

Acoustic Levitation

Rafael Haigermoser

Maximilian Irran

16. Mai 2019

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Vorwort	3
1.2	Vorteile gegenüber anderen Methoden	3
1.3	Anwendungsgebiete	4
1.4	Bisherige Erfolge in der Acoustic Levitation	5
2	Theorie und Berechnung	6
2.1	Berechnung des Abstands	6
2.2	Gor'kov Potential weiterentwickelt von Henrik Bruus	6
2.3	Stehende Wellen und „Single Beam Tweezer“	8
2.4	Weiterentwicklung und nächste Schritte in der Acoustic Levitation	9
2.5	Tiere schweben lassen	11
3	Praxis	12
3.1	Technische Realisierung	12
3.1.1	Grundfunktion	12
3.1.2	Phasenverschiebung	13
3.2	Abstand einstellen	13
3.3	Konfiguration	16
3.3.1	Lautsprecher	17
3.3.2	Eingangssignal	17
3.3.3	Schwebeobjekt	18
3.3.4	Einlegmethode	19
3.4	Erkenntnisse	19
3.5	Messungen	20
3.6	Schwebung	20
4	Quellenverzeichnis	22
4.1	Literaturverzeichnis	22
4.2	Abbildungsverzeichnis	25

1 Einleitung

1.1 Vorwort

Acoustic Levitation ist eine Möglichkeit, Objekte frei in der Luft schweben zu lassen. Wir haben es geschafft, einen Single-Beam-Acoustic-Levigator zu bauen, und beschreiben in dieser Arbeit nicht nur, wie wir diesen konstruierten (Kapitel 3), sondern auch, warum dieser Versuchsaufbau funktioniert (Kapitel 2). Warum wir diesen Aufbau gewählt haben, ist in 1.2 nachzulesen.

1.2 Vorteile gegenüber anderen Methoden

Acoustic levitation bietet vielfältige Möglichkeiten, Prozesse, die berührungslos vollzogen werden müssen, zu vereinfachen, wenn dabei beliebige Materialien bis zu einer Dichte¹ von $2,2 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ verwendet werden. Im Gegensatz zum Einsatz von Magneten können nicht nur ferromagnetische Materialien zum Schweben gebracht werden (wobei es dank der schwachen Polarisation von Wasser schon möglich war, einen Frosch mit genügend starken Magnetfeldern schweben zu lassen²). Es ist in solchen Fällen außerdem weniger Energie nötig, und es fällt die aufwändige Sensorik weg, um die Objekte stabil in der Luft zu halten. Diese starke Hysterese von Magneten ist bei der Acoustic Levitation auch kein Problem. Im Gegensatz zum Optical Trapping³ können nicht nur durchsichtige Objekte bis zu einer Größe von $0.01\text{-}10\mu\text{m}$ zum Schweben gebracht werden.⁴

¹Marzo, A. et al. Holographic acoustic elements for manipulation of levitated objects. Nat. Commun. 6:8661 doi: 10.1038/ncomms9661 (2015)

²Berry, M. V. and Geim, A. K., „Of flying frogs and levitrons,” Eur. J. Phys. 18(4), 307 (1997).

³Grier, D. G. A revolution in optical manipulation. Nature 424, 810–816 (2013).

⁴Optical trapping Review of Scientific Instruments 75, 2787 (2004); <https://doi.org/10.1063/1.1785844>

1.3 Anwendungsgebiete

Im Folgenden werden verschiedene Bereiche aufgelistet, in welchen Acoustic Levitation schon erfolgreich eingesetzt wurde. Die Aufzählung hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit und soll nur zeigen, wie wichtig Acoustic Levitation in Zukunft werden könnte.

Pharmazeutika⁵: Es können berührungslos Objekte mit einem Volumen von 0.1-10 μ L transportiert werden. Dies ist für Experimente wie kontaktloses Verschmelzen von Tröpfchen, Mischen, Verkapselung von flüssigen oder festen Materialien, Absorbierung, Auflösung und Transfektion von DNA geeignet.

Nanomaterial Self-Assembly⁶: Mit Hilfe eines Röntgenstrahls kann sich bei kontrollierter Atmosphäre und Acoustic Levitation weiche Materie selbst in Formen (mizellar, hexagonal, „bicontinuous cubic“, und lamellare Phasen) zusammenbauen.

Acoustic Levitation findet auch viele andere Anwendungen in der Chemie.⁷

Biochemie⁸: Es können Molekülstrukturen wie zum Beispiel rote Blutzellen unbeschadet in kleinen Mengen transportiert werden. Biologie^{9 10}: Es können auch kleine Tiere wie z.B. der Zebrafisch transportiert werden.

Physik¹¹: Es kann das Verhalten verschiedener Flüssigkeiten untersucht werden, wie zum Beispiel deren Oberflächenspannung^{12 13} oder die Eigenschaften von Eiskristallen¹⁴. Acoustic levitation bringt auch neue Möglichkeiten bei der Erforschung der Bildung von Kristallstruk-

⁵Foresti, D., Nabavi, M., Klingauf, M., Ferrari, A., and Poulikakos, D., „Acoustophoretic contactless transport and handling of matter in air,” *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 110(31), 12549–12554 (2013). <https://doi.org/10.1073/pnas.1301860110>,

⁶Seddon, A. M., Richardson, S. J., Rastogi, K., Plivelic, T. S., Squires, A. M., and Pfrang, C., „Control of nanomaterial self-assembly in ultrasonically levitated droplets,” *J. Phys. Chem. Lett.* 7(7), 1341–1345(2016). <https://doi.org/10.1021/acs.jpcllett.6b00449>

⁷Santesson, S. and Nilsson, S., „Airborne chemistry: Acoustic levitation in chemical analysis,” *Anal. Bioanal. Chem.* 378(7), 1704–1709 (2004). <https://doi.org/10.1007/s00216-003-2403-2>

⁸Puskar, L., Tuckermann, R., Frosch, T., Popp, J., Ly, V., McNaughton, D., and Wood, B. R., „Raman acoustic levitation spectroscopy of red blood cells and Plasmodium falciparum trophozoites,” *Lab Chip* 7(9), 1125–1131 (2007). <https://doi.org/10.1039/b706997a>

⁹Weber, R. J., Benmore, C. J., Tumber, S. K., Taylor, A. N., Rey, C. A., Taylor, L. S., and Byrn, S. R., „Acoustic levitation: Recent developments and emerging opportunities in biomaterials research,” *Eur. Biophys. J.* 41(4), 397–403 (2012). <https://doi.org/10.1007/s00249-011-0767-3>

¹⁰Sundvik, M., Nieminen, H. J., Salmi, A., Panula, P., and Hæggström, E., „Effects of acoustic levitation on the development of zebrafish, *Danio rerio*, embryos,” *Sci. Rep.* 5, 13596 (2015). <https://doi.org/10.1038/srep13596>

¹¹Trinh, E. and Wang, T. G., „Large-amplitude free and driven drop-shape oscillations: Experimental observations,” *J. Fluid Mech.* 122, 315–338 (1982). <https://doi.org/10.1017/s0022112082002237>

¹²Trinh, E. H., Marston, P. L., and Robey, J. L., „Acoustic measurement of the surface tension of levitated drops,” *J. Colloid Interface Sci.* 124(1), 95–103 (1988). [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(88\)90329-3](https://doi.org/10.1016/0021-9797(88)90329-3)

¹³Tian, Y., Holt, R. G., and Apfel, R. E., „A new method for measuring liquid surface tension with acoustic levitation,” *Rev. Sci. Instrum.* 66(5), 3349–3354 (1995). <https://doi.org/10.1063/1.1145506>

¹⁴Bauerecker, S. and Neidhart, B., „Formation and growth of ice particles in stationary ultrasonic fields,” *J. Chem. Phys.* 109(10), 3709–3712 (1998). <https://doi.org/10.1063/1.476971>

turen in Metallen¹⁵ oder bei der Erforschung von Phasenübergängen¹⁶; auch das Wachsen von Kristallen in Salzen kann weiter untersucht werden.¹⁷ Das Ionisieren von Materialien: in diesem Fall werden Proben mit wenigen Millimetern Durchmesser mit einem Carbon-Dioxid-Laser bestrahlt¹⁸.

Die Aufnahme einer Massenspektrometrie oder einer Raman-Spektroskopie wird durch Acoustic Levitation vereinfacht.¹⁹ Diese wird zur Untersuchung von Algalzellen²⁰ oder der schon erwähnten roten Blutkörperchen²¹ verwendet. Acoustic levitation findet weitere Einsatzgebiete in Laboren, in denen berührungslos gearbeitet werden muss.²²

1.4 Bisherige Erfolge in der Acoustic Levitation

Bis jetzt wurden häufig piezoelektrische Aktoren²³ eingesetzt, welche allerdings relativ teuer sind. Diese konnten auch nur Kräfte in eine Richtung bewirken^{24 25} oder benötigten eine akustische Linse²⁶, welche auch nicht in dem Preisbereich eines HTL-Projekts liegen. Es wurden auch sogenannte Acoustic Tweezers eingesetzt, welche nur auf einer Seite einen Lautsprecher hatten und nur mit der Reflektion stehende Wellen erzeugten. Diese benötigen allerdings ein Material, das Schall sehr gut reflektiert, und einen sehr starken Lautsprecher, außerdem rea-

¹⁵Xie, W. J., Cao, C. D., Lü, Y. J., and Wei, B., „Eutectic growth under acoustic levitation conditions,” *Phys. Rev. E* 66(6), 061601 (2002). <https://doi.org/10.1103/physreve.66.061601>,

¹⁶Ermoline, A., Schoenitz, M., Hoffmann, V. K., and Dreizin, E. L., „Experimental technique for studying high-temperature phases in reactive molten metal based systems,” *Rev. Sci. Instrum.* 75(12), 5177–5185(2004). <https://doi.org/10.1063/1.1819011>

¹⁷Cao, H. L., Yin, D. C., Guo, Y. Z., Ma, X. L., He, J., Guo, W. H., Xie, X.-Z., and Zhou, B. R., „Rapid crystallization from acoustically levitated droplets,” *J. Acoust. Soc. Am.* 131(4), 3164–3172 (2012). <https://doi.org/10.1121/1.3688494>

¹⁸Stindt, A., Albrecht, M., Panne, U., and Riedel, J., „CO₂ laser ionization of acoustically levitated droplets,” *Anal. Bioanal. Chem.* 405(22), 7005–7010 (2013). <https://doi.org/10.1007/s00216-012-6500-y>

¹⁹Westphall, M. S., Jorabchi, K., and Smith, L. M., „Mass spectrometry of acoustically levitated droplets,” *Anal. Chem.* 80(15), 5847–5853 (2008). <https://doi.org/10.1021/ac800317f>

²⁰Wood, B. R., Heraud, P., Stojkovic, S., Morrison, D., Beardall, J., and McNaughton, D., „A portable Raman acoustic levitation spectroscopic system for the identification and environmental monitoring of algal cells,” *Anal. Chem.* 77(15), 4955–4961 (2005). <https://doi.org/10.1021/ac050281z>

²¹Puskar, L., Tuckermann, R., Frosch, T., Popp, J., Ly, V., McNaughton, D., and Wood, B. R., „Raman acoustic levitation spectroscopy of red blood cells and *Plasmodium falciparum* trophozoites,” *Lab Chip* 7(9), 1125–1131 (2007). <https://doi.org/10.1039/b706997a>

²²Priego-Capote, F. and de Castro, L., „Ultrasound-assisted levitation: Lab-on-a-drop,” *TrAC, Trends Anal. Chem.* 25(9), 856–867 (2006). <https://doi.org/10.1016/j.trac.2006.05.014>,

²³Glynne-Jones, P. et al. Array-controlled ultrasonic manipulation of particles in planar acoustic resonator. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Control* 59, 1258–1266 (2012).

²⁴Lee, J. et al. Single beam acoustic trapping. *Appl. Phys. Lett.* 95, 073701 (2009)

²⁵Baresch, D., Thomas, J. L. & Marchiano, R. Observation of a single-beam gradient force acoustical trap for elastic particles: acoustical tweezers. Preprint at <http://arxiv.org/abs/1411.1912>

²⁶Lam, K. H. et al. Ultrahigh frequency lensless ultrasonic transducers for acoustic tweezers application. *Bio-technol. Bioeng.* 110, 881–886 (2013).

giert dieser Aufbau sehr empfindlich auf Temperaturschwankungen²⁷, was ihn für viele der in 1.3 angesprochenen Gebiete unbrauchbar macht. Es konnte allerdings schon ein „Tractor Beam“²⁸ oder „Bottle Beam“²⁹ erzeugt werden. Diese konnten ohne weitere Reflektoren Objekte bewegen.

2 Theorie und Berechnung

2.1 Berechnung des Abstands

Der Abstand der beiden Lautsprecher kann theoretisch auch berechnet werden:

$$\frac{33000\text{cm/sSchallgeschwindigkeit}}{40000\text{HzArbeitsfrequenz}} = 8,25\text{mm}$$

In der Praxis zeigt sich allerdings, dass der Abstand mit Hilfe eines Oszilloskops einfacher einzustellen ist als mit einer Schiebelehre. Mehr dazu in 3.2.

2.2 Gor'kov Potential weiterentwickelt von Henrik Bruus

Um das Verhalten von kleinen Teilchen bei Acoustic Levitation berechnen/simulieren zu können, entwickelte Prof. Henrik Bruus eine von Gorkov 1962 entwickelte und benannte Theorie³⁰ weiter. Nun folgt eine Zusammenfassung dieser Arbeit³¹:

$$\text{Dichte...}\rho = \rho_0 + \rho_1 + \rho_2 \quad (1)$$

$$\text{Druck...}p = p_0 + c_0^2\rho_1 + p_2 \quad (2)$$

$$\text{Geschwindigkeit...}v = v_1 + v_2 \quad (3)$$

Das Verhalten der Variablen Dichte, Druck und Geschwindigkeit wurde schon erforscht³². Wir fassen diese in Rechnung 1-3 zusammen. Dabei ist c_0 die Schallgeschwindigkeit in der Flüssig-

²⁷TinyLev: A multi-emitter single-axis acoustic levitator editors-pick Review of Scientific Instruments 88, 085105 (2017); <https://doi.org/10.1063/1.4989995>

²⁸Démoré, C. E. et al. Acoustic tractor beam. Phys. Rev. Lett. 112, 174302 (2014).

²⁹Zhang, P. et al. Generation of acoustic self-bending and bottle beams by phase engineering. Nat. Commun. 5, 4316 (2014).

³⁰L. P. Gorkov, Soviet Physics - Doklady, 1962, 6, 773–775

³¹Bruus, H. Acoustofluidics 7: the acoustic radiation force on small particles. Lab Chip 12, 1014–1021 (2012).

³²H. Bruus, Lab Chip, 2012, 12, 20–28.

keit.

Als Voraussetzung für eine weitere Vereinfachung gilt Gleichung 4 bis 6:

$$p_1 = c_0^2 \rho_1 \quad (4)$$

$$\partial_t \rho_1 = -\rho_0 \nabla \cdot v_1 \quad (5)$$

$$\rho_0 \partial_t v_1 = -c_0^2 \nabla \rho_1 \quad (6)$$

Nach weiteren Vereinfachungen gilt die Wellengleichung (7) für diese Flüssigkeit:

$$\nabla^2 \phi_1 = \frac{1}{c_0^2} \partial_t^2 \phi_1 = -\frac{\omega^2}{c_0^2} \phi_1 \quad (7)$$

Da sich die Kräfte über eine Periode aufheben, können wir über diese integrieren:

$$\langle X \rangle \equiv \frac{1}{\tau} \int_0^\tau dt X(t) \quad (8)$$

Die „acoustic radiation force“ wird in Abbildung 1 und Rechnung 9 beschrieben. Diese beschreibt das Reflektionsverhalten der Ultraschallwellen, die auf das viel kleinere Teilchen aufreffen.

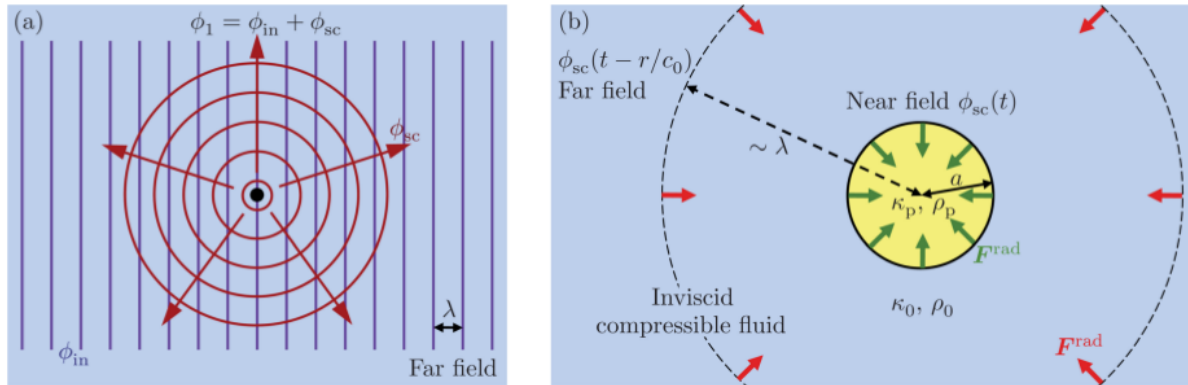


Abbildung 1: Es wird angenommen, dass das Teilchen mit dem Radius a viel kleiner als die Wellenlänge ist. Bei Abbildung (a) wird das Teilchen als Punkt angenommen, wohingegen bei (b) die Wellen wegen zu großer Entfernung nicht mehr dargestellt werden.

$$F^{\text{rad}} = - \int_{\partial\Omega} da \{ (p_2) n + \rho_0 \langle (n \cdot v_1) v_1 \rangle \} = - \int_{\partial\Omega} da \left\{ \left[\frac{1}{2} \kappa_0 \langle p_1^2 \rangle - \frac{1}{2} \rho_0 \langle v_1^2 \rangle \right] n + \rho_0 \langle (n \cdot v_1) v_1 \rangle \right\} \quad (9)$$

Des weiteren beschrieb Bruus in Rechnung 10, wie sich diese „Radiation Force“ bei stehenden

Wellen verhält.

$$\Phi(\tilde{k}, \tilde{\rho}) = \frac{1}{3} f_1(\tilde{k}) + \frac{1}{2} f_2(\tilde{\rho}) \quad (10)$$

Schließlich wird der Weg des Teilchens in Rechnung 11 beschrieben.

$$z(t) = \frac{1}{k} \arctan\{\tan[kz(0)] \times \exp\left[\frac{4\Phi}{3}(ka)^2 \frac{E_{ac}}{\eta} t\right]\} \quad (11)$$

2.3 Stehende Wellen und „Single Beam Tweezer“

Aufbauend auf dem Wissen von 2.2 entwickelten W.J. Xie und B. Wei einen „Single Beam Tweezer“³³, welcher von E.H. Brandt weiterentwickelt wurde³⁴. Deren Arbeit wird im Folgenden zusammengefasst:

Es ist bekannt, dass Wellen Einfluss auf kleine Teilchen haben. Um aber größere Objekte mit Größen bis in den Millimeterbereich schweben zu lassen, muss die einwirkende Kraft dauerhaft aufrecht erhalten werden. Dies wird mit stehenden Wellen erreicht, da sich bei diesen die hin- und die rücklaufende Welle überlagern und so einen immer gleich bleibenden Druckunterschied erzeugen, da Schallwellen im Prinzip nur Druckunterschiede sind.

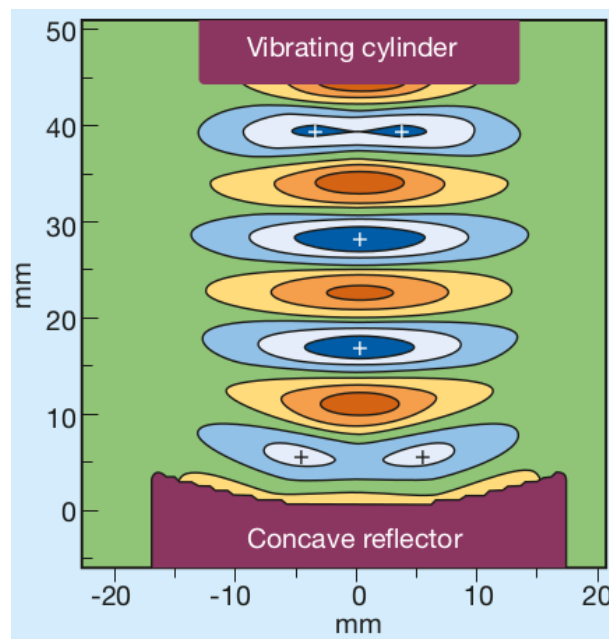


Abbildung 2: Die von W.J. Xie berechneten Druckunterschiede, wenn eine stehende Welle mit der Frequenz 16,7kHz erzeugt wird.

In Abbildung 2 sind Druckminima mit einem + gekennzeichnet. Dies sind jene Orte, an denen

³³Xie, W. J. & Wei, B. Appl. Phys. Lett. 79, Parametric study of single-axis acoustic levitation, 881–883 (2001)

³⁴Brandt, E. H., „Acoustic physics: Suspended by sound“, Nature 413(6855), 474–475 (2001). <https://doi.org/10.1038/35097192>

sich die zum Schweben gebrachten Teilchen später einfinden werden. Besonders interessant ist, dass sich das oberste und das unterste Feld in zwei Minima aufspalten. Dies erklärt, dass in der Praxis die obersten und untersten Objekte im Gegensatz zu allen anderen Teilchen nicht in einer Linie zu finden sind. Dieser „Single Beam Tweezer“ verwendet einen magnetostriktiven Aktor und einen Reflektor, um die stehende Schallwelle zu erzeugen. Diese Bauteile werden wegen ihrer hohen Kosten und deren seltener Verwendung nur in Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen eingesetzt. Da die Arbeitsfrequenz dieses Aufbaus mit 16,7kHz nicht einmal halb so groß ist wie jene in unserem Aufbau (40kHz), sind die Unterdruckfelder auch größer und damit die Objekte, die zum Schweben gebracht werden können.

2.4 Weiterentwicklung und nächste Schritte in der Acoustic Levitation

Bei den bisher besprochenen Methoden war es möglich, Objekte in der Luft schweben zu lassen; allerdings ist das Bewegen durch den Raum und das gezielte Rotieren um die eigene Achse des Objekts nicht möglich. Um dies zu erreichen, wird ein ganz neuer Aufbau benötigt, und zwar wird nicht mehr eine stehende Welle zwischen einem Lautsprecher und einem Reflektor oder zwei Lautsprechern gebildet, sondern es werden viele kleine Lautsprecher gleichzeitig angesteuert. Dies wird Array genannt. Deren Anordnung variiert stark: von zwei einander zugewandten Halbkugeln bis zu einer schachbrettartigen Anordnung von Lautsprechern gibt es viele verschiedene Varianten. Ersteres imitiert „Langevin Horns“, also einen effektiven, aber teuren akustischen Aktor, und wird in „TinyLev: A multi-emitter single-axis acoustic levitator“³⁵ näher beschrieben. Auf Zweiteres wird in „Holographic acoustic elements for manipulation of levitated objects“³⁶ näher eingegangen. Die Erkenntnisse aus diesen Papern werden im Folgenden zusammengefasst, um einen Ausblick auf die zukünftige Entwicklung zu geben. Die Grundlage dafür bilden allerdings Erkenntnisse aus „Realization of compact tractor beams using acoustic delay-lines“³⁷. Darin wird die Formel 12, welche den Druck P bei N Lautsprechern an

³⁵TinyLev: A multi-emitter single-axis acoustic levitator editors-pick Review of Scientific Instruments 88, 085105 (2017); <https://doi.org/10.1063/1.4989995>

³⁶Holographic acoustic elements for manipulation of levitated objects Asier Marzo, Sue Ann Seah, Bruce W. Drinkwater, Deepak Ranjan Sahoo, Benjamin Long & Sriram Subramanian Nature Communications volume 6, Article number: 8661 (2015)

³⁷Realization of compact tractor beams using acoustic delay-lines editors-pick Appl. Phys. Lett. 110, 014102 (2017); <https://doi.org/10.1063/1.4972407>

einem Punkt beschreibt, entwickelt.

$$P(r) = \sum_{n=1}^N P_n L_n \frac{D_f(\theta_n)}{d_n} e^{i(\varphi_n + k\Delta_n)} \quad (12)$$

P_n ist die Kraft des Lautsprechers n , L_n ist der Abstand des Lautsprechers n zu diesem Punkt. D_f berücksichtigt den Winkel des Lautsprechers und d_n beschreibt den freien Raum bis zum Punkt. Der E-Term gibt die Phasenverschiebung an.

Damit können drei verschiedene Arten an Arrays beschrieben werden: bei „Coils“ werden die Lautsprecher zu unterschiedlichen Zeitpunkten angesteuert; die äußeren als erstes, die in der Mitte als letztes. Bei „Tubes“ werden die Lautsprecher in unterschiedlichen Höhen befestigt; die in der Mitte am tiefsten, die am Rand am höchsten. Der Aufbau „Surface“ schließlich schaut wie eine Halbkugel aus.

Die Lautsprecher können nun entweder mit einem IC zu unterschiedlichen Zeiten angesteuert oder, wenn die Phasenverschiebung genau $\lambda/2$ ist, gegenpolig angeschlossen werden. Mit einem 20x20 Coils Array können drei verschiedene Arten von Feldern erzeugt werden. Diese werden „Twin“, „Vortex“, und „Bottle“ genannt. Die erzeugten Druckfelder schauen in Simulationen wie zwei parallele Felder, ein Wirbel (Vortex) oder eine Flasche aus.

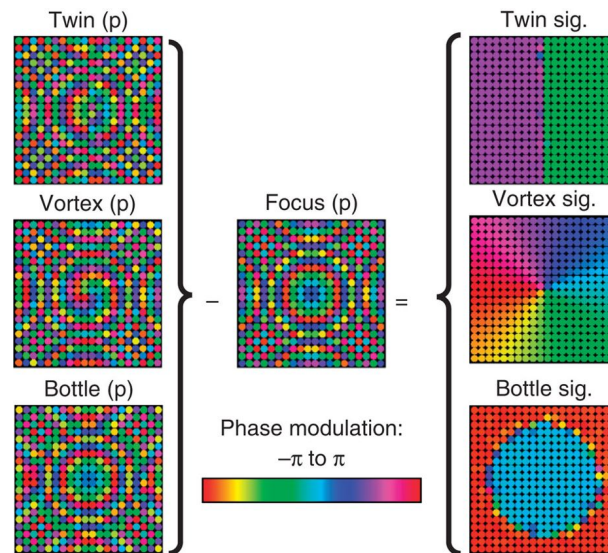


Abbildung 3: Die Phasenverschiebung zwischen den verschiedenen Lautsprechern (links) und die „Holographic Signatures“ (rechts)

In Abbildung 3 ist zu sehen, wie die einzelnen Lautsprecher angesteuert werden müssen, um ein entsprechendes Feld zu erzeugen. Außerdem wird der Begriff der „Holographic Signature“ eingeführt. Dieser beschreibt, wie das Druckverhältnis in der Luft über dem Levitator aussieht.

2.5 Tiere schweben lassen

Bei Vorführungen von Acoustic Levitation vor Publikum wird regelmäßig nachgefragt, ob es möglich ist, Menschen oder zumindest kleinere Tiere schweben zu lassen. Ersteres muss verneint werden, da immer nur Objekte zum Schweben gebracht werden können, die kleiner als die halbe Wellenlänge sind. Beim Menschen müsste die Frequenz so niedrig sein, dass sie hörbar und daher für Menschen schmerzhaft wäre. Ausserdem wären sehr starke Lautsprecher nötig, die entsprechend viel Energie bräuchten. Allerdings wurden von W.J. Xie, Cao, Y.J.Lü., Yz.Y. Hong und B.Wei die Auswirkungen von Acoustic levitation auf kleine Tiere untersucht³⁸. Allerdings nur mit einem „Single Beam Tweezer“; die Unterschiede zu unserem Versuchsaufbau werden in 2.3 erläutert. Da nicht sichergestellt werden kann, dass die Ergebnisse eins zu eins übertragbar sind, ist dieser Abschnitt nicht unter Praxis zu finden. Dieses Paper wird im Folgenden zusammengefasst. Um mögliche Schäden an Tieren schon vorhersagen zu können, kann mit der folgenden Formel der Druck auf die Innereien der Tiere berechnet werden. Näheres im angesprochenen Paper.

Durchschnittsdruck... p_a

Schallgeschwindigkeit... c_0

Mediumsdichte... ρ_0

$$p_a = \frac{1}{2} \frac{\rho_0}{c_0^2} \langle p^2 \rangle - \frac{1}{2} \rho_0 \langle \mathbf{v}^2 \rangle \quad (13)$$

Es wurden kleine Tiere aus den Lebensräumen Luft, Wasser und Land ausgewählt: Ameise, Käfer, Spinne, Marienkäfer, Biene, junger Fisch und eine Kaulquappe. Alle Tiere versuchten, dem Feld zu entkommen; es misslang ihnen allerdings. Die Ameise mit ihren kleinen Beinen konnte am wenigsten ausrichten. Der Käfer konnte trotz seiner Flügel auch nicht entkommen. Nach einer halben Stunde im Acoustic Levitator wurden die Tiere wieder in ihren ursprünglichen Lebensraum entlassen. Abgesehen von den Wasserlebewesen konnten bei den Tieren keine Schäden festgestellt werden. Die Wassertiere sind wahrscheinlich an Wassermangel gestorben, auch wenn einmal pro Minute Wasser zugegeben wurde.

³⁸Acoustic method for levitation of small living animals.W. J. Xie, C. D. Cao, Y. J. Lü, Z. Y. Hong, and B. Wei,<http://dx.doi.org/10.1063/1.2396893>

3 Praxis

3.1 Technische Realisierung

Das Ziel ist es eine Schaltung und einen Aufbau zu entwickeln, welche eine höchstmögliche Leistung am Ausgang, also auf zwei Lautsprecher, bringen. Es soll ein stabiles und starkes Unterdruckfeld entstehen, um möglichst hohe Gewichte schweben zu lassen.

3.1.1 Grundfunktion

Wir haben günstige Untraschalllautsprecher gewählt, die eine gute Leistung bei circa 40kHz aufweisen. Vorteil der entstehenden Schallwellen im 40kHz Bereich ist, dass sie nicht hörbar sind, denn diese würden aufgrund der hohen Amplituden sehr laut und störend sein. Der Nachteil der hohen Schallwellen Frequenz ist das in 2.3 erwähnte geometrisch kleine Unterdruckfeld, in dem nur kleine Objekte schweben können. Um die Lautsprecher mit einem leistungsstarken steuerbaren Signal zu versorgen, haben wir zwei H-Brücken mit externer Versorgung und einen Microprozessor als Steuerelement verwendet. Somit wird das gewünschte 5V Steuersignal auf die doppelte Amplitude der 24V Versorgungsspannung gebracht, also auf ein 48V Signal. Die Konstruktion eines eigenen Gehäuses ist dringend von Nöten, denn es muss der Abstand als auch der Winkel der Lautsprecher aufeinander konstant bleiben, um die Funktion des Projektes aufrecht zu erhalten. Dabei ist zu beachten, dass neben den Lautsprechern möglichst viel Freiraum bleibt, um mögliche Reflektionen der Schallwellen zu vermeiden.

Ein Ergebnis kann zum Beispiel so aussehen:

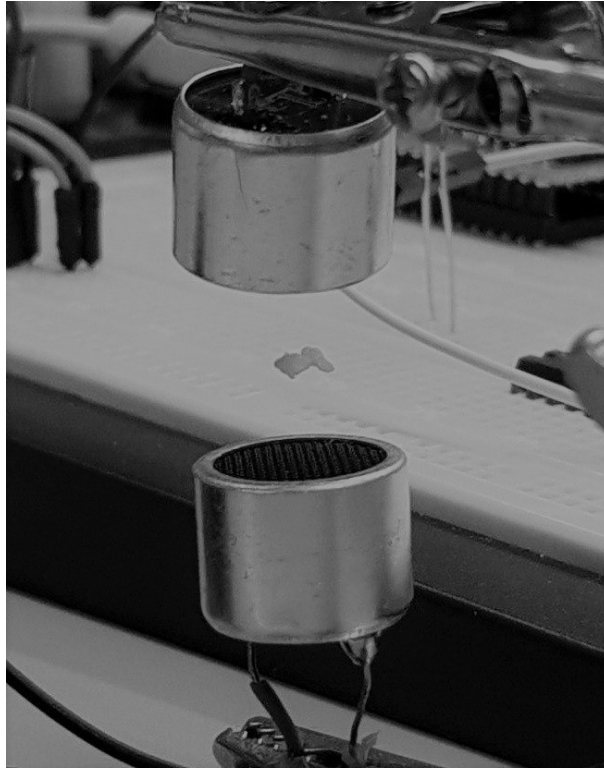


Abbildung 4: Schwebendes Styroporteilchen

3.1.2 Phasenverschiebung

Eine Phasenverschiebung der beiden Eingangssignale zueinander bewirkt nur eine Änderung der Positionen der Druckunterschiede. Wenn dies nun langsam und gleichmäßig passiert, bewegen sich die schwebenden Teilchen in der vertikalen Achse. Das Projekt haben wir also erweitert, um solch eine Funktion zu realisieren. Der Code des Microprozessors muss also geändert werden, damit er zwei Signale mit kontinuierlich veränderter Phasenverschiebung ausgibt. Schaltungstechnisch muss nichts verändert werden. Für die manuelle Steuerung haben wir ein Potenziometer beim Gehäuse hinzugefügt. So kann von Außen die Position der Objekte dynamisch geändert werden.

3.2 Abstand einstellen

Nach den ersten Versuchen hat sich herausgestellt, dass ohne einen genauen Abstand zwischen den Lautsprechern keine beziehungsweise zu schwache stehende Wellen entstehen. Trotz den in 2.1 genauen Berechnungen, ist diese nicht einfach einzustellen, da der Abstand bei den Membranen der beiden Lautsprechern anfängt und dieser schwer abzumessen ist. Einerseits weil die Membran unter einem Netz bei den verwendeten Lautsprechern liegt, aber auch weil sie zu

leicht bewegbar sind, um sie physikalisch mit zum Beispiel einer Schiebelehre zu messen. Solche Messungen sind aber ohnehin nicht realistisch, da die Geometrie des Lautsprechergehäuses, die Umgebung als auch die eingeführten Objekte in das System das Verhalten der Schallwellen und jede Eigenschaft der stehenden Welle dynamisch verändern. Ohne große Berechnungen oder Messungen machen zu müssen, bleibt die Möglichkeit den Abstand durch „Trial and Error“ zu erfassen. Optimale Ergebnisse liefert allerdings die Methode bei der mittels einem Oszilloskop die Phasenübereinstimmung des Eingangssignales und des am zweiten Lautsprecher gemessenen Signals überprüft wird. Dabei müssen die Anschlüsse des zu messenden Lautsprecher frei schweben. Die zwei Signale dürfen nur 0° oder 180° Phasenverschoben sein:

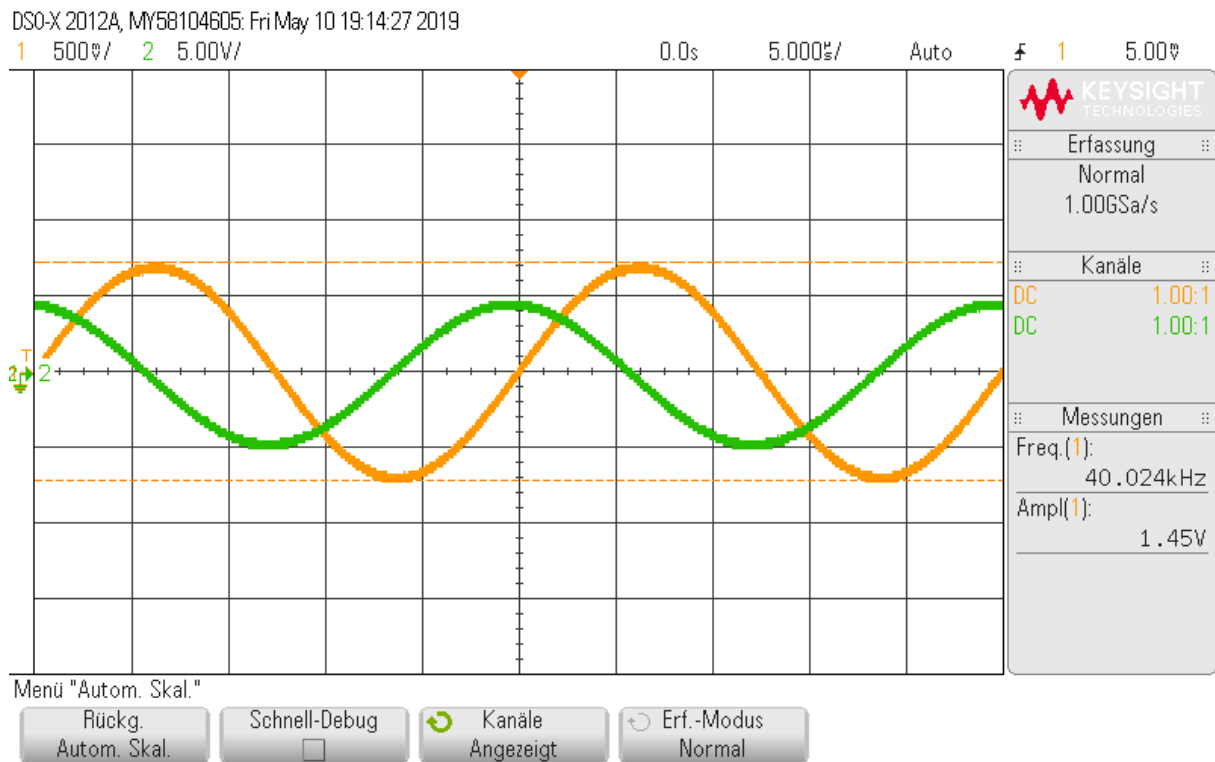


Abbildung 5: noch nicht eingestellter Abstand

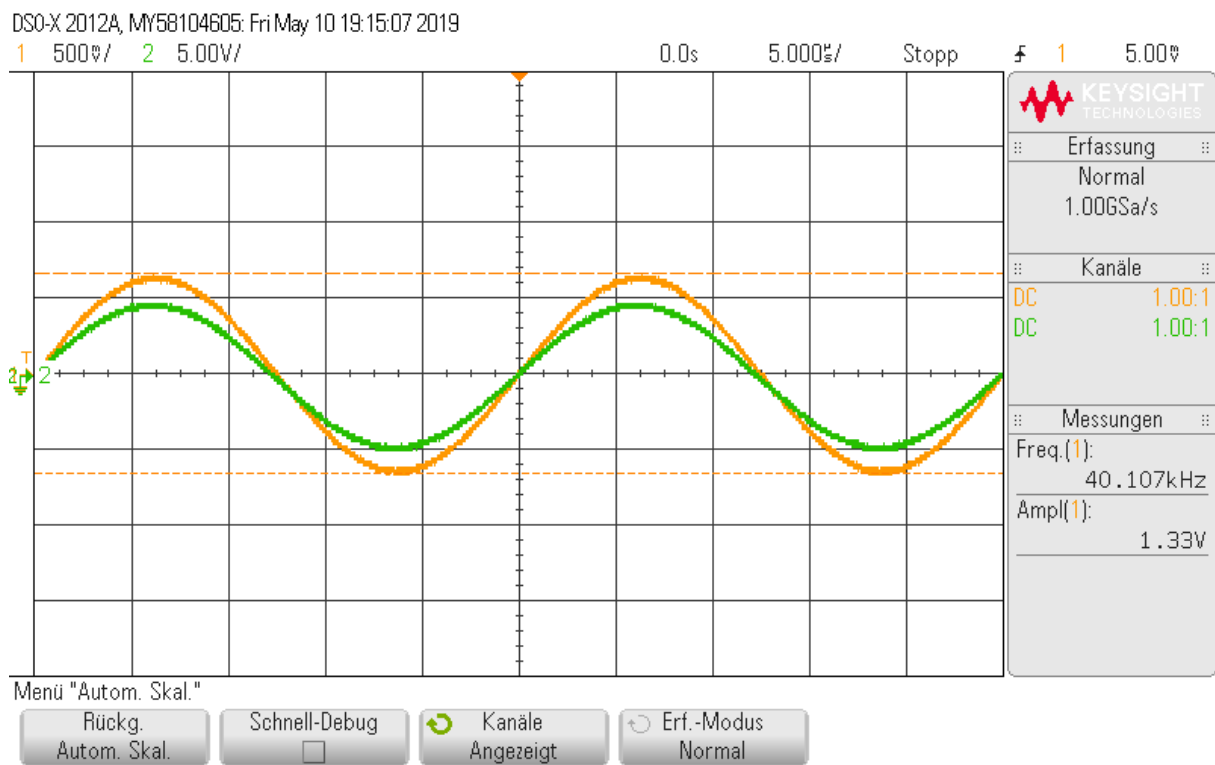


Abbildung 6: 0° Phasenverschoben
richtiger Abstand

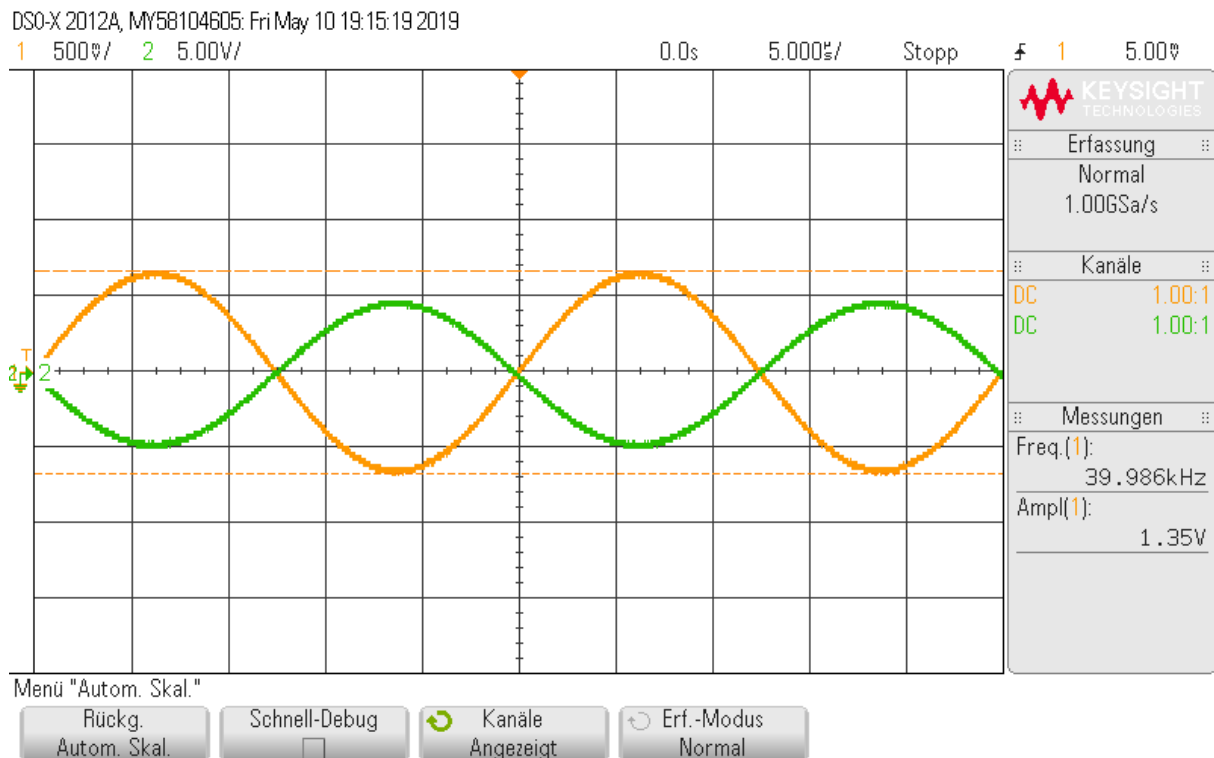


Abbildung 7: 180° Phasenverschoben
richtiger Abstand

Es kann auch ein Vielfaches des ausgerechneten theoretischen Abstandes gewählt werden. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass die Stärke, also die Dichte, die getragen werden kann, des Schwebens mit zunehmenden Abstand abnimmt. Die Schichten in denen sich Druckunterschiede bilden nehmen jedoch zu. Kleine Veränderungen des Abstands nach dem Einstellen können das Unterdruckfeld stark schwächen beziehungsweise ganz zerstören also ist besondere Vorsicht empfohlen.

3.3 Konfiguration

Ein Kügelchen das erste Mal zum Schweben zu bringen, war für uns einer der schwierigsten Schritte dieses Projektes. Es ist nämlich fast unmöglich eine passende Konfiguration der vielen Variablen ohne Rückmeldung zu finden. Diese sind unter anderen: Abstand, Winkel aufeinander und Polung der Lautsprecher (3.3.1); Frequenz, Form und Leistung des Eingangssignals (3.3.2); Leistung der Versorgung (3.3.2); Größe, Gewicht und Form des schwebenden Objektes (3.3.3); Einlegmethode jenes Objektes (3.3.4). Erst nach dem ersten Erfolg konnten wir nach und nach alle Eigenschaften an einander abstimmen.

3.3.1 Lautsprecher

Die Einstellung des Abstandes ist ausführlich in 3.2 beschreiben.

Der Winkel der beiden Lautsprecher aufeinander verändert die Position und Geometrie der Druckfelder zwischen diesen und damit den benötigten Abstand. Große Probleme weist ein gewisser Winkel nicht auf, jedoch sollte dieser 0° bei der Gehäusekonstruktion, und wenn konstantes Verhalten des Systems verlangt ist, betragen.

Die Polung der beiden Lautsprecher ist komplett egal, weil einerseits das Eingangssignal durch die verwendete H-Brücke um den Nullpunkt läuft, also darf diese auch invertiert werden, und andererseits weil die Signale an den Lautsprechern, gleich wie in 3.2 besprochen, 0° beziehungsweise 180° Phasenverschoben sein dürfen.

3.3.2 Eingangssignal

Die Frequenz der Schallwellen haben wir bei ungefähr 40kHz wegen den verwendeten Ultraschalllautsprechern gewählt. Genauere Messungen befinden sich in 3.5 .

Für die Form war für uns anfangs logisch ein Sinussignal den Lautsprechern zur Verfügung zu stellen, da Schallwellen ebenso Sinusschwingungen sind. Das Gegenteil stellte sich heraus, als wir herausfanden, dass unsere Ultraschalllautsprecher ebenso gut mit einem Rechtecksignal operieren. Diese Form hat den Vorteil, dass sie einen weitaus höheren Effektivwert und damit die höhere Leistung hat:

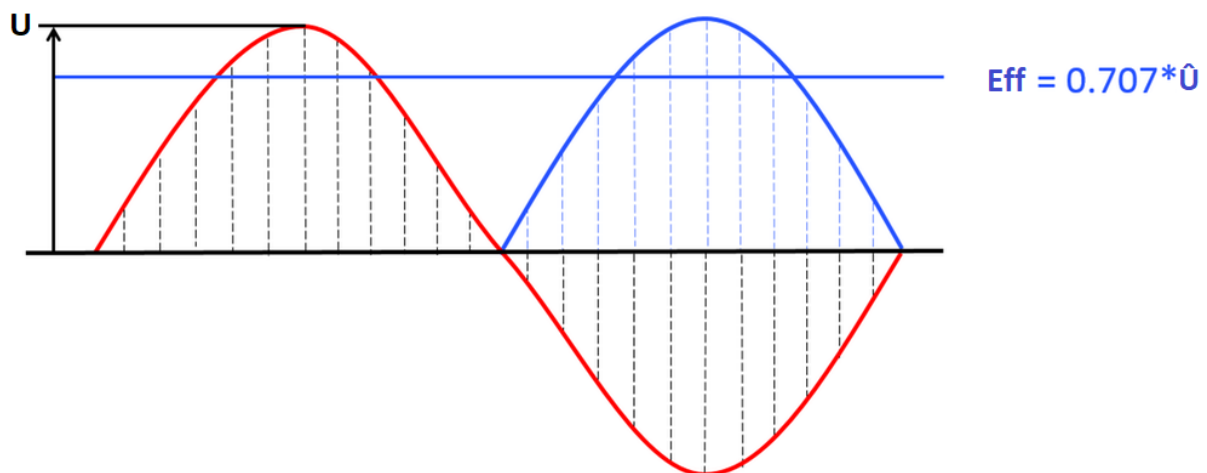


Abbildung 8: Effektivwert Sinusschwingung
 $U_{Eff} = 0.707\hat{U}$

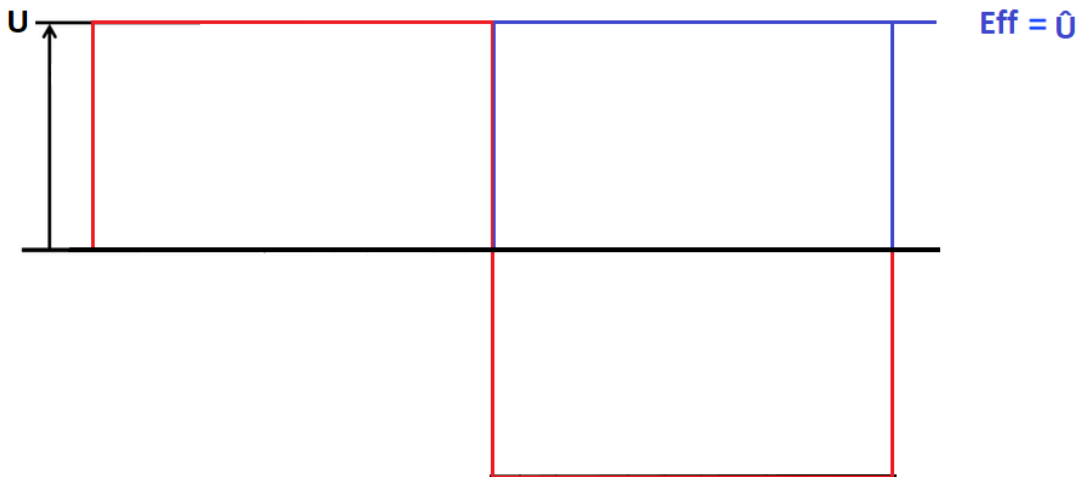


Abbildung 9: Effektivwert Rechtecksignal
 $U_{Eff} = \hat{U}$

Die maximale Leistung des Steuersignals, also jenes vom Microprozessor welche nur die Frequenz vorgibt, ist bei unserer Schaltung fix vom Prozessor vorgegeben und beträgt 5V. Sie muss aber auch nicht besonders hoch sein, denn die endgültige Leistung an den Lautsprechern sind wegen der H-Brücken durch die Versorgung vorgegeben. Trotzdem gibt es einen Minimalwert um die Mosfets in den H-Brücken zu steuern. Dieser liegt bei grob 4V. Da eine ausreichende Leistung der Versorgung so wichtig für die endgültige Funktion ist, haben wir ein Netzteil gewählt, welches die Schaltung mit 24V (mal 2 wegen der verdoppelten Funktion der H-Brücke) und 1A versorgt, also mit einer Leistung von:

$$P = U * I = (2 * 24V) * 1A = 48W \quad (14)$$

3.3.3 Schwebeobjekt

Das Objekt, welches zum Schweben gebracht werden soll, darf maximal der exakten Größe der jeweiligen Unterdruckfelder betragen. Sinn macht es wenig diese Größe auszurechnen. Ausprobieren und Schätzen sind in diesem Fall die weitaus sinnvollere Methoden.

Das Gewicht ist recht einfach mittels der Dichte (in 1.2 erwähnt und zitiert) von $2,2 \frac{g}{cm^3}$ auszurechnen. Damit können Materialien wie zum Beispiel Holz, Papier, Wasser, Polystyrol (Styropor), Schotter bis zu Quarzglas³⁹ zum Schweben gebracht werden.

Recht unerwartet war die Feststellung, dass es nicht vorteilhaft ist, wenn das Objekt kugelförmig ist. Bessere Ergebnisse liefern unregelmäßige beziehungsweise Scheibenformen. Erklärt

³⁹H. Knopf: Dichte einiger Stoffe, 1995

kann dies folgendermaßen werden:

Geometrisch darf das Schwebeobjekt für größtmögliches Volumen maximal genau wie das Unterdruckfeld (Abbildung 2) aussehen. Grob kann diese Form als Zylinder mit dem Durchmesser der Lautsprecher und der Höhe von ungefähr der halben Wellenlänge der Schallwellen beschrieben werden. Bei unserem Beispiel wird das Volumen dieses Zylinders folgendermaßen berechnet:

$$\varnothing_{Lautsprecher} = \varnothing_{Zylinder} = 16mm \quad (15)$$

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{343 \frac{m}{s}}{40kHz} = 8.575mm \quad (16)$$

$$V = \frac{8.575mm}{2} * \pi \left(\frac{16mm}{2} \right)^2 = 862mm^3 \quad (17)$$

3.3.4 Einlegmethode

Bei der Messmethode mittels Oszilloskop sind die Einflüsse der Umgebung und deren Ausmaße auf die Schallwellen und auf die darauf folgende stehende Welle sehr gut sichtbar. Ein einfacher Bleistift in der Nähe der Lautsprecher kann das ganze Unterdruckfeld zusammenbrechen lassen. Durch die enorme Störung des Feldes durch unsere Finger war uns sogar unmöglich händisch ein Objekt schweben zu lassen. Es gelang uns erst als wir ein Netz zum Transport des Teilchens und eine dünne SMD-Pinzette verwendeten.

3.4 Erkenntnisse

Sehr interessant als auch unberuhigend ist unsere Beobachtung, dass wenn ein Objekt nur neben dem System steht, kann ein hohes Summen gehört werden. Dies lässt darauf Schließen, dass sehr leicht Schallwellen mit jeglichen Frequenzen entstehen die bis in den hörbaren Bereich fallen, welcher unter der Hälfte der verwendeten Frequenz liegt! Mehr dazu in 3.6 .

Ein weiterer Versuch war über die Ausrichtung des Aufbaus, bei jener wir herausgefunden haben, dass eine Änderung einer vertikalen Anordnung der Lautsprecher auf eine horizontale die Kraft das Teilchen in der Luft zu halten sehr stark abnimmt. Die Erklärung dazu ist in Abbildung 2 (in Kapitel 2.3) zu sehen und liegt kurzgefasst nur an den Augenformen der Unterdruckfelder, welche nur mit vertikalem Aufbau genug Kraft aufweisen.

Eine unvermutete jedoch sehr vorteilhafte Feststellung von uns ist, dass das ganze System beziehungsweise Gehäuse bewegt werden kann und das schwebende Objekt in der Luft bleibt,

da die Ultraschalllautsprecher im proportional im Raum zueinander nicht bewegt werden. Nur schnelle vertikale Bewegungen weisen aus demselben Grund wie im darüberstehenden Absatz ein Problem auf.

3.5 Messungen

Am Oszilloskop kann der in 3.1 angesprochene optimale Frequenzbereich ziemlich genau mit einem Funktionsgenerator ermittelt werden. Es ist zu erkennen, dass dieser Bereich sehr klein und schwer technisch erreichbar ist. Bei Frequenzen von ungefähr 39,67kHz und 42,55kHz weisen die Lautsprecher Spitzen in der ausgegebenen Leistung auf:

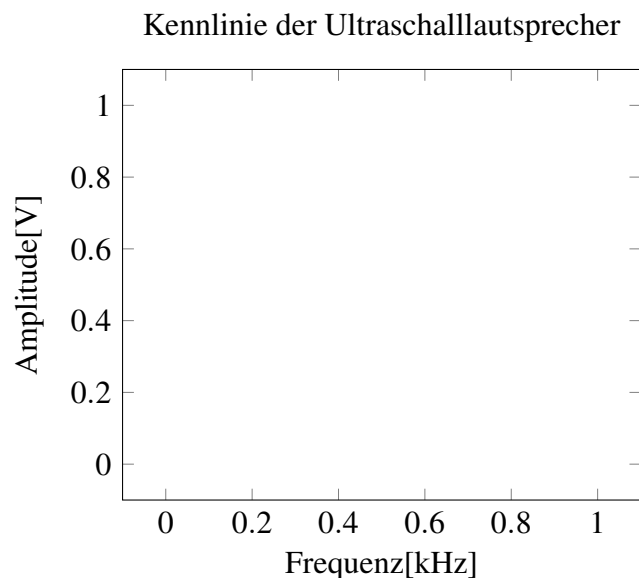


Abbildung 10: Amplitudenverlauf unserer Lautsprecher

3.6 Schwebung

In 3.4 wird von einem hörbaren Geräusch gesprochen. Dieses ist durch die Schwebung zu erklären. Die Schwebung entsteht durch die Addition der Grundschwingung und ihre Oberwellen. Um diese hörbare Schwingung nachzuweisen, nehmen wir zwei Sinusschwingungen mit identischen Amplituden aber unterschiedlicher Frequenzen an. Die zweite Frequenz ist hier die Oberwelle 2. Ordnung der ersten Frequenz:

$$f_1(t) = A \sin(\omega_1 t)$$

$$f_2(t) = A \sin(\omega_2 t)$$

Bei der Addition der beiden Funktionen können Amplitude und Zeit vernachlässigt werden:

$$f_1(t) + f_2(t) = 2 \sin\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}\right) \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}\right) \quad (18)$$

Der Faktor $\cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}\right)$ beschreibt, dass die Frequenz der einhüllenden Schwingung in die Richtung des hörbaren Bereich gehen kann. Dies wird mit einem für unser Projekt relevantem Beispiel ausprobiert:

$$\omega_1 = 2\pi 40kHz$$

$$2.Oberwelle : 2 * 40kHz = 80kHz$$

$$\omega_2 = 2\pi 80kHz$$

$$\cos\left(2\pi\left(\frac{f_1 - f_2}{2}\right)\right)$$

Interessant sind hier nur die Frequenzen also kann der Rest weggelassen werden:

$$\frac{80kHz - 40kHz}{2} = 20kHz$$

Eine 20kHz Schallwelle liegt am oberen Rand der Hörschwelle. Natürlich muss eine Toleranz bei der 40kHz Grundfrequenz einberechnet und die noch weiteren existierenden Oberwellen beachtet werden. So ist das beobachtete hörbare Geräusch durchaus realistisch.

Zu vermuten sind jedoch eine Unmenge an nicht hörbaren Oberwellen und deren addierten Signalen die nicht nur den Nachteil haben, dass die der Verlustleistung beisteuern, aber auch, dass sie die gewollten Schallwellen beeinflussen und die Entstehung der stehenden Welle erschweren.

⁴⁰Abramowitz and Stegun: Handbook of Mathematical Functions, Seite 73, 4.3.34, Variable z auf ω geändert.

4 Quellenverzeichnis

4.1 Literaturverzeichnis

Abramowitz and Stegun. Handbook of Mathematical Functions, 4.3.34, 73.

Baresch, D., Thomas, J. L., & Marchiano, R. (o.D.). Observation of a single-beam gradient force acoustical trap for elastic particles: acoustical tweezers. Abgerufen 11. Mai, 2019, von <http://arxiv.org/abs/1411.1912>

Bauerecker, S., & Neidhart, B. (1998). Formation and growth of ice particles in stationary ultrasonic fields. *The Journal of Chemical Physics*, 109(10), 3709–3712. <https://doi.org/10.1063/1.476971>

Berry, M. V., & Geim, A. K. (1997). Of flying frogs and levitrons. *Eur. J. Phys.*, .

Brandt, E. H. (2001). Suspended by sound. *Nature*, 413(6855), 474–475. <https://doi.org/10.1038/35097192>

Cao, H., Yin, D., Guo, Y., Ma, X., He, J., Guo, W., . . . Zhou, B. (2012). Rapid crystallization from acoustically levitated droplets. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(4), 3164–3172. <https://doi.org/10.1121/1.3688494>

Bruus, H. (2012). Acoustofluidics 7: the acoustic radiation force on small particles. *Lab Chip*, 12(1014–1021).

Bruus, H. (2012b). *Lab Chip*, 12(20-18).

Cao, H., Yin, D., Guo, Y., Ma, X., He, J., Guo, W., . . . Zhou, B. (2012). Rapid crystallization from acoustically levitated droplets. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(4), 3164–3172. <https://doi.org/10.1121/1.3688494> Daniele Foresti, D. (2013, 30. Juli). Acoustophoretic contactless transport and handling of matter in air. Abgerufen 8. Mai, 2019, von <https://www.pnas.org/content/110/31/12549>

Ermoline, A., Schoenitz, M., Hoffmann, V. K., & Dreizin, E. L. (2004). Experimental technique for studying high-temperature phases in reactive molten metal based systems. *Review of Scientific Instruments*, 75(12), 5177–5185. <https://doi.org/10.1063/1.1819011>

Foresti, D., Nabavi, M., Klingauf, M., Ferrari, A., & Poulikakos, D. (2013). Acoustophoretic contactless transport and handling of matter in air. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(31), 12549–12554. <https://doi.org/10.1073/pnas.1301860110>

Grier, D. G. (2013). A revolution in optical manipulation. *Nature*, 424(810–816).

H. Knopf (1995). *Dichte einiger Stoffe*.

Lam, K. H. (2013). Ultrahigh frequency lensless ultrasonic transducers for acoustic tweezers application. *Biotechnol. Bioeng*, 110(881–886).

- Lee, J. (2009). Single beam acoustic trapping. *Appl. Phys. Lett*, 95(073701).
- Marzo, A., Barnes, A., & Drinkwater, B. W. (2017a). TinyLev: A multi-emitter single-axis acoustic levitator. *Review of Scientific Instruments*, 88(8), 085105. <https://doi.org/10.1063/1.4989995>
- Gorkov, L. P. (1962). *Doklady. Soviet Physics*, 6(773–775).
- Marzo, A., Seah, S. A., Bruce, W., Sahoo, D. R., Long, B., & Subramanian, S. (2015). Holographic acoustic elements for manipulation of levitated objects. *Nature Communications* volume, 6(8661).
- Marzo, A., Barnes, A., & Drinkwater, B. W. (2017b). TinyLev: A multi-emitter single-axis acoustic levitator. *Review of Scientific Instruments*, 88(8), 085105. <https://doi.org/10.1063/1.4989995>
- Marzo, A., Ghobrial, A., Cox, L., Caleap, M., Croxford, A., & Drinkwater, B. W. (2017a). Realization of compact tractor beams using acoustic delay-lines. *Applied Physics Letters*, 110(1), 014102. <https://doi.org/10.1063/1.4972407>
- Marzo, A., Ghobrial, A., Cox, L., Caleap, M., Croxford, A., & Drinkwater, B. W. (2017b). Realization of compact tractor beams using acoustic delay-lines. *Applied Physics Letters*, 110(1), 014102. <https://doi.org/10.1063/1.4972407>
- Marzo, A., Seah, S. A., Drinkwater, B. W., Sahoo, D. R., Long, B., & Subramanian, S. (2015). Holographic acoustic elements for manipulation of levitated objects. *Nature Communications*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/ncomms9661>
- Neuman, K. C., & Block, S. M. (2004). Optical trapping. *Review of Scientific Instruments*, 75(9), 2787–2809. <https://doi.org/10.1063/1.1785844>
- Priego-Capote, F., & De Castro, L. (2006). Ultrasound-assisted levitation: Lab-on-a-drop. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 25(9), 856–867. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2006.05.014>
- Puskar, L., Tuckermann, R., Frosch, T., Popp, J., Ly, V., McNaughton, D., & Wood, B. R. (2007a). Raman acoustic levitation spectroscopy of red blood cells and *Plasmodium falciparum* trophozoites. *Lab on a Chip*, 7(9), 1125. <https://doi.org/10.1039/b706997a>
- Puskar, L., Tuckermann, R., Frosch, T., Popp, J., Ly, V., McNaughton, D., & Wood, B. R. (2007b). Raman acoustic levitation spectroscopy of red blood cells and *Plasmodium falciparum* trophozoites. *Lab on a Chip*, 7(9), 1125. <https://doi.org/10.1039/b706997a>
- Santesson, S., & Nilsson, S. (2004). Airborne chemistry: acoustic levitation in chemical analysis. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 378(7), 1704–1709. <https://doi.org/10.1007/s00216-003-2403-2>
- Seddon, A. M., Richardson, S. J., Rastogi, K., Plivelic, T. S., Squires, A. M., & Pfrang, C.

(2016). Control of Nanomaterial Self-Assembly in Ultrasonically Levitated Droplets. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 7(7), 1341–1345. <https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.6b00449>

Stindt, A., Albrecht, M., Panne, U., & Riedel, J. (2012). CO₂ laser ionization of acoustically levitated droplets. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 405(22), 7005–7010. <https://doi.org/10.1007/s00216-012-6500-y>

Sundvik, M., Nieminen, H. J., Salmi, A., Panula, P., & Hæggström, E. (2015). Effects of acoustic levitation on the development of zebrafish, *Danio rerio*, embryos. *Scientific Reports*, 5(1). <https://doi.org/10.1038/srep13596>

Tian, Y., Holt, R. G., & Apfel, R. E. (1995). A new method for measuring liquid surface tension with acoustic levitation. *Review of Scientific Instruments*, 66(5), 3349–3354. <https://doi.org/10.1063/1.1145500>

Trinh, E., Marston, P., & Robey, J. (1988). Acoustic measurement of the surface tension of levitated drops. *Journal of Colloid and Interface Science*, 124(1), 95–103. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(88\)90329-3](https://doi.org/10.1016/0021-9797(88)90329-3)

Trinh, E., & Wang, T. G. (1982). Large-amplitude free and driven drop-shape oscillations: experimental observations. *Journal of Fluid Mechanics*, 122(-1), 315. <https://doi.org/10.1017/s0022112082002237>

Weber, R. J. K., Benmore, C. J., Tumber, S. K., Taylor, A. N., Rey, C. A., Taylor, L. S., & Byrn, S. R. (2011). Acoustic levitation: recent developments and emerging opportunities in biomaterials research. *European Biophysics Journal*, 41(4), 397–403. <https://doi.org/10.1007/s00249-011-0767-3>

Westphall, M. S., Jorabchi, K., & Smith, L. M. (2008). Mass Spectrometry of Acoustically Levitated Droplets. *Analytical Chemistry*, 80(15), 5847–5853. <https://doi.org/10.1021/ac800317f>

Wood, B. R., Heraud, P., Stojkovic, S., Morrison, D., Beardall, J., & McNaughton, D. (2005). A Portable Raman Acoustic Levitation Spectroscopic System for the Identification and Environmental Monitoring of Algal Cells. *Analytical Chemistry*, 77(15), 4955–4961. <https://doi.org/10.1021/ac050281>

Xie, W. J., & Wei, B. (2001). Parametric study of single-axis acoustic levitation. *Appl. Phys. Lett.*, 79(881-883).

Xie, W. J., Cao, C. D., Lü, Y. J., Hong, Z. Y., & Wei, B. (2006). Acoustic method for levitation of small living animals. *Applied Physics Letters*, 89(21), 214102. <https://doi.org/10.1063/1.2396893>

Xie, W. J., Cao, C. D., Lü, Y. J., & Wei, B. (2002). Eutectic growth under acoustic levitation conditions. *Physical Review E*, 66(6). <https://doi.org/10.1103/physreve.66.061601>

Zhang, P. (2014). Generation of acoustic self-bending and bottle beams by phase engineering. *Nat. Commun.*, 5(4316).

4.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aus H. Bruus, Lab Chip, 2012, 12, 20–28. entnommen.

Abbildung 2: Aus Brandt E. H., „Acoustic physics: Suspended by sound”, Nature 413(6855), 474–475 (2001). <https://doi.org/10.1038/35097192> entnommen.

Abbildung 3: Aus Holographic acoustic elements for manipulation of levitated objects Asier Marzo, Sue Ann Seah, Bruce W. Drinkwater, Deepak Ranjan Sahoo, Benjamin Long & Sriram Subramanian Nature Communications volume 6, Article number: 8661 (2015) entnommen

Abbildung 4: Eigenkreation. Fotografie des Aufbaus.

Abbildung 5: Eigenkreation. Falscher Abstand. Messmethode: 2 Lautsprecher aufeinander zeigend platziert, Am Oszilloskop Steuer- und Ausgangssignal am 2. Lautsprecher überprüft.

Abbildung 6: Eigenkreation. 0° Richtiger Abstand. Messmethode: 2 Lautsprecher aufeinander zeigend platziert, Am Oszilloskop Steuer- und Ausgangssignal am 2. Lautsprecher überprüft.

Abbildung 7: Eigenkreation. 180° Richtiger Abstand. Messmethode: 2 Lautsprecher aufeinander zeigend platziert, Am Oszilloskop Steuer- und Ausgangssignal am 2. Lautsprecher überprüft.

Abbildung 8: Eigenkreation. Grafische Ermittlung des Amplitudeneffektivwertes einer Sinusschwingung.

Abbildung 9: Eigenkreation. Grafische Ermittlung des Amplitudeneffektivwertes eines Rechtecksignals.

Abbildung 10: Eigenkreation. Kennlinie der Ultraschalllautsprecher. Messmethode: 2 Lautsprecher aufeinander zeigend platziert, Frequenz verändert mit Funktionsgenerator an einem Lautsprecher, Amplituden am Oszilloskop ausgelesen am anderen, An 35 Messpunkten gemessen.