

Der alternative Feuerlöscher

SOWAS-Projekt Sommersemester 2016

Gruppe F: Katharina Ortel, Adam Enders, Timo Schmalofski, Timo Schorlepp

Projektleiter: Alexander Ganz

Motivation

Inspiziert von einem 2015 von zwei Studenten der George Mason University, Virginia, durchgeführten Projekt zu einem lautsprecherbasierten Feuerlöscher, der Feuer nur mit Schallwellen löschen soll (vgl. nebenstehenden QR-Code), entschlossen wir uns, eine vergleichbare Konstruktion zu erstellen und den Löschmechanismus sowie dessen Frequenzabhängigkeit zu untersuchen.



Physikalische Grundlagen

Feuer

Bei Feuer handelt es sich um eine exotherme Oxidation unter Licht- und Wärmeausstrahlung in Form einer Flamme. Im Alltag liegen dabei Diffusionsflammen vor: Der Sauerstoff diffundiert durch den Flammenrand in die Flamme hinein; Oxidator und Brennstoff treffen anschließend in der Reaktionszone aufeinander. Um eine Flamme zu entzünden und aufrechtzuerhalten, müssen drei Gegebenheiten erfüllt sein: das Vorhandensein von Brennstoff und Sauerstoff sowie genügend Energie (vgl. Abbildung 2). Entzieht man eine dieser drei Grundlagen, so wird das Feuer gelöscht; dies kann beispielsweise durch Erstickung (Entzug von Sauerstoff) oder Auspusten (Wegtragen der Flamme vom Brennstoffnachschub bei gleichzeitiger Kühlung) verwirklicht werden.

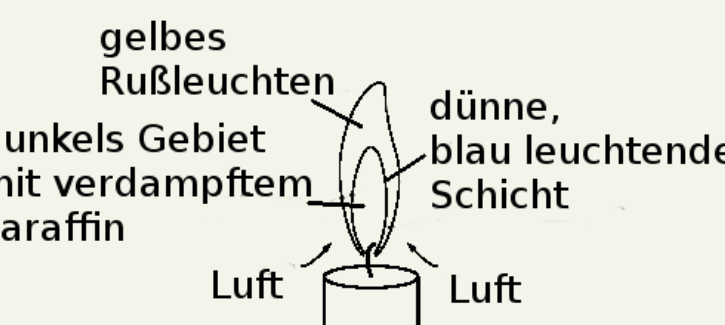


Abbildung 1: Diffusionsflamme

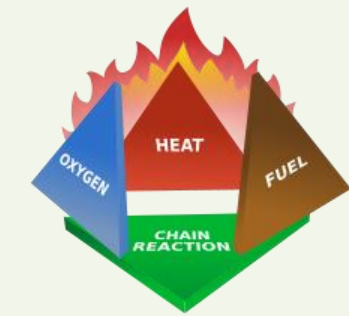


Abbildung 2: Brandvoraussetzungen

Schallwellen

Schallwellen propagieren als periodische Druckschwankungen, die sich in einem idealisierten, strömungsfreien und gasförmigen Medium ausschließlich longitudinal ausbreiten und der Wellengleichung gehorchen:

$$\Delta p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

wobei p den Schalldruck und c die Schallgeschwindigkeit im Medium bezeichne. Dabei schwingen die Luftschichten um ihre Ruhelage, wobei ξ die Auslenkung beschreibt und $\vec{v} = \frac{d\xi}{dt}$ als Schallschnelle bezeichnet wird.

Für ebene Wellen $p(\vec{r}, t) = \hat{p} \cdot \exp(i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t))$ ergibt sich mit der Eulergleichung ohne Trägheitsterm für die Amplituden $\hat{p} = \omega c \rho \hat{\xi}$

und für die Schallintensität

$$I := \langle p | \vec{v} \rangle = \frac{1}{2} c \rho \omega^2 \hat{\xi}^2$$

Selbst bei einer Intensität von 1 Wm^{-2} (entspricht 120 dB) ergeben sich damit nur ca. 28 Pa als Schalldruck und Schallschnellen im Bereich weniger mm/s, sodass durch einen bloßen Lautsprecher höchstens eine Kerze „ausgepustet“ werden kann.

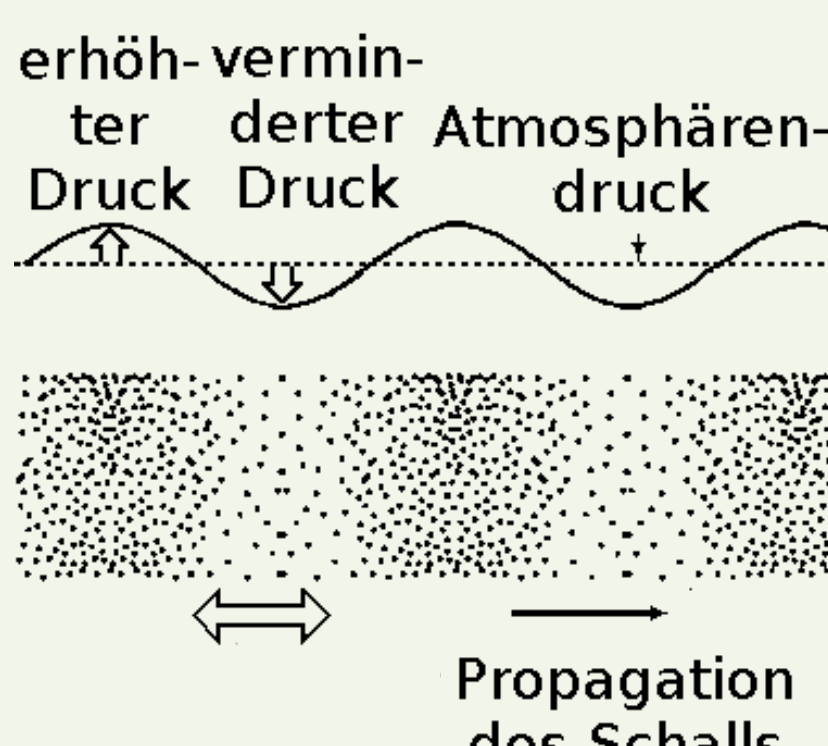


Abbildung 3: Schallwelle

Horn und Druckkammer

Da Lautsprecher als Energiewandler grundsätzlich sehr ineffizient sind (~1%), werden in der Akustik u.a. Hörner eingesetzt, um die Abstrahlungs- und Schallcharakteristik zu verbessern. Exponentiell oder konisch nach außen öffnende Hörner passen dabei vor allem die sog. akustische Impedanz von Membran und Luft aneinander an.

Wichtig für den Versuch ist eine inverse Anordnung (Druckkammer, vgl. Abbildung 4). Durch die unterschiedlichen Öffnungsflächen A_1, A_2 ergibt sich aus der vereinfachten Kontinuitätsgleichung eine Erhöhung der Schallschnelle am sich verjüngenden Ende des Kegels um $v_2 = v_1 \frac{A_1}{A_2}$.

Dies führt in unserem Fall zu einer Erhöhung der Schallschnelle um einen Faktor von ca. 40 und kann damit nicht die einzige Erklärung für den Löschmechanismus sein.

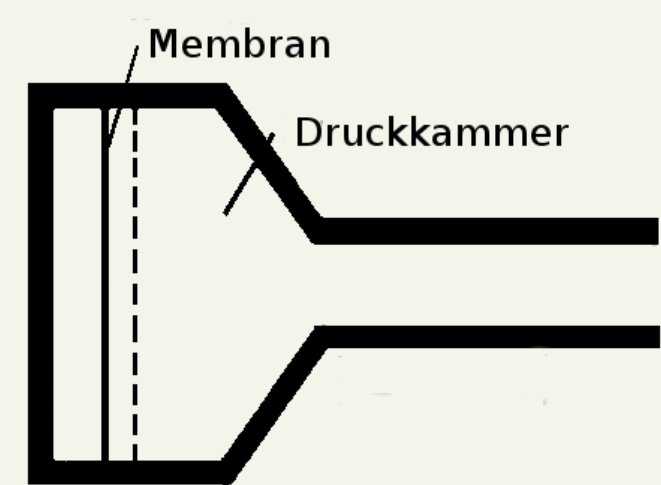


Abbildung 4: Druckkammer

Nichtlineare Akustik

Will man die Kompressibilität der Luft und Strömungen in der Druckkammer berücksichtigen, muss zur vollständigen Beschreibung der Vorgänge eine den jeweiligen Randbedingungen genügende Näherung zur Lösung der Navier-Stokes Gleichung

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right) = -\nabla p + \mu \Delta \vec{v} + \left(\xi + \frac{\mu}{3} \right) \nabla (\nabla \cdot \vec{v}) + \vec{f}$$

gefunden werden. Dies war im vorgegebenen zeitlichen Rahmen und mangels entsprechender Vorkenntnisse nicht möglich; wichtige Konsequenzen und Überlegungen werden qualitativ erläutert.

Die *Reynoldsspannung* ist auf Dissipationseffekte durch innere Reibung im Medium zurückzuführen: Die sich so verringernde Energie der Schallwelle wird in kinetische Energie der umgebenden Moleküle umgewandelt, wodurch eine (turbulente) Nettoströmung des Mediums hervorgerufen wird. Des Weiteren entstehen in der Druckkammer in der Grenzschicht zur Wand bei tiefen Frequenzen Wirbel, die ebenfalls zu einer Nettoströmung führen.

Quarzwind ist ein an oszillierenden Membranen auftretender Effekt. Schwingt die Membran in Richtung des ruhenden Mediums, findet ein Impulsübertrag auf die vor der Membran befindlichen Luftmoleküle statt, sodass eine Luftströmung in Flächennormalenrichtung entsteht. Beim Zurückschwingen der Membran werden Moleküle aufgrund der lokalen Druckverringeringung wiederum in Richtung der Membran gesogen. In diesem Fall ist jedoch Vorzugsrichtung weniger stark ausgeprägt, d.h. es strömen ebenfalls Luftmoleküle aus seitlicher Richtung heran. Als Bilanz ergibt sich auch hier eine Nettoströmung.

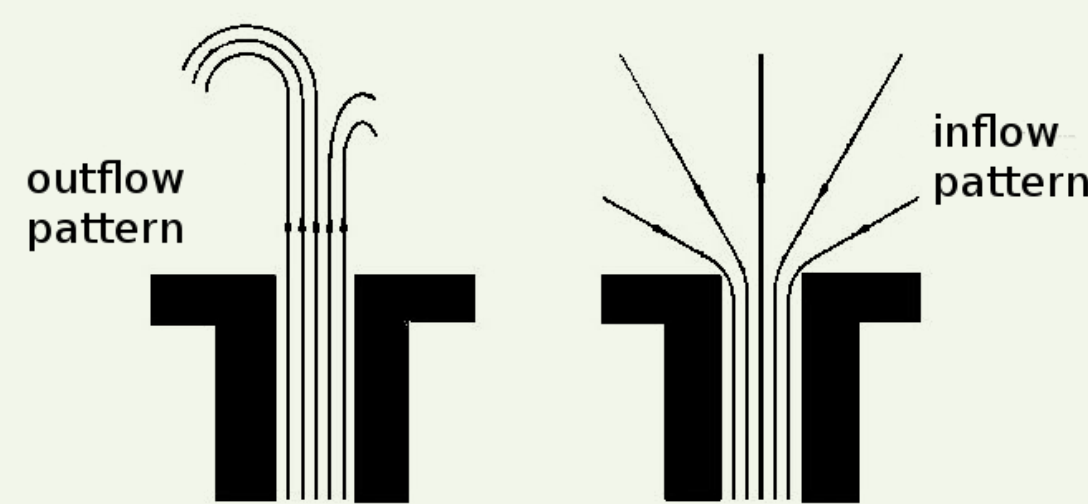


Abbildung 5: Quarzwind

Versuchsteil 1: Richtcharakteristik und Resonanz der Druckkammer

Versuchsaufbau und -durchführung

Die in den Grundlagen beschriebene Druckkammer soll die Schallschnelle und damit den Schalldruck erhöhen sowie die Richtcharakteristik verbessern. Zur Verifikation wurde ein Lautsprecher mit einem vor der Membran angebrachten, umgedrehten Trichter (wie in Abbildung 6 dargestellt) am Ursprung einer Winkelskala platziert. Anschließend wurde durch Variation der Position des Stabmikrofons der ortsabhängige Schalldruck für verschiedene Frequenzen und Abstände gemessen. Dies geschah durch Messung des Effektivwerts der Spannung des Elektret-Mikrofons, der direkt proportional zum jeweiligen Schalldruck ist.

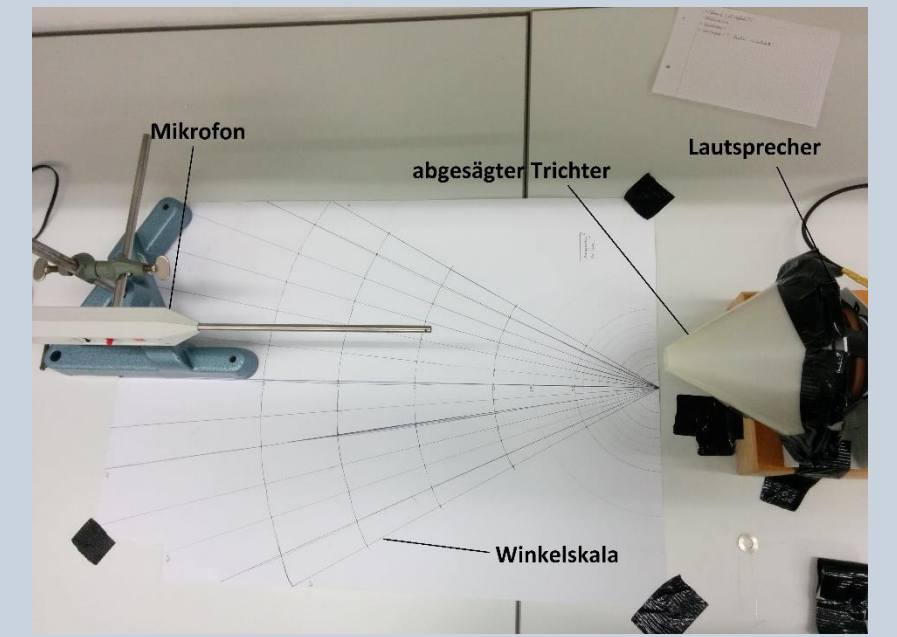
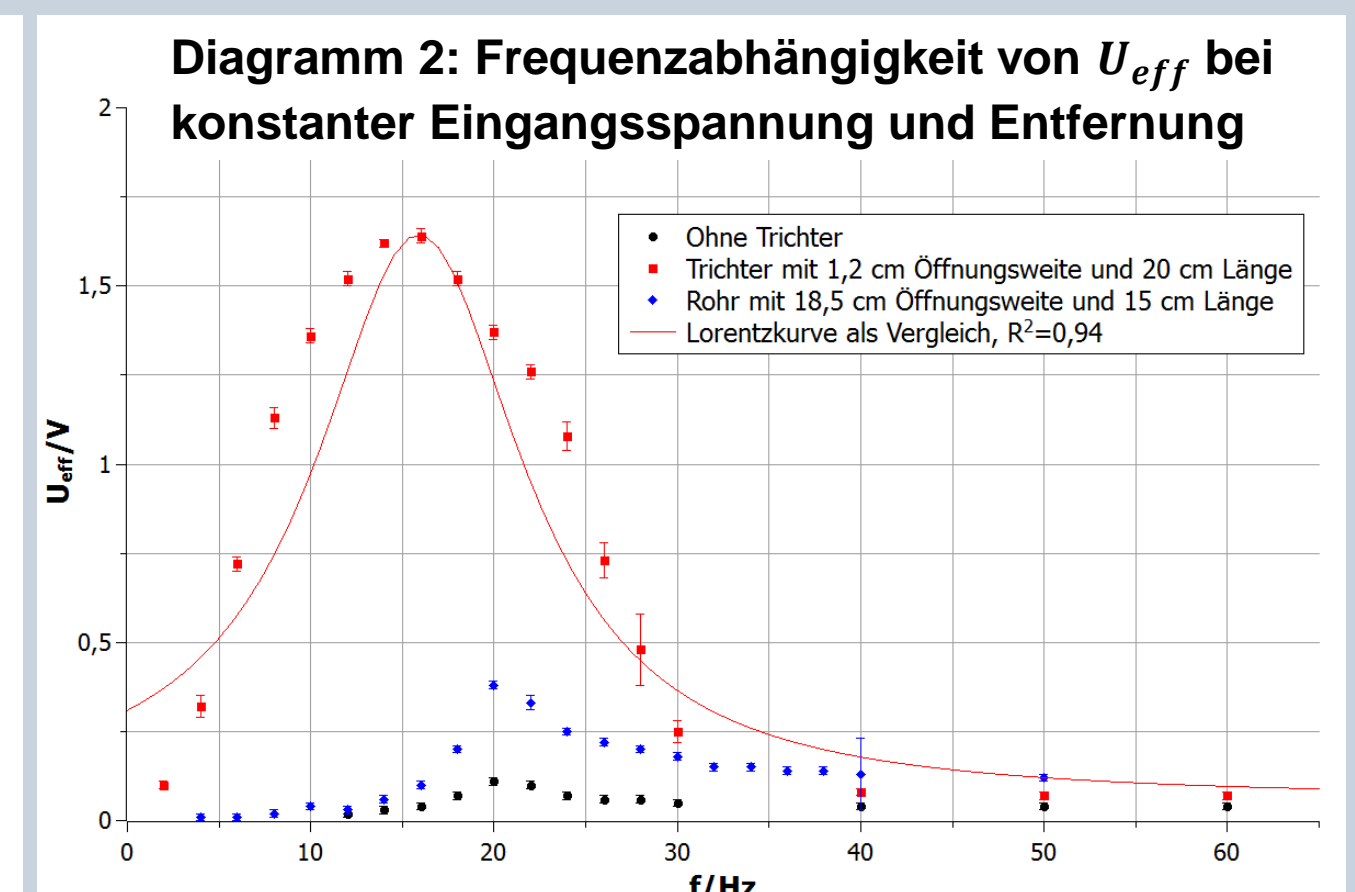
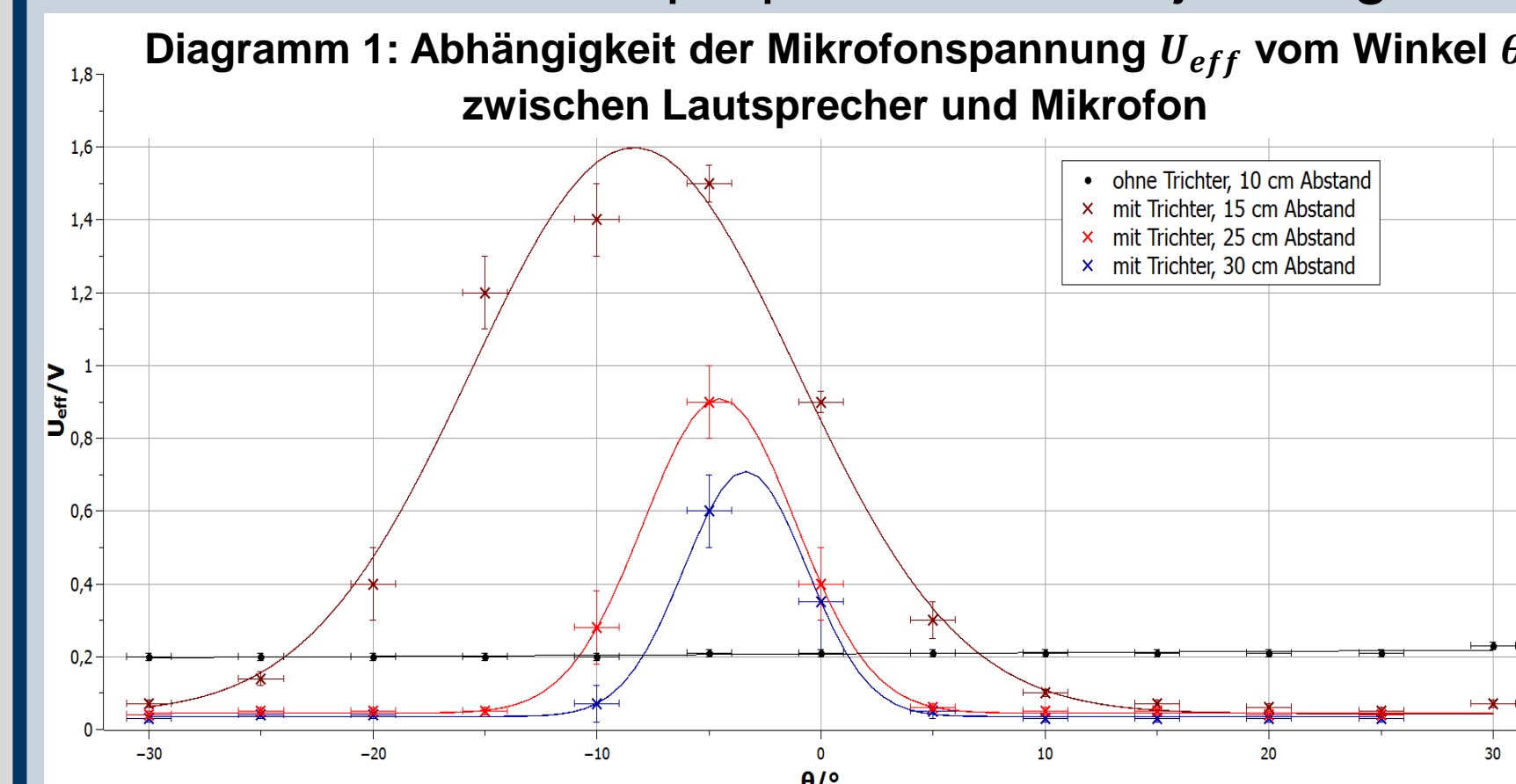


Abbildung 6: Versuchsaufbau (1)



Resultat

In Diagramm 1 ist eine deutliche Fokussierung zu erkennen; die leichte Asymmetrie ist auf Reflexionen an der Wand des Raumes zurückzuführen. Des Weiteren liegt im Trichter ein Resonanzverhalten des Schalldrucks mit einem Maximum bei ca. 15 Hz vor.

Versuchsteil 2: Frequenz- und Amplitudenparameter des Löschvorgangs

Versuchsaufbau und -durchführung

Nun sollte die tatsächliche Löschwirkung untersucht werden. Dazu wurde eine Kerze in festem Abstand vor dem Lautsprecher platziert. Für verschiedene Eingangsspannungen wurde die zum Löschen der Kerze benötigte Frequenz ermittelt. Dieser Versuchsteil wurde für verschiedene Druckkammergeometrien, Brennstoffe und Brandherdgrößen wiederholt (nicht abgebildet).

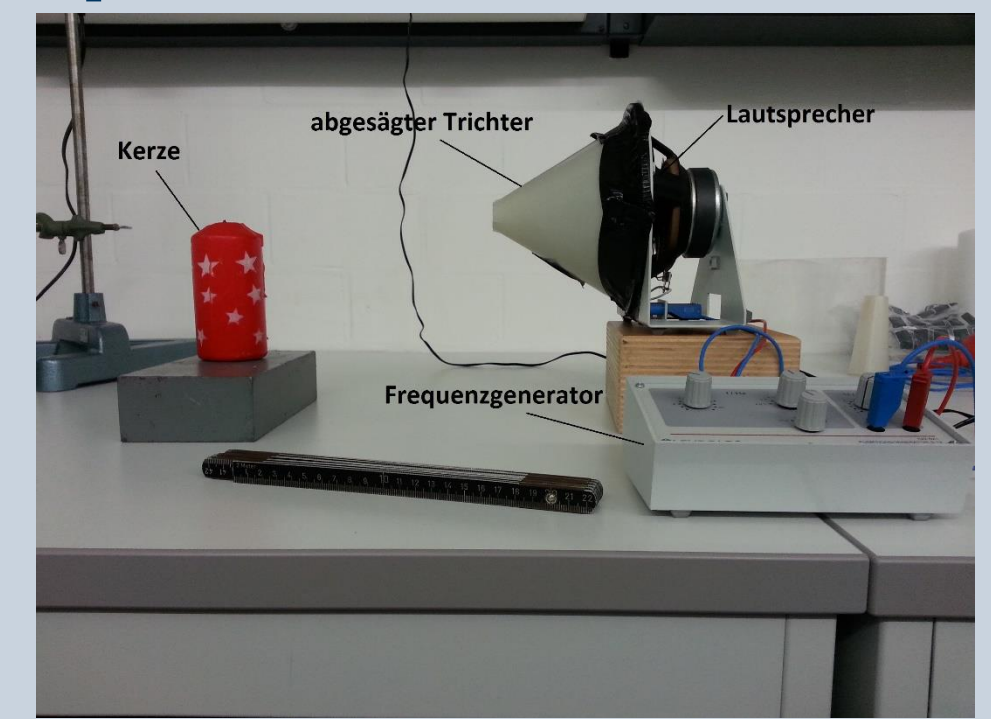
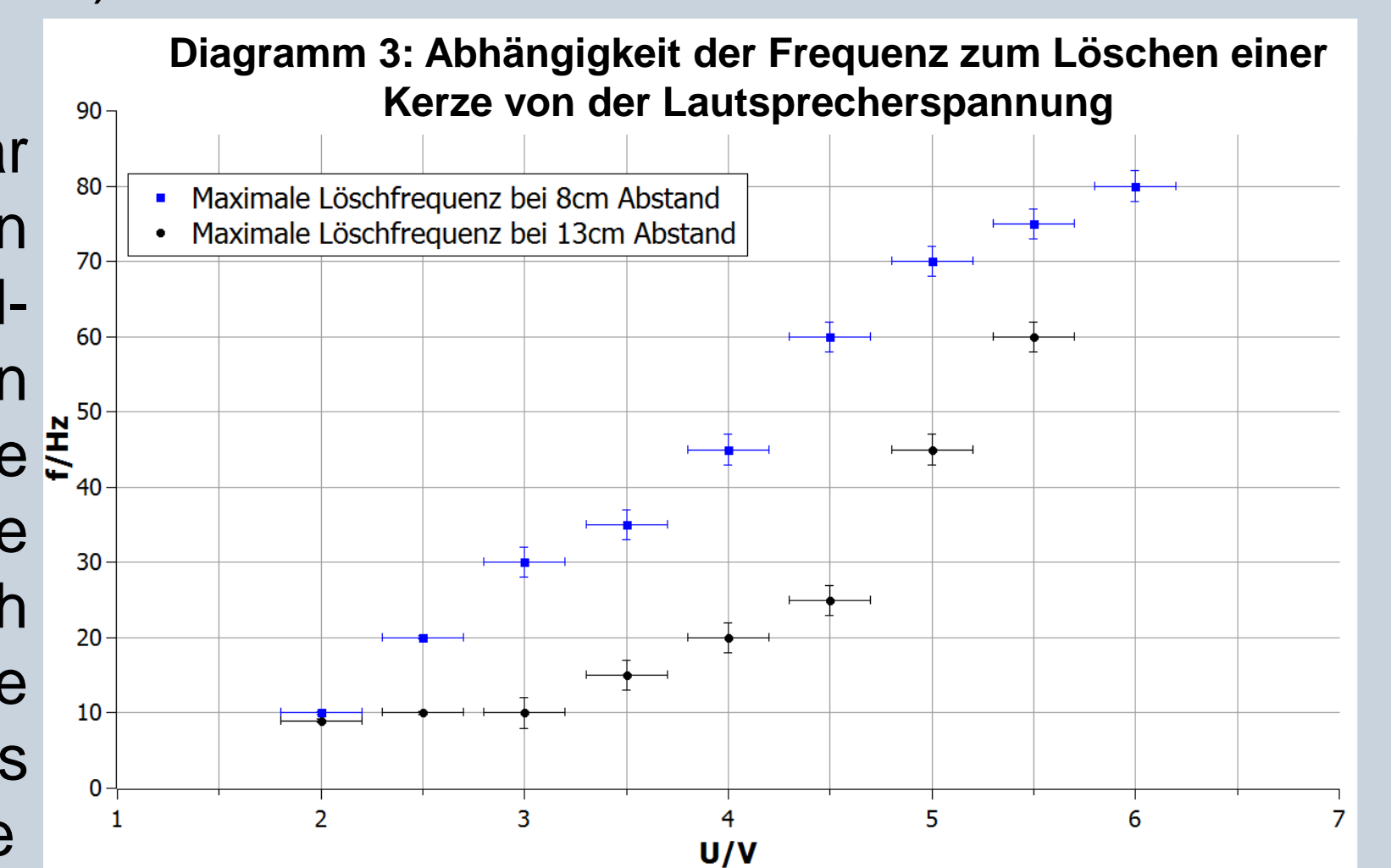


Abbildung 7: Versuchsaufbau (2)

Resultat

Bis zu einer Frequenz von ca. 100 Hz war es möglich, Feuer zu löschen, d. h. Kerzen und Ethanolbrände mit Brandherddurchmessern bis zu 8 cm. Das Löschen von Holz war nicht möglich, da hier die Reaktionszone nicht in gleicher Weise „weggepustet“ werden kann. Im Bereich von 10 bis 30 Hz waren die Löschversuche am ergiebigsten. Diagramm 3 zeigt, dass bei niedrigeren Amplituden auch niedrigere Frequenzen zum Löschen benötigt wurden. Dazu passt die Beobachtung, dass im niederfrequenten Bereich am Trichterhals eine Luftströmung entstand. Aufgrund der Korrelation zur Löscheffizienz und obigen Resonanz lag nun die Vermutung nahe, dass diese der der Löschwirkung zugrundeliegende Prozess sein könnte.



Versuchsteil 3: Messung der Luftströmungen

Versuchsaufbau und -durchführung

Nun sollte die Stärke und Frequenzabhängigkeit der Luftströmung und der Zusammenhang zum Schalldruck untersucht werden. Vor dem Lautsprecher wurde ein Kugelschalenanemometer platziert und mittels einer Lichtschranke die Umdrehungszahl innerhalb eines Zeitintervalls ermittelt. Der Schallpegel und die Frequenz wurden mit dem Mikroskop bestimmt.

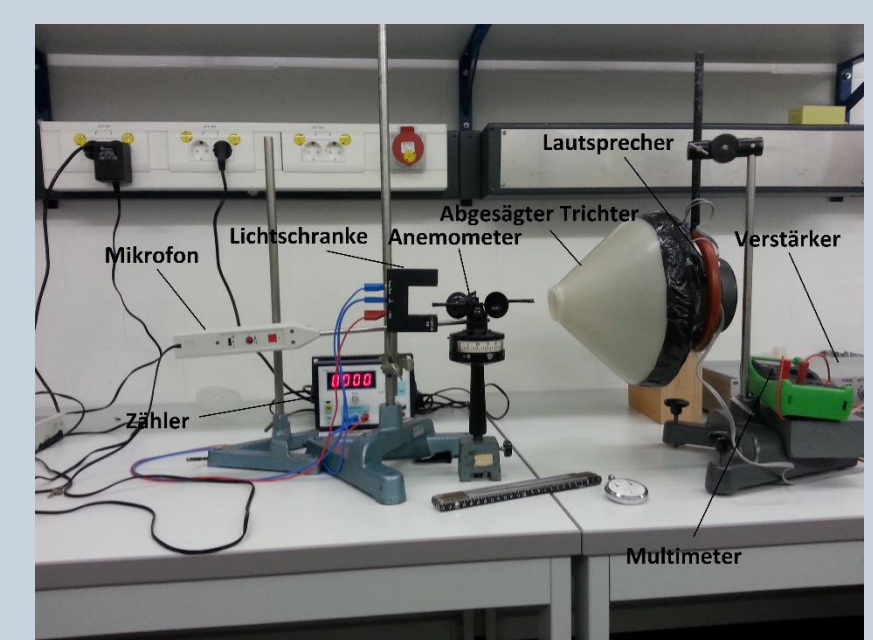
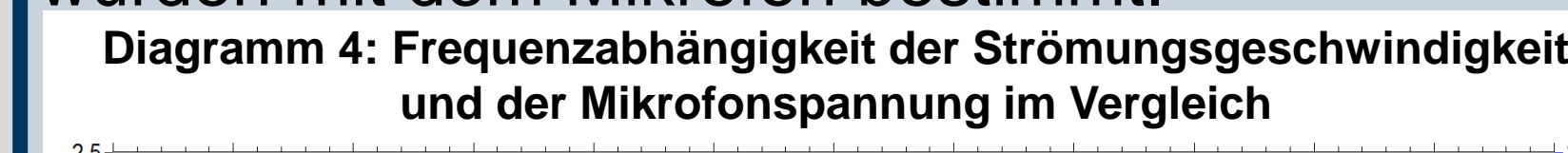


Abbildung 8: Versuchsaufbau (3)



Resultat

Der Schalldruck zeigt über einen Frequenzbereich von 30 bis 110 Hz einen näherungsweise konstanten Verlauf, während die Strömungsgeschwindigkeit unabhängig davon ein deutlich ausgeprägtes Maximum um ~35 Hz besitzt und bei höheren Frequenzen nahezu vollständig verschwindet.

Fazit

Alles in allem hat das Erlöschen des Feuers keine direkte Ursache in den Schallwellen. Die Bezeichnung „akustischer Feuerlöscher“ ist also hier nicht gerechtfertigt. Dafür erzeugt der Schall im niederfrequenten Bereich Luftströmungen in einer Größenordnung weniger m/s in der Druckkammer, welche Kerzen und Ethanolbrände löschen können. Der genaue Ursprung der Strömungen konnte dabei nicht geklärt werden, Turbulenzen im Raum der engen Druckkammeröffnung spielen wohl eine große Rolle. Beobachtet wurde, dass bei höherem Schalldruck stärkere Luftströmungen auftreten und die Druckkammerform die Lage des Strömungsmaximums bedingt. Der nebenstehende QR-Code führt zu einem Zusammenschritt der Experimente.

