

Downloadmaterial zum Beitrag „Auftrieb mit dem Teilchenmodell vermitteln“ – MINT Zirkel 3-2023

Auftrieb mit dem Teilchenmodell vermitteln

„All things are made of atoms“, war Richard Feynmans Antwort auf die Frage, welche wissenschaftliche Idee er der Nachwelt weitergeben würde, wenn nur eine zu retten wäre. Tatsächlich ist das Teilchenmodell auch eines der ersten Modelle im naturwissenschaftlichen Unterricht, mit dem sich die Schüler*innen auseinandersetzen. Gleichzeitig ist es das Modell, bei dem am häufigsten Modellgrenzen aufgesucht werden – gefolgt von einer Erweiterung. Selbst mit der einfachen Vorstellung von kleinen, sich regellos bewegenden Teilchen können schon viele Phänomene erklärt werden.

Die Anwendung im Unterricht erstreckt sich häufig auf die Wärmelehre oder auf Druck und Dichte: Aggregatzustände, Temperatur, Längen- und Volumenänderungen – die Vorstellung kleinster Teilchen ist hilfreich. In anderen Bereichen wird das Teilchenmodell nicht mit der gleichen Selbstverständlichkeit eingesetzt. Auch der Auftrieb wird in der Schule in der Regel nicht mit dem Teilchenmodell in Verbindung gebracht. Eine einfache Überlegung zeigt aber, dass hier eine qualitative und sogar quantitative Modellvorstellung das Verständnis unterstützen kann.

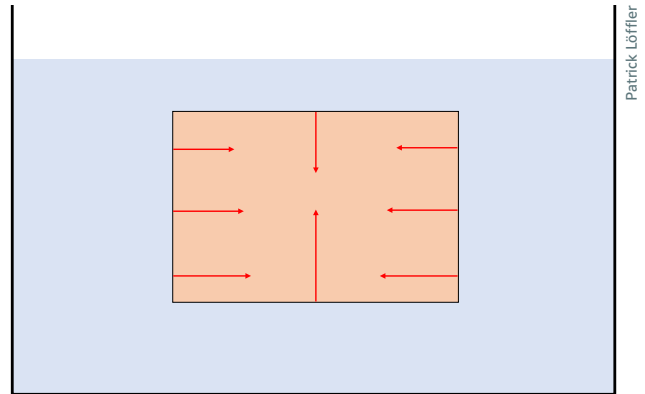
Einführung in den Auftrieb

Üblicherweise wird der Auftrieb in Schulbüchern über Experimente eingeführt. Aufbauend auf dem zuvor erarbeiteten Druckbegriff wird meist nicht mehr konkret mit Teilchen argumentiert. Stattdessen wird möglichst zügig das Archimedische Gesetz angestrebt – in verschieden detaillierter Form, auf Wasser und Erdbeschleunigung bezogen oder in allgemeiner Form, etwa wie folgt: „Die Auftriebskraft eines Körpers ist genauso groß wie die Gewichtskraft des vom Körper verdrängten Wassers.“

Oder als Formel:

$$F_A = F_G = m \cdot g = \rho \cdot V \cdot g$$

Bilder zeigen zur Illustration häufig eine Seitenansicht eines untergetauchten Quaders mit eingezeichneten Kraftpfeilen:



Patrick Löffler

Die Argumentation ist dann üblicherweise wie folgt: In der Tiefe nimmt der allseitig wirkende Druck zu. Deshalb ist der Druck an der Unterseite des Quaders höher als an der Oberseite und als Resultat wirkt eine nach oben gerichtete Kraft, die Auftriebskraft. Der an den Seitenflächen herrschende Druck führt zu sich gegenseitig aufhebenden Kräften, sodass hier keine resultierende Kraft auftritt. Leider haben Schüler*innen meist kein tragfähiges Konzept des Begriffs Druck. Untersuchungen zeigen eine Vielzahl von Alltagsvorstellungen und Lernschwierigkeiten (Wodzinski, 2000 oder Schecker et al., 2018), zum Beispiel hinsichtlich dessen, dass Druck eine skalare Größe ist. Nutzt man stattdessen die Vorstellung, dass die Wasserteilchen unterschiedlich stark an Ober- und Unterseite des Quaders stoßen, kann ein tiefergehendes Verständnis unterstützt werden. Zudem verhindert man so, ein falsches Verständnis für die Rolle des Experiments in den Naturwissenschaften zu verstärken: Im Unterricht erliegt man leicht der Versuchung, aus einem Experiment induktiv auf eine allgemeingültige Formel zu schließen.

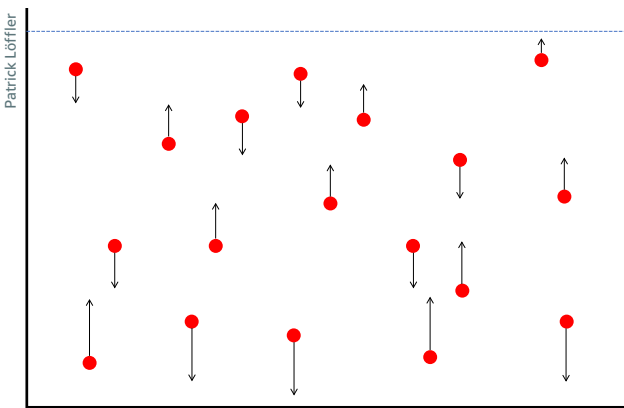
Ein Teilchenmodell des Auftriebs

Möller (1999) fordert, zum Verstehen der Auftriebskraft und des Archimedischen Prinzips müsse die Aufmerksamkeit weg vom eingetauchten Körper hin auf das Wasser und seine Eigenschaften gerichtet werden. Diesem Ansatz folgend, modellieren wir Wasser mit kleinsten Teilchen und deren aus der kinetischen Gastheorie bekannten Eigenschaften

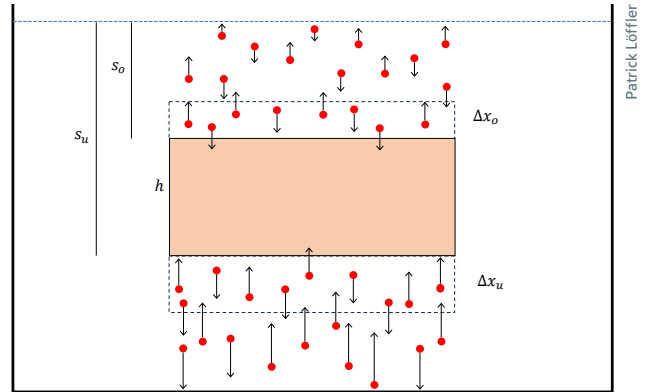
ten. Dort ist es üblich, Druck über Stoßprozesse von Gasteilchen zu veranschaulichen und auch quantitativ herzuleiten. Analog betrachten wir Stoßprozesse von Wasserteilchen. Es gelten folgende Annahmen:

- Die Wasserteilchen stoßen vollkommen elastisch.
- Die einzige Kraft, die auf die Wasserteilchen wirkt, ist die Gravitation.

Als Analogie kann man die Vorstellung von Gumbällen verwenden, die an der gedachten Wasseroberfläche fallen gelassen werden und am Boden des Behälters abprallen und sich somit in einer beständigen Auf- und Abbewegung befinden. Die Fallgeschwindigkeit nimmt mit der Tiefe gemäß $v = \sqrt{2sg}$ zu. In der folgenden Abbildung sind zur Veranschaulichung die Geschwindigkeitsvektoren eingezeichnet – eine dynamische Visualisierung ist mit entsprechender Software realisierbar.



Da der Wasserspiegel gleich bleibt, sind im Mittel jeweils gleich viele Wasserteilchen in der Auf- wie in der Abbewegung. An dieser Stelle drängt sich die Frage nach Stoßprozessen der Wasserteilchen untereinander und der freien Weglänge auf. Betrachtet man allerdings nur den dabei weitergegebenen Impuls, können die Stoßprozesse untereinander vernachlässigt werden. Auch damit verbundene Richtungsänderungen sind für die folgende Auftriebsherleitung nicht von Belang: Die vertikale Geschwindigkeitskomponente bleibt erhalten. Horizontale Impulskomponenten, die auf die Seitenflächen übertragen werden, heben sich gegenseitig auf. Zur Bestimmung des insgesamt auf den Körper übertragenen Impulses betrachten wir daher diejenigen Teilchen, die innerhalb einer Zeitspanne Δt mit der Körperunter- bzw. -oberseite stoßen können. Da die Geschwindigkeit der Teilchen oberhalb und unterhalb nicht gleich ist, ergeben sich unterschiedlich große Bereiche:



Auch hier sind horizontale Impulskomponenten nicht von Belang: Schräg in die Bereiche Δx_o und Δx_u eintretende Teilchen und schräg austretende sind im Mittel gleich häufig und gleichen sich in ihrer Wirkung gegenseitig aus.

Bedeutung für die Auftriebskraft

Zur Herleitung der Auftriebskraft ist zunächst der pro Zeiteinheit übertragene Impuls an der Unter- und Oberseite zu beschreiben. Dazu wird der durchschnittliche Impuls eines Teilchens auf die Zeiteinheit bezogen, woraus sich die jeweilig wirkende Kraft ergibt. Die Anzahl der Teilchen entspricht der Hälfte der Teilchen, die sich in Δx_o bzw. Δx_u befinden, da sich im Mittel jeweils die Hälfte in einer Auf- bzw. Abwärtsbewegung befindet. Die Geschwindigkeit der Teilchen in den jeweiligen Bereichen ergibt sich aus der Erdbeschleunigung und der Fallstrecke, die für die Oberseite mit der Eintauchtiefe s_o gleichgesetzt wird. Für die Unterseite ergibt sich die Fallstrecke s_u entsprechend aus der Eintauchtiefe s_o und der Höhe h des eingetauchten Körpers. Da v_u größer ist als v_o , ist entsprechend Δx_u größer als Δx_o . Es stoßen also in der gleichen Zeit mehr und schnellere Teilchen an die Unterseite als an die Oberseite.

$$F_A = F_u - F_o = \frac{N_u/2 \cdot m_T \cdot v_u}{\Delta t} - \frac{N_o/2 \cdot m_T \cdot v_o}{\Delta t}$$

Die gesamte Teilchenmasse lässt sich für Ober- und Unterseite auch zusammenfassen und über das Volumen und die Dichte ausdrücken:

$$N \cdot m_T = V \cdot \rho = A \cdot \Delta x \cdot \rho$$

$$F_A = \frac{A \cdot \Delta x_u \cdot \rho \cdot v_u}{2 \cdot \Delta t} - \frac{A \cdot \Delta x_o \cdot \rho \cdot v_o}{2 \cdot \Delta t}$$

$\frac{\Delta x_u}{\Delta t}$ bzw. $\frac{\Delta x_o}{\Delta t}$ entsprechen aber gerade v_u und v_o . Daraus ergibt sich:

$$F_A = \frac{A \cdot \rho \cdot v_u^2}{2} - \frac{A \cdot \rho \cdot v_o^2}{2} = \frac{A \cdot \rho}{2} \cdot (v_u^2 - v_o^2)$$

Aus $v = \sqrt{2sg}$ folgt:

$$F_A = \frac{A \cdot \rho}{2} \cdot (\sqrt{2 \cdot s_u \cdot g}^2 - \sqrt{2 \cdot s_o \cdot g}^2)$$

$$F_A = \frac{A \cdot \rho}{2} \cdot (2 \cdot s_u \cdot g - 2 \cdot s_o \cdot g)$$

$$F_A = \frac{A \cdot \rho \cdot g \cdot 2}{2} \cdot (s_u - s_o)$$

Da $s_u = s_o + h$, gilt:

$$F_A = \frac{A \cdot \rho \cdot g \cdot 2}{2} \cdot h$$

Und wegen $A \cdot h = V$ schließlich:

$$F_A = \rho \cdot V \cdot g$$

Das Archimedische Gesetz wird hier also aus den Eigenschaften des Wassers, genauer: den Wasserteilchen, hergeleitet. Das Volumen des vom Wasser verdrängten Körpers ergibt sich hier aus den „Stoßflächen“ und der Höhe des Körpers. Daran anschließend können nun confirmatorische Experimente zur Prüfung der hergeleiteten Formel eingesetzt werden – anstatt wie oben beschrieben zur induktiven Herleitung derselben.

Über Modelle reden

Zum Aufbau eines tragfähigen Modellbegriffs gehört auch das Reden über Modelle, also den Modellierungsprozess, die Modellannahmen und Modellgrenzen (Mikelskis-Seifert, 2006). Das vorgestellte Teilchenmodell des Auftriebs bietet hierzu vielfältige Gelegenheiten. Beispielsweise kann die Rolle des Gefäßbodens thematisiert werden und damit zusammenhängend die Frage gestellt werden: Kann es Auftrieb in der Schwerelosigkeit geben? Hypothesen dazu lassen sich sogar experimentell überprüfen. In Fallversuchen kann das Verhalten von Körpern in einer Wasserflasche untersucht werden. Mit modernen Smartphones können Zeitlupenvideos erstellt werden. Alternativ bieten Videoplattformen im Internet eine Auswahl an entsprechenden Versuchen.

Eine weitere Gelegenheit zum Reden über das Modell ist die Wasseroberfläche: Durch die Stoßprozesse der Wasserteilchen sollte es keine „scharfe“ Abtrennung zur darüber liegenden Luft geben. Hier können Verbindungen zum Thema Verdunsten ge-

zogen werden; auch die Geschwindigkeitsverteilung der Teilchen ist in diesem Zusammenhang ein Gesprächsanlass. Darüber hinaus wurde auch die Rolle der Kohäsion bislang ebenso wenig untersucht wie Sonderfälle, Körper beispielsweise, die nur teilweise eingetaucht sind oder komplett auf dem Gefäßboden aufliegen, oder auch unterschiedlich dichte Medien (etwa Salzwasser). Die Übertragbarkeit auf Auftrieb in kompressiblen Gasen bietet ebenfalls Anlass zum Reden über Modelle.

All diese Beispiele sollten also nicht vermieden, sondern vielmehr gezielt aufgesucht werden, um ein adäquates Verständnis von der Rolle von Modellen in den Naturwissenschaften aufzubauen. Dem entgegen steht die Notwendigkeit, in einem zeitlich meist sehr eng gesteckten Rahmen die vom Lehrplan geforderten Inhalte zu vermitteln. Hier gilt es, einen Mittelweg zu finden und Mut aufzubringen, sich auf dynamische Unterrichtsgespräche einzulassen – es liegt eine große Chance darin.



Dr. Patrick Löffler ist Geschäftsführer des Zentrums für Lehrerbildung an der RPTU in Landau. Der Fachdidaktiker, Lehrer und Schulbuchautor hat am DFG-Graduiertenkolleg „Unterrichtsprozesse“ promoviert und forscht seit 2012 zur Modellanwendung.

Quellen

Mikelskis-Seifert, S. (2006). Im Physikunterricht modellieren. Modellmethode als epistemologisches und didaktisches Konzept. In Helmut F. Mikelskis (Hrsg.), *Physik-Didaktik. Praxishandbuch für die Sekundarstufe I und II* (S. 120–138). Berlin: Cornelsen Scriptor.

Möller, K. (1999). Konstruktivistisch orientierte Lehr-Lernprozessforschung im naturwissenschaftlich-technischen Bereich des Sachunterrichts. In W. Köhnlein (Hrsg.), *Vielperspektives Denken im Sachunterricht* (S. 125–191). Bad Heilbrunn: Verlag Julius Klinkhardt.

Schecker, H., Wilhelm, T., Hopf, M. & Duit, R. (Hrsg.) (2018). *Schülervorstellungen und Physikunterricht*. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg.

Wodzinski, R. (2000). Zustandsgröße Druck. Zur Einführung des Druckbegriffs in der Sekundarstufe I. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik* 11 (57). S. 32–34. Hannover: Friedrich Verlag.