

Vakuumphysik im Alltag: Physikalische Freihand- und Low-cost-Experimente

Michael Vollmer

Physikalische Ingenieurwissenschaften, Fachhochschule Brandenburg,
Magdeburger Straße 50, 14770 Brandenburg, vollmer@fh-brandenburg.de
(Eingegangen: 01.03.2002; Angenommen: 04.11.2002)

Kurzfassung:

Es werden eine Reihe einfacher Freihandexperimente zum Thema Unterdruck vorgestellt. Viele der Beispiele sind vom grundlegenden Aufbau her bekannt, gestatten jedoch neue Varianten, Erweiterungen bzw. die Korrektur von Fehlvorstellungen. Neben der Druckmessung in Einmachgläsern und der Funktionsweise von Ausgussreinigern und Saughaken werden Druck- sowie Tragfähigkeitsmessungen an Staubsaugern diskutiert. Des weiteren wird untersucht, welche Saughöhe per Strohhalm realisiert werden kann. Es wird eine physikalisch einleuchtende, aber dennoch verblüffende Erweiterung des Versuchs mit dem umgedrehten Wasserglas präsentiert.

1. Einleitung

Gemäss Definitionen in Lexika bezeichnet Vakuum im Idealfall den materiefreien, d.h. teilchenfreien Raum. In der Umgangssprache hört man häufig, Vakuum sei luftleerer Raum. In der Technik nutzt man dagegen eine Definition gemäss der deutschen Norm DIN 28400: *Vakuum ist der Zustand eines Gases, dessen Teilchenzahldichte geringer ist, als die der Atmosphäre an der Erdoberfläche.* Gemäss der physikalischen Gesetze der kinetischen Gastheorie lässt sich diese Definition auch mit der physikalischen Grösse Druck formulieren: *Vakuum ist der Zustand eines Gases, dessen Druck geringer ist, als der der Atmosphäre an der Erdoberfläche.* Der Druck der Atmosphäre an der Erdoberfläche ist etwa 10^5 Pa (oder gemäss Wetterkarten 1000 hPa). Alle Druckangaben in diesem Beitrag werden in P oder hPa angegeben ($1\text{hPa} = 100\text{Pa} = 1\text{mbar} = 100\text{N/m}^2$).

Der Weg von den griechischen Naturphilosophen Leukipp, Demokrit und Aristoteles über die modernen Pioniere Torricelli, Pascal, von Guericke sowie später Gaede bis zu dieser heutigen Definition, vom horro vacui zur Nutzung des Vakuums für physikalisch-technische Prozesse, war zwar beschwerlich, hat aber in der Gegenwart zu einer derart grossen Zahl von Anwendungen in Gebrauchsgegenständen oder Prozessen des

täglichen Lebens geführt, dass Vakuum heute nicht mehr wegzudenken ist.

In der Fachliteratur findet man neben einführenden Artikeln und Buchkapiteln zum Vakuum [1,2] auch Bemerkungen zur Geschichte und Philosophie [3]. Ausserdem gibt es einige Fachbücher zur Vakuumtechnik bzw. Vakuumphysik [4-6], wobei zwar die Anwendungen nicht zu kurz kommen (siehe insbesondere [6]), aber Schulexperimente gänzlich fehlen.

Ohne Vakuumtechnik gäbe es z.B. keine Fernseh- und Radiotechnik, keine CD's und übrigens auch keine Flachbildschirme [7], keine Mikro- und Optoelektronik, und auch bei Lichtquellen wie Glüh- oder Entladungslampen sähe es düster aus. In der Medizintechnik wäre beispielsweise Röntgen genauso unbekannt wie z.B. die Saugglocke bei Problemgeburten. Es gäbe selbst einfache Haushaltsgeräte wie Staubsauger, Thermoskannen, Strohhalm und Saughaken als Handtuchhalter nicht, ganz zu schweigen von der täglichen Milch von Melkmaschinen oder von gefriergetrockneten und/oder vakuumverpackten und daher länger haltbaren Lebensmitteln. Hierzu hat schon Otto von Guericke - vor allem bekannt durch seine öffentlichen Demonstrationsexperimente mit den Halbkugeln (s. Abb. 1) - erste quantitative Messungen durchgeführt.

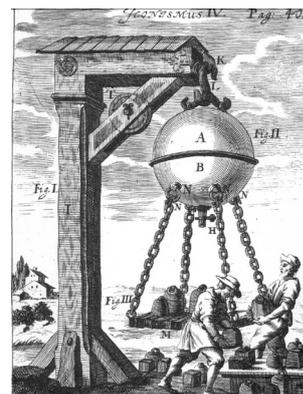
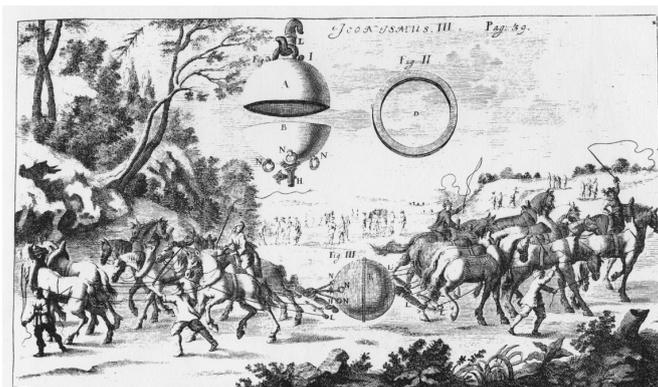


Abb. 1: Historische Darstellung des Halbkugelversuchs (a) sowie eines quantitativen Versuchs (b) von Otto von Guericke. 19

2. Standardexperimente zur Vakuumtechnik im Physikunterricht

Praktisch alle Lehrmittelhersteller bieten zur Thematik Vakuum ähnliche Geräte an, z.B. Vakuimglocken aus Glas (der heute immer noch gebräuchliche Name Rezipient kommt ursprünglich von Arzneimittelflaschen, die Guericke für seine Experimente nutzte) mit oder ohne Hahn, elektrische Pumpen, Handpumpen, und Demonstrationsmodelle von Vakuummessgeräten. An fertigen Experimentiergeräten werden i.a. nur Fallröhren aus Glas angeboten, um den freien Fall von Federn mit Münzen vergleichen zu können sowie vor allem kleine Magdeburger Halbkugeln (z.B. mit Durchmessern um 10 cm). Wegen der leichten Verfügbarkeit werden in vielen Schulphysikbüchern Guericke's Halbkugelversuche beschrieben, aber auch Saughaken werden erwähnt – i.a. jedoch ohne nähere Erklärung [8]. Viele andere Demonstrationsexperimente mit diesen oder anderen preiswerteren Gegenständen sind in der Literatur zu einfachen Experimenten beschrieben (z.B.[9-12], insbesondere lassen sich mit etwas handwerklichem Geschick sehr preiswert Pumpen bauen, die Enddrucke im Bereich 40hPa erreichen [13]). Bekannt sind z.B. Klingelversuche im Vakuum, Sieden von Wasser unter vermindertem Druck, Magdeburger Halbkugeln mit Gläsern oder Getränkedosen, das Aufblasen von Luftballons durch geringen Restdruck, das Aufblähen von quellfähigen Süßigkeiten, die Implosion von Blechdosen, das Erzeugen von Schaumkronen auf abgestandenem Bier (dumm nur, dass man es erst wieder bei Normaldruck trinken kann), das Beobachten von Gasentladungserscheinungen oder beispielsweise die Demonstration des Vakuummessprinzips einer Piranimessröhre, basierend auf einer druckabhängigen Wärmeleitfähigkeit der Luft [14]. Auch flüssiger Stickstoff ermöglicht einfache Demonstrationsexperimente mit Unterdruck [15]. Einige Versuche sind auch im Internet beschrieben (z.B. [16]).

Im folgenden wird eine Reihe einfacher Freihandexperimente vorgestellt. Viele der Beispiele sind zwar vom grundlegenden Aufbau her bekannt, sie gestatten jedoch neue Varianten bzw. überraschende Erweiterungen. Ausserdem wird auf eine typische Fehlinterpretation bei Versuchen mit Saughaken eingegangen.

3. Einige Freihandexperimente für die Schule

Unter Freihandexperimenten sollen hier solche verstanden werden, die mit Mitteln des Alltags sowie einfachen und preiswerten Geräten aus Schulsammlungen durchgeführt werden können (z.B. [17]).

3.1 Einmachgläser

In den Deckel eines Einmachglases wird mit einem z.B. in eine Handbohrmaschine eingespannten Glasbohrer ein Loch gebohrt, ein Schlauch eingeführt und ggf. mit Kleber vakuumdicht gemacht (Abb. 2a). Am Schlauch hängt hinter einer Klemme (nicht im Bild) direkt in Nähe des Deckels ein Manometer. Das Glas wird zu etwa 4/5 mit Wasser gefüllt und im Wasserbad eines Kochtopfs erhitzt oder direkt mit siedendem Wasser gefüllt. Im Versuch wurde unmittelbar vor dem Verschliessen des Glases eine Temperatur von 95°C gemessen. Nach dem Abkühlen (Beschleunigung durch Wasserbad) auf 25°C wurde die Klemme geöffnet und der Druck im Innern des Einmachglases abgelesen. Er sank von den anfangs etwa 1000 hPa auf ca. 580 hPa (Abb. 2b). Bei einem idealen Gas hätte man (das Volumen bleibt konstant) nur eine Erniedrigung auf etwa 800 hPa erwartet. Ursache der Differenz: das eingeschlossene Gas besteht im heissen Zustand aus Wasserdampf und Luft, im kalten i.w. nur aus der Luft (der Sättigungsdampfdruck des Wassers bei 25° beträgt ca. 31 hPa). Beim Abkühlen kondensiert der zunächst heisse Wasserdampf auf der Glaswand. Die Luft kann daher ein grösseres Volumen einnehmen, d.h. der Druck sinkt.

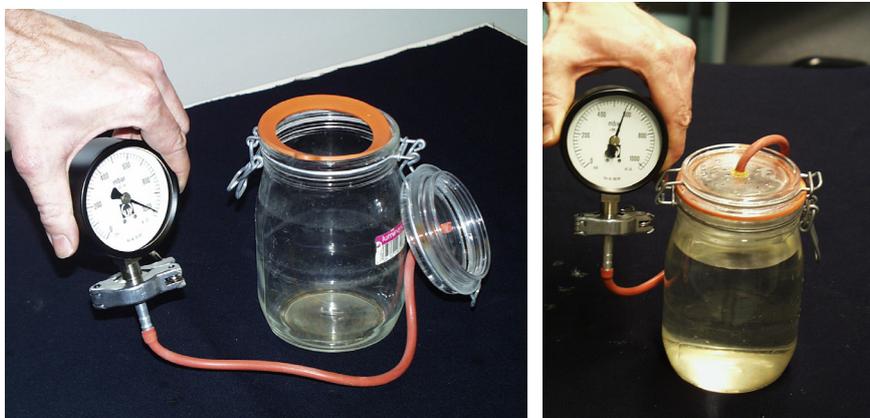


Abb. 2: Einmachglas mit Druckmessgerät (a), mit dem z.B. die Druckerniedrigung beim Einmachen von Marmelade demonstriert werden kann (b)

Das Experiment kann auch mit mehr Alltagsbezug durchgeführt werden, indem beispielsweise Marmelade oder Kompott eingemacht wird. Allgemein erhöht sich durch den Luftabschluss die Haltbarkeit von Lebensmitteln im Vakuum stark, eine Tatsache, die schon Guericke im 17. Jahrhundert experimentell studierte.

3.2 Magdeburger Halbkugeln

Es ist ein wahrscheinlich verbreiteter Irrtum (z.B. [18]), beim Anpressen eines Saughakens auf eine glatte Unterlage entstehe im verbleibenden Restvolumen zwischen Wand und Haken ein grosser Unterdruck, der die Tragfähigkeit solcher Haken erklärt. Hier wird fälschlicherweise immer auf den Magdeburger Halbkugelversuch verwiesen. Im folgenden soll erläutert werden, warum dieser Vergleich falsch ist. Es wird eine durch einfache Versuche gestützte Erklärung des Verhaltens von Saughaken gegeben und gezeigt, dass es viele Gemeinsamkeiten zum Wirken von mechanischen Kräften bei Anwesenheit von Haftreibungskräften gibt. Um den Unterschied zu den Halbkugelexperimenten herauszuarbeiten, wird zunächst ein typischer Versuch diskutiert.

Bei quantitativen Versuchen mit Magdeburger Halbkugeln (vergl. Abb. 1) lässt sich die Tragfähigkeit von zwei über einen Gummidichtring aufeinandergepressten Halbkugeln bestimmen, nachdem sie mit einer Handpumpe oder Drehschieberpumpe evakuiert wurden. Hierzu greift an einer Kugel eine Gewichtskraft an. In Abhängigkeit von Kugelradius, genauer dem Innenradius bis zum Dichtring, kann man die maximale Tragkraft auch berechnen und somit

quantitative Messungen durchführen. Theoretisch kommt die Tragkraft dadurch zustande, dass die beiden Halbkugeln durch den äusseren Luftdruck zusammengepresst werden, sofern der Innendruck p_i kleiner als der äussere Luftdruck p_a ist.

Beispielsweise wirken auf zwei verbundene Halbkugeln vom Durchmesser $2R=10$ cm (Abb. 3a), wenn im Innern z.B. nur 1/100 des äusseren Luftdrucks vorliegt ($p_i=10^3$ Pa, $p_a=10^5$ Pa) ein Druckunterschied Δp von $0,99 \cdot 10^5$ Pa. Aufgrund der Geometrie und der Tatsache, dass die Kräfte nur senkrecht zur Kugeloberfläche angreifen, ergibt sich für die Gesamtkraft, welche die beiden Halbkugeln zusammenpresst

$$F = \Delta p \cdot \pi \cdot R^2 \quad (1)$$

$$\approx 778 \text{ N}.$$

Dem entspricht bei $g=9,805 \text{ m/s}^2$ die Gewichtskraft einer Masse $m \approx 79,3 \text{ kg}$. Würde man auf 1/1000 des Atmosphärendrucks evakuieren, ergäbe sich $\approx 80 \text{ kg}$, käme man nur auf 1/10, ergäbe sich $72,1 \text{ kg}$. Solch eine Kugel ist somit ohne weiteres in der Lage, das Gewicht eines Menschen von knapp 80 kg zu halten. Hierzu muss allerdings erstens die Pumpe wirklich auf weniger als 1 hPa evakuieren und zweitens müssen die Kontaktflächen gut dichten (Vakuummatt, glatter Dichtring). Abb. 3b zeigt den Versuch mit einem Probanden der Masse $m = 77 \text{ kg}$, der sich an die Halbkugeln hängen konnte. Hierzu wurde die obere Halbkugel mit einem Seil an eine Leiter gebunden, die zwischen zwei Schränken lag. Es wurden kommerzielle Halbkugeln von Lehrmittel-firmen verwendet.

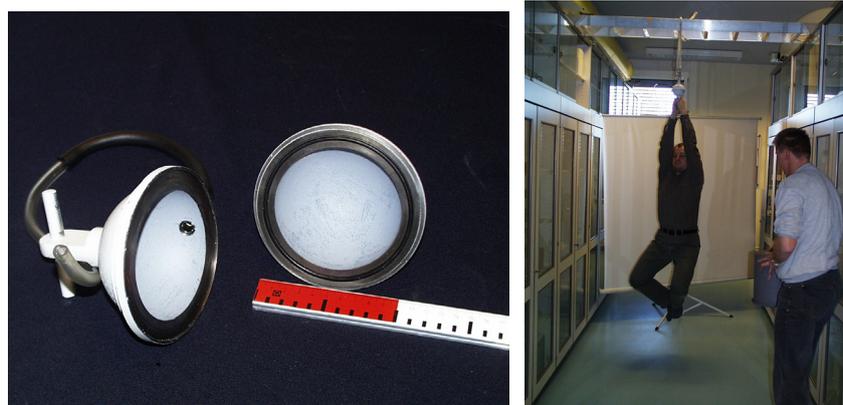


Abb. 3: Evakuierte Magdeburger Halbkugeln können – je nach Vakuum und Radius der Kugeln - das Gewicht verschieden schwerer Menschen tragen. (a): Kugeln mit Radius 5cm. (b): nach Evakuierung auf etwa 1/1000 des Atmosphärendrucks tragen sie einen etwa 77 kg schweren Mann.

3.3 Ausgussreiniger und Saughaken: Unterdruck im Haushalt

Um die Unterschiede zwischen Saughaken und Halbkugeln herauszuarbeiten, empfiehlt es sich, zunächst auf sehr grosse Sauger einzugehen, die in Fachgeschäften auch unter dem Namen Ausgussreiniger bekannt sind.

3.3.1 Ausgussreiniger

Ausgussreiniger, im folgenden kurz als Sauger bezeichnet, sind Gummikörper mit einem etwa zylinderförmigen Innenvolumen und einer glatten Gummidichtfläche (Abb.4). Wird ein solcher Sauger auf eine glatte Unterlage gedrückt, kann ein Teil der Innenluft entweichen. Der Sauger bleibt sichtbar deformiert an der Fläche haften (Abb. 5), da im Endzustand innen ein Unterdruck im Vergleich zum äusseren Luftdruck herrscht. Die Haftwirkung wird übrigens praktisch nicht verändert, wenn anstelle der Luft ein wassergefüllter Sauger verwendet wird, der von unten an eine glatte Fläche gepresst wird. Auf diese Weise lässt sich auch nach dem Ablösen die Restflüssigkeit, d.h. das typische Restinnenvolumen nach dem Anpressen bestimmen.



Abb.4: Zwei kommerzielle Ausgussreiniger.

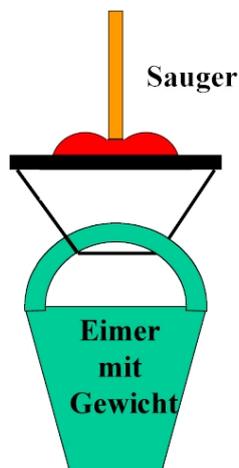


Abb. 6: Messprinzip der Tragfähigkeit: an eine angesaugte Platte werden Gewichte gehängt.

Im Experiment wurden zwei Sauger mit innerem Durchmesser von etwa 11,3 cm verwendet. Das maximale Volumen der Zylinderform betrug etwa 450 cm^3 (gemessen durch Einfüllen von Flüssigkeit). Das Restinnenvolumen betrug etwa 140 cm^3 .

Um den Mechanismus der Tragfähigkeit zu bestimmen, sind mehrere Wege möglich. Zunächst kann man beispielsweise ähnliche Versuche wie von Guericke anstellen (Abb.1), indem man an eine angesaugte Platte Gewichte anhängt (z.B. in einem Eimer, Abb. 6) und die maximale Gewichtskraft (Tragfähigkeit) bestimmt.

In unserem Fall betrug die maximale Gewichtskraft, die ein Sauger halten konnte, etwa 19 kg (Abb 7a). Sinnvollerweise werden die Stiele dabei mit Schlauchklemmen gesichert. Mit zwei dieser Sauger wurde beispielsweise ein Tisch von 38 kg Gewicht gehoben (Abb. 7b). Da bei dieser Grenzbelastung die Kräfte gleichmässig angreifen müssen, kann es auch passieren, dass die Tragfähigkeit nach einigen Sekunden (z.B. bei Wackeln des Tisches) überschritten wird (Abb.7c).

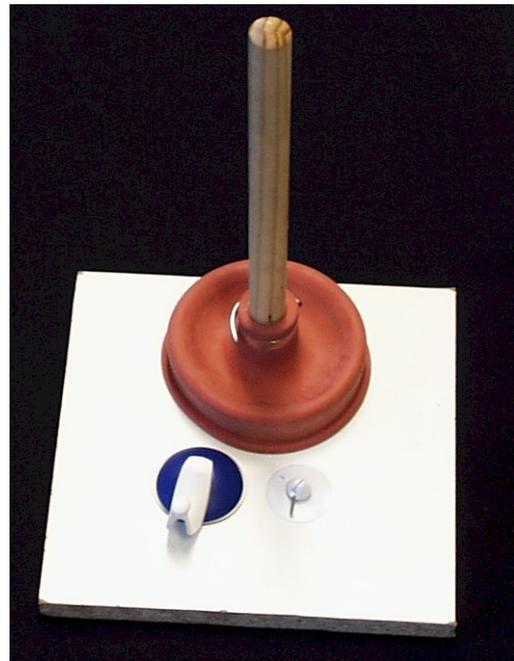


Abb.5: Ein Ausgussreiniger sowie zwei Saughaken haften auf einer Unterlage nach Anpressen. Beim Ausgussreiniger ist die Formveränderung am deutlichsten sichtbar.

Allein aufgrund solcher Versuche könnte man geneigt sein, eine den Magdeburger Halbkugeln ähnliche Argumentation zu vertreten: durch das Andrücken wird im Restinnenvolumen ein Unterdruck erzeugt während von aussen der äussere Luftdruck p_a wirkt. Die gerade noch aufgebrachte Tragkraft wäre dann gemäss obiger Gleichung wieder $F = \Delta p \cdot \pi \cdot R^2$. Bei dem experimentellen Durchmesser von 11,3 cm wäre man somit in der Lage auf die Druckdifferenz (und somit den Unterdruck) zu schliessen. In unserem Fall entspricht eine Masse von 19kg einem Unterdruck von etwa 190 hPa. Hier stellt sich folgende Frage: ist dieser Unterdruck immer konstant, wie bei den Magdeburger Halbkugeln, oder ändert er sich infolge der angreifenden Kräfte ?

Da sich der Sauger bei Belastung deformiert, ist zu erwarten, dass sich auch das Innenvolumen bei Belastung verändert – dann muss sich gemäss den Gasgesetzen (hier $pV \approx \text{const}$) natürlich auch der Innendruck ändern. Diese These: bei einem belasteten Sauger hängt der Unterdruck von der angreifenden Kraft ab, wurde durch Experimente untermauert. Dabei stellt sich heraus, dass die oben genannten Volumina nicht ausreichen, um eine Abschätzung des minimal möglichen Innendrucks zu gestatten.

Zunächst wurde, um die Vorgänge zu visualisieren, der Sauger auf eine Glasplatte gepresst und die Verformung ohne und mit Belastung beobachtet (Abb. 8). Wie erwartet, vergrössert sich das innere Volumen bei Belastung (es gibt jedoch keine einfache Möglichkeit, das maximale Innenvolumen bei Belastung vor Erreichen der Tragfähigkeitsgrenze direkt zu bestimmen).

Um die Druckverhältnisse beim Anpressen und bei Belastung zu bestimmen, wurde in eine etwa 1 cm dicke Kunststoffplatte bzw. eine 7 mm dicke Plexiglasplatte ein Loch von etwa 0,5mm Durchmesser gebohrt und auf der anderen Seite über einen kurzen Schlauch ein Druckmessgerät befestigt. Der Aufbau mit der Kunststoffplatte und einem durchbohrten Gummistopfen als Dichtung ist in Abb. 9a gezeigt. Das zusätzliche Volumen von der Platte bis zum Manometer betrug etwa $0,8 \text{ cm}^3$. Im folgenden wurde der Sauger von unten angesetzt, sodass das Manometer einfach abgelesen werden konnte. Presst man den Sauger auf die Platte, baut sich während des Anpressens kurzzeitig ein Überdruck gegen p_a von etwa 20-30 hPa auf (Abb.9b), der dazu führt, dass die Luft aus dem Innenraum des Saugers quasi über das Überdruckventil Dichtfläche herausgepresst wird. Lässt man den Sauger los, dehnt sich das

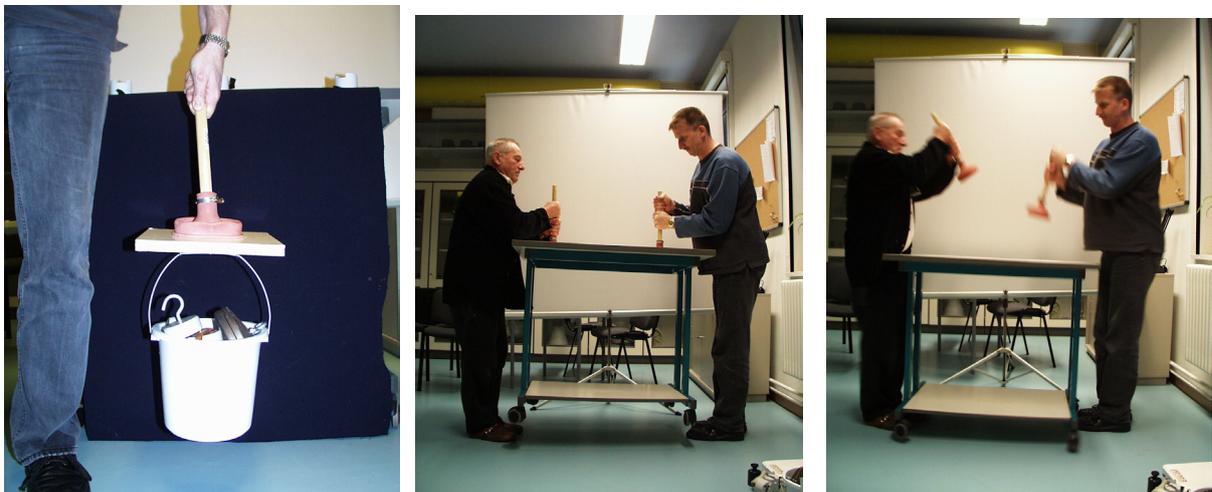


Abb.7: Heben eines Gewichts von 19kg mit einem bzw. eines 38 kg schweren Tisches mit zwei Saugern.



Abb.8: Ausgussreiniger auf einer Glasplatte vor dem Anpressen (a) sowie nach dem Anpressen ohne (b) bzw. mit zusätzlicher Belastung (c).

Innenvolumen etwas aus, wodurch sich ein leichter Unterdruck p_i aufbaut. Ein Unterschied zum Aussendruck p_a ist aber fast nicht messbar, da er nur so gross ist, um über $F = (p_a - p_i) \cdot \pi \cdot R^2$ die Gewichtskraft des Saugers selbst zu kompensieren. Sobald jedoch am Sauger gezogen wird, vergrössert sich das Innenvolumen und der Innendruck sinkt (Abb.9c). Durch die Druckdifferenz zum Aussendruck wird der Sauger an die Unterlage gedrückt. Im Experiment riss der Sauger bei einem Innendruck p_i von etwa 800 hPa (minimal 730hPa) ab (Druckdifferenz also 200 hPa), was gemäss den oben diskutierten Messungen auch zu erwarten war. Mit Hilfe der gemessenen Volumina lässt sich nun auch – bei der Annahme isothermer Expansion - die Vergrösserung des inneren Volumens von V_1 direkt nach Anpressen ohne Belastung auf V_2 bei Belastung abschätzen:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \quad (2)$$

Mit $V_1 = 140 \text{ cm}^3$, $p_1 \approx 10^5 \text{ Pa}$ sowie $p_2 \approx 8 \cdot 10^4 \text{ Pa}$ findet man $V_2 = 1,25 \cdot V_1$, d.h. $\Delta V \approx 35 \text{ cm}^3$. Bei Beobachtung durch die Glasscheibe erscheint dieser Wert qualitativ bestätigt.

Diese Messungen führen – im Gegensatz zur Erklärung der Halbkugelversuche - zu folgender Interpretation von Saugerversuchen: Auch der Sauger wird durch den äusseren Luftdruck an die Unterlage gepresst. Nach dem Anpressen bildet sich im Innern des Saugers allerdings nur der Unterdruck gegen p_a auf, der für die jeweils angreifende Kraft gemäss $F = \Delta p \cdot \pi \cdot R^2$ eine gleich grosse kompensierende Gegenkraft erzeugt. Dies geht bis zum minimal möglichen Innendruck, der eine maximal mögliche Gegenkraft erzeugt. Greifen grössere Kräfte am Sauger an, reisst der Kontakt ab.

Diesen Vorgang kann man sich insofern ähnlich der anfänglichen Überwindung von Haftreibung beim Zustandekommen einer Bewegung unter Krafteinwirkung vorstellen. Dabei bewirkt eine

ziehende Kraft solange keine Bewegung, wie durch das System eine gleichgrosse Gegenkraft durch die Haftreibung aufgebracht wird. Diese Haftreibungskraft hat jedoch einen Maximalwert $\mu \cdot F_n$ (F_n Normalkraft, μ Haftreibungskoeffizient), wird dieser überschritten, beginnt die Bewegung. Völlig analog gibt es beim Saughaken eine angreifende Kraft, z.B. durch Anhängen von Gewichten. Durch die Druckdifferenz zwischen Luftdruck und Druck im inneren Volumen des Saughakens gibt es eine Gegenkraft. Je stärker die Gewichtskraft, desto mehr vergrössert sich das innere Volumen des Hakens. Dadurch sinkt der Innendruck, was zu einer grösseren Druckdifferenz und damit zu einer grösseren Gegenkraft führt. Erst, wenn die Belastung so gross wird, dass die Dichtfläche des Hakens abreisst, kann keine ausreichende Gegenkraft aufgebracht werden und die Belastung führt zur Ablösung des Hakens samt angehängten Gewichten.

Es gibt im direkten Vergleich zum Halbkugelexperiment eine Komplikation: der Sauger ist im Gegensatz zu den Halbkugeln elastisch. Dies führt dazu, dass bei Belastung die andrückende Wirkung des äusseren Luftdrucks zwar gleich bleibt, der entgegen wirkende Einfluss des Innendrucks jedoch von einer variablen Teilfläche abhängt, u.z. der inneren Dichtfläche, welche sich durch die Einflussnahme (das Anhängen von Gewichten) leicht verändert (dies ist bei den kleinen Saughaken, s.u., weitaus wichtiger). In einer reinen Betrachtung der auftretenden Kräfte müssten auch die Anteile der elastischen Kräfte der verformten Membran mit berücksichtigt werden. Allerdings führen sie letztlich nur dazu, dass sich der Innendruck im Sauger auf einen bestimmten Wert einstellt. Insofern reduziert sich die Betrachtung wieder auf die andrückende Kraft durch p_a und die dem entgegen wirkende Kraft auf eine kleinere innere Dichtfläche durch den Innendruck.

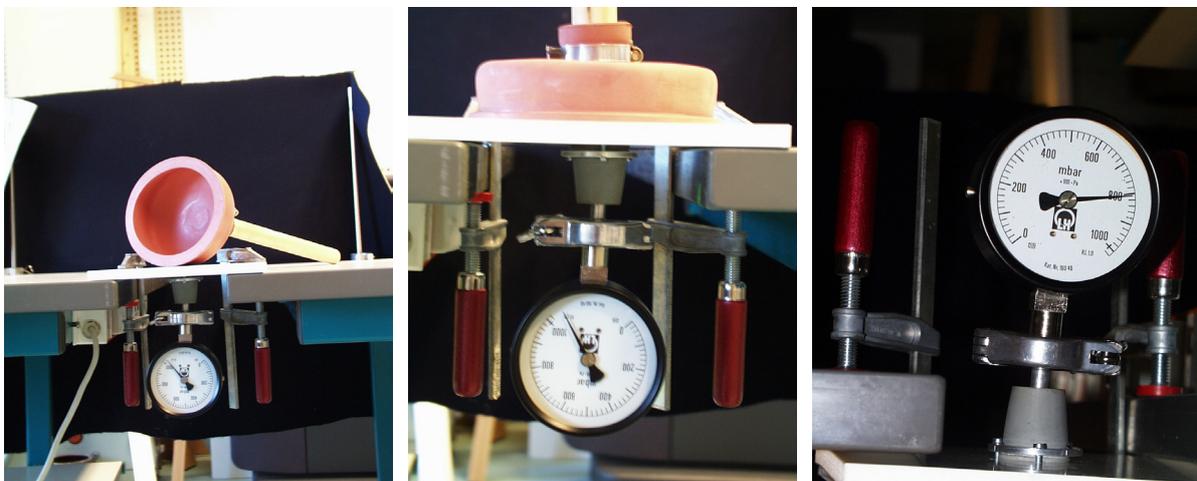


Abb.9: Ausgussreiniger auf einer durchbohrten Platte mit einem Druckmessgerät. Versuchsanordnung (a), beim Anpressen, d.h. mit Überdruck (b), beim Ziehen, d.h. bei Unterdruck (c). Bei (a) und (b) steht das Manometer auf dem Kopf.

3.3.2 Saughaken

Saughaken, wie sie z.B. für Handtuchhalter oder Halterung für Sonnenschutzmotive an Autoscheiben verwendet werden, funktionieren ähnlich. Auch hier wird beim Andrücken des Hakens an eine glatte Fläche die Luft aus dem Zwischenraum zwischen Haken und Wand gedrückt. Dabei kann die Dichtfläche, d.h. der Kontakt zur Unterlage durch Anfeuchten verbessert werden. Die durch die Gummifläche eingeschlossene Restluft weist wieder einen leichten Unterdruck auf. Bei Belastung ergibt sich wie bei den Ausgussreinigern durch elastische Verformung einerseits eine Volumenvergrößerung und damit (gemäss $pV=const$) ein sinkender Innendruck

und andererseits i.a. auch eine Vergrößerung der inneren Dichtfläche. Werden die elastischen Kräfte des Gummis wieder pauschal durch die Wirkung des Innendrucks auf die innere Dichtfläche berücksichtigt, kann man ähnlich zu Gl. 1 (es gehen ggf. zwei leicht verschieden grosse Dichtflächen für Innen- und Aussendruck ein) die Gesamtkraft berechnen, mit der der Haken an die Dichtfläche gedrückt wird.

Die einfachsten Versuche betreffen wieder die Tragfähigkeit sowie die Messung des Innendrucks. Im Experiment wurden zwei verschieden grosse Haken untersucht (Abb. 10), bei denen der Anpressvorgang und somit auch das Ansaugen auf verschiedene Weise erfolgt.

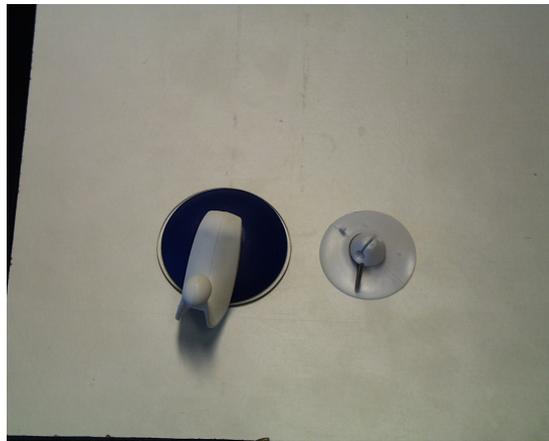


Abb.10: Zwei handelsübliche Saughaken für Handtücher.

a) Kleiner Haken

Ein kleiner einfacher Haken hat einem Aussendurchmesser von 4,1 cm und ohne Anpressen eine Einbuchtung von etwa 4 mm Tiefe sowie einen inneren zylinderförmigen Hohlraum von etwa 4 mm Tiefe und 5 mm Durchmesser (Querschnitt schematisch in Abb. 11 links). Der innere zylinderförmige Hohlraum fasst etwa $0,08 \text{ cm}^3$, was man auch leicht durch Einfüllen von Wasser feststellt. Durch das Andrücken kann fast die ganze Saugfläche flach an eine Wand gedrückt werden,

sodass praktisch nur noch der innere Hohlraum Luft enthält (Abb 11 rechts).

Lässt man los, vergrößert sich der innere Hohlraum leicht, was sichtbar wird, wenn er auf eine Glasscheibe aufgedrückt wird. Deutlich ist dann die innere Kontaktfläche ähnlich einem Kreisring von ca. 2 cm Durchmesser zu sehen (Abb. 12a). Werden Gewichte senkrecht zur Ansaugfläche an den Haken gehängt, vergrößert sich das Innenvolumen wieder (siehe Diskussion oben) bis der Haken bei einem Innendurchmesser von 2,5 bis 3 cm abreisst. Abb.

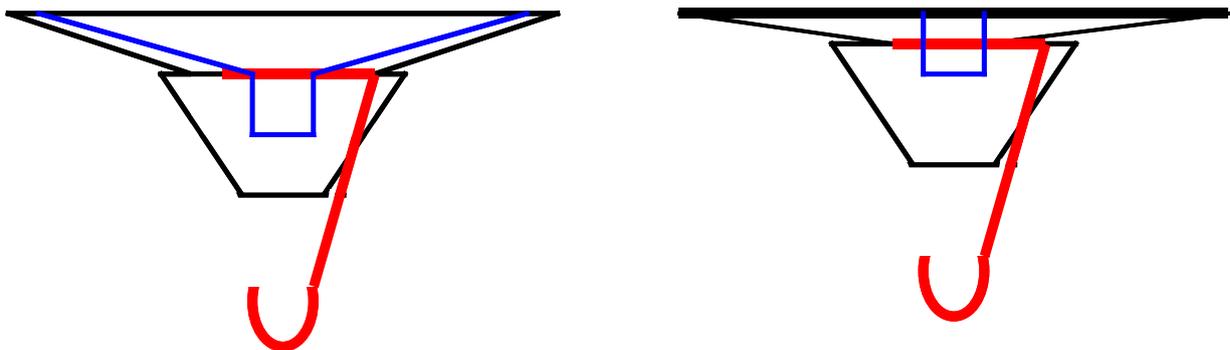


Abb. 11 Querschnitt durch den kleinen Haken ohne (links) bzw. mit (rechts) Anpressen. Der innere Hohlraum ist blau gekennzeichnet, die Drahtschleife zum Anhängen der Gewichte rot.

12b zeigt ein gehaltenes Gewicht von 2 kg von der Seite, Abb. 12c ein Gewicht von 3 kg von oben durch die Glasplatte gesehen. Bei paralleler Orientierung können Saughaken ins Gleiten geraten, ohne das Vakuum zu zerstören. Greift das Gewicht – wie bei Handtuchhaltern üblich – parallel zur Saugfläche an, trägt der kleine Haken gut 1 kg (Abb. 12d), allerdings führten Gewichte ab etwa 1,3 kg zum Abrutschen des Hakens (sobald eine Kachelfuge oder Unebenheit getroffen wird, gibt es ein Leck und der Haken fällt ab).

Möchte man wieder aus der Kraft zum Entfernen des Saughakens für die maximal gehaltenen 3,5 kg die Druckdifferenz Δp bzw. den Innendruck abschätzen, so setzt man für die Querschnittsfläche des Innenvolumens beim Abreißen die beobachtete nahezu kreisförmige Fläche vom Durchmesser $2R_i=3$ cm an, d.h. die Wirkung des Innendrucks führt zu einer Kraft von $p_i \cdot \pi \cdot R_i^2$.

Ein Problem taucht auf bei der Berechnung der andrückenden Kraft $p_a \cdot \pi \cdot R_a^2$ durch den äusseren Luftdruck. $2R_a$ ist nämlich i.a. nicht identisch zum Aussendurchmesser von 4,1 cm. Dies erkennt man

experimentell sofort, da der Haken bei Belastung auch dann noch angepresst wird, wenn ein Teil der Saugfläche mit einem flachen Gegenstand abgehoben wird.

Um dennoch eine Abschätzung vorzunehmen, wird angenommen, dass R_a nahe bei R_i ist, d.h. man nutzt Gleichung 1 mit $R=R_i$. Daraus ergibt sich

$$\Delta p = F / (\pi \cdot R^2) \approx 490 \text{ hPa.}$$

Folglich herrscht kurz vor dem Abreißen ein Innendruck im Bereich um 500 hPa.

Mit dem Plexiglasplattenaufbau ähnlich zu Abb. 9 (Kunststoff und Holz kann ausgasen, was die Druckmessung verfälscht) lässt sich der Innendruck bei diesem kleinen Haken direkt messen. Beim Aufpressen ergibt sich ein Überdruck von etwa 1150 hPa. Entlastet dehnt sich der Haken aufgrund seiner Elastizität wieder aus und es bildet sich etwa ein Unterdruck von ca. 800 hPa aus. Bei Zugbelastung reisst der Haken bei typisch 400 –500 hPa ab, unser Rekordversuch ergab minimale 320 hPa.



Abb. 12: a: Angepresster Haken durch eine Glasscheibe beobachtet. Man erkennt die Begrenzung des inneren Volumens. Haken bei Belastung mit 2kg von der Seite (b) bzw. mit 3kg von oben durch eine Glasscheibe gesehen (c) sowie Belastung parallel zur Saugfläche (d)

b) Hebelhaken

Im Handel sind neben den gerade diskutierten einfachen Saughaken auch vom Design her stilvollere mehrfarbige Hebelhaken als Handtuchhalter erhältlich. Im Versuch wurde ein Haken (Abb. 13a) mit einer durchsichtigen elastischen Saugfläche und einem Aussendurchmesser von 5,7 cm verwendet. Im lockeren Zustand befindet sich etwa 5-6 Millimeter darunter ein Kugelsegment aus blauem Plastik.

Das Anpressen des Hakens an die Wand erfolgt per Hebel, indem zunächst die Ansaugfläche nahezu flach auf die Unterlage gedrückt wird. Durch Umlegen des als Hebel ausgebildeten eigentlichen Hakenteils wird die Kugelfläche gegen die Ansaugfläche gepresst. Dabei deformiert das blaue Kugelsegment die Saugfläche in etwa als Kugelsegment, wodurch ein innerer Hohlraum entsteht mit $2R_i \approx 4\text{cm}$ (Abb. 13b und c). Man kann auch die äussere Dichtfläche mit einem Durchmesser von ca. 5,1 cm i.a. deutlich erkennen. Da die Saugfläche in diesem Zustand formfest ist, lässt sich das durch den Hebel erzeugte innere Volumen zwar im Prinzip einfach über eine Flüssigkeitsmessung bestimmen. Allerdings entspricht es nicht dem inneren Volumen nach Anpressen des Hakens auf eine Glasplatte.

Beim anfänglichen Andrücken ohne den Hebel wird wieder zunächst praktisch die ganze Luft durch den Überdruck des Anpressens aus dem Hohlraum herausgedrückt (Abb. 14a) (bei einem Test mit einer wassergefüllten Ansaugfläche wurde praktisch alles Wasser seitlich herausgedrückt). Umklappen des Hebels bewirkt dann die Schaffung des inneren Volumens. Dieses hat an der Saugfläche jedoch nur einen kreisförmigen Querschnitt von etwa 3,5 cm Durchmesser (Abb.14b).

Dieses Saugprinzip ist offensichtlich verschieden von dem des kleinen Saughaken und dem der Ausgussreiniger. Hier wird durch den Hebel ein inneres Volumen mit einem Unterdruck geschaffen, d.h. Hebelhaken weisen als einzige der untersuchten Saughaken eine teilweise Analogie zu den Magdeburger Halbkugeln auf. Denn ein recht niedriger Innendruck besteht bereits auch ohne Belastung. Allerdings ändert sich dieser Druck zusätzlich noch während der Belastung, da sich bei einer angreifenden Kraft das Innenvolumen durch die elastische Dichtfläche noch verändert

Wegen der Geometrie dieses Hakens konnten nur Belastungen parallel zur Saugfläche untersucht werden. Es konnten auf einer glatten Holzfläche Gewichte von bis zu 5 kg gehalten werden (Abb 14c), auf einer Glasplatte sogar bis 7 kg.



Abb.13: Hebelhaken im lockeren Zustand (a) sowie nach Umlegung des Hebels (b,c).



Abb.14: Angepresster Hebelhaken vor (a) bzw. nach (b) Umlegen des Hebels, durch eine Glasplatte gesehen. Der Haken kann eine Masse von 5 kg parallel zur Saugfläche tragen (c).

Es wurden ebenfalls wieder Druckmessungen durchgeführt. Um das zusätzlich zum Innenvolumen auftretende Volumen vom Sauger bis zur Messröhre klein zu halten, wurde ein gegenüber Abb. 9 modifizierter Aufbau verwendet. Der Saughaken wurde zum einen (Abb. 15a,b) auf die mit einem Loch von 0,5mm Durchmesser versehene Kunststoffplatte gepresst, zum anderen auf die nicht ausgasende Plexiglasplatte. Auf die Gegenseite wurde direkt ein Manometer gepresst. Dies erlaubte direkt nach Umlegen des Hebels eine Messung des Innendrucks. Bei mehreren Versuchen ergab sich jeweils beim Anpressen des Hakens ein Überdruck von typisch 20hPa und sodann beim Umlegen des Hebels ein minimaler Innendruck von etwa 150 hPa, d.h. eine Druckdifferenz von immerhin 850 hPa.

Wird der Hebel nicht umgelegt, sondern wie der gewöhnliche Haken nur angedrückt, entspricht die Funktionsweise nicht mehr dem Prinzip der Magdeburger Halbkugeln sondern wieder dem der anderen Saughaken. In dieser Anordnung konnte auch die Belastung senkrecht zur Saugfläche getestet werden. Dabei trug der Haken 16,1 kg (!), wobei allerdings die das Innenvolumen abgrenzende Dichtfläche schon Durchmesser von nahezu 5 cm aufwies, d.h. nahe bei dem äusseren Dichtdurchmesser von

5,1 cm. Dem entspricht ein gemäss Gl. 1 mit $2R=5,05$ cm abgeschätzter Druckunterschied von $\Delta p \approx 820$ hPa. Im Experiment wurde der minimale Unterdruck gemessen, indem der Haken nach dem Anpressen auf das Plexiglas bis zum Abreissen der Dichtfläche belastet wurde. Dabei ergaben sich Innendrucke von bis zu 100 hPa, minimal einmal sogar nur noch 50 hPa! Berücksichtigt man die Fehler bei der Abschätzung der nicht ganz kreisförmigen Dichtfläche, kann eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen Experiment und Vorhersage festgestellt werden.

Somit können Tragfähigkeitsmessungen von Saughaken einfach zum Abschätzen des Innendrucks verwendet werden, sofern sinnvolle Angaben über die Grösse der inneren Dichtfläche der Haken gemacht werden können, was beim Blick durch Glasscheiben i.a. immer möglich ist.

Zum Abschluss der Diskussion von Saughaken soll deren technische Anwendung erwähnt werden. Vakuumhebegeräte werden sowohl in der Glashebetechnik als auch bei Natursteinbetrieben eingesetzt. Sie arbeiten mit dem Saugerprinzip und gestatten – bei Nutzung mehrerer Sauger gleichzeitig – Lasten von über einer Tonne zu heben [19].



Abb.15: Prinzip der Druckmessung beim Hebelsauger

3.3 Staubsauger

Fast jeder hat schon damit gearbeitet, aber kaum jemand hat einmal gemessen, wie gross der Unterdruck eines handelsüblichen Staubsaugers ist. Solche Messungen sind denkbar einfach, benötigt man doch neben dem Staubsauger nur Dichtungen (z.B. Gummiringe o.ä.) und ein Manometer. Staubsauger realisieren Unterdrücke in verschiedenen Bereichen. Unser handelsüblicher Industriestaubsauger erzielt beispielsweise $\Delta p \approx 0,12 p_{\text{Luft}}$, d.h. $\Delta p \approx 120$ hPa, wenn ein Manometer direkt am Schlauchende bzw. einer anderen abschliessenden Halterung am Schlauchende misst (Abb. 16a). Zwei

getestete normale Hausstaubsauger erzielten um 800 hPa, wobei ein Modell mit Leistungsregelung den Bereich zwischen 900 hPa und 800 hPa ($P=1200$ W) abdeckte.

Staubsauger bieten nun eine sehr einfache Möglichkeit, die Beziehung $F = \Delta p \cdot A$ eindrucksvoll anzuwenden. Hierzu wird die Saugfläche einfach variiert, beispielsweise durch Trichter oder eine andere Geometrie mit Dichtung (Abb. 16b), während der Unterdruck konstant bleibt.



Abb.16: Unterdruck eines Industriestaubsaugers (a) sowie verschieden grosse Dichtflächen am Schlauchende des Staubsaugers (b).

Der Versuch besteht dann darin, mittels der ansaugenden Fläche ein Gewicht zu heben (Aufbau Abb. 17a), beispielsweise einen Eimer mit Gewichten. Als Beispiel wurde mit einer kreisförmigen Saugfläche und einer Gummidichtung von 23,8 cm Durchmesser ein 38 kg schwerer Tisch gehoben (Abb 17b). Für den Unterdruck von 120 hPa hätte man idealerweise ein maximales Gewicht von etwa 54 kg erwartet, allerdings benötigt man zum Anheben derartiger Massen schon mindestens zwei Handgriffe, an denen gleichzeitig angehoben werden muss. Beim Verkippen können einseitig

höhere Kräfte auftreten wodurch der Versuch misslingt.

Mit verschieden grossen Trichtern lässt sich eine ganze Versuchsreihe durchführen. In unserem Beispiel wurde ein Trichter mit 7,7 cm Radius verwendet, der immerhin noch ein Gewicht von 18,5 kg heben konnte. Hierbei muss man allerdings zum einen sehr auf die Qualität der Dichtfläche achten, zum anderen kann es bei den grossen Trichtern schwierig sein, am glatten Trichter ein grosses Gewicht zu heben.



Abb.17: Aufbau zum Heben grosser Gewichte mit einem Staubsauger (a) sowie Durchführung eines Versuchs: Heben eines 38 kg schweren Tisches (b)

3.4 Unterdruck beim Strohhalmtrinken

Jeder Mensch kann einen verblüffend grossen Unterdruck erzeugen. Ein einfacher Test besteht darin, an einem Manometer zu saugen. Dabei kann man – je nach Technik - z.B. kurzzeitig bis auf 600 hPa evakuieren, d.h. ein Druckunterschied von $\Delta p = 400$ hPa ist möglich.

Eindrucksvoller und lustiger ist ein Versuch mit einem langen durchsichtigen Schlauch oder ineinandergesteckten Strohhalmen (am Ende z.B. 1 cm einschneiden und in zweiten Halm schieben, dann mit Tesafilm abdichten). Das untere Ende hängt in einem Becherglas mit einer farbigen Flüssigkeit (Orangensaft, Kirschsafte o.ä., keine Kohlensäure !) und man nimmt das obere Ende, z.B. auf einem Stuhl, Tisch oder einer Leiter stehend in den Mund und saugt. Da man immer nur kleine Volumina evakuieren kann, werden pro Saugen etwa Höhen von 20-40 cm gesaugt. Dann muss der Halm/Schlauch jeweils wieder mit der Zunge

abgedichtet werden und der Vorgang wird wiederholt. So kann man ruckweise den Druck im Gesamtschlauch erniedrigen, was durch die aufsteigende farbige Flüssigkeit überall sichtbar ist (Abb.18a,b). Es ist verblüffend zu sehen, dass man noch aus Höhen von 3,5-4 Meter aus dem langen Halm trinken kann (Abb 18c), dem entspricht ein Unterdruck von immerhin etwa 350 - 400 hPa, in Übereinstimmung mit dem zuvor erwähnten Manometertest !

Man kann auch einen Wettbewerb starten, indem man zwei oder mehrere identische Halme präpariert und es darum geht, am schnellsten über eine gegebene Höhendifferenz zu trinken oder auszutrinken (Idee von M. Junge, Technorama/Winterthur). Ob alleine oder im Wettbewerb, viele Schülerinnen und Schüler bzw. allgemein Zuschauer feuern lautstark an und gehen begeistert mit.



Abb.18: Ansaugen von Kirschsafte durch einen etwa 2,5 m langen Schlauch (a,b) und Ansaugen von Orangensaft durch einen etwa 3,5 m langen Schlauch (c)

3.5 Das umgedrehte Wasserglas

Eines der bekanntesten Freihandexperimente zum Luftdruck ist das durch einen Bierdeckel abgedichtete Wasserglas (z.B. [12]): Man füllt ein Glas (Höhe z.B. 10 cm) üblicherweise randvoll mit Wasser, bedeckt es sodann mit dem Bierdeckel, hält beides fest und dreht das Ganze vorsichtig auf den Kopf. Wenn man den Deckel loslässt, bleibt er am Glas haften und das Wasser bleibt im Glas (Abb. 19). Statt Bierdeckel kann man auch Postkarten und vieles mehr verwenden, auch funktioniert das Experiment, wenn eine kleine Luftblase im Glas ist, sofern ein kleiner Teil der Flüssigkeit ausfliesst, bzw. der Deckel sich etwas wölben kann. Das Phänomen hängt mit dem Luftdruck und dem Schweredruck des Wassers im Glas zusammen.



Abb.19: Experiment zum umgedrehten Wasserglas: der Bierdeckel wird durch den Luftdruck an das Glas gepresst: es läuft keine Flüssigkeit aus.

Nachdem das Glas umgedreht ist, wirkt auf die obere (ins Innere des Glases zeigende) Seite des Deckels der Druck der darauf lastenden Wassersäule $p_W = \rho \cdot g \cdot h \approx 10^5 \text{ Pa}$, auf die untere Seite des Deckels wirkt der äussere Luftdruck p_L . Der Luftdruck von 10^5 Pa entspricht dem Druck einer Wassersäule von etwa 10 m Höhe, ist also etwa 100 mal grösser als der von oben auf den Deckel wirkende Druck der Wassersäule im Glas. Folglich wird der Deckel vom Luftdruck an das Glas gepresst. Ist das Glas nicht randvoll, d.h. ist auch eine Luftblase im Glas, so wirkt auf die Oberseite des Deckels zusätzlich der (nahezu dem äusseren Luftdruck entsprechende) Luftdruck im Glas. Wenn etwas Wasser ausfließt, sinkt der Luftdruck im Glas wieder unter den äusseren Luftdruck, so dass das Experiment dennoch gelingt.

Im folgenden wird eine logische Fortführung dieses bekannten Experiments vorgestellt und diskutiert. Ausgangspunkt ist die obige Erklärung für den luftblasenfreien Fall. Dabei wird der Deckel eines 10 cm hohen Glases theoretisch mit einer Kraft

$$F = \Delta p \cdot A \\ = 0,99 p_L \cdot \pi \cdot R^2$$

angedrückt. Bei einem Glasdurchmesser von 4,9 cm entspricht dies wie oben bei der Abschätzung mit den Magdeburger Halbkugeln einer Gewichtskraft von 187 N, d.h. der Gewichtskraft einer Masse von 19 kg. Erhöht man den Durchmesser und die Wassersäulenhöhe auf $R = 11,3 \text{ cm}$ bzw. $h = 16 \text{ cm}$

($\Delta p = 0,984 p_L$), ergeben sich $F \approx 987 \text{ N}$ und $m \approx 100 \text{ kg}$. Insofern sollte es ohne weiteres möglich sein, ein zusätzliches Gewicht an dem Deckel zu befestigen.

Um dies experimentell zu belegen, muss ein stabiler Deckel benutzt werden, der exakt in der Achse des Glases einen Befestigungshaken für Lasten hat (sobald eine Last ausserhalb des Schwerpunkts angreift, wirken Drehmomente auf den Deckel, die zum Verlust der Abdichtung führen). Abbildung 20 zeigt die gewählte Anordnung aus einem zylindrischen Plexiglasgefäss (Radius = 11,3 cm, Höhe = 16 cm) und einem zylindrischen Deckel mit Haken in der Achse. Um eine gute Dichtung zu gewährleisten, wurde die Dichtfläche aus Silikon gefertigt. Das Gefäss wird mit Wasser gefüllt und der Deckel so aufgeschoben, dass sich innen keine Luftblasen bilden. Dann wird die Anordnung um 180° gedreht, sodass der Deckel – wie oben beschrieben – durch den Luftdruck an das Gefäss gepresst wird. Dann kann man zusätzliche Gewichte anhängen. Abbildung 21 zeigt eine Last von 2 bzw. 8 kg, die ohne weiteres vom Luftdruck gehalten wird. Je nach Qualität der Dichtfläche konnten mit der vorliegenden Anordnung Gewichte bis 10 kg an das Gefäss hängen (bei Schaukelbewegungen können baldigen Misserfolgen führen, zu Beginn empfiehlt es sich deshalb, das Experiment über einem Eimer durchzuführen).



Abb.20: zylindrisches Plexiglasgefäss mit stabilem Deckel und Haken für das Anbringen von Gewichten in der Achse.

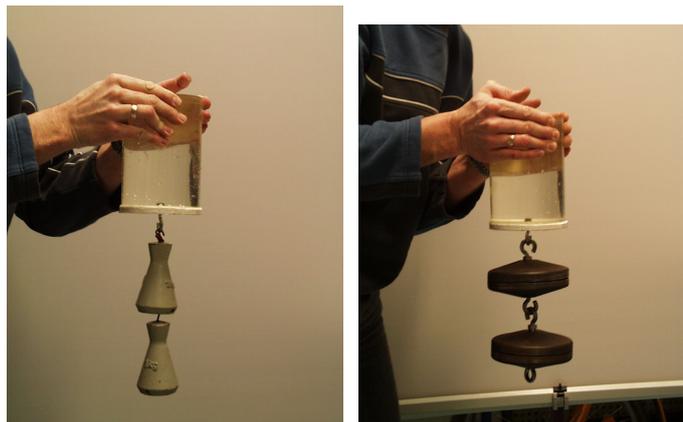


Abb.21: Lasten von 2 kg bzw. 8 kg an einem mit Wasser gefüllten und auf dem Kopf stehenden Plexiglasgefäss.

Ist schon das Experiment mit dem Wasserglas und dem Bierdeckel verblüffend, so zeigt dieser Versuch noch eindrucksvoller die enorme Kraftwirkung aufgrund von Druckunterschieden zum Luftdruck.

4. Schlussbemerkungen

Die Vakuumtechnik ist mehr oder weniger augenfällig an der Wirkungsweise oder der Herstellung von vielen Alltagsgegenständen beteiligt. Freihandexperimente zum Vakuum mit Alltagsgegenständen wie Marmeladengläsern, Saughaken oder z.B. Staubsaugern bieten zum einen die Möglichkeit für einfache Heimexperimente, zum anderen können sie motivationsfördernd im Unterricht sowohl qualitativ als auch quantitativ eingesetzt werden.

Herzlicher Dank gebührt Herrn Thomas Schnitzer für seine Mitwirkung am Halbkugelexperiment sowie Herrn Klaus Peter Möllmann, Herrn Detlef Karstädt und Herrn Adalbert Scheinemann für tatkräftige Unterstützung bei den anderen Experimenten.

5. Literaturangaben

- [1] R. Lamprecht, *Was ist Vakuum ?*, Vakuum in der Praxis **1**, 22-29 (1989)
- [2] W. Demtröder, *Experimentalphysik Bd. 1: Mechanik und Wärme*, Springer 2. Auflage, 2001
- [3] Themenheft *Wie leer ist das Vakuum*, Praxis der Naturwissenschaften Physik, **50/3** (2001)
- [4] Ch. Edelmann, *Vakuumphysik*, Spektrum 1998
- [5] M. Wutz, H. Adam, W. Walcher, *Theorie und Praxis der Vakuumtechnik*, Vieweg 1988
- [6] W. Pupp, H.K. Hartmann, *Vakuumtechnik – Grundlagen und Anwendungen*, Hanser (1991)
- [7] A. Weber, *Vakuum in modernen Flachdisplays*, Vakuum in Forschung und Praxis **3**, 175-178 (2001)
- [8] *Physik für Realschulen* (NRW 9/10), Cornelson 2000; *Physik für Gymnasien* Sek. I, Länderausgabe A, Bd. 1, Cornelson (1992)
- [9] M. Gressmann, W. Mathea, *Die Fundgrube für den Physikunterricht*, Cornelsen Scriptor 1996
- [10] H. Backe, *Das Physik-Experimentierbuch*, Harry Deutsch 1987
- [11] H. Melenk, U. Runge, P. Dräger, *Verblüffende physikalische Experimente*, 4. Auflage, Aulis 1998
- [12] CD-ROM *Physikalische Freihandexperimente*, Multimedia Physik Verlag, Inh. Veiti Braam, Alte Salzstr. 1, D-88175 Scheidegg, Tel./Fax: 08381/940937
- [13] H. Römer, *Vakuumversuche mit einfachen Mitteln*, Tagungsbeiträge Didaktik der Physik, Physikertagung 1999, Ludwigsburg
- [14] K.P. Möllmann, M. Vollmer, *Beispiele physikalischer Freihand- und Low-Cost-Experimente in der Schule*, Physik in der Schule **5/37**, 332-336 (1999)
- [15] D. Karstädt, K.P. Möllmann, M. Vollmer, *Coole Experimente*, Physik in unserer Zeit **32**, 222-228 (2001); siehe auch *Lecture demonstrations with liquid nitrogen* Im Buch und auf der zugehörigen CD-Rom: Proc Int. Conf. "Hands-On experiments in Physics Education, Duisburg, 23.-28.8.1998, Eds. G. Born, H. Harreis, H. Litschke, N. Treitz, Universität Duisburg (1999)
- [16] z.B. www.kopfball-online.de/experimente dann Stichwort Vakuum, Stand März 2002
- [17] M. Vollmer, *Motivation und Stellenwert physikalischer Freihand- und Low-Cost-Experimente in der Schule*, Physik in der Schule **3/37**, 187 - 192 (1999)
- [18] H. Dittmar-Ilgen, *Unter Druck und wider Willen: Saugknöpfe*, Physik in der Schule **37**, 386-387 (1999)
- [19] z.B.: <http://www.anver.com/document/world/German/german.htm>, oder <http://www.wimag.de/vakuumtechnik.htm> Stand März 2002