

US3

## **Doppler-Sonographie**

Felix Symma

felix.symma@tu-dortmund.de

Joel Koch

joel.koch@tu-dortmund.de

Durchführung: 19.04.2022

Abgabe: 26.04.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Zielsetzung</b>                                | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>Theorie</b>                                    | <b>3</b>  |
| <b>3</b> | <b>Durchführung</b>                               | <b>3</b>  |
| <b>4</b> | <b>Auswertung</b>                                 | <b>5</b>  |
| 4.1      | Auswertung der Strömungsgeschwindigkeit . . . . . | 5         |
| 4.2      | Auswertung des Strömungsprofils . . . . .         | 7         |
| <b>5</b> | <b>Diskussion</b>                                 | <b>10</b> |
| 5.1      | Diskussion der Ergebnisse . . . . .               | 10        |
| 5.2      | Diskussion der Fehlerquellen . . . . .            | 11        |
|          | <b>Literatur</b>                                  | <b>11</b> |

## 1 Zielsetzung

Ziel dieses Versuches ist es, das Verhalten von Rohrströmungen mit Hilfe von Ultraschall zu untersuchen.

## 2 Theorie

Menschen können in einem Frequenzintervall von ca. 16 Hz bis 20 kHz hören. Der Frequenzbereich darüber bis 1 GHz wird als Ultraschall und der jenseits von 1 GHz als Hyperschall bezeichnet. Frequenzen unterhalb des für Menschen hörbaren Bereichs werden Infraschall genannt.

Zur Erzeugung des Schalls wird sich der reziproke piezo-elektrische-Effekt zu Nutzen gemacht. Hierfür wird ein geeigneter piezo-elektrischer Kristall in einem elektrischen Wechselfeld zu Schwingungen angeregt, wobei dieser Ultraschallwellen abstrahlt. Der Kristall kann ebenso genutzt werden, um Schallwellen zu empfangen, da diese ihn wiederum zu Schwingungen anregen.

In diesem Versuch wird der Doppler-Effekt ausgenutzt, um die Geschwindigkeit von Rohrströmungen zu messen. Durch die Bewegungsgeschwindigkeit der Flüssigkeit wird die Frequenz der Schallwellen verändert. Aus der Differenz der Frequenzen lässt sich dann wiederum auf die Geschwindigkeit der Strömung schließen. Für die Differenz der Frequenzen gilt

$$\Delta\nu = 2\nu_0 \frac{v}{c} \cos(\alpha), \quad (1)$$

wobei  $\nu_0$  die ursprüngliche Frequenz,  $v$  die Geschwindigkeit der Strömung,  $c$  die Schallgeschwindigkeit in der Flüssigkeit und  $\alpha$  der Winkel unter dem die Schallwellen auf die Röhre treffen ist.

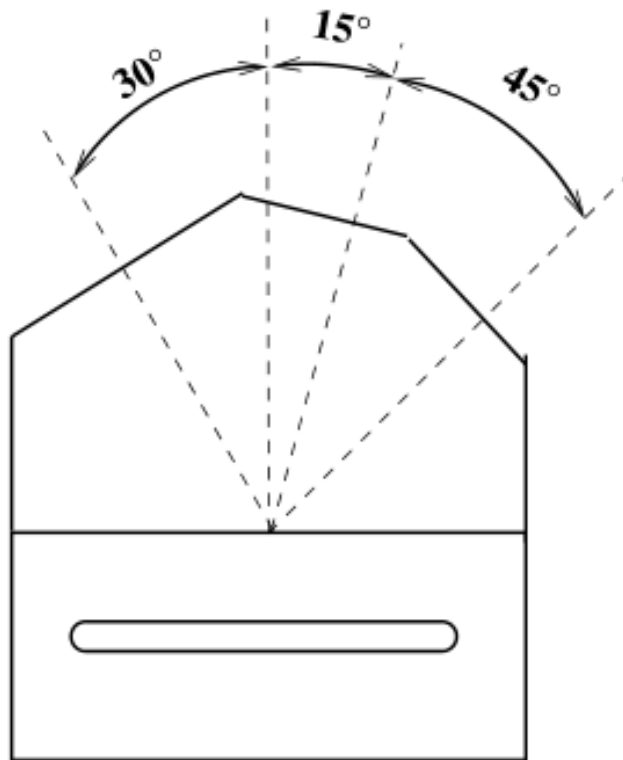
Um die verwendete Ultraschallsonde besser an die Röhre koppeln zu können und dies vor allem auch unter einfach reproduzierbaren Winkeln, wird ein Doppler-Prisma aus Acryl verwendet. Auf Grund von Brechung innerhalb des Prismas entsprechen die Einstellwinkel des Prismas nicht den zu verwendenden Doppler-Winkeln. Aus dem Brechungsgesetz folgt für die zu verwendenden Winkel  $\alpha$

$$\alpha = 90^\circ - \arcsin\left(\sin(\varphi) \frac{c_L}{c_P}\right), \quad (2)$$

wobei  $c_L$  die Schallgeschwindigkeit in der Flüssigkeit,  $c_P$  die Schallgeschwindigkeit im Prismenmaterial und  $\varphi$  der Einstellwinkel des Prismas ist [1].

## 3 Durchführung

Der Versuch besteht aus einem Kreislauf aus Acryl Rohren und Schläuchen, durch den ein Gemisch aus Wasser, Glycerin und Glaskugeln fließt. Die Flüssigkeit wird von einer Zentrifugalpumpe angetrieben. Die Fließgeschwindigkeit ist hierbei einstellbar.



**Abbildung 1:** Doppler-Prisma mit Winkeln.

Es wird ein ebenfalls aus Acryl bestehendes Doppler-Prisma, wie in Abbildung 1 verwendet, um die Schallsonde in einem reproduzierbarem Winkel mit dem Rohr zu koppeln. Alle Abstände der verschiedenen Flächen des Prismas zum Rohr sind hierbei identisch. Zum Senden und Empfangen von Ultraschallwellen wird in diesem Versuch eine, an einen Doppler-Generaor angeschlossene und zur Auslesung von Daten mit einen Computer verbundene 2MHz Schallsonde verwendet. Die Messdaten werden am Computer mit dem Programm Flowview dargestellt und gespeichert. Auf jegliche Flächen zwischen Rohr, Prisma und Schallsonde wird Ultraschallgel aufgetragen, um die Absorbition von Schall durch die Luft zu minimieren.

Der ersten Teil des Versuches besteht daraus, die Strömungsgeschwindigkeit der Flüssigkeit durch das Acryl Rohr für fünf verschiedene Leistungsstufen der Zentrifugalpumpe zu bestimmen. Die Messung für alle fünf Geschwindigkeiten werden jeweils an allen dreien in Abbildung 1 zu sehenden Winkeln durchgeführt.

Es wird hierzu die Schallsonde unter Verwendung von Ultraschallgel an das Doppler-Prisma gekoppelt und am Doppler-Generator ein Sample-Volume von Large eingestellt. Im Anschluss kann die Zentrifugalpumpe auf bestimmte Leistungswerte eingestellt werden. Diese werden zusammen mit den zugehörigen Messwerte der Schallsonde für die

Frequenzen am Computer gespeichert.

Im zweiten Teil des Versuches wird nun das Strömungsprofil der Dopplerflüssigkeit bestimmt. Es wird die Schallsonde mit dem Doppler-Prisma gekoppelt und das Sample-Volume auf Small gestellt. Die Zentrifugalpumpe wird zunächst auf 70% der Maximalleistung eingestellt, wobei im Anschluss eine identische Messreihe mit 45% durchgeführt wird.

Zur Messung des Strömungsprofils muss die Messtiefe der Schallsonde variiert werden. Sie wird von  $12\mu\text{s}$  auf  $20\mu\text{s}$  in Schritten von  $0,5\mu\text{s}$  erhöht. Die Messwerte der Streuintensität und Momentangeschwindigkeit werden jeweils mit den zugehörigen Messtiefen vom Computer abgelesen und notiert.

## 4 Auswertung

Im folgenden wird sowohl die Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Prismawinkels  $\varphi$  ausgewertet, als auch ein Strömungsprofil für den mittleren Schlauch angelegt. Die ausgewerteten Messwerte werden grafisch dargestellt.

### 4.1 Auswertung der Strömungsgeschwindigkeit

Als erstes wird zu den jeweiligen Winkeln  $\varphi$ , die am Prisma eingestellt wurden, der zugehörige Dopplerwinkel  $\alpha$  nach Gleichung (2) berechnet und in Tabelle 1 eingetragen.

**Tabelle 1:** Prisma- und Dopplerwinkel.

| Prismawinkel $\varphi$ | Dopplerwinkel $\alpha$ |
|------------------------|------------------------|
| $15^\circ$             | $80,06^\circ$          |
| $30^\circ$             | $70,53^\circ$          |
| $45^\circ$             | $61,87^\circ$          |

Es wird die Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Dopplerwinkels  $\alpha$  untersucht. Hierzu wird ein Rohr mit einem Außendurchmesser von 20 mm und einem Innendurchmesser von 16 mm verwendet und an den drei verschiedenen Winkeln ausgewertet. Die Messwerte sind der Tabelle 2 zu entnehmen. An der Zentrifugalpumpe, die die Strömungsgeschwindigkeit regelt, wurde in einem Bereich von 3000 rpm bis 7000 rpm in Schrittweiten von 1000 rpm gemessen. Dies entspricht den in der Tabelle verzeichneten Abweichungen von der maximalen Leistung (8400 rpm). Sie sind gegenüber der Differenz der maximalen und minimalen Frequenz  $\Delta\nu = f_{\text{max}} - f_{\text{mean}}$  dargestellt.

**Tabelle 2:** Frequenzdifferenz  $\Delta\nu$  in Abhängigkeit der Pumpleistung.

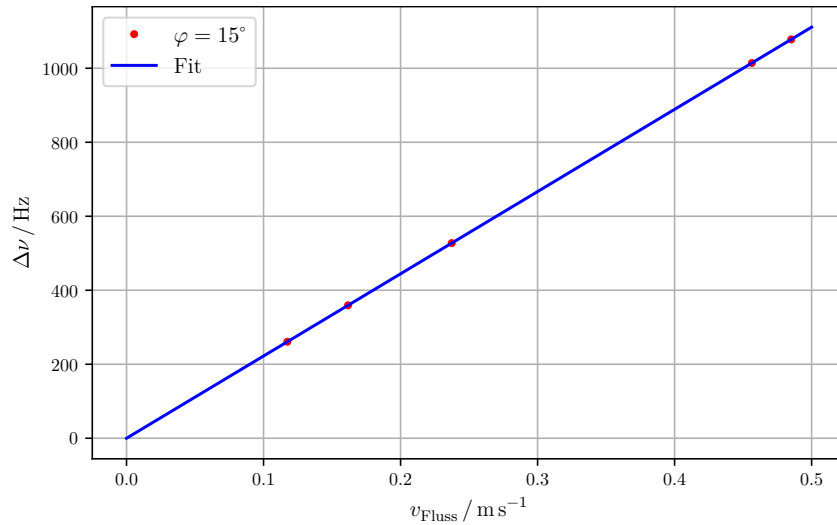
| Prismawinkel $\varphi$ | 35,7% | 47,62% | 59,52% | 71,43% | 83,3%  |
|------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 15°                    | 45 Hz | 62 Hz  | 91 Hz  | 175 Hz | 186 Hz |
| 30°                    | 55 Hz | 102 Hz | 152 Hz | 246 Hz | 355 Hz |
| 45°                    | 96 Hz | 184 Hz | 298 Hz | 461 Hz | 643 Hz |

Die Strömungsgeschwindigkeiten  $v$  folgen nun, indem die Gleichung 1 umgestellt wird. Die berechneten Strömungsgeschwindigkeiten sind in Tabelle 3 eingetragen.

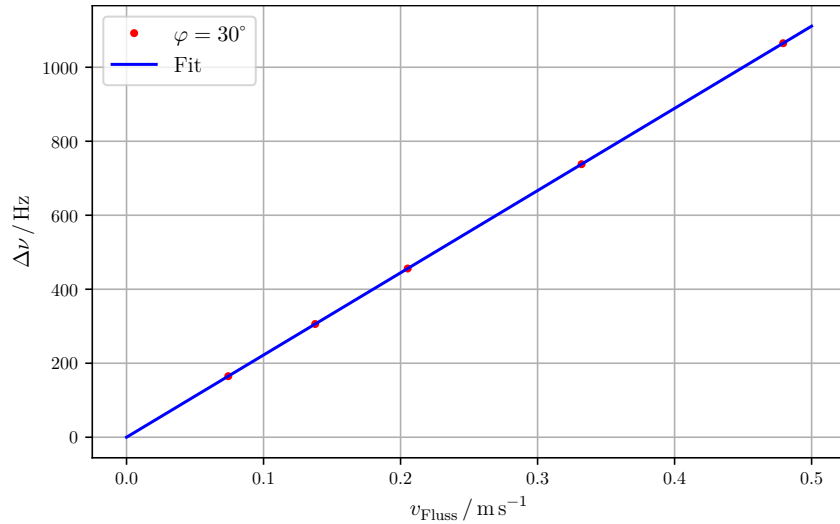
**Tabelle 3:** Strömungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Pumpleistung.

| Prismawinkel $\varphi$ | 35,7%      | 47,62%     | 59,52%     | 71,43%     | 83,3%      |
|------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 15°                    | 0,1174 m/s | 0,1617 m/s | 0,2373 m/s | 0,4564 m/s | 0,4851 m/s |
| 30°                    | 0,0743 m/s | 0,1377 m/s | 0,2052 m/s | 0,3321 m/s | 0,4793 m/s |
| 45°                    | 0,0916 m/s | 0,1756 m/s | 0,2845 m/s | 0,4401 m/s | 0,6138 m/s |

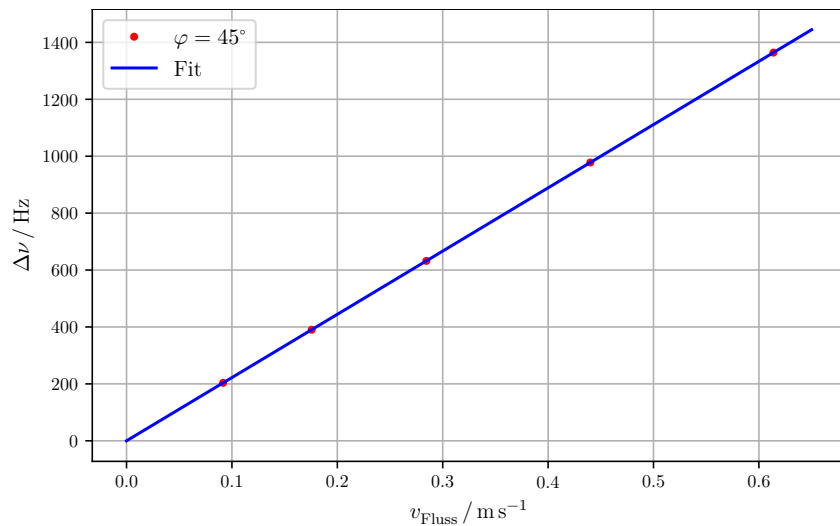
Die Strömungsgeschwindigkeiten  $v$  folgen nun, indem die Formel (1) umgestellt wird. In der Abbildung 2, Abbildung 3 und Abbildung 4 sind die Werte aus der berechneten Strömungsgeschwindigkeiten visuell gegen den Quotient aus der Frequenzdifferenz  $\Delta\nu$  und  $\cos(\alpha)$  für den jeweiligen Winkel dargestellt.



**Abbildung 2:** Messwerte den Einstrahlwinkel von 15° gegen die berechnete Strömungsgeschwindigkeit  $\frac{\Delta\nu}{\cos(\alpha)}$ .



**Abbildung 3:** Messwerte den Einstrahlwinkel von  $30^\circ$  gegen die berechnete Strömungsgeschwindigkeit  $\frac{\Delta\nu}{\cos(\alpha)}$ .



**Abbildung 4:** Messwerte den Einstrahlwinkel von  $45^\circ$  gegen die berechnete Strömungsgeschwindigkeit  $\frac{\Delta\nu}{\cos(\alpha)}$ .

## 4.2 Auswertung des Strömungsprofils

Im zweiten Teil des Versuches wird für einen Schlauch mit einem Außendurchmesser von 15 mm und einem Innendurchmesser von 10 mm ein Strömungsprofil unter einem Einfallwinkel von  $45^\circ$  angelegt. Die Messwerte für eine Leistung von 70% sind in Tabelle 5 und für 45% in Tabelle 4 zu finden. Dargestellt sind die Messtiefe des Ultraschalls, die Signalstärke und die Fließgeschwindigkeit der Flüssigkeit. Die Werte sind außerdem in

Abbildung 5 für eine Pumpleistung von 45% und in Abbildung 6 für eine Pumpleistung von 70% eingetragen.

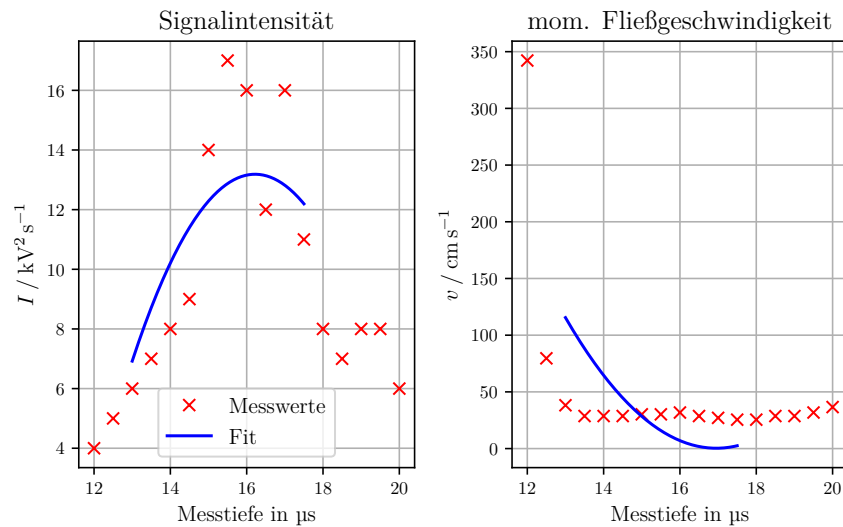
**Tabelle 4:** Messwerte des zweiten Aufgabenteils bei 45 % Leistung (3.870 rpm) des Gerätes.

| Tiefe / $\mu\text{s}$ | Signalstärke / $1000 \text{ V}^2/\text{s}$ | Fließgeschwindigkeit / $\text{cm/s}$ |
|-----------------------|--|--------------------------------------|
| 12,0                  | 4  | 342,2                                |
| 12,5                  | 5  | 79,6                                 |
| 13,0                  | 6  | 38,2                                 |
| 13,5                  | 7  | 28,7                                 |
| 14,0                  | 8  | 28,7                                 |
| 14,5                  | 9  | 28,7                                 |
| 15,0                  | 14   | 30,2                                 |
| 15,5                  | 17   | 30,2                                 |
| 16,0                  | 16   | 31,8                                 |
| 16,5                  | 12   | 28,7                                 |
| 17,0                  | 16   | 27,1                                 |
| 17,5                  | 11   | 25,5                                 |
| 18,0                  | 8  | 25,5                                 |
| 18,5                  | 7  | 28,7                                 |
| 19,0                  | 8  | 28,7                                 |
| 19,5                  | 8  | 31,8                                 |
| 20,0                  | 6  | 36,6                                 |

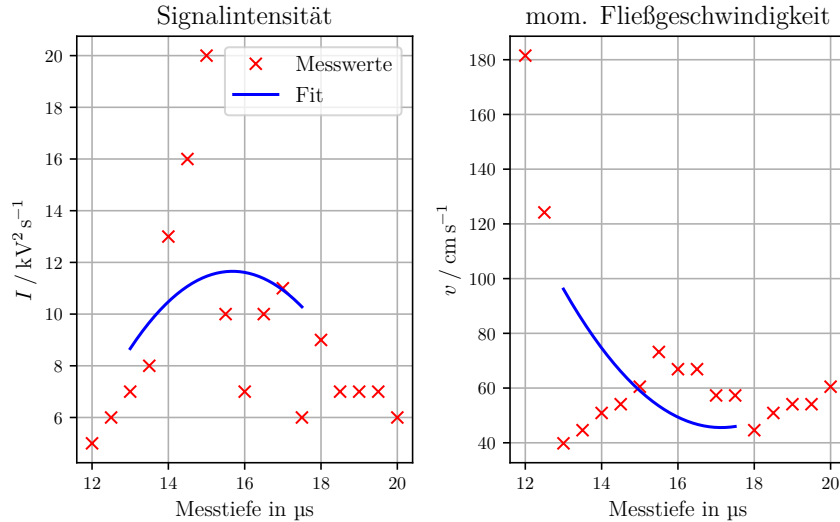


**Tabelle 5:** Messwerte des zweiten Aufgabenteils bei 70 % Leistung (6.000 rpm) des Gerätes.

| Tiefe / $\mu\text{s}$ | Signalstärke / $1000 \text{ V}^2/\text{s}$ | Fließgeschwindigkeit / $\text{cm/s}$ |
|-----------------------|--|--------------------------------------|
| 12,0                  | 5  | 181,5                                |
| 12,5                  | 6  | 124,2                                |
| 13,0                  | 7  | 39,8                                 |
| 13,5                  | 8  | 44,6                                 |
| 14,0                  | 13   | 50,9                                 |
| 14,5                  | 16   | 54,1                                 |
| 15,0                  | 20   | 60,5                                 |
| 15,5                  | 10   | 73,2                                 |
| 16,0                  | 7  | 66,9                                 |
| 16,5                  | 10   | 66,9                                 |
| 17,0                  | 11   | 57,3                                 |
| 17,5                  | 6  | 57,3                                 |
| 18,0                  | 9  | 44,6                                 |
| 18,5                  | 7  | 50,9                                 |
| 19,0                  | 7  | 54,1                                 |
| 19,5                  | 7  | 54,1                                 |
| 20,0                  | 6  | 60,5                                 |



**Abbildung 5:** Grafische Darstellung der Signalintensität und der momentanen Fließgeschwindigkeit bei 45% der Pumpleistung.



**Abbildung 6:** Grafische Darstellung der Signalintensität und der momentanen Fließgeschwindigkeit bei 70% der Pumpleistung.

## 5 Diskussion

### 5.1 Diskussion der Ergebnisse

Beim Aufbau ist anzumerken, dass die Fließgeschwindigkeit durch den kleinen Radius des Schlauches eventuell beeinträchtigt werden könnte. Dieser könnte zu stark gebogen oder sogar geknickt sein, sodass die Flüssigkeit nicht ausreichend fließen kann. Außerdem konnte der Schlauch nicht an das Acryl mit den drei einzustellenden Winkeln gedrückt werden, da die Kunststoffplatte nicht unter den Schlauch passte und somit nicht für eine bessere Fixierung untergeschoben werden konnte.

Im ersten Teil des Versuches konnten genaue Messwerte erfasst werden und eine grafische Auswertung dieser ergibt die zu erwartende lineare Abhängigkeit zwischen dem Quotienten  $\Delta\nu/\cos(\alpha)$  und der Fließgeschwindigkeit  $v$ . Aus der grafischen Auswertung folgt, dass es keinen Zusammenhang zwischen dem Dopplerwinkel und der Strömungsgeschwindigkeit gibt.

Der zweite Teil des Versuches ergab jedoch keine gebrauchbaren Messwerte. Dies liegt vermutlich an der Einstellung des Ultraschall-Doppler Generators. Es war allerdings nicht möglich den Fehler, der die Werte so stark verzerrte, zu finden. Zu erwarten war, dass die Fließgeschwindigkeit mit der Tiefe zunimmt und ein Maximum erreicht, wenn der Ultraschall auf der Tiefe der zu untersuchenden Flüssigkeit angekommen ist. Danach hätte die gemessene Fließgeschwindigkeit wieder abnehmen sollen. Für die Signalintensität hätte sich eine quadratische Verteilung ergeben sollen.

In unserem Versuch ergaben sich keine deutlichen Werte und es gab kein deutlich abzulesendes Maximum. Wie in Abbildung 5 und in Abbildung 6 zu sehen ist, sind die Werte für die Signalintensität nicht quadratisch verteilt, weshalb nahelegt, dass bei der Einstellung am Messprogramm *Flow View* ein Fehler unterlaufen ist. In Abbildung 5 stieg

die momentane Fließgeschwindigkeit auch nicht an, was eine Auswertung der Messwerte unmöglich macht. In Abbildung 6 folgt sie dann auch keinem konkreten Verlauf, auch keinen konstanten, mehr. Auch verschiedene Einstellungen des Ultraschall-Generators und des aufzeichnenden Programmes ergaben keine besseren Messwerte. Es ist deshalb zu sagen, dass der zweite Teil des Versuches nicht auszuwerten ist.

## 5.2 Diskussion der Fehlerquellen

Eine mögliche Fehlerquelle ist das Programm *Flow View*, in dem die angezeigten Werte für die Maximal- und Minimalfrequenz  $f_{\max}$ ,  $f_{\min}$  starken Schwankungen unterlagen. Es war demnach nicht möglich einen genauen Wert abzulesen, wodurch die dadurch bestimmte Frequenzdifferenz ebenfalls hohen Schwankungen unterliegt. Eine weitere Fehlerquelle könnte die Menge des verwendeten Ultraschallgels sein. Da hier jedoch mehrere Male mit unterschiedlichen Mengen versucht wurde, Messwerte zu erstellen und die Qualität nicht besser wurde, ist davon auszugehen, dass zumindest dieser Fehler gering gehalten wurde. Die Strömungsgeschwindigkeit, die von der Pumpe erzeugt wurde, unterlag ebenfalls hohen Schwankungen. Es war nicht möglich eine genaue Pumpleistung einzustellen, da bereits durch Erschütterungen des Tisches, auf dem die Pumpe stand, zu einer anderen Pumpleistung führte. All diese Ungenauigkeiten führten zu schlechteren Messwerten. Jedoch bleibt immer noch offen, weshalb die Messwerte im zweiten Versuchsteil so unbrauchbar sind.

## Literatur

- [1] *Doppler-Sonographie*. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2022.

## Anhang

bei 45° Depth in  $\mu\text{s}$  signal intensity/1000  $\frac{\text{V}^2}{\text{s}}$  speed  $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$

|      |    |       |
|------|----|-------|
| 12   | 9  | 392,2 |
| 12,5 | 5  | 79,6  |
| 13   | 6  | 38,2  |
| 13,5 | 7  | 28,7  |
| 14   | 8  | 28,7  |
| 14,5 | 9  | 28,7  |
| 15   | 14 | 30,2  |
| 15,5 | 17 | 30,2  |
| 16   | 16 | 31,8  |
| 16,5 | 12 | 28,7  |
| 17   | 16 | 27,1  |
| 17,5 | 11 | 25,5  |
| 18   | 8  | 25,5  |
| 18,5 | 7  | 28,7  |
| 19   | 8  | 28,7  |
| 19,5 | 8  | 31,8  |
| 20   | 6  | 26,6  |

J. Müller

Abbildung 7: Originale Messwerte des Versuches.

US3 19.04.22

Vorbereitung:

$$\alpha = 90^\circ - \arcsin\left(\sin(\theta) \cdot \frac{c_L}{c_P}\right) \quad | \quad c_L = 1800 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad c_P = 2700 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\theta = 15^\circ: \alpha = 90^\circ - \arcsin\left(\sin(15^\circ) \cdot \frac{1800}{2700}\right) = 80,06^\circ$$

$$\theta = 30^\circ: \alpha = 70,53^\circ$$

$$\theta = 60^\circ: \alpha = 54,74^\circ$$

| rpm  | t-max | t-mean |
|------|-------|--------|
| 1000 | 84,3  | 2,23   |
| 2000 |       |        |

Tiefe  $\mu\text{s}$  | signal intensity  $1000 \frac{\text{V}^2}{\text{s}}$  | speed  $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$  bei 6.000 rpm  
↳  $T_0 \approx$  Leistung

|      |    |       |
|------|----|-------|
| 12   | 5  | 181,5 |
| 12,5 | 6  | 124,2 |
| 13   | 7  | 89,8  |
| 13,5 | 8  | 44,6  |
| 14   | 13 | 50,9  |
| 14,5 | 16 | 54,1  |
| 15   | 20 | 60,5  |
| 15,5 | 10 | 73,2  |
| 16   | 7  | 66,9  |
| 16,5 | 10 | 60,9  |
| 17   | 11 | 57,3  |
| 17,5 | 6  | 57,3  |
| 18   | 9  | 44,6  |
| 18,5 | 7  | 50,9  |
| 19   | 7  | 54,1  |
| 19,5 | 7  | 54,1  |
| 20   | 6  | 60,5  |

Abbildung 8: Originale Messwerte des Versuches.