

# Entwicklung eines Kapillarwellengenerators zur Untersuchung des Tropfenaufpralls auf gestörte dünne Filme

Advanced Design Project

am Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik

Joshua Fischer (2638810), Anton Gnabs (2629146), Benedikt Sesterhenn (2637390), Benjamin Traut (2455640)



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

---

**ADP**

Technische Universität Darmstadt  
Institut für Strömungslehre und Aerodynamik  
Gebäude L2|06

Alarich-Weiss-Str. 10  
64287 Darmstadt

**Betreuung:**

Prof. Dr.-Ing. Jeanette Hussong.  
M.Sc. Hatim Ennayar

**Titel:**

Entwicklung eines Kapillarwellengenerators zur Untersuchung des Tropfenaufpralls auf gestörte dünne Filme

(Development of a capillary wave generator to study drop impact on perturbed thin liquid films)

**Bearbeitungszeitraum: 01.11.2021 – 22.04.2022**

Joshua Fischer (2638810), Anton Gnabs (2629146), Benedikt Sesterhenn (2637390), Benjamin Traut (2455640)

Studiengang: Mechanical and Process Engineering

---

## **„Entwicklung eines Kapillarwellengenerators zur Untersuchung des Tropfenaufpralls auf gestörte dünne Filme“**

## **„Development of a capillary wave generator to study drop impact on perturbed thin liquid films“**



**Aufgabenstellung zum ADP (6CP) von Joshua Fischer (2638810), Anton Gnabs (2629146), Benedikt Sesterhenn (2637390), Benjamin Traut (2455640)**

**Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Jeanette Hussong; M.Sc. Hatim Ennayar**

**Beginn der Arbeit: 01.11.2021**

### **Problemstellung**

Um Verbrauch und Emissionen zu reduzieren, ist das Verständnis der Transportprozesse in dünnen Wand-Fluid-Filmen innerhalb von Verbrennungs- und Abgasnachbehandlungssystemen unerlässlich. Die Wechselwirkung zwischen Tropfen- und Wandfilmflüssigkeit, wie beispielsweise in einem Verbrennungssystem, kann den Verbrennungsprozess beeinflussen. Bisherige Studien haben auf Tropfenaufprall auf initial ungestörten Fluidfilme fokussiert. Unverstanden ist bisher jedoch den Impuls- und Speziestransport während eines Tropfenaufpralls in welligen Zweikomponenten-Dünnschichten.

### **Aufgabenstellung**

Für dieses Ziel wurde am Fachgebiet für Strömungslehre und Aerodynamik ein Prüfstand zur experimentellen Untersuchung der Transportprozesse in initial ungestörten Dünnschichten während eines Tropfenaufpralls aufgebaut. Nachfolgend soll nun der Einfluss der initialen Störungen durch Tropfenbeaufschlagung untersucht werden. Zu diesem Zweck soll erst ein Kapillarwellengenerator entwickelt und aufgebaut werden, der definierte Oberflächenwellen anregen kann, die vergleichbar mit Tropfen induzierten Wellen sind.

Die Aufgabe gliedert sich in folgende Teilaufgaben:

- 1. Kurze Literaturrecherche zu Kapillarwellen**
- 2. Entwicklung und Konstruktion eines Kapillarwellengenerators zur Anregung von Oberflächenwellen mit Frequenz in der Größenordnung von 700 bis 800 Hz**
- 3. Implementierung des neuen Kapillarwellengenerators in den Versuchstand**
- 4. Durchführung von Experimenten zur Demonstration der Funktionstauglichkeit des Kapillarwellengenerators**
- 5. Dokumentation der Arbeit**

---

## Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß § 22 Abs. 7 APB TU Darmstadt

Hiermit versichern wir, Joshua Fischer, Anton Riccardo Gnabs, Benjamin Traut, Benedikt Sesterhenn, das vorliegende Advanced Design Project ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Uns ist bekannt, dass im Falle eines Plagiats (§38 Abs.2 APB) ein Täuschungsversuch vorliegt, der dazu führt, dass die Arbeit mit 5,0 bewertet und damit ein Prüfungsversuch verbraucht wird.

---

Datum / Date:

22.04.2022

Unterschrift:

B. Sesterhenn

Unterschrift:

A. Gnabs

Unterschrift:

J. Fischer

Unterschrift:

Benjamin Traut

---

## Kurzfassung

---

Der Reduktion von Verbrauch und Emission, von Verbrennungs- und Abgasnachbehandlungssystemen, fällt eine wachsende Bedeutung zu. Hierzu ist es unerlässlich die zu Grunde liegenden Transportprozesse in dünnen Wand-Fluid-Filmen zu verstehen. Dabei ist die Rolle von gestörten Dünnschichten bisher nur unzureichend verstanden. Hierzu soll im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden, wie gestörte Dünnschichten mit definierten Parametern reproduzierbar hergestellt werden können.

Es konnte ein Kapillarwellengenerator entwickelt werden, der die durch den Tropfenauflauf induzierten Kapillarwellen nachbilden kann. Es wurden mehrere Konzepte bewertet und schließlich ein akustischer Kapillarwellengenerator als Konzept ausgewählt. Die induzierten Kapillarwellen des akustischen Generators sind dabei vergleichbar mit denen eines Wassertropfens mit 2,2 mm Durchmesser. Es konnte gezeigt werden, dass sich mit Hilfe einer Variation in der Erregungsfrequenz des akustischen Generators die Kapillarwellen von Tropfenaufläufen mit verschiedenen Fallhöhen, also Weberzahlen, nachbilden lassen. Eine Methode zur Bestimmung der Wellenparameter wurde dargelegt. Weiterhin konnten Anomalien, wie z.B. Riffelungen auf den induzierten Wellen des Tropfenauflaufs beobachtet werden.

# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	V
Symbolverzeichnis	VIII
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XII
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Theoretische Grundlagen</b>	<b>2</b>
2.1 Physik des Tropfenaufpralls .....	2
2.1.1 Dimensionslose Kennzahlen.....	2
2.1.2 Berechnung der Tropfengeschwindigkeit .....	3
2.1.3 Tropfenaufprall auf fluiden Dünnsfilm .....	4
2.2 Klassifizierung der Kapillarwellen .....	5
2.3 Erzeugung von Kapillarwellen .....	7
2.3.1 Mechanisches Wirkprinzip .....	8
2.3.2 Akustisches Wirkprinzip.....	11
2.3.3 Elektrostatisches Wirkprinzip.....	14
<b>3 Konzeptauswahl</b>	<b>15</b>
3.1 Bestehender Prüfstand und Anforderungen.....	15
3.2 Konzeptentwicklung und -bewertung.....	16
3.2.1 Bewertung des mechanischen Wirkprinzips .....	16
3.2.2 Bewertung des akustischen Wirkprinzips .....	17
3.2.3 Bewertung des elektrostatischen Wirkprinzips .....	17
3.3 Konzeptentscheidung.....	18
<b>4 Konstruktion</b>	<b>19</b>
4.1 Wellengenerator .....	19
4.2 Befestigung und Gestell .....	20
4.3 Konfokalsensor .....	23
4.4 Elektronische Ansteuerung .....	24

<b>5 Versuchsaufbau</b>	<b>27</b>
5.1 Versuchsdurchführung.....	27
5.2 Versuchsdatenverarbeitung.....	28
<b>6 Messergebnisse</b>	<b>29</b>
6.1 Oberflächenwellen auf dem Wasserreservoir.....	29
6.1.1 Oberflächenwellen des Tropfenaufpralls .....	30
6.1.2 Oberflächenwellen des akustischen Generators.....	31
6.1.3 Vergleich der Tropfenwellen mit den akustisch generierten Oberflächenwellen .....	33
6.2 Oberflächenwellen auf dem Dünnfilm.....	34
6.2.1 Oberflächenwellen des Tropfenaufpralls .....	35
6.2.2 Oberflächenwellen des akustischen Generators.....	37
6.2.3 Vergleich der Tropfenwellen mit den akustisch generierten Oberflächenwellen .....	39
6.3 Bestimmung der Wellenparameter.....	40
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>45</b>
<b>8 Literaturverzeichnis</b>	<b>46</b>
<b>Anhang</b>	<b>49</b>

---

## Symbolverzeichnis

---

$v$	Geschwindigkeit .....	[m/s]
$D$	Tropfendurchmesser .....	[m]
$h_{film}$	Filmdicke .....	[m]
$\rho$	Dichte .....	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Oberflächenspannung .....	[N/m]
$\eta$	dynamische Viskosität .....	[m <sup>2</sup> /s]
$We$	Weberzahl .....	[-]
$Re$	Reynoldszahl .....	[-]
$Oh$	Ohnesorgzahl .....	[-]
$Fr$	Froudezahl .....	[-]
$\bar{H}$	dimensionslose Filmdicke .....	[-]
$d_{drop}$	Tropfendurchmesser .....	[m]
$V$	Tropfenvolumen .....	[m <sup>3</sup> ]
$v_{drop}(t)$	vertikale Fallgeschwindigkeit .....	[m]
$g$	Erdbeschleunigung .....	[m/s <sup>2</sup> ]
$h$	Fallhöhe .....	[m]
$K_2$	Spritzschwelle .....	[-]
$d$	Durchmesser .....	[m]
$a$	Distanz vom Fokalsensor zum Mittelpunkt .....	[m]
$b$	Distanz vom Fokalsensor zum Rand .....	[m]
$T_1$	Zeitpunkt erste Welle in Konfokalsensor .....	[s]
$T_2$	Zeitpunkt erste Reflexion in Konfokalsensor .....	[s]
$c$	Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle .....	[m/s]
$\lambda$	Wellenlänge .....	[m]
$f$	Frequenz .....	[1/s]
$t$	Zeit .....	[s]
$\tau$	Relaxationszeit .....	[s]



---

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1: Schematische Darstellung hydrodynamischer Mechanismen beim Tropfenaufprall im Dünnsfilm in Abhängigkeit von $h/D$ : (a) Schnitt durch Dünnsfilm und Tropfen (ggf. mit Zirkulationsgebiet); (b) Zweischichtenströmung ohne Zirkulationsgebiet; (c) Bildung Korona mit Sekundärtropfen; (d) reine Korona mit stehenden Oberflächenwellen (Innenbereich) und wandernden Oberflächenwellen (Außenbereich) [7] .....	4
Abbildung 2: Unterteilung Wellenkategorien [9] .....	7
Abbildung 3: Überblick der Wellengeneratoren [6] .....	8
Abbildung 4: Schematischer Aufbau des Akustikgenerators mit Übertragungsmedium Glasplatte [9] ...	9
Abbildung 5: Erzeugung der Kapillarwellen durch einen Elektromagneten [8] .....	10
Abbildung 6: Erzeugung der Kapillarwellen durch schwebenden Magneten [15] .....	11
Abbildung 7: Versuchsaufbau von Krutyansky et al. [20] .....	12
Abbildung 8: Versuchsaufbau von Shmyrov et al. (2) Messzelle, (3) Boden der Küvette, (4) freie Oberfläche, (6) Lautsprecher, (7) Wellenleiter, (8) Oberfläche der Küvette.[21] .....	13
Abbildung 9: Schematische Darstellung des Elektrokapillareffekts in Anlehnung an [23].....	14
Abbildung 10: Lautsprecher (vordere Ansicht).....	19
Abbildung 11: Lautsprecher (hintere Ansicht) .....	20
Abbildung 12: Trichter .....	20
Abbildung 13: Halterung für Wellengenerator (obere und schräge Ansicht) .....	21
Abbildung 14: Wellengenerator mit Halterung im zusammengebauten Zustand (seitliche und obere Ansicht) .....	21
Abbildung 15: drehbare Halterung (obere Ansicht) .....	21
Abbildung 16: Adapterplatte (obere Ansicht).....	22
Abbildung 17: Höhenverstellung der Montageplatte (links); Höhenverstellung mit Winkelverstellung (mittig); Wellengenerator mit Gestell (rechts) .....	22
Abbildung 18: Konfokalsensor Halterung.....	23
Abbildung 19: Der Versuchsaufbau als Draufsicht. Der Tropfenaufprall bzw. der Wellengenerator befindet sich dabei im Mittelpunkt des Flüssigkeitsreservoirs mit dem Durchmesser $d$ . Im Abstand $a$ vom Mittelpunkt wurde der Konfokalsensor platziert. Dieser besitzt den Abstand $b$ zum Rand. (Wasserreservoir: $a = 1$ cm, $b = 5$ cm, $d = 12$ cm; Dünnsfilm: $a = 1$ cm, $b = 2$ cm, $d = 6$ cm).....	27
Abbildung 20: Der zeitliche Verlauf der Oberflächenwellen des Tropfenaufpralls auf dem Wasserreservoir verschiedener Fallhöhen. Der Abstand zum Zentrum des Aufpralls beträgt 1 cm und die maximale Amplitude der Wellen wurde auf den Zeitpunkt $t = 50$ ms gesetzt.....	30

Abbildung 21: Die Oberflächenwellen des akustischen Generators auf dem Wasserreservoir in Abhängigkeit verschiedener Abstände des Wellenleiterendes zur Flüssigkeitsoberfläche. Der Abstand zum Zentrum des Aufpralls beträgt 1 cm und die maximale Amplitude der Wellen wurde auf den Zeitpunkt $t = 50$ ms gesetzt. ....	31
Abbildung 22: Die Oberflächenwellen des akustischen Generators auf dem Wasserreservoir in Abhängigkeit verschiedener Erregungsfrequenzen des Lautsprechers. Der Abstand zum Zentrum des Aufpralls beträgt 1 cm und die maximale Amplitude der Wellen wurde auf den Zeitpunkt $t = 50$ ms gesetzt. ....	32
Abbildung 23: Vergleich der Oberflächenwellen des Tropfenaufpralls mit den akustisch generierten Wellen auf dem Wasserreservoir. (a) Vergleich der Fallhöhe von 50 mm mit den Wellen einer Erregungsfrequenz von 160 Hz. (b) Vergleich der Fallhöhe von 80 mm mit den Wellen einer Erregungsfrequenz von 140 Hz. (c) Vergleich der Fallhöhe von 150 mm mit den Wellen einer Erregungsfrequenz von 100 Hz.....	33
Abbildung 24: Der zeitliche Verlauf der Oberflächenwellen des Tropfenaufpralls auf dem Dünnsfilm für verschiedene Fallhöhen. Der Abstand zum Zentrum des Aufpralls beträgt 1 cm und die minimale Amplitude der Wellen wurde auf den Zeitpunkt $t = 50$ ms gesetzt. ....	35
Abbildung 25: Die Oberflächenwellen des akustischen Generators auf dem Dünnsfilm in Abhängigkeit verschiedener Abstände des Wellenleiterendes zur Flüssigkeitsoberfläche. Der Abstand zum Zentrum des Aufpralls beträgt 1 cm und die minimale Amplitude der Wellen wurde auf den Zeitpunkt $t = 50$ ms gesetzt. ....	37
Abbildung 26: Die Oberflächenwellen des akustischen Generators auf dem Dünnsfilm in Abhängigkeit verschiedener Erregungsfrequenzen des Lautsprechers. Der Abstand zum Zentrum des Aufpralls beträgt 1 cm und die minimale Amplitude der Wellen wurde auf den Zeitpunkt $t = 50$ ms gesetzt. ....	38
Abbildung 27: Vergleich der Oberflächenwellen des Tropfenaufpralls mit den akustisch generierten Wellen auf dem Dünnsfilm. (a) Vergleich der Fallhöhe von 80 mm mit den Wellen einer Erregungsfrequenz von 140 Hz. (b) Vergleich der Fallhöhe von 100 mm mit den Wellen einer Erregungsfrequenz von 120 Hz. (c) Vergleich der Fallhöhe von 120 mm mit den Wellen einer Erregungsfrequenz von 100 Hz.....	39
Abbildung 28: Der zeitliche Verlauf einer Oberflächenwelle mit auftretenden Reflexionen vom Rand des Wasserreservoirs. Der Zeitpunkt $T_1$ markiert dabei das erste Auftreten von Wellen am Konfokalsensor und der Zeitpunkt $T_2$ markiert das erste Auftreten von Reflexionen. Die gestrichelte rote Linie repräsentiert den Fehler bei der Bestimmung der jeweiligen Zeitpunkte....	40
Abbildung 29: Vergleich der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der dimensionslosen Filmdicken mit den experimentellen Werten von Ersoy et al. ( $We = 125$ )	Die Versuche des

akustischen Generators wurden mit einer Erregungsfrequenz von 100 Hz durchgeführt und die Tropfenaufrallversuche der vorliegenden Arbeit wurden mit einer Fallhöhe von 150 mm ( $We = 87$ ) durchgeführt. [25] Die Balken repräsentierten den jeweiligen Fehler. ....	41
Abbildung 30: (a) Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen auf dem Dünnfilm in Abhängigkeit der Fallhöhe des Tropfenaufralls. (b) Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen auf dem Dünnfilm in Abhängigkeit der Erregungsfrequenz des akustischen Generators. Der blaue Balken repräsentiert den Fehler, berechnet durch die Fehlerfortpflanzung. ....	42
Abbildung 31: (a) Die Wellenlänge der Wellen auf dem Dünnfilm in Abhängigkeit der Fallhöhe des Tropfenaufralls. (b) Die Wellenlänge der Wellen auf dem Dünnfilm in Abhängigkeit der Erregungsfrequenz des akustischen Generators. Der blaue Balken repräsentiert den Fehler, berechnet durch die Fehlerfortpflanzung. ....	43
Abbildung 32: (a) Die Frequenz der Wellen auf dem Dünnfilm in Abhängigkeit der Fallhöhe des Tropfenaufralls. (b) Die Frequenz der Wellen auf dem Dünnfilm in Abhängigkeit der Erregungsfrequenz des akustischen Generators. Der blaue Balken repräsentiert den Fehler, berechnet durch die Fehlerfortpflanzung. ....	44

---

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 1: Weberzahlen und Aufprallgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Fallhöhe des Tropfenaufpralls .....	27
--	----

---

## 1 Einleitung

---

Der Reduktion von Verbrauch und Emission, von Verbrennungs- und Abgasnachbehandlungssystemen, fällt eine wachsende Bedeutung zu. Hierzu ist es unerlässlich die zu Grunde liegenden Transportprozesse in dünnen Wand-Fluid-Filmen zu verstehen. Dabei wird den Wechselwirkungen zwischen Tropfen- und Wandfilmflüssigkeit eine große Rolle zugeschrieben. Die bisherige Forschung hat sich dabei auf Tropfenaufprallversuche auf initial ungestörte Dünnsfilme konzentriert. Dabei treten in der Realität nur selten ungestörte Wandfilme auf, da diese durch vorangegangene Tropfenaufpralle gestört und in Bewegung versetzt werden. Die Erforschung des Tropfenaufpralls auf initial gestörte fluide Dünnsfilme und das Verständnis des Impuls- und Speziestransport ist also von großer Bedeutung.

Hierzu soll im ersten Schritt ein Wellengenerator entwickelt werden, mit dem sich ein initial gestörter Dünnsfilm erzeugen lässt. Der Wellengenerator soll hierbei definierte Kapillarwellen erzeugen, welche vergleichbar mit den Wellen, erzeugt durch Tropfenaufprall, sind.

Hierfür werden zuerst die theoretischen Grundlagen des Tropfenaufpralls und der Kapillarwellen dargelegt. Weiterhin wird eine Übersicht über die Methoden der Kapillarwellenerzeugung gegeben. Ausgehend von den verschiedenen Methoden der Wellenerzeugung werden verschiedene Konzepte erwogen und bewertet. Ein Konzept, basierend auf einem akustischen Wellengenerator, wird ausgewählt und konstruiert. Es werden Versuche mit verschiedenen einstellbaren Parametern des akustischen Generators auf einem Wasserreservoir und einem fluiden Dünnsfilm durchgeführt, und mit Vergleichsmessungen eines Tropfenaufpralls kompariert. Weiterhin werden die Ausbreitungsgeschwindigkeit, Wellenlänge und Frequenz der erzeugten Oberflächenwellen bestimmt. Es folgen eine Zusammenfassung der Arbeit und ein Ausblick auf das weitere Forschungsfeld.

---

## 2 Theoretische Grundlagen

---

### 2.1 Physik des Tropfenaufpralls

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen des Tropfenaufpralls behandelt. Im Rahmen dieser Arbeit bezieht sich der Tropfenaufprall zu einem Aufprall auf einen Flüssigkeitsfilm. Dieses Kapitel wird mit den dimensionslosen Kennzahlen begonnen, die für die Charakteristik des Tropfenaufpralls relevant sind. Im Anschluss wird auf die Berechnung der Tropfengeschwindigkeit eingegangen. Das Kapitel wird mit der Beschreibung des Tropfenaufpralls auf einen fluiden Dünnsfilm abgeschlossen, welcher Grundlage für die Entwicklung eines Kapillarwellengenerators bietet.

#### 2.1.1 Dimensionslose Kennzahlen

Der Aufprall eines Tropfens auf einen Flüssigkeitsfilm wird wesentlich durch die Geschwindigkeit  $v$  und den Tropfendurchmesser  $D$  charakterisiert. Darüber hinaus ist, besonders beim Tropfenaufprall auf einen Flüssigkeitsfilm, die Filmdicke  $h_{film}$  zu betrachten. Diese Parameter können in dimensionslosen Kennzahlen dargestellt werden, den Reynolds- und Weber-Zahlen. Dadurch können Strömungen und hydrodynamische Phänomene, die durch den Tropfenaufprall auftreten, definiert werden. Die Weberzahl (2.1) wird als Verhältnis von Impuls zu Kapillarkräften verstanden und ist insbesondere ein Maß für die Tropfenformung. Die Reynoldszahl gibt Aussage über die Art der Strömung (Gleichung (2.2)). Sie ist als das Verhältnis von Trägheits- zu Viskositätskräften definiert. Neben dem Tropfendurchmesser  $D$  und der Geschwindigkeit  $v$  gehen die Dichte  $\rho$ , die Oberflächenspannung  $\sigma$  und die dynamische Viskosität  $\eta$  in die Gleichungen ein. Die Kombination dieser Parameter ergeben folgende dimensionslose Kennzahlen, um universelle Ergebnisse aus Experimenten oder Simulationen zu erhalten: [1] [2]

$$We = \frac{\rho v^2 D}{\sigma} \quad (2.1)$$

$$Re = \frac{\rho v D}{\eta} \quad (2.2)$$

$$Oh = \frac{\eta}{\sqrt{\rho \sigma D}} \quad (2.3)$$

$$Fr = \frac{v^2}{g D} \quad (2.4)$$

$$\bar{H} = \frac{h_{film}}{D} \quad (2.5)$$

$Oh$ ,  $Fr$  und  $\bar{H}$  sind hierbei die Ohnesorge-Zahl (Zähigkeitseinfluss bei der Deformation von Tropfen und Blasen), Froude-Zahl (Verhältnis von Trägheitskräften zu Schwerkraften) und die dimensionslose Filmdicke.

### 2.1.2 Berechnung der Tropfengeschwindigkeit

Hierbei kann der Tropfendurchmesser durch das Tropfenvolumen der Flüssigkeit berechnet werden. Die Annahme des kugelförmigen Volumens des Tropfens ist durch den Einfluss der Oberflächenspannung zu begründen, welcher sich im Bestreben für das Erreichen eines Energieminimums zeigt. Die Kugelform erlaubt dabei dem Tropfen die kleinstmögliche Oberfläche. Demnach wird der Tropfendurchmesser  $D$  durch folgende Gleichung (2.6) berechnet: [3]

$$V = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D}{2}\right)^3 \quad (2.6)$$

Die Endtropfengeschwindigkeit, die als vertikale Fallgeschwindigkeit  $v_{drop}(t)$  definiert ist, wird durch Gleichung (2.7) berechnet. Hierbei gehen die Relaxationszeit  $\tau$ , die Erdbeschleunigung  $g$ , sowie die Startgeschwindigkeit  $v_{vi}$  in die Berechnung ein. [4] [5]

$$v_{drop}(t) = \tau g + (v_{vi} - \tau g) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.7)$$

Wobei die Relaxationszeit  $\tau$  mit dem Tropfendurchmesser  $D$ , der Viskosität  $\eta$  von Luft und der Dichte  $\rho$  berechnet wird. [4] [5]

$$\tau = \frac{1}{18} \frac{D^2}{\eta} \rho \quad (2.8)$$

Der Geschwindigkeit des Tropfens lässt sich darüber hinaus mit der Gravitationskraft und dem Luftwiderstand (Gesetz von Stokes) berechnen. In die Berechnung der Stokeskraft Gleichung (2.9) gehen die Tropfengeschwindigkeit  $v_{drop}$ , sowie die Viskosität  $\eta$  der Luft ein. [5]

$$F_{Stokes} = 3\pi\eta Dv \quad (2.9)$$

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Endtropfengeschwindigkeit durch Gleichung (2.10) vereinfacht berechnet. Hierbei gehen die Erdbeschleunigung  $g$  und die Fallhöhe  $h$  in die Berechnung ein.

$$v_{drop} = \sqrt{2gh} \quad (2.10)$$

### 2.1.3 Tropfenaufprall auf fluiden Dünnsfilm

Der Tropfenaufprall hängt in der fluiden Phase besonders von der Dichte, der Viskosität und der Oberflächenspannung der Medien ab (vergleiche Kapitel 2.1.1). Die Dynamik des Aufpralls sowie die verschiedenen Mischvorgänge zwischen Tropfen und Flüssigkeitsfilm lassen sich anhand der dimensionslosen Kennzahlen aus Kapitel 2.1.1 darstellen, besonders benötigt werden hierbei die Reynolds- und Weberzahl (Gleichung (2.1) und (2.2)). [1] [6] Wie in Abbildung 1 dargestellt, können beim Tropfenaufprall auf einen Dünnsfilm unterschiedliche hydrodynamische Mechanismen entstehen. Diese werden in Abhängigkeit der dimensionslosen Filmdicke (Gleichung (2.5)) dargestellt. Durch die Abbildung wird deutlich, dass der Speziestransport von unterschiedlichen hydrodynamischen Mechanismen bestimmt werden kann. Bei der Tropfenausbreitung entsteht eine Zweischichtenströmung und ggf. ein Zirkulationsgebiet am Rand. Dadurch kann der Speziestransport im Dünnsfilm wesentlich beeinflusst werden (Abbildung a). Mit zunehmendem Filmdicken- zu Tropfenverhältnis kann beispielsweise eine Zweischichtenströmung ohne ausgeprägtes Zirkulationsgebiet (Abbildung b), die Bildung einer Korona mit Sekundärtropfenbildung (Abbildung c) oder eine reine Korona, bei der nach dem Zusammenfall im Innenbereich stehende Oberflächenwellen und im Außenbereich wandernde Oberflächenwellen gebildet werden, entstehen (Abbildung d). [1] [7]

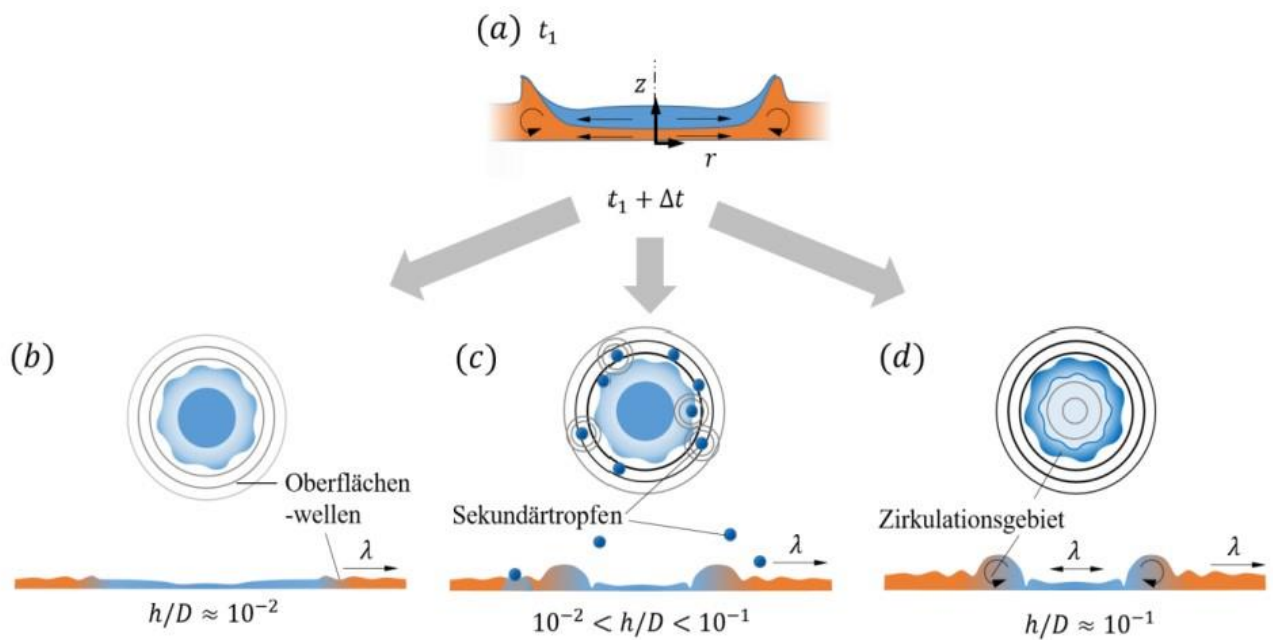


Abbildung 1: Schematische Darstellung hydrodynamischer Mechanismen beim Tropfenaufprall im Dünnsfilm in Abhängigkeit von  $h/D$ : (a) Schnitt durch Dünnsfilm und Tropfen (ggf. mit Zirkulationsgebiet); (b) Zweischichtenströmung ohne Zirkulationsgebiet; (c) Bildung Korona mit Sekundärtropfen; (d) reine Korona mit stehenden Oberflächenwellen (Innenbereich) und wandernden Oberflächenwellen (Außenbereich) [7]

Eine wichtige Rolle nehmen außerdem die Wellenparameter, also die Wellenlänge, Frequenz und Ausbreitungsgeschwindigkeit ein. Um diese zu bestimmen, wird angenommen, dass der Tropfenaufprall



eine harmonische Welle erzeugt. Für eine Potentialströmung können die Kontinuitäts- und Impulsgleichungen zu einer Laplace Gleichung in Abhängigkeit des Geschwindigkeitspotentials vereinfacht werden:

$$\frac{c^2}{gh_{film}} = \frac{\lambda}{2\pi h_{film}} \left[ 1 + \frac{\sigma}{\rho g} \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \right] \tanh \frac{2\pi h_{film}}{\lambda} \quad (2.11)$$

Dabei ist  $g$  die Erdbeschleunigung,  $c$  die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen,  $\lambda$  die Wellenlänge,  $\sigma$  die Oberflächenspannung des Fluids und  $\rho$  die Dichte des Fluids.

Bei Kapillarwellen mit Wellenlängen  $\lambda \sim 1$  mm ist der Term  $\frac{\sigma}{\rho g} \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \gg 1$ , sodass die Erdbeschleunigung  $g$  auf beiden Seiten der Gleichung eliminiert werden kann. Weiterhin wird die Annahme getroffen, dass  $\tanh \frac{2\pi h_{film}}{\lambda} \approx 1$ . Mit Hilfe dieser Annahmen vereinfacht sich Gleichung 2.11 zu Gleichung 2.12. Diese ergibt einen direkten Zusammenhang der Ausbreitungsgeschwindigkeit zur Wellenlänge.

Über den Zusammenhang  $f = c/\lambda$  kann somit die Frequenz der Wellen  $f$  ermittelt werden. [8]

$$c = \left( \frac{2\pi\sigma}{\rho\lambda} \right)^{1/2} \quad (2.12)$$

## 2.2 Klassifizierung der Kapillarwellen

Kapillarwellen können Flüssigkeitsfilme und Tropfen destabilisieren oder durch verschiedene Mechanismen Einfluss auf diese nehmen. Daher ist die Untersuchung von Kapillarwellen in vielen Bereichen von Interesse. [9] Kapillarwellen sind Wellen, die eine Wellenlänge von nur einigen Millimetern aufweisen. Bei diesen wird die Rückstellkraft von der Oberflächenspannung bestimmt. [10]

Mittels der Eigenschaften der Kapillarwellen können viele Parameter der betrachteten Flüssigkeit ermittelt werden. Über die Wellenlänge kann die Oberflächenspannung bestimmt werden. Die Abklingzeit und Abklingdauer werden von der Viskosität, der Gibb'schen Elastizität sowie von der Adsorptions- und Desorptionskinetik und der damit einhergehenden Oberflächenviskosität beeinflusst. [9] Besonders in Dünnschichten nehmen Kapillarwellen Einfluss auf die wirkenden Oberflächenkräfte. [7]

Wellen können grundsätzlich in drei Kategorien eingeteilt werden. Gravitations- oder Schwerewellen ( $< 1$  Hz) werden maßgeblich von der Gravitation beeinflusst. Diese können weitergehend in Kapillarschwerewellen, bei denen die Schwerkraft und die Oberflächenspannung einen vergleichbaren Einfluss haben [10] (Wellenlänge zwischen 1-10 mm und einer Frequenz von 10-100 Hz bei Wasser), und in reine Schwerewellen (Wellenlänge über 1 cm und eine Frequenz unter 10 Hz) unterteilt werden. [9]

---

Mit einer Frequenz von über 10 kHz sind thermische Kapillarwellen weitaus kleiner als die hier betrachteten Kapillarwellen, die eine Frequenz von über 100 Hz aufweisen. [9]

An der Oberfläche von Newton'schen Flüssigkeiten liefern die Navier-Stokes und Laplace Gleichungen, für die Bedingungen der Wellenausbreitung, eine einzige Lösung. Dies entspricht einer schwach abklingenden Transversalwelle. Wird hingegen die Grenzfläche zwischen zwei Flüssigkeitsfilmen betrachtet, so ergeben sich zwei Lösungen, die die Wellenmodi bestimmen. Diese zwei Wellenmodi sind der reguläre transversale Modus (Laplace) und der schnell abklingende Modus (Marangoni oder Lucassen). Bei gleicher Frequenz unterscheiden sich die beiden Modi in der Wellenlänge, der Abklinglänge und dem Durchdringen in der Flüssigkeit. [9]

Werden Kapillarwellen des Laplacemodus betrachtet, so ist die Abklinglänge stark durch die Oberflächenelastizität beeinflusst. Ist hingegen die Oberflächenelastizität größer als das Ein- bis Dreifache der Oberflächenspannung, so wird die Oberfläche tangential unbeweglich und der Einfluss der dynamischen Oberflächeneigenschaften nimmt ab. [9]

Des Weiteren können die Laplacewellen in lineare und nicht-lineare Kapillarwellen unterteilt werden. Ist die Amplitude von der Größenordnung der Wellenlänge, so sind nicht-lineare Effekte zu beobachten. [9]

Bei linearen Kapillarwellen kann die Geometrie der Wellen abweichen. Die Wellen können sich ausbreiten oder stehend, sowie flach oder radial sein. Dies wird durch die Art der Entstehung der Wellen bestimmt. Ebenfalls wird das Abklingverhalten maßgeblich von der Quellenart beeinflusst. Werden die Wellen von einer stationären Quelle mit konstanter Leistung erzeugt, so stellen sich, nach einer kurzen instationären Periode, Wellen ein, die räumlich abklingen und eine zeitunabhängige Amplitude aufweisen. Tritt nur eine kurze Störung der Oberfläche auf, so klingen die Wellen auch zeitlich ab. [9]

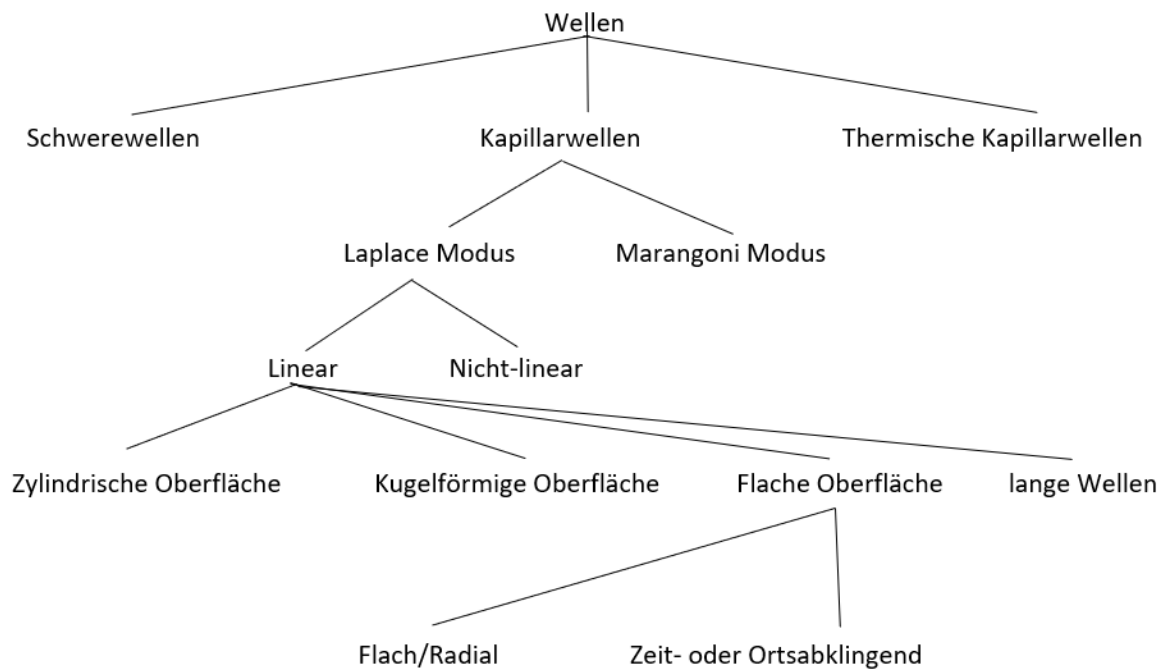


Abbildung 2: Unterteilung Wellenkategorien [9]

### 2.3 Erzeugung von Kapillarwellen

Kapillarwellen werden durch Generatoren erzeugt, die in unterschiedliche Wirkprinzipien unterteilt werden können. Wie Abbildung 3 zu entnehmen, können diese in die nachfolgenden Wirkprinzipien unterteilt werden: elektrokapillar, mechanisch, pneumatisch und akustisch. Auf diese werden in den folgenden Kapiteln näher eingegangen. Um ausgehend von einem Generator Kapillarwellen charakterisieren zu können, wird ein Detektor benötigt, auf den in Kapitel 4 eingegangen wird. [9]

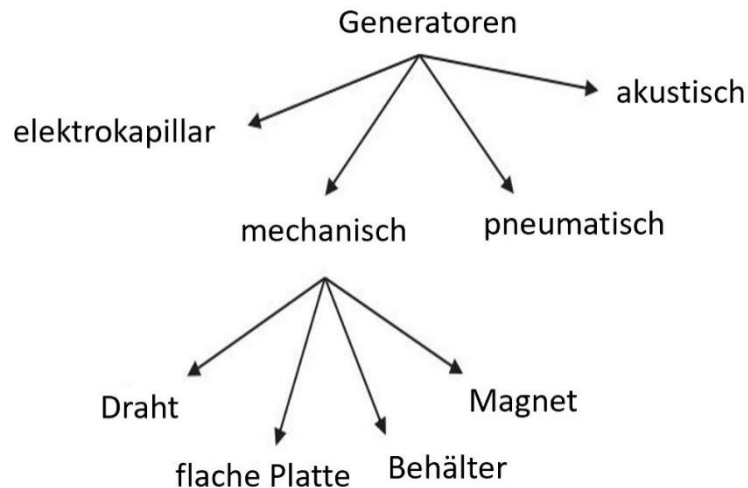


Abbildung 3: Überblick der Wellengeneratoren [6]

### 2.3.1 Mechanisches Wirkprinzip

Zur Erzeugung von Kapillarwellen ist das mechanische Wirkprinzip am weitesten verbreitet. [9] Mechanische Generatoren sind aufgrund der einfachen Konstruktion und den vielfältigen Steuerungsmöglichkeiten der Wellenamplitude vorteilhaft. Darüber hinaus sind diese Generatoren vielseitig einsetzbar, da der Generator flache, radiale, lineare und nichtlineare Kapillarwellen an jeder beliebigen Oberfläche erzeugen kann. Nachteilig dagegen ist das Auftreten von möglichen nichtlinearen Schwingungen, welche in die Bereiche der Resonanzfrequenz der Übertragungsvorrichtung kommen können. Des Weiteren spielen der Kontaktwinkel sowie der Meniskus eine entscheidende Rolle beim Erzeugen von Kapillarwellen. Hierbei ist eine komplexe und genaue Betrachtungsweise erforderlich. Ein weiterer Nachteil wird durch den erforderlichen Reinigungsaufwand sichtbar, der bei direktem Kontakt von Übertragungsmedium und Fluid entsteht. Um eine Verfälschung der Messergebnisse zu vermeiden, muss daher das Übertragungsmedium sorgfältig und aufwendig gereinigt werden. [9] Im Rahmen dieser Arbeit wird die mechanische Wellenerzeugung in die Übertragungsarten des direkten Kontaktes von Fluid und Übertragungsmedium und des indirekten Kontakts eingeteilt.

Nachfolgend wird zuerst auf die Wellenübertragungsweise mit direktem Kontakt eingegangen. Hierbei besteht der Wellengenerator aus einem elektromagnetischen Akustikgenerator und einem Wellenübertragungsmedium. Der Akustikgenerator wird im hier dargestellten Beispiel als Sinusspannungsgenerator ausgeführt, der mit einem elektromagnetischen Vibrator verbunden ist. Wie in Abbildung 3 dargestellt, kann das mechanische Wirkprinzip außerdem durch unterschiedliche Übertragungsmedien weiter kategorisiert werden, auf die folglich eingegangen wird. [9]

Als Übertragungsvorrichtung, um vom Akustikgenerator ausgehend, Kapillarwellen auf einem Flüssigkeitsfilm zu erzeugen, kann eine eingetauchte Platte verwendet werden. In Abbildung 4 ist eine mögliche

schematische Ausführung eines solchen Versuchsaufbaus dargestellt, wobei ein Glasobjektträger als Übertragungsmedium dient. Der Lautsprecher (CISATON, EX605) dient hierbei als Erreger, ist vertikal beweglich und wird von einem sinusförmigen Spannungssignal angetrieben. Das Spannungssignal wird hierbei von einem Impulsgenerator und einem Verstärker erzeugt. Dabei sind die Frequenz und die Amplitude der Kapillarwellen steuerbar. [9]

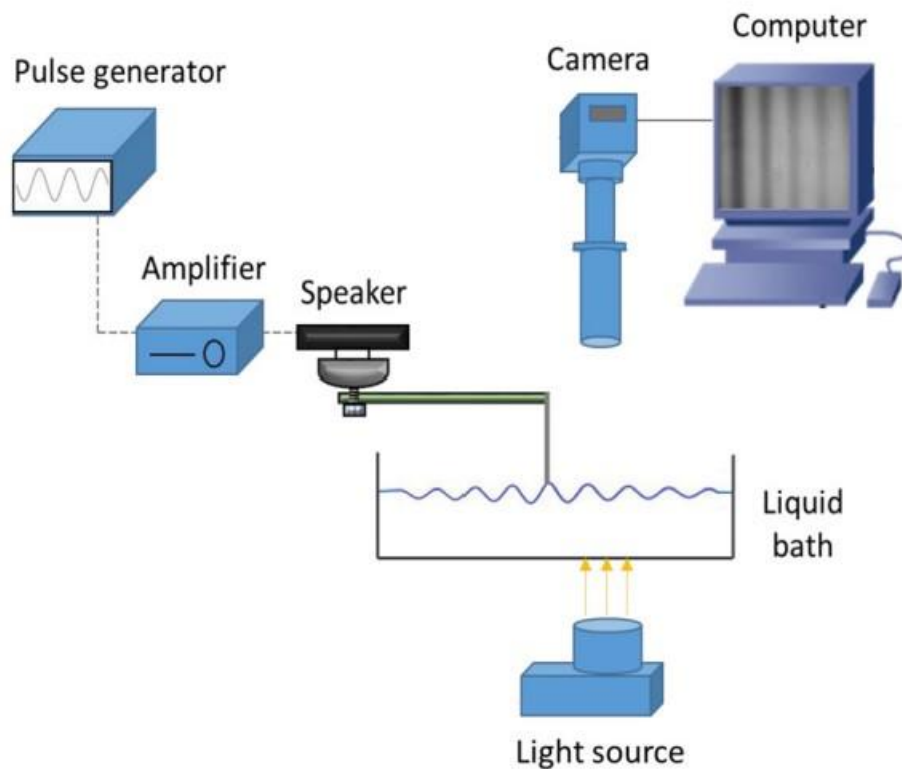


Abbildung 4: Schematischer Aufbau des Akustikgenerators mit Übertragungsmedium Glasplatte [9]

In dem dargestellten Versuchsaufbau wird der Glasobjektträger ( $50 \times 30 \times 0,8 \text{ mm}^3$ ) mittig in der Petrischale positioniert und eingetaucht. Der Abstand des Glasobjektträgers und der Wand der Petrischale sind dabei so angesetzt, dass keine reflektierenden Wellen mit den erzeugten Kapillarwellen des Glasobjektträgers interferieren. Die eine Seite des Objektträgers ist leicht in den Flüssigkeitsfilm eingetaucht. Die andere Seite ist mit dem Lautsprecher verbunden, wodurch der Objektträger vertikal und horizontal bewegt werden kann. Dadurch kann unter anderem die Eintauchtiefe des Objektträgers variiert werden. Die Ausbreitungsrichtung der Kapillarwellen ist dabei horizontal. [9]

Die Kapillarwellen können darüber hinaus auch durch einen dünnen Draht [11] [12] oder einen Kunststoffzylinder [13] als Übertragungsmedium im Flüssigkeitsfilm entstehen. Die Übertragungsmedien sind hierbei ebenfalls mit dem Akustikgenerator verbunden. [11] [12] [13] Für diese direkte Übertragungsart

muss das Übertragungsmedium sorgfältig gereinigt werden. Oberflächenaktive Verunreinigungen könnten sonst zu Messergebnisverfälschungen führen. Die Reinigung erfolgt hierbei oftmals durch Absaugen mittels Mikrometerspritzen oder Abspülen. [9] [14]

Nachfolgend wird auf die indirekte Erzeugung von Kapillarwellen eingegangen. Eine mögliche Ausführung ist in Abbildung 5 dargestellt. Durch einen Elektromagneten und dessen resultierenden Vibration im Behälter werden die Kapillarwellen erzeugt.

Wie in Abbildung 5 abgebildet, ist der Behälter mit Wasser unterfüllt. Durch die Vibration wird der Behälter vertikal in Schwingung versetzt, wodurch mittels der Faraday'schen Instabilität Kapillarwellen im Fluid entstehen. Die Amplitude der Vibration wird dabei oberhalb eines bestimmten Schwellenwertes angesetzt. Geformt werden die Kapillarwellen somit durch den Behälter und gehen von dem Meniskus aus. [15] [16] [17] Hierbei werden stehende zylindrische Wellen ausgebildet, dessen Amplitude proportional zur Stromstärke des Generators ist. [15]

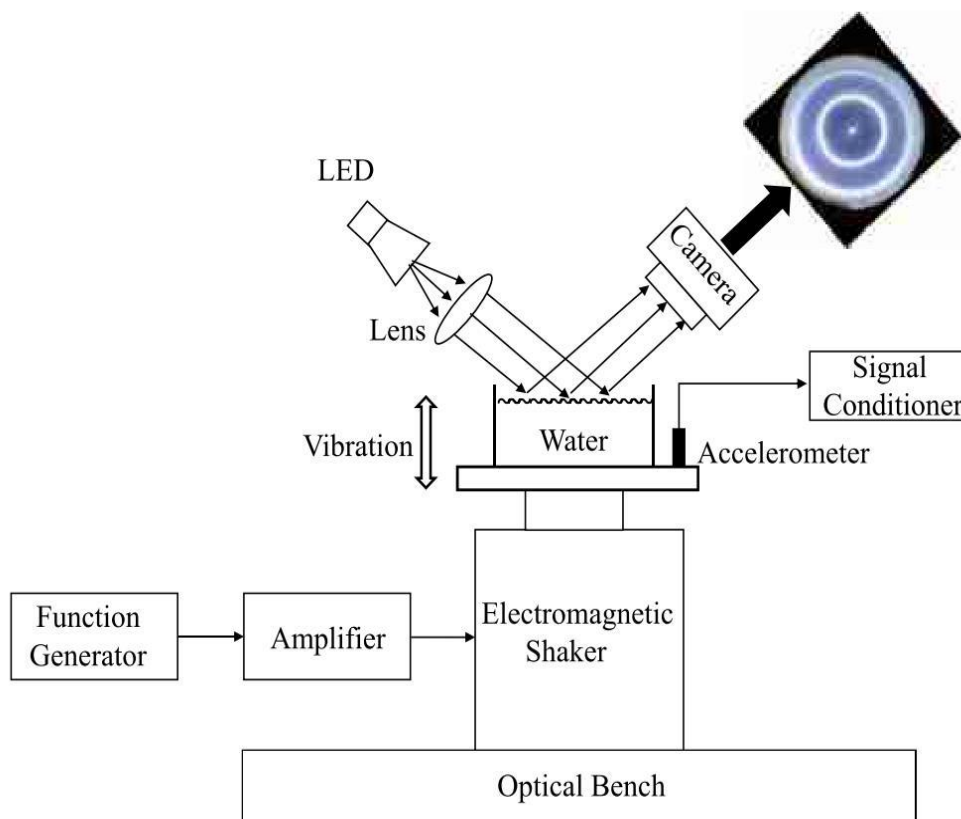


Abbildung 5: Erzeugung der Kapillarwellen durch einen Elektromagneten [8]

Eine weitere Möglichkeit Kapillarwellen zu erzeugen ist in Abbildung 6 abgebildet. In dem hier dargestellten Versuchsaufbau werden ebene Wellen durch vertikale Sinusbewegung erzeugt. Der Magnet ist mit der Abmessung  $80 \times 8 \times 2$  mm ausgeführt und wird von einem Elektromagneten in Schwingung gebracht. Mit dieser Wellenerzeugungsmethode sind Frequenzbereiche von 10 bis 160 Hz möglich. [18]

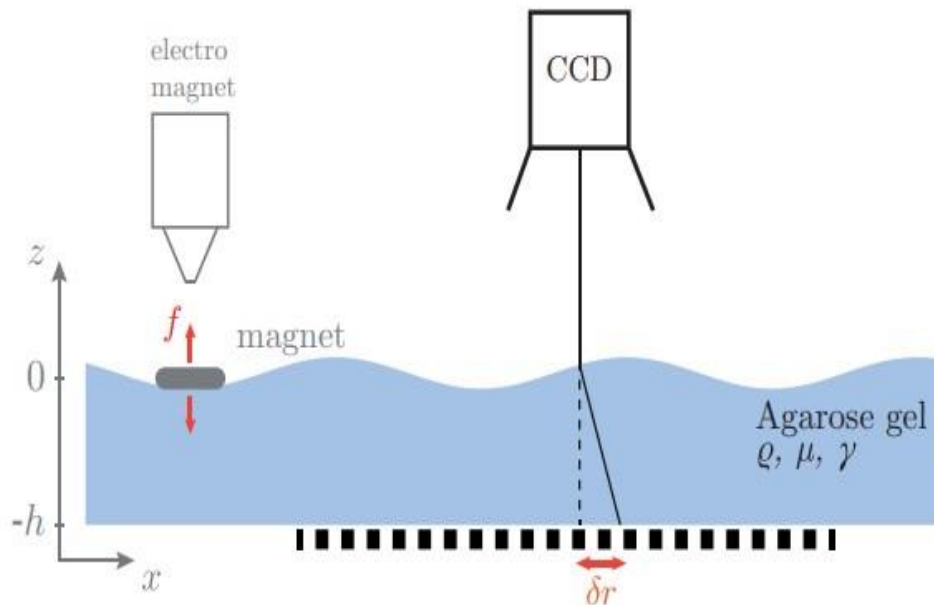


Abbildung 6: Erzeugung der Kapillarwellen durch schwebenden Magneten [15]

### 2.3.2 Akustisches Wirkprinzip

Eine weitere Möglichkeit der Erzeugung kapillarer Wellen basiert auf einem akustischen Wirkprinzip. Diese Art der Wellenerzeugung findet in der Forschung erst seit wenigen Jahren Anwendung. Da die Wellenerzeugung kontaktlos erfolgt, können Wellen unabhängig von den Fluideigenschaften erzeugt werden. Weiterhin kann eine Verunreinigung des Flüssigkeitsfilms durch Kontakt mit dem Wellenerzeuger vermieden werden. Durch das akustische Wirkprinzip können radiale Kapillarwellen erzeugt werden, welche sich auch bei einem Tropfenaufprall ausbilden. Die akustische Wellenerzeugung lässt sich in zwei Arten einteilen. [19]

Die erste Methode basiert auf dem experimentellen Aufbau von Krutyansky et al. [20] und ist in Abbildung 7 dargestellt. Die Kapillarwellen werden durch eine fokussierte Ultraschallwelle an einer Grenzschicht zwischen zwei Flüssigkeiten erzeugt. Dabei wird ein Ultraschallsender von außen an einen Behälter (35 mm Breite, 28 mm Länge, 4 mm Höhe) angebracht. Im Inneren des Behälters befindet sich am Boden eine konkave Aussparung, welche als fokussierende Linse für die Ultraschallwellen dient. Der Brennpunkt der Linse ist dabei auf die Grenzfläche der beiden Flüssigkeiten gerichtet. Dabei können stehende Wellen, durch eine kontinuierliche Ultraschallanregung, oder abklingende Wellen, durch eine

gepulste Ultraschallanregung, erzeugt werden. Für die Erfassung wurde eine Hochgeschwindigkeitskamera verwendet. Als Flüssigkeiten wurden FC72 und Silikonöl verwendet. Die untersuchten Kapillarwellen befanden sich in einem Frequenzbereich von 5 Hz – 30 Hz mit einer maximalen Amplitude von 1,5 mm. [20]

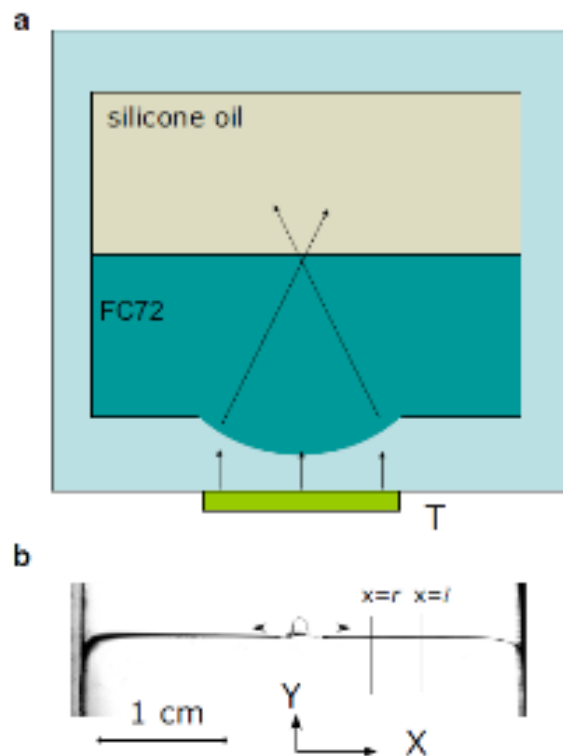


Abbildung 7: Versuchsaufbau von Krutyansky et al. [20]

Eine weitere Methode der akustischen Kapillarwellenerzeugung auf einem Flüssigkeitsfilm wurde in der Arbeit von Shmyrov et al. [21] vorgeschlagen und ist in Abbildung 8 dargestellt. Sie baut auf periodischen, lokalen Druckfluktuationen der Gassäule an der Flüssigkeitsoberfläche auf. Die Druckfluktuationen werden mit Hilfe eines Lautsprechers erzeugt und mit einem Wellenleiter zur Flüssigkeitsoberfläche geleitet. In ihrem Aufbau wurde ein Miniaturlautsprecher an eine schmale Stahlröhre als Wellenleiter (0,8 mm Durchmesser und 25 mm Länge) angeschlossen. Die Stahlröhre wurde senkrecht zur Flüssigkeitsoberfläche im Abstand von 0,1 mm platziert. Es wurden zwei Küvetten mit 2 cm und 9 cm Durchmesser für die Experimente verwendet. Die Filmdicke wurde dabei von 0,3 mm bis 3 mm variiert. Mit dieser Methode konnten stehende Kapillarwellen mit einer Frequenz von 50 Hz – 5000 Hz erzeugt werden. Die maximale Amplitude betrug dabei  $\approx 0,1 \mu\text{m}$ . [21]



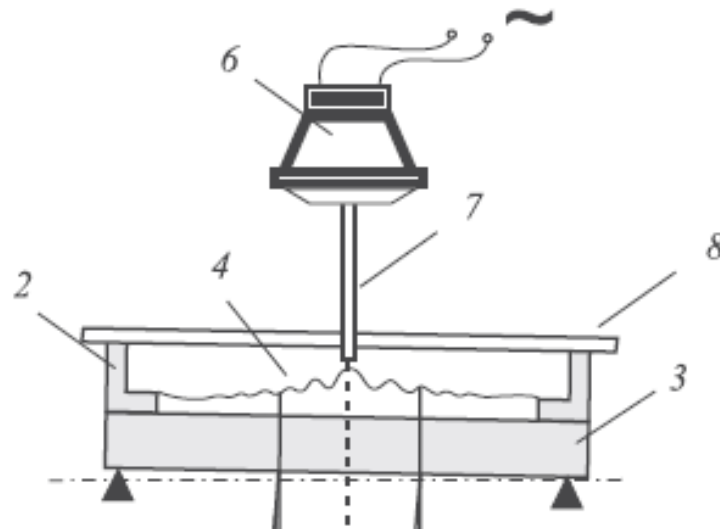


Abbildung 8: Versuchsaufbau von Shmyrov et al. (2) Messzelle, (3) Boden der Küvette, (4) freie Oberfläche, (6) Lautsprecher, (7) Wellenleiter, (8) Oberfläche der Küvette.[21]

Ein entscheidender Vorteil der Kapillarwellenerzeugung durch akustische Anregung ist die Einfachheit ihrer Umsetzung, da sie keine komplexen Bauteile benötigt. Durch die kontaktlose Anregung können Flüssigkeiten unabhängig von ihren elektrischen und chemischen Eigenschaften untersucht werden. [22]

Da der Bereich der akustischen Wellenerzeugung bisher wenig erforscht ist, sind Einflüsse auf die Kapillarwellen durch diese Methode nur schwer abzuschätzen. In der Theorie können die Druckfluktuationen zur lokalen Abkühlung der Flüssigkeitsoberfläche durch gesteigerte Verdunstung führen. Dabei können schon kleine Temperaturschwankungen im Bereich von  $10^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}$  zu einem thermischen Marangoni-Effekt führen [22]. Ein Temperaturgradient führt demnach zu einem Gradienten in der Oberflächenspannung, welcher eine unerwünschte Strömung im Fluid induziert.

### 2.3.3 Elektrostatisches Wirkprinzip

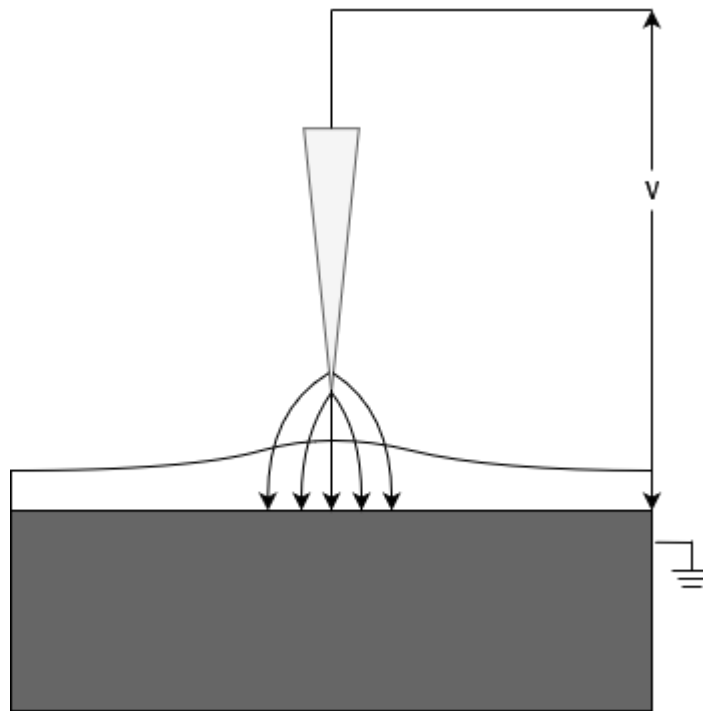


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Elektrokapillareffekts in Anlehnung an [23]

Eines der möglichen Wirkprinzipien zur Erzeugung von Wellen mit konstanter Frequenz basiert auf dem sogenannten Elektrokapillareffekt. Grundlegend besteht dieser Effekt aus der Erzeugung eines elektrischen Feldes, in welches ein Fluid aufgrund seiner höheren Dielektrizitätskonstante im Vergleich zu Luft elektrostatisch angezogen wird. [23]

Eine schematische Darstellung zur praktischen Nutzung dieses Effekts lässt sich in Abbildung 9 erkennen. Das elektrische Feld wird hierbei zwischen einer Rasierklinge und dem Boden des Flüssigkeitsbehälters angelegt. Dies hat zur Folge, dass aufgrund der geringen Fläche der scharf zulaufenden Rasierklinge eine möglichst starke Konzentration der Feldlinien vorhanden ist. Durch einen Wechselstrom mit entsprechender Frequenz kann nun die Flüssigkeit im Behälter periodisch im Feld an Höhe gewinnen und anschließend aufgrund der Oberflächenspannung wieder zurückfallen, wodurch Wellen in periodischen Abständen erzeugt werden können. [23]

Ein Beispiel zur Anwendung des Elektrokapillareffekts zur Erzeugung von Wellen finden sich exemplarisch in [23] und eine allgemeine Anwendung in [24].

---

### 3 Konzeptauswahl

---

Das Kapitel Konzeptauswahl behandelt die Umgebung des Kapillarwellengenerators im Prüfstand. Anschließend werden die Anforderungen an den Kapillarwellengenerator dargestellt und anhand dieser und basierend auf dem Grundlagenteil die Konzepte entwickelt und bewertet. Das Kapitel wird mit der Konzeptentscheidung abgeschlossen.

#### 3.1 Bestehender Prüfstand und Anforderungen

Im bestehenden Prüfstand werden bereits experimentell die Transportprozesse in initial ungestörten Dünnschichten während eines Tropfenaufpralls untersucht. Hierzu wurde ein Tropfengenerator entwickelt, der Tropfen aus verschiedenen Höhen auf eine Platte fallen lässt. Ziel dieser Arbeit ist es nicht den Wellengenerator in den vorhandenen Prüfstand zu integrieren, sondern einen Wellengenerator zu entwickeln, der in den Prüfstand integriert werden kann.

Die Anforderungen an den Kapillarwellengenerator bilden die Grundlage für die Konzeptentwicklung, -bewertung und -entscheidung, sowie der Konstruktion. Diese werden nachfolgend dargestellt:

##### Umgebung

- Kapillarwellen werden auf einer rechteckigen Platte ( $5 \times 10 \text{ cm}$ ) in einem Flüssigkeitsdünnschicht auf einem Durchmesser  $d = 20, 30, 60 \text{ mm}$  und einer Schichtdicke  $h = 200 - 800 \text{ }\mu\text{m}$  ( $\bar{H} = h/D = 0,1 - 0,4$ ) erzeugt.
- Kontamination/ Verunreinigung ist zu vermeiden
- Konfokalsensor ist seitlich einzubauen. Platz für den Kapillarwellengenerator ist beschränkt.

##### Tropfenparameter

- Durchmesser des zu imitierenden Tropfens:  $1,8 - 2,3 \text{ mm}$ ; Start mit Wasser ( $2,2 \text{ mm}$ )
- Medien: Wasser

##### Kapillarwellenparameter

- Frequenz:  $200 - 800 \text{ Hz}$  [25; 26]
- Geschwindigkeit:  $350 - 700 \text{ mm/s}$  [25; 26]
- Wellenlänge:  $1 - 2,5 \text{ mm}$  [25; 26]

##### Kapillarwellengenerator

- Der Kapillarwellengenerator soll in den bereits vorhandenen Prüfstand integriert werden können
- Reinigung ermöglichen

- Nach Möglichkeit soll die Kapillarwellenanregung kontaktlos stattfinden, um Kontamination/Verunreinigung und eine aufwendige Reinigung der benetzten Komponenten zu vermeiden.

### **3.2 Konzeptentwicklung und -bewertung**

Im Rahmen dieser Arbeit werden anhand der im Kapitel 2.3 dargestellten Wirkprinzipien der Kapillarwellenanregung verschiedene Konzepte entwickelt. Diese lassen sich ausgehend von dem mechanischen, akustischen und elektrostatischen Wirkprinzip einteilen. Anschließend werden die dargestellten Konzepte bezüglich der Anforderungen bewertet. Hierzu werden morphologische Kästen verwendet, die auf Grundlage der Literaturrecherche bewertet sind. Die in Anhang 1-3 dargestellten morphologischen Kästen sind in die drei Wirkprinzipien unterteilt, sowie in folgende Teilbereiche:

Aktor, Übertragungsart, Übertragungsmittel, Reinigungsmethode, Ausbreitungsrichtung, Räumliche Wellenerzeugung und Steuerbarkeit der Wellenparameter.

Darüber hinaus sind für die Konzeptentwicklung und -bewertung weitere Teilbereiche relevant, die nicht direkt von den Wirkprinzipien der Wellenanregung abhängen. Diese werden in Kapitel 4 genauer behandelt. Hierzu zählen die Halterung, die Anbindung an den Prüfstand, die Benutzeroberfläche, die Ansteuerungsart, sowie die Anbindung des Aktors des Kapillarwellengenerators.

#### **3.2.1 Bewertung des mechanischen Wirkprinzips**

Das Konzept, welches sich von dem in Kapitel 2.3.1 vorgestellten mechanischen Wirkprinzip für die Wellenanregung ableiten lässt, ist in Anhang 1 in einem morphologischen Kasten dargestellt und bewertet. Die im Grundlagenteil aufgeführten Vor- und Nachteile des Wirkprinzips sind somit erläutert, veranschaulicht und bewertet.

Zusammenfassend eignet sich das mechanische Wirkprinzip für die Erzeugung von Kapillarwellen durch die einfache Konstruktion und vielfältigen Steuerungs- und Einsatzmöglichkeiten gut. Im Rahmen dieser Arbeit ist das mechanische Wirkprinzip für die Wellenanregung exemplarisch in Form einer direkten Wellenanregung getestet worden. Aufgrund der nachfolgenden Aspekte wird dieses Wirkprinzip nicht als Konzept ausgewählt. Nachteilig sind das Auftreten von nichtlinearen Schwingungen sowie die komplexe Betrachtung des Kontaktwinkels, sowie des Meniskus. Im Rahmen dieser Arbeit stellt sich die mechanische Erzeugung von Kapillarwellen bezüglich der folgenden Aspekte in der Anforderungsliste (Vergleich Kapitel 3.1) eher als problematisch heraus: Die erzeugten Kapillarwellenparameter (bspw. Frequenz und Wellenlänge) sind durch die mechanische Anregung in der Regel zu groß und weichen somit von den Kapillarwellen ab, die von einem Tropfenaufprall induziert werden würden. Gerade bei der

---

kontaktlosen/indirekten Wellenanregung weichen die Kapillarwellenparameter von den Vorgaben dieser Arbeit ab. [9] [15–17; 27] Der verwendete Aufbau aus den betrachteten Arbeiten, bei denen der Behälter in Vibration gebracht wird, könnte außerdem zu Problemen bei der optischen Auswertung der Versuche führen. Darüber hinaus stellt gerade bei der Kapillarwellenanregung durch direkten Kontakt mit einem Übertragungsmedium die notwendige Reinigung der benetzten Komponenten ein Problem dar.

### **3.2.2 Bewertung des akustischen Wirkprinzips**

Grundlage der Konzeptentwicklung und -bewertung für das akustische Wirkprinzip bietet Kapitel 2.3.2. Konzeptvorschläge sowie deren Bewertung, basierend auf diesem Wirkprinzip, sind Anhang 2 zu entnehmen.

Das erst seit wenigen Jahren erforschte Wirkprinzip der Kapillarwellenanregung zeichnet sich vor allem durch die mögliche kontaktlose Wellenerzeugung aus, wodurch Verunreinigungen vermieden werden und Wellen unabhängig von den Fluideigenschaften erzeugt werden können. Darüber hinaus eignet sich dieses Wirkprinzip für die Wellenanregung durch die einfache Ansteuerung und Umsetzung für den auszulegenden Kapillarwellengenerator. Des Weiteren lassen sich in der Literatur Arbeiten finden, die Kapillarwellen mit ähnlichen charakteristischen Parametern untersuchen, die auch bei einem Tropfenaufrall entstehen würden (Vergleich Kapitel 3.1). Die Ausführung eines Lautsprechers könnte außerdem seitlich an den Prüfstand befestigt werden, wodurch der Konfokal-Sensor problemlos angebracht werden kann und die restliche Auswertungselektronik weiterhin kompatibel ist.

### **3.2.3 Bewertung des elektrostatischen Wirkprinzips**

Das aus dem elektrostatischen Wirkprinzip resultierende Konzept wird ebenso basierend auf dem Grundlagenteil (Kapitel 2.3.2) entwickelt und bewertet. Anhang 3 ist der dazugehörige morphologische Kasten zu entnehmen.

Die in Anhang 3 bewerteten Konzeptmöglichkeiten eignen sich für diese Aufgabenstellung vergleichsweise schlechter. Es ist zwar eine kontaktlose Wellenerzeugung möglich, wodurch eine Verunreinigung vermieden wird, problematisch sind aber die benötigten elektrisch leitfähigen Komponenten, die bei diesem Prüfstand nicht praktikabel sind. Weiterhin sind große Teile der veröffentlichten Forschung mittlerweile über 40 Jahre alt, was indiziert, dass dieses Verfahren im Vergleich zu den anderen Methoden eine geringere zeitgemäße Relevanz besitzt.

---

### 3.3 Konzeptentscheidung

Das vorherige Kapitel beschreibt die Konzepte, sowie deren Bewertung bezüglich der Wirkprinzipien mechanisch, akustisch und elektrostatisch. Darin wird verdeutlicht, dass jedes Wirkprinzip seine Vor- und Nachteile angesichts der Aufgabenstellung und Anforderungsliste mit sich bringt.

Das elektrostatische Wirkprinzip (Kapitel 3.2.3) eignet sich aus den genannten Gründen nicht für diese Aufgabenstellung. Beim Vergleich von Kapillarwellengeneratoren, die auf dem mechanischen und akustischen Wirkprinzip (Kapitel 3.2.1 und 3.2.2) beruhen, wird deutlich, dass sich das akustische Wirkprinzip durch die kontaktlose Wellenerzeugung mit gleichzeitigem Erreichen der korrekten Wellenparameter adäquater für die Auslegung eines geeigneten Wellengenerators ist. Auch die kompakte und einfache Umsetzung sowie die unkomplizierte Ansteuerungsmöglichkeiten zeichnen diesen Wellengenerator aus.

Im Rahmen dieser Arbeit wird sich vor diesem Hintergrund für einen Kapillarwellengenerator nach dem akustischen Wirkprinzip entschieden. Basierend auf der Anforderungsliste erfüllt der Akustikgenerator die festgelegten Vorgaben besser durch die kontaktlose Übertragungsart - verglichen mit einem Piezo Aktor, bei dem die Wellen direkt übertragen werden (Vergleich Anhang 2). Davon ausgehend ist das Übertragungsmedium Luft, womit keine Reinigungsmethode der beanspruchten Komponenten benötigt wird, um Kontamination zu vermeiden. Die Wellenparameter der zylindrischen Wellen lassen sich durch die Wellenlänge, der Frequenz sowie der Amplitude durch den Akustikgenerator steuern.

---

## 4 Konstruktion

---

### 4.1 Wellengenerator

Der Wellengenerator besteht aus einem Kleinlautsprecher mit einem Durchmesser von 50 mm (Abbildung 10 und Abbildung 11). Mit Hilfe eines handelsüblichen Edelstahltrichters (Abbildung 12) werden die akustischen Wellen dann in ein Rohr vom Durchmesser 2,5 mm zusammengeführt. Durch diese Verjüngung ist der Auslass in der Größenordnung der Tropfen, die erzeugt werden sollen und die Wirkfläche der akustischen Wellen wurde verringert.

Für die Auswahl des Lautsprechers werden unterschiedliche Modelle mit variierender Größe, Lautstärken, Frequenzbereichen und Leistungen getestet. Schlussendlich wird der Lautsprecher Visaton BF45 mit der, auf die Größe bezogene, höchste Leistung ausgewählt.

Um eine senkrechte Einleitung der akustischen Wellen auf die Oberfläche zu ermöglichen ist das Rohr am Austritt um circa  $45^\circ$  gebogen. So ist es möglich, den Aufbau nicht zentral über dem Flüssigkeitspool zu montieren, und dennoch ein senkrechtes Auftreffen der Wellen auf den Fluidfilm zu erreichen. Die Krümmung des Rohres macht sich erst ab größeren Winkeln durch ein verringern der Amplitude der erzeugten Kapillarwellen bemerkbar. Das Auslassrohr ist in den Trichter leicht eingepresst.



Abbildung 10: Lautsprecher (vordere Ansicht)



Abbildung 11: Lautsprecher (hintere Ansicht)



Abbildung 12: Trichter

## 4.2 Befestigung und Gestell

Das Gestell und die Halterung des Wellengenerators bestehen aus vier Einzelteilen. Die Halterung des Wellengenerators (Abbildung 13), sowie die Montageplatte des Gestells an die Höhenverstellung (Abbildung 16) sind per CAD konstruiert und Lasergesintert. Die Winkerverstellung (Abbildung 15), sowie die höhenverstellbare Platte (Abbildung 17) sind zugekauft.

Um den Lautsprecher auf dem Trichter zu fixieren, wird eine Halterung, per Lasersintern, aus Kunststoff gefertigt (Abbildung 13). In diese Halterung wird der Trichter in die konisch zulaufende Öffnung eingelegt. Auf den Trichter wird der Lautsprecher gelegt und seitlich mit zwei M3 Schraubverbindungen fixiert (Abbildung 14).





Abbildung 13: Halterung für Wellengenerator (obere und schräge Ansicht)



Abbildung 14: Wellengenerator mit Halterung im zusammengebauten Zustand (seitliche und obere Ansicht)

Das gesamte Gestell ist an einer um 360 Grad drehbaren Halterung (Abbildung 15) mittels vier Schrauben befestigt. Dies ermöglicht das Einstellen des Winkels, unter dem die akustischen Wellen auf die Oberfläche treffen.



Abbildung 15: drehbare Halterung (obere Ansicht)

Die Winkelverstellung ist mittels Passstiften an eine Adapterplatte geklemmt, welche aus gesintertem Kunststoff besteht. Die Adapterplatte (Abbildung 16) ist mittels zweier Schraubverbindungen an der Höhenverstellung befestigt.

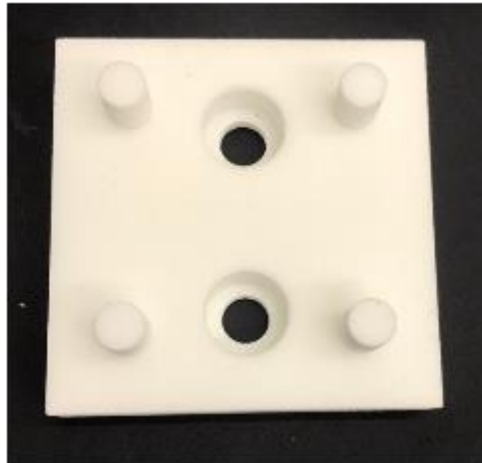


Abbildung 16: Adapterplatte (obere Ansicht)

Das Gestell kann mittels einer mikrometergenauen, höhenverstellbaren Platte (Abbildung 17) an ITEM-Profilen befestigt werden. So kann die Höhe des gesamten Gestells verändert werden, sowie die genaue Höhe des Auslasses über dem Fluidfilm eingestellt werden.

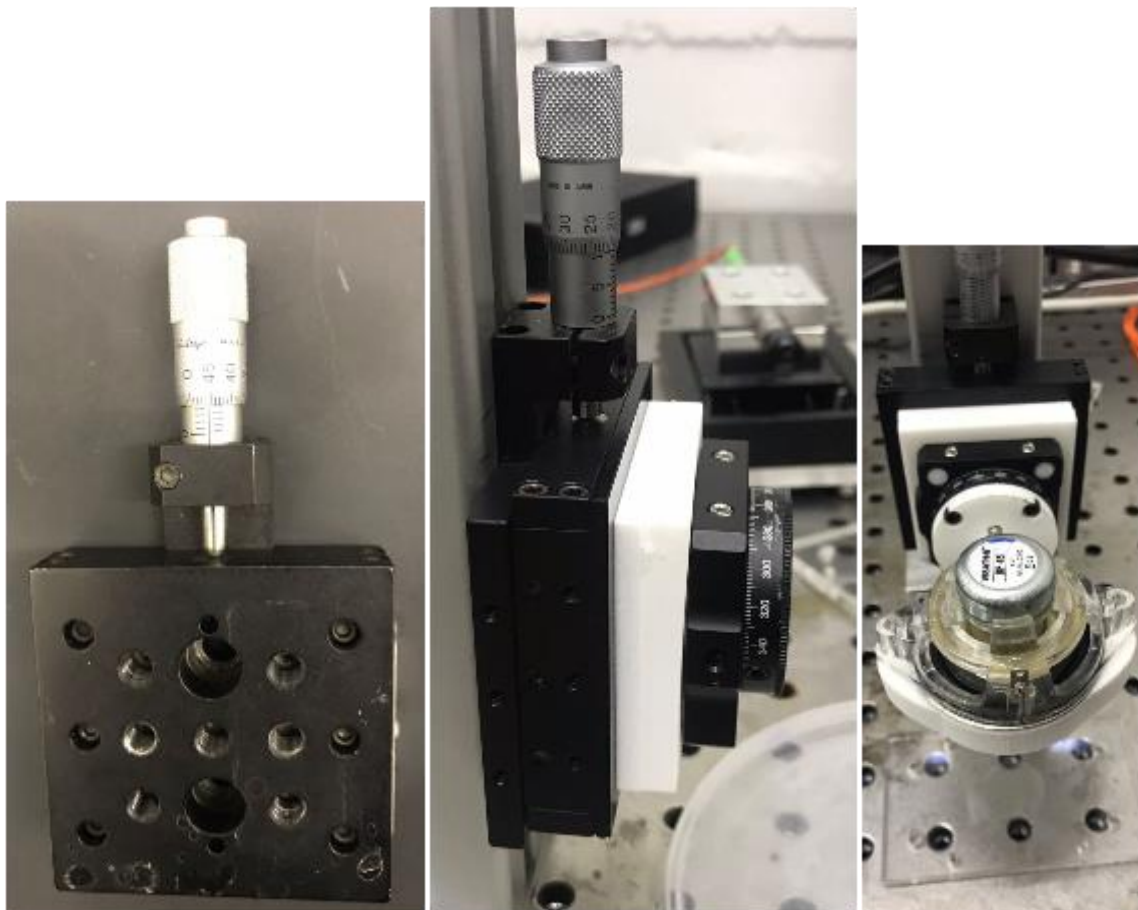


Abbildung 17: Höhenverstellung der Montageplatte (links); Höhenverstellung mit Winkelverstellung (mittig); Wellengenerator mit Gestell (rechts)

### 4.3 Konfokalsensor

Für die Bestimmung der Fluidfilmdicke wird ein Konfokal-chromatischer Sensor vom Hersteller Micro-Epsilon Messtechnik verwendet. Mittels dem konfokal-chromatischen Messprinzip wird der Abstand des Sensors zu den einzelnen Schichten gemessen. Hierfür wird Licht mittels Dispersion in verschiedene Spektren aufgespalten. Danach werden die Lichtspektren mittels mehrerer Linsen auf einen Brennpunkt fokussiert (konfokal). Durch die Anordnung der Linsen wird das Licht in abstandsabhängige, monochromatische Wellenlängen aufgeteilt. Die auf das Messobjekt auftreffende Lichtwellenlänge wird dann für die Messung herangezogen. Bei diesem Prinzip kann ein kleiner Lichtpunkt erzeugt werden, und dennoch eine hohe Auflösung erreicht werden. Aus den Abstandswerten der einzelnen Schichten kann dann die Schichtdicke des Fluids bestimmt werden. Hierfür ist es wichtig, dass der Sensor senkrecht über dem Fluidfilm platziert ist und der Abstand genau justiert werden kann. [28; 29]

Hierfür wird der Konfokal-Sensor zwischen zwei Aluminiumplatten, mit einer vertikalen Bohrung des Durchmessers 12 mm, geklemmt. Die Platten werden mit vier Schraubverbindungen verklemt. Die Halterung wird mittels zweier Schraubverbindungen an eine höhenverstellbare Platte befestigt (Abbildung 18). Diese ist zur Einstellung der Höhe des Konfokalsensors mikrometergenau einstellbar. Die gesamte Konstruktion kann somit an ITEM-Profilen befestigt werden.



Abbildung 18: Konfokalsensor Halterung

---

## 4.4 Elektronische Ansteuerung

Für die elektronische Ansteuerung des Wellengenerators wird ein Mikrocontroller ESP 32 verwendet. Dieser ist über einen Audioverstärker DEBO SOUND AMP1 mit dem verwendeten Lautsprecher verbunden und steuert diesen mit den einstellbaren Parametern Frequenz und Impulsdauer an.

Der entsprechende Code, welcher für die elektronische Ansteuerung entworfen wurde, wird im Folgenden erklärt.

Zuerst werden, abgesehen von den notwendigen Parametern channel und resolution, die weiteren Variablen deklariert. Diese entsprechen der Frequenz des akustischen Impulses freq, der Dauer des Impulses duration und der Anzahl der Impulse count, sowie einer später benötigten Laufvariable i.

```
int freq = 800;
int channel = 1;
int resolution = 8;
int duration = 100;
int count = 5;
int i;
```

Im Folgenden Setup werden die Datenrate in Bit/Sekunde sowie der channel festgelegt, von welchem aus der Lautsprecher angesteuert wird.

```
void setup() {

  Serial.begin(115200);
  ledcSetup(channel, freq, resolution); // set PWM channel
  ledcAttachPin(12, channel); // attach speaker pin to PWM channel
}
```

Der Hauptloop beginnt mit dem Auslesen des serial Inputs, indem ein String (receivedString) erstellt wird und mithilfe eines eigenen Loops so lange um den Input erweitert wird bis dieser vollständig im string abgespeichert ist.

```

if (Serial.available() > 0) {
  String receivedString = "";
  while (Serial.available() > 0) {
    int receivedByte = Serial.read();
    receivedString += (char)receivedByte;
  }
  if (receivedString.length() > 1) {
    int dlmIdx = receivedString.indexOf(" ");
    if (dlmIdx != -1) {
      // interpret string prior to delimiter as command and after delimiter as parameter
      String cmd = receivedString.substring(0, dlmIdx);
      String param = receivedString.substring(dlmIdx + 1, receivedString.length() - 1);

```

Die Inputs “freq”, “duration” und “count” ermöglichen es über den seriellen Monitor die Frequenz, Impulsdauer und Anzahl der Impulse zu verändern.

```

if (cmd == "freq") {
  freq = param.toFloat();
  Serial.print("frequency of speaker set to ");
  Serial.print(freq);
  Serial.println("Hz");
}

else if (cmd == "duration") {
  freq = param.toFloat();
  Serial.print("duration of pulse set to ");
  Serial.print(duration);
  Serial.println("ms");
}

else if (cmd == "count") {
  freq = param.toFloat();
  Serial.print("pulse count set to ");
  Serial.print(count);
}

```

Die Befehle “speaker on” und “speaker off” schalten den Lautsprecher an oder aus, bis ein neuer Input kommt.

```

else if (cmd == "speaker" && param == "on") {
  //turn speaker on
  ledcWriteTone(channel, freq);
  Serial.println("speaker on");
}

```

---

```
else if (cmd == "speaker" && param == "off") {  
    //turn speaker off  
    ledcWrite(channel, 0);  
    Serial.println("speaker off");  
}
```

Der Befehl “pulse” startet einen Loop, in welchem der Lautsprecher mit den festgelegten Parametern so oft angeschaltet wird, wie es in der Variable count festgelegt ist.

```
else if (cmd == "pulse" ) {  
    //send acoustic pulse  
    Serial.println("pulsing");  
    for (i = 0; i<count; ++i){  
        ledcWriteTone(channel, freq);  
        delay(duration);  
        ledcWrite(channel, 0);  
        delay(1000);  
    }  
}
```

---

## 5 Versuchsaufbau

---

Dieses Kapitel behandelt den Versuchsaufbau, sowie die Durchführung der Versuche zur Demonstration der Tauglichkeit des Wellengenerators. Weiterhin wird die Aufbereitung der Versuchsdaten mit Hilfe eines MatLab-Skripts dargestellt.

### 5.1 Versuchsdurchführung

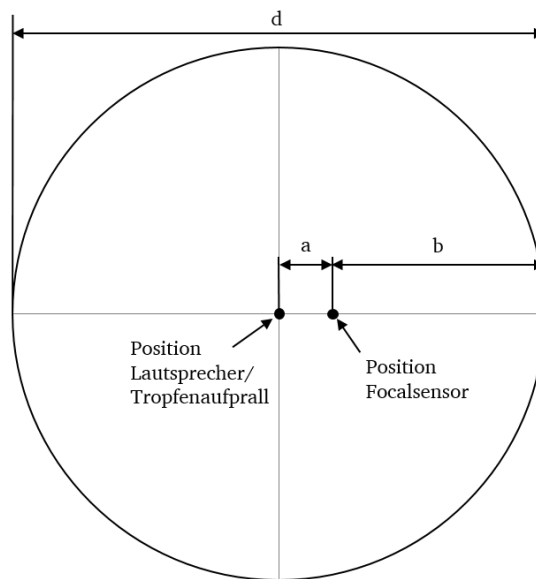


Abbildung 19: Der Versuchsaufbau als Draufsicht. Der Tropfenaufprall bzw. der Wellengenerator befindet sich dabei im Mittelpunkt des Flüssigkeitsreservoirs mit dem Durchmesser  $d$ . Im Abstand  $a$  vom Mittelpunkt wurde der Konfokalsensor platziert. Dieser besitzt den Abstand  $b$  zum Rand. (Wasserreservoir:  $a = 1$  cm,  $b = 5$  cm,  $d = 12$  cm; Dünnfilm:  $a = 1$  cm,  $b = 2$  cm,  $d = 6$  cm)

Zum Feststellen der Tauglichkeit des Wellengenerators wird die Funktionsfähigkeit in zwei Szenarien getestet. Um die grundlegende Funktion des Wellengenerators ohne den Einfluss von Effekten des Dünnfilms nachzuweisen, wird ein Wasserreservoir mit einem Durchmesser  $d$  von 12 cm und einer Tiefe von 4 mm verwendet. Für die Versuche mit einem Dünnfilm wird eine Scheibe mit einer zylindrischen Ausparung mit einer Höhe von  $600\text{ }\mu\text{m}$  und einem Durchmesser von 6 cm verwendet. Auf diesen werden jeweils Versuche mit dem Wellengenerator und einem Tropfenaufprall durchgeführt. Zur Messung der Oberflächenwellen wird ein Konfokalsensor eingesetzt. Das grundlegende Wirkprinzip des Konfokalsensors wurde bereits in Kapitel 4 dargelegt. Die Messungen werden mit einer Messfrequenz von 2 kHz durchgeführt. Anhand einer Punktmessung lässt sich der zeitliche Verlauf der Flüssigkeitsoberfläche

rekonstruieren. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 19 dargestellt. Der Konfokalsensor wird dabei beim Dünnfilm, sowie im Wasserreservoir im Abstand  $a = 1 \text{ cm}$  zum Mittelpunkt platziert.

Für den Tropfenaufprall werden Versuche mit verschiedenen Fallhöhen des Tropfens durchgeführt, um unterschiedliche Weberzahlen des Aufpralls zu untersuchen. Der Tropfen wurde hierbei manuell mit einer Spritze an den jeweiligen Fallhöhen erzeugt über dem Mittelpunkt des Wasserreservoirs, bzw. des Dünnfilms erzeugt. Die verwendete Spritze besitzt eine Kanüle mit einem Durchmesser von  $0,4 \text{ mm}$ . Mit dieser lassen sich Tropfen mit einem Durchmesser von  $\approx 2,2 \text{ mm}$  erzeugen. Eine Auflistung der Fallhöhen und zugehörigen Aufprallgeschwindigkeiten, welche aus Gleichung (2.10) berechnet werden, sowie den zugehörigen Weberzahlen ist in Tabelle 1 dargestellt.

Fallhöhe [mm]	Aufprallgeschwindigkeit [m/s]	Weberzahl [-]
10	0,44	5,84
20	0,63	12,00
30	0,77	17,98
50	1,00	30,15
80	1,25	47,11
100	1,40	59,09
120	1,53	70,58
150	1,70	87,13

Tabelle 1: Weberzahlen und Aufprallgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Fallhöhe des Tropfenaufpralls

Der Wellengenerator wird mit einer Halterung über dem Mittelpunkt des Wasserreservoirs, bzw. des Dünnfilms befestigt. Das Wellenleiterende wird senkrecht zur Flüssigkeitsoberfläche ausgerichtet. Für den Wellengenerator werden die verschiedenen einstellbaren Parameter getestet. Diese beinhalten den Abstand des Wellenleiterendes zur Flüssigkeitsoberfläche, die Frequenz des akustischen Pulses und die Dauer des akustischen Pulses.

## 5.2 Versuchsdatenverarbeitung

Die Verarbeitung der Versuchsdaten erfolgt mit Hilfe eines MatLab-Skripts. Der Konfokalsensor liefert die absolute Höhe des Flüssigkeitsstands zu jedem Zeitschritt als Textdatei. Die Textdatei wird eingelesen, und der Ruhepegel der Flüssigkeitsoberfläche wird über eine Mittelung der ersten  $2 \text{ s}$  der Messung bestimmt. Dieser wird anschließend von der absoluten Höhe des Flüssigkeitspegels subtrahiert, um die Amplitude der Wellen zu ermitteln.



---

## 6 Messergebnisse

---

In diesem Kapitel werden die Beeinflussungsmöglichkeiten der, durch den Wellengenerator, erzeugten Kapillarwellen, sowie die Messergebnisse der durchgeführten Versuche diskutiert. Hierbei werden zunächst die Einflüsse der verschiedenen einstellbaren Parameter des Wellengenerators untersucht. Diese umfassen den Abstand des Wellenleiterendes zur Flüssigkeitsoberfläche, die Frequenz des akustischen Pulses und die Dauer des akustischen Pulses. Dabei werden die Kapillarwellen des Wellengenerators mit den Messungen des Tropfenaufpralls verglichen. Weiterhin wird eine Möglichkeit der Abschätzung der Ausbreitungsgeschwindigkeit, Frequenz und Wellenlänge der gemessenen Kapillarwellen vorgestellt und die ermittelten Werte werden mit Literaturwerten verglichen.

### 6.1 Oberflächenwellen auf dem Wasserreservoir

Im Folgenden werden die erzeugten Kapillarwellen des Tropfenaufpralls und des akustischen Wellengenerators auf dem Wasserreservoir diskutiert und gegenübergestellt. Das verwendete Wasserreservoir besitzt einen Durchmesser von 12 cm und eine Tiefe von 4 mm.

### 6.1.1 Oberflächenwellen des Tropfenaufpralls

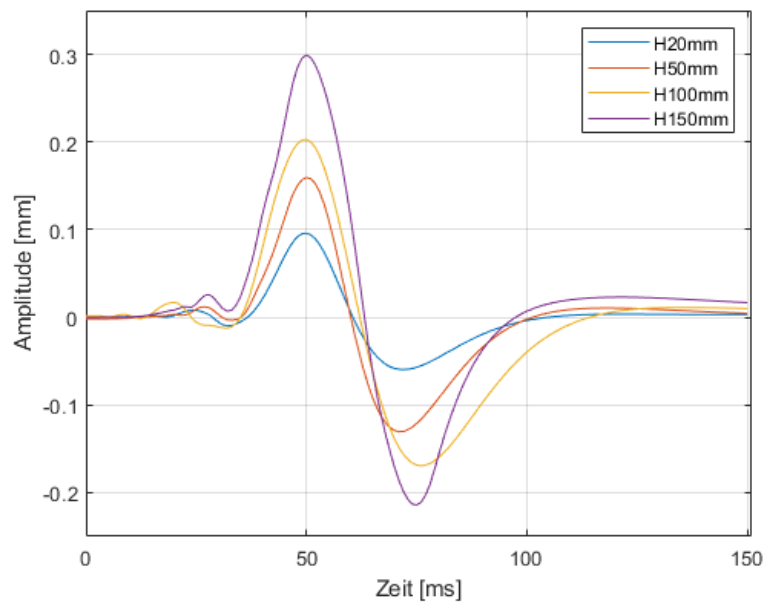


Abbildung 20: Der zeitliche Verlauf der Oberflächenwellen des Tropfenaufpralls auf dem Wasserreservoir verschiedener Fallhöhen. Der Abstand zum Zentrum des Aufpralls beträgt 1 cm und die maximale Amplitude der Wellen wurde auf den Zeitpunkt  $t = 50$  ms gesetzt.

In diesem Abschnitt werden die Messergebnisse der Tropfenaufprallversuche auf das Wasserreservoir diskutiert. Der zeitliche Verlauf der Kapillarwellen ist in Abbildung 20 in Abhängigkeit von verschiedenen Fallhöhen dargestellt, und zeigt die Messung des Konfokalsensors im Abstand von 1 cm vom Zentrum des Aufpralls. Es ist zu erkennen, dass durch den Tropfenaufprall Oberflächenwellen mit unterschiedlichen Amplituden und Periodendauern erzeugt werden. Da diese Wellen in vielen Fällen keine vollständige Periode durchlaufen, ist kein genaues Ablesen der Periodendauer und somit der Frequenz möglich.

Die ersten auftretenden Wellen besitzen eine geringe Amplitude von  $<10 \mu\text{m}$  und eine Periodendauer von wenigen Millisekunden und somit eine hohe Frequenz von  $>150$  Hz. Aufgrund der geringen Amplituden und der hohen Frequenzen können diese Wellen in vielen Fällen mit der Messauflösung von 2 kHz am Konfokalsensor nicht mehr erfasst werden. Die kleinste gemessene Welle besitzt eine Frequenz von ca. 250 Hz und eine Amplitude von  $5 \mu\text{m}$ .

Die Welle mit der größten Amplitude, ist die letzte Welle die den Konfokalsensor passiert. Die Amplitude dieser Welle ist stark abhängig von der Fallhöhe des Tropfens und somit der Weberzahl. Eine höhere Weberzahl ergibt demnach eine größere Amplitude der Welle. Die Frequenz dieser Welle liegt im Bereich von 10 - 20 Hz und ihre Amplitude umfasst einen Bereich von 100 - 300  $\mu\text{m}$  für die Fallhöhen von 20 - 150 mm. Im Bereich zwischen den ersten auftretenden Wellen und der größten Welle liegen weitere Kapillarwellen mit Frequenzen von 20 - 100 Hz und Amplituden von 10 - 30  $\mu\text{m}$ .

Da die Amplitude der letzten Kapillarwelle um einen Faktor 10 größer ist als die der restlichen gemessenen Wellen, wurde diese als Referenz für die Nachbildung mit Hilfe des akustischen Wellengenerators herangezogen.

### 6.1.2 Oberflächenwellen des akustischen Generators

Um den Einfluss der verschiedenen Parameter des Wellengenerators zu testen, werden Versuchsreihen für verschiedene Abstände des Wellenleiterendes zur Wasseroberfläche, Frequenzen des akustischen Generators und Dauer des akustischen Pulses durchgeführt. Beim Testen des Konzepts hat sich gezeigt,

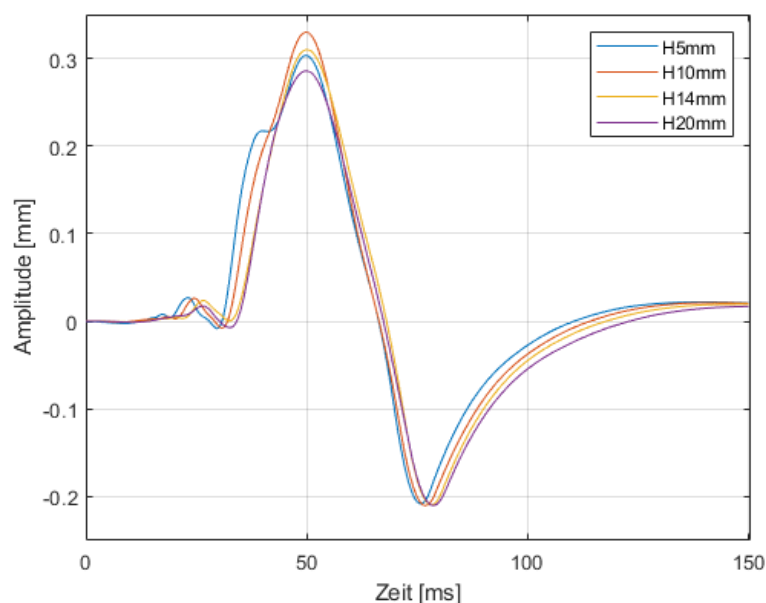


Abbildung 21: Die Oberflächenwellen des akustischen Generators auf dem Wasserreservoir in Abhängigkeit verschiedener Abstände des Wellenleiterendes zur Flüssigkeitsoberfläche. Der Abstand zum Zentrum des Aufpralls beträgt 1 cm und die maximale Amplitude der Wellen wurde auf den Zeitpunkt  $t = 50$  ms gesetzt.

dass die kleinste Frequenz des akustischen Generators die größte Amplitude der erzeugten Wellen ergibt, und diese mit zunehmender Erregungsfrequenz abnimmt. Die kleinste Erregungsfrequenz des Lautsprechers liegt bei 100 Hz. Ausgehend von dieser Frequenz, werden im ersten Schritt unterschiedliche Abstände des Wellenleiterendes zur Flüssigkeitsoberfläche getestet. Die Messergebnisse sind in Abbildung 21 dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass ein kleiner Abstand von 5 mm zu unerwünschten Riffelungen auf den erzeugten Kapillarwellen führt. Mit zunehmendem Abstand glätten sich die Wellen und ihre Amplituden nehmen zu. Ein Maximum bei der erreichbaren Amplitude wurde in einem Abstand von 10 mm experimentell ermittelt. Bei einem weiteren Erhöhen des Abstands nimmt diese wieder ab. Auf der erzeugten Welle bei 10 mm Abstand sind jedoch noch leichte Riffelungen zu erkennen. Weiterhin konnte beobachtet werden, Messergebnisse

dass der Abstand keinen relevanten Einfluss auf die Periodendauer und Frequenz der erzeugten Kapillarwellen hat.

Aus diesem Grund wird ein Abstand des Wellenleiterendes zur Wasseroberfläche von 14 mm ausgewählt, da diese eine glatte Wellenerzeugung mit geringen Einbußen in der Amplitude ermöglicht.

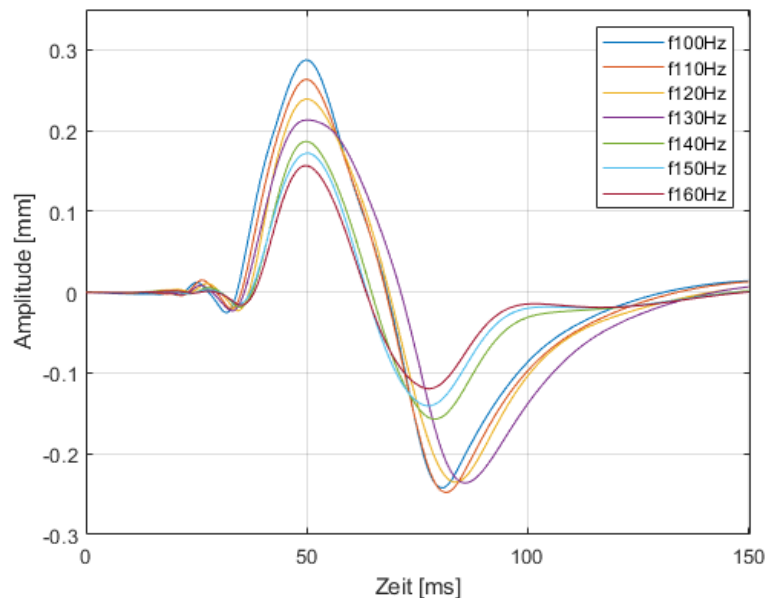


Abbildung 22: Die Oberflächenwellen des akustischen Generators auf dem Wasserreservoir in Abhängigkeit verschiedener Erregungsfrequenzen des Lautsprechers. Der Abstand zum Zentrum des Aufpralls beträgt 1 cm und die maximale Amplitude der Wellen wurde auf den Zeitpunkt  $t = 50$  ms gesetzt.

Ausgehend von dem ermittelten Abstand von 14 mm werden Versuche für unterschiedliche Erregungsfrequenzen des akustischen Wellengenerators durchgeführt. Diese sind in Abbildung 22 dargestellt. Als erste Beobachtung ist zu erkennen, dass die Erregungsfrequenz nicht direkt die Frequenz der erzeugten Kapillarwellen bestimmt. Die Messergebnisse zeigen weiterhin, dass die Amplitude der Kapillarwellen mit zunehmender Erregungsfrequenz abnimmt.

Für die Frequenzen von 100-120 Hz lässt sich dabei eine konstante Frequenz von ca. 15 Hz bei der größten Welle erkennen. Eine interessante Beobachtung ist jedoch im Fall einer Erregungsfrequenz von 130 Hz zu erkennen. Hier scheint die Kapillarwelle vom Muster abzuweichen und eine höhere Periodendauer anzunehmen. Ab einer Erregungsfrequenz von 140 Hz verringert sich die Amplitude merklich und die Frequenz der erzeugten Welle steigt auf  $\sim 19$  Hz. Für eine weitere Erhöhung der Erregungsfrequenz bleibt die Frequenz der erzeugten Welle konstant und nur die Amplitude verringert sich weiter. Ein direkter Zusammenhang zur Resonanzfrequenz des akustischen Generators ist nicht zu erkennen, da diese bei 160 Hz liegt. Eine mögliche Erklärung für dieses Phänomen könnte die Eigenfrequenz des Schwingensystems liefern. Durch die Einflüsse des Wellenleiters und der Wasseroberfläche könnte sich die

Resonanzfrequenz verschoben haben, was die Beobachtung bei 130 Hz erklären würde. Eine weitere Untersuchung dieses Verhaltens bietet sich an. Die Autoren empfehlen im ersten Schritt eine Frequenz von 130 Hz zu meiden, da sowohl niedrigere als auch höhere Frequenzen ein stabileres Verhalten zeigen. Die Messergebnisse zeigen, dass sich mit der Einstellung der Erregungsfrequenz die Amplitude der Kapillarwellen über einen Bereich von 150 - 290  $\mu\text{m}$ , mit der Ausnahme des Bereichs von 190 - 230  $\mu\text{m}$ , einstellen lässt.

### 6.1.3 Vergleich der Tropfenwellen mit den akustisch generierten Oberflächenwellen

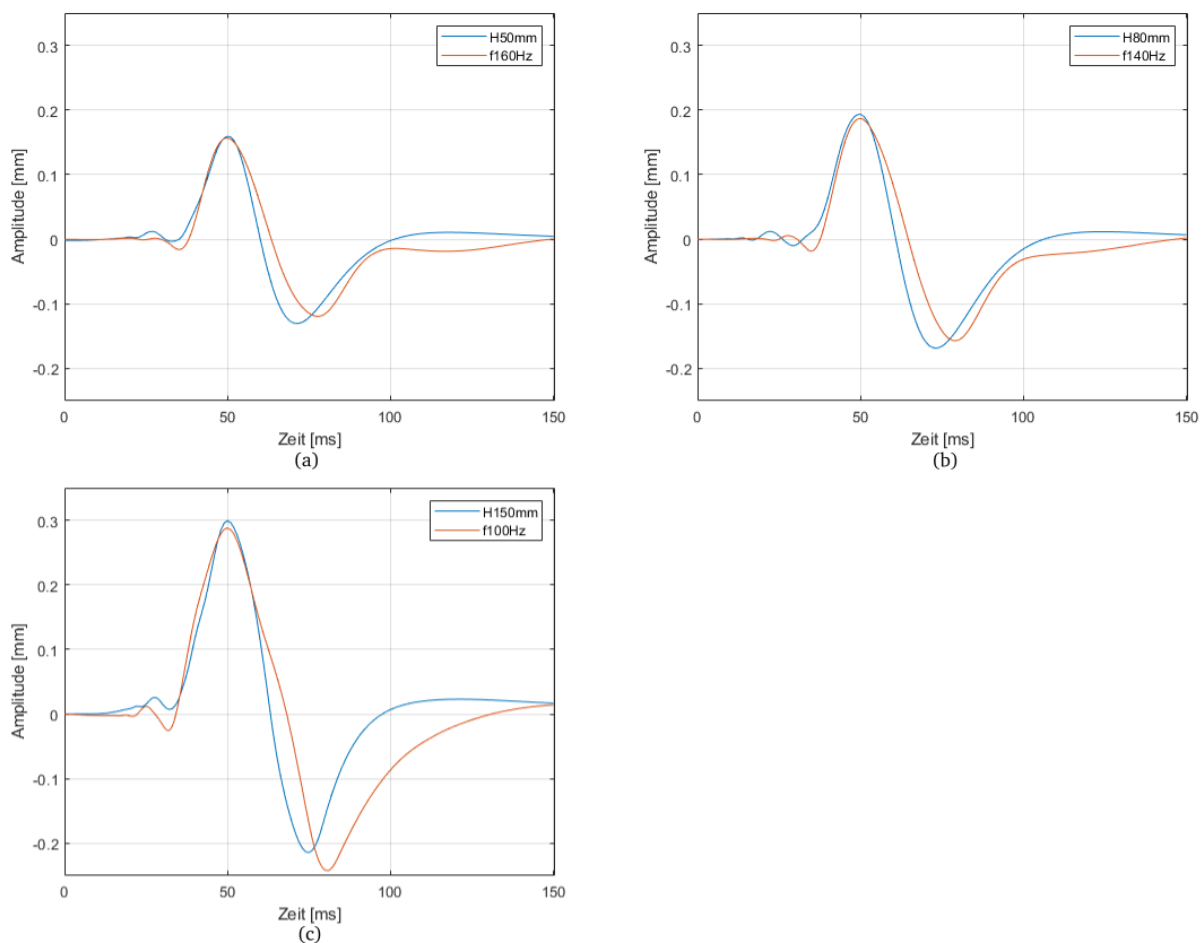


Abbildung 23: Vergleich der Oberflächenwellen des Tropfenaufpralls mit den akustisch generierten Wellen auf dem Wasserreservoir. (a) Vergleich der Fallhöhe von 50 mm mit den Wellen einer Erregungsfrequenz von 160 Hz. (b) Vergleich der Fallhöhe von 80 mm mit den Wellen einer Erregungsfrequenz von 140 Hz. (c) Vergleich der Fallhöhe von 150 mm mit den Wellen einer Erregungsfrequenz von 100 Hz.

In den vorangegangenen Abschnitten wurde dargelegt, dass sich mit Hilfe der Erregungsfrequenz des akustischen Pulses die Amplitude der erzeugten Kapillarwellen steuern lässt. Im Folgenden werden die akustisch erzeugten Kapillarwellen verschiedener Frequenzen mit den Wellen des Tropfenaufpralls mit verschiedenen Fallhöhen verglichen.

---

Abbildung 23 zeigt die akustisch generierten Wellen für eine Erregungsfrequenz von 100 Hz, 140 Hz und 160 Hz mit den entsprechenden Wellen des Tropfenaufpralls für eine Fallhöhe von jeweils 50 mm, 80 mm und 150 mm. Aus der Gegenüberstellung lässt sich erkennen, dass sich die maximale Amplitude der Tropfenwelle bei einer Fallhöhe von 150 mm mit der akustischen generierten Welle bei 100 Hz erreichen lässt. In allen Fällen entspricht das Wellenmaximum der Tropfenwelle dem der akustisch generierten Welle. Die Periodendauer des Wellenmaximums der akustisch generierten Welle ähnelt in allen Fällen der Periodendauer der Tropfenwelle. Das Wellenminimum ist dabei in allen Fällen in Amplitude und Periodendauer leicht verschoben zur Tropfenwelle. Bei den ersten auftretenden Wellen lassen sich Unterschiede zwischen den akustisch generierten Wellen und den Tropfenwellen erkennen. Die akustisch generierten Wellen wirken insgesamt glatter und unterscheiden sich in der Form für verschiedene Erregungsfrequenzen kaum, was nicht der Fall für die Tropfenwellen ist.

Es konnte gezeigt werden, dass sich mit der Variation der Erregungsfrequenz des akustischen Generators Wellen eines Tropfenaufpralls aus verschiedenen Fallhöhen, also verschiedenen Weberzahlen auf dem Wasserreservoir nachbilden lassen.

## **6.2 Oberflächenwellen auf dem Dünnfilm**

In diesem Kapitel werden die erzeugten Kapillarwellen des Tropfenaufpralls und des akustischen Wellengenerators auf dem Dünnfilm diskutiert und gegenübergestellt. Der Dünnfilm besitzt einen Durchmesser von 6 cm und eine Filmdicke von 600  $\mu\text{m}$ .

### 6.2.1 Oberflächenwellen des Tropfenaufpralls

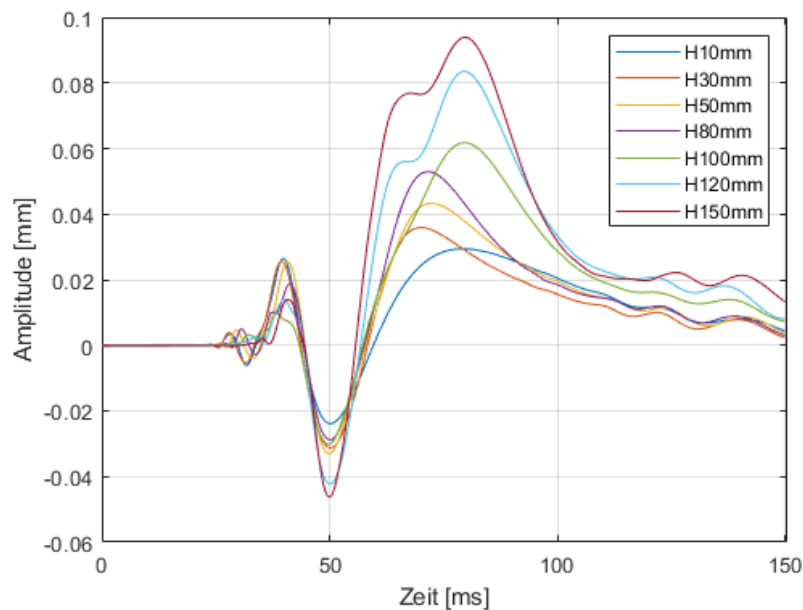


Abbildung 24: Der zeitliche Verlauf der Oberflächenwellen des Tropfenaufpralls auf dem Dünnsfilm für verschiedene Fallhöhen. Der Abstand zum Zentrum des Aufpralls beträgt 1 cm und die minimale Amplitude der Wellen wurde auf den Zeitpunkt  $t = 50$  ms gesetzt.

In diesem Abschnitt werden die Kapillarwellen des Tropfenaufpralls auf dem Dünnsfilm behandelt. Es werden dabei Aufprallversuche aus verschiedenen Fallhöhen des Tropfens, also Versuche mit unterschiedlichen Weberzahlen durchgeführt. Der zeitliche Verlauf der Wellenamplituden ist in Abbildung 24 dargestellt. Eine erste Beobachtung ist, dass das Muster der Wellen von dem des Tropfenaufpralls auf das Wasserreservoir abweicht. Während bei dem Wasserreservoir ein dominantes Maximum und ein Minimum der Wellenamplitude zu beobachten ist, scheinen beim Dünnsfilm drei Maxima und zwei Minima der Amplitude aufzutreten. Wird das erste dominante Maximum und das dominante Minimum zu einer Welle zusammengefasst, liegt die Frequenz bei  $\sim 28$  Hz. Dabei konnte ausgeschlossen werden, dass es sich bei dem zweiten Maximum um eine Reflexion handelt. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle müsste in diesem Fall über  $1,2$  m/s betragen, was über der in der Literatur angegebenen Ausbreitungsgeschwindigkeit für Kapillarwellen auf Dünnsfilmen liegt.[25; 26] Die Ermittlung der Wellenparameter wird in Kapitel 6.3 näher diskutiert.

Beim Vergleich der Amplituden der Wellen für die einzelnen Fallhöhen, lässt sich feststellen, dass diese mit zunehmenden Fallhöhen steigen. Der gleiche Trend lässt sich beim Tropfenaufprall auf das Wasserreservoir beobachten. Die Amplituden des Tropfenaufpralls sind dabei jedoch insgesamt viel kleiner, was auf die geringere Filmdicke zurückzuführen ist.

---

Eine weitere Beobachtung sind Riffelungen, welche ab einer Fallhöhe von 80 mm auf den ersten Wellenmaxima, und ab einer Fallhöhe von 120 mm auf den letzten Wellenmaxima auftreten. Eine mögliche Erklärung für die komplexere Wellengeometrie könnten Sekundärtropfen aus dem Tropfenaufprall liefern. Da keine Bildauswertung der Versuche vorliegt, bietet es sich an eine Abschätzung über die sogenannte Spritzschwelle  $K_2$  durchzuführen. Diese gibt eine Grenze an, ab der sich beim Tropfenaufprall Sekundärtropfen bilden. Hierfür wird die empirische Beziehung von Geppert herangezogen.[30] Dabei wird eine dimensionslose Formulierung wie folgt definiert:

$$K_2 = We^{5/8} Oh^{-1/4} \quad (6.1)$$

Die Abhängigkeit von der Filmdicke wird über:

$$K_2 = 114 + 164 \bar{H}^{6/5} \quad (6.2)$$

dargestellt. Für den Dünnsfilm mit einer Filmdicke von  $600 \mu\text{m}$  beträgt der kritische Wert von  $K_2 = 148,5$ . Dabei liegen die  $K_2$ -Werte aller Versuche weit unter dem kritischen Wert. Ein Einfluss von Sekundärtropfen kann somit ausgeschlossen werden. Die auftretenden Riffelungen scheinen sich durch eine komplexe Wellengeometrie zu bilden, welche bei größeren Weberzahlen auftritt. Eine Bildauswertung könnte hier weitere Aufschlüsse bieten.



### 6.2.2 Oberflächenwellen des akustischen Generators

In diesem Abschnitt werden die Versuchsreihen der Kapillarwellenerzeugung mit dem akustischen Wellengenerator beschrieben und diskutiert. Das Vorgehen ist dabei analog zu dem Wasserreservoir. Im ersten Schritt wird der optimale Abstand des Wellengenerators zur Flüssigkeitsoberfläche bestimmt. Ausgehend von dieser Höhe werden die verschiedenen Frequenzen des akustischen Pulses gegenübergestellt.

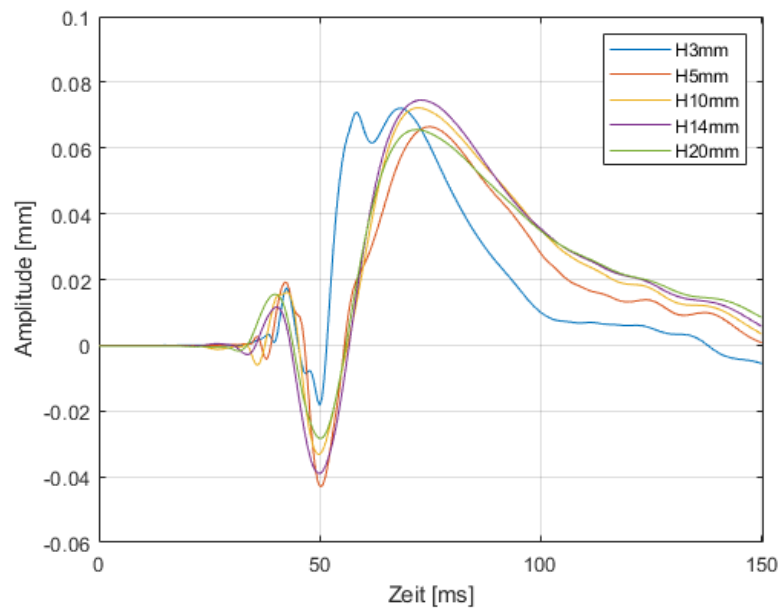


Abbildung 25: Die Oberflächenwellen des akustischen Generators auf dem Dünnsfilm in Abhängigkeit verschiedener Abstände des Wellenleiterendes zur Flüssigkeitsoberfläche. Der Abstand zum Zentrum des Aufpralls beträgt 1 cm und die minimale Amplitude der Wellen wurde auf den Zeitpunkt  $t = 50$  ms gesetzt.

In Abbildung 25 sind die verschiedenen Abstände des Wellenleiterendes zur Flüssigkeitsoberfläche dargestellt.

Bei den kleinsten Abständen von 3 mm und 5 mm sind deutliche Riffelungen auf den Wellen zu erkennen. Beim Erhöhen des Abstands glätten sich diese und die Amplituden der Wellen nehmen zu. Die größte Amplitude kann bei einem Abstand von 14 mm beobachtet werden. Bei einem weiteren Erhöhen des Abstands nimmt die Amplitude wieder ab. Dies ist deutlich an der Kapillarwelle bei einem Abstand von 20 mm zu erkennen. Aufgrund der größten Amplitude und der glatten Wellenform wurde ein Abstand des Wellenleiterendes zur Flüssigkeitsoberfläche von 14 mm gewählt.

Ausgehend von dem ermittelten Abstand wurde die Wellenerzeugung für verschiedene Frequenzen

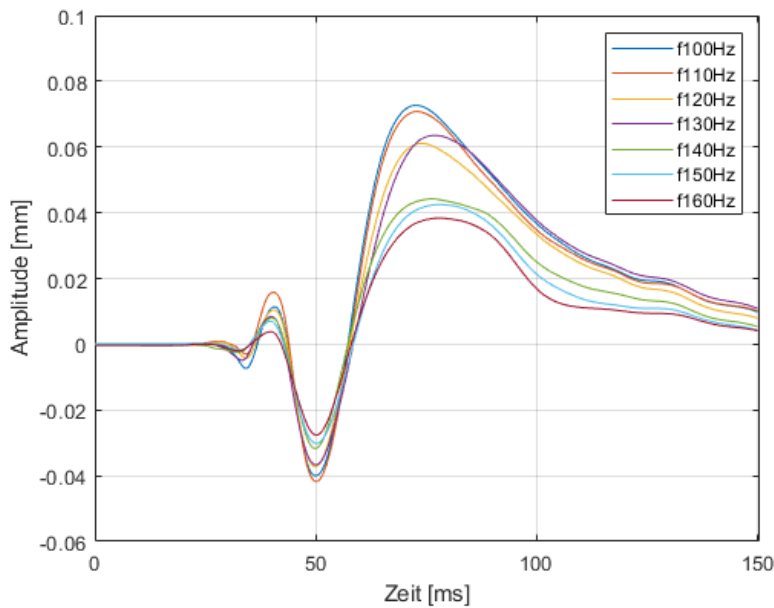


Abbildung 26: Die Oberflächenwellen des akustischen Generators auf dem Dünnsfilm in Abhängigkeit verschiedener Erregungsfrequenzen des Lautsprechers. Der Abstand zum Zentrum des Aufpralls beträgt 1 cm und die minimale Amplitude der Wellen wurde auf den Zeitpunkt  $t = 50$  ms gesetzt.

des akustischen Pulses getestet. Diese sind in Abbildung 26 dargestellt.

Die akustisch erzeugten Kapillarwellen weisen ein ähnliches Muster wie die Wellen des Tropfenaufpralls auf dem Dünnsfilm auf. Dabei sind zwei größere Maxima und ein Minimum in der Amplitude zu erkennen. Die Frequenz der Welle aus dem ersten Maximum und dem Minimum liegt hier, wie bei dem Tropfenaufprall, bei  $\sim 28$  Hz. Die Frequenz der erzeugten Wellen hängt auch hier nicht direkt von der Erregungsfrequenz ab. Es ist der Trend zu erkennen, dass mit einer steigenden Erregungsfrequenz die Amplituden der erzeugten Wellen abnehmen. Ein interessantes Phänomen ist bei einer Erregungsfrequenz von 130 Hz zu beobachten. Hier scheint die Amplitude der erzeugten Welle leicht anzusteigen. Bei einer weiteren Erhöhung der Frequenz ändert sich die Form der letzten Welle und ihre Amplitude nimmt deutlich ab. Dies konnte auch schon bei den akustisch erzeugten Wellen auf dem Wasserreservoir beobachtet werden, und legt eine weitere Untersuchung nahe.

### 6.2.3 Vergleich der Tropfenwellen mit den akustisch generierten Oberflächenwellen

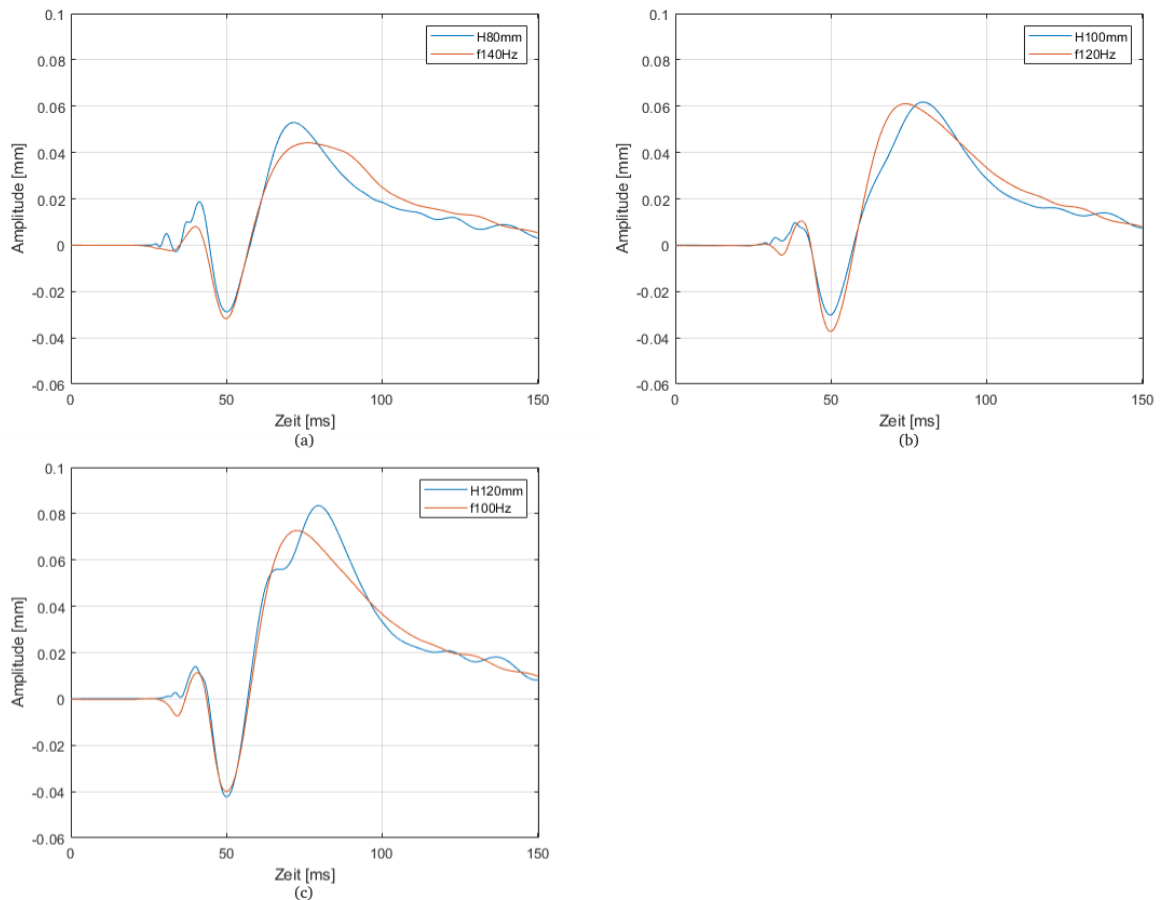


Abbildung 27: Vergleich der Oberflächenwellen des Tropfenaufpralls mit den akustisch generierten Wellen auf dem Dünnsfilm. (a) Vergleich der Fallhöhe von 80 mm mit den Wellen einer Erregungsfrequenz von 140 Hz. (b) Vergleich der Fallhöhe von 100 mm mit den Wellen einer Erregungsfrequenz von 120 Hz. (c) Vergleich der Fallhöhe von 120 mm mit den Wellen einer Erregungsfrequenz von 100 Hz.

Im folgenden Abschnitt werden die akustisch erzeugten Wellen verschiedener Erregungsfrequenzen mit den Kapillarwellen des Tropfenaufpralls verschiedener Fallhöhen verglichen. Diese sind in Abbildung 27 dargestellt. Dabei werden die akustisch generierten Wellen mit den Erregungsfrequenzen von 100 Hz, 120 Hz und 140 Hz den Wellen des Tropfenaufpralls mit den entsprechenden Fallhöhen von 120 mm, 100 mm und 80 mm gegenübergestellt. Die Amplituden der Wellen des Tropfenaufpralls mit einer Fallhöhe von  $>120$  mm kann dabei mit Hilfe des akustischen Wellengenerators nicht erreicht werden. Es ist zu erkennen, dass die akustisch erzeugten Wellen den Wellen des Tropfenaufpralls in Amplitude und Periodendauer ähneln. Bei dem ersten Wellenmaximum und dem ersten Wellenminimum ist der zeitliche Verlauf der Wellen nahezu identisch. Ausnahmen bilden die Fälle, bei denen auf den Wellen des Tropfenaufpralls Riffelungen entstehen. Diese Riffelungen scheinen zu einer Erhöhung der jeweiligen Wellenamplitude zu führen, was die Abweichungen zu den akustisch generierten Wellen erklärt. Eine weitere Beobachtung stellt die abweichende Form der letzten Kapillarwelle bei einer Erregungsfrequenz

von 140 Hz dar. Diese weicht von der Wellenform des Tropfenaufpralls sowohl in Amplitude, als auch in der Periodendauer ab.

Es kann gezeigt werden, dass sich die Kapillarwellen des Tropfenaufpralls auf dem Dünnsfilm mit den akustisch generierten Wellen modellieren lassen. Dabei können die Erregungsfrequenzen von 100 – 120 Hz benutzt werden, um verschiedene Fallhöhen des Tropfens zu modellieren. Von einer Implementierung höherer Frequenzen wird aufgrund der aufgezeigten Veränderungen in der Wellenform abgeraten. Eine Lösung könnte hier die Verwendung eines anderen akustischen Generators bieten, um einen größeren Frequenzbereich abzudecken.

### 6.3 Bestimmung der Wellenparameter

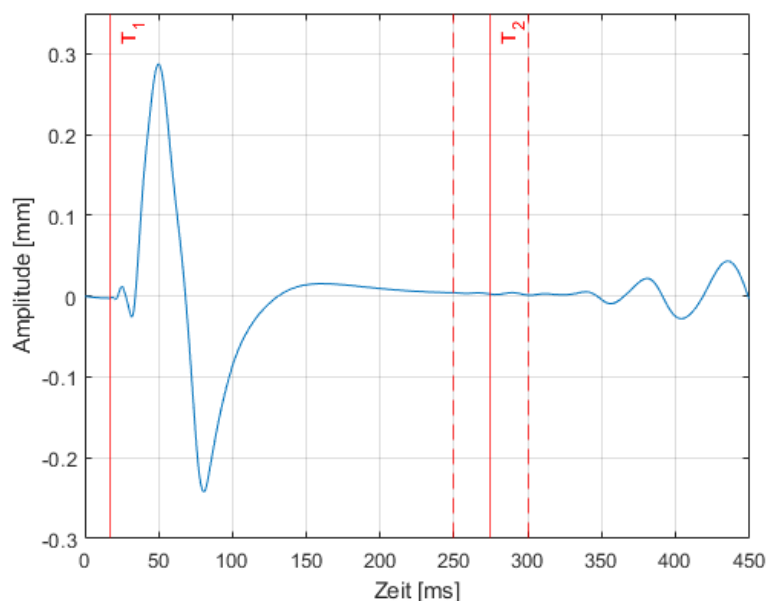


Abbildung 28: Der zeitliche Verlauf einer Oberflächenwelle mit auftretenden Reflexionen vom Rand des Wasserreservoirs. Der Zeitpunkt  $T_1$  markiert dabei das erste Auftreten von Wellen am Konfokalsensor und der Zeitpunkt  $T_2$  markiert das erste Auftreten von Reflexionen. Die gestrichelte rote Linie repräsentiert den Fehler bei der Bestimmung der jeweiligen Zeitpunkte.

Um die Oberflächenwelle zu charakterisieren ist eine Bestimmung der Wellenparameter nötig. Dabei wird meist auf eine optische Bildauswertung zurückgegriffen, um die Wellenlänge zu bestimmen. [8; 25; 26] Es wird die Dispersionsbeziehung für eine Potentialströmung aus Gleichung 2.8 benutzt, um die Ausbreitungsgeschwindigkeit und somit die Frequenz der Wellen zu bestimmen. Da ein optischer Zugang zur Flüssigkeitsoberfläche aufgrund des Wellengenerators nur schwer zu realisieren ist, wird eine andere Technik zur Wellenmessung verwendet. Diese stützt sich auf die Reflexionen der Wellen vom Rand des

Messergebnisse

Films und ist in Abbildung 28 exemplarisch für den Tropfenaufprall auf dem Wasserreservoir dargestellt. Zum Zeitpunkt  $T_1$  tritt dabei die erste Welle durch den Konfokalsensor. Nachdem die ursprünglichen Wellen den Konfokalsensor komplett durchlaufen haben, tritt ab einem Zeitpunkt  $T_2$  die erste Reflexion vom Rand des Reservoirs durch den Konfokalsensor. Mit bekannter Distanz  $b$  vom Konfokalsensor zum Rand (siehe Abbildung 19), kann mit Hilfe der Zeit  $T_2 - T_1$  die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  mithilfe folgender Formel abgeschätzt werden:

$$c = \frac{2b}{T_2 - T_1} \quad (6.3)$$

Eine Abschätzung des Fehlers erfolgt mit Hilfe einer Fehlerfortpflanzung der fehlerbehafteten Größen  $T_2$ ,  $T_1$  und  $b$ , wobei der größte Fehler bei der Bestimmung von  $T_2$  liegt. Analog erfolgt die Berechnung der Ausbreitungsgeschwindigkeit für den Tropfenaufprall auf dem Dünnfilm. Dabei wird eine Totale Reflexion der Wellen am Rand angenommen, und eine Dissipation der kinetischen Energie der Welle vernachlässigt.

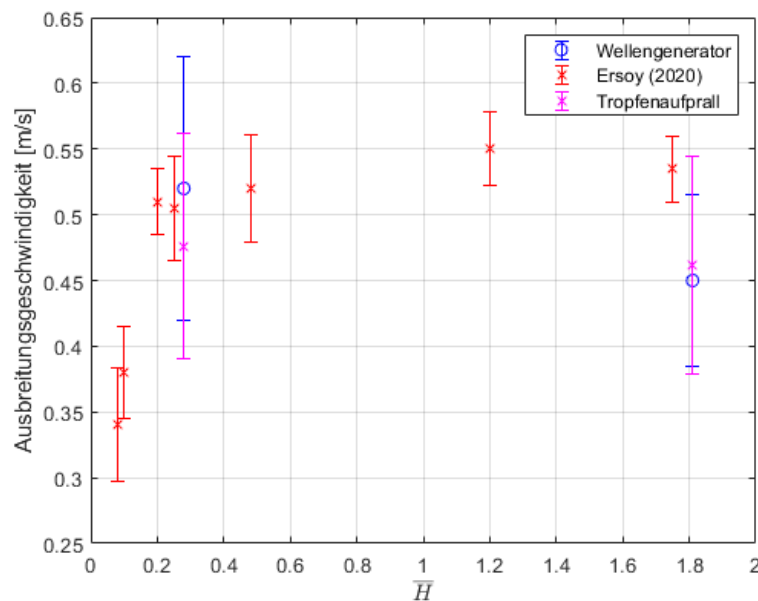


Abbildung 29: Vergleich der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der dimensionslosen Filmdicken mit den experimentellen Werten von Ersoy et al. ( $We = 125$ ) Die Versuche des akustischen Generators wurden mit einer Erregungsfrequenz von 100 Hz durchgeführt und die Tropfenaufprallversuche der vorliegenden Arbeit wurden mit einer Fallhöhe von 150 mm ( $We = 87$ ) durchgeführt. [25] Die Balken repräsentierten den jeweiligen Fehler.

Als Vergleich können Literaturwerte herangezogen werden, welche jedoch im Bereich der Dünnsfilme nur sehr spärlich vorhanden sind. Ein Vergleich mit den Versuchen von Ersoy et al. ist in Abbildung 29 dargestellt. [25; 26] Die Werte für die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Kapillarwellen im Dünnsfilm für die Tropfenaufprallversuche von Ersoy et al. zeigen sowohl mit den akustisch generierten, als auch mit den, in dieser Arbeit durchgeführten Tropfenaufprallversuchen gute Übereinstimmung. Bei der Ausbreitungsgeschwindigkeit auf dem Wasserreservoir ist sowohl bei den akustisch generierten, als auch bei

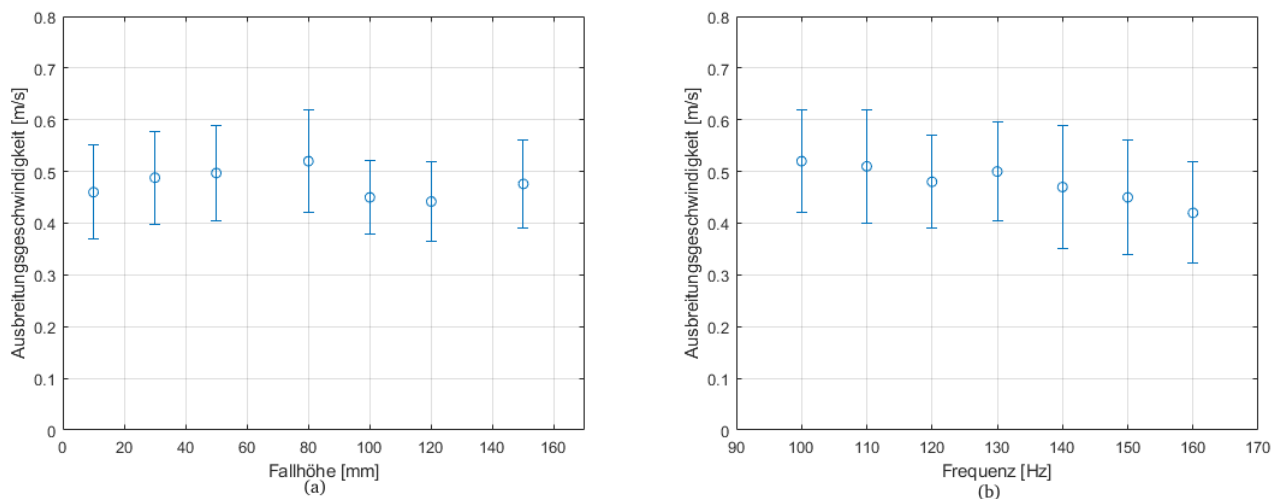


Abbildung 30: : (a) Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen auf dem Dünnsfilm in Abhängigkeit der Fallhöhe des Tropfenaufpralls. (b) Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen auf dem Dünnsfilm in Abhängigkeit der Erregungsfrequenz des akustischen Generators. Der blaue Balken repräsentiert den Fehler, berechnet durch die Fehlerfortpflanzung.

den Tropfenaufprallwellen eine Abweichung zu den Werten von Ersoy et al. zu erkennen. Weiterhin ist darauf hinzuweisen, dass die spärlich verfügbare Literatur zu den Wellenparametern beim Tropfenaufprall widersprüchliche Ergebnisse liefert. Khan et al. und Ersoy et al. geben in ihrer Auswertung der Wellenparameter für ähnliche dimensionslose Filmdicken und Weberzahlen deutlich voneinander abweichende experimentelle Werte an. [25; 26] Weiterhin sind die experimentellen Ergebnisse von Ersoy et al. widersprüchlich zu einer vorangegangenen Veröffentlichung vom selben Autor. [8; 25]

Abbildung 32 (a) zeigt die Ausbreitungsgeschwindigkeit für den Tropfenaufprall auf dem Dünnsfilm für verschiedene Fallhöhen, also Weberzahlen. Es zeigt sich, dass sich diese im Bereich von 0,4 – 0,6 m/s befindet. In Abbildung 31 (b) ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit für die akustisch erzeugten Wellen dargestellt. Es ist ein leichter Abwärtstrend in der Ausbreitungsgeschwindigkeit mit zunehmender Frequenz zu erkennen.

Um die Frequenz und die Wellenlänge der Oberflächenwellen zu bestimmen wird die Dispersionsbeziehung aus Gleichung 2.8 verwendet. Die Wellenlängen für die Oberflächenwellen des Tropfenaufpralls sind in Abbildung 32 (a) dargestellt. Diese befinden sich im Bereich von 1,5 – 2,5 mm. Die Wellenlängen der akustisch erzeugten Wellen sind in Abbildung 32 (b) dargestellt. Die Wellenlängen befinden sich im gleichen Bereich wie die des Tropfenaufpralls. Es ist ein leichter Aufwärtstrend der Wellenlänge mit

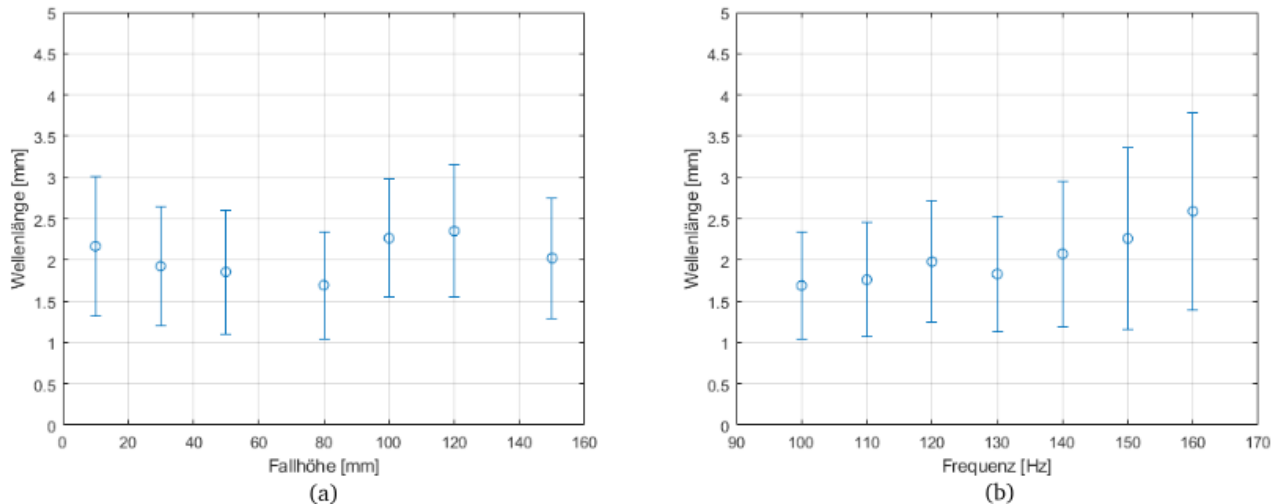


Abbildung 31: (a) Die Wellenlänge der Wellen auf dem Dünnsfilm in Abhängigkeit der Fallhöhe des Tropfenaufpralls. (b) Die Wellenlänge der Wellen auf dem Dünnsfilm in Abhängigkeit der Erregungsfrequenz des akustischen Generators. Der blaue Balken repräsentiert den Fehler, berechnet durch die Fehlerfortpflanzung.

steigender Erregungsfrequenz zu erkennen.

Die Frequenzen der Oberflächenwellen für den Tropfenaufprall und die akustisch erzeugten Wellen sind in Abbildung 33 dargestellt. Die Frequenzen der Wellen des Tropfenaufpralls liegen in einem Bereich von 190 – 320 Hz. Die akustisch generierten Oberflächenwellen weisen ähnliche Werte auf, jedoch ist hier ein Abwärtstrend der Frequenz der Oberflächenwellen mit steigender Erregungsfrequenz zu erkennen.

Ein Vergleich der experimentell ermittelten Wellenlängen und Frequenzen der Oberflächenwellen mit Literaturwerten von Khan et al. und Ersoy et al. zeigt gute Übereinstimmung. [25; 26]

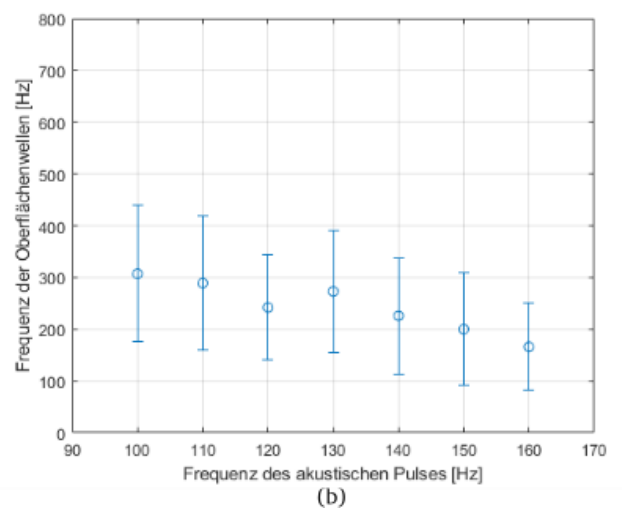
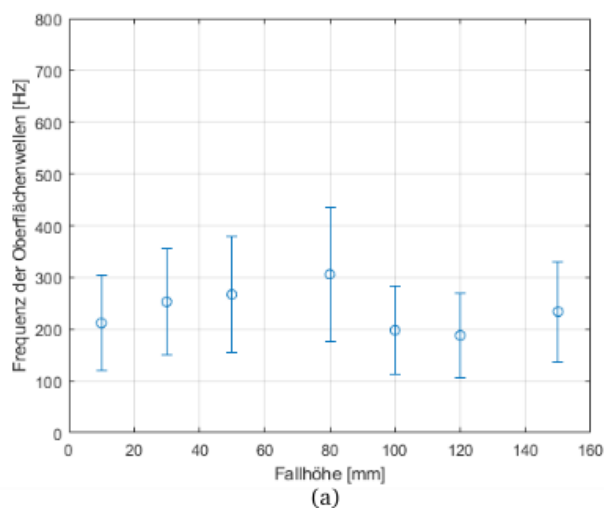


Abbildung 32: (a) Die Frequenz der Wellen auf dem Dünnsfilm in Abhängigkeit der Fallhöhe des Tropfenaufpralls. (b) Die Frequenz der Wellen auf dem Dünnsfilm in Abhängigkeit der Erregungsfrequenz des akustischen Generators. Der blaue Balken repräsentiert den Fehler, berechnet durch die Fehlerfortpflanzung.



---

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

---

Im Rahmen dieser Arbeit konnte ein Kapillarwellengenerator entwickelt werden, der die durch den Tropfenaufprall induzierten Kapillarwellen nachbilden kann. Es wurden mehrere Konzepte bewertet und schließlich ein akustischer Kapillarwellengenerator als Konzept ausgewählt. Dieser erfüllt alle Anforderungen hinsichtlich der Implementierung in den bestehenden Prüfstand und der Parameter der zu erzeugenden Kapillarwellen. Die Kapillarwellen werden mit Hilfe eines akustischen Pulses generiert, der über einen Wellenleiter und die Gassäule an die Flüssigkeitsoberfläche übertragen wird.

Der Kapillarwellengenerator kann hinsichtlich des Bauraums in den bestehenden Prüfstand integriert werden. Die induzierten Kapillarwellen des akustischen Generators sind dabei vergleichbar mit denen eines Wassertropfens mit 2,2 mm Durchmesser.

Die Kapillarwellen wurden im Zeitbereich abhängig von ihrer Amplitude mit Hilfe eines Konfokalsensors untersucht. Dabei wurden die erzeugten Kapillarwellen hinsichtlich der verschiedenen einstellbaren Parameter des akustischen Generators betrachtet. Diese umfassen den Abstand des Wellenleiterendes zur Flüssigkeitsoberfläche, die Dauer des akustischen Pulses und die Erregungsfrequenz des Lautsprechers. Ausgehend von den Versuchen wurden die optimalen Betriebsparameter ermittelt. Es konnte gezeigt werden, dass sich mit Hilfe einer Variation in der Erregungsfrequenz des akustischen Generators die Kapillarwellen von Tropfenaufprällen mit verschiedenen Fallhöhen, also Weberzahlen, nachbilden lassen.

Eine Methode zur Abschätzung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen wurde dargelegt. Weiterhin wurden die Wellenlänge und Frequenz der induzierten Kapillarwellen bestimmt, und mit Literaturwerten verglichen. Die experimentell ermittelten Werte zeigen gute Übereinstimmung mit den Literaturwerten.

Es konnten Anomalien, wie z.B. Riffelungen auf den induzierten Wellen des Tropfenaufpralls beobachtet werden. Dies, und die fehlerbehaftete Messung der Wellenparameter legen weitere Untersuchungen mit einer Bildauswertung nahe. Weiterhin steht die Integration des Wellengenerators in den Prüfstand aus. Eine Erprobung des Kapillarwellengenerators, sowie des Tropfenaufpralls wurde im Rahmen dieser Arbeit nur mit Wasser als Medium durchgeführt. Eine Erweiterung der Versuche auf die Medien Silikonöl, sowie AdBlue liegen nahe.

---

## 8 Literaturverzeichnis

---

- [1] Breitenbach, J.; Roisman, I. V.; Tropea, C. (2018) *From drop impact physics to spray cooling models: a critical review* in: Experiments in Fluids 59, H. 3. <https://doi.org/10.1007/s00348-018-2514-3>
- [2] Liang, G.; Mudawar, I. (2016) *Review of mass and momentum interactions during drop impact on a liquid film* in: International Journal of Heat and Mass Transfer 101, S. 577–599. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.062>
- [3] Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M. (2021) *Physik für Ingenieure*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [4] Buczko, Helbrecht, Sperling, Siegel (2019) *Entwicklung eines Tropfengenerators zur Untersuchung des multiplen Tropfenaufpralls auf eine beheizte Oberfläche* [ADP]. TU Darmstadt.
- [5] Lee, E. R. *Microdrop Generation*. CRC Press, 2002. <http://dx.doi.org/10.1201/9781420039986>. <http://dx.doi.org/10.1201/9781420039986>.
- [6] Bernard, R. *Phasenfeld Simulationen eines Tropfenaufpralls auf strukturierten Oberflächen*. KIT.
- [7] *TRR15 – SFB/Transregio (TRR) 150* [Projekt A07].
- [8] Ersoy, N. E.; Eslamian, M. (2019) *Capillary surface wave formation and mixing of miscible liquids during droplet impact onto a liquid film* in: Physics of Fluids 31, H. 1, S. 12107. <https://doi.org/10.1063/1.5064640>
- [9] Slavchov, R. I.; Peychev, B.; Ismail, A. S. (2021) *Characterization of capillary waves: A review and a new optical method* in: Physics of Fluids 33, H. 10, S. 101–303. <https://doi.org/10.1063/5.0066759>
- [10] Behroozi, F.; Perkins, A. (2006) *Direct measurement of the dispersion relation of capillary waves by laser interferometry* in: American Journal of Physics 74, H. 11, S. 957–961. <https://doi.org/10.1119/1.2215617>
- [11] Nikolić, D.; Nešić, L. (2012) *Determination of surface tension coefficient of liquids by diffraction of light on capillary waves* in: European Journal of Physics 33, H. 6, S. 1677–1685. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/33/6/1677>
- [12] Royal Society © 2017 (1966) *On the damping of capillary waves by surface films* in: Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts 13, H. 1, S. 124. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(66\)90051-9](https://doi.org/10.1016/0011-7471(66)90051-9)
- [13] Vinnichenko, N. A. et al. (2020) *Measurements of liquid surface relief with moon-glade background oriented Schlieren technique* in: Experimental Thermal and Fluid Science 114, S. 110051. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2020.110051>

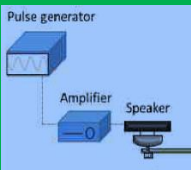
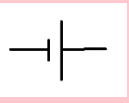
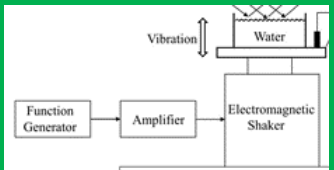
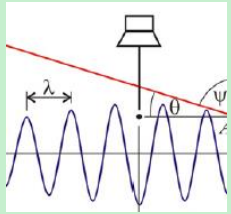
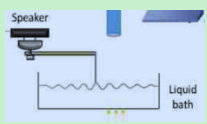
- 
- [14] Davies, J. T., & Vose, R. W. (1965) *On the damping of capillary waves by surface films* [Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 286(1405), 218–234.].
- [15] Thiessen, D.; Scheludko, A. (1967) *Dämpfung von zylindrischen stehenden Kapillarwellen durch grenzflächenaktive Stoffe* in: Kolloid-Zeitschrift und Zeitschrift für Polymere 218, H. 2, S. 139–148. <https://doi.org/10.1007/BF01500356>
- [16] J.R. Saylor, A.J. Szeri, G.P.Foulks (2000) *Measurement of surfactant properties using circular capillary wave field*. Springer Verlag.
- [17] Shao, X. et al. (2021) *On the role of meniscus geometry in capillary wave generation* in: Experiments in Fluids 62, H. 3. <https://doi.org/10.1007/s00348-021-03161-3>
- [18] Chantelot, P.; Domino, L.; Eddi, A. (2020) *How capillarity affects the propagation of elastic waves in soft gels* in: Physical review. E 101, 3-1, p. 32609. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.101.032609>
- [19] Shmyrov, A. et al. (2019) *Capillary wave method: An alternative approach to wave excitation and to wave profile reconstruction* in: Physics of Fluids 31, H. 1, S. 12101. <https://doi.org/10.1063/1.5060666>
- [20] Krutyansky, L. et al. (2019) *Measurements of Interfacial Tension Coefficient Using Excitation of Progressive Capillary Waves by Radiation Pressure of Ultrasound in Microgravity* in: Microgravity Science and Technology 31, H. 6, S. 723–732. <https://doi.org/10.1007/s12217-019-9700-7>
- [21] Shmyrov, A. et al. (2019) *Capillary wave method: An alternative approach to wave excitation and to wave profile reconstruction* in: Physics of Fluids 31, H. 1, S. 12101. <https://doi.org/10.1063/1.5060666>
- [22] Novev, J. K.; Panchev, N.; Slavchov, R. I. (2017) *Evaporating foam films of pure liquid stabilized via the thermal Marangoni effect* in: Chemical Engineering Science 171, S. 520–533. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2017.06.016>
- [23] Sohl, C. H.; Miyano, K.; Ketterson, J. B. (1978) *Novel technique for dynamic surface tension and viscosity measurements at liquid-gas interfaces* in: The Review of scientific instruments 49, Nr. 10, p. 1464. <https://doi.org/10.1063/1.1135288>
- [24] Magerlein, J. H.; Sanders, T. M. (1976) *Surface Tension of He4 near T $\lambda$*  in: Physical Review Letters 36, H. 5, S. 258–261. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.36.258>
- [25] Ersoy, N. E.; Eslamian, M. (2020) *Phenomenological study and comparison of droplet impact dynamics on a dry surface, thin liquid film, liquid film and shallow pool* in: Experimental Thermal and Fluid Science 112, S. 109977. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2019.109977>

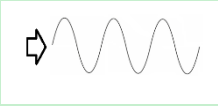
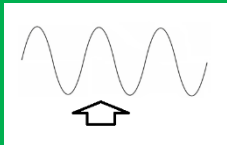
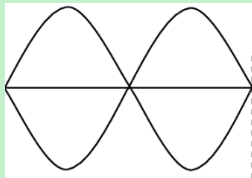
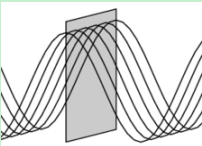

- 
- [26] Khan, T.; Ersoy, N. E.; Eslamian, M. (2020) *Droplet impact on a wavy liquid film under multi-axis lateral vibrations* in: Experiments in Fluids 61, H. 8. <https://doi.org/10.1007/s00348-020-03010-9>
- [27] Måløy, K. J.; Feder, J.; Joossang, T. (1989) *An experimental technique for measurements of capillary waves* in: Review of Scientific Instruments 60, H. 3, S. 481–486. <https://doi.org/10.1063/1.1140403>
- [28] *Konfokale Sensorsysteme für Weg, Abstand, Position und Dicke* [online]. [https://www.micro-epsilon.de/displacement-position-sensors/confocal-sensor/confocal-chromatic-sensors/confo-caLDT\\_2406/](https://www.micro-epsilon.de/displacement-position-sensors/confocal-sensor/confocal-chromatic-sensors/confo-caLDT_2406/) [Zugriff am: 8. Apr. 2022].
- [29] Anne Katharina Geppert (2019) *Experimental Investigation of Droplet Wall-Film Interaction of Binary Systems* [Dissertation]. Universität Stuttgart.
- [30] Khuri-Yakub, B. T. et al. (1988) *Ultrasonic excitation and detection of capillary waves for the measurement of surface film properties* in: Applied Physics Letters 52, H. 19, S. 1571–1572. <https://doi.org/10.1063/1.99084>
- [31] Tan, M. K. et al. (2010) *Capillary wave motion excited by high frequency surface acoustic waves* in: Physics of Fluids 22, H. 11, S. 112112. <https://doi.org/10.1063/1.3505044>
- [32] Higginbotham, A. P. et al. (2011) *Evidence of the harmonic Faraday instability in ultrasonic atomization experiments with a deep, inviscid fluid* in: The Journal of the Acoustical Society of America 130, Nr. 5, pp. 2694–2699. <https://doi.org/10.1121/1.3643816>

## Anhang

### Anhang 1

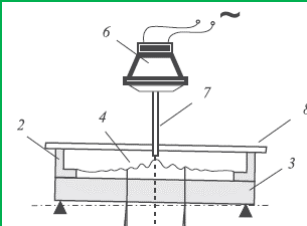
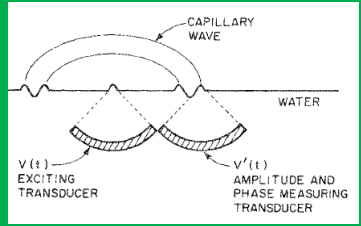
Tabelle 2: Morphologischer Kasten für Wirkprinzip mechanischer Wellenanregung


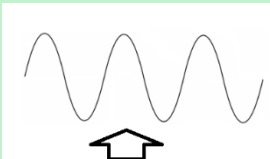
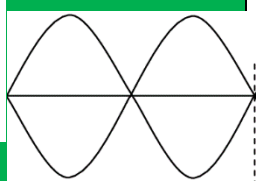
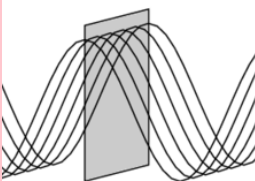
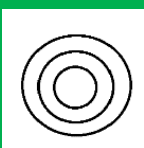
	Sehr gut	Gut	Neutral	Schlecht
<b>Wirkprinzip Wellenanregung</b>	Akustisch	Mechanisch	Elektrostatisch	
<b>Aktor</b>	Akustikgenerator [9] 		Nur Spannungsquelle 	Elektromagnet [15]; [16]; [17] 
<b>Übertragungsart</b>	kontaktlos	direkter Kontakt		
<b>Übertragungsmittel</b>	Ohne	Nadel (Draht) [11] 	flache Platte/Glasobjektträger [9] 	Zylinder [9] Luft Behälter/Wand [9; 15] schwebender Magnet [18]

<b>Reini- gungs- me- thode</b>	Ohne [15–17; 27]	Abspülen [9]	Reinigungsmittel di- rekt auftragen	Ab- sau- gen [9; 27]	
<b>Aus- brei- tungs- rich- tung</b>	horizontal [9; 16] 	vertikal [[9; 15–17; 27] 	stehend [[9; 15–17; 27] 		
<b>Räum- liche Wel- lener- zeu- gung</b>	ebene Wellen [15; 27] 	zylindrische Wel- len[[9; 16–18] 			
<b>Steu- erbar- keit</b>	Wellenlänge	Frequenz [1]	Amplitude [1,3]	Al- les	

## Anhang 2

**Tabelle 3:** Morphologischer Kasten für Wirkprinzip akustische Wellenanregung

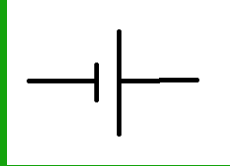
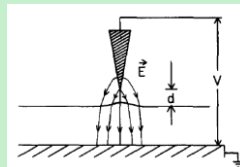
	Sehr gut	Gut	Neutral	Schlecht
<b>Wirkprinzip Wellenanregung</b>	Akustisch	Mechanisch	Elektrostatisch	
<b>Aktor</b>	Akustikgenerator [21] 		Nur Spannungsquelle 	Piezo[20; 24; 31; 32] 
<b>Übertragungsart</b>	Kontaktlos [21]	direkter Kontakt [32]		
<b>Übertragungsmittel</b>	Ohne[31; 32]	Nadel (Draht) [21]	Klinge	Zylinder Luft Behälter/Wanne Glasplatte


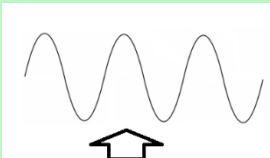
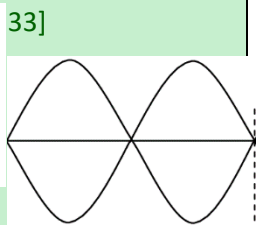
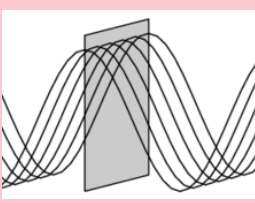
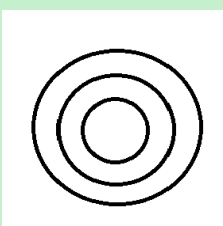
<b>Reini- gungs- me- thode</b>	Ohne	Abspülen	Reinigungsmittel direkt auftragen	Ab- sau- gen	
<b>Aus- brei- tungs- rich- tung</b>	Horizontal 	vertikal [21; 32] 	stehend [16; 21; 31; 32] 		
<b>Räum- liche Wel- lener- zeu- gung</b>	ebene Wellen 	zylindrische Wel- len[[16; 21; 31; 32] 			
<b>Steu- er- bar- keit</b>	Wellenlänge	Frequenz	Amplitude	Al- les	



### Anhang 3

**Tabelle 4:** Morphologischer Kasten für Wirkprinzip elektrostatische Wellenanregung

Sehr gut		Gut		Neutral		Schlecht	
Wirkprinzip	Wellenanregung	Akustisch	Mechanisch	Elektrostatisch			
Aktor	Akustikgenerator				Elektromagnet		
Übertragungsart	kontaktlos	direkter Kontakt					
Übertragungsmittel	Ohne [23; 24; 33]	Nadel (Draht)		Zylinder	Luft	Behälter/Wand	Glasplatte

<b>Reini- gungs- me- thode</b>	Ohne [15–17; 27]	Abspülen	Reinigungsmittel direkt auftragen	Ab- sau- gen	
<b>Aus- brei- tungs- rich- tung</b>	Horizontal 	vertikal [23; 24; 33] 	stehend [23; 24; 33] 		
<b>Räum- liche Wel- lener- zeu- gung</b>	ebene Wellen 	zylindrische Wellen 			
<b>Steu- er- bar- keit</b>	Wellenlänge	Frequenz	Amplitude	Al- les	

