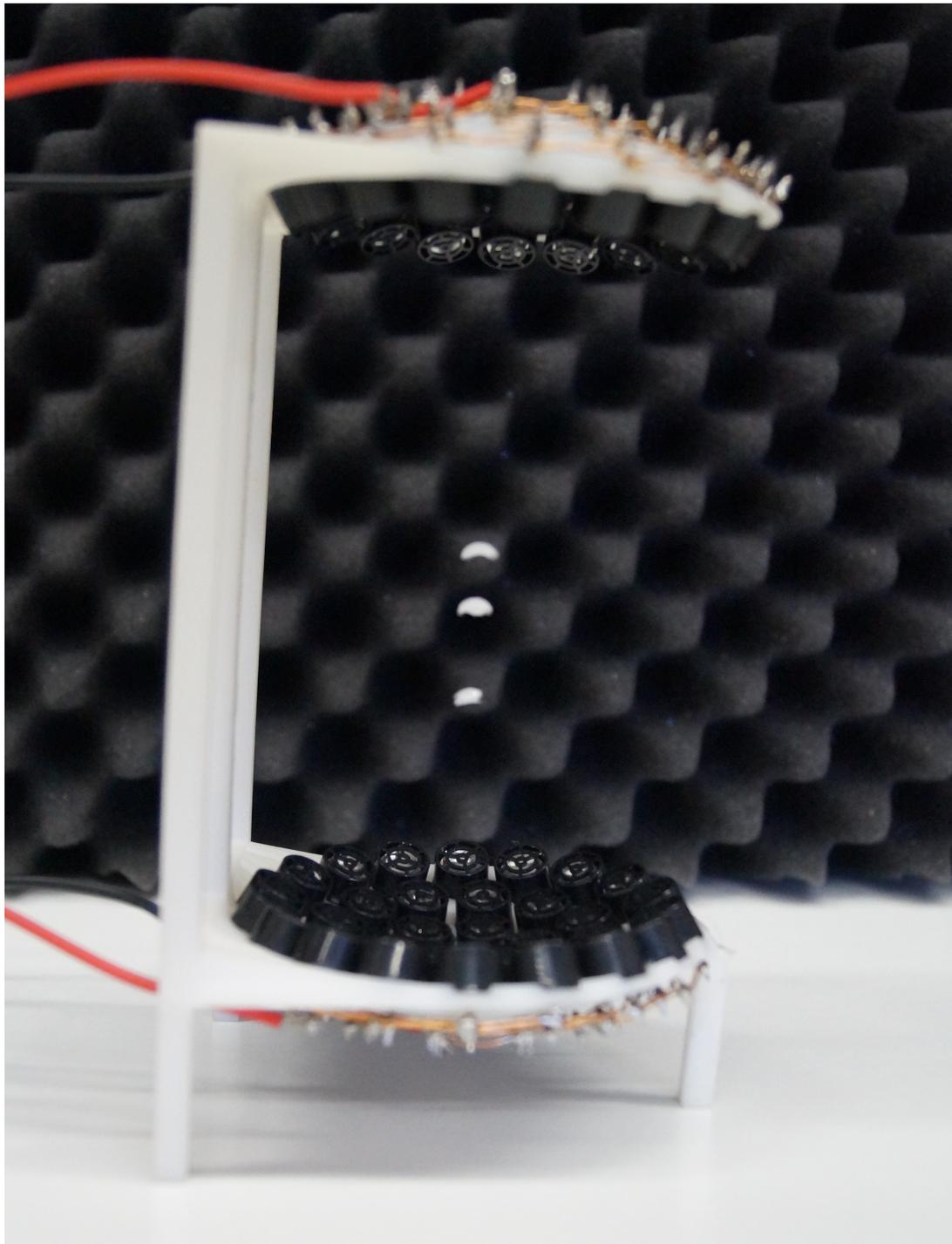


Der Akustische Levitator zur Anwendung im Schulunterricht



1 Einleitung

Mit den Experimenten aus diesem Koffer können Lehrkräfte auf eine spannende Weise physikalische Phänomene wie das berührungslose Schweben von Partikeln vorführen und begreiflich machen. Dazu wird eine akustische Falle demonstriert, mit der man mehrere Teilchen (Korkpartikel, Styroporkugeln) gleichzeitig levitieren und kontrolliert bewegen kann. Aus den Teilchenabständen und der angelegten Frequenz kann die Schallgeschwindigkeit bestimmt werden. In der aktuellen Forschung werden Fallenexperimente zur kontrollierten Levitation (z. B. von Atomen, Ionen, Biomolekülen oder Aerosolpartikeln) eingesetzt.

2 Materialliste

- Hartplastikkoffer mit Schaumstofffüllung
- Holzbrett mit Bauelementen (Netzanschluss, Schalter, Arduino, Motor-Drive-Board, Verkabel)
- Levitationsgehäuse
- Netzteil
- Filmdose gefüllt mit Korkmehl
- Filmdose gefüllt mit Styroporkugeln

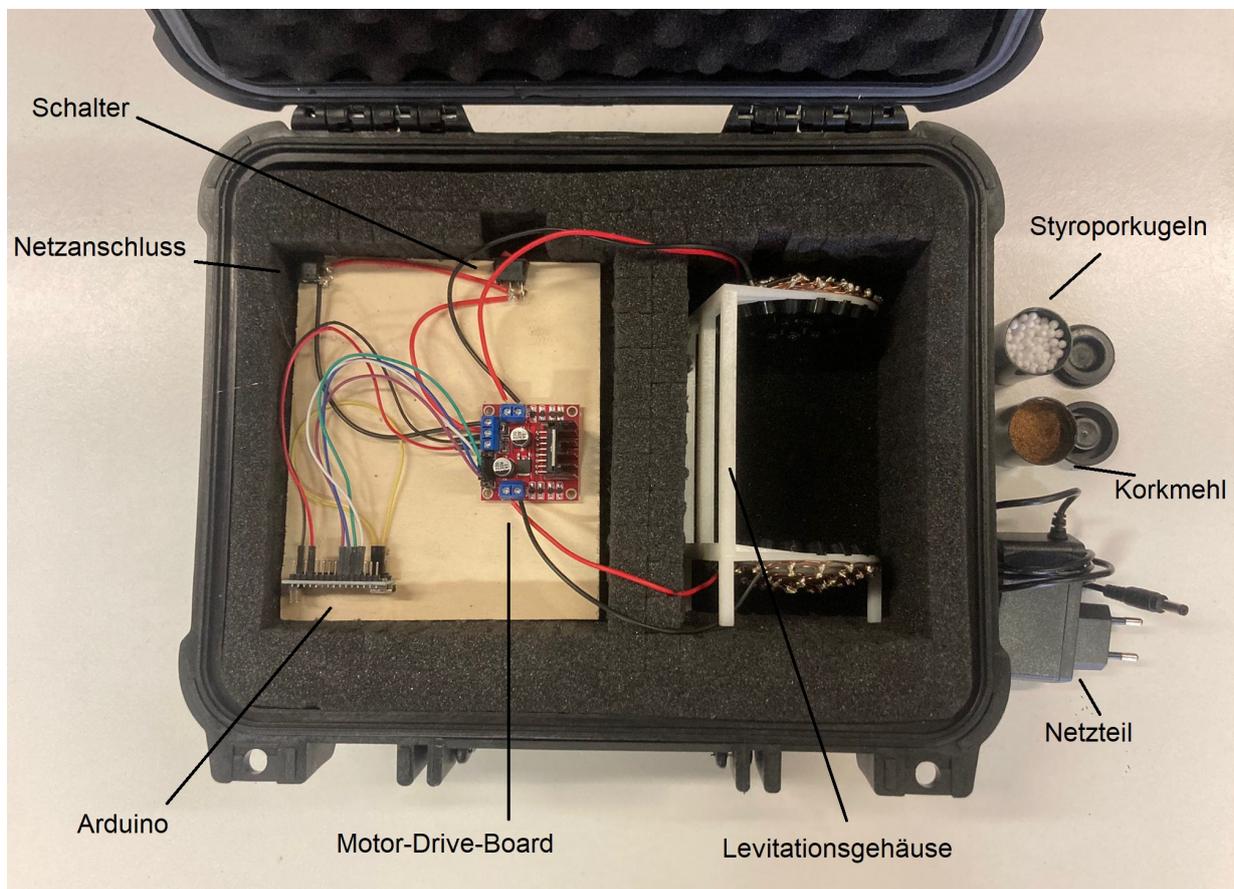


Abb. 1: Experimentierkoffer mit Inhalt

3 Physikalische Hintergründe

Die akustische Levitation bietet eine sehr kostengünstige Möglichkeit Körper zu untersuchen, ohne dass sie mit einem Behältnis wechselwirken. Es werden mithilfe von Ultraschall über stehende Wellen eine statische Druckverteilung generiert, welche eine ortsfeste Positionierung von kleinsten Festkörpern und Flüssigkeiten gewährleistet. Diese Methode fordert eine gasförmige oder flüssige Atmosphäre, um die levitierenden Kräfte zu übertragen. Jene akustische Variante wurde 1933 von Bücks und Müller entdeckt und ein Jahr später von King theoretisch hinterlegt [1][2]. Im Folgenden wird die Funktionsweise der Levitation mathematisch vorgestellt. Abschließend wird eine vereinfachte Erklärung angeboten, welche so weit elementarisiert wurde, sodass sie im Schulunterricht angewendet werden kann.

3.1 Akustische Levitation

Der zur Levitation verwendete Ultraschall wird durch einen Ultraschallgenerator (Sonotrode) erzeugt, was über das Anlegen einer Wechselspannung an einen Piezokristall realisiert werden kann. Dabei wird dieser periodisch deformiert und zur elastischen Schwingung angeregt, sodass im Übertragungsmedium Schallwellen ausgebildet werden. Treffen diese auf einen Reflektor in einem Abstand, der ein ganzzahliges Vielfaches der halben Schallwellenlänge entspricht, so bilden sich stehende Wellen aus, die darüber charakterisiert werden, dass sie feste Druckknoten und schwingende Bäuche besitzen.

Dieser Schall wird über folgende Größen definiert:

Schallschnelle v - Momentangeschwindigkeit, mit der die Teilchen des schwingenden Mediums in Richtung der ausbreitenden Schallwelle schwingen.

$$v = \frac{ds}{dt} \tag{1}$$

Schallwechseldruck \tilde{p} - Verdichtung und Verdünnung des Mediums um den Mittelwert des Standarddrucks \bar{p} , da der Druck p in einem Schallfeld um diesen schwingt.

$$\tilde{p} = p - \bar{p} \tag{2}$$

Für diese Größen gelten mit der Wellenzahl $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, dem Abstand z zum Reflektor und der Ultraschallwellenlänge λ :

$$v = v_{max} \sin(kz) \quad \text{und} \quad \tilde{p} = \tilde{p}_{max} \cos(kz) \tag{3}$$

Dabei wird die Wellenlänge durch der Frequenz f im Medium und der Ausbreitungsgeschwindigkeit c des Schalls im jeweiligen Medium definiert:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (4)$$

Da Schallwellen als mechanische Wellen angesehen werden können, besitzen sie eine Gesamtenergie, die sich aus einem kinetischen E_{kin} und einem potentiellen E_{pot} Anteil zusammensetzt. Diese werden mithilfe der Dichte des Trägermediums ρ_M berechnet:

$$E = E_{kin} + E_{pot} = \frac{\rho_M}{2} v_{max}^2 \sin^2(kz) + \frac{1}{2\rho_M c^2} \tilde{p}_{max}^2 \cos^2(kz) \quad (5)$$

Positioniert man nun ein Teilchen mit einem bestimmten Volumen V_T , Durchmesser d_T und Dichte ρ_T in einem Druckknoten dieses Schallfeldes, liefert die darauf wirkende Energie eine radiale Rückstellkraft, bei einer Auslenkung Δz aus diesem Knoten. Diese wird auch axiale Levitationskraft F_{axial} genannt und wird wie folgt berechnet:

$$F_{axial} = \frac{5}{8} k \rho_M v_{max}^2 V_T f_1(x) \sin(2k\Delta z) = \rho_T V_T g \quad (6)$$

$$\text{mit} \quad f_1(x) = \frac{3}{(x)^2} \left(\frac{\sin(x)}{x} - \cos(x) \right) \quad (7)$$

$$\text{mit} \quad x = k \cdot d_T \quad (8)$$

Dabei ist g die Gravitationskonstante, der entgegengewirkt werden muss. Somit ist zu erkennen, dass die Levitationskraft abhängig von der Dichte des Trägermediums, der Frequenz des Ultraschalls und der Schallschnelle ist.

Der Durchmesser des Teilchens d_T ist ausschlaggebend für den Erfolg der Levitation und geht über die Funktion in Gleichung (8) in die Gesamtgleichung (6) ein. Wenn der Wert $x > 0,72$ wird, so ist die Gleichung (6) negativ. Das bedeutet, dass ein eingefügtes Teilchen mit einem Durchmesser, welcher größer als das 0,7-fache der Ultraschallwellenlänge ist, sich nicht in dem Ultraschallfeld positionieren lässt.

In folgender Darstellung werden die hier theoretische verwendeten physikalischen Größen veranschaulicht:

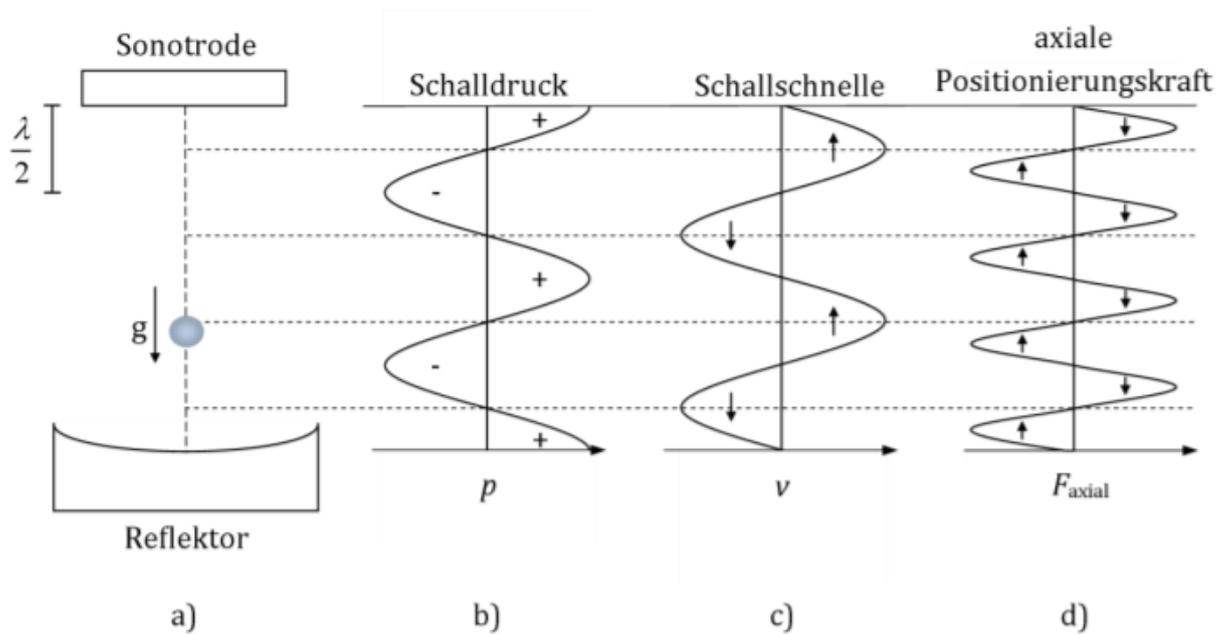


Abb. 2: Schematische Darstellung der physikalischen Größen in dem Schallfeld einer stehenden Welle. a) In einem Druckknoten positionierte Probe, auf den die Erdbeschleunigung g wirkt. Der Abstand zwischen Sonotrode und Reflektor ist dabei ein ganzes Vielfaches der halben Ultraschallwellenlänge. b) Darstellung der Druckverteilung. c) Darstellung der Schallschnelle. d) Darstellung der axialen Levitationskraft. Darstellung entnommen aus [3, S.14].

Das levitierende Teilchen befindet sich in Ruhelage in einem Schalldruck-Knoten, somit am Ort maximaler Schallschnelle und einer axialen Levitationskraft von null. Die Kraft wirkt erst auf das Teilchen, sobald es durch die Gravitationskraft eine Auslenkung Δz aus ihrer Ruhelage erfährt.

Es herrscht auch eine Rückstellkraft, wenn sich das Teilchen radial aus der Ruhelage entfernt. Diese resultiert aus dem Bernoulli-Prinzip. Da sich die levitierende Probe am Ort maximaler Schallschnelle befindet, bewegen sich dort die Moleküle des Fluids am schnellsten. Die Schallschnelle nimmt dabei immer weiter ab, wenn man von der Levitationsachse nach außen geht. Verlässt die Probe nun die Levitationsachse, so bewegt sich das Fluid an der Ruhelage zugewandten Seite schneller, als auf der abgewandten Seite. Somit entsteht ein Unterdruck und eine Druckdifferenz, welche eine Rückstellkraft auf das Teilchen in Richtung der Ausgangsposition bewirkt.

3.2 Elementarisierte Erklärung

Um diesen Versuch zu verstehen, muss die stehende Welle eingeführt werden. Diese wird darüber charakterisiert, dass es eine Welle mit Punkten ist, deren Auslenkung null beträgt. Jene Orte werden Knoten genannt. Die schwingenden Bereiche um die Knoten herum werden als Bäuche bezeichnet. Stehende Wellen entstehen durch die Überlagerung von zwei entgegelaufenden Wellen. Dies kann auch zustande kommen, wenn eine Welle an einer Ebene reflektiert wird und diese Reflexionswelle mit der Ursprünglichen interferiert.

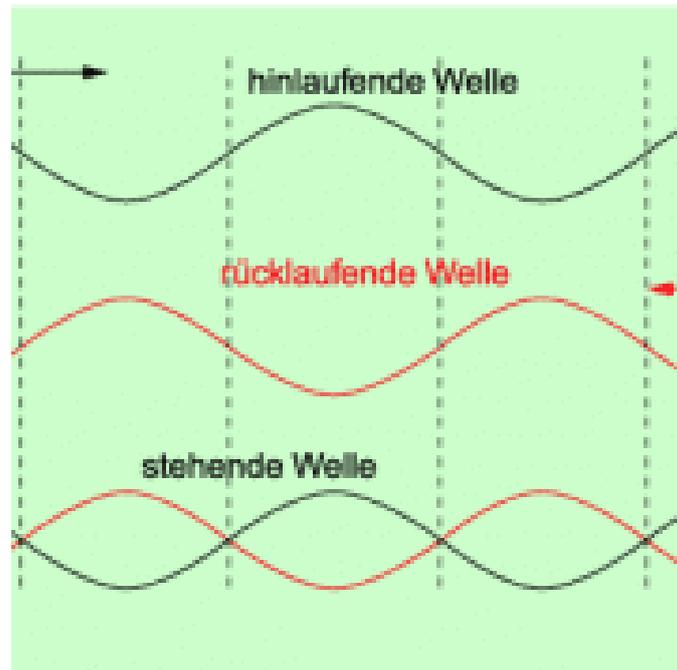


Abb. 3: Schematische Darstellung zur Entstehung einer stehenden Welle. Darstellung entnommen aus [Anhang 1].

Es können stehende mechanische Wellen über ein Seil oder speziell dafür entwickelte Wellenmaschinen erzeugt werden, deren Anschaulichkeit sehr hoch ist.