Physik und Didaktik in Schule und Hochschule
PhyDid 2/5 (2006) S.117-122

Das umgedrehte Wasserglas
- ein einfaches Experiment zur Untersuchung des Luftdrucks

Andreas Heithausen und Konrad Arnolds

Institut für Physik und ihre Didaktik, Universität zu Köln,
Gronewaldstraße 2, 50931 Köln
(Eingegangen: 08.08.2006; Angenommen: 23.11.2006)

Kurzfassung
Der einfache Versuch eines umgedrehten vollen Wasserglases, an dem von unten eine Postkarte haftet, dient häufig als Einstieg in das Thema "Luftdruck" im Physikunterricht, dem dann meist nur eine qualititative und nicht durch weitere Experimente untermauerte Erklärung folgt. In diesem Artikel zeigen wir mit Hilfe einer Reihe von Variationen des Experiments, dass sich dieser Versuch mit Hilfe des Boyle-Mariotteschen Gesetzes auch relativ einfach quantitativ beschreiben lässt.

1. Einleitung
Ein beliebter Freihandversuch zum Thema Luftdruck besteht aus einem Glas, das bis zum Rand mit Wasser gefüllt wird, dann mit einer Postkarte abgedeckt und anschließend herumgedreht wird [1,2]. Die Frage, ob die Postkarte hinunterfällt oder am Glas bleibt, wird selbst bei Physikern, die den Versuch nicht kennen, instinktiv nicht immer richtig beantwortet. Die Postkarte bleibt oben, wie man sich leicht überzeugen kann (Abb. 2). [1]
Die gängige Erklärung für den Versuch ist, dass der uns umgebende Luftdruck viel stärker ist als der Druck, den die Wassersäule im Glas auf die Postkarte ausübt [2,3,4,5]. Immerhin entspricht der Luftdruck auf Meereshöhe im Mittel etwa dem Druck, den eine 10m hohe Wassersäule ausüben würde [6]. Daher wird die Postkarte allein durch den äußeren Luftdruck an das Glas gedrückt und kann so die Wassersäule tragen. In der Literatur werden Versuchsaufbauten mit Wassersäulen von bis zu 2m Höhe beschrieben [7], die durch einen einfachen Deckel getragen werden.
Die Abdeckplatte eines Wasserglases mit einem Radius r=2,5cm müsste demnach bei Vernachlässigung des Schweredrucks des Wassers und bei einem angenommenen äußeren Luftdruck von p=1,013 10^5Pa eine Zugbelastung von

$$F = p\pi r^2 = 199N$$

aushalten können. Dies entspricht einer Masse von 19,9 kg, die man - abzüglich der Masse der Abdeckplatte- an diese anhängen können müsste. Die Abdeckplatte lässt sich aber relativ leicht wieder entfernen, und auch die von ihr maximal getragenen Gewichte sind mehr als 10mal leichter, als sie theoretisch sein könnten [3], sodass Zweifel an obiger Erklärung entstehen.
Die Erklärung des Versuchs durch den Luftdruck ist den meisten Schülern und auch den meisten Erwachsenen zudem nicht unmittelbar einleuchtend. Sie würden eher vermuten, dass das Wasser die Postkarte bzw. die Abdeckplatte an den Boden "klebt", also dass die Adhäsion zwischen Postkarte, Wasser und Glasrand für diesen Effekt verantwortlich ist. Schließlich kann man eine trockene Postkarte nicht einfach unter einen Tisch oder Schrank drücken und sie bleibt haften. Ohne weitere Belege bleibt die Erklärung des Versuchs durch den Luftdruck daher eine Behauptung.
In diesem Artikel präsentieren wir Variationen des ursprünglichen Versuchs und zeigen, dass er sich relativ einfach mit Hilfe des Boyle-Mariotteschen Gesetzes quantitativ beschreiben lässt.

2. Ein einfaches Experimentierset
Zunächst einmal soll untersucht werden, welche Aufgabe die Postkarte in dem Versuch hat. Ohne Abdeckung würde das Wasser natürlich auslaufen. Aber welche Funktion hat die Postkarte hier konkret?

Abb.1: Experimentierset für den Wasserglasversuch

[1] Bei unseren Versuchen wurde zur Ermöglichung weitergehender Untersuchungen die Postkarte durch eine stabilere Plexiglasplatte ersetzt.

Abb.2: Variationen zum Versuch mit einem umgedrehten Wasserglas, links: ein mit Wasser gefüllter Zylinder abgedeckt mit einer Plexiglasplatte; Mitte: der teilweise gefüllte Zylinder; rechts: der Zylinder abgedeckt mit einem Gitter.

Um das weiter zu untersuchen, lässt sich ein normales Konservenglas mit Schraubdeckel (s. Abb. 1) gut verwenden [8]. Der Deckel wird mit einem großen Loch versehen, welches durch Gitter mit verschiedenen Maschenweiten abgedeckt werden kann.

Man kann nun das Glas zwar durch den Deckel mit Wasser befüllen; aber wenn man das Glas mit dem Deckel nach unten hält, läuft das Wasser zur Verblüffung der Zuschauer nicht aus (s. Abb. 3). Aufgrund des Schraubdeckels spielt in dieser Versuchsanordnung die Adhäsion zwischen Postkarte, Wasser und Glasrand keine Rolle.

Abb.3: Aus einem umgedrehten Wasserglas, welches mit einem Drahtgeflecht abgedeckt ist, fließt kein Wasser.

Relativ einfach kann man nun untersuchen, bis zu welcher Maschenweite das Wasser gehalten wird. Auch kann man das Gitter durch andere, normalerweise Wasser durchlässige Stoffe ersetzen. In unseren Versuchen konnte das Wasser bei einer Maschenweite von 2mm ausfließen, während es bei 1mm noch gehalten wurde.

Das Gitter und die Postkarte dienen also nur dazu, die Oberfläche des Wassers zu stabilisieren. Bei einer großen Maschenweite ist die Oberfläche des Wassers so instabil, dass sich Luftblasen bilden

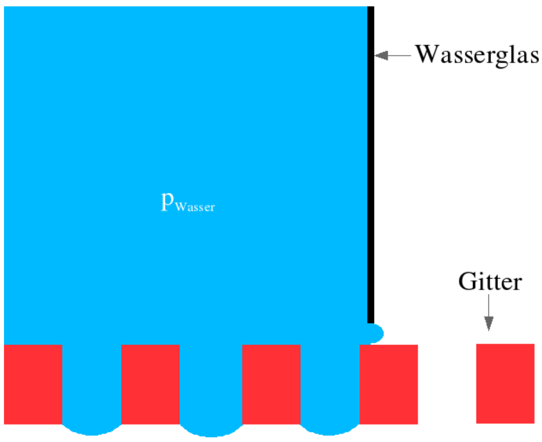

Abb.4: Schematische Darstellung der Stabilisierung der Wasseroberfläche durch ein Gitter und durch die Oberflächenspannung.

können, die aufsteigen, so dass Wasser austreten kann. Wenn man bei geringerer Maschenweite das Gitter mit dem Finger überstreicht, kann man sehen, dass kleine Wassertropfen abperlen, während gleichzeitig Luftbläschen aufsteigen. Hiermit lässt sich also gut der Einfluss der Oberflächenspannung des Wassers untersuchen (s. Abb. 4).

3. Variation des Versuchs

Um jetzt den Luftdruck als Ursache für das Halten der Postkarte bzw. der Abdeckplatte zu untermauern, lässt sich der Versuch auch in einer Modifikation durchführen. Der Effekt tritt nämlich auch auf, wenn das Glas nicht vollkommen mit Wasser gefüllt ist (s. Abb. 2, Mitte). Auch hier hält die Postkarte, aber die Erklärung ist nicht mehr so einfach. Eigentlich sollte diese Version des Versuchs gar nicht gelingen. Wenn man nämlich - was zunächst plausibel erscheint - voraussetzt, dass die Luft im Glas den gleichen Druck p_{innen} wie die äußere Luft $p_{außen}$ hat, müsste wegen der Ungleichung

$$p_{innen} + p_{Wasser} = p_{außen} + p_{Wasser} > p_{außen} \quad (1)$$

die Postkarte abfallen und das Wasser ausfließen. Da dies nicht eintritt, muss die Annahme $p_{innen}=p_{außen}$ falsch sein.

In der gängigen Literatur [2,3] wird der hier zu deutende Versuch meist dadurch erklärt, dass beim Umdrehen des Glases etwas Wasser ausläuft, aber keine Luft ins Glas strömt, wodurch sich der innere Druck verringert. Zusätzlich ist die Postkarte flexibel und durch einen leichten Andruck beim Auflegen der Karte wird das Luftvolumen im Glas verringert; nach dem Umdrehen beult sich die Postkarte zurück, wodurch der innere Luftdruck verringert wird.

Um dies experimentell zu untersuchen, ersetzt man zunächst die Postkarte durch ein Stück Plexiglas. Da dies relativ starr ist, verhindert man, dass das innere Luftvolumen durch Verbiegung der Platte verringert werden kann. Zusätzlich trocknet man die Platte ab, so dass man nach dem Drehen die ausgeflossene Wassermenge abschätzen kann. Tatsächlich tritt je nach Füllhöhe des Glases eine geringe Menge Wasser aus. Intuitiv würde man diese Menge aber als zu gering einschätzen, als dass sie den inneren Druck so zu verringern vermag, dass die unter der eingeschlossenen Luft befindliche Wassermenge getragen werden kann. Daher ist es sinnvoll, zunächst einmal die nötige Volumenänderung zu berechnen.

4. Abschätzung der nötigen Druck- und Volumenänderung

Zur Berechnung der unterschiedlichen Drücke an der Glasöffnung gehen wir zunächst vom Boyle-Mariotteschen Gesetz aus:

$$pV = const = (p + \Delta p)(V + \Delta V) \quad (2)$$

Danach ist bei konstanter Temperatur die Änderung des Luftvolumens mit der Änderung des Luftdrucks verbunden gemäß:

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{-\Delta V}{V + \Delta V} \quad (3)$$

Eine Vergrößerung des Volumens hat also eine Verringerung des Drucks zur Folge.

Wir identifizieren nun mit V das Volumen der eingeschlossenen Luft und mit p deren Druck. Wir wollen zunächst die minimale Volumenvergrößerung berechnen, die erforderlich ist, damit der äußere Luftdruck dem Gegendruck aus innerem Luftdruck und Wasserdruck standhalten kann und somit das Wasser im nur teilweise gefüllten Glas hält. Es muss gelten:

$$p_{Wasser} \leq -\Delta p \quad (4)$$

oder

$$\frac{p_{Wasser}}{p_{aussen}} \leq \frac{-\Delta p}{p_{aussen}} = \frac{\Delta V}{V + \Delta V} \quad (5)$$

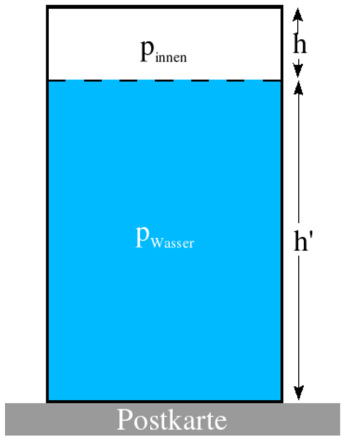

Abb.5: Schematische Darstellung der auftretenden Größen

Das Verhältnis von Volumenzunahme zum Volumen des eingeschlossenen Gases muss also näherungsweise gleich dem Verhältnis des Schweredrucks der Wassersäule zum äußeren Luftdruck sein. Da der normale Luftdruck etwa 10m Wassersäule entspricht, muss sich bei einer Wassersäule von 10cm das Volumen der eingeschlossenen Luft um 1% vergrößern. Bei einer Lufthöhe im Glas von h=5cm müsste die Platte um 0,5mm absinken, ein Effekt, der sich nicht so einfach nachmessen lässt.

Nach Gleichung 5 sollte der Nachweis aber einfacher werden, wenn die Wassersäule größer ist, also wenn man z.B. ein 1m langes Rohr verwendet. Füllt man ein solches bis zu einer Höhe von 90cm mit Wasser und lässt 10cm für die Luft, müsste die Platte um 0,9cm absinken, damit das eingeschlossene Luftvolumen so vergrößert wird, dass sein Druck entsprechend stark absinkt. Es sollte also eine messbare Menge an Wasser austreten. Abbildung 6 illustriert den entsprechenden Versuch.

5. Ausmessen der Volumenänderung

Um die auftretende Volumenänderung zu quantifizieren und mit den Vorhersagen zu vergleichen, haben wir eine Messreihe mit einem 1m langen Plexiglasrohr durchgeführt, welches einen Innendurchmesser von 4,4cm hat (Abb. 6) und auf einer Seite mit einer Plexiglasplatte zugeklebt ist. Zunächst wurde das Rohr bis zu einer bestimmten Höhe mit Wasser gefüllt, sein oberes Ende mit einer weiteren losen Plexiglasplatte abgedeckt und schließlich die gesamte Anordnung um 180° gedreht. Die Platte wurde hierbei mit einer Hand festgehalten. Durch leichtes Verringern des Anpressdrucks der Platte ließen wir vorsichtig solange Wasser tropfenweise austreten, bis die Platte gerade ohne Unterstützung hielt. Besonderer Wert wurde darauf gelegt, dass keine Luftblasen aufstiegen, die die Messungen verfälscht hätten. Danach wurde das Rohr wieder zurückgedreht und die verbleibende Wassermenge mit der Ausgangsmenge verglichen. Die Differenz der beiden Werte entspricht dem gesuchten ΔV.

Abb.6: Auch bei einem 1m langen Rohr, welches nur teilweise mit Wasser gefüllt ist, hält die auf der unteren Seite des Rohres nur angedrückte Platte.

Abbildung 7 zeigt das Resultat der Messung im Vergleich zur Vorhersage gemäß Gleichung 5. Der Wasserdruck wurde dabei wie folgt berechnet:

$$p_{Wasser} = \frac{m_{H_2O}g}{\pi r^2} = \rho_{H_2O}gh' \qquad (6)$$

wobei h' die Höhe der Wassersäule und ρ deren Dichte sind (s. Abb. 5). Während unserer Messungen sank der Luftdruck von 1015 hPa auf 1011 hPA, was einer Schwankung von 0,4% entspricht; der Luftdruck wurde daher zu 1013 hPa angesetzt. Alle Messwerte liegen oberhalb der Kurve, die den stabilen (weiß) vom instabilen Bereich (blau) trennt.

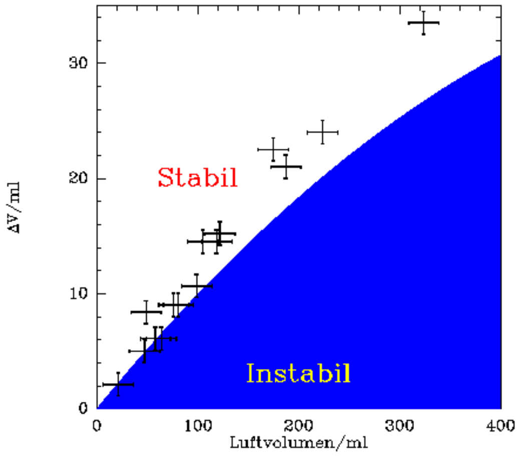

Abb.7: Die nötige Volumenänderung in Abhängigkeit vom Luftvolumen bei einem 1m langen Rohr mit 4,4cm Durchmesser. Der blaue Bereich unterhalb der Kurve kennzeichnet den instabilen Bereich, wo die angedrückte Platte nicht halten sollte. Bei Werten oberhalb der Kurve hält die Platte, was durch die Messwerte (Kreuze) demonstriert wird, die nur in diesem Bereich liegen.

Bei der Diskussion dieser Grafik sollte man darauf eingehen, dass die eingezeichnete Kurve auf einer ***Un***gleichung (Gl. 5) basiert. Denn einen stabilen Zustand erhält man auch, wenn die Volumenänderung ΔV größer ausfällt. Die Messwerte streuen deswegen nicht um die Kurve, sondern sollten alle innerhalb des Fehlerbereichs oberhalb der Kurve liegen, was tatsächlich so gemessen wurde.

6. Ausmessen der Andruckkräfte

Um die Kräfte abschätzen zu können, mit denen die Platte am Rohr gehalten wird, haben wir den Versuch abgewandelt. Mit Hilfe des in Abb. 8 dargestellten Aufbaus wurden die auftretenden Kräfte quantitativ bestimmt. Hierzu wurde ein 20cm hoher Messzylinder zunächst in normal orientierter Position bis zu einer bestimmten Höhe befüllt und danach umgedreht in eine Halterung eingespannt. Der Deckel aus Plexiglas, an dem vorher genau zentriert ein Haken mit einem Seil angebracht war, wurde beim Umdrehen fest angedrückt. Das Seil wurde über 2 Umlenkrollen umgelenkt und mit einem Federkraftmesser verbunden.

Bei der Versuchsdurchführung wurde besonderer Wert darauf gelegt, dass der Messzylinder senkrecht eingespannt war (nachgewiesen über eine kleine Dosenlibelle auf dem Boden), und dass die Plexiglasplatte genau zentriert unter dem Zylinder angeordnet war. Außerdem zog das Seil genau senkrecht nach unten, so dass Drehmomente an der Platte vermieden wurden. Es sei noch darauf hingewiesen,

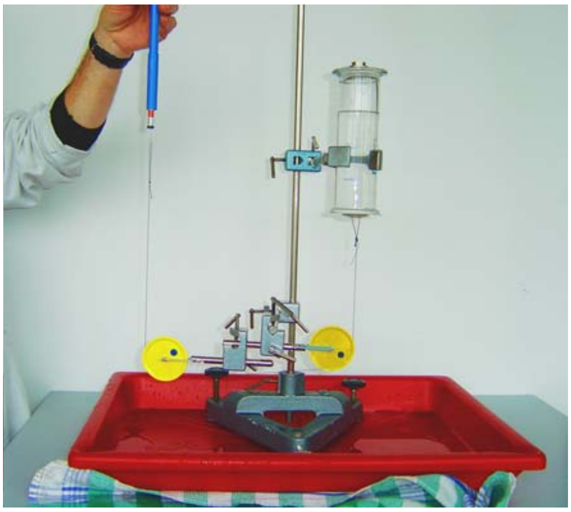

Abb.8: Experimenteller Aufbau zur Messung der Kraft, die die Abdeckplatte an den Messzylinder drückt

dass die Platte einfach nur auf den unteren Rand des Zylinders aufgelegt wurde. Keine zusätzliche Abdichtung mit Silikon o.ä. [wie z.B. in 3] wurde vorgenommen.

Abbildung 9 zeigt die benötigte Kraft, um die Glasplatte vom Rohr zu trennen, in Abhängigkeit von dem eingeschlossenen Luftvolumen. Für den Versuch wurde ein Messzylinder mit einem Volumen von 400ml benutzt. Sein Innendurchmesser war 5cm, der Außendurchmesser an der Einfüllöffnung, wo die Plexiglasplatte auflag, 7cm. Die Masse der Platte betrug 24g.

Die aufgenommenen Werte schwanken stark; sie hängen sehr davon ab, ob die Platte genau senkrecht nach unten gezogen wird und ob sie zentral aufliegt. Ansonsten treten Drehmomente auf, die die notwendige Kraft verkleinern.

Interessant ist hier, wie auch schon in der Einleitung

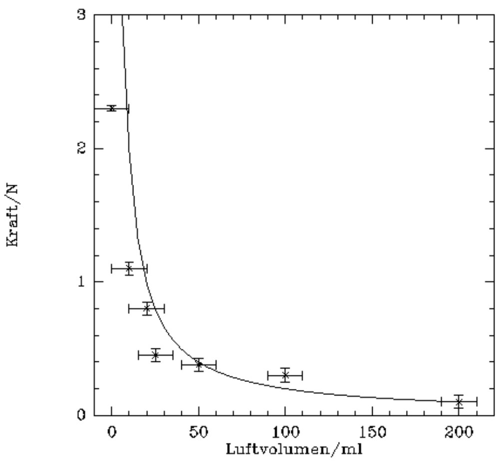

Abb.9: Maximale Zugkraft an der unteren Platte in Abhängigkeit vom eingeschlossenen Luftvolumen. Die durchgezogenen Linie gibt den nach Gleichung 7 erwarteten Verlauf wieder für den Fall, dass sich das eingeschlossene Volumen um 0,1ml vergrößert.

angesprochen, dass der Wert für verschwindendes eingeschlossenes Luftvolumen bei nur 2,3N liegt und nicht bei 199N, wie man bei einem Zylinder mit 2,5cm Radius erwarten würde. Dies liegt an den im Wasser gelösten Gasen, wobei das CO_2, welches sich am leichtesten in Wasser lösen lässt, der Hauptverursacher sein dürfte.

Um dies zumindest qualitativ zu bestätigen, wurde der Versuch mit Wasser mit verschiedenen Mengen an gelösten Gasen durchgeführt. Zunächst wurde das Wasser unter einer Vakuumglocke weitgehend entgast. Bei dem mit diesem Wasser durchgeführten Versuch lag die Kraft zum Abziehen der Platte bei 4N. Danach wurde der Versuch mit Kohlensäure versetztem Wasser durchgeführt. Hierzu wurde im Handel erhältliches Mineralwasser verwendet, das etwa 300mg/l Köhlensäure enthielt. Um zu verhindern, das sich Gasblasen bilden, die das Ergebnis verfälschen, wurde vor der Versuchsdurchführung so lange gewartet, bis keine Kohlensäurebläschen mehr aufstiegen. Bei dieser Variation des Versuchs lag die Kraft zum Abziehen der Platte deutlich unter 1N.

Da der Luftdruck von allen Seiten wirkt, nicht nur von unten, sollte das Experiment auch funktionieren, wenn man die Anordnung umdreht und die Plexiglasscheibe nach oben abzieht. In diesem Falle betrug die maximale Kraft, um die Scheibe vom Zylinder zu trennen, 6,3N bei komplett gefülltem Zylinder. Dies ist konsistent mit dem Wert aus unserer Messreihe von 2,3N, wenn man die Gewichtskraft des Wassers mit einer Gesamtmasse von 400g berücksichtigt.

Die erwartete Abhängigkeit zwischen der maximalen Zugkraft und dem eingeschlossenen Luftvolumen ergibt sich aus folgender Überlegung: durch das Auslaufen des Wassers vor dem Einwirken der Zugkraft sind die Kräfte, die an der Platte angreifen, zunächst im Gleichgewicht. Die zusätzlich wirkende Kraft muss nun das eingeschlossene Gasvolumen vergrößern. Dabei verursacht die gleiche *absolute* Volumenänderung eine größere *relative* Änderung bei kleinem Volumen als bei großem Volumen. Die Kraft, die man aufbringen muss, um die Platte vom Rohr zu trennen, ist also bei kleinem Volumen größer, gemäß (vgl. Gl. 5):

$$F = \frac{\Delta V}{V + \Delta V} p_{aussen} A \tag{7}$$

Einziger freier Parameter in dieser Gleichung ist ΔV. Durch Variation von ΔV kann man also die Kurve an die Messwerte anpassen. In unserem Fall ergab sich ΔV=0,1ml (s. Abb. 9). Bei einer Querschnittsfläche von A=19,6cm^2 entspricht dies einem Absenken der Platte von nur 0,05mm.

Es ist interessant, dass die Volumenänderung unabhängig vom Gas- oder Wasservolumen im Glas ist. Dies lässt sich mit der Oberflächenspannung des Wassers erklären: zunächst verhindert diese, dass sich Luftblasen an der Stelle bilden, wo sich Plexiglas und Glaszylinder berühren. So kann von außen keine Luft in das Glas einströmen, wodurch die Platte abgelöst würde. Senkt man aber die Platte um den obigen Betrag, dann reißt an einer Stelle die Wasseroberfläche zwischen Zylinder und Plexiglasplatte, Luft strömt in den Zylinder und die Platte fällt ab.

7. Schlussbemerkungen

Die Idee, den Versuch mit dem umgedrehten Wasserglas auszubauen, entstand aus Diskussionen mit Schülern und Kollegen, denen der ursprüngliche Versuch mit dem umgedrehten Wasserglas vorgeführt wurde. Die beschriebenen Versuche sind recht einfach. Sie lassen sich daher leicht von Schülern mit relativ wenig Aufwand nachmachen. Auch verlangt die Beschreibung keine komplizierte Theorie, einzig die Definition des Drucks und das Boyle-Mariottesche-Gesetz wurden verwendet.

Durch die Versuche wird eindrucksvoll die Stärke des Luftdrucks demonstriert. Schon kleine Volumenvergrößerungen führen zu Kräften, die ohne weiteres große Wassersäulen tragen können. Die Versuche sollen exemplarisch zeigen, dass in der Physik sich eine Behauptung (nämlich die, dass der Luftdruck das Wasser im Glas hält) auch durch Messreihen quantifizieren lassen muss.

Zusammenfassend kann man den Versuch mit dem umgedrehten Wasserglas also, wie folgt, beschreiben: der Hauptgrund, dass das Wasser im umgedrehten Glas bleibt, ist der äußere Luftdruck. Auch für den Fall, dass noch Luft im Glas eingeschlossen ist, kann man den Druck dieses eingeschlossenen Gases durch minimales Auslaufen von Wasser so verringern, dass das Glas nicht ausläuft. Da Wasser, wie jede andere Flüssigkeit, keine feste Oberfläche hat, muss diese stabilisiert werden, was in unserem Versuch durch die Postkarte, eine Plexiglasplatte oder durch ein Gitter geschieht. Wie man sich leicht überzeugen kann, spielt die Adhäsion zwischen Wasser, Glas und Platte nur eine untergeordnete Rolle: eine befeuchtete und nasse Platte alleine hält nicht unter einem Glas.

Wir danken Herrn Anton Arendt sowie den Schülern Anton Löbbert und Leonard Heithausen für ihre Unterstützung bei den Versuchsdurchführungen.

7. Literatur

[1] Physik für Gesamtschulen, Bd. 1 (NRW), Cornelsen Verlag Berlin, S. 146-147 (2001)
[2] H. J. Schlichting, Praxis der Naturwissenschaften - Physik 41/2, 27-32 (1992)
[3] M. Vollmer, PhyDid 1/1, S. 19-32 (2002)
[4] W. Rentzsch: Experimente die Spaß machen, Bd. 3, S. 89-91, Aulis Verlag (1998)
[5] C. Berthold, D. Binzer, G. Braam, J. Haubrich, M. Herfert, H. Hilscher, J. Kraus, Ch. Möller: Physikalische Freihandexperimente, Bd. 1, S. 390, Aulis Verlag (2005)
[6] W. Demtröder, Experimentalphysik I, Springer Verlag (2005)
[7] P. R. Camp, Am. Journal of Physics 44, 604-605 (1976)
[8] Teaching chemistry with toys, Terrific science books, Kits & more (http://www.terrificscience.org), S. 177-182 (2006)