

Christian Ucke/Wolfgang Detsch

Freihandversuche mit Einmalspritzen, -schläuchen und -kanülen

Mit Einmalartikeln (Spritzen, Schläuchen, Kanülen, Hähnen) aus dem medizinischen Bereich lassen sich viele physikalische Versuche einfach und billig durchführen. Dabei geht es meist weniger um Präzisionsversuche als vielmehr darum, daß Schüler und Studenten auch selbst experimentieren können. Die machbaren Versuche beziehen sich hauptsächlich auf die Mechanik und Wärmelehre. Beschrieben werden u.a. Versuche zum Boyle-Mariotteschen-Gesetz, Volumenausdehnung von Gasen, Siedepunktserniedrigung, Hydraulische Presse, Dichtebestimmung, Oberflächenspannung, Viskosität.

Einmalspritzen sind billige und relativ leicht erhältliche Experimentiergeräte [1]. Die mit ihnen möglichen Versuche beziehen sich primär auf die Mechanik und Wärmelehre. Es sind darunter Versuche mehr spielerischer, qualitativer Natur, aber auch solche quantitativer Art mit Meßunsicherheiten bis über 100%. Sehr genaue quantitative Versuche sind praktisch nicht möglich, da die Reibung zwischen Kolben und Spritze doch beträchtlich behindert. Einige Versuche eignen sich direkt als physikalische Schülerübungen bzw. für physikalische Praktika in Hochschulen.

Die folgenden Versuche stellen eine kleine Auswahl aus dem Spektrum möglicher Anwendungen dar. Weitere Anwendungen finden sich in der Literatur [7].

Einige technische Hinweise

Einmalspritzen gibt es in vielen verschiedenen Größen; für physikalische Experimente eignen sich vor allem 10 ml-, 20 ml- und 50 ml-Spritzen.

Die Spritzen haben endseitig verschiedene Ansätze, Luer-, Luer-Lok-, bzw. Rekord-Ansätze; Luer-Ansätze sind steckbar, Luer-Lok sind schraubbar, Rekord-Ansätze sind ebenfalls steckbar, aber heute veraltet. Bei den meisten Versuchen sind Schraubfassungen wegen ihrer größeren Haltbarkeit zu bevorzugen.

Die Maßeinteilung von Spritzen mit aufgedruckter Skala ist im warmen Wasser bzw. in den Schweißhänden von Schülern nicht besonders abriebfest. Es gibt aber auch Spritzen mit eingravierter Maßeinteilung. Die Kunststoffspritzen aus Polypropylen oder Polyethylen halten üblicherweise Temperaturen bis zum Siedepunkt von Wasser ohne Verformung aus.

Für physikalische Experimente empfehlen sich ferner wegen ihrer geringeren Reibung Spritzstempel mit Gummilippen vorne. Jedoch unterscheiden sich auch hier noch Spritzen von verschiedenen Herstellern in ihrem Reibungsverhalten beträchtlich. Einreiben der Gummilippen mit Vaseline bzw. Silikonöl kann die Reibung manchmal vermindern.

Mit Infusionsschläuchen von 0,5 m bis 2 m Länge kann man Spritzen unter Zwischenschaltung eines Dreiwegehahnes miteinander verbinden; diese Schläuche haben endseitig Luer- bzw. Luer-Lok-Ansätze. Kanülen schließlich gibt es in außerordentlich vielfältigen Ausführungen. Auf den Aufreißpackungen ist normalerweise der Außendurchmesser und die Länge der aus dem Ansatz herausstehenden Kanüle vermerkt. Für physikalische Experimente eignen sich vor allem Kanülen mit Durchmessern von etwa 0,4 mm bis 1,0 mm und Längen von 20 mm bis 100 mm. Vorsicht beim Umgang: Normale Kanülen sind bestimmungsgemäß sehr spitz.

Wer sich genauer über technische Einzelheiten informieren möchte, sei auf die DIN-Normen [2] hingewiesen, die Qualitätsanforderungen und gewisse Standards enthalten.

Zur Durchführung der meisten hier beschriebenen Experimente benötigt man je eine Spritze 50 ml und 10 ml, einen Infusionsschlauch 1 m und einen Dreiwegehahn, der sich auch als Verschlußstopfen verwenden läßt. Die Artikel befinden sich normalerweise in sterilisierten Aufreißpackungen.

1. Boyle-Mariottesches Gesetz inklusive Luftdruck

Man stellt den Kolben einer 50 ml-Spritze auf etwa 45 ml ein und verschließt die Spritze am Ende mit Hilfe eines Dreiwegehahnes. Dreiwegehähne sind hinreichend gasdicht, wovon man sich allerdings bei jedem Experiment überzeugen sollte. Sodann belastet man den Stempel der senkrecht gestellten Spritze mit verschiedenen Massenstücken und liest die zugehörigen Volumina ab. Der herrschende Druck ist der Quotient aus der Gewichtskraft der Massenstücke und der Querschnittsfläche des Stempels. Die Querschnittsfläche ergibt sich als Quotient aus Volumen und Länge.

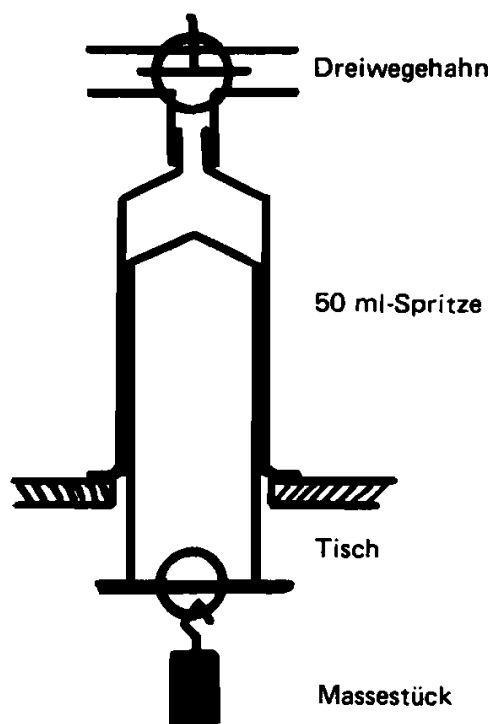


Abb. 1 Aufbau zum Versuch Boyle-Mariottesches Gesetz

Durch Anhängen der Massestücke an den Stempel kann das Boyle-Mariottesche Gesetz auch für Unterdruck gezeigt werden, was in der Durchführung des Experiments leichter zu realisieren ist. Der Spritzkolben wird endseitig symmetrisch durchgebohrt und mit einer Schlaufe versehen, in die man die Massestücke einhängt.

Bei mechanischen Versuchen dieser Art läßt sich die Genauigkeit erheblich steigern, indem man bei angehängtem Gewicht einmal den Kolben nach oben drückt, losläßt und auf den Gleichgewichtszustand zugleiten läßt, zum anderen den Kolben etwas nach unten auszieht und ihn sich nach oben gleitend einstellen läßt. Der Mittelwert aus den beiden Volumeneinstellungen stellt einen besseren Näherungswert an das Idealvolumen dar, als nur ein abgelesener Wert. Zugleich erhält man einen Hinweis auf die Größe der Reibung aus der Differenz beider Grenzvolumina; diese Differenz bezeichnet man als Spanne.

Das Zubehör zu diesem Versuch kann für etwa DM 15,— komplett bezogen werden (Anschrift wie bei [3]).

Experimentell ergaben sich mit einer 50 ml-Spritze durch Anhängen von Massestücken folgende Werte. Die Eigenmasse des Spritzenkolbens beträgt 25 g und ist hier vernachläss-

sigt. V_1 und V_2 stellen die beiden Grenzvolumina dar, die nach der oben beschriebenen Technik ermittelt wurden. V ist der Mittelwert.

m (kg)	0	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
V_1 (ml)	9,5	11,0	12,0	14,5	15,2	17,5	20,5	26,5	33,5
V_2 (ml)	10,5	13,0	14,6	16,7	19,2	22,7	28,0	36,5	48,9
V (ml)	10,0	12,0	13,3	15,6	17,2	20,1	24,3	31,5	41,2

Rechnet man den Unterdruck p_u aus (Querschnittsfläche Kolben = $6,1 \text{ cm}^2$) und trägt ihn gegen den Kehrwert des Volumens V auf, ergibt sich folgende Zeichnung:

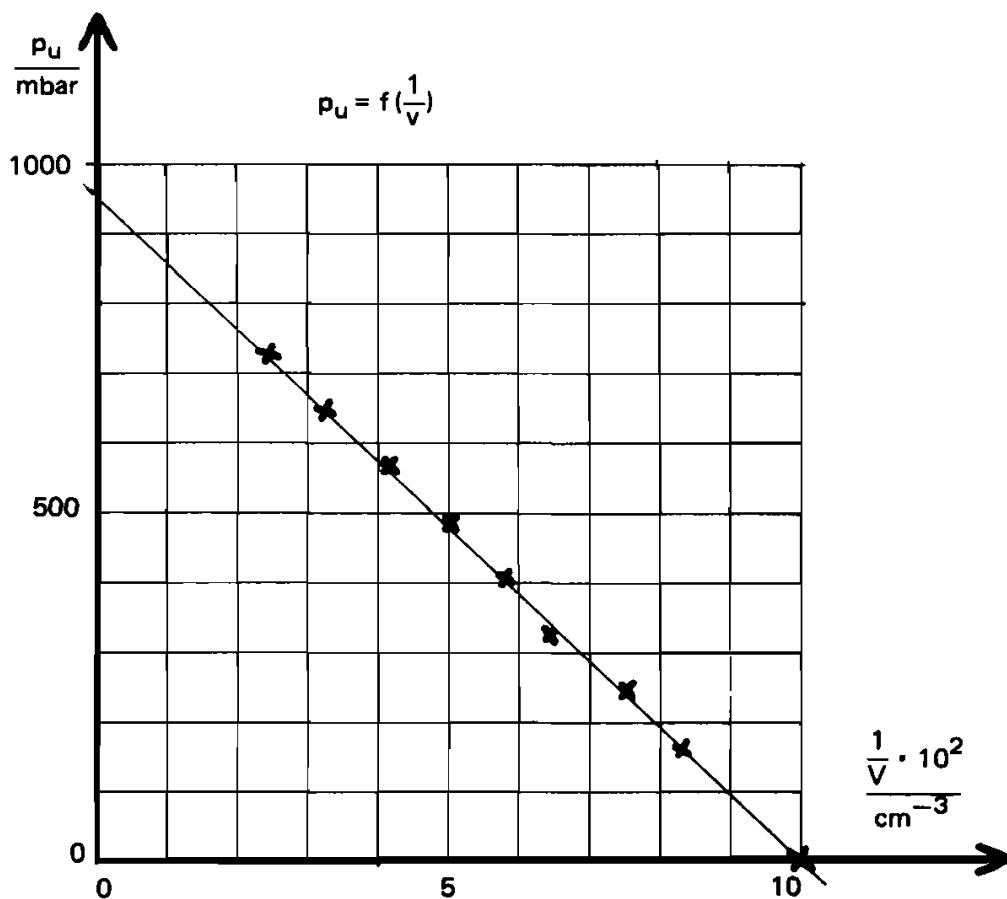


Abb. 2 Der in der Spritze durch Anhängen von Massenstücken erreichte Unterdruck als Funktion des Kehrwerts des Volumens.

Die Meßwerte liegen trotz erheblicher Reibung ausgezeichnet auf einer Geraden, wie es gemäß dem Boyle-Mariotteschen Gesetz sein sollte.

Der Schnittpunkt der Geraden mit der Ordinate (950 mbar) muß dem gerade herrschenden Luftdruck entsprechen. Auf einem – für die entsprechende Höhe korrigierten – Barometer war zur gleichen Zeit 965 mbar abzulesen. So gut fällt der Vergleich aber nicht immer aus.

2. Volumenausdehnung von Gasen

Bei Raumtemperatur wird ein bestimmtes Gasvolumen in einer Spritze mit einem Dreiwegehahn gasdicht eingeschlossen. Im Wasserbad wird die Temperatur des Gases erhöht, dadurch wird der Stempel aus der Spritze herausgedrückt. Das Gas nimmt ein größeres Volumen ein, das wiederum bestimmt wird. Aus Anfangsvolumen, Volumenunterschied und Temperaturdifferenz kann der Ausdehnungskoeffizient für das Gas bestimmt werden. Bei einem Experiment mit einer 50 ml-Spritze wurden 38,5 ml (Spanne 5 ml) Luft von 19 °C auf 45 °C erwärmt, das Volumen des eingeschlossenen Gases erhöhte sich auf 42 ml (Spanne 5 ml). Daraus errechnet sich ein Ausdehnungskoeffizient von $1/281 \text{ }^\circ\text{C}$ (Tabellenwert: $1/273 \text{ }^\circ\text{C}$).

Mit einer 50 ml-Spritze, einem Dreiwegehahn und einem Infusionsschlauch 1 m läßt sich ein Gasthermometer realisieren. Die Spritze wird in ein Becherglas ganz eingetaucht, der Schlauch wird U-förmig gebogen und im einfachsten Fall mit Wasser gefüllt. Beim Erwärmen läßt sich die Differenz der Wasserstände im U-förmigen Teil mit Hilfe eines Thermometers eichen.

Der Kolben der Spritze muß hier fixiert werden (z.B. mit einem durch Spritze und Kolben gesteckten Nagel).

3. Anomalie des Wassers

Eine Spritze wird teilweise mit Wasser gefüllt und mit einem Dreiwegehahn verschlossen. Das Wasservolumen wird abgemessen und die Spritze in das Gefrierfach eines Kühlschranks gestellt. An der Maßeinteilung kann abgelesen werden, daß das Eis ein größeres Volumen einnimmt als zuvor das Wasser.

In einer 10 ml-Spritze dehnten sich 8,2 ml Wasser in gefrorenem Zustand auf 8,7 ml aus, woraus sich eine Dichte von $0,94 \text{ cm}^3$ errechnet (Literaturwert $0,92 \text{ cm}^3$).

4. Siedepunktserniedrigung

Füllt man ca. 5 ml schon warmes Wasser möglichst ohne Luft in eine 50 ml Spritze und verschließt sie am Ende, so kann man beim vorsichtigen Herausziehen des Kolbens beobachten, wie das Wasser anfängt zu Sieden (Blasenbildung).

Nicht direkt hierher gehören zwei ähnliche Experimente. Füllt man schales Bier in eine Spritze, die dann verschlossen wird, so ergibt sich bei Druckerniedrigung durch Herausziehen des Kolbens ein letztes Aufschäumen. Gibt man ein kleines Stück eines Marshmallows in eine verschlossene Spritze, dann wird das Marshmallow beim Herausziehen des Kolbens durch Druckerniedrigung von inneren Gaseinschlüssen aufgeblasen.

5. Seifenblasen

An einen Dreiwegehahn schließt man zwei Schlauchstücke und eine Spritze an. Die freien Enden der Schläuche taucht man in eine geeignete Lösung (z.B. Spülmittel, Glycerin und Wasser im Verhältnis 1:3:3). Nach dem Herausnehmen sind die Schläuche durch Seifenhäute verschlossen. Der Dreiwegehahn gestattet es, zwei Blasen unterschiedlicher Größe

getrennt aufzublasen. Öffnet man die Verbindung zwischen beiden Seifenblasen, dann verschwindet die kleinere Blase und das Volumen der größeren nimmt zu. Der Druck in der kleineren Blase ist also höher als der Druck in der größeren. Es bedarf allerdings einiger Geduld, um dieses Experiment zu verwirklichen.

6. Hydraulische Presse

Man verbindet eine 10 ml- und eine 50 ml-Spritze über einen Dreiwegehahn und einen Infusionsschlauch miteinander und füllt die Spritzen blasenfrei mit Wasser. Man kann aber auch Luft als kompressibles Arbeitsmedium nehmen.

Der schwächste Schüler mit der 10 ml-Spritze „besiegt“ mit Leichtigkeit den stärkeren Schüler beim Drücken, da der Flächenunterschied der Spritzenkolben etwa vier beträgt. Quantitativ ist dieser Versuch – etwa durch Anhängen von Gewichten – wegen der Reibung nicht besonders befriedigend vorzuführen.

Die technische Ausführung einer hydraulischen Pumpe kann nachgebildet werden, wenn man mit einer Spritze durch verschiedene Stellungen am Dreiwegehahn Arbeitsmedium aus einem Vorratsbehälter aufsaugt, und dann in einen anderen Vorratsbehälter hineinpumpt.

7. Dichtebestimmung

7.1. Statisches Verfahren

Benötigt werden eine 50 ml-Spritze, ein Dreiwegehahn als Verschlussstopfen, ein Nagel sowie eine empfindliche Waage, mit der Massen mindestens auf 1/100 g genau bestimmt werden können.

Zuerst bohrt man durch den Kolben der Spritze ein Loch, so daß der herausgezogene Kolben bei einem bestimmten Volumen mit Hilfe eines durchgesteckten Nagels fixiert werden kann.

Man wiegt die Spritze, Dreiwegehahn und Nagel. Man drückt den Kolben ganz in die Spitze und verschließt sie mit dem Dreiwegehahn. Dann zieht man den Kolben gegen den Luftdruck heraus und fixiert ihn mit dem Nagel. Es ist ein luftleerer Raum entstanden, dessen Volumen abgelesen werden kann. Es folgt eine zweite Massenbestimmung und die Berechnung der Luftdichte. Auch hier sollte man die Dichtigkeit der Spritze bzw. des Dreiwegehahnes unbedingt prüfen, indem man am Ende des Versuchs den Nagel wieder herauszieht und feststellt, ob der Kolben wieder auf den Ausgangswert zurückgeht.

Im Versuch ergab sich die Masse 46,114 g für die luftleere und 46,054 g für die luftgefüllte Spritze. Das Volumen betrug 49 ml. Das ergibt eine Dichte von $0,00122 \text{ g/cm}^3$ (Tabellewert $0,00129 \text{ g/cm}^3$).

7.2. Dynamisches Verfahren

Die Größenordnung der Dichte von Gasen kann mit einer einfachen kinematischen Methode bestimmt werden (Ableitung z.B. in [5]). Drückt man ein Volumen V mit einem

Druckunterschied Δp in der Zeit t durch einen Querschnitt der Fläche A , so ergibt sich für die Dichte ρ :

$$\rho = \frac{2 \cdot \Delta p \cdot A^2 \cdot t^2}{V^2}$$

Bei einer 50 ml-Spritze mit einer Kanüle mit einem Außendurchmesser von 0,4 mm (der Innendurchmesser ist ca. halb so groß) konnte man mit voller Kraft 50 ml Luft in 7 s herausdrücken. Den dabei angewendeten Druckunterschied p kann man aus einer Messung mit einer am Ende verschlossenen Spritze gemäß dem Boyle-Mariotteschen Gesetz näherungsweise ermitteln. Bei endseitig verschlossener Spritze kann man das Volumen durch kräftiges Drücken halbieren; daraus ergibt sich etwa $\Delta p = 1000$ mbar.

Setzt man diese Zahlenwerte in die Formel ein, folgt für die Dichte von Luft $\rho = 0,0039$ g/cm³. Das ist zugegebenermaßen kein besonders realistischer Wert, was nicht nur daran liegt, daß eine Reihe von Meßwerten doch nur ziemlich ungenau ermittelt werden können, sondern auch daran, daß obige Formel eigentlich nicht mehr gültig ist. Rechnet man nämlich die Geschwindigkeit aus, mit der die Luft durch die Kanüle gedrückt wird, erhält man ca. 230 m/s. Üblicherweise reicht der Gültigkeitsbereich obiger Formel aber nur bis zu 1/10 bis 1/7 der Schallgeschwindigkeit.

8. Schwimmen, Schweben, Tauchen

In eine Spritze wird etwas Bleischrot, Muttern o.a. gefüllt. Von der Stellung des Kolbens hängt das von der Spritze beim Eintauchen verdrängte Volumen ab. Die Spritze muß nicht verschlossen werden, es entweicht keine Luft.

Wird der Kolben möglichst weit hineingedrückt, dann ist das verdrängte Volumen klein, die Spritze sinkt auf den Boden eines Wasserbehälters. Wird der Kolben in Luft weit genug herausgezogen, so schwimmt die Spritze. Bei einer bestimmten Stellung wird Schweben der Spritze in Wasser erreicht.

An einer Spritze im Schwebezustand wird der Kolben wieder etwas herausgezogen, die Spritze schwimmt dann. Die Spritze wird in ein Glas gegeben, das luftdicht verschlossen werden kann. Z.B. ein Konservenglas mit großem Deckel (10 cm Durchmesser), oder ein Einmachglas, das mit einem Stück Plastiktüte, oder Gummihaut abgedeckt und mit Draht gesichert wird. Das Glas wird vollständig mit Wasser gefüllt und verschlossen. Drückt man auf den Deckel, dann sieht man, wie Wasser in die Spritze eindringt und die Spritze absinkt. Die Wirkungsweise eines Cartesischen Tauchers ist gut zu beobachten.

Eine mit Bleischrot teilweise gefüllte Spritze kann man nach entsprechender Eichung als Senkspindel (Aräometer) zur Dichtebestimmung von Flüssigkeiten verwenden.

9. Oberflächenspannung

Die Oberflächenspannung von Flüssigkeiten läßt sich nach dem Prinzip des Stalagmometers, d.h. Tropfapparat, bestimmen. Man schleift eine Kanüle (ca. 0,5 bis 0,7 mm Außendurchmesser) an der Spitze (z.B. mit der Heimwerkerschleifscheibe) ab und entgratet die Öffnung mit einem kleinen Bohrer.

Ist d der Durchmesser der Kanüle, ρ die Dichte der Flüssigkeit und V das Volumen eines Tropfens, so gilt:

$$\sigma = \frac{\rho \cdot V \cdot g}{\pi \cdot d} \quad \text{mit: } g = 10 \text{ ms}^{-2} .$$

Meßtechnisch ist es günstig, 10 oder mehr Tropfen heraustropfen zu lassen und aus deren Gesamtvolumen das Volumen eines Tropfens zu ermitteln.

Mit diesem Versuch kann die Eigenschaft von Spülmitteln, das Wasser zu „entspannen“, sowohl qualitativ als auch quantitativ überzeugend demonstriert werden.

Mit einer Kanüle mit einem Außendurchmesser von 0,7 mm ergaben sich mit Wasser z.B. 83 Tropfen bei einem Volumen von 1 cm^3 (Temperatur 24°C). Daraus ergibt sich eine Oberflächenspannung von $0,054 \text{ Nm}^{-1}$ (Literaturwert $0,072 \text{ Nm}^{-1}$). Mit 2 Tropfen Pril auf 10 cm^3 Wasser ergab sich eine Halbierung der Oberflächenspannung. Man hat dann Schwierigkeiten, die Tropfen zu zählen.

10. Viskosität

Die Viskosität von Flüssigkeiten und Gasen läßt sich gemäß dem Hagen-Poiseuilleschen Gesetz näherungsweise bestimmen.

Drückt man ein Volumen V mit einem Druckunterschied Δp in der Zeit t durch eine Kanüle der Länge l und dem Innenradius r so gilt:

$$\eta = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot \Delta p \cdot t}{8 \cdot l \cdot V} .$$

Bei kleinen Kanülen bis ca. 0,6 mm Außendurchmesser kann man den Innenradius meist in einem Viertel des Außendurchmessers hinreichend genau ansetzen. Den Druckunterschied Δp ermittelt man wie vorher beschrieben gemäß dem Boyle-Mariotteschen Gesetz. Die anderen in der Formel vorkommenden Größen sind leicht zu ermitteln bzw. zu messen.

Zahlenmäßig kann folgendes Beispiel angeführt werden: Mit einer 50 ml-Spritze drücke ich mit voller Kraft 5 ml Wasser von etwa 20°C in 20 s durch eine 20 mm lange Kanüle mit einem Außendurchmesser von 0,4 mm. Für den Druckunterschied Δp ergibt sich gemäß dem Boyle-Mariotteschen Gesetz etwa $\Delta p = 1000 \text{ mbar}$ (vgl. Punkt 7.2). Damit ergibt sich für die Zähigkeit von Wasser bei einem Überschlagsversuch $\eta = 0,8 \text{ mPas}$ (Literaturwert 1 mPas).

Die Berechnung der Reynoldsschen Zahl ergibt im vorliegenden Fall laminare Strömung, so daß die Anwendung des Hagen-Poiseuilleschen Gesetzes gerechtfertigt ist.

Schon mit diesem sehr groben Überschlagsversuch läßt sich die Temperaturabhängigkeit der Viskosität deutlich nachweisen, indem man nur warmes Wasser in die Spritze füllt.

Erstaunlicherweise funktioniert dieses Experiment auch mit Luft noch passabel, obwohl das Hagen-Poiseuillesche Gesetz nicht für kompressible Medien gilt und darüberhinaus eine Berechnung ergibt, daß die Luft annähernd mit Schallgeschwindigkeit durch die Kanüle gepreßt wird (Reynoldssche Zahl größer als 2000; vgl. Versuch 7.2).

Die Kirchhoffschen Gesetze der Hintereinander- und Parallelschaltung von Kapillaren lassen sich mit einem etwas vergrößerten Aufwand ebenfalls bestätigen. Ein derartiger

Versuch ist an der Technischen Universität München in einem physikalischen Anfängerpraktikum realisiert [4].

11. Oszillator

Am Ende sei auf einen merkwürdigen Oszillator hingewiesen, der sich z.B. mit einer 10 ml-Spritze, einen Dreivegehahn mit durchgehender Bohrung und einer Kanüle mit einem Innendurchmesser größer als 1 mm durchführen läßt [6].

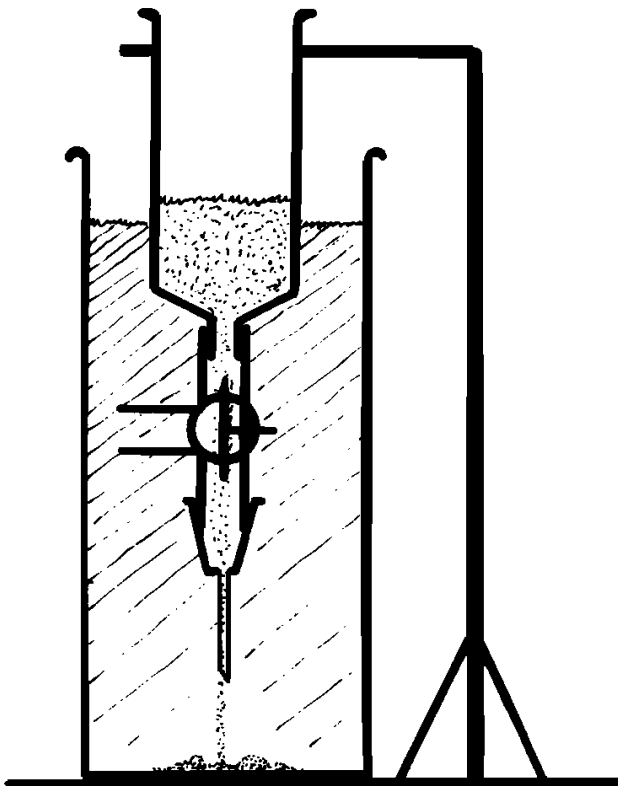


Abb. 3 Aufbau zum Versuch Oszillator

Aus der Spritze entfernt man den Kolben. Bei verschlossenem Dreivegehahn füllt man eine gesättigte und gefärbte Salzlösung in die Spritze ein. Dann taucht man die Spritze so in ein mit normalen Wasser gefülltes, hohes Becherglas ein, daß der Pegel der Salzlösung in der Spritze gerade über dem Wasserspiegel im Becherglas liegt.

Öffnet man jetzt den Dreivegehahn, so fließt die Salzlösung aufgrund ihres höheren Pegels und höheren Dichte ins Wasser. Das kann man wegen der Färbung der Salzlösung gut beobachten. Nach einiger Zeit sinkt der Pegel der Salzlösung unter den des Wassers und schließlich fließt keine Salzlösung mehr aus der Spritze, sondern umgekehrt fließt das Wasser zurück in die Spritze, woraufhin der Pegel dort wieder steigt, solange bis sich die Flußrichtung wieder umkehrt. Dieses Oszillieren kann sich ziemlich oft wiederholen, schließlich wird es aufhören, weil sich Salzlösung und Wasser hinreichend gut miteinander vermischt haben. Die Dauer der Oszillation hängt hauptsächlich ab vom Innendurchmesser des Dreivegehahnes bzw. der Kanüle sowie von der Länge der Kanüle. Mit einer 10 ml-

Spritze, einem Dreiwegehahn und einer Kanüle mit einem Durchmesser von 1,6 mm und einer Länge von 30 mm erreicht man Oszillationsdauern von etwa einer Minute, die bis zu einer halben Stunde andauern.

(Anschrift der Verfasser: Christian Ucke, Physikdepartment E 20, Techn. Univ. München, 8046 Garching; Wolfgang Detsch, Berufsoberschule Ingolstadt, Am Brückenkopf 1, 8070 Ingolstadt)

Eingangsdatum: 3.1.1984

Literatur

- [1] Über Apotheken, lokale Vertreter von medizinischen Firmen, Kliniken oder Ärzte in der persönlichen Bekanntschaft kann man oft kostenlose Muster bzw. wenige Exemplare billig erhalten. Die Hersteller selbst bzw. medizinische Ausrüstungsfirmen geben meist nur 100-Packungen ab. Über die Physik-Boutique des Verlages M. Stark, Postfach 2125, 8050 Freising kann man ein Set von Einmalartikeln beziehen, das speziell für physikalische Versuche zusammengestellt ist (diverse Spritzen, Kanülen, Infusionsschläuche, Dreiwegehahn)
- [2] DIN 13090 Kegel und Kegelerbindungen für med. Geräte
DIN 13095 Farbkennzeichnung für medizinische Kanülen
DIN 13097 Medizinische Kanülen
- [3] Baumann, A. und M.: Schülerübungen in Physik, Darmstadt 1980, GRS Lehrgeräte, Darmstädter Str. 1, 6100 Darmstadt
- [4] Detsch, W.: Aufbau eines Versuches zur Viskosität im Physikalischen Praktikum für Mediziner der Technischen Universität München, Zulassungsarbeit für das höhere Lehramt, Technische Universität München, Physikdepartment E 20, 8046 Garching
- [5] Walcher, W.: Praktikum der Physik, Stuttgart 1980
- [6] Stong, C.L.: Curious oscillators that involve salt water, flame and hot wire, *Scientific American* 223 (Sept. 1970) 221–234
- [7] Ferguson, J.: The many uses of disposable plastic hypodermic syringes – A shot in the arm for small equipment budgets, *American Journal of Physics* 46 (1978) 1104–1106