

## Das umgedrehte Wasserglas – ein Irrweg im Physikunterricht? Fehlvorstellungen zum Druck und Anregungen für den Unterricht

Rolf Pelster, Fabian Schön, Thomas Klein

Universität des Saarlandes, FR Physik, Campus E2 6, 66123 Saarbrücken  
[rolf.pelster@mx.uni-saarland.de](mailto:rolf.pelster@mx.uni-saarland.de), [f.schoen@mpg-saarlouis.de](mailto:f.schoen@mpg-saarlouis.de), [t.klein@mpg-saarlouis.de](mailto:t.klein@mpg-saarlouis.de)  
 (Eingegangen: 26.03.2019; Angenommen: 17.09.2019)

### Kurzfassung

Die Vorstellung, allein die Gewichtskraft einer Flüssigkeitssäule bestimme den Druck an ihrer Unterseite, ist falsch, aber leider weit verbreitet. Die mangelnde Unterscheidung zwischen dem Schweredruck einer Flüssigkeit und dem in ihr herrschenden Druck wird u. a. dadurch begünstigt, dass der Schweredruck in der Schule in der Regel vor Einführung des Luftdrucks behandelt wird. Zu grundsätzlichen Verständnisschwierigkeiten kommt es in Situationen, in denen oberhalb des gewohnten Referenzniveaus, also der Grenzfläche zwischen Flüssigkeit und Luft, scheinbar freistehende Flüssigkeitssäulen auftreten. Beispiele hierfür sind das Herausziehen eines einseitig verschlossenen Schlauches aus einem Wasserbecken oder auch das wegen seines Überraschungseffekts beliebte Handexperiment, bei dem ein mit einer dünnen Folie abgedecktes Wasserglas umgedreht wird, ohne dass die Abdeckung abfällt und das Wasser ausläuft. Die in vielen Schulbüchern und Fachartikeln angeführte Erklärung, der Luftdruck sei viel größer als der Druck, den die Wassersäule ausübe, ist falsch und erzeugt gerade die genannte Fehlvorstellung. Wir stellen eine Versuchsreihe vor, mit der in der Klassenstufe 8 das Zusammenspiel von Luft- und Schweredruck in Flüssigkeiten vertieft behandelt und die Phänomene erklärt werden können.

### Abstract

The idea that the weight of a liquid column entirely determines the pressure at its bottom is a common misconception. The liquid's contribution to gravitational pressure is misleadingly put on a level with the overall pressure at the bottom of such a column. Possibly, this is favored by curricular requirements: at school, gravitational pressure of liquids is introduced before atmospheric pressure. The inconsistency becomes evident in situations where apparently free standing liquid columns form above the usual reference level at the liquid-air interface. One example would be pulling the closed side of a hose out of a water basin. Another one is a popular experiment, where a glass filled with water is covered by a thin sheet, and then turned upside down before releasing the sheet: surprisingly, the sheet does not fall down and no water flows out. According to many schoolbooks and articles, this provides evidence for the fact that the atmospheric pressure is much higher than the pressure exerted by the liquid. However, this explanation is erroneous and evokes the above misconception regarding the pressure in liquids. We present a series of experiments at school level (junior high school or secondary school) explaining the phenomena and aiming at a deeper understanding of the interplay between atmospheric pressure and gravitational pressure in liquids.

### 1. Einleitung

Der Themenbereich Druck wird typischerweise in der Klassenstufe 8 behandelt, wobei im Allgemeinen nacheinander Stempel- und Schweredruck in Flüssigkeiten, der Luftdruck als Schweredruck der Luft und schließlich der Auftrieb behandelt wird [1-7]. Typische Schülervorstellungen werden z. B. in [8-10] diskutiert: Dazu gehört, dass der Druck häufig als gerichtete Einwirkung auf einen Körper angesehen wird, d. h. implizit einer Kraft gleichgesetzt

wird, die sich zudem über Bewegungen bemerkbar macht. Im Unterricht sollte daher darauf geachtet werden, ein Verständnis des Drucks als ungerichtete Zustandsgröße zu erreichen, mit der sich auch Gleichgewichtssituationen von Gasen oder Flüssigkeiten beschreiben lassen, in denen sich nichts bewegt oder strömt [8-10]. In diesem Artikel befassen wir uns mit dem Zusammenspiel von Luft- und Schweredruck in Flüssigkeiten. Die Wirkung des Luftdrucks wird häufig mit dem „umgedrehten Wasserglas“ demonstriert [2-6, 11-18], einem beliebten

Freihandversuch (siehe Abb. 1). Dabei wird ein randvoll mit Wasser befülltes Glas mit einer ange-drückten Postkarte oder ähnlichem abgedeckt und umgedreht. Danach kann man den Deckel loslassen, ohne dass die Flüssigkeit ausfließt. Qualitativ lässt sich dies mit Aussagen der Art „Die Wassersäule wird vom äußeren Luftdruck gehalten“ erklären oder „Obwohl die Wassersäule von innen auf den Deckel drückt, fällt dieser nicht ab. Dies zeigt die Wirkung des außen herrschenden Luftdrucks“. Problematisch wird es beim Versuch, den Druck als physikalische Größe einzubeziehen [4, 5, 12, 14-16, 18]. Zumeist wird behauptet, der Luftdruck sei größer bzw. sogar sehr viel größer als der auf die Oberseite des Deckels wirkende Druck der Wassersäule, so dass der Luftdruck den Deckel an das Glas presst.<sup>1</sup> Als Beleg wird oftmals [12, 14-16, 18] auch explizit in Worten oder formelmäßig die Ungleichheit

$$p_{Luft} \gg p_{hyd} = \frac{F_G}{A} = \rho \cdot g \cdot H \quad \{1\}$$

angeführt. Dabei ist der hydrostatische Druck  $p_{hyd}$ , auch Schweredruck genannt, durch den Betrag der Gewichtskraft  $F_G = m \cdot g$  der über der Querschnittsfläche  $A$  stehenden Wassersäule der Masse  $m$  und Höhe  $H$  gegeben.  $\rho$  bezeichnet die Dichte der Flüssigkeit, für Wasser also ca.  $1 \text{ g/cm}^3$ , und  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  die Erdbeschleunigung. Der Luftdruck liegt in der Größenordnung von  $10^5 \text{ Pa}$ , also etwa 1 bar, wohingegen sich für eine Wassersäule der Höhe 10 cm ein etwa hundert Mal kleinerer Schweredruck einstellt. Dies klingt zunächst recht überzeugend und Gl. {1} ist in der Tat korrekt. Dennoch ist die Argumentation falsch: In der Flüssigkeit unmittelbar über der Abdeckung herrscht gar nicht der Schweredruck  $p_{hyd}$  und dort kommt es daher auch zu keinem Drucksprung von  $p_{Luft} - \rho \cdot g \cdot H$ . Der Gedankenfehler liegt in der suggerierten Vorstellung, allein die Gewichtskraft einer Flüssigkeitssäule bestimme den Druck an ihrer Unterseite<sup>2</sup> unmittelbar über der Abdeckung. Leider finden sich auch in einem experimentalphysikalischen Standardlehrbuch für die Hochschule [19, 20] hierzu nur Andeutungen, jedoch keine explizite Druckberechnung.

Wird bei der Behandlung des Drucks nicht thematisiert, dass der hydrostatische Druck einer Flüssigkeit nur einen Teilbetrag zu dem in ihr herrschenden Druck liefert,<sup>3</sup> so kommt es auch in anderen Situati-

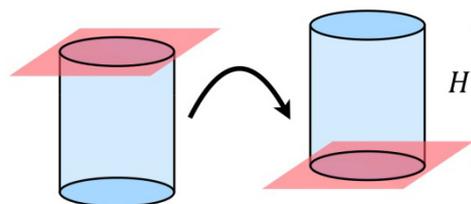
<sup>1</sup> Beispielsweise wird dies im Schulbuch [5] wie folgt formuliert: „Das Wasser fließt nicht aus, weil der Luftdruck die Postkarte mit einer Kraft andrückt, die größer ist als die innen nach unten wirkende Kraft.“

<sup>2</sup> Dies ist unseres Erachtens zunächst keine Alltags- oder Schüler-vorstellung, sondern eine Fehlvorstellung, die erst im Unterricht erzeugt wird, wenn das Zusammenspiel von Luft- und Schweredruck nicht erläutert wird.

<sup>3</sup> Darauf kann und sollte man schon bei der Einführung des Schweredrucks hinweisen.

onen zu Verständnisschwierigkeiten, insbesondere wenn sich Flüssigkeit oberhalb des gewohnten Referenzniveaus befindet (oberhalb der Grenzfläche zwischen Flüssigkeit und Luft). Nach unserer Erfahrung zögern selbst Studierende der Physik nach dem ersten Fachsemester noch, die Frage zu beantworten, welche Druckverhältnisse sich in einem wassergefüllten Gefäß oder Schlauch einstellen, dessen geschlossenes Ende man nach oben aus dem Wasser zieht.<sup>4</sup>

Wir wollen in diesem Artikel zeigen, wie man die Druckverhältnisse in Wassersäulen untersuchen kann und schlagen dazu elementare Versuche vor, die sich bereits in Klassenstufe 8 in etwa zwei Schulstunden durchführen lassen. Über das umgedrehte Wasserglas hinaus ergeben sich dabei grundlegende Erkenntnisse über das Zusammenwirken von Luft- und Schweredruck in Flüssigkeiten. Die hier gewählte Darstellung ist kein Unterrichtsentwurf, sondern bietet eine auf das Gymnasium abzielende Argumentationslinie, die nur wenige mathematisch-formale Aspekte enthält. Je nach Lerngruppe bedarf sie einer passenden didaktischen Rekonstruktion und einer methodischen Ausgestaltung. Die Experimente können mit einfachsten Mitteln durchgeführt und zusätzlich zu der üblichen Vorgehensweise an geeigneter Stelle eingeschoben werden, wenn es die Zeit erlaubt. Im Folgenden gehen wir daher davon aus, dass vorab der Schweredruck auf schulübliche Weise erarbeitet wurde, insbesondere der lineare Druckanstieg mit zunehmender Eintauchtiefe [1-7]. Wir setzen darüber hinaus voraus, dass die Existenz des Luftdrucks bereits nachgewiesen wurde, beispielsweise mittels der Magdeburger Halbkugeln, und sein Wert bekannt ist.



**Abb. 1:** Das umgedrehte Wasserglas demonstriert die Wirkung des Luftdrucks: Die zunächst angedrückte Postkarte fällt auch nach dem Loslassen nicht ab. Die qualitative Aussage, die Wassersäule werde vom äußeren Luftdruck gehalten, ist noch korrekt. Die Erklärung, die Karte werde an das Glas gepresst, weil der äußere Luftdruck um ein Vielfaches größer sei als der Druck des Wassers, ist jedoch falsch.

<sup>4</sup> Völlig irreführende Ansätze zur Druckberechnung finden sich vereinzelt auch in der Literatur, siehe z.B. [21].

## 2. Eine einfache Versuchsreihe zur vertieften Erarbeitung des Zusammenwirkens von Schweredruck in Flüssigkeiten und Luftdruck

### 2.1. Einstieg

Da das Innere des umgedrehten Wasserglases nicht ohne weiteres für Messungen zugänglich ist, beginnen wir zur Klärung der Druckverhältnisse mit einer anderen Anordnung, die sich später in die des Wasserglases überführen lässt.

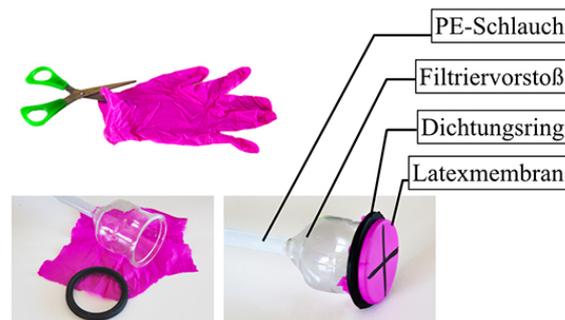
Wir tauchen wie in Abb. 2 gezeigt ein Glasgefäß vollständig in ein Wasserbecken ein, drehen es um, und ziehen es dann mit dem Boden nach oben aus dem Wasser, so dass der Rand noch unterhalb der Wasseroberfläche bleibt und sich auch keine Luftblasen im Inneren befinden. Dies ist ein bekanntes Einstiegsexperiment (siehe z. B. [4, 7]), das wir im Folgenden jedoch erheblich erweitern. Können wir herausfinden, wieso das Wasser nicht unten aus dem Gefäß herausfließt, obwohl die Gewichtskraft wirkt? Was hält das Wasser im Gefäß? Welcher Druck herrscht in der Wassersäule und wie können wir diesen messen?



**Abb. 2:** Ein Glasgefäß wird vollständig in ein Wasserbecken eingetaucht,<sup>5</sup> umgedreht, und mit dem Boden nach oben luftblasenfrei aus dem Wasser gezogen, so dass der Rand noch unterhalb der Wasseroberfläche bleibt. Das Wasser läuft dann nicht aus (siehe hierzu auch das Video „Präparation der Wassersäule“). Hier haben wir das Gefäß auf dem offenen oberen Ring eines Dreifußes abgestellt und das Wasser zur besseren Sichtbarkeit mit einem fluoreszierenden Farbstoff (Fluorescein) eingefärbt.

### 2.2. Präsentation einer einfachen Drucksonde

Eine Sonde, mit der sich positive und negative Druckdifferenzen gut sichtbar zeigen lassen, kann man sich mit einfachsten Mitteln selber bauen. Wie in Abb. 3 gezeigt, benötigt man dafür lediglich einen gläsernen Filtriervorstoß, einen Latex-Handschuh, einen passenden Schlauch sowie einen Dichtungsring. Man schiebt den Schlauch über den Auslauf des Filtriervorstoßes, legt ein aus der „Handfläche“ des Handschuhs geschnittenes Stück Latex über die Öffnung und fixiert ihn mit dem Dichtungsring.



**Abb. 3:** Bau einer einfachen Drucksonde aus einem Latex-Handschuh, einem Filtriervorstoß, einem passenden Schlauch und einem Dichtungsring für Wasserrohre. Bei Druckdifferenzen zwischen dem Inneren und dem Äußeren wölbt sich die Membran, was durch das aufgezeichnete Kreuz besser sichtbar wird (siehe Abb. 4). Aus diesem Grund haben wir auch einen hinreichend großen Filtriervorstoß verwendet.<sup>6</sup>

Zunächst wird die Drucksonde präsentiert oder vor der Klasse mit wenigen Handgriffen zusammengesteckt. Dabei wird auf die gespannte Membran hingewiesen. Da auf beiden Seiten der gleiche Druck  $p_{Luft}$  herrscht, ist die Membran eben. Wirken zusätzliche Kräfte, wölbt sich die Membran, was man dadurch demonstrieren kann, dass man Luft aus dem Schlauch saugt (die Membran wölbt sich nach innen) oder in den Schlauch hineinbläst (die Membran wölbt sich nach außen). Mit dieser Sonde kann man nun Druckunterschiede qualitativ erfassen.<sup>7</sup>

### 2.3. Demonstration des Druckverlaufs unterhalb und oberhalb der Flüssigkeitsoberfläche

Im Folgenden befindet sich das offene Schlauchende immer außerhalb des Wassers, so dass an der Innenseite der Membran der Luftdruck  $p_{Luft}$  herrscht. Das Schlauchende mit der Membran wird nun, wie in Abb. 4a-c gezeigt, immer weiter eingetaucht. Es ist deutlich zu sehen, dass sich die Membran umso stärker nach innen wölbt, je tiefer sie eingetaucht wird. Die Wölbung der Membran ist ein Maß für die Druckdifferenz<sup>8</sup> zwischen dem Druck in der Flüssigkeit und dem konstanten Druck im Schlauchinneren,  $p_{Luft}$ . Der Druck der Flüssigkeit nimmt mit zunehmender Tiefe offensichtlich zu.

<sup>6</sup>Hier: Filtriervorstoß E573.1 für 50 ml Tiegel, Carl Roth GmbH (Innendurchmesser 50 mm; Außendurchmesser des Auslaufs 10mm).

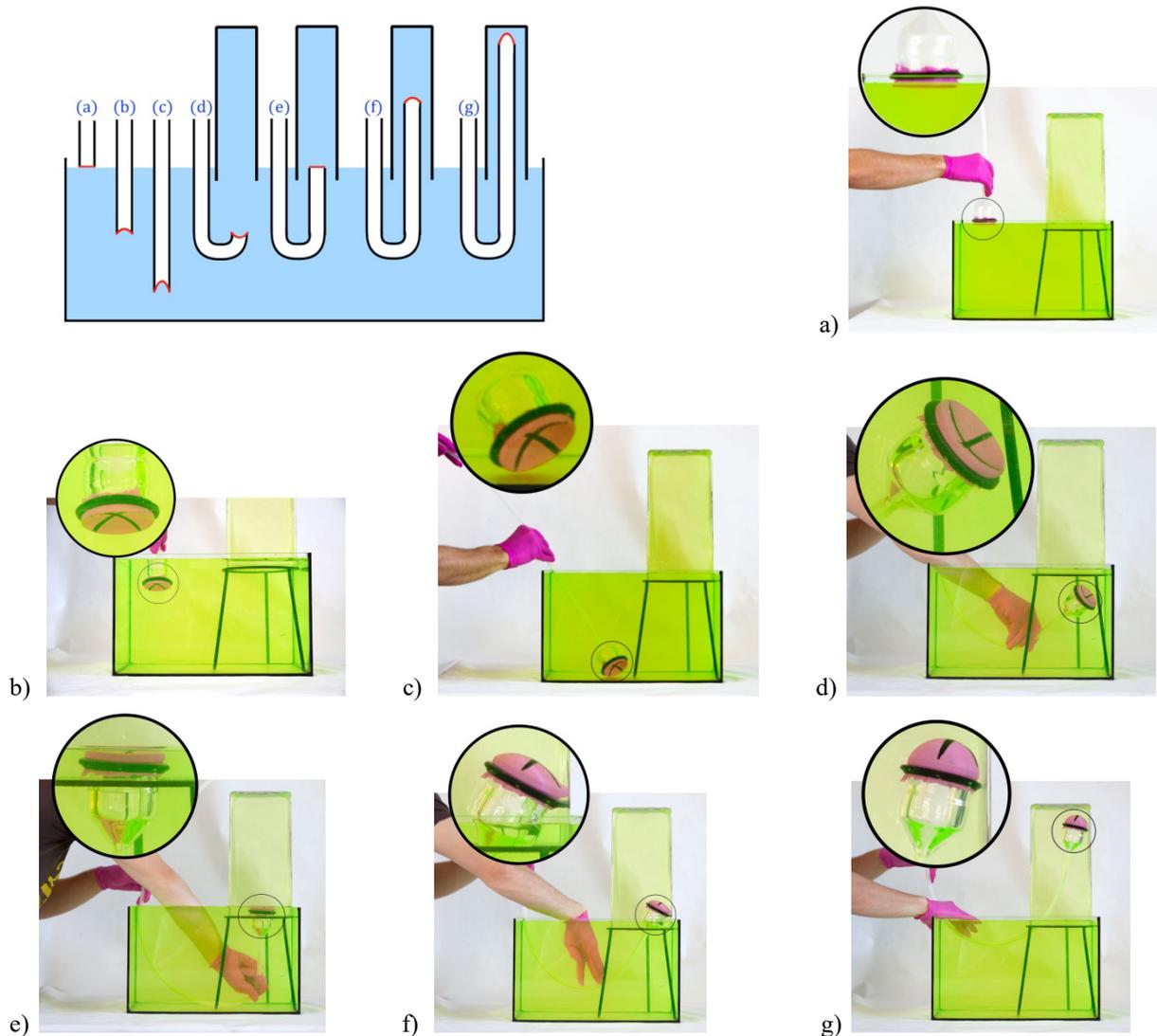
<sup>7</sup>In [7] wird vorgeschlagen, mit einer ähnlichen Sonde aus einem Trichter und einer Luftballonhülle die Allseitigkeit des Drucks unterhalb der Wasseroberfläche nachzuweisen.

<sup>8</sup>Wie in Abb. 4 zu sehen ist, wölbt sich die Membran über einen gewissen Tiefen- bzw. Höhenbereich. Auch ist bei einer Wölbung nach außen (Messung in Höhe  $h$ ) der Durchmesser der Grundfläche gleich dem Außendurchmesser des Filtriervorstoßes, bei einer Wölbung nach innen (Messung in Tiefe  $t$ ) jedoch gleich dem Innendurchmesser. Da wir hier jedoch nur qualitativ arbeiten, ist es nicht nötig, die Sonde zu kalibrieren.

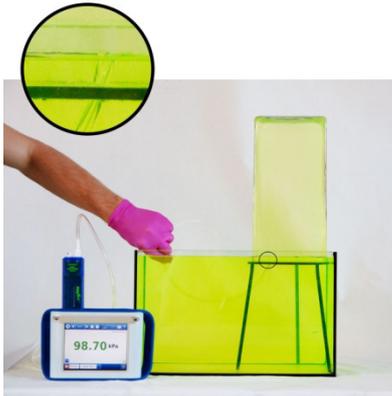
<sup>5</sup> Maße des Glasgefäßes: Grundfläche 10 cm x 15 cm, Höhe 30 cm. Maße des Beckens: Grundfläche 40 cm x 25 cm, Höhe 25 cm.

Nun wird die Drucksonde unter die Öffnung des umgedrehten Gefäßes gebracht und im U-Bogen wieder nach oben geführt (Abb. 4d). Das Schlauchende zeigt mit der Membran immer nach oben und die Wölbung der Membran geht zurück, bis sie auf der Höhe des Wasserspiegels wieder eben ist (Abb. 4e). An der Stelle herrscht also auch der Druck  $p_{Luft}$ . Je höher die Messmembran in das Glasgefäß geschoben wird, desto stärker wölbt sie sich (Abb. 4f und g), diesmal aber nach außen. Der

Druck in der Flüssigkeit vor der Membran ist nun also kleiner als der Luftdruck im Schlauchinneren. Der Verlauf des Experimentes ist im Video „Druckmessung unter- und oberhalb des Wasserspiegels“ zu sehen. Der Druck lässt sich mit anderen Sensoren auch quantitativ messen (siehe Abb. 5). Wir haben hier der qualitativen Messung den Vorzug gegeben, da die Druckverhältnisse so unmittelbar sichtbar werden.



**Abb. 4:** a) Auf Höhe der Flüssigkeitsoberfläche ist die Membran der Drucksonde eben. b) und c) Je weiter die Sonde eingetaucht wird, desto stärker ist die Membran gewölbt. d) Wird die Drucksonde nun im Bogen wieder nach oben geführt, nimmt die Wölbung der Membran wieder ab. e) Auch unter dem umgedrehten mit Wasser gefüllten Gefäß ist die Membran auf Höhe des äußeren Wasserspiegels eben. f) und g) Je weiter die Sonde nach oben geschoben wird, desto stärker ist die Membran nach außen gewölbt, d. h. desto kleiner ist der Druck in der Flüssigkeit.



**Abb. 5:** Alternativ oder ergänzend zu der qualitativen Demonstration kann der Druck auch quantitativ gemessen werden (hier mit einem Pasco-Drucksensor; auf dem Bild befindet sich das Sondenende im umgedrehten Gefäß).

#### 2.4. Schlussfolgerungen:

Das Ergebnis der Messung lässt sich wie folgt zusammenfassen (siehe Abb. 6):

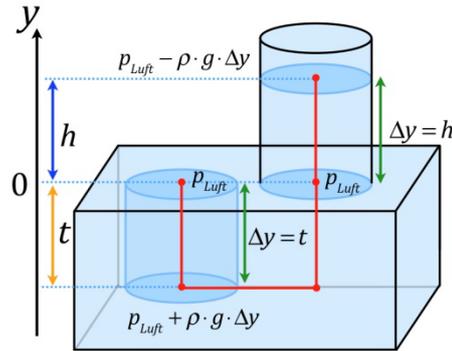
- Auf der Höhe der Flüssigkeitsoberfläche herrscht immer der Druck  $p_{Luft}$ , auch innerhalb des Zylinders. Der Druck hängt dort also offensichtlich nicht von der Gewichtskraft der darüber befindlichen Wassersäule ab!
- Je größer die Eintauchtiefe  $t$ , desto größer der Druck. In der Tiefe  $t > 0$  herrscht ein Druck  $p > p_{Luft}$  (Abb. 6 links). Aus den vorherigen Unterrichtseinheiten zum Schweredruck ist bereits bekannt, dass der Druck linear mit  $t$  anwächst:

$$p(t) = p_{Luft} + \rho \cdot g \cdot t \quad \{2a\}$$

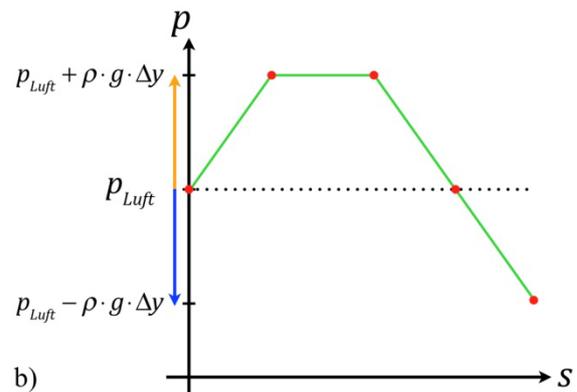
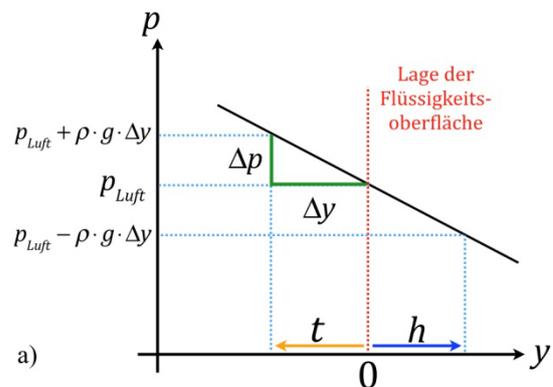
für Tiefen  $t \geq 0$ . Zwischen der Unter- und der Oberseite einer Wassersäule, die von der Wasseroberfläche bis in die Tiefe  $t$  reicht, herrscht ein Druckunterschied  $\Delta p = p(t) - p(0) = \rho \cdot g \cdot t$ . Diese Druckdifferenz ist genau der hydrostatische Druck bzw. Schweredruck  $F_G/A$  aus Gl. {1}. Er darf nicht mit dem absoluten Druck an einer Stelle in der Flüssigkeit verwechselt werden.

- Im umgedrehten Gefäß sinkt der Druck mit zunehmender Höhe oberhalb des Wasserspiegels: In der Höhe  $h > 0$  herrscht ein Druck  $p < p_{Luft}$ . Bei der in Abb. 6 rechts skizzierten zugehörigen Wassersäule (zwischen der Höhe  $h$  und dem Niveau des Wasserspiegels bei  $y = 0$ ) muss der Druck auf der Unterseite aufgrund der Gewichtskraft um  $\Delta p = \rho \cdot g \cdot h$  höher sein als auf ihrer Oberseite. Es gilt daher für  $h \geq 0$ :

$$p(h) = p_{Luft} - \rho \cdot g \cdot h. \quad \{2b\}$$



**Abb. 6:** Qualitative Darstellung der Messergebnisse. Da auf die Wasseroberfläche der äußere Luftdruck wirkt, herrscht in der Tiefe  $t$  der Druck  $p_{Luft} + \rho \cdot g \cdot t$ . In der Höhe  $h$  herrscht hingegen der Druck  $p_{Luft} - \rho \cdot g \cdot h$ . In beiden Fällen ist der Druck an der Unterseite der jeweiligen Wassersäule der Höhe  $\Delta y$  um  $\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta y$  größer als der Druck an der Oberseite.



**Abb. 7:** a) Druckverlauf in der Flüssigkeit als Funktion der Höhenkoordinate  $y$  unterhalb und oberhalb des Wasserspiegels. b) Druckverlauf entlang des in Abb. 6 rot eingezeichneten Weges  $s$ .

Der Druck in der Flüssigkeit nimmt wie in Abb. 7 gezeigt kontinuierlich von unten nach oben ab, und zwar unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche genauso wie oberhalb (im Bereich des gefüllten Gefäßes).<sup>9</sup>

<sup>9</sup> Letzteres liegt daran, dass der Druck an der Unterseite einer Wassersäule der Höhe  $\Delta y$  aufgrund der Schwerkraft immer

Nun kann die Frage beantwortet werden, weshalb die Flüssigkeit nicht unter dem Einfluss der Schwerkraft nach unten aus dem Gefäß ausströmt. Zwar wirkt auf jeden Flüssigkeitstropfen die nach unten gerichtete Gewichtskraft, unter jedem Tropfen befindet sich jedoch Flüssigkeit unter einem höheren Druck, so dass er nicht in diesen Bereich absinken kann. Das ist bei einem gewöhnlichen mit Wasser gefüllten Glas auch nicht anders. Wurde bereits der Auftrieb behandelt, so lässt sich dies vertiefen: Für jeden Tropfen kompensieren sich Gewichtskraft und die durch den Druckgradienten hervorgerufene Auftriebskraft (siehe z. B. S. 54 und Abb. 4 in [22]).

Man kann auch anders argumentieren: Die Wassersäule kann nicht als Ganzes nach unten aus dem Gefäß herausrutschen. Da sich der Gefäßrand unter Wasser befindet, können keine Luftblasen eindringen und den Platz des Wassers einnehmen. Es kann oberhalb der Wassersäule kein „leerer“ Raum (mit einem Druck nahe 0 bar) entstehen, weil an ihrem oberen Ende der Druck  $p_{Luft} - \rho \cdot g \cdot h > 0$  herrscht. Ein solches Ungleichgewicht würde dazu führen, dass sich die Lücke sofort wieder schließt.<sup>10</sup>

Die Wassersäule bleibt also im Gefäß, man muss aber natürlich von außen eine Kraft aufwenden, um die Masse der Wassersäule und des Glases „in Position“ zu halten.<sup>11</sup> Lässt man los bzw. entfernt man den untergestellten Dreifuß, so sinken beide zusammen zurück ins Becken.

Mögliche Aufgaben zur Vertiefung des bisher Erarbeiteten reichen von der Berechnung der absoluten (in Pa angegebenen) Druckwerte an verschiedenen

---

um  $\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta y$  größer ist als der Druck an ihrer Oberseite, unabhängig von der absoluten Lage dieser Ebenen. Anders ausgedrückt: Der Schweredruck bestimmt die Höhenabhängigkeit  $\partial p / \partial y = -\rho \cdot g$  des Drucks und damit die Steigung in Abb. 7a. Um den absoluten Wert des Drucks in der Flüssigkeit angeben zu können, muss man zumindest einen Referenzwert für eine bestimmte Höhe kennen (in Gl. 2a und b ist dies  $p_{Luft}$  auf der Höhe des Flüssigkeitsspiegels). Würde man das Experiment in einer Druckkammer durchführen, würde sich dieser Referenzwert entsprechend ändern und damit auch der Druck überall in der Flüssigkeit.

<sup>10</sup> Adhäsionskräfte zwischen den Flüssigkeitsmolekülen und der Gefäßwand muss man zur Begründung also nicht anführen. In der Tat kann man eine Wassersäule auch in einem umgedrehten Teflongefäß nach oben ziehen. Erst wenn der Druck in der Flüssigkeit unter deren Dampfdruck fällt, kann sich oberhalb der Säule eine Gasblase bilden (siehe Abschnitt 3).

<sup>11</sup> Stellt man sich einen eingetauchten Kolbenprober bzw. eine Spritze vor, so herrscht oberhalb des Kolbens der Druck  $p_{Luft}$ , in der Flüssigkeit darunter hingegen  $p_{Luft} - \rho \cdot g \cdot h$ . Bei einer Querschnittsfläche  $A$  muss daher die Kraft  $\Delta p \cdot A = \rho \cdot g \cdot h \cdot A = m_{Säule} \cdot g$  aufgewandt werden, um die Säule zu halten. In Abb. 2, 4 und 5 kompensiert der untergestellte Dreifuß eine Kraft dieses Betrags zusätzlich zur Gewichtskraft des Gefäßes. Die zum Anheben der Flüssigkeitssäule von 0 auf die Höhe  $h$  verrichtete Hubarbeit ist  $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot h^2 \cdot A = m_{Säule} \cdot g \cdot h/2$ .

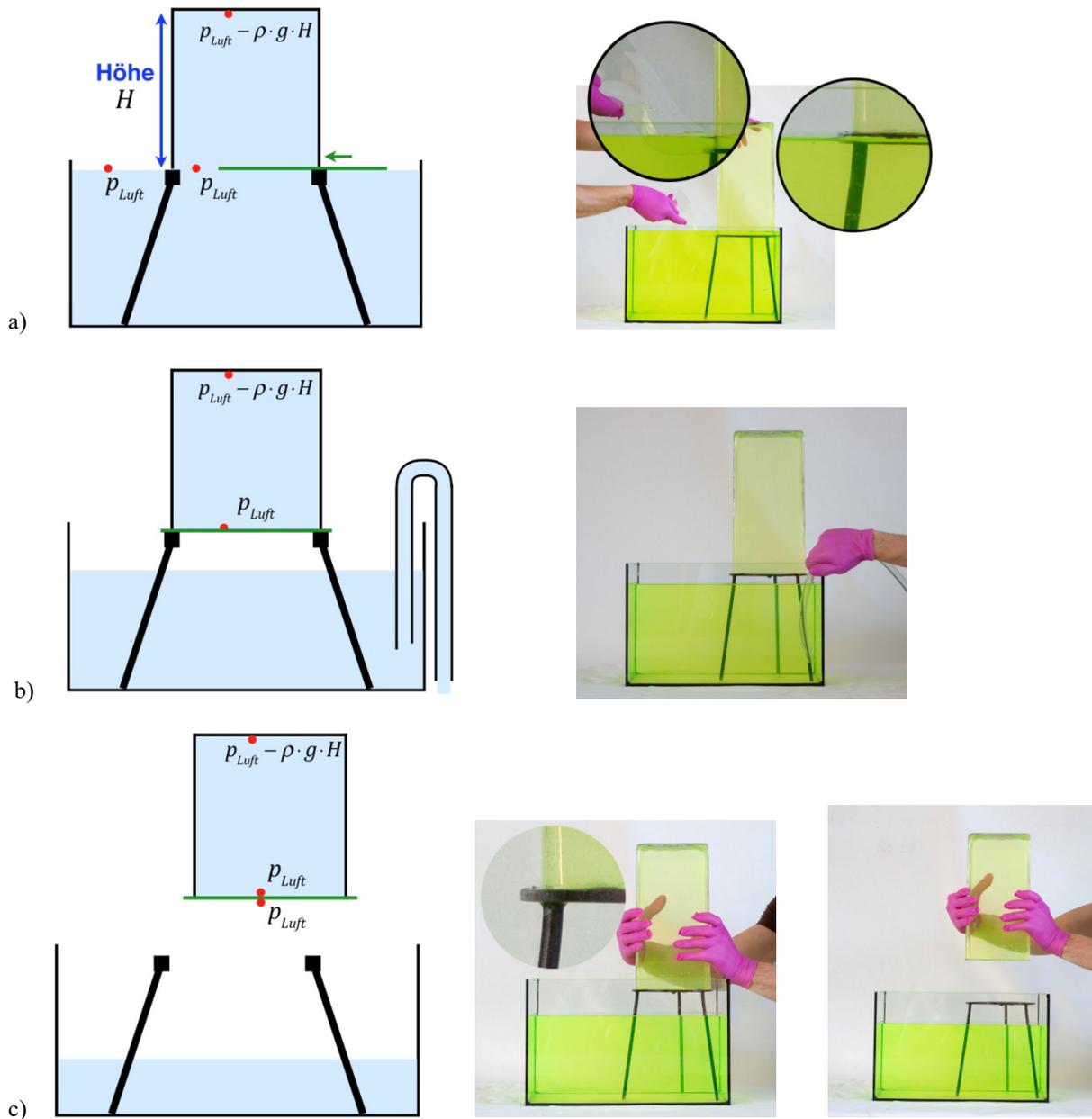
Stellen in der Flüssigkeit (Skizze ähnlich wie Abb. 6, jedoch mit Markierungen und entsprechenden Längenbemaßungen), über die Angabe der Druckdifferenz zwischen den Enden von Wassersäulen, die von einer Tiefe  $t$  bis in eine Höhe  $h$  reichen, bis hin zur Darstellung des Druckverlaufes entlang eines skizzierten Weges (ähnlich wie in Abb. 7b). Beschränkt man sich darauf, das Zusammenspiel zwischen Luft- und Schweredruck zu erläutern, ohne auf das in Abb. 1 gezeigte Experiment des umgedrehten Wasserglases einzugehen, kann die Versuchsserie bereits an dieser Stelle beendet werden.

## 2.5. Übergang zum umgedrehten Wasserglas

Brauchen wir das Wasser im Becken noch, um die Druckverhältnisse in der Wassersäule und damit die Säule selbst aufrechtzuerhalten? Um dies experimentell zu klären, schieben wir eine dünne durchsichtige Kopierfolie zwischen das umgedrehte Wasserglas und den Standfuß (Abb. 8a). Die Kopierfolie befindet sich idealerweise möglichst dicht unter der Wasseroberfläche (gegebenenfalls kann man nach der Platzierung der Folie etwas Wasser aus dem Becken entfernen). Wir haben bewusst eine Folie gewählt, da sie leicht und flexibel ist und im Gegensatz zu einem Bierdeckel kein Wasser aufnimmt. Nun lassen wir über einen Saugheber das Wasser aus dem Becken ablaufen<sup>12</sup> (Abb. 8b) und stellen fest: Die Flüssigkeit im umgedrehten Gefäß läuft nicht aus. Als Nächstes heben wir das Gefäß einfach an (Abb. 8c). Die Folie fällt nicht ab und das Wasser läuft nicht aus (siehe das Video „Übergang von herausgezogener Wassersäule zum umgedrehten Wasserglas“). Der äußere Druck hat sich gegenüber der ursprünglichen Situation – umgedrehtes Gefäß im Wasserbecken – nicht geändert (vgl. Abb. 8a und c). Zu Beginn befand sich unter der Folie Flüssigkeit (Abb. 8a), die durch das Ablassen des Wassers aus dem Becken lediglich durch Luft des gleichen Drucks ersetzt wurde (Abb. 8c). Wenn keine zusätzlichen physikalischen Mechanismen auftreten, sollten sich auch die Druckverhältnisse der Flüssigkeit im Gefäßinneren nicht ändern: Direkt über der Folie sollte ein Druck von etwa  $p_{Luft}$  herrschen, der nach oben abnimmt und an der höchsten Stelle den Wert  $p_{Luft} - \rho \cdot g \cdot H$  erreicht.

---

<sup>12</sup> Versucht man, das große Gefäß aus dem Wasser zu heben, kann es leicht passieren, dass man die flexible Folie nicht richtig an den Gefäßrand drückt – es entsteht ein größerer Spalt und das Wasser läuft aus. Um dies zu vermeiden, bleibt das Gefäß zunächst stehen und wir lassen Wasser aus dem Becken ablaufen. Auch wenn sich die Kontaktfläche zwischen Gefäßrand und Folie zunächst in einer gewissen Tiefe bei höherem Druck befindet, stellt sich dort schließlich ein Druck von etwa  $p_{Luft}$  ein, wenn der Wasserspiegel gesunken ist. Dies liegt daran, dass die Folie das Gefäß aufgrund der Oberflächenrauigkeiten nie hermetisch abschließt. Um aber keine unnötige Verwirrung zu stiften, sollte sich der Gefäßrand von vornherein dicht unter der Wasseroberfläche befinden.



**Abb. 8:** a) Eine dünne transparente Kopierfolie wird unter das Gefäß geschoben, wodurch sich die Druckverhältnisse nicht ändern (auf dem linken Foto befindet sich die Folie leicht unterhalb des Wasserspiegels. Auf dem rechten hingegen nach Abschöpfen von etwas Wasser auf der Höhe des Wasserspiegels. b) Das Wasser im Becken wird mittels eines Saughebers entfernt. Die Flüssigkeit läuft nicht aus dem Glasgefäß. c) Das gefüllte Gefäß wird angehoben. Die Folie fällt nicht ab und das Wasser läuft nicht aus. Experimenteller Hinweis: Es ist von Vorteil, einen Dreifuß mit einem runden oberen Ring zu verwenden, um die Kontaktfläche mit der Folie und damit mögliche Adhäsionseffekte zu minimieren. Man beachte, dass die Druckverhältnisse bei b) und c) nur näherungsweise gelten, solange die kapillare Adhäsion im Randspalt zwischen Gefäßrand und Abdeckung zu keiner merklichen Druckabsenkung führt, so wie das z. B. bei leichten flexiblen Folien der Fall ist.

Wenn die Folie aber nicht durch einen „großen“ Außendruck gegen das gefüllte Gefäß gedrückt wird, wieso fällt sie dann nicht einfach nach unten? Sie ist zwar sehr leicht, hat aber doch eine Masse, so dass eine Gewichtskraft auf sie wirkt, auch wenn diese nur klein ist. Befindet sich kein Wasser im Gefäß, so herrscht auf beiden Seiten der Luftdruck, und die Folie fällt zu Boden, sobald wir sie loslassen. Ist das Gefäß aber mit Wasser gefüllt, passiert das nicht,

d. h. es muss einen zusätzlichen – von uns bisher vernachlässigten – Effekt geben, der das Herunterfallen verhindert. Einen Hinweis erhalten wir, wenn wir ein leeres (also nur mit Luft gefülltes) Glas mit der Öffnung nach unten halten, den Rand oder die Folie mit Wasser befeuchten und dann andrücken. Nun hält die Folie, da anziehende Kräfte wirken: Kohäsionskräfte halten die Flüssigkeitsmoleküle

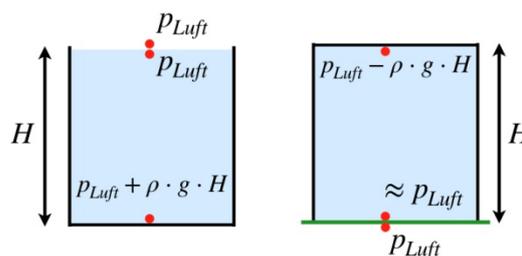
zusammen,<sup>13</sup> Adhäsionskräfte halten sie an den Oberflächen von Gefäß und Folie. Auch beim gefüllten Gefäß befindet sich zwischen Gefäßwand und Folie solch ein dünner Flüssigkeitsfilm, so dass die Folie aufgrund „kapillarer Adhäsion“ hält.<sup>14</sup> Die Adhäsion hängt von den gewählten Materialien<sup>15</sup> und der Güte der Kontaktflächen ab, die möglichst glatt und sauber sein sollten.

Die Flüssigkeit im umgedrehten Gefäß kann nicht einfach zwischen Glasrand und Folie auslaufen – dazu müssten Luftblasen eindringen, was die Kohäsions- und Adhäsionskräfte ebenfalls verhindern, solange der Flüssigkeitsfilm hinreichend dünn ist, d. h. sich die Folie gut an den Gefäßrand anschmiegt (aus diesem Grund drückt man sie beim Umdrehen im Allgemeinen an).<sup>16</sup> Diese Kräfte sorgen also für eine Art „Selbstversiegelung“, obwohl die Kontaktfläche zwischen Gefäß und Folie eine gewisse Rauigkeit aufweist und nicht hermetisch abgedichtet ist.

Nun kann auch der in Abb. 1 gezeigte Versuch – das Umdrehen eines mit Wasser gefüllten und abgedeckten Glases durchgeführt und besprochen werden. Im Video „Drehen eines Wasserglases mit Folie“ zeigen wir das mit einer dünnen flexiblen Folie. Wird sie vorher richtig auf den Glasrand aufgelegt, kann man das Glas sogar wie gezeigt schnell umdrehen, ohne die Folie dabei anzudrücken.

Im Video „Drehen eines Wasserglases mit Bierdeckel“ kommt ein Bierdeckel zum Einsatz. Es ist deutlich zu sehen, dass dieser Wasser aufsaugt. Um die Vorstellung zu vermeiden, der ganze Effekt beruhe auf einem dadurch entstehenden Unterdruck, empfehlen wir, Folien oder laminierte Karten zu verwenden. Für das umgedrehte Wasserglas gilt das Gleiche wie zuvor: Die Wassersäule der Höhe  $H$  übt nicht den hydrostatischen Druck  $\frac{F_G}{A} = \rho \cdot g \cdot H$  auf die Folie aus. Auch hier bestimmt der Luftdruck den Druck der Flüssigkeit an der Grenzfläche: Sowohl

vor als auch nach dem Umdrehen des Glases herrscht auf beiden Seiten der Folie (vernachlässigbar kleiner Masse) der Druck  $p_{Luft}$ , und der Druck nimmt im Wasser nach unten hin zu (siehe Abb. 9).



**Abb. 9:** Druckverhältnisse vor und nach dem Umdrehen eines mit Wasser gefüllten und mit einer leichten flexiblen Folie abgedeckten Glases (vgl. Abb. 1).

### 3. Hinweise für folgende Unterrichtsstunden: Das Barometer oder die maximale Höhe einer Flüssigkeitssäule

Im Anschluss an den Schweredruck in Flüssigkeiten wird im Schulstoff der Klasse 8 bei der Behandlung des Luftdrucks auch oftmals das Flüssigkeitsbarometer besprochen [1-7]. Dies ist im Wesentlichen nichts anderes als eine gedankliche Erweiterung des Experimentes aus Abb. 2: Lassen sich mit einem geeigneten Gefäß oder Schlauch beliebig hohe Säulen aus einer Flüssigkeit ziehen?<sup>17</sup> Auch hier wäre es irreführend zu argumentieren, der Luftdruck könne die Säule nur halten, solange deren Gewichtskraft nicht zu groß ist. Die maximale Höhe einer Flüssigkeitssäule wird nicht dadurch festgelegt, dass der Druck am unteren Ende zu groß wird: Auf Höhe des Flüssigkeitsspiegels herrscht immer der Luftdruck.

Entscheidend für die maximale Höhe der Säule ist vielmehr, dass der Druck am oberen Ende so klein wird, dass ein Übergang in den gasförmigen Zustand erfolgt. Dies ist in Abb. 10 skizziert. Je höher die Säule wird, desto kleiner wird der Druck an ihrer Oberseite, bis die Flüssigkeit dort schließlich in den gasförmigen Zustand übergeht – auch wenn sie sich nur auf Raumtemperatur befindet. Flüssigkeiten enthalten i. A. Nukleationskeime<sup>18</sup> und sieden bei

<sup>13</sup> Ohne Kohäsionskräfte würde eine Flüssigkeit instantan vor unseren Augen verdunsten.

<sup>14</sup> Den fachlichen Hintergrund erläutern wir in einem folgenden Beitrag detaillierter. Die Flüssigkeit zwischen Gefäßrand und Folie bildet konkave Menisken aus. Dies führt zu einem negativen Druckbeitrag, dem sogenannten Laplace-Druck, der von der Höhe des Randspaltes und den Wechselwirkungen an den Grenzflächen abhängt, u. a. von der Oberflächenspannung der Flüssigkeit. Bei leichten flexiblen Abdeckungen, an denen Kräftegleichgewicht herrschen muss, ist die Druckabsenkung sehr klein (die Gewichtskraft der Folie ist klein im Vergleich zum Produkt aus Luftdruck und Querschnittsfläche). Dann entspricht der Druck oberhalb der Abdeckung in guter Näherung dem Luftdruck. Im Gegensatz zur weit verbreiteten Vorstellung herrscht auf beiden Seiten der dünnen Folie also in etwa der gleiche Druck.

<sup>15</sup> Wasser benetzt z. B. kein Teflon, so dass diese Kombination zu vermeiden ist.

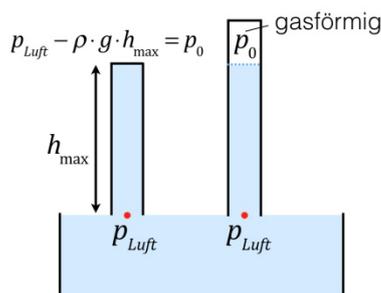
<sup>16</sup> Die Folie sorgt also dafür, dass die Grenzfläche zwischen Luft und Flüssigkeit hinreichend klein und damit stabil wird.

<sup>17</sup> Dies kann man auch mit einem Schulversuch untersuchen, indem man einen langen transparenten Schlauch in einem Wasserbecken füllt, einseitig verschließt und dieses Ende dann nach oben zieht (siehe [2] auf S. 182 oder [4]). Will man vermeiden, dass mit abnehmendem Druck im Wasser gelöste Gase freigesetzt werden und sich am oberen Schlauchende sammeln, muss man das Wasser kurz vorher entgasen. In [3] wird vorgeschlagen, am oberen Schlauchende eine Pumpe einzusetzen, die den Druck dort auf den Dampfdruck  $p_0$  reduziert. Allerdings lenkt dies von der höhenbedingten Druckabsenkung ab.

<sup>18</sup> Dies sind z. B. kleinste Gasblasen in festen Verunreinigungen mit Rissen und Spalten [23] bzw. Blasen in den Wänden der Behälter, an die sich beim Sieden weitere Gasmoleküle anlagern. Will man die Blasenbildung im Flüssigkeitinneren (Kavitation) und damit das Sieden behindern, muss man die Nukleationskeime

Erreichen ihres Dampfdrucks  $p_0$ , d. h. wenn  $p_0 = p_{Luft} - \rho \cdot g \cdot h_{max}$  gilt. Zieht man das Gefäß weiter nach oben, reicht die Säule weiterhin nur bis zur Höhe  $h_{max}$ , während sich über ihr immer Flüssigkeitsdampf befindet (rechts in Abb. 10). Da im Allgemeinen  $p_0 \ll p_{Luft}$  gilt, lässt sich der Luftdruck an der Säulenhöhe ablesen. Für Wasser ergeben sich typischerweise<sup>19</sup> Werte von etwa  $h_{max} \approx p_{Luft}/(\rho \cdot g) \approx 10,1$  m. Gelingt es, die Nukleationskeime zu eliminieren, behindert man den Übergang in den gasförmigen Zustand, der das Ablösen der Flüssigkeitssäule vom oberen Gefäßboden erst ermöglicht.<sup>20</sup> In der Tat wurden so mit Wasser Säulenhöhen von  $H \approx 15$  m erreicht [24, 25], für die  $\rho \cdot g \cdot H > p_{Luft}$  gilt.

Das Experiment mit dem umgedrehten und abgedeckten Wasserglas könnte für (sicherlich unhandliche) Glashöhen oberhalb  $h_{max}$  schon prinzipiell nicht mehr funktionieren: Beim Umdrehen würde die Flüssigkeit im oberen Teil siedend, ein größeres Volumen einnehmen und die restliche Flüssigkeit aus dem Gefäß verdrängen, so dass die Folie abfallen und das Wasser auslaufen würde. Auch hier scheitert das Experiment nicht daran, dass der Druck am unteren Säulenende zu groß wird, sondern daran, dass er am oberen Ende zu klein wird.



**Abb. 10:** Zur maximalen Höhe einer Flüssigkeitssäule beim Herausziehen eines Schlauches aus einem Becken.  $p_0$  bezeichnet den Dampfdruck der Flüssigkeit ( $p_0 \ll p_{Luft}$ ). Die Anordnung links zeigt den (idealisierten) Grenzfall für eine Flüssigkeit, aus der keine gelösten Gase entweichen. Die Anordnung rechts entspricht der eines Barometers, bei dem man den Wert des zeitlich variierenden Luftdrucks an der Höhe der Flüssigkeitssäule ablesen kann:  $p_{Luft} \approx \rho \cdot g \cdot h_{max}$ . Um mit niedrigen Flüssigkeitssäulen arbeiten zu können, werden Stoffe hoher Dichte verwendet (z. B. Quecksilber mit einer 13,6 Mal höheren Dichte als Wasser).

beseitigen, bei Wasser beispielsweise durch wochenlanges Entgasen [25] und gegebenenfalls den Zusatz von Tensiden [24]. Bei größeren Säulenhöhen wird der Druck an der höchsten Stelle negativ, was vielleicht ungewohnt aber unproblematisch ist, da der Referenzwert der Druckskala frei wählbar ist (siehe z. B. Kapitel 3 und 5.2 in [22]).

<sup>19</sup> Wasser hat bei 20°C einen Dampfdruck von etwa  $p_0 = 2,3393$  kPa, die Dichte ist  $\rho = 10^3$  kg/m<sup>3</sup>. Für den Luftdruck haben wir den Wert  $p_{Luft} = 101,325$  kPa eingesetzt.

<sup>20</sup> Siehe hierzu auch die Ausführungen am Ende von Kapitel 2.4.

## 4. Zusammenfassung

### 4.1. Versuchsreihe

Phänomene, bei denen scheinbar freistehende Flüssigkeitssäulen auftreten, werden fälschlicherweise oftmals damit erklärt, dass der Luftdruck viel größer sei als der Druck, den die Wassersäule ausübt. Wir haben eine einfache Versuchsreihe vorgestellt, mit der sich bereits in der Klassenstufe 8 erarbeiten lässt, wie in Flüssigkeiten Luftdruck und Schweredruck zusammenwirken. Dazu haben wir eine einfache selbstgebaute Sonde eingesetzt, die den Druck in der Flüssigkeit über die Wölbung einer Membran gut sichtbar anzeigt. Wesentliche Schritte des ersten Teils der Versuchsreihe sind (Abschnitt 2.1 – 2.4):

- Man kann Flüssigkeitssäulen in einem umgedrehten Gefäß aus einem Becken ziehen. Der äußere Luftdruck bestimmt den Druck der Flüssigkeit an der Grenzfläche, d. h. auf der Höhe des Flüssigkeitsspiegels. Auf der Höhe dieses Referenzniveaus herrscht überall der Druck  $p_{Luft}$ .
- Oberhalb des Referenzniveaus nimmt der Druck in der Flüssigkeit linear ab, so wie er unterhalb linear zunimmt. Dies ist auf den höhenabhängigen Beitrag des Schweredrucks zurückzuführen. Daher können auch Druckwerte unter  $10^5$  Pa bzw. 1 bar erreicht werden!

Damit wird deutlich, dass der Schweredruck  $p_{hyd}$  nicht dem Druck am Boden einer Flüssigkeitssäule gleichzusetzen ist und dass an ihrer höchsten Stelle der Druck nicht verschwindet. Druckwerte in Flüssigkeiten sind daher immer ausgehend vom jeweils relevanten Referenzniveau zu berechnen.

Für das Experiment mit dem umgedrehten Wasserglas ergibt sich wie in Abschnitt 2.5 gezeigt Folgendes:

- Das Referenzniveau liegt auf Höhe der dünnen flexiblen Abdeckfolie: Auf beiden Seiten herrscht (in guter Näherung) der gleiche Druck  $p_{Luft}$  und die Wassersäule ist im Gleichgewicht.
- Kohäsions- und Adhäsionskräfte sorgen dafür, dass die Folie unter dem Einfluss ihrer eigenen Gewichtskraft nicht nach unten fällt.

### 4.2. Vorschläge für den Unterricht

Eine tragfähige Erklärung des Experimentes mit dem umgedrehten Wasserglas (Abschnitt 2.5) ist deutlich komplexer, als man dies zunächst erwarten würde. Wir empfehlen daher, für die Einführung des Themas Luftdruck einfachere Versuche wie z. B. die Magdeburger Halbkugeln zu nutzen und danach wie üblich die Größe des Luftdrucks und seine Interpretation als Schweredruck der Luft zu erarbeiten. Unsere Versuchsreihe könnte sich daran anschließen.

Plant man zwei Schulstunden ein, kann das Vorführen des umgedrehten Wasserglases zur Motivation an den Anfang der Reihe gesetzt werden. Die hier angeführten Experimente dienen dann dazu, die korrekte Erklärung zu finden und Hypothesen (z. B. zur Höhenabhängigkeit des Effekts) zu überprüfen.

Möchte man nur eine Stunde aufwenden, dann schlagen wir vor, auf das beigefügte Videomaterial zurückzugreifen und sich auf die Klärung des Zusammenspiels von Luftdruck und Schweredruck in der herausgezogenen Wassersäule zu beschränken (Abschnitt 2.1. bis 2.4., in denen die Druckverhältnisse unter- und oberhalb des Wasserspiegels geklärt werden). Dies bietet auch Gelegenheit, den hydrostatischen Druck bzw. Schweredruck sauber von dem an einer Stelle in der Flüssigkeit herrschenden Gesamtdruck abzugrenzen.

Wenn man die hier vorgestellte Versuchsreihe nicht durchführen möchte, kann man das umgedrehte Wasserglas dennoch gewinnbringend im Unterricht verwenden. Als Einstiegsexperiment zum Luftdruck zeigt es dessen Existenz und erzeugt einen motivierenden kognitiven Konflikt. Dann sollte man sich aber wie in der Einleitung beschrieben auf qualitative Formulierungen beschränken und keinesfalls suggerieren, der äußere Luftdruck sei viel größer als der Druck des Wassers über der Abdeckung.

#### 4.3. Ausblick

In einem zweiten Artikel ergänzen wir unsere Darstellung um weitergehendes fachliches Hintergrundwissen für Lehrerinnen und Lehrer bzw. Lehramtsstudierende der Physik. Wir erläutern dort insbesondere den Einfluss der Kohäsions- und Adhäsionskräfte, die beim umgedrehten Wasserglas zur Bildung konkaver Menisken im Randspalt zwischen Glasrand und Folie führen und damit eine Druckabsenkung bewirken, welche die Tragkraft der Abdeckung bestimmt. Darüber hinaus werden wir diskutieren, weshalb das Experiment auch bei einer nicht vollständigen Füllung des Glases funktioniert [15, 16] bzw. wenn Luftblasen eindringen. Darauf haben wir hier bewusst verzichtet, zum einen, um nicht auf Vorwissen zu Gasgesetzen zurückgreifen zu müssen, das zum Zeitpunkt der Einführung des Luftdrucks noch nicht zur Verfügung steht, und zum anderen, um nicht den Blick auf die Druckverhältnisse in Flüssigkeiten zu verstellen.

#### 5. Dem Beitrag beigefügte Medien

Video „Präparation der Wassersäule.mp4“

Video „Druckmessung unter- und oberhalb des Wasserspiegels.mp4“

Video „Übergang von herausgezogener Wassersäule zum umgedrehten Wasserglas.mp4“

Video „Drehen eines Wasserglases mit Folie.mp4“

Video „Drehen eines Wasserglases mit Bierdeckel.mp4“

#### 6. Literatur

- [1] Lehrplan Physik, Klassenstufen 7 und 8, Saarland, Ministerium für Bildung und Kultur, 2013, <https://www.saarland.de/209629.htm> (letzter Aufruf 15.7.2019)

- [2] *Impulse Physik*, Mittelstufe (für Gymnasien), Ernst Klett Verlag Stuttgart Düsseldorf Leipzig, 1. Auflage, 2007, S. 177, ISBN 3-12-772444-6
- [3] Dorn, Bader, *Physik, Mittelstufe*, Ausgabe B, Schrödel Schulbuchverlag GmbH Hannover (1992), 324-325, ISBN 3-507-86250-6
- [4] Bergmann, Schröder, *Einführung in die Physik*, Sekundarstufe 1, Ausgabe E, 1979, Diesterweg, Frankfurt am Main, S.124-125, ISBN 3-425-05087-7 (Kapitel 3.4)
- [5] Wilfried Kuhn, *Physik 1*, Band 1.1, 2. Auflage Westermann Schulbuchverlag GmbH, Braunschweig 1996, S.134, ISBN 3-14-15 2227 – 8
- [6] Feuerlein, Rainer; Näpfel, Helmut; Schäfflein, Horst, *BSV Physik N*, Sekundarstufe 1, Bayerischer Schulbuch Verlag GmbH München (1998), 2. Auflage 2002, S. 124, ISBN 978-3-7627-3902-9
- [7] *Spektrum Physik*, Gymnasium SI, Gesamtband, Schroedel Verlag GmbH Hannover (2001), S. 224-231, ISBN 3-507-86307-3
- [8] Wodzinski, Rita (2000): *Zustandsgröße Druck. Zur Einführung des Druckbegriffs in der Sekundarstufe I*. In: *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 11(57) (2000) S. 32-34, ISSN: 0946-2147  
Nachdruck (2004/2011) in: Müller, Rainer; Wodzinski, Rita; Hopf, Martin (Hrsg.): *Schülervertretungen in der Physik*. Aulis Verlag. ISBN 978-3-7614-2555-8
- [9] Wodzinski, Rita (1999) : *Neuere Konzepte zur Behandlung des Drucks in der Sekundarstufe I*. Vortrag auf dem Erlanger Physik-Wochenende: <http://www.solstice.de/cms/upload/Vortrag/wodzinski/vortra99.pdf> (letzter Aufruf 18.7.2019)
- [10] Wilhelm, Thomas; Schecker, Horst (2018): *Strategien für den Umgang mit Schülervorstellungen*. In: Schecker, Horst; Wilhelm, Thomas; Hopf, Martin; Duit, Reinders (Hrsg.): *Schülervorstellungen und Physikunterricht: Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis*. Berlin: Springer Spektrum. ISBN 978-3-662-57269-6, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57270-2>
- [11] Camp, P. R. (1976): *Simple lecture demonstration of atmospheric pressure, dissolved gasses in liquid, and cavitation*. In: *Am. Journal of Physics* 44, S. 604-605
- [12] Backe, Hans; Backe, Rolf; Giegenack, Helmut (1987): *Das Physik-Experimentierbuch*, 1. Auflage, Verlag Harri Deutsch, S. 91-92, ISBN 3-87144-967-9
- [13] Schlichting, Hans Joachim (1992): *Spiel mit den Elementen: Wasser und Luft in Freihandexperimenten*, In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik* 41/2, S. 27
- [14] Vollmer, Michael (2002): *Vakuumphysik im Alltag: Physikalische Freihand- und Low-cost-Experimente*, In: *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule PhyDid* 1/1, S. 19-32,

- <http://www.phydid.de/index.php/phydid/article/view/2>
- [15] *Physikalische Freihandexperimente*, Band 1 Mechanik, (Experiment „3.14 Papier stoppt Wasser“, S. 390-391), Aulis Verlag Deubner, Köln 2004, ISBN 3-7614-2535-X
- [16] Heithausen, Andreas; Arnolds, Konrad (2006): *Das umgedrehte Wasserglas – ein einfaches Experiment zur Untersuchung des Luftdrucks*. In: Physik und Didaktik in Schule und Hochschule PhyDid 2/5, S. 117-122, <http://www.phydid.de/index.php/phydid/article/view/49>
- [17] LEIFiPhysik, Versuch „Luftdruck verschließt Wasserglas“ unter <https://www.leifiphysik.de/mechanik/druck-kolben-und-schweredruck/versuche/heimversuche> (letzter Aufruf am 15.7.2019)
- [18] Phywe, Versuchsbeschreibung zum Artikel-Nr. P1423702 „Bestimmung des atmosphärischen Luftdrucks“ unter <https://www.phywe.de/de/bestimmung-des-atmosphaerischen-luftdrucks.html> (letzter Aufruf 15.7.2019)
- [19] Bergmann-Schäfer, *Lehrbuch der Experimentalphysik*, Band I, *Mechanik, Akustik, Wärme*, 9. Verbesserte Auflage, 1974, Walter de Gruyter, Berlin, New York, ISBN 3 11 004861 2 (Kapitel 52)
- [20] Lüders, K.; von Oppen, G. (2008): *Schweredruck in Gasen*. Kapitel 10.6 in *Bergmann Schaefer Physik, Lehrbuch der Experimentalphysik Band 1, Mechanik, Akustik, Wärme*. 12. Auflage. Berlin, New York: Walter de Gruyter. ISBN 978-3-11-019311-4
- [21] *Physikalische Freihandexperimente*, Band 1, Mechanik, (Experiment „2.20 Ein Saugheber“, S. 285-286) Aulis Verlag Deubner, Köln 2004, ISBN 3-7614-2535-X
- [22] Pelster, Rolf; Schön, Fabian (2018): *Zur Physik des Saughebers: Missverständnisse und fachliche Klarstellungen*, In: Physik und Didaktik in Schule und Hochschule PhyDid-A 1/17, S. 51-65, <http://www.phydid.de/index.php/phydid/article/view/819>
- [23] Crum, L. A. (1979): *Tensile strength of water*. In: Nature 278, S. 148-149
- [24] Vera, F.; Rivera, R.; Romero-Maltrana, D.; Villanueva, J. (2016): *Negative Pressures and the First Water Siphon Taller than 10.33 Meters*, In: PLOS ONE, S. 1-11, doi: 10.1371/journal.pone.0153055
- [25] Boatwright, A.; Hughes, S.; Barry, J. (2015): *The height limit of a siphon*. In: Scientific Reports, 5:16790, doi: 10.1038/srep16790, [www.nature.com/articles/srep16790](http://www.nature.com/articles/srep16790)

#### Danksagung

Wir danken den Physiklehrern Hayo Schmitt und Willi Göbel für hilfreiche Diskussionen.

Finanziell gefördert wurde die Arbeit im Rahmen der Qualitätsoffensive Lehrerbildung des BMBF (Projekt SaLUt, Teilprojekt „Frühzeitige Verknüpfung von Fachwissenschaft und Fachdidaktik in der Lehramtsausbildung der Physik“).

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

