



# Masterthesis

## Messtechnische Charakterisierung des Kavitationspotentials von Ultraschallquellen

Autor	Morisseau Leroy, Penka Mboukousa Studiengang: Biomedical Engineering
Matrikelnummer	██████████
Erstprüfer	Prof. Dr. Friedrich Ueberle
Zweitprüfer	Prof. Dr. Bernd Flick
Abgabedatum	08.06.2021

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>VI</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>1</b>
<b>Abstrakt</b> .....	<b>2</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>3</b>
<b>2 Theoretische Grundlagen</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1 Elektrohydraulische Quelle</b> .....	<b>6</b>
<b>2.2 Piezoelektrische Quelle</b> .....	<b>11</b>
<b>2.3 Elektromagnetische Quelle</b> .....	<b>13</b>
<b>3 Methode</b> .....	<b>15</b>
<b>3.1 Wasserkreislauf</b> .....	<b>15</b>
<b>3.2 Elektrohydraulische Messung</b> .....	<b>18</b>
3.2.1 Messaufbau .....	18
3.2.2 Messmethode mit Sensoren .....	20
3.2.3 Messmethode mit Alufolie .....	23
<b>3.3 Piezoelektrische Messung</b> .....	<b>25</b>
3.3.1 Messaufbau .....	25
3.3.2 Messmethode mit Alufolie .....	26
3.3.3 Messmethode mit der Sonde .....	31
<b>3.4 Elektromagnetische Messung</b> .....	<b>36</b>
3.4.1 Messaufbau und Messung .....	36
<b>4 Ergebnisse</b> .....	<b>40</b>
<b>4.1 Elektrohydraulische Quelle</b> .....	<b>40</b>
<b>4.2 Piezoelektrische Quelle</b> .....	<b>47</b>
4.2.1 Messung mit Alufolie .....	47
4.2.2 Messung mit der Sonde .....	54
<b>4.3 Elektromagnetische Quelle</b> .....	<b>58</b>
<b>5 Diskussion</b> .....	<b>65</b>

<b>6</b>	<b>Fazit.....</b>	<b>70</b>
	<b>Eidesstattliche Erklärung.....</b>	<b>A</b>
	<b>Literatur .....</b>	<b>B</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>D</b>
	<b>Anhang A.....</b>	<b>D</b>
	<b>Anhang B.....</b>	<b>D</b>
	<b>Anhang C.....</b>	<b>D</b>

# Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 2-1: Messaufbau für die elektrohydraulische Messung mit der Sonde und ein Oszilloskop.....</i>	<i>7</i>
<i>Abbildung 2-2: Messaufbau für die elektrohydraulische Messung mit der Aluminiumfolie.....</i>	<i>10</i>
<i>Abbildung 2-3: Piezoelektrische Messung mit der Sonde und dem Oszilloskop.....</i>	<i>11</i>
<i>Abbildung 2-4: Piezoelektrische Messung mit Aluminiumfolie.....</i>	<i>12</i>
<i>Abbildung 2-5: Piezoelektrizität durch das Anlegen einer elektrischen Spannung.....</i>	<i>12</i>
<i>Abbildung 2-6: Skizze des Messaufbaus der EMSE-Messung mit Aluminiumfolie.....</i>	<i>14</i>
<i>Abbildung 3-1: Sauerstoffmessgerät; „Dissolved Oxygen-meter D-100“ von der Firma Voltcraft.....</i>	<i>16</i>
<i>Abbildung 3-2: Wasserkreislauf zur Entgasung von Wasser.....</i>	<i>17</i>
<i>Abbildung 3-3: Sauerstoffmenge in mg/l in Wasser während des Entgasungsprozess und 15 Minuten Abstände.....</i>	<i>18</i>
<i>Abbildung 3-4: Messaufbau für die Analyse von Kavitation mit elektrohydraulische Stoßquellen.....</i>	<i>20</i>
<i>Abbildung 3-5: Primär- und Sekundärwelle von der elektrohydraulischen Quelle bei jeweils 60 <math>\mu</math>s und 76 <math>\mu</math>s. [17].....</i>	<i>22</i>
<i>Abbildung 3-6: Konvertierungsprozess vom Realbild zum Schwarzweißbild. Das Bild auf der linken Seite ist das reale Bild, das zunächst in ein Graubild und dann in ein Schwarzweißbild umgewandelt wird.....</i>	<i>24</i>
<i>Abbildung 3-7: Skizze der Alufolie mit Beulen und sieben roten Quadranten. Drei Quadranten oben und unten, und ein siebter, dort wo die meisten Beulen zu finden sind.....</i>	<i>24</i>
<i>Abbildung 3-8: Der Versuchsaufbau für Messungen mit dem Piezo-Wandler.....</i>	<i>26</i>
<i>Abbildung 3-9: A) Platzierung der Alufolie in der Halterung und in dem Reaktionsgefäß, B) Position der Piezowandler am Boden des Wasserbehälters, C) Verdichtung der Piezowandler-Kopf am Boden des Behälters.....</i>	<i>27</i>
<i>Abbildung 3-10: Steuergerät für den Piezowandler links und sein Schallwandler rechts.....</i>	<i>29</i>
<i>Abbildung 3-11: Dimensionen von der Platzierung der Alufolie mit dem Halter in dem Reaktionsgefäß.....</i>	<i>30</i>
<i>Abbildung 3-12: Foto der Alufolie auf einem von hinten beleuchtet DIN-A4-Blatt. Die Breite der Folie passt zu der Breite des DIN-A4-Blattes. Das linke Bild zeigt die Vorderansicht und das rechte, die Seitenansicht.....</i>	<i>30</i>
<i>Abbildung 3-13: Aufbau für die Messung mit Sonde, Voltmeter und Oszilloskop.....</i>	<i>32</i>
<i>Abbildung 3-14: Skizze des Wasserbehälters und der Piezoquelle. Ansicht ist von oben mit Achsendefinition.....</i>	<i>33</i>

Abbildung 3-15: Spannungskurve, ermittelt durch Mittelung von 10 Signalen bei der Kavitationsintensität von L8 an der Position X=0 mm, Y=0 mm und Z=20 mm .....	35
Abbildung 3-16: Messaufbau für die Analyse der Kavitation mit der elektromagnetischen Quelle.....	36
Abbildung 3-17: Halter für Aluminiumfolie mit geschlossenen Platten und eine Alufolie, welche daran befestigt wird .....	37
Abbildung 3-18: Offene Halter für Alufolie aus Lego. <b>A</b> ist der Halter mit der Dimension der Breite, <b>B</b> zeigt den Halter mit der Dimension der Länge. <b>C</b> zeigt der Sicht der Halter mit der Folie von oben und <b>D</b> der Sicht von unten. <b>E</b> zeigt den Halter mit Alufolie in mit Wasser gefüllte Reaktionsgefäß.....	38
Abbildung 4-1: Druckmessung von der Kavitation mit der Sonden mit der Seriennummer (S/N)1910 und 1914.....	40
Abbildung 4-2: Bilder der Alufolie nach Beschallung mit der Stoßwelle mit einer Spannung von 24kV und 200 Impulsen: Bild A zeigt das Ergebnis der Messung bei einer Entfernung von 128 mm und einer Frequenz von 1 Hz. Bild B präsentiert das Resultat bei einer Entfernung von 228 mm und einer Frequenz von 4 Hz.....	41
Abbildung 4-3: Bilder der Alufolie nach Beschallung mit der Stoßwelle mit einer Spannung von 28 kV, Frequenz von 1 Hz und mit 200 Impulsen: Bild A ist bei einer Entfernung von 128 mm. Bild B ist bei einer Entfernung von 228 mm und einer Frequenz von 1 Hz.....	42
Abbildung 4-4: Bild der Alufolien jeweils auf einem Blatt Papier in einem dunklen Raum mit einer kleinen Lichtquelle hinter dem Papier. ....	45
Abbildung 4-5: Schwarz-Weiß-Bilder der Alufolie unter Behandlung mit elektrohydraulischer Quelle.....	46
Abbildung 4-6: Echtzeitbilder von Messungen mit der Alufolie bei Kavitationsintensitäten von L6 bis L10 an einem Abstand von 20 mm (bezeichnet als Z20) von aktiver Membran. Bei jeder Kavitationsintensität wurde drei Messungen gemacht und mit Labeln A, B und C gekennzeichnet. ....	48
Abbildung 4-7: Echtzeitbilder von Messungen mit der Alufolie bei Kavitationsintensitäten von L5 bis L7 an einem Abstand von 30 mm (bezeichnet als Z30) von aktiver Membran. Bei jeder Kavitationsintensität wurden drei Messungen gemacht und mit Labeln A, B und C gekennzeichnet.....	49
Abbildung 4-8: Darstellung von Löchern auf Alufolie in einer Entfernung von 20mm mit steigenden Kavitationsintensitäten von Level 3 bis Level 8. Erläuterung siehe Text.....	51
Abbildung 4-9: Darstellung von Löchern auf Alufolie in einer Entfernung von 20mm mit steigenden Kavitationsintensitäten von Level 9 bis 10. ....	52

Abbildung 4-10: Darstellung von Löchern auf Alufolie in einer Entfernung von 30mm mit steigenden Kavitationsintensitäten von Level 4 bis 7.....	52
Abbildung 4-11: Diagramm von Kavitationsintensität der Schallwellen gegen den Prozentual Löcheranteil auf der Alufolie in 20mm Abstand von der Schallquelle .....	53
Abbildung 4-12: Diagramm von Kavitationsintensität der Schallwellen gegen den Prozentual Löcheranteil auf der Alufolie in 30mm Abstand von der Schallquelle .....	53
Abbildung 4-13: Das Diagramm beschreibt die Zeit, welche die Ultraschallkavitation benötigt, um ein Loch in der Folie zu erzeugen .....	54
Abbildung 4-14: Verteilung der Kavitationsintensität auf der X-Achse von -70 mm auf +70 mm bei Y=0 auf Abb. A und Y-Achse von -90 mm auf +100 mm bei X = 0 auf Abb. B, alle in einer Entfernung von 20 mm von der aktiven Membran. Messung mit einem Oszilloskop bei einer Kavitationsintensität von L2. ....	55
Abbildung 4-15: Verteilung der Kavitationsintensität auf der X-Achse von -70 mm auf +70 mm bei Y = 0 auf Abb. A und Y-Achse von -90 mm auf +100 mm bei X = 0 auf Abb. B, alle in einer Entfernung von 20 mm von der aktiven Membran. Messung mit dem Onda Voltmeter bei einer Kavitationsintensität von L2.....	56
Abbildung 4-16: Verteilung der Kavitationsintensität auf der X-Achse von -70 mm auf +70 mm bei Y = 0 auf Abb. A und Y-Achse von -90 mm auf +100 mm bei X = 0 auf Abb. B, alle in einer Entfernung von 20 mm von der aktiven Membran. Messung mit dem Voltmeter bei einer Kavitationsintensitätsstufe von L5.....	57
Abbildung 4-17: Spannungswerte bei ansteigenden Entfernungen von der Wirkmembran des Schallwandlers bei einem Kavitationspegel von L5 .....	58
Abbildung 4-18: Halterung für die Alufolie für die EMSE Messung. Geschlossener Halter links (A) und der offene Halter recht (B).....	59
Abbildung 4-19: Fotos nach Beschallung mit der EMSE mit offenem (A, B und C) und geschlossenem Halter (D und E). ....	60
Abbildung 4-20: Umwandlung der Bilder nach Beschallung in Schwarz-Weiß-Bilder. Löcher sind weiß dargestellt. ....	63

## Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Zeit damit die primäre (1° Zeit) und sekundäre (2° Zeit) Welle an den Sensor ankommt. A_S_S ist der Abstand zwischen dem Sensor und den Elektroden oder dem Elektrodenspalt. Der Abstand zwischen dem Elektrodenspalt und dem Reflektor beträgt 20 mm .....</i>	<i>9</i>
<i>Tabelle 2: Die durchschnittliche Anzahl der Beulen auf den 4 Folien.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabelle 3: Ergebnis der erzeugten Löcher auf der Aluminiumfolie nach Beschallung mit der elektrohydraulischen Quelle .....</i>	<i>44</i>
<i>Tabelle 4: Ergebnis der Beschallung mit der EMSE von der Alufolie am offenen Halter. Folgende Informationen sind auf die Tabelle zu finden: OL (oben links), OM (oben mittig), OR (oben recht), UL (unten links), UM (unten mittig), UR (unten recht), S1 (erste Quadrat mit die meisten Beulen), S2 (zweite Quadrat mit den meisten Beulen), Anzahl der Beulen pro 121 mm<sup>2</sup>, Anzahl der Beulen auf der gesamten Folie (Total Nummer) und Fläche der verschmolzenen Beulen (Fläche in mm<sup>2</sup>).....</i>	<i>61</i>
<i>Tabelle 5: Ergebnis der Beschallung mit der EMSE von der Alufolie am geschlossenen Halter, mit Darstellung der Fläche der verschmolzenen Beulen.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabelle 6: Fläche der Löcher auf der Alufolie nach Beschallung und Prozent der Löcherfläche zur gesamten Folie.....</i>	<i>62</i>

## Abstract

The importance of cavitation caused by ultrasound for our social life is shown by its use in a wide variety of areas, ranging from the military with torpedoes to the environmental industry (disinfection of water) and medicine. For this reason, it is important to further the study on how to effectively measure cavitation in order to characterise and use it. As a result of this observation, three sources of ultrasound were considered namely, the electrohydraulic, piezoelectric and electromagnetic source. The need to analyse the cavitation effect produced by these three ultrasound sources was to find out if it was possible to use this effect industrially to sterilize food instead of using chemicals.

For the analysis of the cavitation effects of the three ultrasound sources, a reaction vessel was made for each source and the ultrasound sources were placed at the base of these vessels. These vessels were filled with degassed water (oxygen concentration  $\leq 3 \text{ mg/l}$ ). The active membrane on the piezoelectric (Abbildung 3-9C) and electromagnetic sources (Abbildung 3-16 label 2) were planar and the sound waves produced travelled directly to the measuring instrument (sensor or aluminium foil). On the electrohydraulic source, there were two electrodes placed next to each other with a small gap (1 mm) in-between (see Abbildung 2-1) and a reflector at the bottom of the vessel. One part of the waves produced travelled directly to the measuring instrument while the other part was reflected towards it. The idea was for the sound waves to travel from the bottom of the vessels to the top while carrying cavitations along their wavelets. The Hydrophone sensor (probe) was used with an oscilloscope and a voltmeter to measure the cavitation intensity (the analysis was done with MATLAB), while aluminium foils were used to measure the distribution of the cavitation effect throughout different depths in water. The bumps and the holes created on the foils were analysed using Image J and Spyder (A Python program).

The analysis of the effects of cavitation produced by the different ultrasound source gave interesting results. The closer the probe or the aluminium foil was to any of the sources, the higher the cavitation effect was observed (Bumps and holes on the foil, and high voltages and pressures measured by the sensor). The same holds when the cavitation intensity is increased. The higher the frequency of the impulses coming from the sources, the lower the effect of cavitation. Cavitations produced by the piezoelectric source was concentrated toward the centre of the foil while those produced by the other two sources were much more distributed all over the foil. The following chapters provide more details on the work done to achieve these results as well as more details on the results.

## Abstrakt

Die durch Ultraschall verursachte Kavitation wird in einer Vielzahl von Bereichen eingesetzt, vom Militär mit Torpedos über die Umweltindustrie (Entkeimung von Wasser) bis hin zur Medizin, was zeigt, wie wichtig sie für unser gesellschaftliches Leben ist. Aus diesem Grund ist es wichtig, die Untersuchung zur effektiven Messung der Kavitation voranzutreiben, um sie zu charakterisieren und zu nutzen. Als Ergebnis dieser Beobachtung wurden drei Ultraschallquellen in Betracht gezogen, nämlich die elektrohydraulische, piezoelektrische und elektromagnetische Quelle. Die Notwendigkeit, den von diesen drei Ultraschallquellen erzeugten Kavitationseffekt zu analysieren, bestand darin, später herauszufinden, ob es möglich ist, diesen Effekt zur industriellen Sterilisierung von Lebensmitteln anstelle von Chemikalien zu nutzen.

Für die Analyse der Kavitationseffekte der drei Ultraschallquellen wurde für jede Quelle ein Reaktionsgefäß angefertigt und die Ultraschallquellen am Boden dieser Gefäße platziert. Diese Gefäße wurden mit entgastem Wasser (Sauerstoffkonzentration  $\leq 3$  mg/l) gefüllt. Die aktive Membran an den piezoelektrischen (Abbildung 3-9C) und elektromagnetischen Quellen (Abbildung 3-16 Label 2) war planar und die hier erzeugten Schallwellen wanderten direkt zum Sensor oder zur Alufolie. Bei der elektrohydraulischen Quelle befanden sich zwei Elektroden nebeneinander mit einem kleinen Spalt (1 mm) dazwischen (siehe Abbildung 2-1) und einem Reflektor am Boden des Gefäßes. Ein Teil der hier erzeugten Wellen wanderte direkt zum Sensor oder Folie, während der andere Teil reflektiert wurde. Die Idee war, dass sich die Schallwellen vom Boden des Gefäßes nach oben bewegen und dabei Kavitationen mit sich führen. Eine Sonde (Hydrofonsensor) wurde mit einem Oszilloskop und einem Voltmeter verwendet, um die Kavitationsintensität zu messen (die Analyse wurde mit MATLAB durchgeführt), während Aluminiumfolien verwendet wurden, um die Verteilung des Kavitationseffekts (Beulen und Löcher) in verschiedenen Tiefen im Wasser zu messen. Diese Effekte wurden mit Image J und Spyder (einem Python-Programm) analysiert.

Die Analyse der Auswirkungen der durch die verschiedenen Ultraschallquellen erzeugten Kavitation ergab interessante Ergebnisse. Je näher die Sonde oder die Aluminiumfolie an einer der Quellen war, desto höher war der Kavitationseffekt (Beulen und Löcher auf der Folie sowie Spannungs- und Drückwerte, die vom Sensor gemessen wurden). Das Gleiche galt, wenn die Kavitationskraft erhöht wurde. Je höher die Frequenz der Impulse des Schallwandlers, desto geringer war der Kavitationseffekt. Die von der piezoelektrischen Quelle erzeugten Kavitationen konzentrierten sich auf die Mitte der Folie, während die von den anderen beiden Quellen erzeugten Kavitationen viel breiter über die gesamte Folie verteilt waren. In den folgenden Kapiteln werden die Arbeiten, die zur Erzielung dieser Ergebnisse durchgeführt wurden, sowie die Ergebnisse im Detail beschrieben.

# 1 Einleitung

Kavitation ist definiert als die Bildung eines Hohlraums in einer Flüssigkeit und ihr anschließendes Verhalten [1]. Sie wird auf verschiedene Arten erzeugt, unter anderem durch Ultraschall, hydrodynamische Effekte und Laser. Die Anwendung der Kavitation in der Technik ist sehr vielfältig, z.B. bei der Reinigung von Objekten mit sogenannten Ultraschallbädern, im Bereich der Militär mit Torpedos, die sich mit hoher Geschwindigkeit in einem künstlich geschaffenen Hohlraum bewegen oder in der Sonochemie, um sonochemische Reaktionen zu ermöglichen [2]. Blasen kavitationen sind nicht nur in der Technik, sondern auch in der Medizin von Bedeutung, da sie als Energiespeicher in einer Vielzahl von medizinischen und chirurgischen Verfahren eingesetzt werden, z.B. bei der Emulgierung von Gewebe (sehr häufig bei Lithotripsieverfahren zur Zertrümmerung von Nierensteinen) [3]. Diese Arbeit beinhaltet die Erzeugung von Kavitation mit einer der bereits erwähnten Methoden, nämlich Ultraschall [4]. Heutzutage wird eine immer größere Bedeutung an Ultraschall beigemessen, wenn es z.B. um die Entkeimung von Wasser geht, weil Chemikalien eine eher toxische Wirkung haben können. Diese Sterilisation von Wasser mithilfe von Ultraschall anstatt der Anwendung von Chemikalien ist daher umweltfreundlich.

Wie es sich erahnen lässt, besteht das Prinzip der Desinfektion hier in der Erzeugung von Kavitationen mit ausreichender Energie, um Keime abzutöten, da diese aufplatzen und die gespeicherte Energie freisetzen. [5]. Trotz der vielen Möglichkeiten, Kavitation zu erzeugen und zu nutzen, ist es noch nicht ganz klar, wie man sie am besten messen kann. Eine der Schwierigkeiten in der Messung von Kavitation ist die Tatsache, dass Lücken in Fluiden nicht direkt nachgewiesen werden können, sondern nur indirekt durch den Effekt der Blasendynamik, die (unter anderem) zu sekundären akustischen Emissionen führt. Dabei ist zu beachten, dass die Erzeugung von Kavitation durch Ultraschall auf verschiedene Weise erfolgen kann, z.B. nach den elektrohydraulischen, piezoelektrischen und auch elektromagnetischen Prinzipien. Es gibt andere Prinzipien aber nur diese drei Variante werden in Rahmen dieser Arbeit berücksichtigt.

Bei der Erzeugung von Kavitation mittels Ultraschallbädern (welche mit piezoelektrischer, elektrohydraulischer oder elektromagnetischer Quelle erzeugt werden können) wird ein Generator oder Steuergerät verwendet, um das System mit Spannung zu versorgen. Die Spannung vom Generator hilft den Ultraschallquellen dabei einen Impuls zu generieren. Dieser Impuls bewegt sich als Schallwellen in das Wasser und erzeugt entlang seines Weges Kavitationsblasen. Die Gasblasen kollabieren anschließend, weil der Druck der umgebenden Flüssigkeit höher ist als der Druck in den Blasen oder sie platzen bei Kontakt mit einer festen

Oberfläche und setzen die in der Kavität gespeicherte Energie an diesen Gegenständen frei [6]. Durch das Zerplatzen der Blase wird Energie in der Form einer Schockwelle freigesetzt, die, wie bereits erwähnt, zu Reinigungs- und medizinischen Zwecken genutzt werden kann. Die Wirkung der Schockwellen ist unter anderem eine akustische Emission, die oft als indirektes Maß für die Kavitation dient. Die Messung erfolgt in diesem Fall meist mit einem Hydrophon oder einer Lichtsonde [6]. In dieser Arbeit werden Methoden entwickelt, um die Kavitation und ihre Auswirkungen optimal zu charakterisieren. Dies dient der Anwendung bei der Qualitätskontrolle der Sterilisation von Nahrungsmittel in einem später geplanten industriellen Prozess.

## 2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel wird der theoretische Hintergrund der Erzeugung und Analyse von Kavitation erarbeitet. Dabei wird auf die verschiedenen Formen der Erzeugung von Kavitation eingegangen und festgelegt, was zu erwarten ist. Ein wichtiger Teil dieser Arbeit ist die Wahl der zu verwendenden Flüssigkeit, um die Auswirkungen der Kavitation richtig zu analysieren. Wasser ist eine geeignete Wahl, weil es unter anderem verfügbar und relativ billig ist. Außerdem bietet es eine gute Sicht, um die Sensoren und die Aluminiumfolie zu platzieren und somit die Druckverteilung in der Flüssigkeit zu ermitteln (siehe IEC<sup>1</sup> TS 62781) [7]. Das Wasser muss jedoch aufbereitet werden, wobei die darin enthaltenen Gasblasen entfernt werden müssen, die die Auswirkungen des Ultraschalls beeinträchtigen können, da sie ihn aufheben. Die Entgasung des Wassers trägt auch dazu bei, dass die während der Ultraschallbehandlung erzeugten Kavitationen ein Ergebnis dieser Behandlung sind. Damit ist der Unterschied zwischen der Kavitation durch bereits im Wasser vorhandene Gasblasen (Gas- oder weiche Kavitation) und der durch Ultraschall in entgastem Wasser erzeugten Blasen (Dampfblase oder harte Kavitation) angesprochen, obwohl diese Kavitation auch ohne Ultraschallbehandlung vorhanden sein kann. Bei der Gaskavitation, wie der Name schon sagt, werden die Hohlräume im Wasser mit gelösten Gasmolekülen gefüllt, während diese Kavitäten bei der harten Kavitation mit Dampf aus der umgebenden Flüssigkeit gefüllt sind [9]. Der Entgasungsprozess läuft in mehreren Schritten ab (siehe Kapitel 3.1), wobei das Hauptwerkzeug die Vakuum- Sprührohrentgasung ist, die das mit Gas gefüllte Wasser auffängt und das Gas aus dem Wasser entfernt. Am Ende wird der Sauerstoffgehalt im Wasser (mit einem Sauerstoffmessgerät) gemessen, um zu überprüfen, ob eine Entgasung stattgefunden hat und das Wasser für die Messung verwendet werden kann. Der Sauerstoffgehalt sollte niedriger als  $5 \text{ mg/l}$  sein, um die Effekte der durch Ultraschall verursachten Kavitation beobachten zu können [10]. Sobald der Sauerstoffgehalt im Wasser im Normbereich ist, können die verschiedenen Ultraschallquellen zur Erzeugung von Kavitation eingesetzt werden. Die Idee ist, die Ultraschallquelle (zum Teil auch den Reflektor bei der elektrohydraulischen Quelle) auf dem Boden eines Wasserbehälters zu befestigen und den Sensor oder die Aluminiumfolie an verschiedenen Positionen über der Quelle im Wasser zu platzieren. Die Quelle wird dann aktiviert und erzeugt Kavitation, die dann kollabiert oder platzt und Druck auf den Sensor (gemessen mit dem Oszilloskop oder Multimeter) oder das Aluminium (die Zerstörung des Aluminiums wird mit dem Software MATLAB® oder Image J

---

<sup>1</sup> International Electrochemical Commission

analysiert) ausübt. Der Druck auf dem Sensor wird Mithilfe des Oszilloskops als „.csv<sup>2</sup>“ Datei gespeichert und mit MATLAB® und Microsoft EXCEL® ausgewertet.

Wie bereits erwähnt, werden drei Quellen untersucht, die zur Erzeugung von Kavitationen führen, nämlich:

1. Elektrohydraulische Quelle
2. Piezoelektrische Quelle
3. Elektromagnetische Quelle

## 2.1 Elektrohydraulische Quelle

Bei der Messung mit der elektrohydraulischen Quelle werden folgende Geräte benutzt:

- Ein Reaktionsgefäß.
- Zwei Elektroden zur Erzeugung einer Schallwelle.
- Ein Generator (auch Steuergeräte) zur Erzeugung des Kurzschlusses zwischen den Elektroden.
- Ein Reflektor zur Reflexion der sich zum Boden des Wasserbehälters ausbreitenden Wellen.
- Ein kalibrierter Sensor zur Messung des Drucks im Wasser.
- Ein Positioniersystem zur Bewegung des Sensors in verschiedene Positionen
- Ein Oszilloskop zur Analyse der vorgenommenen Messungen.
- 12  $\mu\text{m}$  dick Aluminiumfolie.

Der Aufbau für die Messungen mit dieser Quelle ist in Abbildung 2-1 unten zu sehen. Die Spannung wird am Generator so eingestellt, dass ein Kurzschluss zwischen den Elektroden mit einer Kavitationsintensität proportional zur Höhe der Spannung entsteht. Die daraus erzeugte Schallwelle bewegt sich in alle Richtungen, wie in Abbildung 2-1 dargestellt, wobei sich ein Teil direkt zum Sensor bewegt und der andere Teil am Reflektor reflektiert wird. Wie in der Abbildung zu erkennen, ist der verwendete Reflektor parabelförmig. Die Idee ist, die sphärische abgestrahlten Wellen durch Reflexion an der parabolischen Oberfläche in ebenen Wellen umzuwandeln. Die Umwandlung von sphärischen in ebene Wellen lässt sich am besten in der Abbildung 2-1 (Label 5 und 6) veranschaulichen. Die vom Brennpunkt direkt senkrecht auf die Membran gerichtete Welle wird zuerst reflektiert, da der Abstand (zwischen dem Punkt und dem Boden des Reflektors) am geringsten ist. Die Wellen, die sich schräg auf den Reflektor zubewegen, werden mit einer entsprechenden Zeitverzögerung reflektiert. Wenn sich die reflektierten Wellen zur Oberseite des konkav geformten Reflektors bewegen,

---

<sup>2</sup> Comma-separated values

erreichen sie die Oberseite gleichzeitig, da die ersten reflektierten Wellen einen längeren Weg zur Oberseite zurücklegen, während die später reflektierten einen kürzeren Weg zurücklegen, also gleichzeitig an der Oberseite ankommen. Von dort aus breiten sie sich als gleichmäßig verteilte Wellen über die vom Rand des Reflektors abgedeckte Fläche aus. Dadurch wird sichergestellt, dass der durch die Kavitation in der Flüssigkeit erzeugte Druck gleichmäßig oberhalb der Funkenstrecke nach oben wandern. Das heißt, dass diese Kavitation auf der gesamten Oberfläche des Sterilisiergutes (Nahrungsmittel) gleichmäßig erzeugt wird.

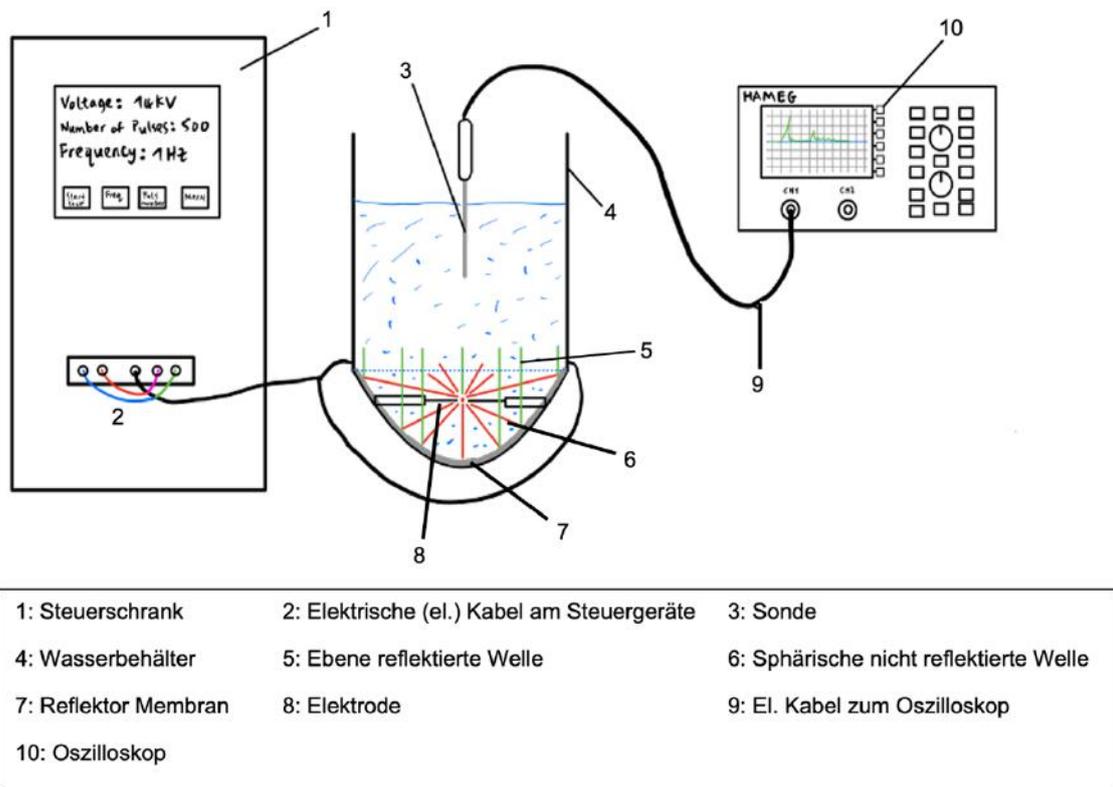


Abbildung 2-1: Messaufbau für die elektrohydraulische Messung mit der Sonde und ein Oszilloskop

Der Druck von den nicht reflektierten Wellen gelangt jedoch direkt zum Sensor, ist aber ungleichmäßig verteilt, wobei der höchste Druck in der Mitte liegt. Es besteht also ein Zeitunterschied zwischen dem Signal, dass das Hydrophon von der ersten Wellengruppe empfängt, und dem Signal, das von der reflektierten Wellengruppe erzeugt wird. Das Kenntnis der Schallgeschwindigkeit in Wasser [10] und der Abstände zwischen Quelle (Elektroden) und Reflektor, Quelle und Sensor sowie Reflektor und Sensor helfen, zu berechnen (siehe Kapitel 3.2), zu welchem Zeitpunkt das erste und das zweite Signal zu erwarten sind. Diese Information soll weiterhin helfen, den Trigger entsprechend einzustellen, um das erwartete Signal zu erhalten. Die Messung der Temperatur ist auch wichtig, da die Wasserdichte und somit auch die Schallgeschwindigkeit im Wasser davon abhängen. Außerdem kann ein

Anstieg in der Temperatur die Zusammensetzung der Nahrungsmittel, welche mit Ultraschall Kavitation behandelt werden soll, verändern [10] [11]. Daher soll die bevor und nach jeder Messung berücksichtigt werden.

Die folgenden Formeln beschreiben die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit mit der Dichte bzw. die Temperatur und die darauffolgende Zeit, bis das erste und zweite Signal an dem Sensor ankommt:

$$c = \sqrt{\frac{K}{r_w}} \quad \text{Eq. 1}$$

$$r_w = 1000 \left[ 1 + \frac{(T + 288,9414)}{508929,2(T + 68,12963)} (T - 3,9863)^2 \right] \quad \text{Eq. 2} \quad [11]$$

$$c = \frac{d}{t} \quad \text{Eq. 3}$$

$$t = \frac{d}{c} \quad \text{Eq. 4}$$

$c$  = Schallgeschwindigkeit in Wasser

$K$  = Kompressionsmodulus

$r_w$  = Wasserdichte von Thiesen-Scheel-Dieselhorst Gleichung [11].

$T$  = Temperatur in °C

$d$  = von der Welle zurückgelegter Weg

$t$  = Zeit, die das Signal benötigt, um am Sensor anzukommen

Tabelle 1 zeigt die Zeit, die die Primär- und Sekundärwelle benötigt, um am Sensor anzukommen. Die Zeiten für die Primär- und Sekundärwelle werden als „1°-Zeit“ bzw. „2°-Zeit“ bezeichnet. Diese Zeiten wurden mit der Gleichung Eq. 4 berechnet. Es ist zu erkennen, dass die Primärwelle schneller am Sensor ankommt als die Sekundärwelle, weil die Sekundärwelle einen längeren Weg zurücklegt (Abstand zwischen Elektrodenspalt und Reflektor mal 2 zusammen mit dem Abstand zwischen dem Spalt und Sensor).

Tabelle 1: Zeit damit die primäre (1° Zeit) und sekundäre (2° Zeit) Welle an den Sensor ankommt. A\_S\_S ist der Abstand zwischen dem Sensor und den Elektroden oder dem Elektrodenspalt. Der Abstand zwischen dem Elektrodenspalt und dem Reflektor beträgt 20 mm

A_S_S [mm]	1° Zeit [ $\mu$ s]	2° Zeit [ $\mu$ s]
20	13,333	40,000
40	26,667	53,333
60	40,000	66,667
80	53,333	80,000
100	66,667	93,333
120	80,000	106,667
140	93,333	120,000
160	106,667	133,333
180	120,000	146,667
200	133,333	160,000

Der verwendete Sensor muss kalibriert werden, um die erhaltene Spannung in einen tatsächlichen Druckwert umwandeln zu können. Die Kalibrierung eines jeden Sensors ist durch Empfindlichkeitsformeln in seinem Datenblatt zu finden oder kann gemäß spezifischer internationaler elektrotechnischer Kommission (IEC) Normen ermittelt werden. Hydrofonsensoren für Messungen von Ultraschalleffekten in Wasser werden nach der Norm IEC 62127-2 kalibriert. Falls es für ein bestimmtes Hydrofon keine Norm für die Kalibrierung gibt oder keine entsprechenden Werte in seinem Datenblatt stehen, wird ein anderes standardisiertes Hydrofon als Referenz für die Kalibrierung des neuen Hydrofons verwendet. In diesem Fall wird der gleiche Satz von Messungen mit beiden Sensoren (Referenzsensor und nicht kalibrierter Sensor) durchgeführt und die Ergebnisse werden später verglichen. Wenn die vom kalibrierten Sensor (S1) erhaltene Spannung (V1) einem bestimmten Druck (P1) entspricht, dann entspricht die vom zweiten Sensor (S2) für dasselbe Experiment erhaltene Spannung V2 ebenfalls demselben Druck, P1, was zur effektiven Kalibrierung von S2 führt [13]. Die Messung mit der Sonde soll dabei helfen, um festzustellen, wo der Druck unterschiedlichen Höhen am höchsten ist in und seine Verteilungsmuster entlang des Wasserbehälters aufzeigen.

Eine weitere Messung wird mit dem oben beschriebenen Aufbau durchgeführt, mit Ausnahme des Sensors und des Oszilloskops. Stattdessen wird eine Aluminiumfolie mit Hilfe einer Halterung im Wasser eingelegt. Die Rolle der Folie in diesem und in allen anderen Experimenten (mit den piezoelektrischen und elektromagnetischen Ultraschallquellen) besteht darin, die Gesamtverteilung des Kavitationseffekts auf der Oberfläche der Folie zu analysieren. Diese Verteilung zeigt, ob die Kavitationen gleichmäßig über die Fläche jedes der Wassertanks in Abhängigkeit von der Quelle verteilt sind, was mit der Sonde nicht gut

visualisierbar ist, da sie bei jeder Messung nur einen Punkt im Wasser erfasst. Die von der Ultraschallquelle erzeugte Kavitation zerstört die Folie und erzeugt teilweise Löcher und Beulen in ihr. Der Grad der Zerstörung wird fotografiert und später mit einem bekannten Bildverarbeitungsprogrammen (MATLAB® und Image J) analysiert (für weitere Details siehe Kapitel 3.2). Die folgende Abbildung 2-2 zeigt den Aufbau für dieses Experiment.

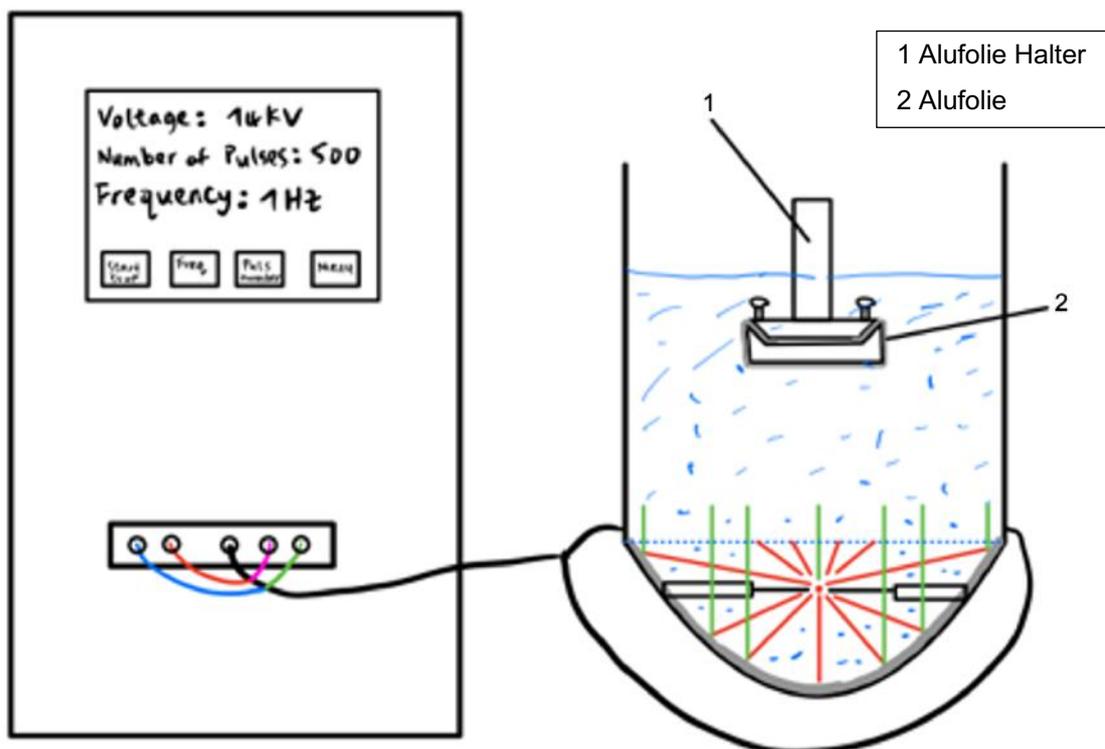


Abbildung 2-2: Messaufbau für die elektrohydraulische Messung mit der Aluminiumfolie.

Wie im Experiment mit dem Sensor erwähnt, laufen diesmal zwei Arten von Wellen zur Alufolie, ein nicht reflektiertes sphärisches Wellenfront und ein gleichmäßig verteiltes Wellenfront als Reflexion des vorherigen. Das bedeutet, dass zum einen ein gleichmäßig verteilter Kavitationseffekt auf der Folie durch die gleichmäßigen Wellen und ein etwas stärkerer Kavitationseffekt in der Mitte der Folie durch die nicht reflektierte Welle auftreten sollte. Dieser erhöhte Effekt in der Mitte des Aluminiumblattes sollte sich auf die gesamte Folie ausbreiten, wenn sie weiter weg vom Reflektor bewegt wird.

Die Zerstörungsmuster (Kavitationseffekt) auf der Alufolie sollte dabei helfen das Wirkungsfeld des Ultraschallwandlers zu ermitteln. Dadurch wird eine mögliche Korrelation mit den Messergebnissen von der Sonde ermittelt.

## 2.2 Piezoelektrische Quelle

Der Aufbau für dieses Experiment ist dem mit der elektrohydraulischen Quelle sehr ähnlich. Es werden eine Reihe von Messungen mit einem Sensor und mit der Aluminiumfolie durchgeführt und später mit MATLAB®, Microsoft EXCEL® und einem Programm für die Bildverarbeitung (Image J) untersucht (siehe Kapitel 3). Der einzige Unterschied ist der Aufbau der Quelle und die aktive Membran. Der Ursprung der Welle kommt direkt vom Boden des Wasserbehälters (aktive Membran), sodass keine verzögerte reflektierte Welle zu erwarten ist, wie bei der elektrohydraulischen Messung mit einem Reflektor (Abbildung 3-5). Außerdem ist die Membran flach und fest mit der Quelle der Schallwellen verbunden. Die untenstehenden Abbildung 2-3 und Abbildung 2-4 zeigen die zwei Arten der Messungen.

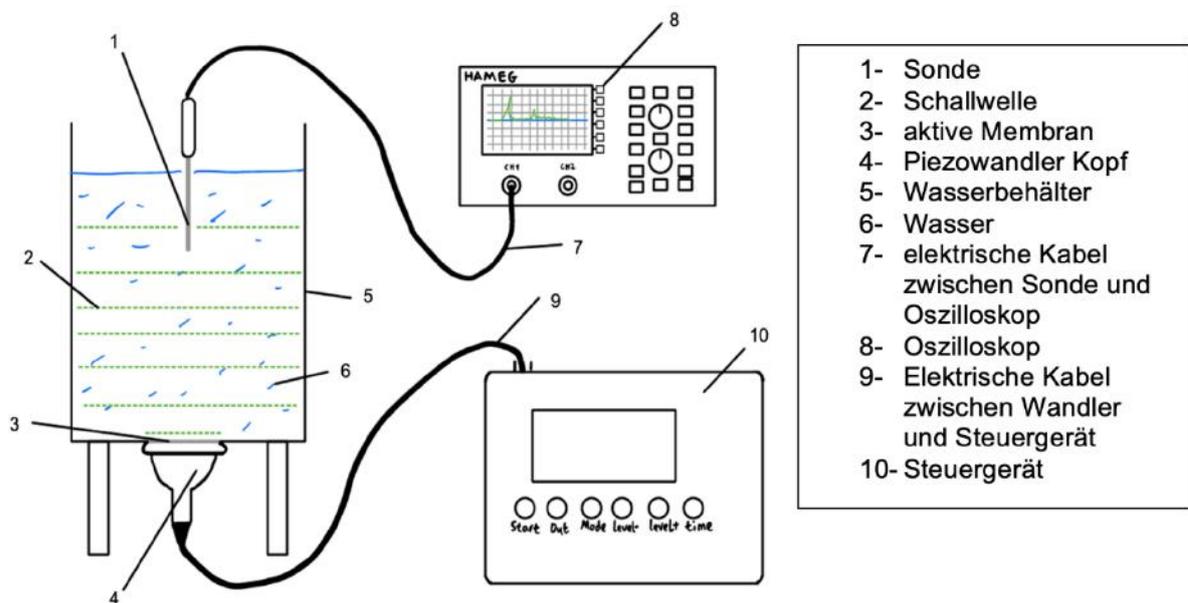


Abbildung 2-3: Piezoelektrische Messung mit der Sonde und dem Oszilloskop

Die Prinzipien der piezoelektrischen Quelle liegen an der Funktionsweise des Piezomaterials. Diese Materialien weisen Piezoelektrizität auf, d. h. die Ansammlung elektrischer Ladungen als Reaktion auf eine mechanische Belastung. Solche Objekte neigen auch dazu, entgegengesetzte Piezoelektrizität zu zeigen, indem sie eine mechanische Dehnung als Folge einer angelegten Spannung erzeugen, was die Eigenschaft ist, die in diesen Messungen verwendet wird [12]. Abbildung 2-5 veranschaulicht diese Prinzipien. Die angelegte Spannung hat eine bestimmte Frequenz und Amplitude, die auf die Piezoelemente übertragen wird, d. h. der Grad der Verformung des Piezomaterials und seine Frequenz sind proportional zur Stärke der angelegten Spannung bzw. ihrer Frequenz. Weitere Details zur Frequenz und zur Signalform der in diesem Experiment verwendeten Steuergerät werden in Kapitel 3.3.1 erläutert.

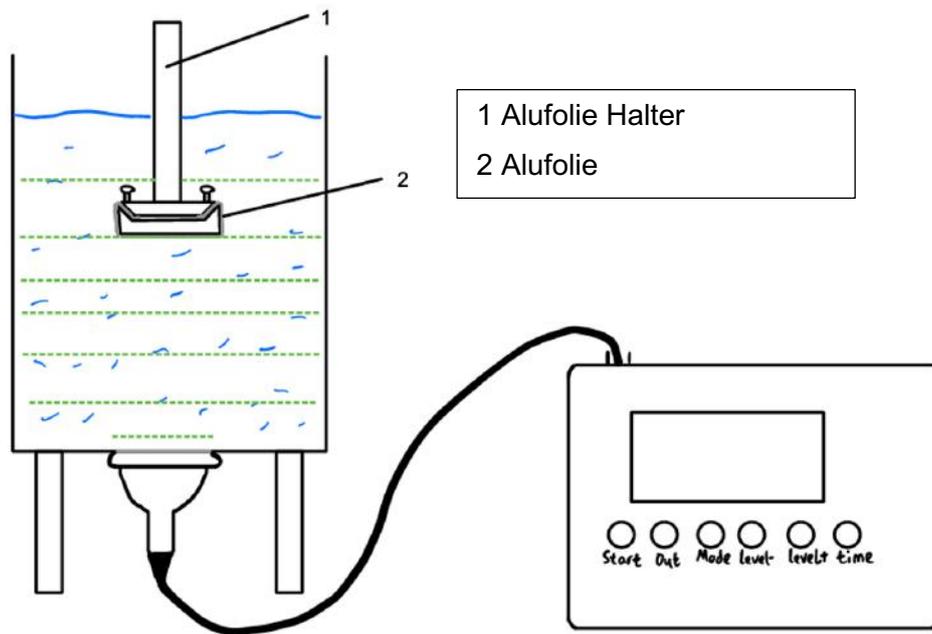


Abbildung 2-4: Piezoelektrische Messung mit Aluminiumfolie

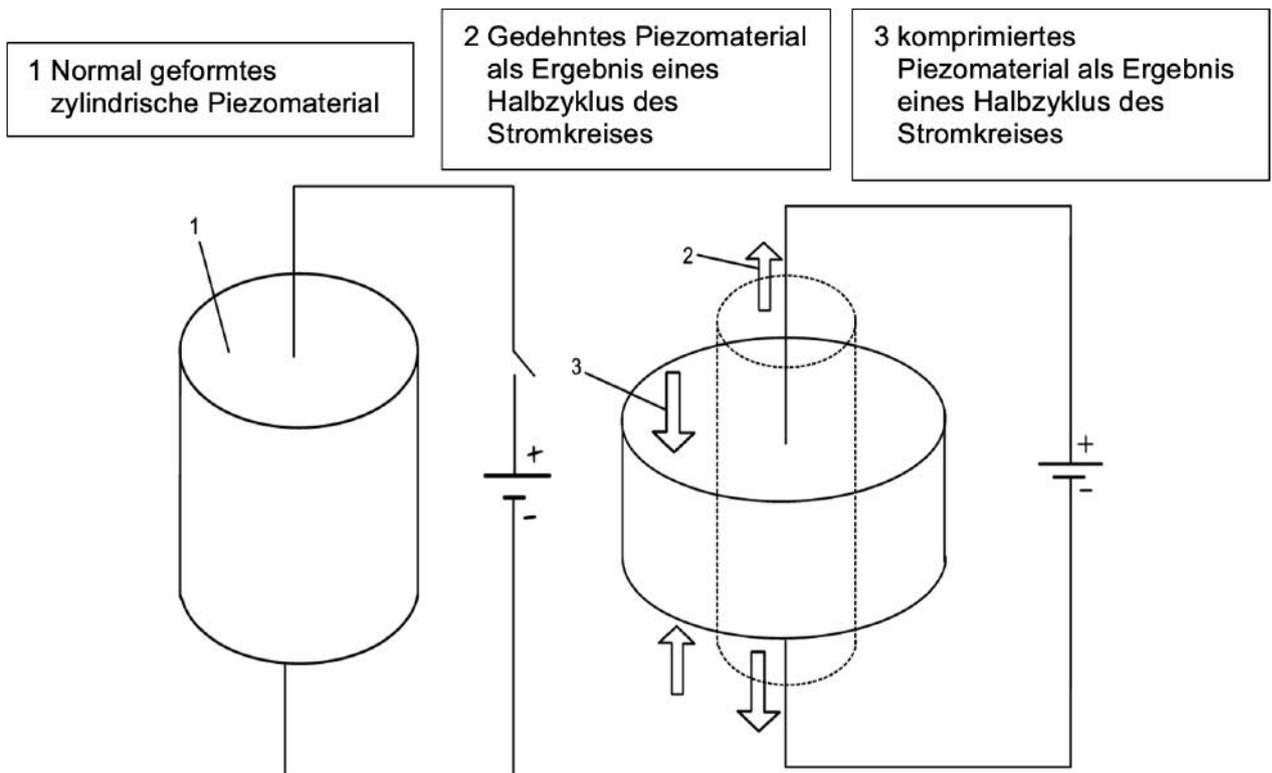


Abbildung 2-5: Piezoelektrizität durch das Anlegen einer elektrischen Spannung

## 2.3 Elektromagnetische Quelle

Für die Messung der Kavitation mit dieser Ultraschallquelle werden u. a. folgende Geräte verwendet:

- Generator und Steuerschrank für die elektromagnetische Stoßwelle (EMSE) von „STS-Systemtechnik Electronic GmbH“.
- Reaktionsgefäß, welches mit entgastem Wasser gefüllt ist, in das der Sensor oder die Alufolie für Messungen eingesetzt wird.
- Edelstahl Halter für die Alufolie.
- 12  $\mu\text{m}$  dick Alufolie.

Die EMSE besteht grundsätzlich aus zwei Hauptteilen; der Steuerschrank mit dem Generator und das Reaktionsgefäß welche an den Schrank angeschlossen ist. Auf dem Steuerschrank wird die Stärke, die Anzahl und die Frequenz der Impulse eingestellt. Das Reaktionsgefäß (aus zylindrischem Glas) hat ein Schallwandler auf seinem Boden mit einer Spule und aktiven Flachkupfermembran, siehe Abbildung 2-6.

Das Prinzip der EMSE ist wie folgt: Am Steuerungsbildschirm wird ein Wert für die Spannung eingegeben und die Kondensatoren im Schaltschrank werden entsprechend geladen. Bei Betätigung der Starttaste entladen sich die Kondensatoren auf die Spule, d.h. es fließt Gleichstrom in die Spule (im Schallwandler) und erzeugt dort ein Magnetfeld. Dieses Magnetfeld erzeugt dann Wirbelstrom in der Kupfermembran (aktive Membran), die dann ihr eigenes Magnetfeld dadurch aufbaut. Beide Magnetfelder stoßen sich gegenseitig ab, was dazu führt, dass die Membran eine Schallwelle in das Wasser generiert, die sich ausbreitet [14].

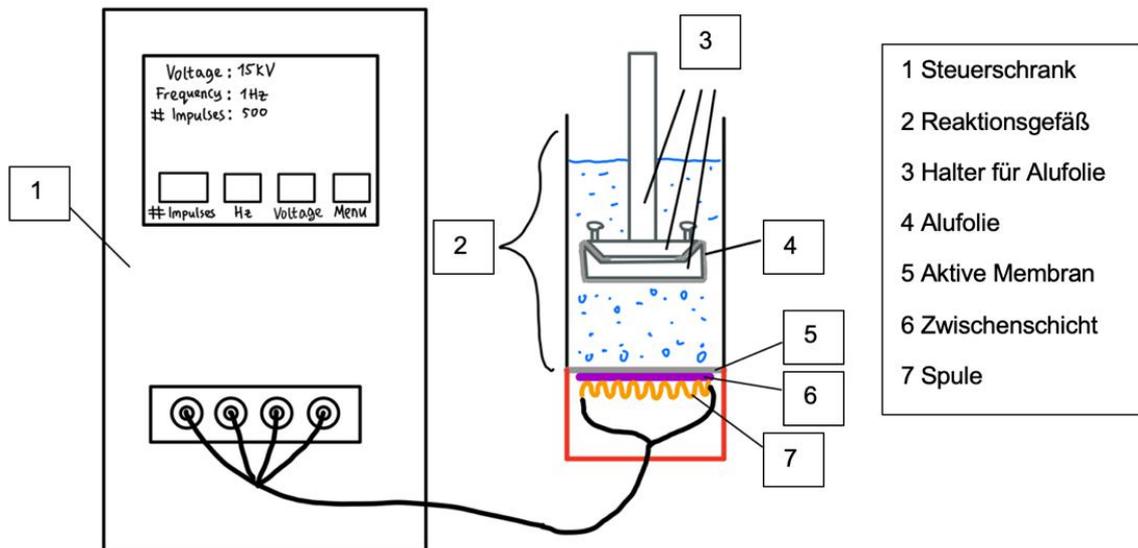


Abbildung 2-6: Skizze des Messaufbaus der EMSE-Messung mit Aluminiumfolie

Die Analyse der Kavitationserzeugung durch diese Ultraschallquelle wurde mit einer Aluminiumfolie durchgeführt, die in unterschiedlichen Abständen von der aktiven Membran im Wasser eingelegt wurde. Hier wurden keine Messungen mit der Sonde durchgeführt, zum einen, weil die Signale nur sehr kurz andauern und daher die Kavitation in der Nähe der Sonde immer nur sporadisch auftritt und zum anderen, weil die Zeit nicht ausreichte, um hier die passende Sonde für diese Messung zu finden. Außerdem befand sich der Aufbau für das Experiment in einem anderen Ort und es standen nur 2 Tage zur Verfügung, sich mit dem Aufbau vertraut zu machen, um einige Messungen durchzuführen. Das Aufstellen der Aluminiumfolie war der schnellere Weg, um in kurzer Zeit brauchbare Daten zu erhalten, anstatt die Sonde zu verwenden, was das Einstellen des Oszilloskops bedeutete. Danach mussten unsere Kooperationspartner an der Hochschule Anhalt vor Ort den Aufbau nutzen. Mehr Details zu den Messungen und der durchgeführten Analyse sind in den folgenden Kapiteln zu finden.

## 3 Methode

In diesem Kapitel werden die verschiedenen durchgeführten Messungen detailliert beschrieben, beginnend mit der Entgasung des Wassers mithilfe eines Entgasungskreislaufs, gefolgt von der Messung der Auswirkungen von Kavitation mit den oben genannten Ultraschallquellen.

### 3.1 Wasserkreislauf

Der Wasserkreislauf ist der wichtigste Teil dieses Experiments, da jede durchgeführte Messung den Einsatz von Sauerstoffarmem Wasser beinhaltet. Das Entgasen des Wassers beim Befüllen und Entleeren des Kreislaufs erfolgte in einer Reihe von aufwendigen Schritten, welche in der Abbildung 3-2 unten dargestellt wird.

Der Wasserkreislauf in dieser Abbildung besteht aus den folgenden Komponenten:

- Steuergeräte mit einem Arduino Microcontroller und Bildschirm zur Steuerung der Öffnung und Schließung der Ventile.
- Eine Netzspannung zur Versorgung der Heizungsentgaser des Kreislaufes. Von Bauhaus.
- Eine Gleichspannungsquelle („Profi Voltcraft 30V / 2,5A Regelbares Labor Netzgerät Labornetzteil Ladegerät“ von Fa<sup>3</sup>. Voltcraft) zur Versorgung der Ventile und Arduino.
- Eine Zahnradpumpe („UPX/AC 220V Gear Pump“ von Fa. Marco Fluid Technology) welche das Wasser in eine Richtung führt.
- Manometern zur Messung des Wasserdrucks an unterschiedlichen Stellen im Kreislauf. Die sind von Lieferant OBI.
- Ventile mit Abstellknebeln von Lieferant Bauhaus zur manuellen Steuerung der Wasser Fluss für die interne und externe Zyklen.
- Magnet Ventilen (Fa. Bauhaus) zur Kontrolle der Flussrichtung von Wasser.
- Ein Heizkörper als Wasserspeicher.
- Ein Reservoir als Druckausgleichsbehälter von Lieferant Bauhaus.
- Ein Wasserfilter von Bauhaus.
- Ein Deionisationspatrone (Gefäß für Wasserfiltration von AQMOS Wasseraufbereitung).
- Durchflusssensoren (von Fa. Kyrio) zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit des Wassers.
- Sauerstoffmessgerät „Dissolved Oxygen meter“ DO-100 vom Firma Voltcraft.

---

<sup>3</sup> Firma

Die Funktionsweise des Kreislaufs lässt sich am besten in vier grundlegenden Teilen verstehen; das Füllen, das Entleeren des Zyklus, der interne und externe Kreislauf.

Beim Befüllen des Kreislaufes wird Ventil 2 (V2) an der Wasserleitung angeschlossen und der Modus „Umlauf 1 interne Befüllen“ (Um1. Int. B) gewählt. Dieser Modus öffnet die Ventile V2, V3 und V4, und aktiviert die Pumpe, um den internen Fluss zu ermöglichen. Die Abstellknebeln (manuellen Ventilen) K3, K4 und K5 sind immer offen, während K2 nur partiell geöffnet ist. V1 und K1 bleiben zu, sodass Wasser nicht aus dem Kreislauf herauslaufen kann. Wasser von der Leitung geht in dem Zyklus und die Wassermenge wird mithilfe der Manometer bestimmt. Der maximal erlaubte Druck ist 2 bar. Bei 2 bar wird der Hahn von der Leitung zugezogen und der Modus „interne Umlauf (Um1. Int.)“ gewählt, um einen internen Kreislauf zu gewährleisten.

Bei der Entleerung des Zyklus wurde ein anderer Modus gewählt: "externe Zirkulation (Um1. Ext.)". Hierbei wird die Pumpe aktiviert und die Ventile V1, V3, V4 werden geöffnet, während V2 geschlossen bleibt. Der Absperrknebel K1 wird manuell geöffnet, damit Wasser aus dem Kreislauf fließen kann. Dieser Prozess der Wasserentnahme aus dem Kreislauf ist die Grundlage des externen Wasserkreislaufs, da das aus V1 kommende Wasser der Eingang des Messbeckens sein kann und der Ausgang dieses Beckens über V3 wieder in den Kreislauf zurückgeführt werden kann, wodurch ein externer Wasserkreislauf entsteht. Eine explizite Beschreibung der Funktionsweise dieses Wasserkreislaufs ist in seiner Bedienungsanleitung zu finden [16].



Abbildung 3-1: Sauerstoffmessgerät; „Dissolved Oxygen-meter D-100“ von der Firma Voltcraft

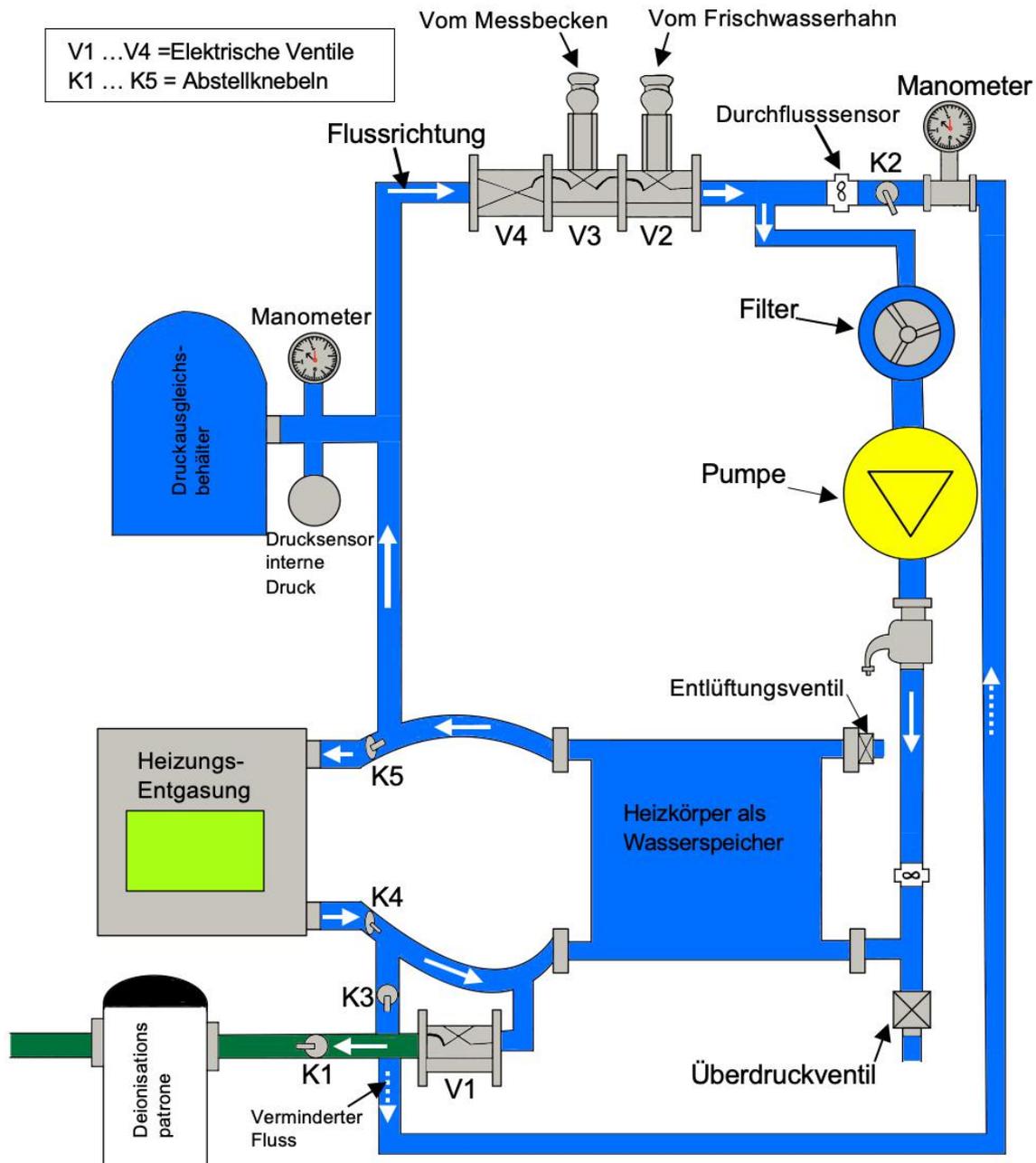


Abbildung 3-2: Wasserkreislauf zur Entgasung von Wasser

Der Wasserkreislauf hilft, das entgaste Wasser in einer kurzen Zeit zur Verfügung zu stellen. Um die Auswirkungen der Kavitation im Wasser richtig zu analysieren, sollte die Sauerstoffkonzentration im Wasser immer unter  $5 \text{ mg/l}$  liegen. Mit dem obigen Zyklus wird diese Bedingung in weniger als 30 Minuten erreicht, wie in Abbildung 3-3 dargestellt. Die Reduzierung des Sauerstoffgehalts im Wasser sorgt einerseits dafür, dass die erzeugte Kavitation hauptsächlich durch den Beschallungsprozess entsteht, und andererseits für eine bessere Wirkung der Ultraschallkavitation, die in entgastem Wasser optimaler funktioniert [9].

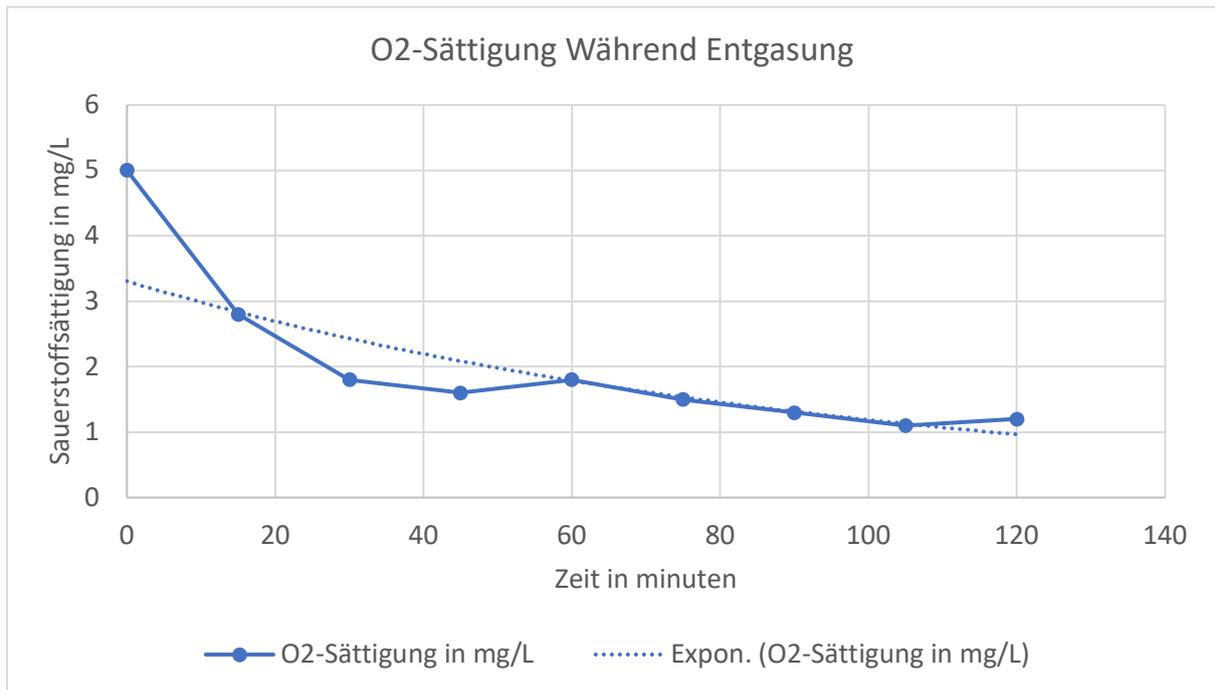


Abbildung 3-3: Sauerstoffmenge in mg/l in Wasser während des Entgasungsprozess und 15 Minuten Abstände

Die Grafik in Abbildung 3-3 zeigt die Sauerstoffkonzentration des Wassers aus dem Zyklus, die in einem Intervall von 15 Minuten aufgenommen wurde. Die Messung wurde mit einem Sauerstoffmessgerät durchgeführt. Es ist zu erkennen, dass der Sauerstoffgehalt mit der Zeit abnimmt, bis er sich bei etwa  $1,2 \text{ mg/l}$  nach  $1,5 \text{ Stunden}$  einpendelt. Für jede Messung in dieser Arbeit wurde das Wasser entgast bis zu einer Sauerstoffgehalt von  $\leq 3 \text{ mg/l}$ .

## 3.2 Elektrohydraulische Messung

Die erste Messung wurde mit der elektrohydraulischen Quelle der Firma „STS-Systemtechnik Electronic GmbH“ durchgeführt. Der Aufbau des Experiments wird in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.

### 3.2.1 Messaufbau

Für die Vermessung der Stoßquelle wurden folgenden Vorrichtungen (siehe Abbildung 3-4) verwendet:

- Oszilloskop von Rohde und Schwarz, RTE 1032, 350 MHz, 3 GSa/s auf dem Tischset links. Anmerkung „1“.

- Windows 10 Computer mit der CNC<sup>4</sup>-Software zur Steuerung des Positioniersystems neben dem Oszilloskop auf dem Tischset, Anmerkung „2“. Von Fa. WinPC-NC-CNC-Step GmbH & Co. KG.
- Light Spot Hydrophon LSHD-2, Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik, Hersteller Universität Erlangen. Anmerkung „3“.
- 3-Achsiger Positioniersystem: CNC-Step, High Z S-720 (Anmerkung „6“) mit Heiz, Steep Controller Zero 3 (auf dem Steuerschrank in der Mitte), Anmerkung „4“. Von IndustryArena GmbH.
- Nadelhydrophon: Onda Hydrophone HNR-0500 (S/N: 1914). Von Fa. Onda
- Elektrohydraulische Stoßquelle mit elliptischem Reflektor und zylindrische Wasserbehälter („10“), Anmerkung „8 und 9“. Von Fa. STS-Systemtechnik Electronic GmbH (STS).
  - Steuer Schrank KRK von STS-Systemtechnik Electronic GmbH (STS), Anmerkung „5“
  - Reflektor-Träger-Wagen mit Wasserkreislauf von STS recht. Der Reflektor hat eine konkave Form.
  - Zwei Generatoren, ein positiver und ein negativer Pol („7“, das andere Generator ist auf der anderen Seite). Von Fa. STS.
- Sauerstoffmessgerät (Abbildung 3-1). „Dissolved Oxygen meter“ DO-100 von der Firma Voltcraft.
- Aluminiumfolie aus Lidl laden (Dicke  $12\mu\text{m}$ )

---

<sup>4</sup> Computer numerical control

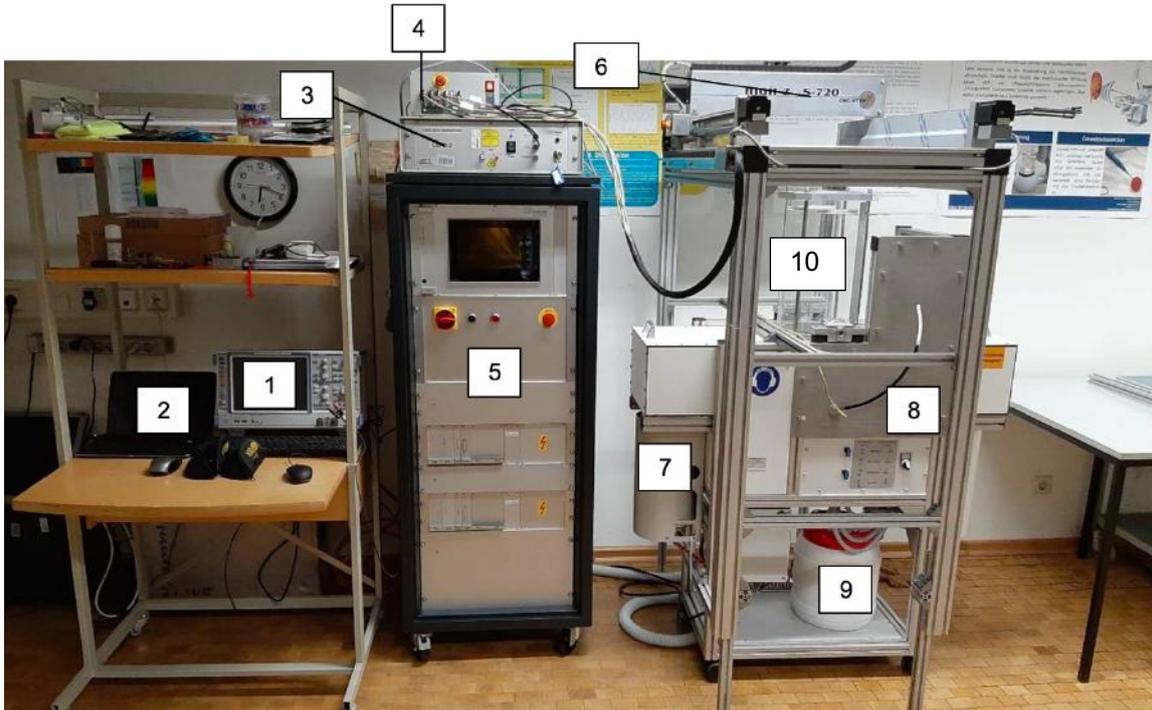


Abbildung 3-4: Messaufbau für die Analyse von Kavitation mit elektrohydraulische Stoßquellen

### 3.2.2 Messmethode mit Sensoren

Der Versuchsaufbau erfolgte wie in Abbildung 3-4 dargestellt mit entgast Wasser im zylindrischen Behälter und dem darin eingesetzten Sensor. Die Hydrofonsensoren S/N 1910 und S/N 1914 wurden jeweils in getrennten Durchläufen entlang der X-, Y- und Z-Achse in 5mm Abständen bewegt. Es ist zu beachten, dass die Messung mit der Sonde hier nicht der Charakterisierung der Kavitation diene, sondern der Vermessung des Schallfelds.

Kavitation muss bei den empfindlichen Sonden während der Messung sogar möglichst vermieden werden, sonst werden sie schnell zerstört. Daher wurden nur wenige Schallimpulse pro Messpunkt und möglichst gut entgaste Wasser verwendet. Das Oszilloskop wurde so eingestellt, dass die Zeitsignale von zehn Messungen gemittelt wurden. Die Signalaufzeichnungslänge wurde auf 1000 und die interne Impedanz des Oszilloskops auf  $1\text{ M}\Omega$  eingestellt, letzteres, um eine Beschädigung der Sensoren zu vermeiden. Bei einer Signalaufzeichnungslänge von 1000 wurden 10000 Messungen durchgeführt und am Ende ein Mittelwert aus 10 Messungen berücksichtigt. Das bedeutet, dass der erste Satz der Mittelwert der Messungen 1, 1001, 2001, 3001, 4001, 5001, 6001, 7001, 8001 und 9001 war, während der letzte Satz der Mittelwert von 1000, 2000, 3000 usw. bis 10000 war. Die beiden verwendeten Hydrofone bei diesen Messungen mussten kalibriert werden. Das Hydrofon mit Seriennummer 1914 (#1914) ist mit Hilfe eines Referenzhydrofons (Onda Hydrophone HNR-0500 S/N: 1910) kalibriert worden. Für weitere Details zum Kalibrierungsprozess siehe zwischenbericht zum Projekt Kavitation [13]. Die Empfindlichkeit der Sonde #1914 war

$-16,57 \text{ MPa/V}$  bei Anschluss an das Oszilloskop mit  $1 \text{ M}\Omega$  Impedanz ohne Verlängerungskabel und 0,64-fache der Wert mit dem verwendeten Verlängerungskabel.

Vor Inbetriebnahme des Teststandes wurde die Stellung der Elektroden nachgeprüft. Für einen erfolgreichen Funkenschlag zwischen den Elektroden sollte der Spalt zwischen die Elektroden ca.  $1 \text{ mm}$  betragen. Bei größeren Abständen (wegen Abbrand) müssten die Elektroden erneut nachgestellt werden. Genauere Anweisung für das Vorgehen zum Nachstellen der Elektroden stand in dem Handbuch des Herstellers. Ist der Spalt zwischen den Elektroden im geforderten Bereich, kann der Reaktionsbehälter (zylinderförmige Wasserbehälter) mit Wasser gefüllt und die Leitfähigkeit und der Sauerstoffgehalt des Wassers überprüft werden. Das verwendete Wasser sollte dabei einen Leitwert in Bereich von  $300 \mu\text{s/cm}$  bis  $450 \mu\text{s/cm}$  und ein Sauerstoffgehalt von maximal  $3 \text{ mg/L}$  aufweisen. Beim Steuergerät wird die Kavitationsintensität des Impulses (die Ladespannung), die Frequenz und der Anzahl der Pulse eingestellt. Bei den Messungen wurden folgenden Einstellungen verwendet:

- Ladespannung:  $20 - 24 \text{ kV}$
- Anzahl der Pulse:  $1 - 10$
- Frequenz:  $1 \text{ Hz}$

Die Sonde (Nadelhydrofon) wird vor den Messungen über den Reflektor platziert, und zwar direkt über die Spalte zwischen den Elektroden. Diese Spalte befindet sich über dem Mittelpunkt des Reflektors. Diese Positionierung des Hydrofons dient als Ursprung für die X-, Y- und Z-Achse. Die Position der Sonde wurde im Laufe der Messung in X-, Y- und Z-Richtung bewegt, die Daten aus dem Oszilloskop wurde mit relevanten Informationen wie Datum, Uhrzeit, Ladespannung (oder Kavitationsintensität), Art des Reflektors und verwendete Sonde gespeichert. Der Anzahl der Pulse wurden nach Bedarf variiert aber nicht die Ladespannung und Frequenz während der Messung. Für den gesamten Prozess wurde eine Spannung von  $20 \text{ kV}$  verwendet, da dies die kleinsten Spannungswerte waren, die gute, mit der Sonde erkennbare Ergebnisse lieferten. Eine Frequenz von  $1 \text{ Hz}$  wurde benutzt, um die Elektroden bessere gegen Abbrand zu schonen.

Bei den Messungen in Labor wurden folgende Messreihen aufgenommen:

- In der Y-Achse  $128 \text{ mm}$  und  $248 \text{ mm}$  über der Elektrodenspalte; Schrittweite der Bewegung der Sonde in die Achse war  $5 \text{ mm}$  von  $-35 \text{ mm}$  zu  $+35 \text{ mm}$ .
- In der Y-Achse  $248 \text{ mm}$  über der Elektrodenspalte; Schrittweite in die Achse:  $5 \text{ mm}$  von  $-35 \text{ mm}$  zu  $+50 \text{ mm}$ .
- Im Mittelpunkt von  $128$  bis  $248 \text{ mm}$  über den Elektroden, Schrittweite (in Z-Richtung):  $10 \text{ mm}$ .

- Im Mittelpunkt von 128 bis 223 mm über den Elektroden, Schrittweite (in Z-Richtung): 5 mm.
- In der X-Achse 128 mm über der Elektrodenspalte; Schrittweite in die X-Richtung: 5 mm von -35 bis +55 mm.

Die Werte des Oszilloskops wurden als „CSV“ Datei gespeichert und zur Analyse im Computer hochgeladen. Ein Beispiel über das Aussehen von so einem Signal ist in Abbildung 3-5 zu sehen. Die erst zwei Peaks in der Abbildung sind das Ergebnis der Primär- und Sekundärwelle, die bei der Sonde empfangen wurden (90 mm Abstand von der Elektrodenspalte bei  $Y = -40\text{ mm}$  und  $X = 30\text{ mm}$ ). Der Abstand zwischen der Elektrodenspalte und der Mitte des Reflektors war 25 mm. Bei einer Schallgeschwindigkeit von  $1500\text{ m/s}$  im Wasser. Die Zeit, die für die Ankunft der ersten und der reflektierten Welle benötigt wird, kann mit Hilfe der Gleichung Eq. 4 berechnet werden, um ungefähr zu wissen, wann die Spitzen im Diagramm erscheinen, nämlich bei  $60\text{ }\mu\text{s}$  und  $76\text{ }\mu\text{s}$ , wie in der Abbildung 3-5 unten zu sehen ist.

EXCEL wurde für die Verarbeitung der Dateien benutzt. Dabei wurde eine Funktion verwendet, um die maximalen Druckwerte für jeder X-, Y- und Z-Position der Sonde zu bekommen. Am Ende wurde ein Plot gemacht mit den Druckwerten auf der vertikalen Achse und der Position des Hydrofons auf der horizontalen Achse siehe Kapitel 4.1. Kavitation hier musste bei den empfindlichen Sonden während der Messung sogar möglichst vermieden werden, sonst werden sie schnell zerstört. Daher wurde immer wenige Schallimpulse pro Messpunkt verwendet, wobei darauf geachtet wurde, dass das Wasser richtig entgast wurde.

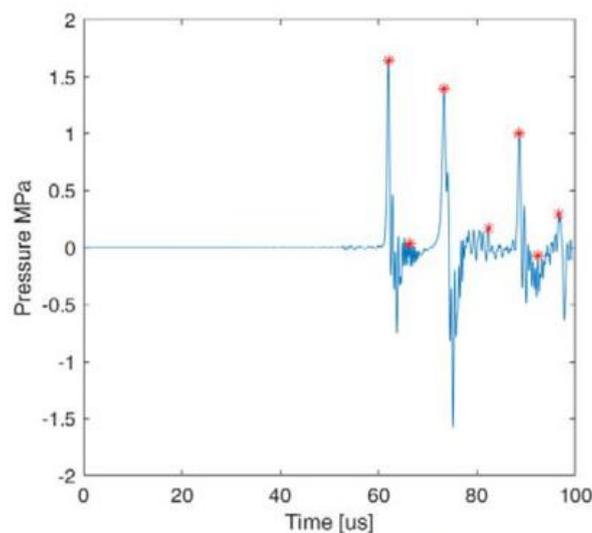


Abbildung 3-5: Primär- und Sekundärwelle von der elektrohydraulischen Quelle bei jeweils  $60\text{ }\mu\text{s}$  und  $76\text{ }\mu\text{s}$ . [17]

### 3.2.3 Messmethode mit Alufolie

Die Messung mit der Alufolie wurde wie in Abbildung 3-4 dargestellt aufgebaut, mit Ausnahme des Sensors. Anstelle des Sensors wird die Alufolie verwendet. Die Folie wird an einem Halter befestigt, dann am Positioniersystem angebracht und in bestimmten Tiefen (Abstand zu den Elektroden) in das Wasser eingeführt.

Bei den Messungen im Labor wurden folgende Messreihen aufgenommen:

- Abstand zwischen Alufolie und Elektroden bei Messung 1 war  $228\text{ mm}$ , Spannung wurde auf  $24\text{ kV}$  eingestellt. Es gab 200 Impulse bei einer Frequenz von  $4\text{ Hz}$ .
- Abstand zwischen Alufolie und Elektroden bei Messung 2 war  $228\text{ mm}$ , Spannung wurde auf  $28\text{ kV}$  eingestellt. Es gab 200 Impulse bei einer Frequenz von  $1\text{ Hz}$ .
- Abstand zwischen Alufolie und Elektroden bei Messung 3 war  $128\text{ mm}$ , Spannung wurde auf  $24\text{ kV}$  eingestellt. Es gab 200 Impulse bei einer Frequenz von  $1\text{ Hz}$ .
- Abstand zwischen Alufolie und Elektroden bei Messung 4 war  $128\text{ mm}$ , Spannung wurde auf  $28\text{ kV}$  eingestellt. Es gab 200 Impulse bei einer Frequenz von  $1\text{ Hz}$ .

Die Frequenz von  $4\text{ Hz}$  wurde nur einmal verwendet, da sie nur geringe Mengen an Beulen und keine Löcher erzeugte, was auf eine schwache Wirkung auf die Folie schließen lässt. Für jede der Messungen wurden 200 Impulse verwendet, um die Konsistenz zu gewährleisten und auch, weil dies trotz der unterschiedlichen Spannungen und Tiefe (Abstand zwischen der Folie und der aktiven Membran) eine deutliche Verzerrung der Folien bewirkte.  $24\text{ kV}$  war die kleinste Spannung, die tatsächlich eine deutliche Zerstörung der Folie aufwies.

Am Ende jeder Messung wurde das Ergebnis mit einer Samsung S10 Kamera fotografiert und mit einer Bildverarbeitungssoftware (Image J) analysiert. Die Bilder der matten Seite der Folie wurden bei Tageslicht gegen 14 Uhr aufgenommen. Es war kaum offensichtliches Loch auf den Folien zu sehen, aber es gab viele gleichmäßige verteilte kreisförmiger Beulen, die durch Kavitation verursacht wurden (siehe Anhang A). Die Fotos von den Folien wurden in der ersten Analyse in schwarz-weiß-Bilder (mit der Software „Image J“) umgewandelt, sodass die Löcher weiß erschienen. Die Abbildung 3-6 unten zeigt die drei Schritte für die Umwandlung eines Bildes in ein Schwarz-Weiß-Bild. Dieser Konvertierungsprozess von Bildern (Alufolie Bilder) ist derselbe wie für alle andere Messungen (Messungen mit der piezoelektrischen und elektromagnetischen Quelle) in dieser Arbeit.

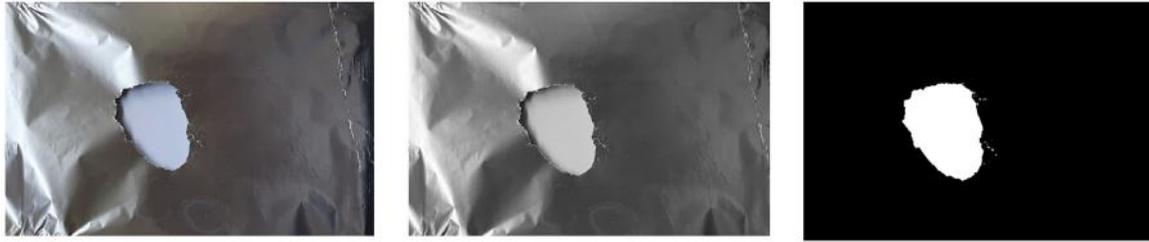


Abbildung 3-6: Konvertierungsprozess vom Realbild zum Schwarzweißbild. Das Bild auf der linken Seite ist das reale Bild das zunächst in ein Graubild und dann in ein Schwarzweißbild umgewandelt wird.

Die Fläche der Löcher wurde berechnet und in Prozent der Löcher zu der gesamten Folie dargestellt (Mithilfe von Python-Anaconda, Anhang B) mit dem Ziel, den Grad der Zerstörung der Folie zu präsentieren. Es wurden weder viele Löcher erzeugt noch waren sie signifikant. Auf der anderen Seite wurden viele Beulen auf den Folien erzeugt, die bei der Kavitationsanalyse dieser Ultraschallquelle berücksichtigt werden mussten. Dafür wurden bestimmte Quadranten (siehe Abbildung 3-7) von der Folie betrachtet, wo die Anzahl der Beulen gezählt und ausgewertet wurde. Es wurde nur eine begrenzte Anzahl von Quadranten berücksichtigt, da es nicht möglich war, alle Unebenheiten auf der gesamten Oberfläche manuell zu zählen. Außerdem war eine automatische Zählung mit keiner der verwendeten Softwares möglich, da Lichtreflexionen an den Seiten der Unebenheiten das Bild verzerrten.

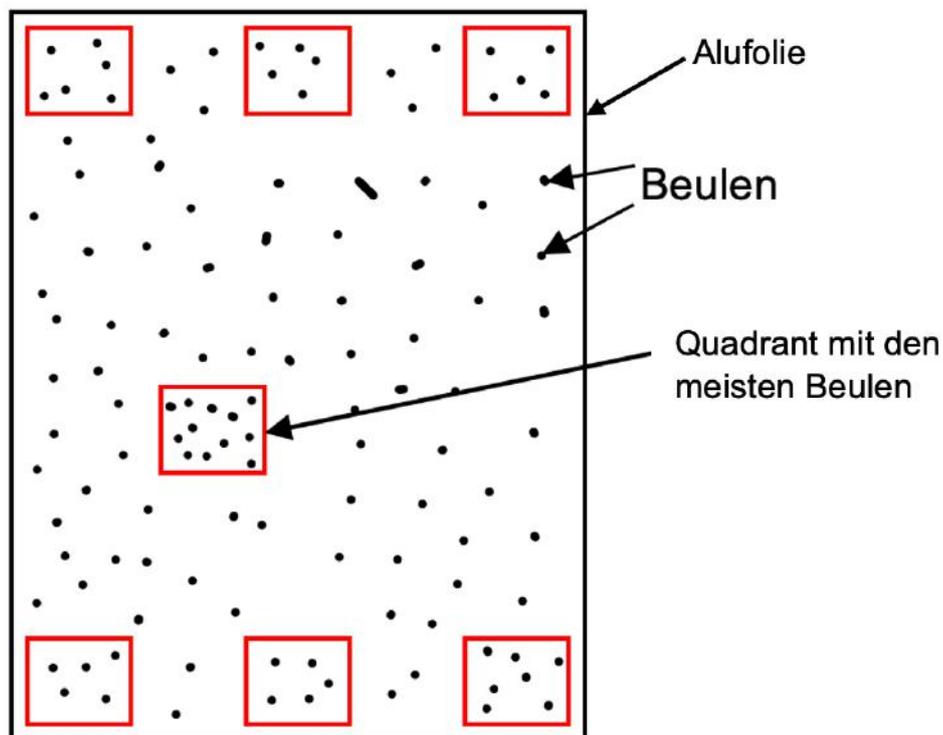


Abbildung 3-7: Skizze der Alufolie mit Beulen und sieben roten Quadranten. Drei Quadranten oben und unten und ein siebter dort wo die meisten Beulen zu finden sind.

Wie es im Bild zu sehen ist, wurden sieben Quadranten gewählt, davon sechs an den Rändern (Standardposition) und einer, wo es am meisten Beulen gab. Daraus wurde ein Durchschnitt erstellt und auf der gesamten Fläche der Folie zurückgerechnet, um festzustellen, wie viele Beulen (ungefähr) auf der Folie entstanden sind, nach jeder Messung. Nach den Auswertungen von Löchern und Beulen auf der Folie wurden einige Ergebnisse erzielt, die im Kapitel 4.1 näher erläutert werden.

Am Ende wurden nur vier beschallte Folien insgesamt berücksichtigt, weil es Zeit brauchte, sich mit den verschiedenen Werkzeugen vertraut zu machen. Da es sich um hohe Spannungen handelte, musste besonders aufmerksam gearbeitet werden. Außerdem reichte die Zeit nicht aus, um weitere Messungen mit der Alufolie durchzuführen, da der gesamte Aufbau an ein anderes Labor in einem anderen Bundesland geschickt werden musste. Die Erfahrungen, die beim Aufbau dieses Experiments gewonnen wurden, halfen jedoch bei den anderen Experimenten, die folgten.

### **3.3 Piezoelektrische Messung**

Der Aufbau für die Messung dieser piezoelektrischen Kavitationsquelle war anders als bei der elektrohydraulischen Messung, da er kleiner und weniger kompliziert aufgebaut war. In den folgenden Unterkapiteln wird darauf näher eingegangen.

#### **3.3.1 Messaufbau**

Für die Messung mit der piezoelektrischen Quelle wurden folgende Geräte und Materialien verwendet (siehe Abbildung 3-8 unten mit Labeln 1 bis 9):

- Windows 10 Computer mit CNC-Software zur Bedienung des Positionierungssystems. (Bildobjekt mit dem Label 1). Von Fa. WinPC-NC-CNC-Step GmbH & Co. KG.
- Alufolie und Sonde Halterung, hergestellt mit „Form 2“ 3D-Drucker und Druckmaterial von der Firma FormLab (Labeln 3 und 4).
- Alufolie mit Dimensionen; 13µm Dicke und 300 m x 29 cm. Lieferant ist Metro Professional.
- Kamera von Samsung S10. Firma Samsung.
- Ultraschall-Steuergeräte mit Wandler (Abbildung 3-10); „Ultrasonic Cavitation“ MZ-168 (Label 7), mit einer Grundfrequenz von 40kHz. Siehe Anhang C.
- Sauerstoffmessgeräte; „Dissolved Oxygen meter“ DO-100 vom Firma Voltcraft. Siehe Abbildung 3-1.
- Oszilloskop; HMO 2022 HAMEG von Rohde & Schwarz (Label 9).
- Reaktionsgefäß (Wasserbehälter für die Messung) von Lieferant OBI (Label 6).
- Maßstab von Lieferant Bauhaus (Label 8).

- TaoTronics Schreibtischlampe LED 12 W. Fa. „Sunvalley Group“.
- Onda Sonde HCT-0200 S/N: 1255 (Fa. Onda Corporation)

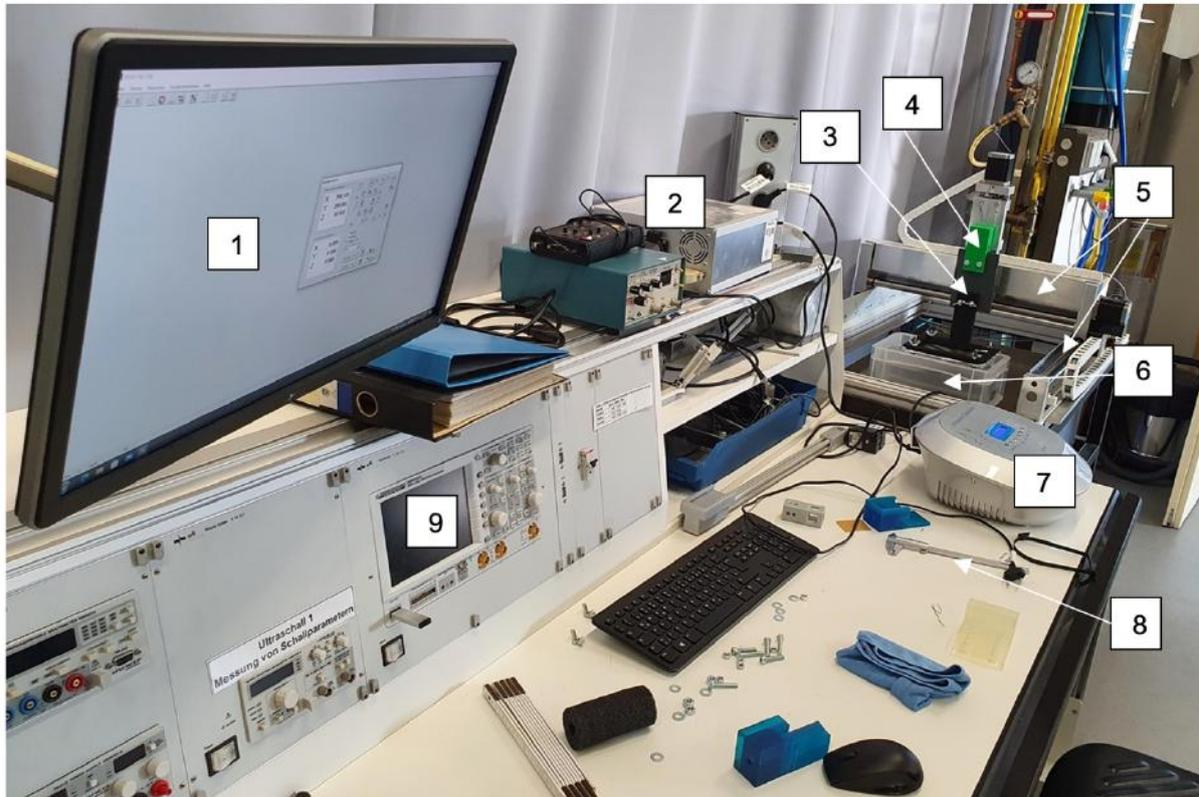


Abbildung 3-8: Der Versuchsaufbau für Messungen mit dem Piezo-Wandler

Mit diesen Geräten wurden die Plattformen für die Versuche mit der Alufolie und dem Sensor aufgebaut. Die gewählte Kavitationsform für die gesamten Experimente in diesem Kapitel war „Cav M1<sup>5</sup>“, die im Steuergerät eingestellt wurde (siehe Anhang C für eine kurze Anleitung des Steuergerätes). Weitere Details zum Aufbau und den Einstellungen sind in den folgenden Kapiteln zu finden.

### 3.3.2 Messmethode mit Alufolie

Die Messungen mit der Alufolie wurden wie in Abbildung 3-8 dargestellt eingerichtet, wobei die Alufolie wie in Abbildung 3-9 A unten platziert wurde. Das Halterungssystem besteht aus zwei offenen rechteck-förmigen Rahmen mit Löchern an den vier Ecken. Die Folie wird zwischen die Rahmen gelegt und Schrauben werden in die vier Löcher eingesetzt, um die Folie zwischen den Rahmen zu fixieren (siehe Abbildung 3-11). Das Reaktionsgefäß besteht aus einem Wasserbehälter mit einer kreisförmigen Öffnung am Boden und einem daran

<sup>5</sup> Cavitation Mode 1 for Continuous mode

befestigten Schallkopf. Die beiden Strukturen werden mit Hilfe von Aquafermit (Dichtungsmaterial), einem Silikon- und Edelstahlring an den Rändern zwischen der Bohrung und dem Schallkopf dicht gemacht (siehe Abbildung 3-9 B und C). Der fixierte Piezowandler wurde dann an seinem Steuergerät (siehe Abbildung 3-10) angeschlossen. Die Bedienung des Gerätes ist einfach. Die Stufe der Beschallungsstärke am Steuergerät kann erhöht oder verringert werden (zwischen Level 1 und 10), und die Zeit auf eine bestimmte Zahl in einem 5-Minuten-Schritt eingestellt werden (von 0 bis 60). Zum Starten der Messungen genügt ein Klick auf den Start/Stopp-Taste am Steuergerät und anschließend ein Klick auf die schwarze Taste am Schallkopf (Abbildung 3-9 C). Das Reaktionsgefäß wird mit entgast Wasser befüllt und die Temperatur wird gemessen (Sauerstoffgehalt und Temperatur werden vor und nach jeder Messung gemessen). Die auf dem Halter fixierte Alufolie wird dann in dem Wasser an einer gewissen Entfernung von dem Piezo-Reflektor eingelegt. Der Folienhalter wird, wie in Abbildung 3-11 gezeigt, in dem Wasserbehälter platziert und nicht seitlich bewegt. Er wird nur nach oben und unten (also in Z-Richtung) bewegt.

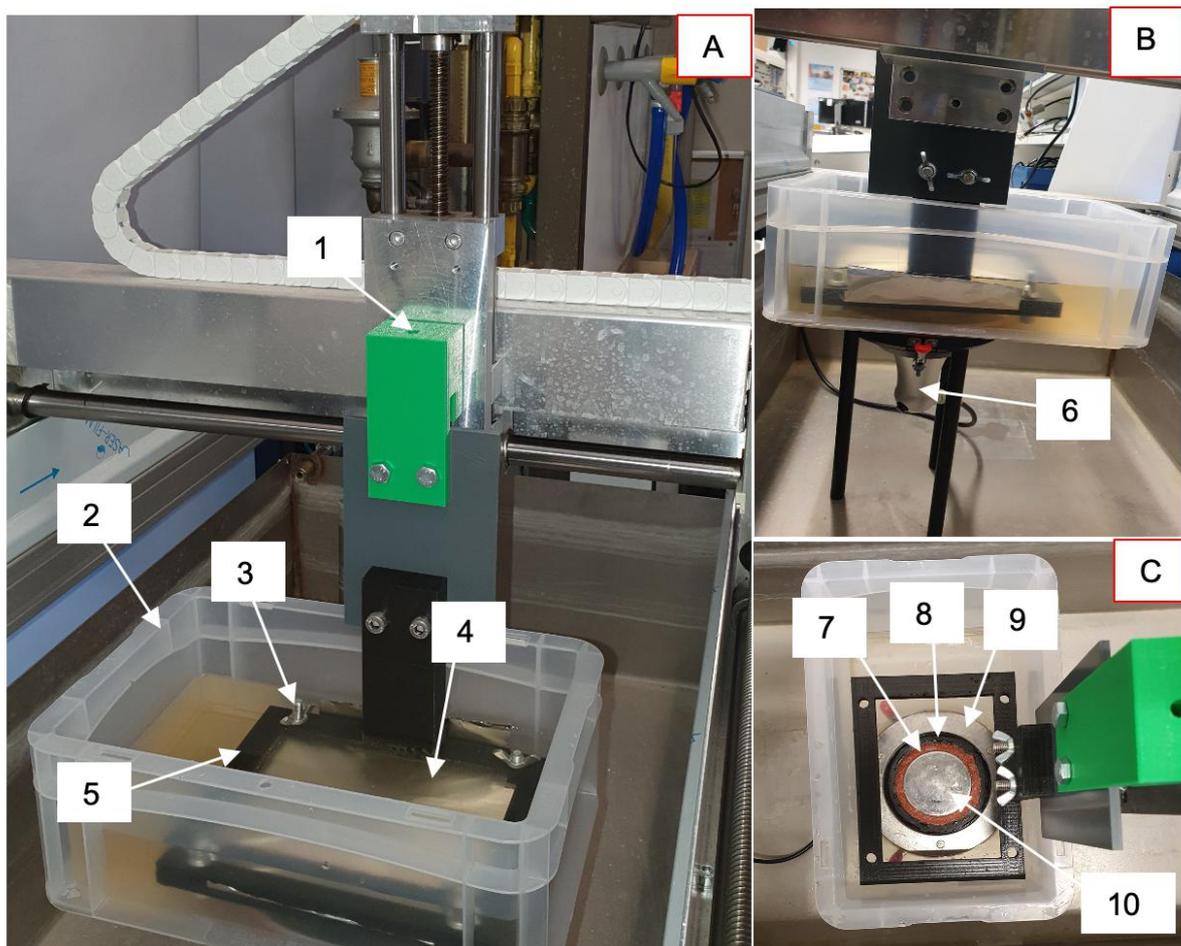


Abbildung 3-9: A) Platzierung der Alufolie in der Halterung und in dem Reaktionsgefäß B) Position der Piezowandler am Boden des Wasserbehälters C) Verdichtung der Piezowandler-Kopf am Boden des Behälters

- 1: Loch am Halterungssystem für die Sonde
- 2: Wasserbehälter (Reaktionsgefäß)
- 3: Schraube zum Fixieren der Alufolie zwischen die zwei Halterahmen (Label 5)
- 4: Alufolie zwischen die Halterahmen ins Wasser
- 5: Rechteckiger Halterahmen für die Alufolie
- 6: Piezowandler-Kopf am Boden des Reaktionsgefäß befestigt
- 7: Aquafermit zur Verdichtung des Wandlers am Boden des Wasserbehälters
- 8: Silikonring zur Verdichtung des Wandlers und Wasserbehälters
- 9: Edelstahlring, Verdichtung mit Silikon zu unterstützen
- 10: Flach kreisförmige aktive Membran des Piezowandlers (Durchmesser ist 70 mm)

Die erste Messreihe diente dazu, die Auswirkungen der Ultraschallquelle auf die Aluminiumfolie bei unterschiedlichen Kavitationsintensitätsstufen bei einer Beschallungszeit von 5 *min* zu ermitteln. Begonnen wurde von Stufe L2 bis Stufe L10 in einer Entfernung von 20 *mm* zwischen der Alufolie und der aktiven Membran und Stufe L2 bis L6 in einer Entfernung von 30 *mm*. Stufe L7 bis L10 wurde nicht bei einer Entfernung von 30 *mm* benutzt, weil es zu diesem Zeitpunkt zu viele Aluminiumpartikeln im Wasser gab, was den Effekt der Kavitation verringert hat. Obwohl der Wasserbehälter gereinigt wurde, gab es trotzdem Restpartikeln auf dem Aquafermit und Behälter, welche nicht entfernt werden konnten. Ein Versuch die Partikel auf dem Aquafermit zu entfernen, führte zur Entfernung des Aquafermits selbst, was der Wasserdichtigkeit des Messstandes beeinträchtigt hat.

Level L1 und L2 haben bei 20 *mm* Abstand keine Wirkung (weder Löcher noch Dellen) auf der Folie ausgelöst. Level L1 bis L3 waren bei einer Entfernung von 30 *mm* genauso unwirksam. Erst bei Stufe L3 bzw. L4 waren die Auswirkungen auf der Folie zu beobachten. Für jede Ebene wurden drei separate Beschallungen mit drei separaten Alufolien in einem Abstand von 20 *mm* und später 30 *mm* von der aktiven Membran der Ultraschallquelle durchgeführt. Es wurde drei Messungen bei jeder dieser Stufen gemacht, um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Die Dauer für jeden einzelnen Beschallungsprozess war 5 *min*. Als Zeitspanne wurden 5 *Minuten* gewählt, da diese Zeit ausreichend war, um eine signifikante Wirkung der Kavitation auf der Folie zu beobachten, ohne dabei zu lang zu warten. Um diese Zeit abzuschätzen, wurde die Kavitationsintensität des Ultraschalls auf 1 eingestellt und die Folie in einem Abstand von 20 *mm* eingeführt. 15 *Minuten* später passierte nichts. Dann wurde die Kavitationsintensität auf 2 erhöht und es passierte immer noch nichts. Bei Stufe 3 begannen sich nach etwa 4 *Minuten* Beschallung Veränderungen zu zeigen. 10 oder mehr Minuten wurden nicht genommen, da dies die Zeit für die Messung erheblich verlängert hätte, die nicht zur Verfügung stand.

Nach der Beschallung wurde die Folie vom Halter entfernt und auf ein weißes DIN A4-Blatt geklebt. Das Ergebnis wurde in einem dunklen Raum mit einer einzigen und schmalen Lichtquelle fotografiert. Abbildung 3-12 zeigt, wie so ein Foto aufgenommen wird und wie es aussieht.



Abbildung 3-10: Steuergerät für den Piezowandler links und sein Schallwandler rechts

Die Lichtquelle wurde hinter dem DIN A4-Blatt platziert, auf das die Aluminiumfolie geklebt war, und ein Bild wurde von der anderen Seite gemacht, wie in Abbildung 3-12 zu sehen. Fotos (mit der Samsung S10 Kamera) der beschallten Folie wurden unter diesen Bedingungen gemacht, um die durch Kavitation entstandenen Löcher hervorzuheben, die weißer erscheinen, während der Rest der Folie etwa dunkler blieb. Dies vereinfachte die spätere Bildverarbeitung durch „Image J“, um dieses Bild in ein Schwarz-Weiß-Bild umzuwandeln. Die Umwandlung zu einem Schwarz-Weiß-Bild erfolgte in einer Reihe von Schritten: Zuerst wird die Software mit Doppelklick geöffnet. Das Bild wird per „Drag und Drop“ in die Software gezogen und der wichtige Teil des Bildes wird dupliziert. Die duplizierte Aufnahme hat eine Fläche von  $24150,4 \text{ mm}^2$ , was dem von Kavitation betroffenen Bereich entspricht. Das Ergebnis wird zu einem 8 Bit grauen Bild gemacht und dann in einem Schwarz-Weiß-Bild letztendlich umgewandelt (siehe Abbildung 3-6). Die Flächen von den Löchern (weiße Flächen) werden mit der Software Anaconda (Python Programm) berechnet und das Verhältnis der Löcher zu der gesamten Folie wird in Prozent dargestellt.

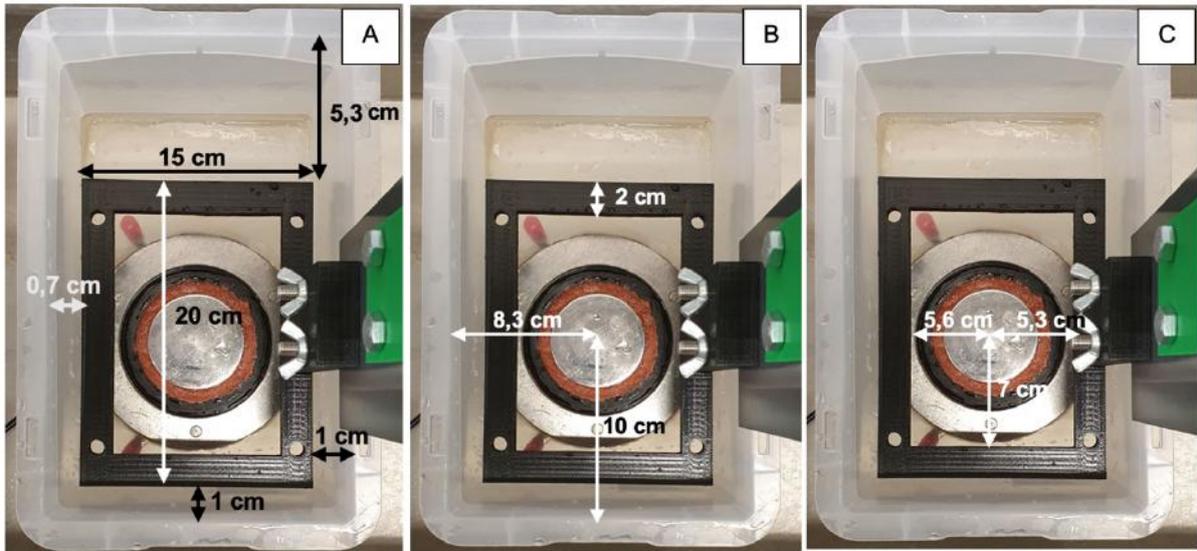


Abbildung 3-11: Dimensionen von der Platzierung der Alufolie mit dem Halter in dem Reaktionsgefäß

Darüber hinaus wird das Muster dieser Löcher analysiert, um zu sehen, wo die Auswirkungen der Kavitation am höchsten sind. Die Idee ist, eine Korrelation zwischen der Kavitationsintensität des Ultraschalls und dem Grad der Zerstörung der Folie herzustellen und auch die Rolle des Abstands zwischen der Folie und der Ultraschallquelle in dieser Hinsicht zu überwachen.

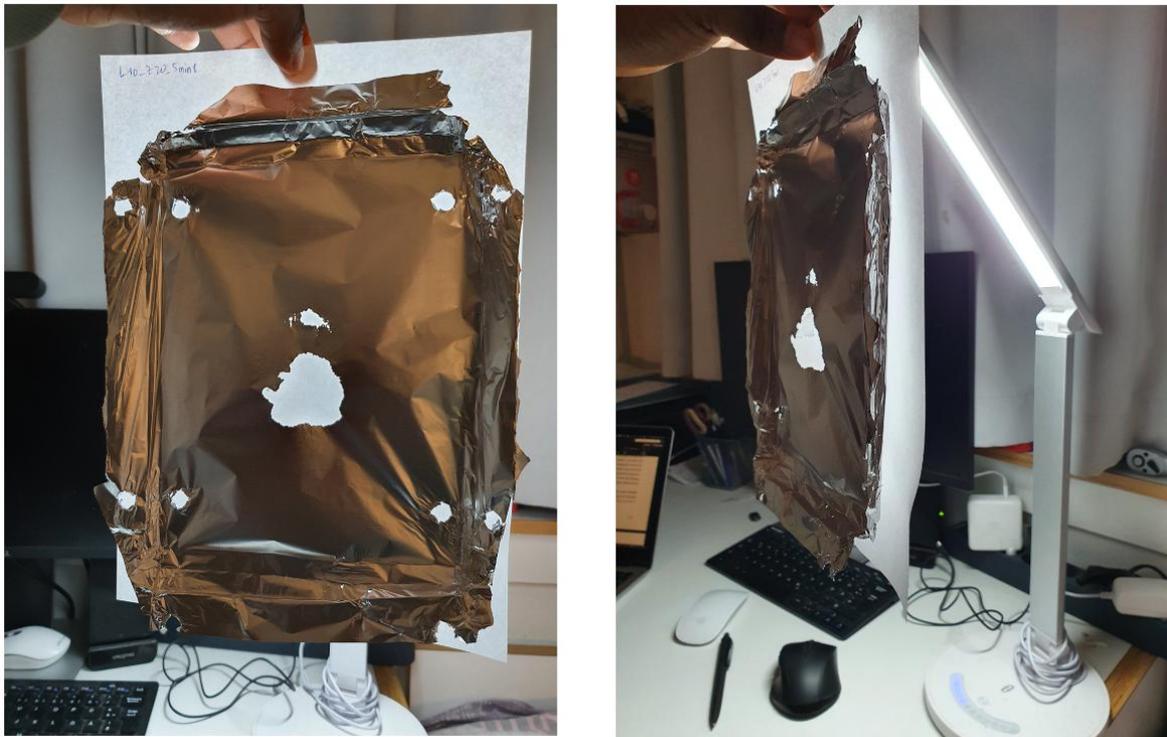


Abbildung 3-12: Foto der Alufolie auf einem von hinten beleuchtet DIN-A4-Blatt. Die Breite der Folie passt zu der Breite des DIN-A4-Blattes. Das linke Bild zeigt die Vorderansicht und das rechte die Seitenansicht.

Es ist zu beachten, dass die Position der Alufolie in Abbildung 3-12 eine 90°-Drehung gegen den Uhrzeigersinn der Folie in Abbildung 3-11 ist. Das bedeutet, dass die Folie nach der Messung abgenommen, gedreht und auf ein weißes Blatt DIN-A4-Papier gelegt wurde, und später fotografiert.

Zur weiteren Nutzung der anderen Kavitationsintensitätsstufen (Level 7 bis 10) des Steuergerätes wurde ein weiterer Versuch durchgeführt. Der Aufbau war bis auf den Abstand zwischen der Aluminiumfolie und der Quelle nahezu identisch. In diesem nächsten Versuch wurde die Alufolie in einem Abstand von 20 mm direkt über der aktiven Membran in Wasser eingesetzt. Das Steuergerät wurde mit ansteigenden Kavitationsintensitätsstufen von 3 bis 10 gestartet und die Zeitspanne zwischen diesem Startzeitpunkt und dem Zeitpunkt, an dem ein Loch auf der Folie erschien, gemessen. Level L1 und L2 wurden nicht berücksichtigt, da kein Effekt auf die Folie entstand. Die Messung wurde mithilfe einer Videoaufnahme mit einem Samsung S10 Smartphone gemacht, sodass es möglich war eine genauere Zeitspanne zu erfassen. Ziel dieses Versuchs war es, zu zeigen, ob eine Erhöhung des Kavitationsintensitätsniveaus die Geschwindigkeit der Auswirkungen der Kavitation erhöht. Weitere Messungen mit Alufolie würde nicht mehr gemacht, da es zu viele Aluminiumpartikel im Wasser gab, was das Resultat der Messungen und die Sauerstoffsättigung des Wassers beeinträchtigt hat. Die Ergebnisse dieser Messungen werden im nächsten Kapitel mithilfe von Bildern ausführlich dargestellt.

Es ist anzumerken, dass es keine erkennbaren Beulen auf der Aluminiumfolie als Folge der Kavitation mit dieser Schallquelle gab. Die einzigen sichtbaren Schäden an den Folien waren die Löcher. Aus diesem Grund mussten hier keine Beulen analysiert werden, wie im Experiment mit der elektrohydraulischen Schockwelle.

### **3.3.3 Messmethode mit der Sonde**

Das Experiment für die Messungen mit dem Sensor wurde ähnlich aufgebaut wie das mit der Aluminiumfolie. Allerdings wurde die Alufolie in diesem Fall durch einen Sensor ersetzt, siehe Label 1 von Abbildung 3-13 unten. Der Sensor wird an einem Voltmeter oder Oszilloskop angeschlossen und auf einem Halter im Wasserbehälter platziert. Die Zeit für die Beschallung und die Kavitationsintensität wird am Steuergerät eingestellt, bevor die Messung gestartet wird. Die Sonde wird mithilfe eines Positionierungssystems in Millimeter Abstände bewegt.

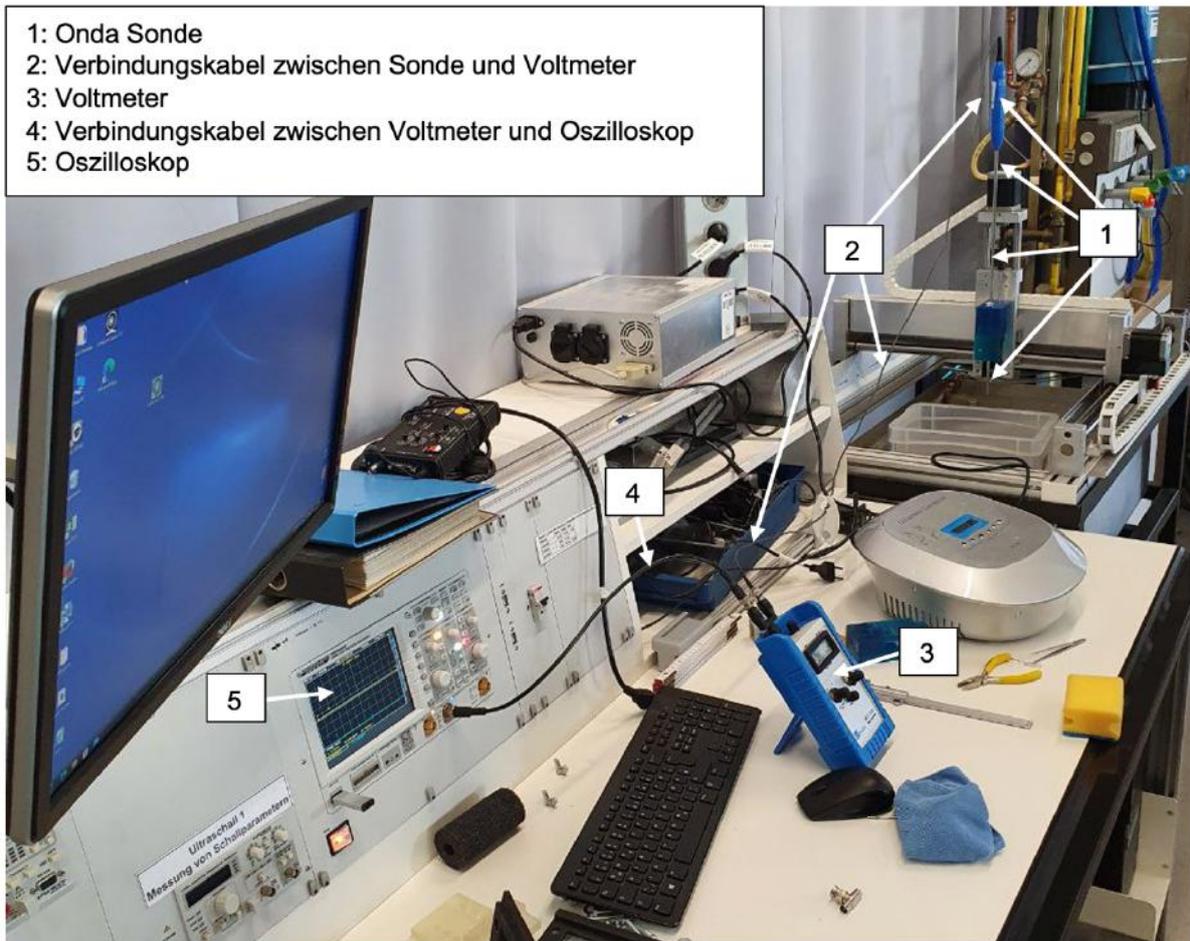


Abbildung 3-13: Aufbau für die Messung mit Sonde Voltmeter und Oszilloskop

Für den ersten Satz von Messungen, die mit dem Sensor durchgeführt wurden, wurde der Sensor im Reaktionsbehälter in einem Abstand von 20 mm vom Zentrum der aktiven Membran platziert (diese Position wurde als Nullstellung betrachtet, X0Y0Z20). Z20 steht für einen vertikalen Abstand von 20 mm und X0Y0 steht für den Ursprung in beiden horizontalen (X- und Y-) Achsen, siehe Abbildung 3-14.

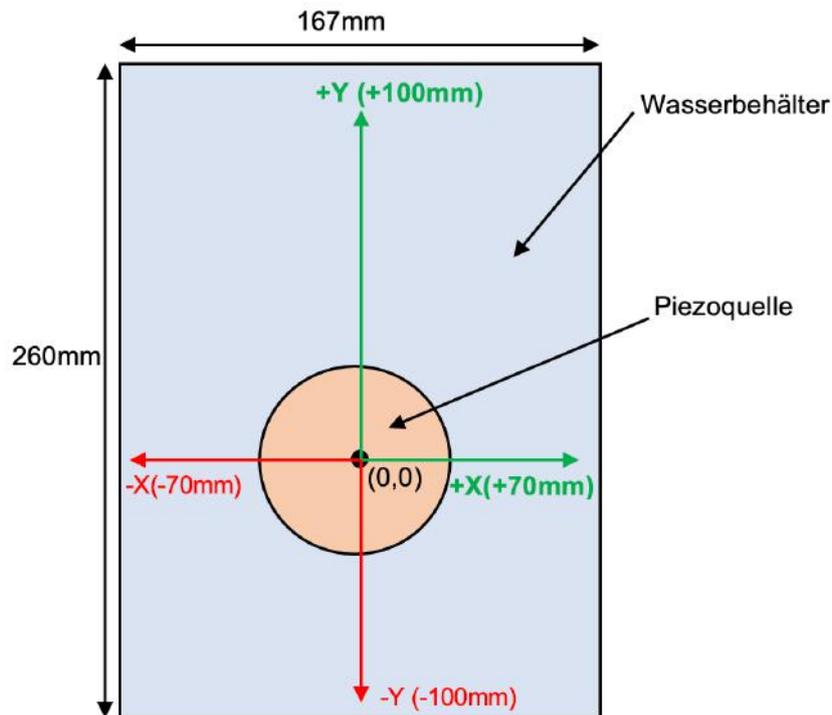


Abbildung 3-14: Skizze des Wasserbehälters und der Piezoquelle. Ansicht ist von oben mit Achsendefinition

Die Kavitationsintensität der Pulse wurde auf Level 2 eingestellt. Die Parameter des Oszilloskops wurden auf eine ADW<sup>6</sup>-Abtastrate von 5 GHz und eine durchschnittliche Erfassungsanzahl von 5 eingestellt (der Durchschnitt von 5 Zählungen wurde automatisch berechnet). Die Signalaufzeichnungslänge dieser Messungen betrug daher 5000 Abtastungen. Das heißt, dass 5000 Abtastungen, fünfmal gemacht wurde, sodass 25000 Abtastungen pro Messposition insgesamt entstanden. Die aus diesem Experiment gewonnenen Daten wurden automatisch als „csv.“-Datei mit einem erkennbaren Namen gespeichert, der zuvor in den Einstellungen des Oszilloskops eingeführt wurde.

Der Name der Datei enthielt:

- Initialen des Benutzers, PM für Penka Mboukoua.
- Ultraschallquelle Abkürzung, Piezo für Piezoquelle.
- Kavitationsintensität der Beschallung (L2 für „Level 2“)
- Position der Sonde (X-5Y0Z20), X-5 für 5mm in X-Richtung, 0mm in Y-Achse und 20 mm in Z-Richtung.
- Datum der Messung (2020-11-30 für 30. November 2020)
- Referenznummer (entweder 1 oder 0)
- Uhrzeit, z.B. 140005 für 14 Uhr, 00 Minuten und 05 Sekunden.

<sup>6</sup> Analog Digital Wandler

- Dateityp („Wfm.csv<sup>7</sup>“ und/oder „csv.“).

Jedes Wort wurde mit einem Unterstrich getrennt. Die gespeicherten Daten erschienen immer paarweise mit fast gleichem Namen, wobei eine als Datentyp „csv.“ und die „Wfm.csv“ hatte. Der Datentyp „wfm.csv.“ enthielt die tatsächlichen Messungen, während der andere Datentyp die Oszilloskopeinstellungen beinhaltete. Ein Beispielpaar Namen für eine Messung ist;

- „PM\_Piezo\_L2\_X-5Y0Z20\_2020-11-30\_0\_142736.Wfm.csv“ und
- „PM\_Piezo\_L2\_X-5Y0Z20\_2020-11-30\_0\_142736.csv“.

Bei den Messungen im Labor wurden folgende Messreihen bei einem Z-Abstand von 20mm und einer Kavitationsintensität von L2 aufgenommen:

- In der X-Achse wurde die Sonde mit einer Schrittweite von 5 mm, von -70 mm Minimum zu +70 mm Maximum bewegt.
- In der Y-Achse wurde die Sonde mit einer Schrittweite von 5 mm, von -100 mm Minimum zu +100 mm Maximum bewegt.

Die gespeicherten Wfm.csv-Dateien wurden dann mit einem MATLAB® Programmcode analysiert [18] um den maximal aufgezeichneten Druck an jeder Position zu ermitteln. Die „wfm.csv“-Daten haben zwei Spalten, wobei die erste Spalte Zeitwerte und die zweite Spalte Spannungswerte enthält, die in entsprechende Druckwerte umgerechnet werden. Die Umrechnung erfolgt im MATLAB-Programm, wobei der Abstand zwischen Sensor und Quelle (20 mm) zusammen mit dem Kalibrierungsfaktor (1) in die Benutzeroberfläche des Programms eingegeben wird. Der Wert 1 wurde als Kalibrierungsfaktor angegeben, da der tatsächliche Faktor in dem Moment von Seite der Hersteller nicht zu Verfügung stand. Dies war jedoch kein großes Problem, da das Hauptziel darin bestand, die Auswirkung der Kavitation in verschiedenen Bereichen innerhalb des Reaktionsgefäßes zu vergleichen. Der wichtige Punkt dabei war, zu wissen, an welcher Position der Druck auf den Sensor als Folge der Kavitation am höchsten war und gegebenenfalls abzuleiten, warum. Die Abbildung 3-15 unten zeigt, wie ein solches Signal von dem Kavitationseffekt mit der Piezoquelle aussieht, wenn mit der Sonde und dem Oszilloskop gemessen wird. Der Plot ist eine Rekonstruktion vom Oszillogramm, welcher mit Excel gemacht wurde. Es zeigt eine sinusförmig schwingende Kurve mit einer signifikanten Spitze, die in beide Richtungen entlang der horizontalen Achse abfällt. Mit der Kenntnis der Abtastrate und Signallänge, war es möglich eine Analyse des Signals zu machen, mithilfe von MATLAB und Excel wie schon beschrieben.

---

<sup>7</sup> Waveform.Comma-separated values

## Spannungskurve bei Piezomessung

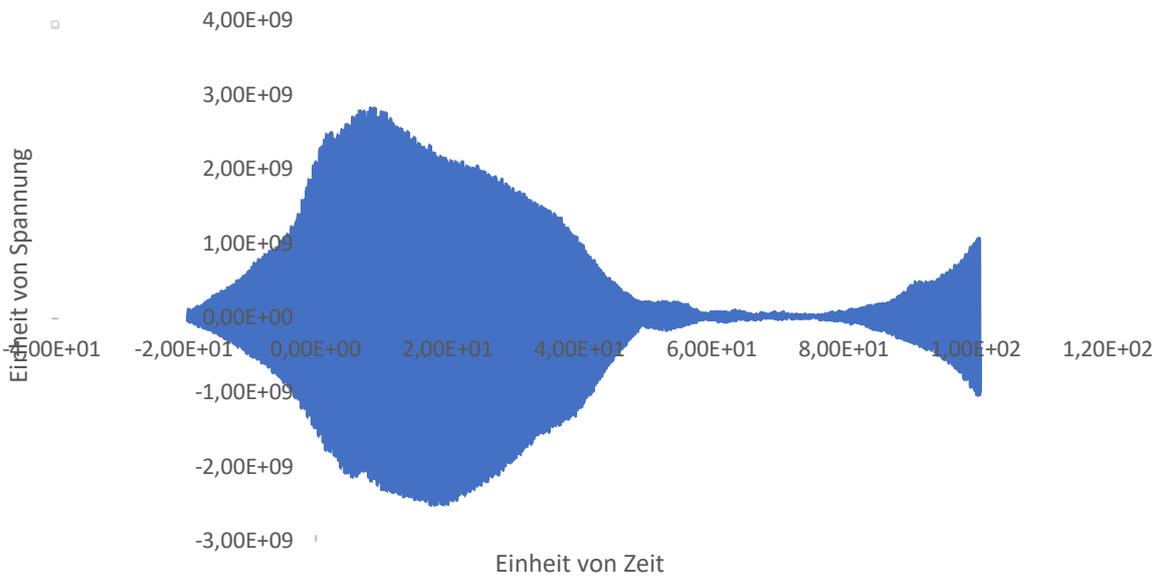


Abbildung 3-15: Spannungskurve ermittelt durch Mittelung von 10 Signalen bei der Kavitationsintensität von L8 an der Position  $X=0\text{ mm}$   $Y=0\text{ mm}$  und  $Z=20\text{ mm}$

Der Aufbau für den zweiten Satz von Messungen wurde genau wie der erste aufgebaut, mit der Ausnahme, dass das Onda-Voltmeter anstelle des „Rohde & Schwarz“ Oszilloskops verwendet wurde. Die Sonde wurde direkt an das Voltmeter angeschlossen. Der angezeigte Spannungswert war der quadratische Mittelwert der abgetasteten Daten. Für den Zweck dieses Experiments wurde 10 s als die für die Berechnung der Effektivspannung erforderliche Zeit festgelegt. Das heißt, dass der dargestellte Wert das Integral der erfassten Datenwerte über diese Zeit geteilt durch diese festgelegte Zeit (10s) entsprach. Die verwendete Messreihe für diese Experiment war identisch mit dem des ersten Satzes von Messungen. Für jede Messposition wurde der Wert von dem Voltmeter-Display in einer EXCEL Tabelle notiert, für weitere Analysen. Die hier erfassten Daten wurden dann mit denen der Messung mit dem Oszilloskop verglichen, um festzustellen, ob es eine Korrelation zwischen den beiden Datensätzen gibt.

Die dritte und letzte Messung in diesem Kapitel wurde fast identisch zum zweiten Experiment aufgebaut, mit dem Unterschied, dass eine höhere Kavitationsintensitätsstufe verwendet wurde, nämlich Level 5 (L5). Weitere Messungen mit dem Oszilloskop wurden aus Zeitmangel und aufgrund der Tatsache, dass es in einem anderen Experiment verwendet wurde, nicht durchgeführt. Dennoch lieferte dieses Experiment interessante Ergebnisse, die im nächsten Kapitel näher erläutert werden.

### 3.4 Elektromagnetische Messung

Die letzte Messung, die im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführt wurde, war die mit der elektromagnetischen Quelle, die von der Firma „Heliro Steuer-und Regelungstechnik GmbH“ hergestellt wurde [18]. Der Steuerschrank wurde aber von der Firma „STS Systemtechnik Electronic GmbH“ hergestellt. Messungen hier wurden ausschließlich mit der Alufolie gemacht, da es keine Zeit gab weitere Messungen mit der Sonde zu organisieren. Im nächsten Unterkapitel wird der genaue Aufbau dieses Experiments näher erläutert.

#### 3.4.1 Messaufbau und Messung

In diesem Experiment wurde das folgende Set von Geräten verwendet:

- Steuerschrank mit Generator von „STS-Systemtechnik Electronic GmbH“.
- Reaktionsgefäße mit Spule und flach, kreisförmige Kupfermembran (aktive Membran), von Fa. „Heliro Steuer-und Regelungstechnik GmbH“ hergestellt.
- Aluminiumfolien Halterung aus Edelstahl auch von dem Fa. STS-Systemtechnik Electronic GmbH
- 12 $\mu$ m Dicke Aluminiumfolie von Lidl
- Sauerstoffmessgerät: „Dissolved Oxygen meter“ DO-100 der Firma Voltcraft.

Zum besseren Verständnis, wie das Experiment aufgebaut war, siehe Abbildung 3-16

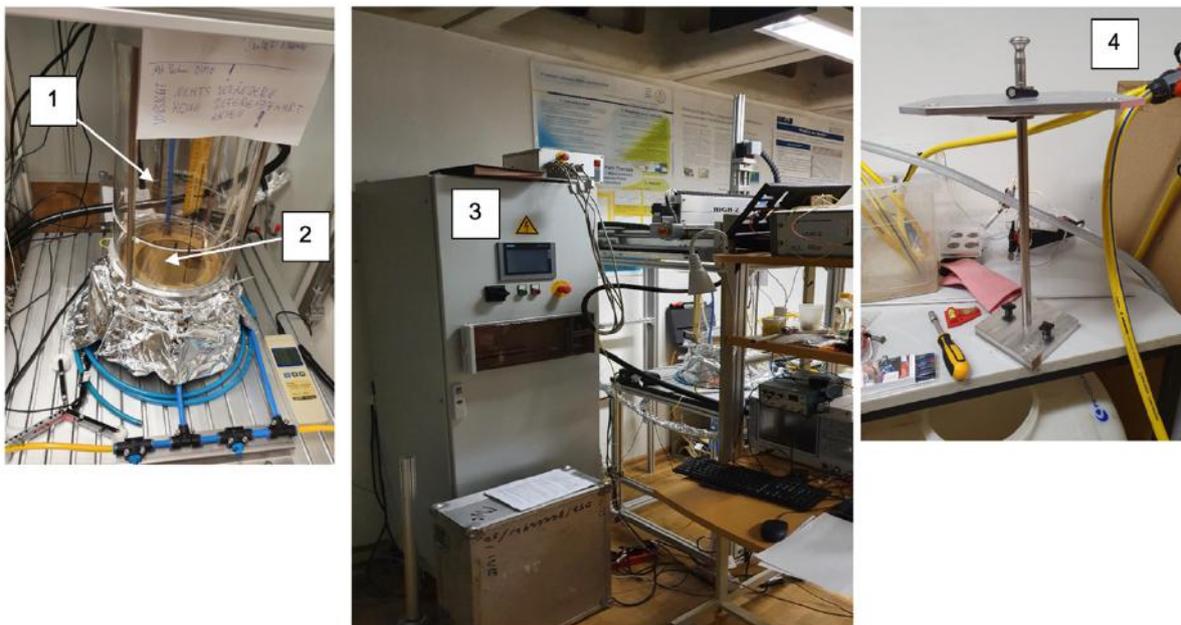


Abbildung 3-16: Messaufbau für die Analyse der Kavitation mit der elektromagnetischen Quelle

Die Etiketten von Abbildung 3-16 stehen für:

1. Reaktionsbehälter
2. Kupfermembran als aktive Membran
3. Steuerschrank mit Generator und Kondensator

4. Alufolienhalter mit Deckel (zum Schließen des Behälters) und Stab, um die Folie nach oben bzw. unten zu bewegen.

Es wurden zwei verschiedene Messreihen mit der Folie durchgeführt, eine mit geschlossenen Platten (siehe Abbildung 3-17) zum Halten der Folie und eine mit offenen Platten (siehe Abbildung 3-18). Die Wahl von zwei Haltertypen ergab sich aus den Unterschieden in den Auswirkungen der Kavitation auf die Folie bei Verwendung beider Halter. Die Auswirkungen werden im nächsten Kapitel näher erläutert. Bei beiden Versuchen wurde die Folie zwischen die Platten gelegt und im Reaktionsbehälter in Wasser eingelegt. Die Tiefe der Folie im Wasser wird eingestellt, indem der Stab des Halters nach oben oder unten geschoben wird. Dies ist möglich, weil die Befestigung des Stocks des Halters am Deckel oben verstellbar ist. Nachdem die Folie in der gewünschten Tiefe (bestimmter Abstand zur Kupfermembran) platziert wurde, werden Parameter wie Frequenz, Spannung und Anzahl der Impulse auf dem Bildschirm der Steuerungsmaschine eingegeben. Anschließend wird das Start-Symbol gedrückt und der Kavitationsprozess beginnt. Um der Reproduzierbarkeit Messungen zu gewährleisten, wurden während des gesamten Prozesses zwei Abstände, 100 und 200 mm berücksichtigt, vor allem weil unser Projektpartner von der Hochschule Anhalt dieselben Abstände verwendet hat.

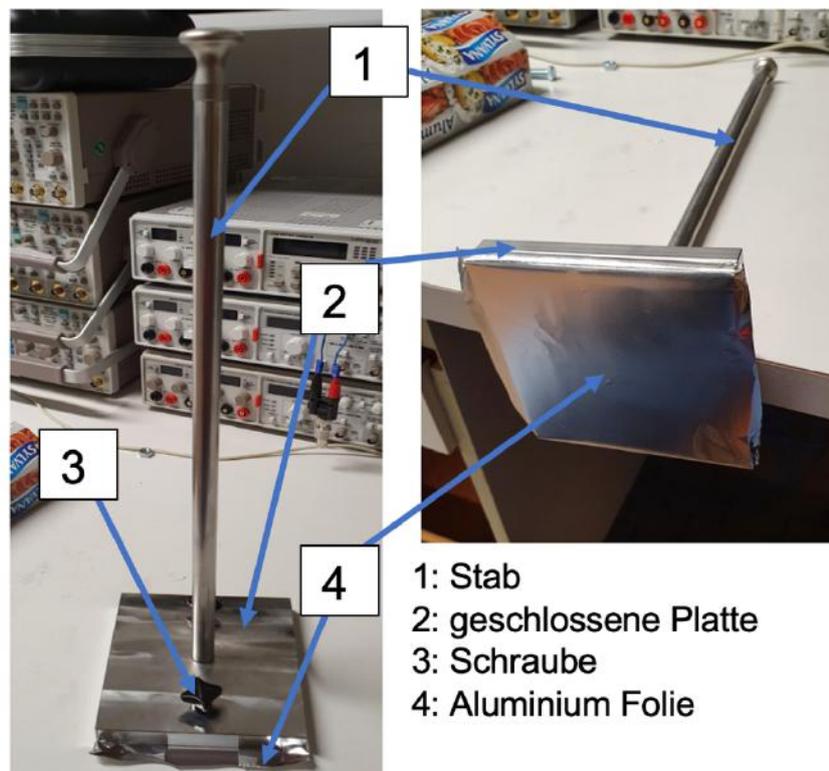


Abbildung 3-17: Halter für Aluminiumfolie mit geschlossenen Platten und eine Alufolie welche daran befestigt wird

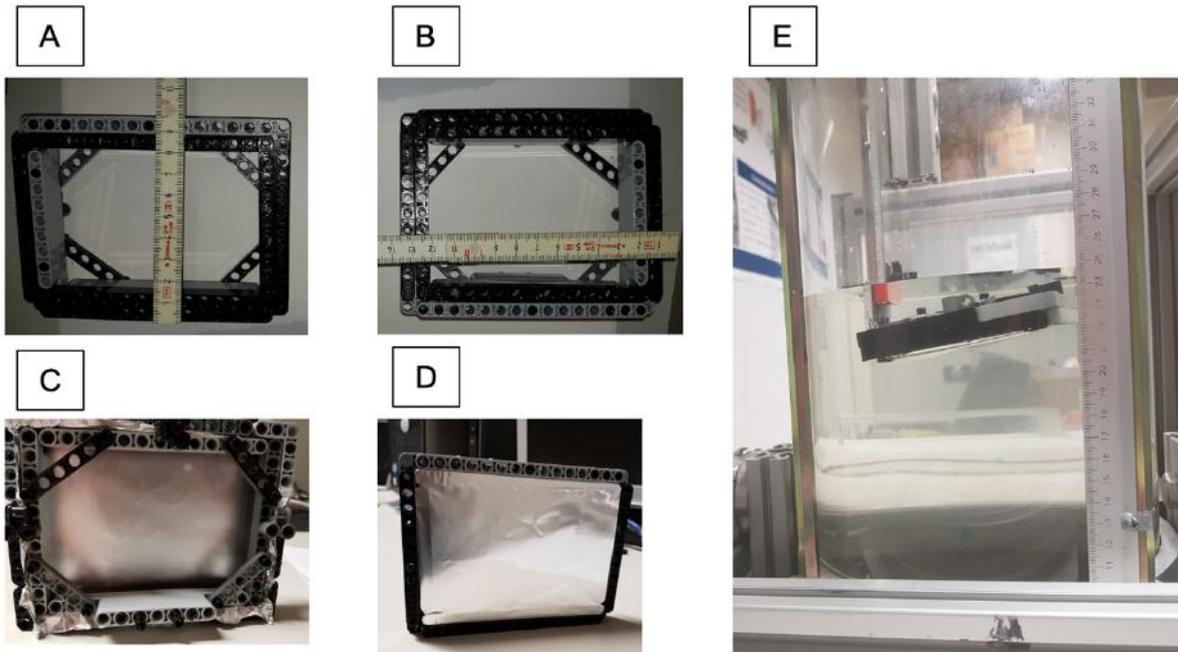


Abbildung 3-18: Offene Halter für Alufolie aus Lego. **A** ist der Halter mit der Dimension der Breite **B** zeigt den Halter mit der Dimension der Länge. **C** zeigt der Sicht der Halter mit der Folie von oben und **D** der Sicht von unten. **E** zeigt den Halter mit Alufolie in mit Wasser gefüllte Reaktionsgefäß.

Die Einstellung von Abstand, Spannung, Frequenz und Anzahl der Impulse für die Messungen mit geschlossenen Platten war wie folgt:

- Eine Folie in einer Entfernung von 100 mm mit 500 Impulsen bei einer Frequenz von 1 Hz und eine Spannung von 15 kV behandelt.
- Eine andere in einer Entfernung von 100 mm mit 3000 Impulsen bei einer Frequenz von 2 Hz und eine Spannung von 15 kV behandelt.
- Die letzte Folie in einer Entfernung von 200 mm mit 500 Impulsen bei einer Frequenz von 1 Hz und eine Spannung von 15 kV behandelt.

Die Einstellungen in dem Fall mit offenen Platten waren:

- Erste Folie in einer Entfernung von 100 mm mit 1500 Impulsen bei einer Frequenz von 1 Hz und einer Spannung von 15 kV behandelt.
- Letzte Folie in einer Entfernung von 100 mm mit 2000 Impulsen bei einer Frequenz von 1 Hz und einer Spannung von 15 kV behandelt.

Auch hier sind die Messungen nicht alle vergleichbar, da nicht für jeden Test eine Wiederholung durchgeführt wurde. Das Hauptproblem war hier die Zeit, die wie bereits erwähnt nicht zur Verfügung stand. Dennoch gaben die erzielten Ergebnisse eine gute Vorstellung vom Wirkungsbereich der Kavitationen, die durch die Schusswirkung der aktiven Membran erzeugt werden.

Nach der Beschallung wurden die Objekträger auf ein DIN A4-Blatt gelegt und wie bei den Messungen mit der elektrohydraulischen und piezoelektrischen Quelle mit einem Samsung S10-Handy fotografiert. Das Bild wird dann mit Image J und einem Python-Programm analysiert. Das Ergebnis dieser Analyse wird im nächsten Kapitel gezeigt.

## 4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aller in **Kapitel 3** durchgeführten Versuche vorgestellt, beginnend mit der elektrohydraulischen Ultraschallquelle bis hin zur elektromagnetischen Quelle.

### 4.1 Elektrohydraulische Quelle

Die Messung der Primärwelle in diesem Fall mit den zwei Sonden (mit Seriennummer 1910 und 1914) haben folgende Ergebnis in Abbildung 4-1 gegeben.

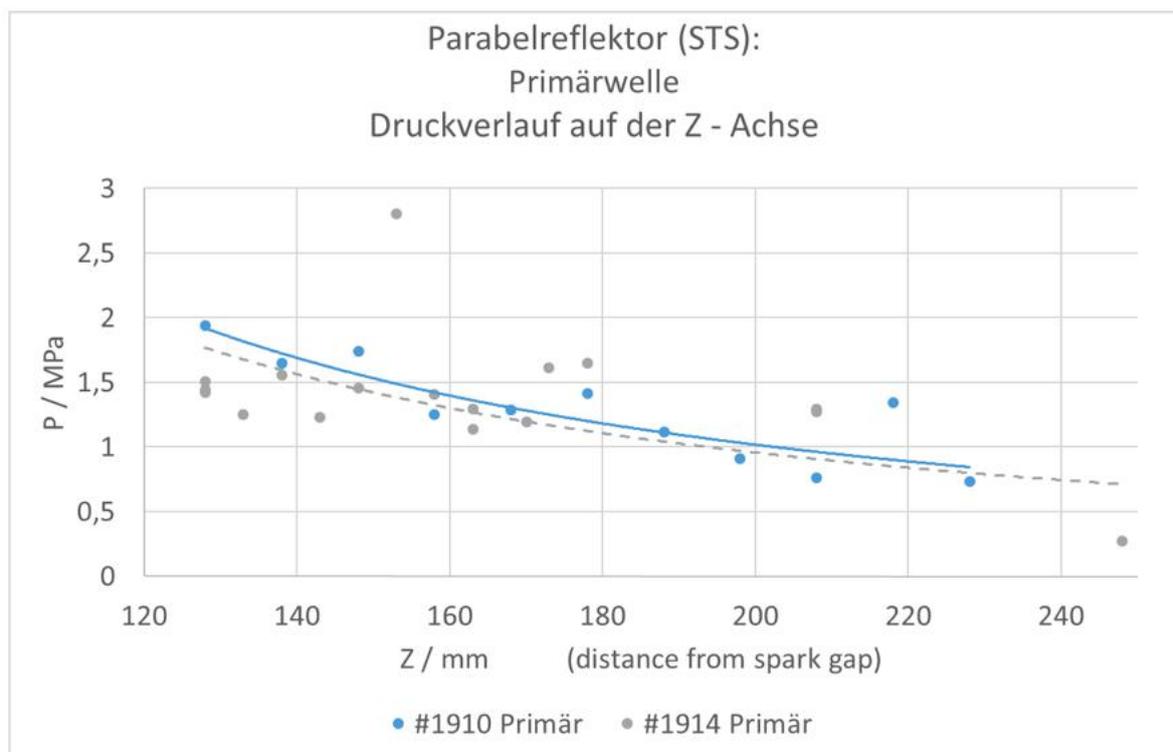


Abbildung 4-1: Druckmessung von der Kavitation mit der Sonden mit der Seriennummer (S/N)1910 und 1914

Die obige Abbildung zeigt einen allgemeinen Abfall der Druckwerte mit der Entfernung der beiden Sonde von der Funkenstrecke (Spalte zwischen den zwei Elektroden). Die Punkte (Blau und Grau) stellen den tatsächlichen Druck an der jeweiligen Position der Sensoren dar. Die kontinuierlichen (für #1910) und diskontinuierlichen (#1914) Linien stellen die Anpassungskurven der Punkte dar. Der Sensor 1910 weist jedoch bessere Ergebnisse auf als der Sensor 1914 mit weniger sporadischer Streuung der Punkte.

Beim nächsten Experiment wurde anstelle der Sonden Alufolien verwendet. Die Fläche der Folien pro Messungen betrug  $7350 \text{ mm}^2$  ( $105 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ ). Messungen mit der Aluminiumfolie erzeugte Dellen auf jeder der verwendeten Folien, die in Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3 unten zu sehen sind. Die Löcher hier sind aufgrund der Lichtreflexion beim

Tageslicht unsichtbar. Dazu mussten die Bilder, wie in der Methode beschrieben, in Schwarz-Weiß-Bilder umgewandelt werden. Darüber hinaus wurde die Folien nach Beschallung auf einem DIN A4-Blatt in einem dunklen Raum geklebt, mit einer kleinen Lichtquelle hinter dem Blatt und von der anderen Seite fotografiert. Die neuen gewonnenen Bilder zeigten die in Abbildung 4-4 dargestellten Ergebnissen.

Die Nomenklatur der Bilder gibt Informationen über die Einstellung des Steuerschranks. Als Beispiel sei hier die Abbildung 4-2A mit der Bezeichnung 24kV\_200i\_Z128\_1Hz genannt, wobei jeder Parameter durch einen Unterstrich getrennt ist. Der erste Parameter ist die Spannung, gefolgt von der Anzahl der Impulse ( $200i = 200 \text{ Impulse}$ ), dann der Abstand ( $Z128 = 128 \text{ mm}$ ) in mm der Folie von der aktiven Membran und schließlich die Frequenz der Impulse.



Abbildung 4-2: Bilder der Alufolie nach Beschallung mit der Stoßwelle mit einer Spannung von 24kV und 200 Impulsen: Bild A zeigt das Ergebnis der Messung bei einer Entfernung von 128 mm und einer Frequenz von 1 Hz. Bild B präsentiert das Resultat bei einer Entfernung von 228 mm und einer Frequenz von 4 Hz.

Die Fläche des Quadrats auf den Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3, auf denen die Unebenheiten gezählt werden, ist auf allen Folien gleich mit einem Wert von  $169\text{mm}^2$ . Die einzelnen Quadrate werden wie folgt abgekürzt;

- der oben links mit „OL“
- der oben in der Mitte mit „OM“
- der oben recht ist „OR“
- der unten links ist „UL“
- der unten in der Mitte ist „UM“
- der unten recht wird mit „UR“ abgekürzt

- der letzte, welche da liegt, wo die meisten Dellen sind, wird als „S“ bezeichnet

Die Auszählung der Beulen in Abbildung 4-2A hat folgende Ergebnisse gegeben:

OL = 60      OM = 26      OR = 16  
 UL = 70      UM = 67      UR = 58  
 S = 110

Der Durchschnitt der Beulenzahl pro  $169\text{mm}^2$  hier ist dann ca. 58,14, was bedeutet, dass die Anzahl der Beulen auf der gesamten Folienoberfläche ungefähr 2529 beträgt.

Die Auszählung der Beulen in Abbildung 4-2B hat folgende Ergebnisse gegeben:

OL = 23      OM = 41      OR = 10  
 UL = 68      UM = 45      UR = 22  
 S = 102

Das heißt, dass der Durchschnitt der Beulenzahl pro  $169\text{mm}^2$  ca. 44,42 beträgt, daraus folgt, dass die Anzahl der Beulen auf der gesamten Folienoberfläche etwa 1932 ist.

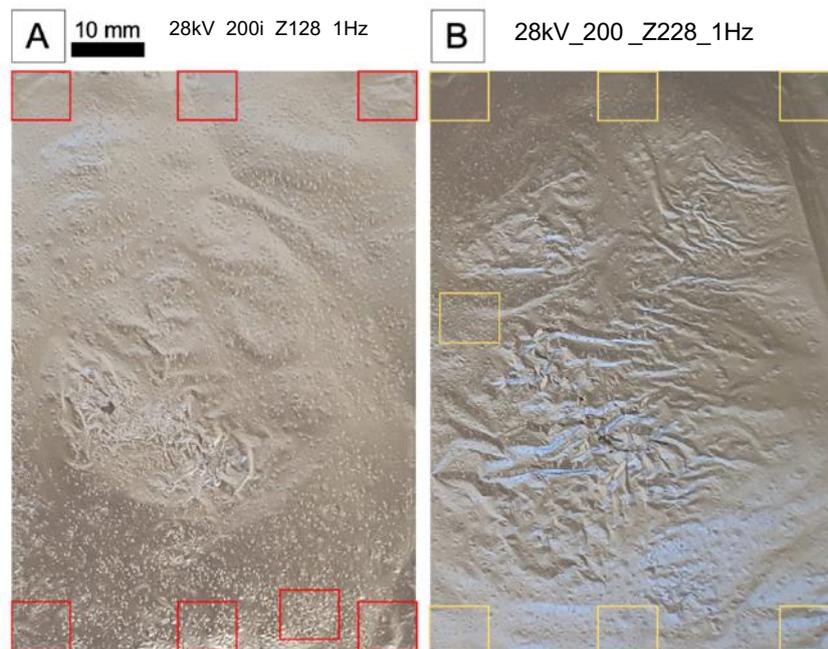


Abbildung 4-3: Bilder der Alufolie nach Beschallung mit der Stoßwelle mit einer Spannung von 28 kV Frequenz von 1 Hz und mit 200 Impulsen: Bild A ist bei einer Entfernung von 128 mm. Bild B ist bei einer Entfernung von 228 mm und einer Frequenz von 1 Hz.

Die Auszählung der Dellen in Abbildung 4-3A ergab folgende Ergebnisse:

OL = 27      OM = 35      OR = 30  
 UL = 67      UM = 90      UR = 56  
 S = 110

Der Durchschnitt der Beulenzahl pro  $169\text{mm}^2$  hier ist dann ca. 59,28, was bedeutet, dass die Anzahl der Beulen auf der gesamten Folienoberfläche ungefähr 2578 beträgt.

Die Zählung der Beulen in Abbildung 4-3B hat folgende Ergebnisse gegeben:

OL = 11      OM = 41      OR = 2  
 UL = 50      UM = 54      UR = 30  
 S = 125

Das heißt, dass der Durchschnitt der Beulenzahl pro  $169\text{mm}^2$  ca. 44,71 beträgt, daraus folgt, dass die Anzahl der Beulen auf der gesamten Folienoberfläche etwa 1944 ist.

Eine weitere Darstellung der Beulen, die auf den 4 Folien gezählt wurden, kann in der folgenden Tabelle zusammengefasst werden.

*Tabelle 2: Die durchschnittliche Anzahl der Beulen auf den 4 Folien*

	24kV_200i_Z128_1Hz	24kV_200i_Z228_4Hz
Oben links (OL)	60	23
Oben mittig (OM)	26	41
Oben recht (OR)	16	10
Unten links (UL)	70	68
Unten mittig (UM)	67	45
Unten recht (UR)	58	22
S	110	102
Beulenzahl/ $169\text{mm}^2$	58,14	44,42
Total Beulenzahl	2529	1932
	28kV_200i_Z128_1Hz	28kV_200i_Z228_1Hz
Oben links (OL)	27	11
Oben mittig (OM)	35	41
Oben recht (OR)	30	2
Unten links (UL)	67	50
Unten mittig (UM)	90	54
Unten recht (UR)	56	30
S	110	125
Beulenzahl/ $169\text{mm}^2$	59,28	44,71
Total Beulenzahl	2578	1944

Die Folie mit der meisten Beulen ist die von Abbildung 4-3A bei einer Spannung von  $28\text{kV}$ , eine Entfernung von  $128\text{mm}$  und eine Frequenz von  $1\text{Hz}$ . Die kleinste Anzahl an Beulen ist in Abbildung 4-2B zu finden, wo die Spannung bei  $24\text{kV}$  liegt mit einer Frequenz von  $4\text{Hz}$ . Dort steht die Folie an einem Abstand von  $228\text{mm}$ . Trotz der Unterschiede in der Menge der

Beulen als Folge der Kavitation sind sie einigermaßen gleichmäßig um die einzelnen Folien verteilt.

Die in der Dunkelkammer aufgenommenen Bilder der Folien wurden mit der Software Image J bearbeitet, um Schwarz-Weiß-Bilder zu erhalten, die in Abbildung 4-5 zu sehen sind. Die Beschriftung dieses Bildes ist fast identisch mit der von Abbildung 4-4, mit dem einzigen Unterschied, dass eine Skala hinzugefügt wurde. Nachdem die durch Kavitation entstandenen Löcher nun sichtbar waren, wurden sie im nächsten Schritt mit einem Python-Programm (Anaconda) analysiert, um darzustellen, wie groß die Löcher im Verhältnis zur gesamten Folie waren. Die folgende Tabelle (Tabelle 3) fasst das Ergebnis dieser Analyse zusammen.

*Tabelle 3: Ergebnis der erzeugten Löcher auf der Aluminiumfolie nach Beschallung mit der elektrohydraulischen Quelle*

N#	Messung	Total Fläche [Pi]	Total Fläche [mm <sup>2</sup> ]	Löcher Fläche [Pi]	Löcher Fläche [mm <sup>2</sup> ]	Prozent Löcher [%]
1	STS.24kV_Z128_1Hz	1248048	7350	1305	7,923	0,105
2	STS.24kV_Z228_4Hz	1248048	7350	0	0,000	0,000
3	STS.28kV_Z128_1Hz	1248048	7350	7013	42,581	0,562
4	STS.28kV_Z228_1Hz	1248048	7350	159	0,965	0,013

Erwartungsgemäß wurde die größte Fläche an Löchern bei der höchsten Spannungsamplitude (28 kV) erzeugt, bei der der Abstand zwischen der Folie und der aktiven Membran am kleinsten war (Z128 für 128 mm). Die Frequenz der Beschallung betrug 1 Hz und die Fläche der Löcher 42,581 mm<sup>2</sup>. Ebenso wurde die kleinste Fläche an Löchern (0 mm<sup>2</sup>) bei der kleineren Spannung von 24kV durch eine höhere Beschallungsfrequenz von 4Hz erzeugt. Außerdem war der Abstand zwischen der Folie und die Elektroden größer mit einem Wert von 228 mm.

24kV\_200i\_Z128\_1Hz



24kV\_200i\_Z228\_4Hz



28kV\_200i\_Z128\_1Hz



28kV\_200i\_Z228\_1Hz



Abbildung 4-4: Bild der Alufolien jeweils auf einem Blatt Papier in einem dunklen Raum mit einer kleinen Lichtquelle hinter dem Papier.

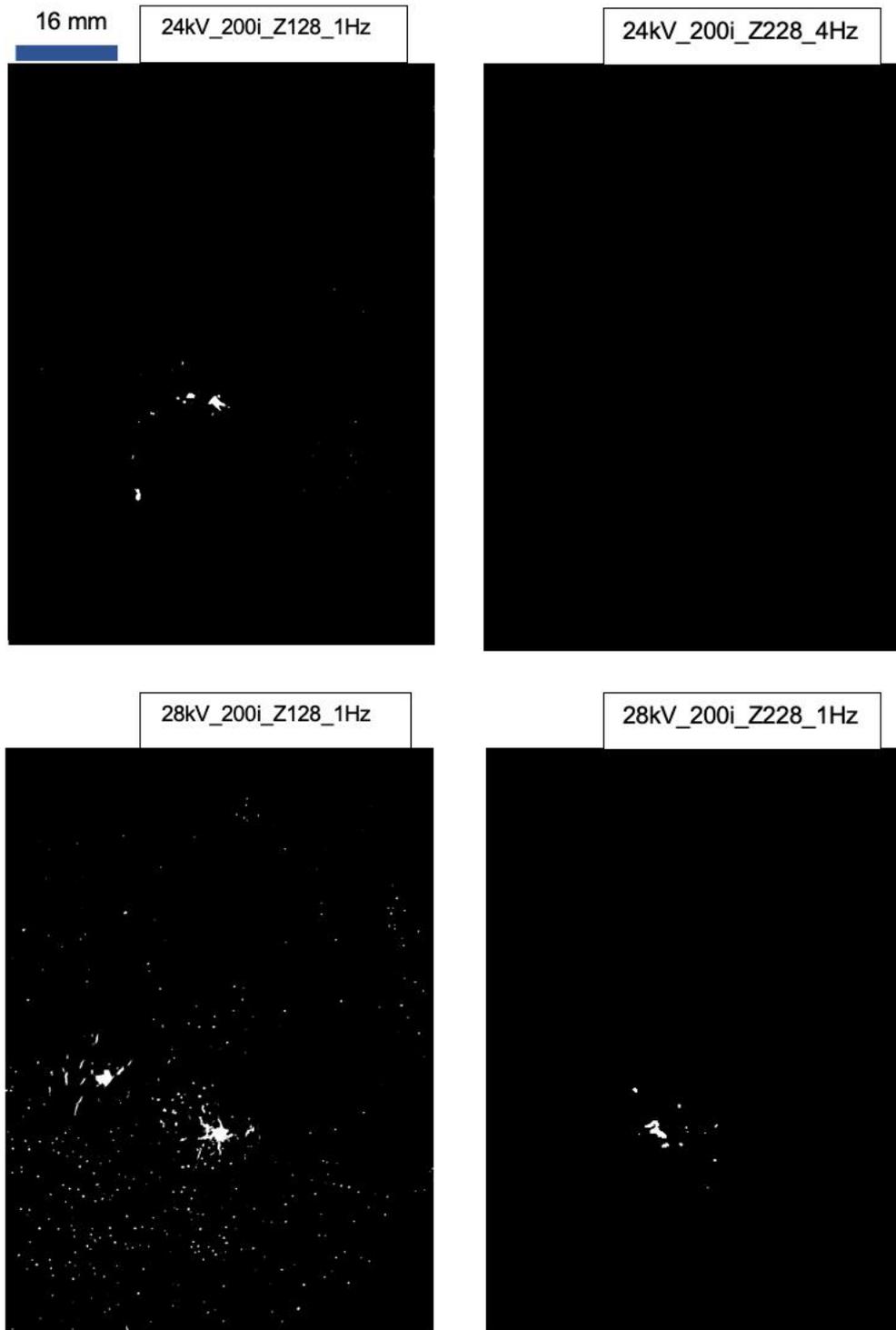


Abbildung 4-5: Schwarz-Weiß-Bilder der Alufolie unter Behandlung mit elektrohydraulischer Quelle

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Analyse der Löcher auf den Folien ist deren Lage und Anordnung auf der Gesamtfläche. Aus der obigen Abbildung 4-5 ist ersichtlich, dass sich die Löcher meist um das Wirkungszentrum der Ultraschallquelle befinden, das ungefähr in der Mitte der Folie selbst liegt. Das Ausbreitungsmuster der Löcher auf die Folien ist jedoch nach unten gerichtet, wenn man auf die Folie in Abbildung 4-5 schaut.

Als Zusammenfassung dieses Kapitels gilt: Je höher die Spannung an der Steuermaschine ist, desto höher sind die Kavitationseffekte, die wiederum mehr Beulen und Löcher auf der Folie erzeugen. Das Gleiche gilt, je näher die Folie an der Elektrodenapertur ist.

## **4.2 Piezoelektrische Quelle**

Die Messungen mit der piezoelektrischen Quelle waren umfangreicher als die mit der elektrohydraulischen Quelle, da Erfahrungen über den Aufbau des gesamten Experiments gesammelt werden konnten. Diese Erfahrung half, die Messungen mit der Piezoquelle besser zu gestalten, um detailliertere Ergebnisse zu erhalten. Die Ergebnisse der Messungen mit der Aluminiumfolie und der Sonde werden im Folgenden beschrieben.

### **4.2.1 Messung mit Alufolie**

Die Ergebnisse der Messungen mit der Aluminiumfolie wurden in verschiedene Teile aufgeteilt. Ein Teil beschrieb den Grad der Zerstörung der Folie und der andere Teil zeigte das Muster der Zerstörung der Folie als Folge der Erhöhung der Kavitationsintensität der Schallwelle. Eine gute Darstellung des Zerstörungsgrades der Folie ist in den folgenden Bildern zu sehen (Abbildung 4-6 und Abbildung 4-7). Diese beiden Abbildungen zeigen Realaufnahmen der Folien nach der Behandlung mit der Piezoquelle in Wasser bei verschiedenen Kavitationsintensitäten. Einige Folien wurden 20 mm von der aktiven Membran entfernt platziert, während andere 30 mm entfernt waren, um den Einfluss des Abstands auf die Auswirkungen der Kavitation zu zeigen. Größere Abstände wie 200 mm oder mehr als bei der elektrohydraulischen und elektromagnetischen Messung (mit größeren Reaktionsgefäßen) konnten nicht berücksichtigt werden, da das Messgefäß hier kleiner war. Es ist zu beachten, dass nicht alle gemessenen Pegel der Kavitationsintensitäten in diesem Real-Life-Bild dargestellt sind. Stattdessen sind sie in den Abbildung 4-8, Abbildung 4-9 und Abbildung 4-10 zu sehen, da die früher aufgenommenen Bilder direkt in Schwarz-Weiß-Bilder umgewandelt und analysiert wurden. Erst nach dieser Analyse kam die Idee, noch einmal Real-Life-Bilder zu machen, um den Kontrast zwischen den beiden zu zeigen, aber einige Folien waren bereits beschädigt, daher das Fehlen von Bildern mit Pegeln unterhalb von L6 in Abbildung 4-6 und L5 in Abbildung 4-7. Trotz dieser Mängel ist der Vergleich zwischen realen Bildern und ihren Schwarz-Weiß-Paaren (Bilder mit demselben Namen) immer noch deutlich zu erkennen. Sie können aufgrund der Ähnlichkeiten in ihren einzigartigen Mustern leicht miteinander abgeglichen werden. Die Umwandlung in Schwarz-Weiß-Bilder, wie bereits bei der elektrohydraulischen Quelle erwähnt, soll die Sichtbarkeit von Löchern erhöhen, die unter normalen Beleuchtungsbedingungen möglicherweise nicht zu erkennen sind.

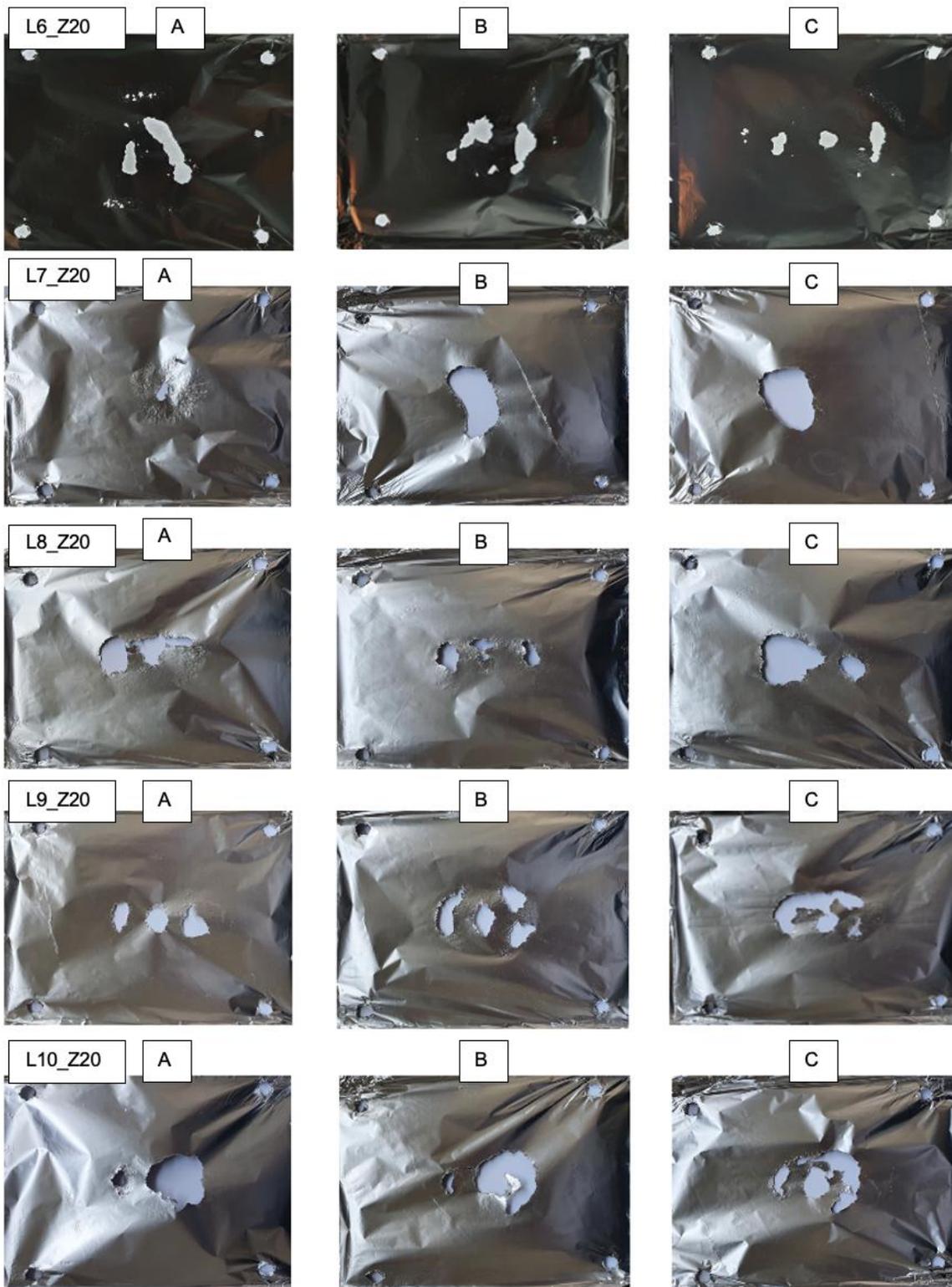


Abbildung 4-6: Echtzeitbilder von Messungen mit der Alufolie bei Kavitationsintensitäten von L6 bis L10 an einem Abstand von 20 mm (bezeichnet als Z20) von aktiver Membran. Bei jeder Kavitationsintensität wurde drei Messungen gemacht und mit Labeln A B und C gekennzeichnet.

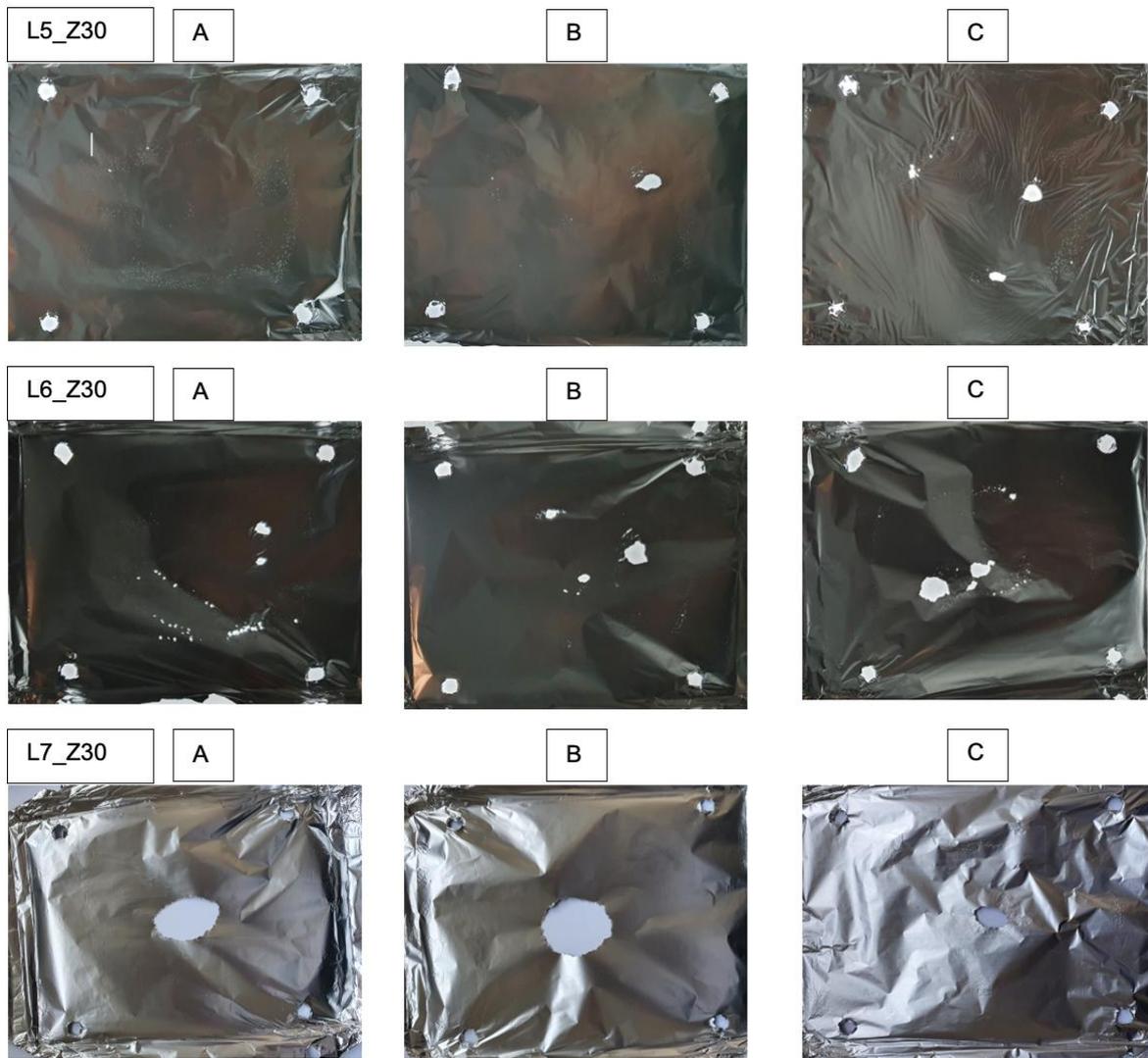


Abbildung 4-7: Echtzeitbilder von Messungen mit der Alufolie bei Kavitationsintensitäten von L5 bis L7 an einem Abstand von 30 mm (bezeichnet als Z30) von aktiver Membran. Bei jeder Kavitationsintensität wurden drei Messungen gemacht und mit Labeln A B und C gekennzeichnet.

Die nächste Reihe von Ergebnissen beschreibt das Muster der Bildung von Löchern als Reaktion auf die Erhöhung der Kavitationsintensität der Ultraschallwelle. Die Bilder aus Abbildung 4-8 und Abbildung 4-9 zeigen die von der Piezoquelle erzeugten Löcher, sobald die Alufolie in einem Abstand von 20 mm von der aktiven Membran in Wasser platziert wurde. In Abbildung 4-10 war die Entfernung zwischen der Alufolie und aktiven Membran 30 mm. Die Alufolie blieb jeweils 5 Minuten lang unter Beschallung und die Kavitationsintensität wurde nach jeder Messung erhöht. Jede Messung wurde 3-mal durchgeführt, um die Reproduzierbarkeit des Experiments zu gewährleisten.

Die Bilder in diesen drei Abbildungen sind in drei Spalten angeordnet, wobei jede Zeile die drei Ergebnisse zeigt, die bei jeder Kavitationsintensitätsstufe erzielt wurden. Die

Kavitationsintensitätsstufe der Piezoquelle und die Tiefe der Folie sind auf dem Bild links dargestellt. In das Bild links oben (Abbildung 4-8) in der ersten Reihe befindet sich beispielsweise die Bezeichnung L3\_Z20 mit einem weißen Balken unterhalb und 30 mm darunter. Die Abkürzung „L3“ steht für Level 3 und „Z20“ für 20 mm von der aktiven Membran entfernt. Der 30-mm-Balken ist der Maßstab des Bildes. Beim Abwärtsgehen in jeder Spalte der drei Abbildungen ist zu sehen, dass die Kavitationsintensitätsstufe ansteigt, aber nicht alle Stufen sind dargestellt. Die Ergebnisse der unteren Stufen (L1 und L2 in Abbildung 4-8 und Abbildung 4-9 sowie L1 bis L3 in Abbildung 4-10) sind nicht dargestellt, da keine Auswirkungen beobachtet wurden, und die höheren Stufen (L8 bis L10 in Abbildung 4-10) wurden nicht dargestellt, weil sie fehlerhaft waren (Gründe in Kapitel 3.3.2 erläutert). Der Großbuchstabe „A“ repräsentiert den ersten Versuch, gefolgt von „B“ und „C“. Die anderen weißen Bereiche stellen die Löcher dar, die während des Experiments entstanden sind, deren Fläche und Muster genauer untersucht werden. Denn diese Untersuchung gibt Aufschluss über die Auswirkungen der von dieser piezoelektrischen Quelle ausgehenden Kavitation auf die Folie.

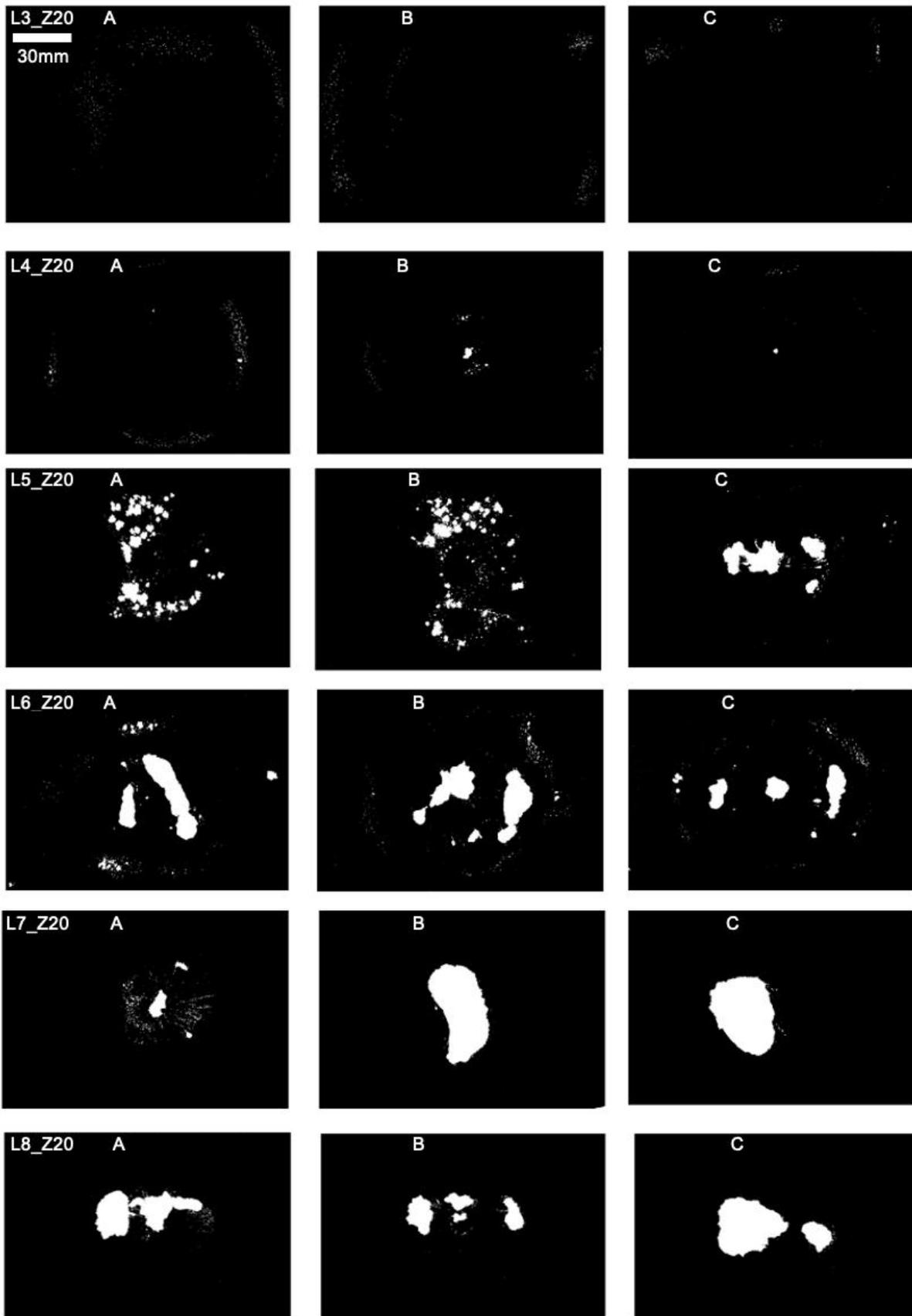


Abbildung 4-8: Darstellung von Löchern auf Alufolie in einer Entfernung von 20mm mit steigenden Kavitationsintensitäten von Level 3 bis Level 8. Erläuterung siehe Text.

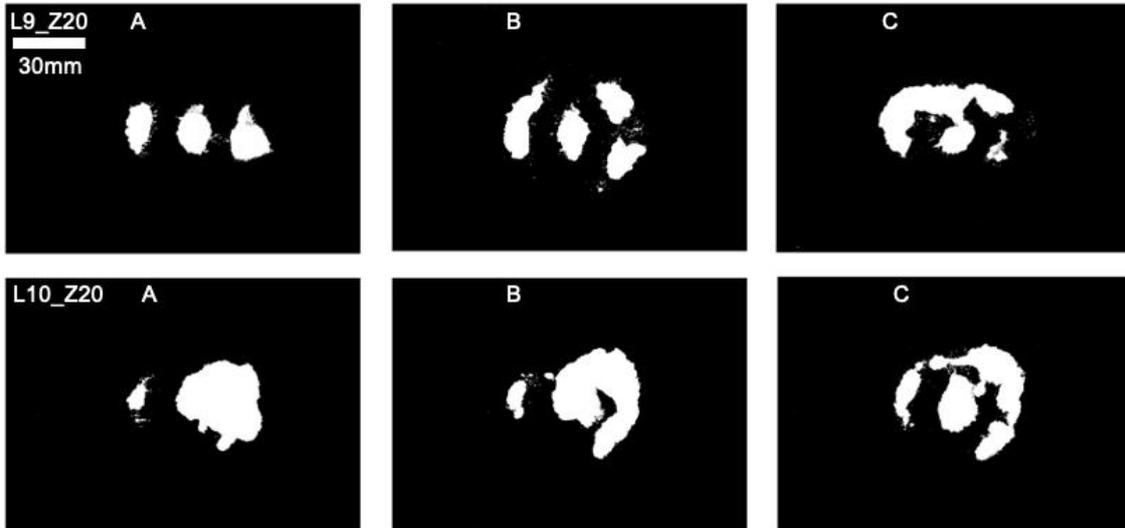


Abbildung 4-9: Darstellung von Löchern auf Alufolie in einer Entfernung von 20mm mit steigenden Kavitationsintensitäten von Level 9 bis 10.

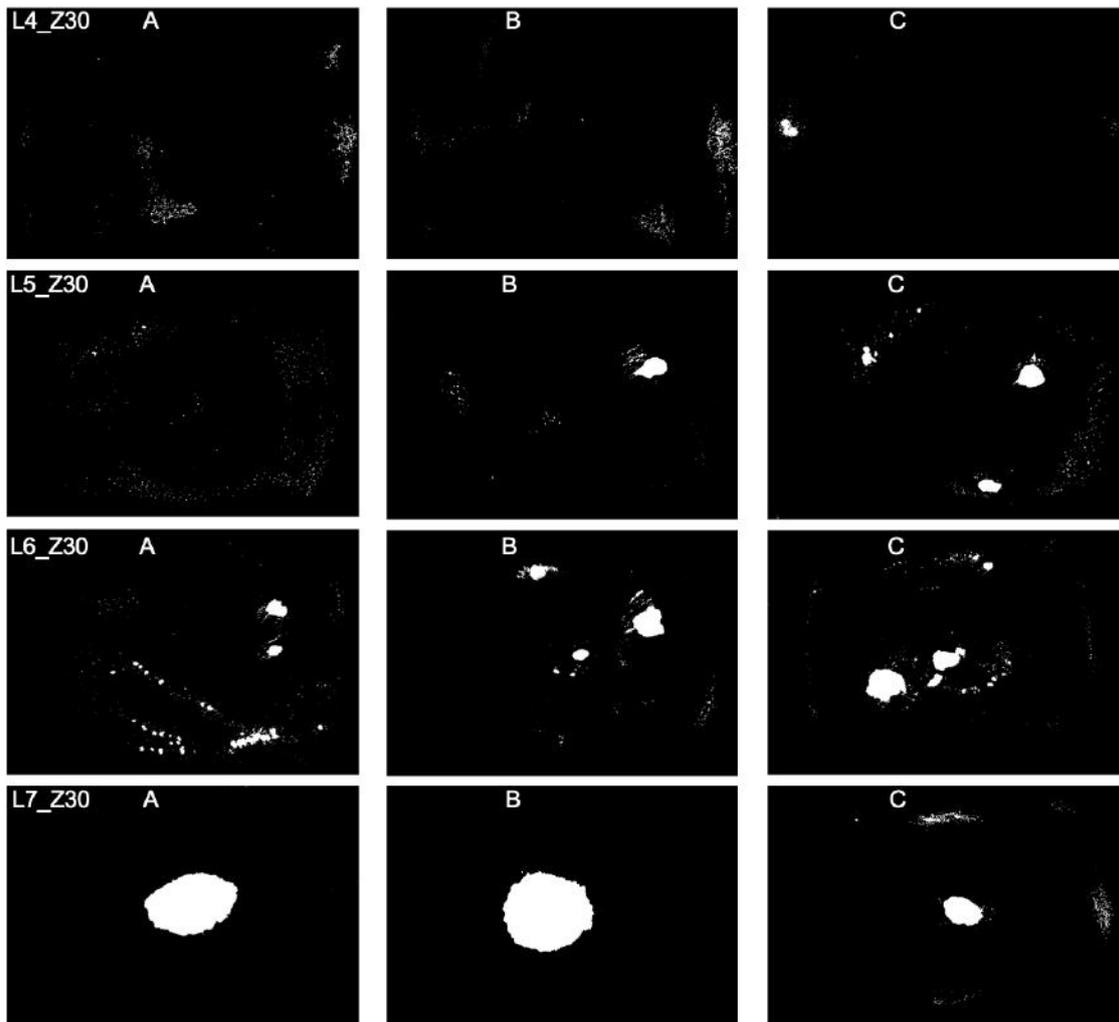


Abbildung 4-10: Darstellung von Löchern auf Alufolie in einer Entfernung von 30mm mit steigenden Kavitationsintensitäten von Level 4 bis 7

Die weißen Bereiche, die die Löcher darstellen, wurden berechnet und das Verhältnis zwischen diesen Löchern und der gesamten Folie für jede Messung wurde aufgezeichnet, siehe Abbildung 4-11 und Abbildung 4-12.

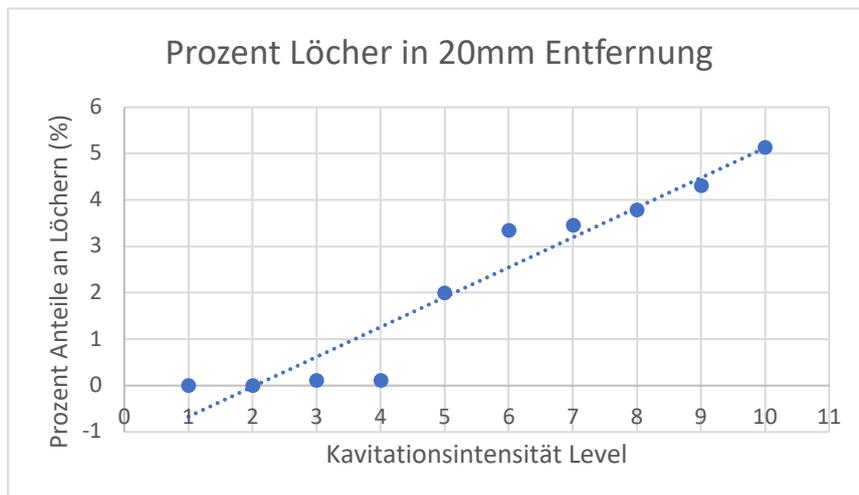


Abbildung 4-11: Diagramm von Kavitationsintensität der Schallwellen gegen den Prozentual Löcheranteil auf der Alufolie in 20mm Abstand von der Schallquelle

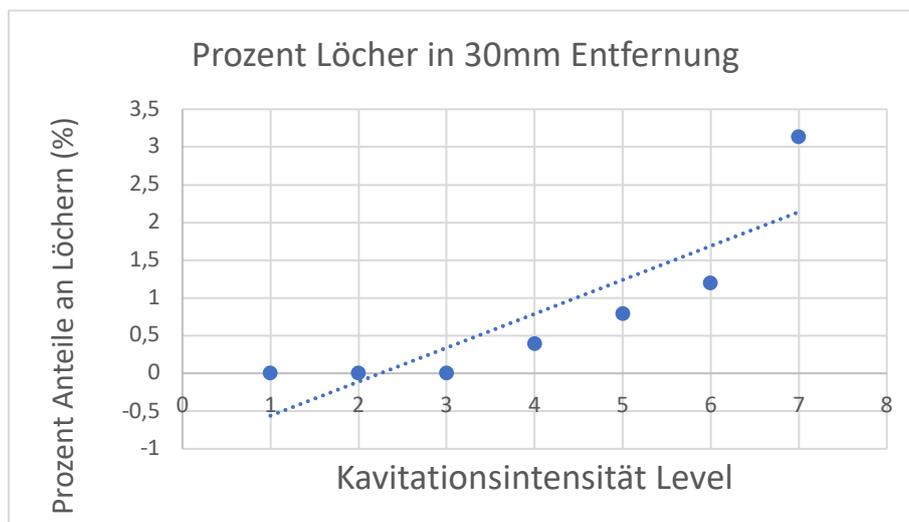


Abbildung 4-12: Diagramm von Kavitationsintensität der Schallwellen gegen den Prozentual Löcheranteil auf der Alufolie in 30mm Abstand von der Schallquelle

Beide Diagramme zeigen die Kavitationsintensitätsstufe auf der horizontalen Achse und den entsprechenden durchschnittlichen Prozentsatz der auf den Alufolien erzeugten Löcher bei jeder Kavitationsintensitätsstufe. Bei jeder Kavitationsintensitätsstufe wurden drei Messungen durchgeführt und dann der Durchschnitt berechnet, wie in Kapitel 3 erläutert. In Abbildung 4-11 wurde die Alufolie in einem Abstand von 20 mm von der Schallwellenquelle platziert, während sie in Abbildung 4-12 einen Abstand von 30 mm hatte. Die obigen Diagramme

zeigen, wie die Zunahme der Kavitationsintensität der Ultraschallwellen mehr Schäden an der Folie verursacht, also die Zunahme der Gesamtfläche der erzeugten Löcher.

Ein weiteres Experiment wurde in der gleichen Linie durchgeführt, um verheerende Auswirkungen der Kavitation zu zeigen, aber dieses Mal in Bezug auf die Zeit statt auf die Oberfläche sowie in Abbildung 4-11 und 4-3. Dieses Experiment hat Ergebnisse geliefert, welche in Abbildung 4-13 zu sehen ist. Auf der horizontalen Achse wird die Intensitätsstufe der Kavitation angezeigt und auf der vertikalen die Zeit, die benötigt wird (in Sekunden), um ein Loch zu erzeugen.

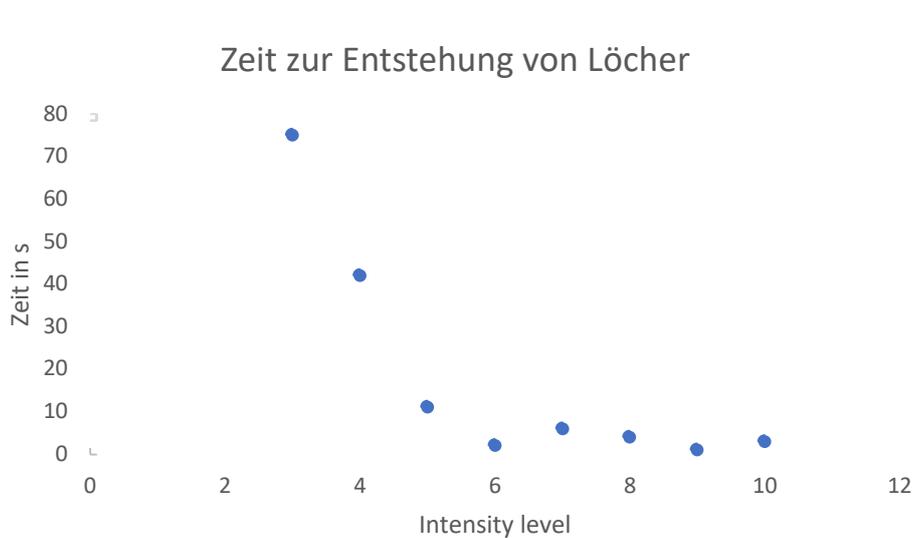


Abbildung 4-13: Das Diagramm beschreibt die Zeit welche die Ultraschallkavitation benötigt um ein Loch in der Folie zu erzeugen

Abgesehen von einigen Schwankungen bei hohen Kavitationsintensitätsstufen wird deutlich, dass sich die Zeitspanne zwischen dem Beginn der Beschallung und dem Auftreten von Löchern mit steigender Kavitationsintensität verkürzt, von 75 s bei Level L3 auf etwa 3 s bei Level L10.

#### 4.2.2 Messung mit der Sonde

Die mit dem Sensor durchgeführten Messungen lieferten eine Reihe von Ergebnissen, die in diesem Kapitel vorgestellt werden. Die folgende Serie stellt die Messungen dar, die als csv.-Datei mit dem Oszilloskop gespeichert und mit MATLAB analysiert wurden, siehe Abbildung 4-14. Die Kavitationspegel wurden in Volt präsentiert, was den Effektivwert des gesamten Signals zeigt.

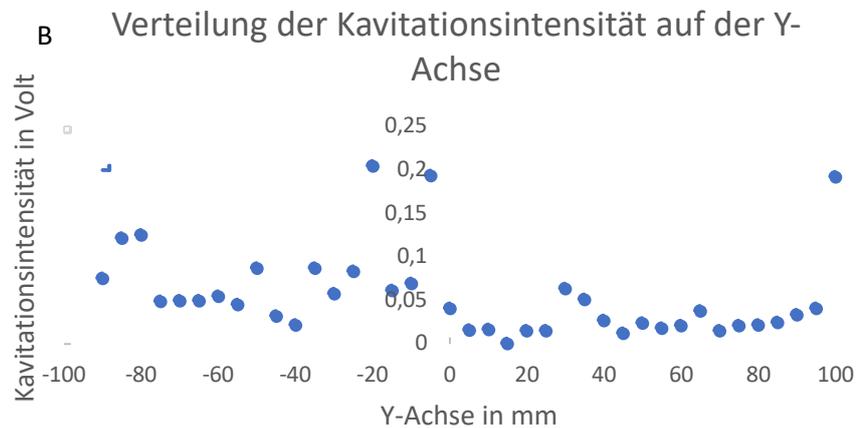
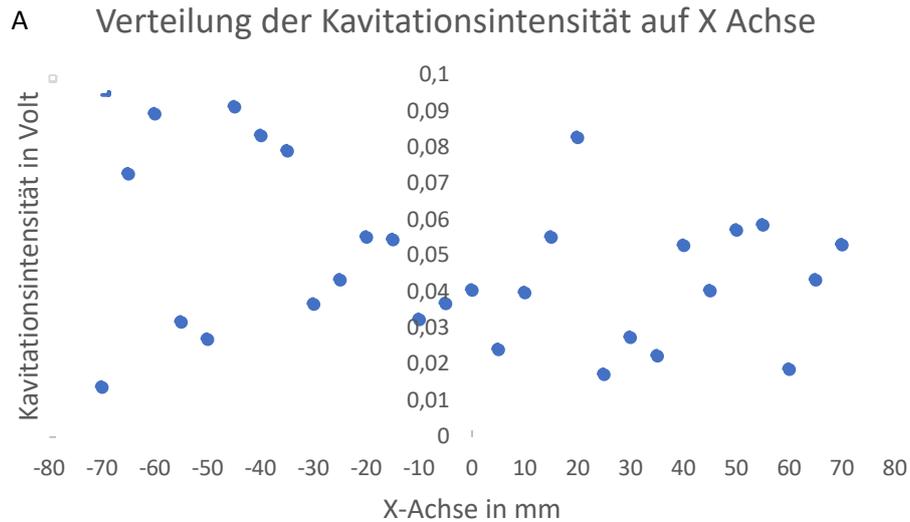


Abbildung 4-14: Verteilung der Kavitationsintensität auf der X-Achse von  $-70\text{ mm}$  auf  $+70\text{ mm}$  bei  $Y=0$  auf Abb. A und Y-Achse von  $-90\text{ mm}$  auf  $+100\text{ mm}$  bei  $X = 0$  auf Abb. B alle in einer Entfernung von  $20\text{ mm}$  von der aktiven Membran. Messung mit einem Oszilloskop bei einer Kavitationsintensität von L2.

Abbildung 4-14A zeigt ein nicht eindeutiges Muster von der Kavitationsstärke entlang der X-Achse mit starken Schwankungen an den Ecken und kleiner Kavitationsintensitäten in der Mitte (um Null herum). Abbildung 4-14B zeigt höhere Druckintensität in der Mitte mit einem Maximum von ca.  $0,2\text{ V}$  bei  $-20\text{ mm}$  und abfallende Kavitationsintensitäten an den Ecken mit zum Beispiel  $0,015\text{ V}$  bei  $+70\text{ mm}$  und  $0,0483\text{ V}$  bei  $-75\text{ mm}$  in der Y-Achse.

Die nächste Abbildung (Abbildung 4-15) zeigt die gleichen Messungen, die diesmal mit einem Voltmeter anstelle eines Oszilloskops durchgeführt wurden. Oben (Abbildung 4-15A) ist die Kavitationsintensitätskurve entlang der X-Achse und darunter (Abbildung 4-15B) die Kurve entlang der Y-Achse zu sehen.

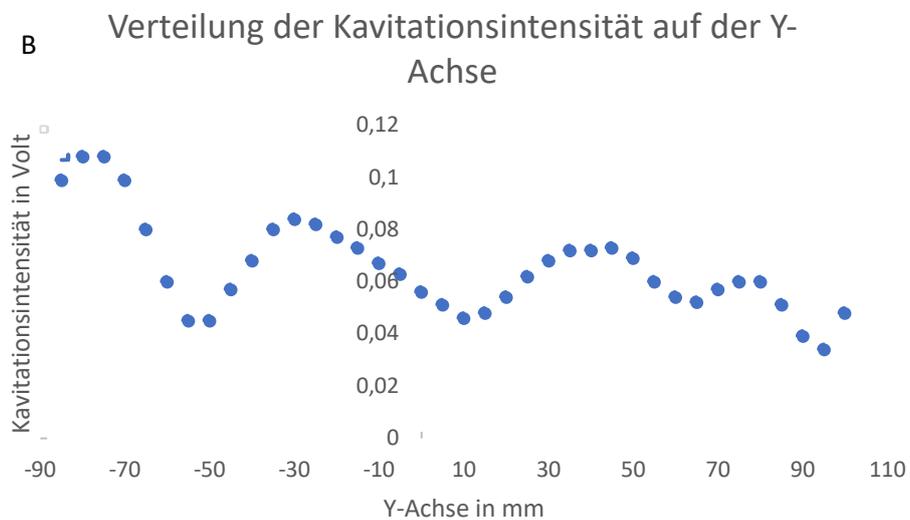
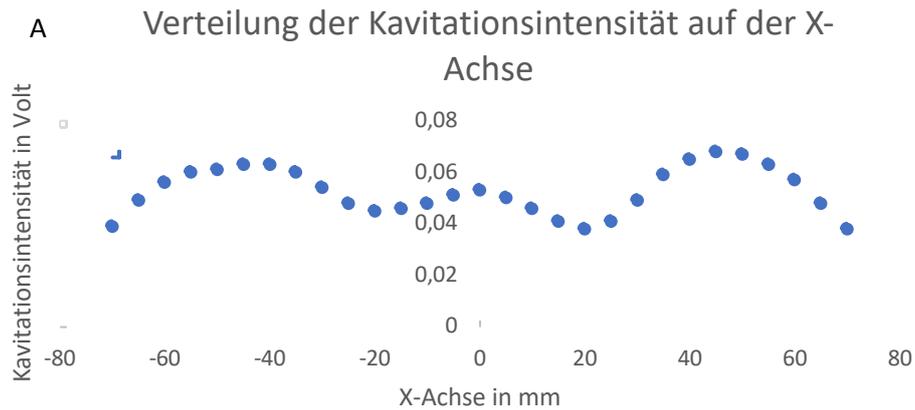


Abbildung 4-15: Verteilung der Kavitationsintensität auf der X-Achse von  $-70\text{ mm}$  auf  $+70\text{ mm}$  bei  $Y = 0$  auf Abb. A und Y-Achse von  $-90\text{ mm}$  auf  $+100\text{ mm}$  bei  $X = 0$  auf Abb. B alle in einer Entfernung von  $20\text{ mm}$  von der aktiven Membran. Messung mit dem Onda Voltmeter bei einer Kavitationsintensität von L2.

Die obige Abbildung zeigt ein glatteres Muster als Abbildung 4-14 mit deutlich unterscheidbaren Wellen. In Abbildung 4-15A sind 3 obere Halbwellen mit 3 Spitzen an den Positionen  $-40\text{ mm}$  ( $0,063\text{ V}$ ),  $0\text{ mm}$  ( $0,053\text{ V}$ ) und  $+45\text{ mm}$  ( $0,068\text{ V}$ ) zu sehen. Die Vertiefungen liegen an den Positionen  $-70\text{ mm}$ ,  $+20\text{ mm}$  und  $+70\text{ mm}$  mit den Werten  $0,039\text{ V}$ ,  $0,038\text{ V}$  und  $0,038\text{ V}$  jeweils. Abbildung 4-15B hingegen weist einen stärker verzerrten, aber glatten Wellensatz auf. Die maximale Kavitationsintensität ist auf dem negativen an Ende am Rand bei  $-80\text{ mm}$  mit einem Wert von  $0,108\text{ V}$  und die minimale Kavitationsintensität auf dem positiven Rand bei  $+95\text{ mm}$  mit einem Wert von  $0,034\text{ V}$ .

Zu beachten ist, dass der Versuch mit Level 2 keine Ergebnisse mit der Alufolie lieferte, wahrscheinlich weil die Kavitationskraft zu gering war. Dennoch wurden einige Ergebnisse mit der Sonde (Hydrofon) erzielt, wie gesehen. Um die Ergebnisse der Folie und des Sensors

vergleichen zu können, wurde ein Experiment mit der Amplitudenstufe L5 unter Verwendung des Sensors durchgeführt. Dies ermöglichte einen Vergleich mit dem Ergebnis, das mit der Alufolie bei gleicher Kavitationsintensitätsstufe (L5) erzielt wurde. Dieses Experiment hat folgende Ergebnisse erbracht (siehe Abbildung 4-16).

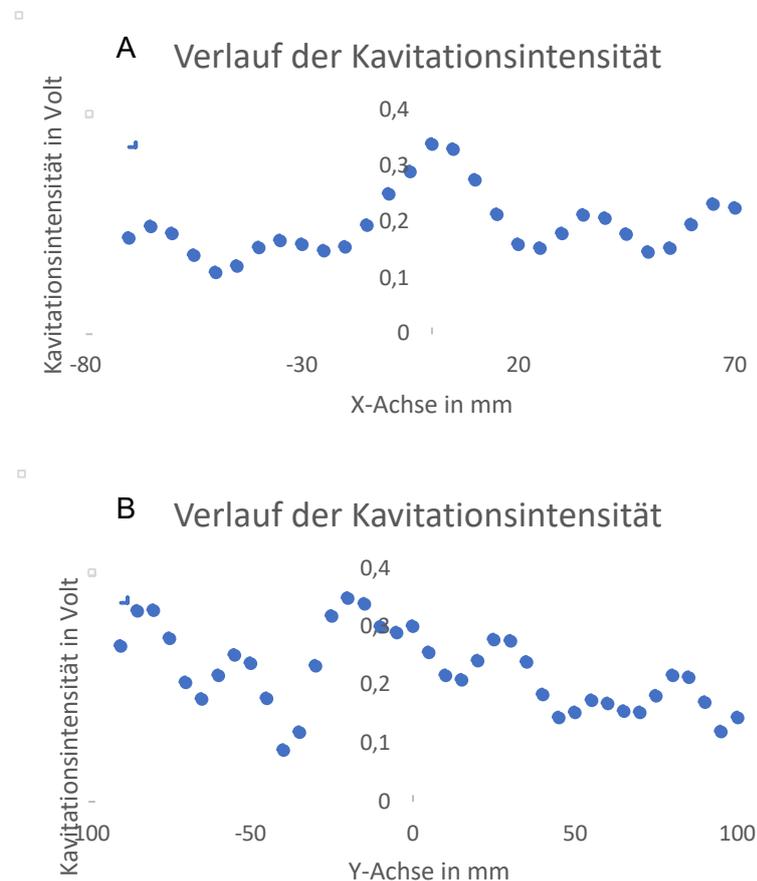


Abbildung 4-16: Verteilung der Kavitationsintensität auf der X-Achse von  $-70\text{ mm}$  auf  $+70\text{ mm}$  bei  $Y = 0$  auf Abb. A und Y-Achse von  $-90\text{ mm}$  auf  $+100\text{ mm}$  bei  $X = 0$  auf Abb. B alle in einer Entfernung von  $20\text{ mm}$  von der aktiven Membran. Messung mit dem Voltmeter bei einer Kavitationsintensitätsstufe von L5

Auf der X-Achse ist in der Mitte (Position  $0\text{ mm}$ ) eine deutlich erkennbare hohe Kavitationsintensität vorhanden ( $0,340\text{ V}$  bei), die in beide Richtungen abklingt. Das Abklingen der Wellen auf beiden Seiten scheint in der Form ähnlich zu sein, wie in Abbildung 4-16A zu sehen. Auf der anderen Seite zeigt Abbildung 4-16B ein ähnliches Muster, mit der höchsten Kavitationsintensität ( $0,35\text{ V}$ ) etwa in der Mitte ( $-20\text{ mm}$ ) der aktiven Membran. Diese Kavitationsintensität verblasst, wenn man sich von der Mitte wegbewegt, obwohl es einige unorthodoxe Spitzen gibt.

Der letzte Versuch mit der Sonde, die in verschiedenen Tiefen über dem Zentrum der wirksamen Membran eingeführt wurde, ergab die in Abbildung 4-17 dargestellten Ergebnisse. Die Kavitationsintensitätsstufe des Ultraschall-Steuergeräts war für die gesamte Messung auf

Stufe L5 eingestellt und die Sonde war an dem Voltmeter angeschlossen. Das Ergebnis war recht eindeutig: Je näher die Sonde am Ausbreitungsbereich der Schallwelle liegt, desto höher ist die aufgezeichnete Spannung am Voltmeter. Die maximale Spannung war  $0,462\text{ V}$  bei einer Entfernung von  $10\text{ mm}$  welche auf  $0,174\text{ V}$  abgefallen ist bei einer Entfernung von  $60\text{ mm}$  von der wirksamen Membran.

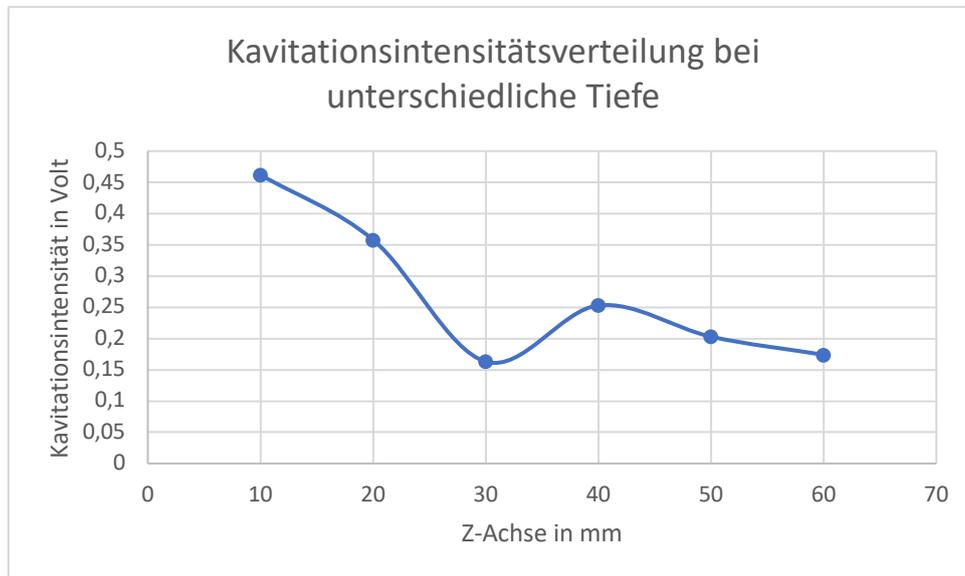


Abbildung 4-17: Spannungswerte bei ansteigenden Entfernungen von der Wirkmembran des Schallwandlers bei einem Kavitationspegel von L5

### 4.3 Elektromagnetische Quelle

Messungen mit dieser Quelle bei  $15\text{ kV}$  haben Ergebnisse geliefert, die in den Abbildung 4-19 und Abbildung 4-20 zu sehen sind. Das Ergebnis in Abbildung 4-19 zeigt ein Echtzeitbild der Aluminiumfolie nach der Behandlung mit der Quelle bei normalem Tageslicht, während das in Abbildung 4-20 eine Schwarz-Weiß-Konvertierung davon zeigt. Insgesamt wurden fünf Behandlungen betrachtet, die ersten 3 mit einem offenen Folienhalter (Abbildung 4-18B) und die letzten 2 mit einem geschlossenen Halter (Abbildung 4-18A). Die Bewertung der ersten 3 Folien erfolgte durch Zählen der Anzahl der Beulen in bestimmten Bereichen (die 8 Quadrate auf den Fotos), um eine Schätzung der Gesamtzahl der Beulen zu erhalten, aber dabei gab es ein großes Problem. Das Problem war die Anhäufung von Unebenheiten in der Mitte der Folie, was es unmöglich machte, jede einzelne Unebenheit zu isolieren. Aus diesem Grund wurde die ungefähre Fläche, die von den verschmolzenen Unebenheiten bedeckt wird (eingekreiste Bereiche in der Mitte), unabhängig gemessen. Die Fläche der obere 3 Folie betrug  $14400\text{ mm}^2$  und die Fläche der Quadrate  $121\text{ mm}^2$ . Die Ergebnisse der Analyse der Folie sind in Tabelle 4 unten zusammengefasst.

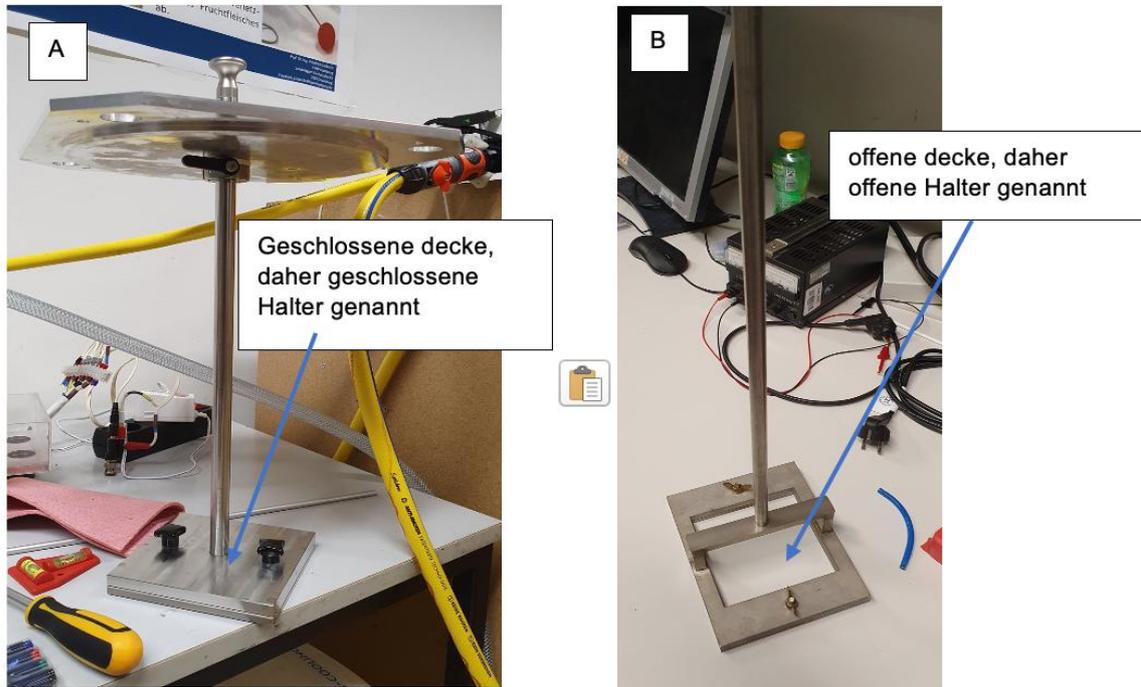


Abbildung 4-18: Halterung für die Alufolie für die EMSE Messung. Geschlossener Halter links (A) und der offene Halter recht (B)

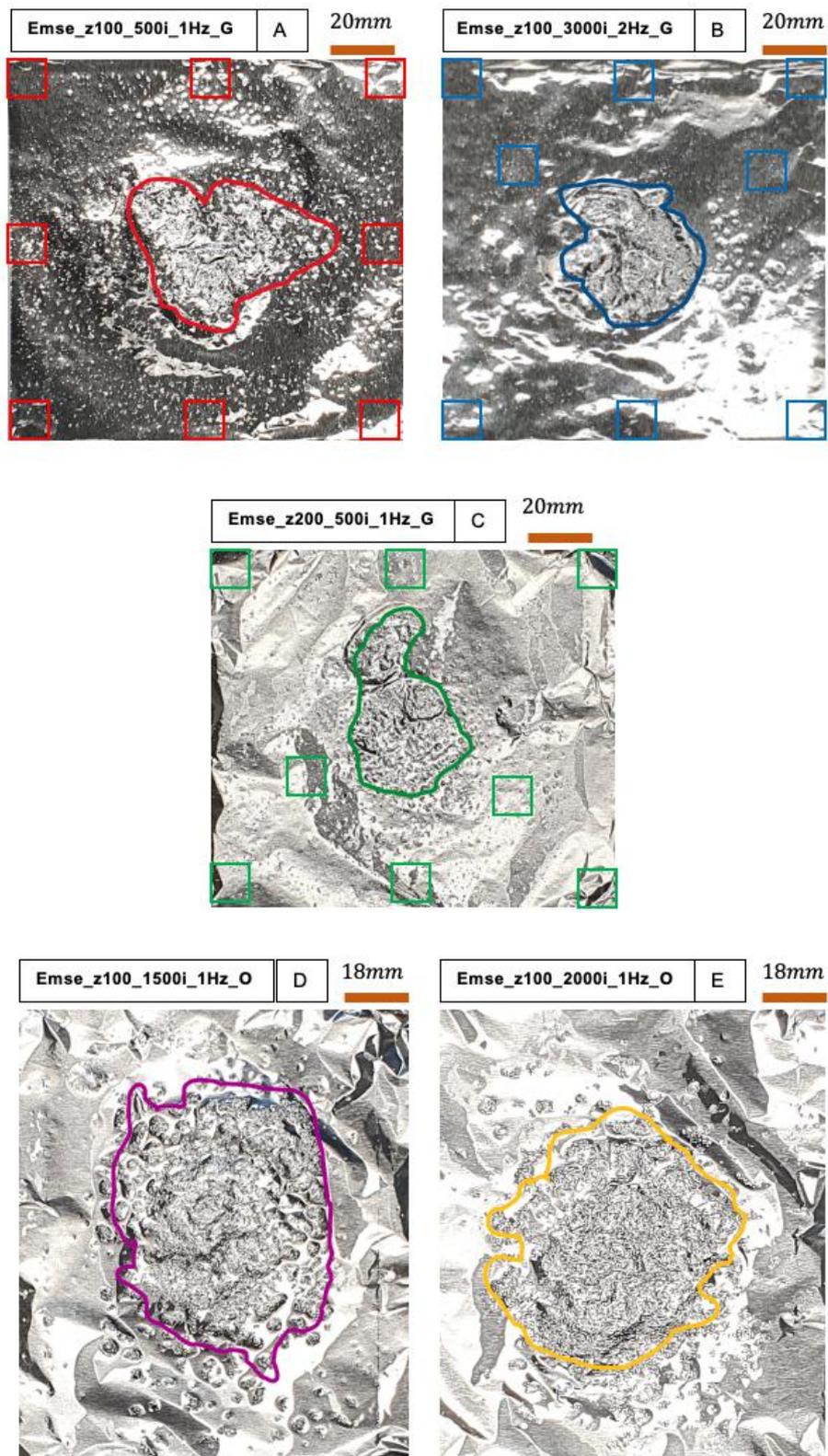


Abbildung 4-19: Fotos nach Beschallung mit der EMSE mit offenem (A B und C) und geschlossenem Halter (D und E).

Wie bei der Messung mit elektrohydraulischer oder Piezo-Quelle geben die Namen der Fotos für jede der Folien Auskunft über die Art der Quelle, die Parameter des Steuergeräts und die

Art des verwendeten Halters. Abbildung 4-19A hat zum Beispiel den Namen "Emse z100 500i 1Hz G". "Emse" steht für die Art der Ultraschallquelle (Elektromagnetische Stoßwellen), "z100" steht für den vertikalen Abstand der Folie von der aktiven Membran in mm, "500i" steht für 500 Impulse, 1Hz für die Frequenz der Impulse und „G“ steht für geschlossenen Halter, während „O“ für offener Halter steht.

Tabelle 4: Ergebnis der Beschallung mit der EMSE von der Alufolie am offenen Halter. Folgende Informationen sind auf die Tabelle zu finden: OL (oben links) OM (oben mittig) OR (oben recht) UL (unten links) UM (unten mittig) UR (unten recht) S1 (erste Quadrat mit die meisten Beulen) S2 (zweite Quadrat mit den meisten Beulen) Anzahl der Beulen pro 121 mm<sup>2</sup> Anzahl der Beulen auf der gesamten Folie (Total Nummer) und Fläche der verschmolzenen Beulen (Fläche in mm<sup>2</sup>)

	EMSE_Z100_500i_1Hz (A)	EMSE_Z100_3000i_2Hz (B)	EMSE_Z200_500i_1Hz (C)
OL (oben links)	9	3	8
OM (oben mittig)	20	3	10
OR (oben recht)	5	4	3
UL (unten links)	20	5	18
UM (unten mittig)	40	5	11
UR (unten recht)	6	3	3
S1	50	29	28
S2	52	22	21
Anzahl/121mm <sup>2</sup>	25,25	9,25	12,75
Total Nummer	3030	1110	1530
Fläche in mm <sup>2</sup>	1935,539	1459,000	1814,231

Aus der obigen Tabelle ist ersichtlich, dass je näher die Folie an der aktiven Membran ist, desto höher ist der Kavitationseffekt mit mehr isolierten Beulen (3030 Beulen bei 100 mm) und einer höheren Fläche an verschmolzenen Beulen (1935,539 mm<sup>2</sup>). Dies steht im Vergleich zu 1530 Beulen bei 200 mm Abstand mit einer Fläche von 1814,231 mm<sup>2</sup> an verschmolzenen Beulen, und das alles bei einer Spannung von 15 kV bei einer Frequenz von 1 Hz mit 500 Impulsen. Eine Erhöhung der Frequenz wirkt sich jedoch negativ auf den Effekt der Kavitation aus, da sie diese deutlich reduziert. Ein gutes Beispiel dafür ist in Tabelle 4A und B zu sehen, wo die Verdoppelung der Frequenz von 1 auf 2 Hz die Anzahl der erzeugten isolierten Beulen von 3030 auf 1110 sowie die Fläche der verschmolzenen Beulen von 1935,539 mm<sup>2</sup> auf 1459 mm<sup>2</sup> reduziert, trotz der Erhöhung der Impulszahl von 500 auf 3000.

Für alle drei Fälle gilt, dass der höchste Kavitationseffekt in der Mitte der Folie auftritt, wo die Unebenheiten nicht voneinander zu unterscheiden sind, da die Unebenheiten (Beulen) übereinander aufgebaut sind. Trotzdem sind die ganzen Folien mit Höckern gefüllt.

Tabelle 5: Ergebnis der Beschallung mit der EMSE von der Alufolie am geschlossenen Halter mit Darstellung der Fläche der verschmolzenen Beulen

	EMSE_Z100_1500i_1Hz (D)	EMSE_Z100_2000i_1Hz (E)
Fläche/mm <sup>2</sup>	4878,1	4346,2

Im Fall mit der offenen Halterung in Abbildung 4-19D und E ist fast keine einzelne Beule sichtbar, da die meisten um die Mitte der beiden Folien verschmolzen sind. Es ist zu beachten, dass die Abmessungen der Folien hier unterschiedlich waren, mit einer Fläche von 14300 mm<sup>2</sup> (143 × 100mm<sup>2</sup>). Aufgrund des Auftretens von meist verschmolzenen Beulen in diesem Fall wurde nur die Fläche gemessen, die davon bedeckt war. Die Parameter der Kontrollmaschine waren in beiden Fällen bis auf die Anzahl der Impulse gleich (15 kV, 100 mm Abstand zur Kupfermembran und 1 Hz). Die Namen in Tabelle 2 enthält diese Einstellungen wie schon erwähnt. Bei 1500 Impulse wurde 4878,067 mm<sup>2</sup> abgedeckt und mit 2000 Impulse, 4346,167 mm<sup>2</sup> (siehe Tabelle 2), was bedeutet, dass eine Erhöhung der Anzahl der Impulse einen fokussierten Effekt in der Mitte der Folie erzeugt.

Die Analyse der Schwarz-Weiß-Bilder (Abbildung 4-20) der Folien lieferte zusätzliche Informationen über die Art der durch die elektromagnetische Quelle erzeugten Kavitation. Zunächst wurde die Fläche der durch den Kavitationsprozess entstandenen Löcher berechnet, und man erhielt das unten dargestellte Ergebnis (Tabelle 2).

Tabelle 6: Fläche der Löcher auf der Alufolie nach Beschallung und Prozent der Löcherfläche zur gesamten Folie

EMSE Einstellung	Total Fläche [mm <sup>2</sup> ]	Löcher Fläche [mm <sup>2</sup> ]	Prozent Löcher [%]
EMSE_Z100_500i_1Hz_G	14400	53,3	0,38
EMSE_Z100_3000i_2Hz_G	14400	7,9	0,06
EMSE_Z200_500i_1Hz_G	14400	5,1	0,04
EMSE_Z100_1500i_1Hz_O	14300	172,7	0,54
EMSE_Z100_2000i_1Hz_O	14300	46,1	0,32

Die größte Fläche an Löchern erschien auf der Folie, die auf dem offenen Halter platziert war, der der Kupfermembran am nächsten war (100 mm Abstand), mit 1500 Impulsen bei einer Frequenz von 1 Hz. Die niedrigste war auf der Folie, die auf dem geschlossenen Halter in der weitesten Entfernung (200 mm) von der Membran platziert war, mit 500 Impulsen bei einer Frequenz von 1 Hz.

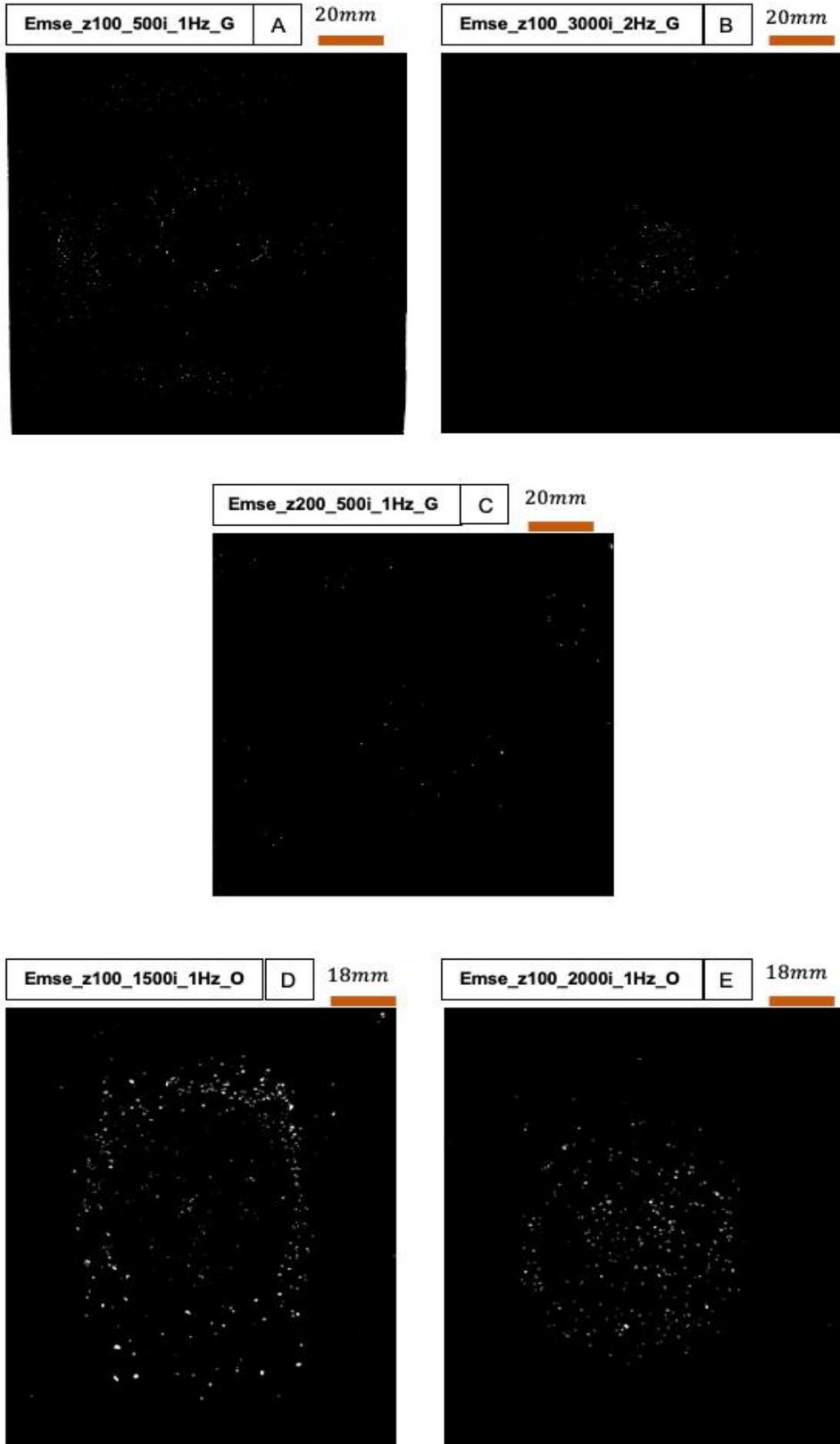


Abbildung 4-20: Umwandlung der Bilder nach Beschallung in Schwarz-Weiß-Bilder. Löcher sind weiß dargestellt.

Nach der Analyse der Fläche der Löcher folgte die Analyse ihres Musters auf der Aluminiumfolie, die eine höhere Konzentration von Löchern um die Mitte herumzeigte,

besonders bei den Folien, die auf offenen Haltern platziert waren (Abbildung 4-20D und E). Eine Vergrößerung des Abstandes zwischen der Folie (fixiert auf dem geschlossenen Halter) und der aktiven Membran (von 100 auf 200 *mm*) führte zu weniger Löchern, die über die gesamte Folie verstreut waren (Abbildung 4-20A und C). Die Erhöhung der Anzahl der Impulse der Ultraschallquelle erzeugt jedoch mehr zentralisierte Löcher, unabhängig vom Halter (siehe Abbildung 4-20B, D und E). Generell gilt für die elektromagnetische Quelle, dass die Verwendung eines geschlossenen Halters eine wesentlich gleichmäßigere Verteilung der Kavitationswirkung auf der Folie bewirkt. Faktoren, die die Auswirkungen der Kavitation erhöhen, sind: Die Verkleinerung des Abstands zwischen der Folie und der aktiven Membran, die Verwendung einer Frequenz von 1 *Hz*, da eine Erhöhung dieser Frequenz einen nachteiligen Effekt hat und die Erhöhung der Anzahl der Pulse.

Bei der Charakterisierung des Kavitationspotentials spielt sowohl die Wahl der Ultraschallquelle als auch deren Aufbau eine wichtige Rolle. Eine gute Kenntnis der verschiedenen Funktionalitäten dieser Quellen ist ein wichtiger Schritt bei der Ausarbeitung einer geeigneten Anwendung von Ultraschall als mögliches Reinigungsmittel (Desinfektionsmittel) für verschiedene Arten von Materialien, von Metallen bis hin zu organischen Materialien wie Fleisch.

## 5 Diskussion

Die Ergebnisse aus den Messungen mit den verschiedenen Ultraschallquellen gaben jeweils Aufschluss über die Eigenschaften der von der einzelnen Quelle verursachten Kavitation. Das Ergebnis der Kavitationsmessung mit der elektrohydraulischen Quelle bei Verwendung der zwei Sonden und des Oszilloskops lieferte die folgenden Informationen: Den Abfall der Druckwerte als Ergebnis der Bewegung beider Sonden von der Funkenstrecke (Elektroden spalt) weg. Bei Verwendung der Sonde mit der Nummer 1910 wurden Druckwerte von  $1,8 \text{ MPa}$  und  $0,75 \text{ MPa}$  (Abbildung 4-1) bei einem Abstand von  $130 \text{ mm}$  bzw.  $230 \text{ mm}$  ermittelt. Ein ähnlicher Abfall aber mit mehr Streuung war bei der Verwendung der Sonde mit der Nummer 1914 zu beobachten. Diese Sonde lieferte Druckwerte von  $1,5 \text{ MPa}$  und  $0,25 \text{ MPa}$  (Abbildung 4-1) bei ähnlichen Abständen, was die umgekehrte Proportionalität zwischen dem Abstand von der Funkenstrecke und dem erhaltenen Druck zeigt.

Für die Charakterisierung der Kavitation von der Elektrohydraulische Quelle wurden die Ergebnisse von vier Folien (deren Name die Parameter des Steuergeräts beschreibt) berücksichtigt. Die Ergebnisse hier wurden in 2 Teile unterteilt, nämlich der Anzahl und Verteilungsmuster der Beulen sowie die Fläche und Verteilungsmuster der Löcher. Die Aluminiumfolie mit den Parametern:  $28 \text{ kV}$ ,  $128 \text{ mm}$  Abstand,  $500$  Impulse und  $1 \text{ Hz}$  (Name:  $28\text{kV}_Z128_500i_1\text{Hz}$ ), siehe Abbildung 4-3A zeigte die meisten Beulen auf der ganzen Folie, etwa  $2578$  Beulen. Die Folie mit dem Namen  $24\text{kV}_Z228_500i_4\text{Hz}$  (siehe Abbildung 4-2B) zeigte die kleinste Anzahl an Beulen, ungefähr  $1932$ , gefolgt von  $1944$  Beulen mit Alufolie  $28\text{kV}_Z228_500i_1\text{Hz}$ . Trotz der Unterschiede in der Anzahl an Beulen, waren diese in allen vier Fällen gleichmäßig auf der gesamten Foliensfläche ( $105 \times 70 \text{ mm}^2$ ) aufgeteilt. Die höchsten und kleinsten Löcherflächen waren auf der Folie zu finden, mit den meisten und wenigsten Beulenzahl jeweils, mit  $42,581 \text{ mm}^2$  für die Folie,  $28\text{kV}_Z128_500i_1\text{Hz}$  und kein Loch für  $24\text{kV}_Z228_500i_2\text{Hz}$  (Tabelle 3). Unter sonst gleichen Bedingungen erhöht sich bei einer Erhöhung der Spannung von  $24 \text{ kV}$  auf  $28 \text{ kV}$  die Fläche der auf der Folie erzeugten Löcher von  $7,923 \text{ mm}^2$  auf  $42,581 \text{ mm}^2$  (Tabelle 3, Nummer 1 und 3). Eine Verringerung des Abstands zwischen der Folie und der aktiven Membran erhöht die Fläche der erzeugten Löcher von  $0,965 \text{ mm}^2$  auf  $42,581 \text{ mm}^2$ , siehe Tabelle 3, Nummer 3 und 4. Eine Erhöhung der Frequenz führt zu weniger bis kein Loch. Die Löcher, sofern vorhanden, befanden sich meist in der Mitte der Aluminiumfolie.

Wie die elektrohydraulische Quelle wurde auch die piezoelektrische Ultraschallquelle mit Aluminiumfolien und einer Sonde untersucht. Allerdings wurde die Sonde in Kombination mit einem Oszilloskop oder einem Voltmeter verwendet. Da bei der Verwendung der Folie kaum

Beulen entstanden, wurden nur die Löcher analysiert. Die Erhöhung der Kavitationsstufe von L3 auf L10 bei einem Alufolie-Abstand von 20 mm von der aktiven Membran führt zu einem Anstieg des Prozentsatzes der erzeugten Löcher Flächen von 0,118 % auf 5,135 % (Abbildung 4-8 und Abbildung 4-9). Das gleiche Muster wird bei einem Abstand von 30 mm von der Membran beobachtet, wo eine Erhöhung der Kavitationsintensität von L4 auf L7 den Prozentsatz der erzeugten Löcher Flächen von 0,392 % auf 3,136 % erhöht (Abbildung 4-10). Wird die Folie mit der gleichen Kavitationskraft von der aktiven Membran wegbewegt, verringert sich die Fläche der entstehenden Löcher. Die Vergrößerung des Abstandes von 20 auf 30 mm bei L5 verringert den prozentualen Anteil der Fläche der Löcher von 2 % auf 0,79 % (Abbildung 4-8 und Abbildung 4-10). Das Muster der Löcher, die während des Kavitationsprozesses entstanden, war abhängig von der Intensität der Kavitation und dem Abstand zwischen der Folie und der aktiven Membran (was indirekt für die Kavitationsintensität spricht). Eine Erhöhung der Kavitationsintensität oder eine Verringerung des Abstands zwischen der Folie und der aktiven Membran erzeugt mehr fokussierte Löcher um das Zentrum der Folie. Im umgekehrten Fall entsteht ein verstreutes Muster von Löchern. Zum Beispiel, eine Kavitation der Stufe L5 bei 20 mm Abstand erzeugt ein deutliches verstreutes Muster von Löchern (Abbildung 4-8), während die Stufe L10 mehr fokussierte Löcher in der Mitte erzeugt (siehe Abbildung 4-9). Das gleiche Muster ist in Abbildung 4-10 zwischen den Kavitationsintensitäten L5 und L7 bei 30 mm Abstand zu sehen. Ein Beispiel dafür, wie die Vergrößerung des Abstands zwischen der Folie und der aktiven Membran den Grad der Verstreuung der erzeugten Löcher erhöht, ist in Abbildung 4-9 und Abbildung 4-10 zu sehen, wenn beispielsweise der Kavitationsgrad L6 betrachtet wird. Die Zeit für die Entstehung von Löchern auf der Alufolie mit unterschiedliche Kavitationspegel wurde auch getestet. Es wurde festgestellt, dass eine Erhöhung der Pegel von L3 auf L7 zu einer Verkürzung der Zeit von 75 s auf 3 s zur Löcherentstehung führte (Abbildung 4-13). Die Kurven des Kavitationsintensitätslevel gegen die Zeit zur Entstehung von Löchern stellt einen exponentiellen Abfall dar (siehe Abbildung 4-13).

Die Ergebnisse der Messungen mit der Sonde (in einer Entfernung von  $Z = 20 \text{ mm}$  von der aktiven Membran) für die Piezoquelle wurden in zwei Teile gegliedert, wobei der erste Teil die Ergebnisse bei der Aufzeichnung der Werte mit dem Oszilloskop und der zweite Teil die Ergebnisse bei der Verwendung des Voltmeters sind. Bei einem Kavitationspegel von L2 mit dem Oszilloskop wurde ein unregelmäßiges Verteilungsmuster von Kavitationsintensität in der  $X$ -Achse, bei  $Y = 0$  und  $Z = 20$  festgestellt (Abbildung 4-14A). Die höchste Spannung, 0,0912 V war an der Position  $-45 \text{ mm}$  und die kleinste Spannung (0,0137 V) bei  $-70 \text{ mm}$  (Abbildung 4-14A). Es gab mehr höhere Spannungswerten in negativen Bereich. Auf der  $Y$ -Achse, bei  $X = 0$  war ein klares Muster zu sehen, nämlich das Auftreten von die meisten

Peaks in der Mitte mit Werten;  $0,193 V$  und  $0,204 V$  bei  $-5 mm$  bzw.  $-20 mm$  (Abbildung 4-14B). Der kleinste Wert,  $0 V$ , lag bei  $15 mm$  (Abbildung 4-14B). Das Ergebnis der gleichen Messung, jedoch diesmal mit einem Voltmeter anstelle des Oszilloskops, zeigte ein sinusförmiges Verteilungsmuster der Kavitationsintensität in der  $X$ -Achse bei  $Y = 0$  mit einer Periode von etwa  $45 mm$  (Abbildung 4-15A). Die Spitzenwerte lagen bei  $-45 mm$ ,  $0 mm$  und  $45 mm$  mit Werten von  $0,063 V$ ,  $0,053 V$  bzw.  $0,068 V$  (Abbildung 4-15A). Die niedrigsten Werte waren  $0,039 V$ ,  $0,038 V$  und  $0,038 V$  an den Positionen  $-70 mm$ ,  $20 mm$  und  $70 mm$  jeweils (Abbildung 4-15A). Auf der  $Y$ -Achse bei  $X = 0$  war das sinusförmige Verteilungsmuster von  $-90 mm$  bis  $100 mm$  abfallend, mit dem höchsten Wert,  $0,108 V$  bei  $-80 mm$  und dem niedrigsten Wert,  $0,034 V$  bei  $95 mm$  (Abbildung 4-15B). Die Periodizität hier war nicht regelmäßig. Das nächste Experiment, das entlang der  $XY$ -Achse durchgeführt wurde, war mit der Kavitationsintensität der Kontrollmaschine auf L5 eingestellt. Bei diesem Aufbau wurde ein Sinusverteilungsmuster der Kavitationskräfte mit einer Periode von  $30 mm$  in der  $X$ -Achse bei  $Y = 0$  und  $Z = 20$  beobachtet, wobei der Peak in der Mitte ( $0,34 V$ ) bei  $0 mm$  sowohl in  $-X$ - als auch in  $+ X$ -Richtung abfiel (Abbildung 4-16A). Die kleinste erhaltene Spannung betrug  $0,11 V$  an der Position  $-50 mm$  (Abbildung 4-16A). Auf der  $Y$ -Achse mit  $X = 0$  waren die Schwankungen der Spitzenwerte jedoch unregelmäßig, wobei der höchste Wert  $0,35 V$  bei  $-20 mm$  und der kleinste Wert  $0,088 V$  bei  $-40 mm$  betrug (Abbildung 4-16B). Das unregelmäßige Muster schien leicht von  $-90 mm$  auf  $100 mm$  zu fallen (Abbildung 4-16B). Anhand dieser Ergebnisse, die mit der Sonde in Kombination mit dem Oszilloskop erzielt wurden, wird deutlich, dass eine Erhöhung der Kavitationsintensität von L2 auf L5, höhere Kavitationskräfte bei  $Z = 20 mm$  erzeugte, die von der Sonde aufgezeichnet wurden (siehe Spannungswerte in Abbildung 4-14, Abbildung 4-15 und Abbildung 4-16). Das vertikale Bewegen der Sonde (entlang der  $Z$ -Achse bei  $X$  und  $Y = 0$ ) im Reaktionsbehälter führt zu ähnlichen Effekten. Beispielsweise wurde bei der Einstellung der Kavitationsintensität auf L5 in der Mitte der aktiven Membran ( $X = Y = 0 mm$ ) eine Spannung von  $0,462 V$  in einem Abstand von  $10 mm$  von der Membran aufgezeichnet, während ein anderer Spannungswert von  $0,174 V$  in einem Abstand von  $60 mm$  von (Abbildung 4-17) erhalten wurde. Also die Kavitationsintensität ist umgekehrt proportional zu der Entfernung der Sonde von der aktiven Membran.

Die Messungen mit der Elektromagnetischen Quelle wurden, wie schon erwähnt und begründet, ausschließlich mit der Alufolie gemacht (Begründung in Kapitel 3.4). Wie bei den anderen Messungen mit der Folie wurden folgende Parameter berücksichtigt: Abstand zwischen der Folie und der aktiven Membran (z. B. Z100 für  $100 mm$ ), Anzahl der Impulse und die Frequenz dieser Impulse. Als neuer Parameter wurde hier die Art des Alufolienhalters

(offener oder geschlossener Halter) berücksichtigt. Die Spannung war während des gesamten Experiments fix mit  $15\text{ kV}$ . Bei Verwendung des geschlossenen Halters wurde die höchste Anzahl von Beulen, 3030 Beulen, erreicht, wenn die Folie in einem Abstand von  $Z = 100\text{ mm}$  platziert und mit 500 Impulsen bei einer Frequenz von  $1\text{ Hz}$  behandelt wurde (Tabelle 4A). Hier wurde auch die höchste Fläche der verschmolzenen Beulen und der höchste prozentuale Anteil an der Fläche der entstandenen Löcher erzielt, mit Werten von  $1935,539\text{ mm}^2$  bzw.  $0,377\%$  (Tabelle 4A). Die Erhöhung der Frequenz der Impulse auf  $2\text{ Hz}$  ergab die geringste Anzahl von Beulen (1110) sowie die geringste Fläche verschmolzener Beulen ( $1459\text{ mm}^2$ ), obwohl die Anzahl der Impulse bis auf 3000 erhöht wurde (Tabelle 4B). Der Prozentsatz der dadurch entstandenen Löcher Fläche war mit einem Wert von  $0,055\%$  ebenfalls sehr gering (Tabelle 6). Das Bewegen der Folie zu einem Abstand von  $z = 200\text{ mm}$  unter Beibehaltung der Impulszahl von 500 bei einer Frequenz von  $1\text{ Hz}$  verursachte die geringste Fläche von Löchern auf der Folie, die nur  $0,035\%$  der Folie bedeckte (Tabelle 6). Die Anzahl der erzeugten Beulen wurde auf 1530 reduziert, ebenso die Fläche der verschmolzenen Beulen ( $1814\text{ mm}^2$ ), siehe Tabelle 4C. Das Muster der erzeugten isolierten Decken (Beulen) war in allen drei Fällen über die gesamte Folie verteilt, die verschmolzenen Unebenheiten befanden sich jedoch in der Mitte. Bei einem Abstand von  $Z = 100\text{ mm}$  befanden sich die erzeugten Löcher um die Mitte der Folie (Abbildung 4-20). Eine Vergrößerung des Abstandes auf  $200\text{ mm}$  erzeugte ein verteiltes Muster von Löchern. Die Verwendung des offenen Halters lieferte unterschiedliche Ergebnisse. Hier wurden nur zwei Folien betrachtet, wobei eine mit 1500 Impulsen und die andere mit 2000 Impulsen behandelt wurde. Der Abstand der Folien von der aktiven Membran und die Frequenz der Impulse waren in beiden Fällen unverändert mit den Werten  $100\text{ mm}$  bzw.  $1\text{ Hz}$ . Die Erhöhung der Anzahl der Impulse von 1500 auf 2000 reduzierte die Fläche der verschmolzenen Beulen von  $4878,067\text{ mm}^2$  auf  $4346,167\text{ mm}^2$  (Tabelle 5) sowie die prozentuale Fläche der Löcher von  $0,537\%$  auf  $0,322\%$  (Tabelle 6). In beiden Fällen wurden kaum isolierte Beulen erzeugt. Die Verschmelzungen lagen jedoch um die Mitte der Folie, wobei die mit 2000 Impulsen behandelte Folie mehr zentralisierte Beulen Verschmelzung aufwies (Abbildung 4-19). Das Muster der entstandenen Löcher war ähnlich wie das der Beulen, also zentralisiert, obwohl die Folie mit mehr Impulsen viel mehr Löcher hatte, die in der Mitte der Folie zueinander geschlossen waren (Abbildung 4-20).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine Erhöhung der Frequenz der Impulse oder des Abstands zwischen der Folie in einem geschlossenen Halter und der aktiven Membran die Auswirkungen der Kavitation verringert, wobei die Änderung der Frequenz einen größeren Einfluss hat. Die Verwendung geschlossener Halter erzeugt jedoch gleichmäßiger verteilte Kavitationseffekte, während der offene Halter einen fokussierten Kavitationseffekt hervorruft.

Ein Fazit zu den Eigenschaften der einzelnen Kavitationsquellen finden Sie im folgenden Kapitel.

## 6 Fazit

Die Untersuchung und das Experimentieren mit den drei Arten von Ultraschallquellen in einem Versuch, ihr Kavitationspotenzial zu charakterisieren, lieferte einen interessanten Abschluss dieser Arbeit, die in drei Hauptteile unterteilt werden kann, wobei jeder Teil jeder der Quellen entspricht. Messungen mit der elektrohydraulischen Quelle zeigten, dass der Kavitationseffekt (Druckwerte, Beulen und Löcher) fast gleichmäßig über das gesamte Wirkungsfeld (Folie) verteilt war, mit etwas mehr Effekt in der Mitte. Dieser Effekt nimmt zu, wenn die Spannung der Quelle erhöht wurde oder bei Annäherung an die aktive Membran und nimmt ab, wenn die Frequenz der Impulse erhöht wurde. Die Verwendung der piezoelektrischen Quelle lieferte jedoch andere Ergebnisse. Die Kavitationseffekte dieser Quelle schienen sich auf das Zentrum der Folie zu konzentrieren, trotz der Entfernung von der aktiven Membran. Der Effekt war stärker und erzeugte direkt Löcher ohne Unebenheiten, nimmt aber ab, wenn man sich von der Membran entfernt oder die Kavitationsintensität der Quelle reduziert.

Das Kavitationspotenzial der elektromagnetischen Ultraschallquelle war sowohl dem der elektrohydraulischen als auch dem der piezoelektrischen Quelle ähnlich, abhängig von der Beschaffenheit des verwendeten Alufolienhalters. Die Verwendung eines geschlossenen Alufolienhalters lieferte ähnliche Ergebnisse wie die der elektrohydraulischen Quelle, während die Verwendung eines offenen Halters ähnliche Ergebnisse wie bei der piezoelektrischen Quelle lieferte.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die messtechnische Charakterisierung des Kavitationspotenzials von Ultraschallquellen von der Art der Quelle, der Form und Dimension der aktiven Membran, ihrer Arbeitsweise (gewählte Spannung, Anzahl der Impulse, Beschallungsdauer, Frequenz und Abstand) und schließlich vom zu beschallenden Objekt abhängt. Es gilt: Je näher ein Objekt an der Quelle ist, je höher die Betriebsspannung, je höher die Anzahl der Impulse (bzw. die Beschallungszeit), desto höher ist das Kavitationspotenzial an diesem Objekt. Je größer der Durchmesser der aktiven Membran, desto verteilter ist die Kavitationswirkung. Die Wahl der Ultraschallkavitationsquelle zwischen den drei hier verwendeten Quellen hängt ausschließlich vom Zweck ab. Für die Sterilisation von organischen Materialien wie Fleisch ist die elektrohydraulische Kavitationsquelle aufgrund eines breiten und relativ gleichmäßigen Wirkungsfeldes am besten geeignet. Für ein genaueres Wirkungsfeld wie die Lithrotypsie-Therapie ist die Piezoquelle am besten geeignet, da sie im Vergleich zu den beiden anderen sehr fokussierte Kavitationseffekte erzeugt. Trotz dieser Schlussfolgerungen bleibt noch Raum, um mehr über die Charakterisierungskavitationspotentiale zu erfahren, da mehr Zeit und Ressourcen zur Verfügung stehen, um intensivere Forschungen zu diesem Thema durchzuführen. Diese Forschung liefert jedoch wertvolle Ausgangspunkte für diese Charakterisierung.

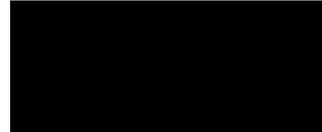
## Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit eigenständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe. Textpassagen, die wörtlich oder dem Sinn nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Hamburg, 01.06.2021

Ort, Datum



Unterschrift

## Literatur

- [1] A. Prosperetti, „Physics of fluids,“ *American Institute of Physics*, Bd. 16, Nr. 6, p. 1852, 2004.
- [2] K. Yasui, *Acoustic Cavitation and Bubble Dynamics*, Springer International Publishing, 2018.
- [3] C. B. Earls, „Cavitation in medicine,“ *Interface Focus, The Royal Society*, Bd. 5, Nr. 5, 2015.
- [4] P. K. Pietrow, „Clinical efficacy of a combination pneumatic and ultrasonic lithotrite,“ *The Journal of Urology*, Bd. 169, Nr. 4, pp. 1247-1249, 2003.
- [5] Hielscher Ultraschall-Technologie, „Hielscher Ultraschall-Technologie,“ Hielscher Ultrasonics GmbH, 25. 4. 2021. [Online]. Available: <https://www.hielscher.com/de/ultrasonic-homogenizers-for-liquid-processing-3.htm>. [Zugriff am 25. 4. 2021].
- [6] E. Johnsen, „Shock-induced collapse of gas bubble in shockwave lithotripsy,“ *The Journal of the Acoustical Society of America*, Bd. 124, Nr. 4, 2008.
- [7] K. Johnson, „Periodic shock-emission from acoustically driven clouds: A source of the subharmonic signal,“ *Elsevier*, 2014.
- [8] IEC, „Ultrasonics – Conditioning of water for ultrasonic measurements,“ IEC/TR 62781, Geneva, 2012.
- [9] Aquatherm, „Vaporous and Gaseous Cavitation,“ *Technews*, Nr. 2, pp. 1-8, 2017.
- [10] L. Liu, „The influence of air content in water on ultrasonic cavitation field,“ *Ultrasonic sonochemistry*, Bd. 21, Nr. 2, pp. 566-571, 2013.
- [11] R. H. Byrne, „Seawater,“ 5. November 2020. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/science/seawater>. [Zugriff am 19. May 2021].
- [12] R. Koech, „Water density formulations and their effect on gravimetric water meter calibration and measurement uncertainties,“ in *Flow Measurement and Instrumentation*, Bd. 45, armidale nsw 2351 australia, Elsevier, 2015, pp. 188-197.
- [13] S. Mellert, F. Ueberle und L. M. Penka, „Projekt Kavitation: Anhang B: Kalibrierung von Hydrophonen für die Messung von Druckpulsquellen,“ HAW Hamburg, Hamburg, 2019.
- [14] Johnson Electric, „The piezoelectric effect,“ Nanomotion Ltd, [Online]. Available: <https://www.nanomotion.com/nanomotion-technology/piezoelectric-effect/>. [Zugriff am 14. 03. 2021].

- [15] Pulsevet, „Pulsevet,“ Pulsevet, 29 05 2009. [Online]. Available: <https://www.pulsevet.com/shock-wave-physics/>. [Zugriff am 20 05 2021].
- [16] L. P. Ueberle Friedrich, „Wasserkreislauf – Bedienung und technische Dokumentation,“ HAW Hamburg, Hamburg, 08.02.2021.
- [17] F. Ueberle, „Simulation von Schallfeldern elektrohydraulischer Pulsschallquellen mit k-Wave,“ HAW Hamburg, Labor für Med. Gerätetechnik, Hamburg, 2019.
- [18] S. Mellert, „Automatisierung der Auswertung von Messreihen, Anlage zum Abschlussbericht des Projekts Kavitation,“ HAW, Fakultät Life Sciences, Labor für Medizinische Gerätetechnik, Hamburg, 2021.
- [19] F. Ueberle, „Schallfeldmessungen der planaren elektromagnetischen Druckpulsquelle,“ HAW Hamburg, Labor für Med. Gerätetechnik, Hamburg, Juni 2021 (in Vorbereitung).

# Anhang

## Anhang A

Die produzierten Kavitationen waren nicht stark genug, um viele Löcher auf die Alufolie zu erzeugen, aber sie reichen aus, um sphärische Beulen zu erzeugen.

## Anhang B

Das Python Programm war spyder ("Scientific Python Development Environment")

Programmcode:

```
import numpy as np
from PIL import Image
name = input("Bitte gebe den Dateinamen ein: ")
image = Image.open(name)
a = np.array(image)

# dimension von EMSE Alu G in mm^2= 120x120
# dimension von EMSE Alu O in mm^2= 143x100

size = 1092*1296 # area in pixel
area =143*100 # area in mm^2
print("\n")
print("Löcher Fläche in Pixeln: {}".format(np.sum(a > 0)), "Pixel\n")
print("Löcher Fläche in mm^2: {}" .format(np.sum(a>0)*(area/size)), "mm^2")
print("\n")
print("Total Fläche in Pixeln: ", size, "Pixel")
print("Total Fläche in mm^2: ", area, "mm^2")
print("\n")
print("Prozentzahl von weiße Fläche: {}".format(np.sum(a > 0) / size*100), "%")
```

## Anhang C

Kurzanleitung zu dem Piezo-Steuergerät: Nachdem das Gerät an einem Netzteil angeschlossen ist, wird der Wandler an das Gerät angeschlossen. Das Gerät kann dann angeschaltet werden. Das Gerät besteht aus 6 Knöpfe, die verständlich sind (Abbildung 3-10):

- „Mode“ Taste zum Auswählen des geeigneten Modus z.B. Cav M1, Abbildung 3-10
- „Level“ Tasten zum Einstellen der Kavitationsintensität, z.B. L2, Abbildung 3-10
- „Start/ Stop“ Taste zum Starten oder Stoppen der Prozess.
- „Out“ Taste ist für der Auswahl eines Ausgangs Signal Modus.