

Ultraschallelevation als Zugang zu stehenden Wellen

Ein Low-Cost-Experimentieraufbau mit 3D-Druck Komponenten

NILS HAVERKAMP – PAUL SCHLUMMER – MALTE S. UBBEN – ALEXANDER PUSCH

Schwebende Objekte faszinieren – die Physik dahinter findet sogar in technischen Anwendungen Verwendung. In diesem Beitrag wird ein Aufbau aus dem 3D-Drucker zur Levitation vorgestellt, der im Schülerexperiment einen Einstieg in das Thema stehende Wellen bieten kann.

1 Einleitung

Eines der bekanntesten Experimente zur Visualisierung von Schallwellen ist die Kundt'sche Staubröhre. Eine Schallwelle wird in einem Glasrohr erzeugt und am offenen bzw. geschlossenen Ende reflektiert. Im Inneren der Röhre entsteht eine stehende Welle. Stäube aus Bärlappsporen oder Korkmehl bilden ein Muster anhand der Schwingungsbäuche der Schallschnelle aus (HAVERKAMP et al., 2021). Aus dem Muster des ausgerichteten Staubes lässt sich auf die Wellenlänge bzw. Frequenz der Schallwelle schließen.

Stehende Wellen können auch verwendet werden, um kleine Styroporkugeln zum Schweben zu bringen (Abb. 1). Dieses einfache Experiment kann als verblüffender und spannender Einstieg in die Thematik „stehende Wellen“ verwendet werden. Bei Ultraschallelevation handelt es sich außerdem um eine moderne experimentelle Methode, die bspw. im Bereich der



Abb. 1. Schwebende Kugeln (rechts: eingefärbter Hintergrund)

Biochemie Verwendung findet, um Proben ohne Kontakt zu einem Trägermaterial zu fixieren (SANTESSON & NILSSON, 2004). Auf diese Weise kann z. B. Spektroskopie mit extrem kleinen Probenmengen betrieben werden, ohne dass störende Absorptionseffekte am Trägermaterial auftreten (ebd.)

2 Levitation mittels Ultraschall

Der experimentelle Aufbau zur Levitation kleiner Styroporkugeln ist sehr einfach: Zwei gegenüberliegende Ultraschallsender in geeignetem Abstand werden parallel geschaltet an einem Frequenzgenerator betrieben und erzeugen eine stehende Welle. Die Idee wurde bereits in verschiedenen Variationen und Umsetzungsmöglichkeiten beschrieben (z. B. SCHMEROLD, 2018 oder HEISE, 2018). Das Gelingen des Experiments hängt wesentlich von mehreren Faktoren ab:

1. Die erzeugte **Schallintensität** muss möglichst groß sein. Die erreichte Intensität hängt stark von der zur Charakteristik des verwendeten Lautsprechers passenden Frequenz ab.
2. Die Ultraschallsender müssen **mittig übereinander ausgerichtet** werden.
3. Der **Abstand** der Sender zueinander muss möglichst exakt ein Vielfaches der halben Wellenlänge betragen.

Der Aufbau lässt sich mit Stativmaterial durchführen. Hier zeigt sich aber die Schwierigkeit, die Sender mittig übereinander zu positionieren und den Abstand der Sender dabei zueinander in kleinen Schritten zu variieren.

Mit der hier vorgestellten 3D-gedruckten Halterung sind die Sender bereits exakt übereinander positioniert, so dass nur noch der Abstand eingestellt werden muss. Der Abstand kann durch Drehen an einer Schraubvorrichtung eingestellt werden (gelbes Bauteil, siehe Schnittbild in Abb. 2). Das Experiment kann mittels 4 mm Laborkabel an schultypische Frequenzgeneratoren angeschlossen werden. Der Aufbau eignet sich als einfach zu bedienendes Schüler- oder Demonstrationsexperiment. Die Kosten für Material und Filament liegen deutlich unter 10 €, die Druckzeit unter 10 h. Die beiden Ultraschallsender



Abb. 2. Schnittbild durch die dreiteilige Halterung

können z. B. aus dem für wenige Euro erhältlichen Sensor Arduino HC-SR04 (Datenblatt HC-SR04) ausgelötet werden.

3 Wie lässt eine stehende Welle Teilchen schweben?

3.1 Erklärung auf Schulniveau

Bei passend gewähltem Abstand zwischen zwei Schallquellen gleicher Amplitude entsteht zwischen ihnen aufgrund von Interferenz der beiden Teilwellen eine stehende Welle. Innerhalb der stehenden Welle bilden sich Schwingungsknoten, an denen die Auslenkung zu jeder Zeit gleich Null ist, sowie Schwingungsbäuche, an denen die Auslenkung im Maximum die doppelte Amplitude einer einzelnen Teilwelle erreicht. Wie in HAVERKAMP et al. (2021) beschrieben, muss bei der Betrachtung von Knoten und Bäuchen stehender Schallwellen allerdings unterschieden werden, welche Kenngröße des Schalls zur Beschreibung herangezogen wird: Die Schwingungsknoten der Schallschnelle sind die Schwingungsbäuche des Schalldrucks und umgekehrt (Abb. 3 sowie Kasten 1). Im Modell schwingender Luftteilchen entsprechen die Orte maximaler Schalldruckänderung den Stellen, an denen die Luftteilchen abwechselnd stark aneinandergespreßt und wieder voneinander weggezogen werden. Da die Schallschnelle am Ort maximalen Schalldrucks Null ist, bewegen sich die Luftteilchen selbst an dieser Stelle jedoch nicht. Konkret ergeben sich bei zwei aktiven Sendern die folgenden Verteilungen für Schallschnelle \vec{v} und Druck p (v_0 und p_0 bezeichnen die Amplitude der jeweiligen Größen, ω und k die Kreisfrequenz, bzw. Wellenzahl der Welle):

$$v(x,t) = v_0 \sin(kx) \cdot \cos(\omega t) \quad (1)$$

$$p(x) = p_0 \cos(kx) \cdot \cos(\omega t) \quad (2)$$

Die obige Beschreibung des Phänomens der stehenden Schallwelle entspricht in etwa dem, was Lernenden im Rahmen der Schulphysik inhaltlich zu diesem Thema vermittelt werden kann.

3.2 Das Experiment als qualitativer Zugang zum Phänomen in der Schule

Für das qualitative Verständnis des Phänomens spielt die Erfahrbarkeit der periodischen Abfolge von Schwingungsknoten und -bäuchen eine wesentliche Rolle: Beim Experimentieren mit der Levitationsapparatur stellt man fest, dass sich die Styroporkügelchen nur an bestimmten Stellen und in gleichmäßigen Abständen zueinander anordnen lassen. Der erstaunliche Effekt des Schwebens veranschaulicht so die Periodizität einer stehenden Welle im Kontext aktueller Techniken der Forschung (z. B. die zu Beginn genannte, kontaktlose Fixierung von Proben (SANTESSON & NILSSON, 2004)).

Um zu verstehen, warum die Kügelchen nun innerhalb der stehenden Welle schweben können, ist zudem das Phänomen des Strahlungsdrucks von Bedeutung, das zumeist eher aus dem Kontext der Elektrodynamik bekannt ist. Der Schallstrahlungsdruck ist vom oben diskutierten Schalldruck zu unterscheiden.

Er ist proportional zur Energiedichte und damit zur Intensität des Schalls. Aufgrund des Schallstrahlungsdrucks wirken zusätzliche Kräfte auf die Styroporkügelchen, die bei ausreichender Schallintensität und passender Platzierung der Kügelchen deren Gewichtskraft ausgleichen. Das Auftreten solcher Kräfte kann Lernenden auf qualitativer Ebene modellhaft durch Streuung der schwingenden Luftteilchen an den Styroporkügelchen plausibel gemacht werden, ist aber darüber hinaus nicht auf einfache Weise aus den oben diskutierten Schallfeldgrößen heraus abzuleiten. Dies zeigt sich schon daran, dass die zeitliche Mittelung der Verteilungen von Schallschnelle und Schalldruck stets null ergäbe. Aus didaktischer Sicht sollte das Experiment daher primär als eine Möglichkeit gesehen werden, das Phäno-

men stehender Wellen anhand eines authentischen Kontextes einzuführen und Lernende durch einen faszinierenden Effekt für die weitere Beschäftigung mit der Thematik zu motivieren. Zur weiteren systematischen Untersuchung von stehenden Wellen im Schülerexperiment eignet sich dann z. B. eine 3D-gedruckte Version des Kundt'schen Staubrohrs (HAVERKAMP et al., 2021).

3.3 Weiterführende Erklärung

Eine fachlich tiefergehende Erklärung der akustischen Levitation, geht deutlich über das Schulniveau hinaus, da sie nicht-lineare Effekte berücksichtigen muss (KARLSEN, 2018). Es kann aber gezeigt werden, dass trotz der nichtlinearen Natur des

Der Zusammenhang zwischen den Schallfeldgrößen, dem Teilchenmodell und dem beobachtbaren Experiment ist in Abbildung 3 zusammengefasst dargestellt. Ganz links ist die Bewegung der Luftteilchen als Momentaufnahme dargestellt, wobei rote Pfeile die momentane Bewegungsrichtung symbolisieren. Die Diagramme in der Mitte zeigen die räumliche Verteilung von Schalldruck und Schallschnelle als Momentaufnahme, sowie die zeitlich gemittelte Kräfteverteilung, welche aus der durch den Schallstrahlungsdruck sich ergebenden Kräfteverteilung resultiert. Die horizontalen blauen Balken markieren die Knoten des Schalldrucks, in deren Richtung die Kräfte wirken. Die Position der Styroporkügelchen unter Berücksichtigung der Gewichtskraft ist rechts im Bild skizziert.

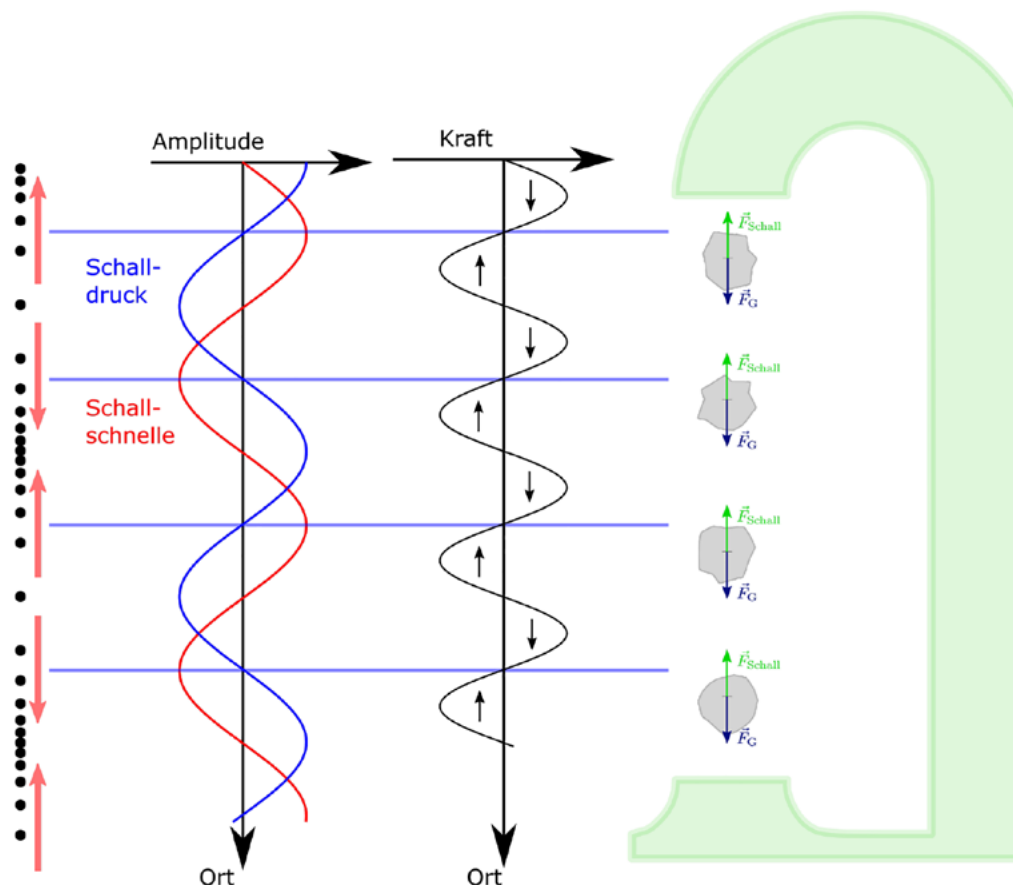


Abb. 3. Zusammenhang zwischen Schallschnelle, Schalldruck und aus dem Schallstrahlungsdruck resultierender Kräfteverteilung auf verschiedenen Darstellungsebenen

Kasten 1. Modell zu den Zusammenhängen zwischen Schalldruck, Schallschnelle und Kräfteverteilung

Schallstrahlungsdrucks zur Berechnung ausschließlich die in Abbildung 3 (in Kasten 1) links gezeigten, aus der rein linearen Betrachtung gewonnenen Verteilungen von Schallschnelle und Schalldruck benötigt werden (ANDRADE, PÉREZ & ADAMOWSKI, 2017). Mithilfe des sogenannten Gor'kov-Potentials lässt sich die aus dem Schallstrahlungsdruck resultierende Kraft als Gradient eines Potentials ermitteln (ebd.). Dieses lautet in vereinfachter Form:

$$U = c_0 [c_1 \cdot p^2 - c_2 \langle v^2 \rangle] \quad (3)$$

Eckige Klammern in Gleichung (3) kennzeichnen eine zeitliche Mittelung und in den Konstanten c_0, c_1 und c_2 sind Terme zusammengefasst, die für den qualitativen Verlauf der Kräfteverteilung irrelevant sind. Für die in Abbildung 3 dargestellte stehende Schallwelle mit den in Gleichungen (1) und (2) gegebenen Verteilungen von Schalldruck und Schallschnelle kann die Kräfteverteilung $\langle F(x) \rangle$ konkret berechnet werden:

$$\langle F(x) \rangle = \nabla \cdot U = K \cdot \sin(2kx) \quad (4)$$

In Gleichung (4) wurden die sich ergebenden Konstanten zu einer neuen Konstante K zusammengefasst. Die Verteilung ist in Abbildung 3 rechts dargestellt.

Zusammengefasst ist aus der Darstellung der Kräfteverteilung ersichtlich, dass die zeitlich gemittelten Kräfte in Richtung der Schalldruckknoten wirken. An den Schalldruckknoten selbst gleichen sich die innerhalb der Schallwelle wirkenden Kräfte aus. Berücksichtigt man zusätzlich, dass auf die Styroporkügelchen noch eine Gewichtskraft nach unten wirkt, kommt man zu dem Schluss, dass die Kügelchen sich an einer Stelle etwas unterhalb der Schalldruckknoten stabil in der Schwebelage halten können. Dort ist die aus dem Schallfeld resultierende Kraft aufwärtsgerichtet, sodass dort die Gewichtskraft ausgeglichen werden kann.

4 Experimentieren mit der Ultraschallelevation

Mit dem hier beschriebenen Aufbau kann auf anschauliche und faszinierende Art das Phänomen der Levitation durch stehende Ultraschallwellen gezeigt werden und Lernenden einen interessanten, spielerischen Zugang zum Phänomen ermöglichen. Die Positionen mehrerer übereinander schwebender Kugeln zeigen die Abstände zwischen den Wellenknoten (des Schalldrucks) und somit die halbe Wellenlänge der Welle. Bei einer Frequenz von 40 kHz ist der Abstand zwischen zwei schwebenden Teilchen grob 4,25 mm. Dies entspricht der halben Wellenlänge

$$\left(\lambda = \frac{c}{f} = \frac{340 \text{ m/s}}{40.000 \text{ 1/s}} = 0,0085\text{m}\right).$$
 Der richtige Abstand der Sender

kann beim Experimentieren durch Ausprobieren eingestellt werden. Eine Styroporkugel wird jeweils auf ein dünnes „Sieb“ (z.B. Fliegengitter) gelegt. Wenn die Kugel beginnt, sich im Sieb zu bewegen, ist der Abstand der Sender bereits grob im Bereich der vielfachen Wellenlänge. Weitere Styroporkugeln können anschließend mit dem Sieb eingesetzt werden.

Alternativ dazu kann der Abstand mit einem 2-Kanal-Oszilloskop exakt eingestellt werden. Dazu wird einer der Sender als Empfänger umfunktioniert. Der passende Abstand kann dann aus dem Vergleich von Eingangssignal am Sender und Ausgangssignal am Empfänger bestimmt werden (Abb. 4). Durch Drehen an der Höhenverstellung verschieben sich die beiden Signale gegeneinander. Durch die Darstellung mit dem Oszilloskop wird den Lernenden eine bildliche Vorstellung von den Ultraschallwellen und den Auswirkungen der Veränderung des Abstands vermittelt, die dabei helfen soll, eine Vorstellung von den Wellen im Aufbau zu bekommen. Dabei kann mit den Lernenden gemeinsam analysiert werden, welche Größen (Amplitude, Frequenz, Phase) auf dem Oszilloskop dargestellt sind und wie der Abstand eingestellt werden muss, damit es zu stehenden Wellen kommt.

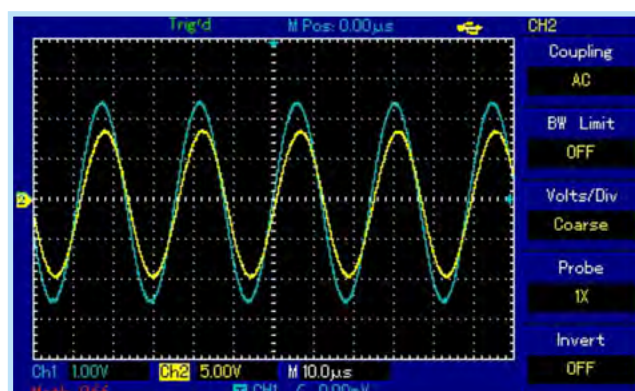


Abb. 4. Das Signal des Frequenzgenerators am 1. Ultraschallsender ist am 1. Kanal geschaltet (blau), das Signal des Ultraschallempfängers am 2. Kanal (gelb).

5 Fazit

Das Experiment Levitation mittels Ultraschalles kann als faszinierender Einstieg mit authentischem Kontext in die Thematik stehende Wellen dienen und grundlegende Begriffe wie Frequenz, Amplitude und Phasenbeziehung (v.a. am Oszilloskop) darstellen.

An diesem Experiment zeigt sich wie die Technologie des 3D-Drucks es Lehrkräften ermöglicht, einfache und innovative Experimentiermaterialien wie diese Halterung selbst oder gemeinsam mit Lernenden herzustellen.

Die 3D-Dateien und die Materialliste zum Nachbau können unter <https://physikkommunizieren.de/3d-druck/ultraschall-levitation> heruntergeladen werden.

Literatur

ANDRADE, M., PÉREZ, N. & ADAMOWSKI, J. C. (2017): Review of progress in acoustic levitation. *Brazilian Journal of Physics*, 48, 190–213.

SANTÉSSON, S. & NILSSON, S. (2004). Airborne chemistry: Acoustic levitation in chemical analysis. *Analytical and*

Bioanalytical Chemistry, 378(7), 1074-1079.
Doi: <https://doi.org/10.1007/s00216-003-2403-2>.

SCHMEROLD, U. (2018). Schwerelos mit Ultraschall.
Make: 2/2018, 82–87.

Heise (2018). <https://www.heise.de/make/artikel/Einfacher-Ultraschall-Levitationsapparat-4022505.html> (22.02.2020).

KARLSEN, J. T. (2018). *Theory of nonlinear acoustic forces acting on fluids and particles in microsystems*. PhD-Thesis. Department of Physics, Technical University of Denmark.

HAVERKAMP N., HAVEMANN, J., HOLZ C., UBBEN M., SCHLUMMER P. & PUSCH, A. (2021). A new implementation of Kundt's tube: 3D-printed low-cost set-up using ultrasonic speakers. *Physics Education*, 56, 1–9.
doi: <https://dx.doi.org/10.1088/1361-6552/abd0d7>.

Datenblatt HC-SR04: <https://cdn-reichert.de/documents/datenblatt/A300/SEN-US01-DATASHEET.pdf> (22.02.2020).

Datenblatt Ultraschallsender: <https://cdn-reichert.de/documents/datenblatt/B400/UST%23PRT.pdf> (22.02.2020).

NILS HAVERKAMP studiert Physik und Mathematik auf Lehramt für die Sek. II an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster

PAUL SCHLUMMER, Dr. MALTE UBBEN und Dr. ALEXANDER PUSCH lehren und forschen am Institut für Didaktik der Physik an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster. alexander.pusch@uni-muenster.de

