sup>3</sup> warmem Wasser gelöst. Man löst ferner fein gepulverten, dunkelbraunen Kandiszucker in 100 cm<sup>3</sup> Wasser, bis dieses gesättigt ist. Vor dem Gebrauch werden beide Lösungen im Verhältnis 1 : 1 gemischt.

### c) Verwendung von Kernseife, Glycerin und destilliertem Wasser

Es werden etwa 8 g Seifenschnitzel einer Kernseife in 150 cm<sup>3</sup> erwärmtem destilliertem Wasser gelöst. Dieser Seifenlösung gibt man etwa 15 cm<sup>3</sup> Glycerin hinzu.

#### *Bemerkungen:*

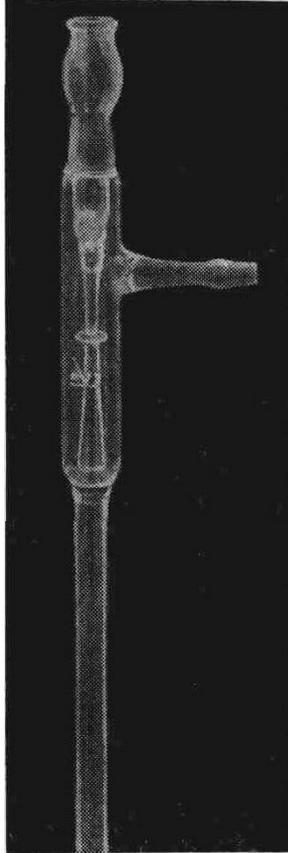
1. Während die ersten beiden Seifenlösungen nach ihrer Herstellung bald verbraucht werden müssen, kann die letzte längere Zeit aufgehoben werden. Sollte die Lösung im Laufe der Zeit fest werden, so läßt sie sich durch Erwärmen in einem Wasserbad leicht wieder verflüssigen.
2. Beim Herstellen der Seifenlösung können kleine Mengen zu dunkel gebranntem Zuckers, unreines Glycerin oder Farbstoffe die Lösung für das Erzeugen von Seifenblasen unbrauchbar machen.

## § 12. LUFT- UND WASSERPUMPEN

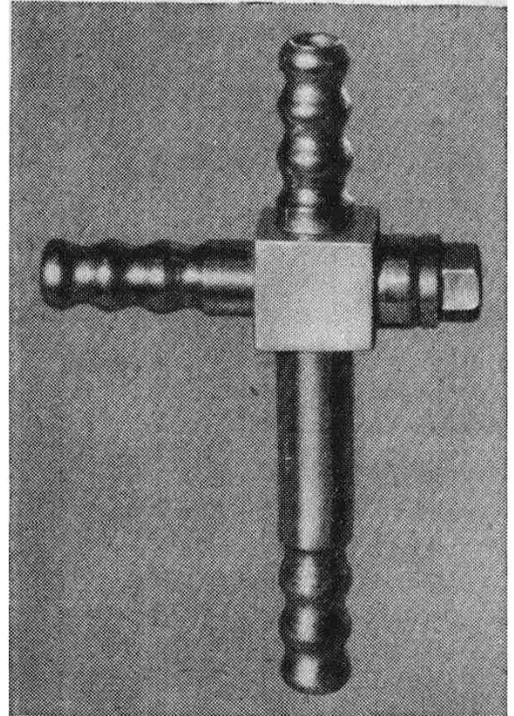
## 116. Luftpumpen für den Schulgebrauch und ihre Behandlung

## 1. Die Wasserstrahlpumpe (Abb. 118/1).

Die Wasserstrahlpumpe beruht auf der Saugwirkung eines aus einer Düse mit großer Geschwindigkeit austretenden Wasserstrahls. Sie erzeugt bei guter Leistung ein Vakuum von etwa 15 Torr. Die Saugleistungen mehrerer Wasserstrahlpumpen sind trotz gleicher Pumpenausführung oft verschieden. Unter Umständen setzt sich bei hartem Wasser infolge längeren Betriebs an der Strahldüse Kalk ab. Dadurch wird die Düsenwirkung und somit die Saugleistung vermindert. Man entfernt diesen Kalkansatz durch Abkratzen oder mit Hilfe verdünnter Salzsäure.



a) aus Glas



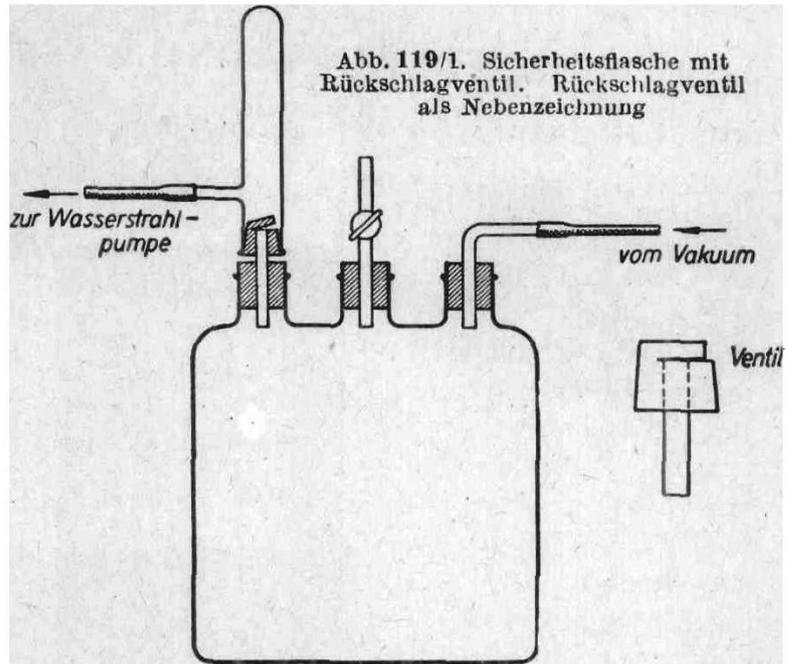
b) aus Metall

Abb. 118/1. Wasserstrahlpumpe

Die Pumpe wird mittels eines Panzerschlauchs mit einem Wasserleitungshahn verbunden. Es ist zu empfehlen, bei genügend weitem oberen Pumpenansatz und entsprechend weitem Panzerschlauch über den Hahn der Wasserleitung ein Stück Gummischlauch zu ziehen und über diesen den Panzerschlauch zu schieben. Die Pumpe kann auf diese Weise leichter zur Reinigung abgezogen werden. Beim Anbringen der Pumpe ist darauf zu achten, daß der Wasserhahn nicht zu tief über dem Abfluß liegt. Will man das Spritzen des ausströmenden Wassers vermeiden und sein Geräusch verringern, so verlängert man das Fallrohr mit einem Schlauch.

Bei Druckschwankungen in der Wasserleitung und beim Abstellen der Pumpe kann der äußere Luftdruck das in der Wasserstrahlpumpe befindliche Wasser in das zu evakuierende Gefäß zurückdrücken. Aus diesem Grunde empfiehlt es sich, zwischen die Pumpe und das zu evakuierende Gefäß eine Sicherheitsflasche und, wenn möglich, ein Rückschlagventil einzuschalten. Sehr geeignet dafür ist eine Woulffsche Flasche mit drei Tuben und einem Inhalt von mindestens 1 Liter. Der eine Tubus wird mit einem in einem durchbohrten Gummistopfen steckenden Glashahn verschlossen. Man kann durch Öffnen des Hahnes den Unterdruck im Gefäß aufheben. Verwendet man statt des einfachen Glashahns einen Dreiweghahn und schließt man an diesen ein verkürztes Quecksilberbarometer an, so kann man den Unterdruck jederzeit messen.

Den zweiten Tubus verbindet man mit einem Sicherheitsventil, das an die Wasserstrahlpumpe angeschlossen ist. Ein einfaches, selbst herstellbares Ventil ist in Abb. 119/1 wiedergegeben. Man schneidet einen konischen Gummistopfen im Abstand von 3 mm von der kleinen Grundfläche parallel zu dieser mit einem angefeuchteten Messer etwa 4 mm tief ein. Der größere Teil des Stopfens wird durchbohrt, doch darf die Bohrung nicht die kleine Scheibe verletzen. In die Bohrung schiebt man ein kurzes Glasrohr, das über einem Gummistopfen an den zweiten Tubus der Woulffschen Flasche angeschlossen ist. Über den eingeschnittenen Gummistopfen schiebt man ein starkwandiges Reagenzglas mit seitlichem Rohr, das durch einen Druckschlauch mit der Pumpe verbunden ist. Den dritten Tubus der Woulffschen Flasche verbindet man mit dem zu evakuierenden Gefäß.



## 2. Die Kolbenluftpumpe (Abb. 119/2).

Ihre Bauart sowie ihre Wirkungsweise werden als bekannt vorausgesetzt. Die Pumpe ist wegen ihres einfachen Aufbaus und ihrer leicht verständlichen Wirkungsweise in den Grundschulen zu empfehlen. Als besonders wirksam haben sich Pumpen mit Öldichtungen erwiesen, da ihre Wartung einfacher ist als die der gewöhnlichen Kolbenpumpen. Außerdem erreicht man mit ihnen infolge Verringerung des schädlichen Raums ein größeres Vakuum als mit Pumpen ohne Öldichtung, nämlich ein Vakuum von etwa 1 Torr. Schaltet man mehrere Pumpenkolben im gleichen Zylinder hintereinander, so ist das erzeugte Vakuum noch größer.

Beim Absaugen von Luft über Flüssigkeitsoberflächen, insbesondere beim Nachweis der Siedepunktserniedrigung des Wassers durch den verminderten Luftdruck, gelangen stets Wasserdampfteilchen in die Luftpumpe. Nach diesen Versuchen ist dann eine Reinigung der Pumpe notwendig. Man reibt den

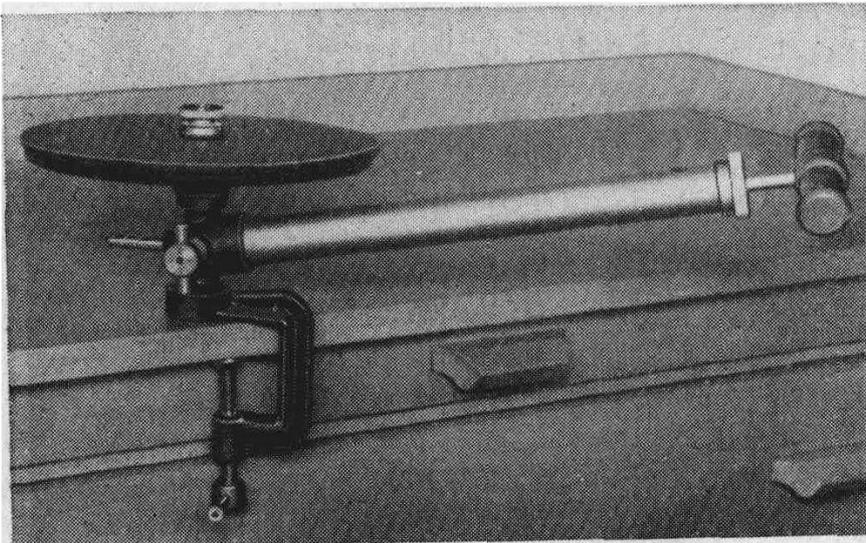


Abb. 119/2. Einfache Schul-Kolbenluftpumpe

Stiefel der Pumpe, Kolben und Hähne mit Fließpapier oder mit einem nicht fasernden Leinwandlappen ab. Dann bestreicht man den Kolben und das Hahnküken mit Hahnfett. Es ist falsch, statt des Kolbens den Zylinder einzufetten, da das Fett durch den Kolben auf den Zylinderboden gedrückt wird. Zum Einfetten verwendet man Ramsayfett, das für Messing- und Stahlteile verwendbar ist. Sein großer Vorteil vor anderen Dichtungsfetten ist der, daß die Hähne der Pumpe selbst bei längerer Nichtbenutzung nicht festbacken. Der Dampfdruck des Fettes ist so niedrig, daß er das Vakuum nicht beeinträchtigt. Man erhält ein brauchbares Hahnfett, indem man hartes, weißes Paraffin mit Vaselineöl in erwärmtem Zustand mischt.

Will man eine unnötige Anstrengung beim Evakuieren mit der Kolbenpumpe vermeiden, so pumpt man am Anfang langsam. Die Dichte der Luft wird durch das Pumpen geringer, ihr Strömungswiderstand nimmt ab.

### 3. Die rotierende Öl- und Kapselluftpumpe (Abb. 120/1)

Das mit diesen Pumpen erreichbare Vakuum beträgt etwa  $10^{-3}$  Torr. Die Pumpen genügen damit allen in der Oberschule an eine Luftpumpe zu stellenden Forderungen und sind für diese Schulen besonders zu empfehlen. Beim Arbeiten mit Ölpumpen ist besonders darauf zu achten, daß diese sehr empfindlich gegen Wasserdämpfe sind. Die Dämpfe kondensieren leicht in Öl und können unter Um-

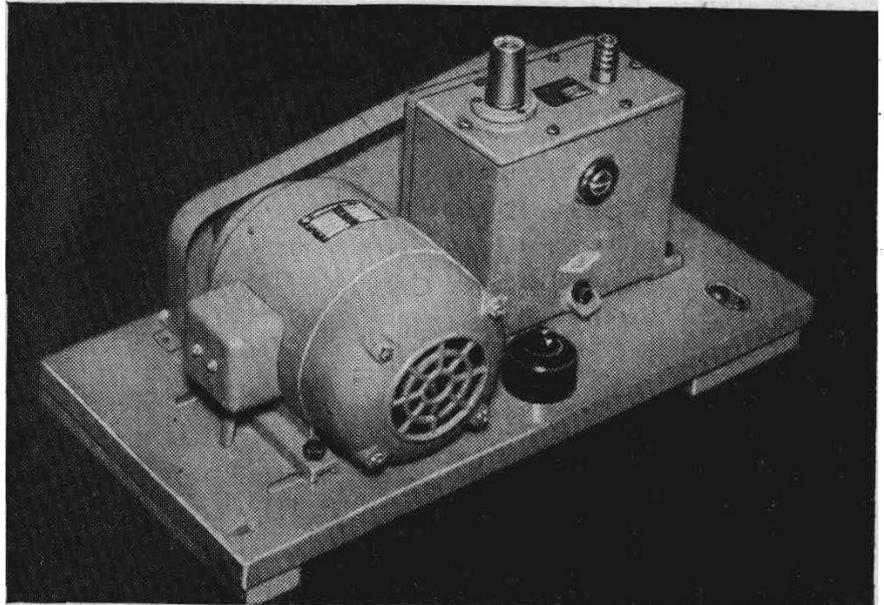


Abb. 120/1. Rotierende Ölluftpumpe

ständen auf die Vakuumseite der Pumpe gelangen und das Vakuum verringern. Diese Pumpen müssen gegen das Eindringen von Wasserdämpfen unbedingt gesichert werden. Vergleiche dazu MB, S. 73!

Die Verbindungsleitung zwischen der Pumpe und dem zu evakuierenden Gefäß muß so kurz wie möglich sein. Bei längeren Leitungen und zum Erzielen höherer Vakua benutzt man Glas- oder Metallröhren, die durch übergeschobene Druckschlauchstücke mit der Pumpe und dem Gefäß verbunden werden. Längere Gummischläuche geben die an den Innenwänden absorbierte Luft ab und verschlechtern dadurch das Vakuum. Die lichten Weiten der Verbindungsleitungen sind nicht zu klein zu wählen, da der Strömungswiderstand der Rohrwandung die Sauggeschwindigkeit stark herabsetzt. Werden in die Verbindungsleitung Absperrhähne eingefügt, so müssen sie weite Bohrungen besitzen.

Werden Geräte mit Schliffverbindungen an die Pumpe angeschlossen, so sind die inneren Teile der Schliffverbindungen dünn mit Fett zu bestreichen. Es darf nur so viel Fett verwendet werden, daß beim Zusammenstecken der geschliffenen Teile noch ein etwa 3 mm breiter fettfreier Streifen am äußeren Rande bestehen

bleibt. Dreht man die Teile einige Male vorsichtig, so muß der Schliff glasklar erscheinen. Zu reichlich gefettete Schriffe zeigen astförmige Figuren im Fett. Die Verbindung ist undicht.

#### *Allgemeines:*

Wird bei den Versuchen ein Luftpumpenteller mit einem Rezipienten verwendet, so sind die Ränder des Rezipienten zum Abdichten mit konsistentem Fett zu bestreichen. Man vermeide ein übermäßiges Fettes, da es zu Undichtigkeiten führt. Das Abheben des Rezipienten vom Teller erfolgt bei gleichem Außen- und Innendruck durch seitliches Verschieben des Rezipienten über den Tellerrand. Entfernt man den Rezipienten vom Teller bei noch bestehendem Unterdruck, so kann eine Beschädigung des Tellers, des Rezipienten und der Pumpe eintreten. Bei Versuchen mit dem Rezipienten verwendet man stets Rezipienten mit möglichst geringem Rauminhalt, damit das notwendige Vakuum in kürzester Zeit erreicht wird. Nach Durchführung der Versuche sind Teller und Rezipient vom Fett zu reinigen.

Zuweilen löst sich die Glasplatte von ihrer metallenen Unterlage. Man erwärmt beide Teile getrennt voneinander, bis der am Metallteller oder an der Glasplatte haftende Kitt flüssig geworden ist, und preßt beide Teile mit einer mit Holz oder starker Pappe unterlegten Schraubzwinde vorsichtig zusammen.

Ist an einer Luftpumpe eine Barometerprobe angebracht, so ist diese oft die Ursache einer Undichtigkeit. Durch festeres Anziehen der über die Barometerprobe gestülpten Glasglocke kann dieser Fehler meist beseitigt werden.

Soll eine Vakuumanlage mit festen Dauerverbindungen aufgestellt werden, so verwendet man zum Abdichten der Verbindungsstücke schwarzen Pizeinkitt. Dieser Kitt wird bei etwa 50° C weich und schmilzt bei 80° C. Statt des Pizeinkitts kann man auch Siegellacke verwenden. Dabei ist der weiße Lack zu bevorzugen, da sich bei seinem Erhärten keine Haarrisse bilden. Will man zwei Verbindungsstücke mit Hilfe des Kittes abdichten, so erwärmt man diese bis über den Schmelzpunkt des Kittes. Das eine Ende einer Kittstange wird über einer Flamme verflüssigt. Man bestreicht die beiden Rohrteile damit und preßt sie fest zusammen. Vergleiche außerdem MB, 5 S. 73!

### 117. Modell einer Kolbenluftpumpe [G]

Lampenzylinder, 2 Gummistopfen (ein Durchmesser ebenso groß wie die lichte Weite des Lampenzylinders, der andere ein wenig größer), ein an einem Ende zu einer Nietkuppe aufgestauchter Metallstab (Ø 4 mm, Länge 360 mm), Bindfaden (Ø etwa 2 mm), Unterlegscheibe zum Stab, T-Rohrstück mit Dreiwegehahn.

Die im folgenden beschriebene Luftpumpe ist in erster Linie als Modell gedacht; man kann sie aber auch bei sehr einfachen Versuchen als Ersatz für eine Stiefelluftpumpe verwenden.

Man benutzt zur Herstellung des Modells einen Lampenzylinder. Ein im Zylinderrohr leicht verschiebbarer Gummistopfen wird mit Hilfe eines Korkbohrers durchbohrt, so daß sich der oben genannte Metallstab mit festem Sitz bis an den Nietkopf hindurchschieben läßt. Vom freien Ende des Stabes her wird bis dicht an den Gummistopfen eine gerade, um den Stab passende Unterlegscheibe vorgetrieben und zur Festlegung ein 5 cm langes, eng anliegendes Schlauchstück bis an die Scheibe über

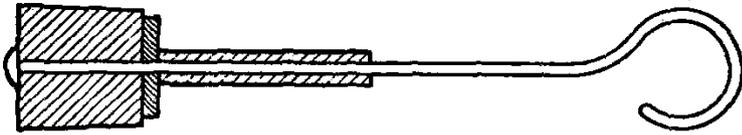


Abb. 122/1. Luftpumpenkolben mit Stiel

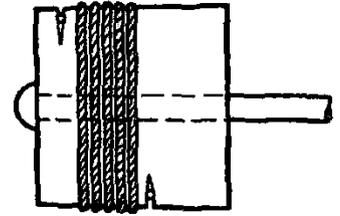


Abb. 122/2. Kolben mit Bindfadendichtung

den Stab gezwängt (Abb. 122/1). Das andere Ende des Stabes wird zu einem Griff umgebogen.

Der so als Kolben hergerichtete Stopfen wird an der Mantelfläche parallel zur größeren Stirnfläche, etwa 3 mm von dieser entfernt, 4 mm tief eingeschnitten. In den Schnitt klemmt man das eine Ende eines dicken Bindfadens und wickelt den Faden fest und eng anliegend ungefähr fünfmal um den Stopfen. Neben der letzten Windung wird ein gleich großer Schnitt wie am Anfang der Wicklung angebracht und das andere Ende des Fadens eingeklemmt (Abb. 122/2). Die Fadendichtung ölt man ein wenig ein und schiebt den Kolben mit dem Stiel voran in den Lampenzylinder. Die Einschnürung des Zylinders am Zylinderfuß verhindert beim Ansaugen der Luft ein Herausziehen des Kolbens aus dem Zylinder.

Das andere Ende des Zylinders wird mit einem durchbohrten Gummistopfen verschlossen. In die Bohrung steckt man den einen Schenkel eines mit einem Dreiwegehahn versehenen T-Rohrstückes (Abb. 122/3). Durch diesen wird der Pumpenzylinder abwechselnd beim Herausziehen des Kolbens mit dem zu evakuierenden Gefäß, beim Hineinstoßen mit der Außenluft verbunden.

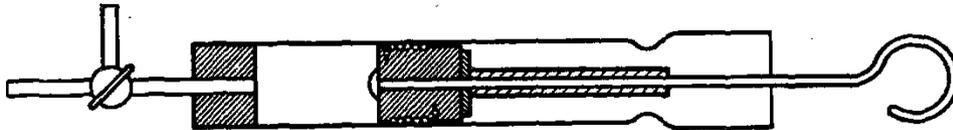


Abb. 122/3. Modell einer Kolbenluftpumpe

#### Bemerkungen:

1. Das Arbeiten mit der Pumpe wird erleichtert, wenn zwei Schüler die Pumpe bedienen. Während der eine den Kolben bewegt, hält der andere die Pumpe fest und betätigt den Dreiwegehahn.
2. Statt des mit einem Dreiwegehahn ausgestatteten T-Rohrstückes kann man auch ein einfaches T-Stück verwenden, über dessen freie Schenkel zwei durch Quetschhähne verschlossene Schlauchstücke geschoben sind. Auch zwei durch einen doppelt durchbohrten Gummistopfen gesteckte Glashähne mit einem gewinkelten Schenkel sind geeignet.

### 118. Modell einer Wasserpumpe — Saug-Hub-Pumpe [G]

Lampenzylinder, Gummistopfen mit Metallstab wie bei V 117, außerdem, 1 Winkelrohr mit Gummischlauch, gerades Glasrohr, gewinkeltes Glasrohr mit gebogenem Schenkel, ein in den Lampenzylinderfuß passender Gummistopfen.

Zum Herstellen der Saug-Hub-Pumpe verwendet man den gleichen Lampenzylinder und den gleichen Metallstab wie bei der Anfertigung der Luftpumpe. Als Kolben wird ein im Zylinder leicht verschiebbarer durchbohrter Gummistopfen verwendet. Mit Hilfe einer Rasierklinge und eines Korkbohrers arbeitet man in den Kolben das Kolbenventil nach Abb. 123/1 ein.

Man schneidet den durchbohrten Stopfen parallel zur Stirnfläche, etwa 3 mm von dieser abgesetzt, mit einer Rasierklinge zur Hälfte ein. In den Schnitt schiebt man ein dünnes Holzbrettchen und bohrt mit dem Korkbohrer aus dem Stopfen die Ventilbohrung aus. Das durch das Brettchen getrennte Gummistück dient als Ventilklappe. Damit die Ventilklappe bei der Kolbenbewegung nicht an der Zylinderwand reibt und dadurch am Schließen und Öffnen des Ventils gehindert wird, werden die Seitenflächen nach Abb. 123/1 frei geschnitten. Man schiebt den Kolben straff über den Metallstab, bis die Endkuppe an der schmalen Stirnfläche anliegt. Die Mantelfläche des Kolbens wird an der breiten Stirnfläche etwas abgeschragt.

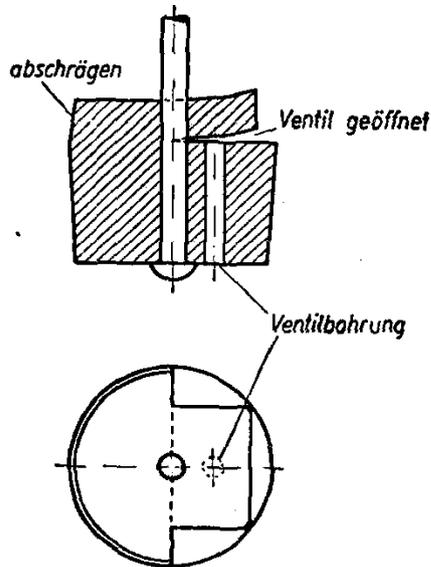
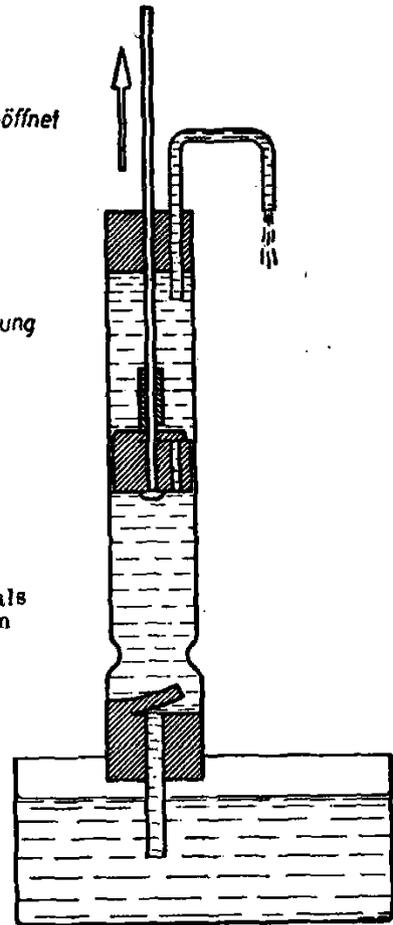


Abb. 123/1. Gummistopfen als Kolben mit eingearbeitetem Kolbenventil

Abb. 123/2. Saug-Hub-Pumpe



Über den Stab zwingt man noch wie bei V 117 ein 2 cm langes enges Schlauchstück, das dem Kolben einen zusätzlichen Halt geben und seine Verschiebung im Zylinder begrenzen soll. Der Kolben wird umgekehrt wie bei der Luftpumpe in den Zylinder geschoben.

Als Bodenventil verwendet man einen großen Gummistopfen, den man in gleicher Weise wie den Kolben mit einer Ventilklappe versieht. Die Ventilbohrung wird aber in der Mitte des Stopfens angebracht und in die Bohrung ein etwa 10 cm langes Glasrohr als Saugrohr geschoben. Die Seitenflächen der Ventilklappe werden ebenfalls freigeschnitten. Als oberen Zylinderverschluß verwendet man einen Gummistopfen mit einer mittleren und einer seitlichen Bohrung. Durch die mittlere Bohrung schiebt man den Kolbenstiel, der in der Bohrung leicht und ohne Behinderung verschiebbar sein muß. In die seitliche Bohrung steckt man ein Winkelrohr, das nicht mehr als 1 cm in den Zylinder hineinreichen darf und dessen freier Schenkel nach unten umgebogen ist (Abb. 123/2).

### 119. Abhängigkeit des Luftdrucks in einer Flasche von der Saugzeit der Luftpumpe [O — Ü]

Ölluftpumpe mit Antriebsmotor oder Wasserstrahlpumpe, große Flasche (4 l), doppelt durchbohrter Gummistopfen, gewinkeltes Glasrohr ( $\varnothing$  3 mm), U-förmig gebogenes Glasrohr ( $\varnothing$  3 mm, langer Schenkel 900 mm), Quecksilber, Vakuumschlauch, kleine Glasschale, Quecksilberbrett, Meterstab, Stativ mit Muffe und Klemme, Stoppuhr, dünne Schnur.

*Versuchsanordnung:*

Man verschließt eine große Flasche mit einem doppelt durchbohrten Gummistopfen. Durch diesen steckt man ein kurzes gewinkeltes Rohr, das mit einer kontinuierlich wirkenden Luftpumpe verbunden wird. Ferner schließt man an die Flasche ein U-förmig gebogenes Rohr an, dessen langer Schenkel in ein Schälchen mit Quecksilber taucht (Abb. 124/1). Damit man dicht neben den langen Schenkel einen Meterstab stellen kann, ist das Rohr nahe seinem unteren Ende etwas gekrümmt.

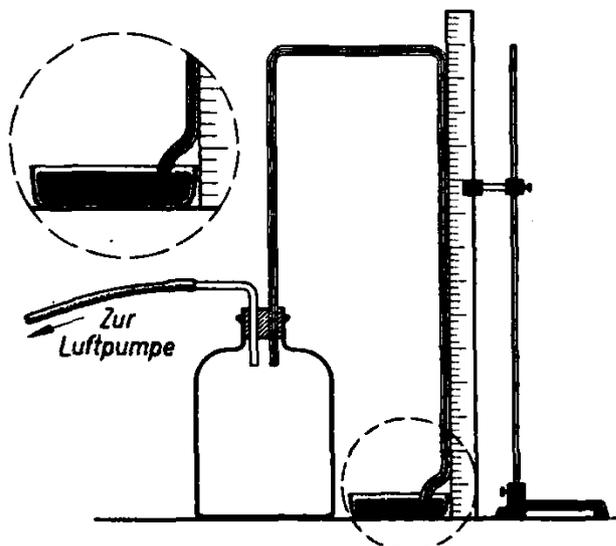


Abb. 124/1. Flasche mit offenem Manometer zum Nachweis der Abhängigkeit des Luftdrucks von der Saugzeit der Luftpumpe

*Versuch:*

Man schaltet den Motor der Ölluftpumpe ein und regelt ihn auf eine konstante Drehzahl. In Zwischenräumen von je 10 s wird der Stand der Quecksilbersäule festgestellt. Der Druck  $p$  der in der Flasche befindlichen Luft ist gleich der Differenz aus dem atmosphärischen Luftdruck  $p_1$  und dem vom Manometer angezeigten Druck  $p_2$ . Beide Werte werden in mm Hg oder Torr angegeben. Die beigefügte Tabelle und das dazugehörige Diagramm (Abb. 125/1) geben ein Beispiel für eine solche Versuchsreihe.

*Abhängigkeit des Druckes in einer Flasche von der Saugzeit  
(Beispiel für eine Meßreihe)*

Atmosphärischer Luftdruck  $p_1 = 707$  Torr

Zeitabstand der einzelnen Messungen ( $t$ ) s	Vom Manometer angezeigter Druck ( $p_2$ ) Torr	Druck in der Flasche ( $p = p_1 - p_2$ )
10	325	382
20	454	253
30	546	161
40	595	112
50	633	74
60	656	51
70	671	36
80	685	22
90	690	17
100	694	13
110	697	10
120	699	8
130	701	6
140	701	6
150	701	6
160	701	6

Nach etwa 130 s ist kein weiteres Absinken des Luftdruckes in der Flasche zu beobachten, obwohl die Pumpe ein viel tieferes Vakuum erzeugen kann. Daß das Grenzvakuum so hoch liegt, ist auf undichte Stellen der Versuchsanordnung zurückzuführen.

*Bemerkungen:*

1. Statt mit einer Ölluftpumpe kann der Versuch auch mit einer Wasserstrahlpumpe durchgeführt werden. Dabei empfiehlt es sich, eine Pumpe mit Rückschlagventil zu verwenden oder eine Sicherheitsflasche zwischen Pumpe und Rezipient einzufügen. Dadurch wird ein Einströmen des Wassers in die zu evakuierende Flasche vermieden.

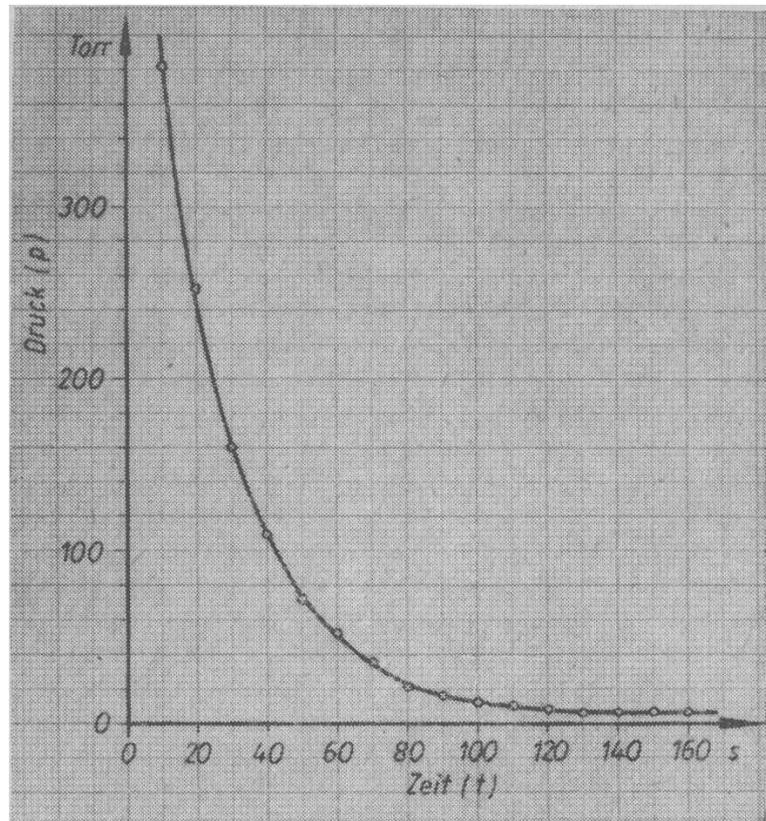


Abb. 125/1.  $p$ - $t$ -Diagramm für das Evakuieren einer Flasche

2. Führt man den Versuch mit einer Kolbenluftpumpe durch, so mißt man nicht die beim Pumpen verfließende Zeit, sondern die Zahl der Kolbenhübe.

## Sachverzeichnis

- Aneroidbarometer 71 u. f., 97 u. f.  
Aräometer 62 u. f.  
Archimedisches Prinzip 9, 57  
Atmosphäre, physikalische 6  
—, technische 6  
Aufdruck 7, 52  
Auftrieb 9, 47 u. ff.
- Barometer 71  
Barometerprobe 94  
Behnsches Rohr 95  
Blasensprenger 75 u. f.  
Bodendruck 7, 9, 38  
Bodendruckgeräte 8 u. f.  
Bodendruckgerät nach Haldat 34  
Bodendruckgesetze 9  
Bodendruckkraft 33 u. ff., 43  
Bourdonsche Röhre 98  
Boylesches Gesetz 72, 101 u. ff.
- Dasymeter 73, 109 u. f.  
Dichte 10, 43  
Dichtezahl 43  
Dosenbarometer 71, 96 u. f.  
Dosenlibelle 20  
Drachenblut 5  
Druck 6, 72  
Drucksonde 7, 30 u. ff., 44  
Druckübertragung 21 u. ff.  
Druckübertragungsgerät 26 u. f.  
Energiedichte 72
- Farbstoffe 5  
Fluoreszein 5  
Flüssigkeitsmodell 13  
Freistrahlturbine 11, 66  
Fuchsin 5
- Gefäßbarometer 44  
Gießkanne 17  
Giftheber 87  
Guericke-Versuch 90
- Heberbarometer 44, 71  
Heronsball 79 u. f.
- Huygenssches Kontrabarometer 91  
Hydraulische Presse 28  
Hydrostatischer Druck 6 u. ff.  
Hydrostatisches Paradoxon 8 u. f., 36  
Hydrostatische Waage 9, 49, 52
- Innendruck 58
- Kaltwasserschwimmer 59  
Kanalwaage 18 u. f.  
Kaplanturbine 68  
Kapselluftpumpe 73, 120  
Kartesianischer Taucher 57 u. f.  
Kontrabarometer 71, 91  
Kolbendruck 7  
Kolbenluftpumpe 73, 119 u. ff.  
Kolbenprober 26
- Luftdruck 71, 74 u. ff., 89, 92, 94, 97  
Luftpumpe 73, 118
- Manometer 9, 71, 104  
—, offenes 98  
—, geschlossenes 99  
Meldesche Röhre 92, 101  
Membranmanometer 98  
Methylenblau 5  
Mikromanometer 100  
Mohrsche Waage 54 u. ff.  
Montgolfiere 114 u. ff.
- Oberfläche (einer Flüssigkeit) 7, 11 u. ff. 15 u. f.  
Ölluftpumpe 73, 120
- Pascalsche Waage 8, 33  
Peltonturbine 11, 66  
Phenolphthalein 5  
Pipette 77  
Propellerturbine 68
- Reaktionsturbine 11  
Röhrenlibelle 19 u. f.  
Röhrenpipette 77
- Saugheber 70, 82 u. ff., 88  
Saug-Hub-Pumpe 74, 122 u. f.  
Schaufelradturbine 66

- Schlauchwaage 17 u. f.  
 Schweben 56, 62  
 Schwebeverfahren (bei Wichtebestimmung)  
 61  
 Schweredruck 5, 7, 30, 33, 72, 74, 77  
 Schwimmen 56, 60  
 Schwimmfähigkeit 56  
 Seifenlösungen 117  
 Seitendruck 7, 52  
 Seitendruckkraft 38 u. f.  
 Selbstanlaufender Heber 86  
 Spannkraft (bei Luft) 70, 79 u. ff.  
 Springbrunnen 40 u. f.  
 Stationsbarometer 71  
 Stechheber 77  
 Torricelli-Rohr 88 u. f., 91 u. f.  
 Torricelli-Versuch 71  
 Turbinenmodell 10
- Variometer 94 u. f.  
 Ventilheber 88  
 Verbundene Gefäße 5, 14 u. ff., 39, 41  
 Verkürztes Barometer 93  
 Vollpipette 77  
 Wanddruck 6 u. f.  
 Wasserbarometer 90  
 Wasserkraftmaschinen 10  
 Wasserpumpe 74, 122  
 Wasserrad, unterschlächtiges 10, 65 u. f.  
 —, oberschlächtiges 10, 64 u. f.  
 Wasserstandsanzeiger 16 u. f.  
 Wasserstrahlpumpe 73, 118 u. f.  
 Wichte 8, 10, 42 u. ff., 52 u. ff., 61, 63, 110  
 Wichtebestimmung 43, 110  
 Wichtezahl 43, 46, 53, 63  
 Zusammendrückbarkeit des Wassers 14

#### Quellenverzeichnis der Abbildungen

Wolf Mucke, Leipzig: Abbildungen 11/1, 11/2, 33/1, 34/1, 118/1, 119/2, 120/1.