

US3

## **Doppler-Sonographie**

David Venker

david.venker@tu-dortmund.de

Nico Guth

nico.guth@tu-dortmund.de

Durchführung: 30.06.2020

Abgabe: 11.07.2020

TU Dortmund – Fakultät Physik

## **Inhaltsverzeichnis**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 Zielsetzung</b>                                  | <b>3</b>  |
| <b>2 Theorie</b>                                      | <b>3</b>  |
| <b>3 Aufbau</b>                                       | <b>4</b>  |
| <b>4 Durchführung</b>                                 | <b>6</b>  |
| <b>5 Auswertung</b>                                   | <b>7</b>  |
| 5.1 Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit . . . . . | 7         |
| 5.2 Erstellung eines Strömungsprofils . . . . .       | 11        |
| <b>6 Diskussion</b>                                   | <b>13</b> |
| <b>Literatur</b>                                      | <b>14</b> |

# 1 Zielsetzung

In diesem Versuch wird eine Flüssigkeit auf ihre Strömungsgeschwindigkeit und ihr Strömungsprofil untersucht. Dazu wird das Prinzip der Ultraschall Doppler-Sonographie verwendet.

## 2 Theorie

Als Ultraschall wird der Schall bezeichnet, welcher in dem Frequenzbereich oberhalb der von Menschen hörbaren Frequenzen liegt. Dieser Bereich liegt etwa zwischen 20 kHz und 1 GHz. Dieser Schall kann dazu verwendet werden Materialien auf Fehlstellen zu untersuchen, ohne dieses zu zerstören.

Hierbei gibt es zwei verschiedene Untersuchungsverfahren. Das Durchschallungsverfahren sendet einen Schallimpuls durch ein Medium und dieser Impuls wird auf der anderen Seite empfangen und auf Zeitdifferenz und Amplitudendifferenz untersucht. Beim Impuls-Echo-Verfahren wird der ausgesendete Impuls an einer Grenzfläche reflektiert und dieser reflektierte Impuls wird untersucht.

Letzteres Verfahren kann auch dazu verwendet werden die Fließgeschwindigkeit einer Objekten in einer Flüssigkeit zu untersuchen. In der Medizin werden so z.B. Blutströmungen untersucht. Dafür wird der Doppler-Effekt genutzt, welcher auch der Namensgeber für die hier beschriebene Doppler-Sonographie ist. Dieser besagt, dass die Bewegung einer Quelle von Schallwellen die Frequenz der Schallwelle beeinflusst. Nähert sich die Quelle dem Betrachter, so wird die Frequenz zu einer höheren Frequenz verschoben und entfernt sich die Quelle, so wird die Frequenz zu einer niedrigeren Frequenz verschoben. Die neue Frequenz kann über

$$\nu = \frac{\nu_0}{1 \pm \frac{v}{c}} \quad (1)$$

berechnet werden, wobei  $\nu_0$  die Frequenz der erzeugten Schallwelle,  $v$  die relative Geschwindigkeit der Quelle zum Beobachter und  $c$  die Schallgeschwindigkeit des Mediums ist.

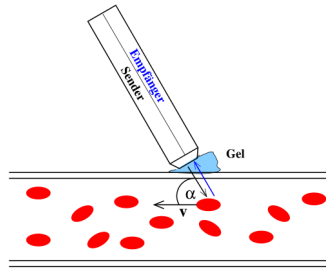
Der Effekt funktioniert analog, wenn man sich im Inertialsystem der Quelle befindet. Hier lässt sich die beobachtete Frequenz über

$$\nu = \nu_0 \left(1 \pm \frac{v}{c}\right) \quad (2)$$

berechnen.

Da beim Impuls-Echo-Verfahren der Schallimpuls nicht parallel zur Fließrichtung ausgesendet und empfangen wird, muss der Winkel  $\alpha$  beachtet werden. (siehe Abbildung 1) Somit kann die Frequenzverschiebung über

$$\Delta\nu = 2\nu_0 \frac{v}{c} \cos \alpha \quad (3)$$



**Abbildung 1:** Schema des Impuls-Echo-Verfahrens bzw. der Doppler-Sonographie [1]

berechnet werden. Umstellen dieser Gleichung führt zu einer Berechnungsformel für die Fließgeschwindigkeit

$$v = \frac{\Delta\nu \cdot c}{2 \cdot \nu_0 \cdot \cos \alpha} \quad (4)$$

Als Quelle und Empfänger wird in diesem Versuch ein sogenannter piezo-elektrischer Kristall verwendet. Wird an diesem ein elektrisches Feld entlang seiner polaren Achse angelegt kontrahiert bzw. expandiert er. So können Schallwellen mit einer hohen Frequenz erzeugt werden. Wenn die Frequenz im Resonanzbereich des Kristalls liegt kann auch ein Schallwelle mit genügend hoher Amplitude erzeugt werden. Andersherum erzeugt der Kristall ein elektrisches Feld wenn auf diesen Schallwellen treffen. Also kann der Kristall sowohl als Sender als auch als Empfänger verwendet werden.

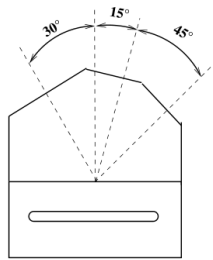
### 3 Aufbau

Es wird ein Kreislauf aufgebaut, in dem ein Wasser-Glycerin-Gemisch mit Glaskugeln durch Rohre und Schläuche strömt. (siehe Abbildung 2)

An einer Stelle des Kreislaufs wird die Flüssigkeit untersucht. Das Rohr an dieser Stelle besteht aus Acryl und hat einen Innenradius von  $R_i = 5 \text{ mm}$  und einen Außenradius von  $R_a = 7,5 \text{ mm}$ . Die Flüssigkeit wird von einer Zentrifugalpumpe angetrieben, an welcher die Fließgeschwindigkeit einstellbar ist.



**Abbildung 2:** Foto des Kreislaufs bzw. des Versuchaufbaus



**Abbildung 3:** Skizze des verwendeten Doppler-Prismas [1]

Um die Schallsonde in einem vorbestimmten Winkel  $\theta$  mit dem Rohr zu koppeln wird ein Doppler-Prisma wie in Abbildung 3 verwendet. Dieses ist ebenfalls aus Acryl. Die Abstände der Flächen zum Rohr sind alle  $l = 30,7 \text{ mm}$ . Da Acryl und die hier verwendete Flüssigkeit verschiedene Dichten haben, wird der Schall an der Grenzfläche gebrochen und im Allgemeinen ist  $\alpha \neq \theta$ . Der tatsächliche Einschallwinkel wird über

$$\alpha = 90^\circ - \arcsin\left(\sin \theta \cdot \frac{c_F}{c_A}\right) \quad (5)$$

berechnet, wobei  $c_F$  die Schallgeschwindigkeit in der Flüssigkeit und  $c_A$  die Schallgeschwindigkeit in Acryl ist.

Als Schallsender und -empfänger wird hier eine 2 MHz Schallsonde verwendet. Diese wird an einen Doppler-Generator angeschlossen, welcher mit einem Computer verbunden ist. Die gemessenen Daten werden am Computer mit dem Programm FlowView dargestellt und ausgewertet.

Das Doppler-Prisma wird mit einem Ultraschall-Gel an das Rohr gekoppelt, da Luft ein hohen Schallabsorption aufweist.

## 4 Durchführung

Im ersten Teil des Versuchs wird die Strömungsgeschwindigkeit durch das Acrylrohr für fünf verschiedene Geschwindigkeiten bestimmt. Diese Messung wird an allen drei Doppler-Winkeln wiederholt. (siehe Abbildung 3)

Dazu wird die Sonde mit Ultraschall-Gel am Doppler-Prisma gekoppelt. Am Doppler-Generator wird ein Sample-Volume von Large eingestellt. An der Pumpe wird eine Strömungsgeschwindigkeit eingestellt und als Vergleichswert notiert. Dann wird am Computer die durchschnittliche Frequenzverschiebung abgelesen und notiert.

Im zweiten Teil des Versuchs wird das Strömungsprofil der Doppler-Flüssigkeit bestimmt.

Dazu wird die Sonde am Doppler-Prisma mit  $\theta = 15^\circ$  gekoppelt. Das Sample-Volume wird auf Small gestellt. An der Pumpe wird eine Strömungsgeschwindigkeit von 70 % der maximalen Geschwindigkeit eingestellt. Eine zweite Messreihe wird mit einer Pumpleistung von 35 % durchgeführt.

Nun kann am Doppler-Generator die Messtiefe eingestellt werden. Diese wird in  $\mu\text{s}$  angegeben, wobei dies der Zeit entspricht, die die Schallwelle benötigt um durchs Medium zu laufen bis sie reflektiert wird. Es soll der gesamte Rohrdurchmesser durchlaufen werden, also muss zunächst berechnet werden in welchem Messtiefebereich gemessen werden muss.

In Acryl hat Schall eine Geschwindigkeit von

$$c_A \approx 2700 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx \frac{10 \text{ mm}}{4 \mu\text{s}}.$$

Die Schallgeschwindigkeit in der Doppler-Flüssigkeit ist

$$c_F \approx 1800 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx \frac{6 \text{ mm}}{4 \text{ s}}.[1]$$

Also kann die minimale Messtiefe (die Strecke von der Sonde bis zum inneren Rand des Rohrs) über

$$d_{\min} = \frac{l + R_a - R_i}{c_A} \quad (6)$$

und die maximale Messtiefe (die Strecke von der Sonde bis zum inneren Rand des Rohrs auf der anderen Seite) über

$$d_{\max} = d_{\min} + \frac{2 \cdot R_i}{c_F} \quad (7)$$

berechnet werden. Damit ergibt sich ein sinnvoller Bereich der Messtiefe von 12,5  $\mu\text{s}$  bis 19,5  $\mu\text{s}$ . In einem Abstand der Messtiefe von 0,5  $\mu\text{s}$  werden die maximal gemessenen Frequenzverschiebungen und die gemessenen Schallintensitäten am Computer abgelesen und notiert.

## 5 Auswertung

### 5.1 Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit

Die aufgenommenen Werte für  $\Delta\nu$  sind in Tabelle 1 notiert.

**Tabelle 1:** Messergebnisse der Dopplerverschiebung

| $\dot{v} / \frac{\text{L}}{\text{min}}$ | $\Delta\nu_{15} / \text{Hz}$ | $\Delta\nu_{30} / \text{Hz}$ | $\Delta\nu_{60} / \text{Hz}$ |
|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 3,0                                     | 200                          | 380                          | 670                          |
| 3,5                                     | 260                          | 460                          | 820                          |
| 4,0                                     | 320                          | 600                          | 1045                         |
| 4,5                                     | 380                          | 720                          | 1245                         |
| 5,0                                     | 470                          | 850                          | 1510                         |

$\dot{v}$  ist der eingestellte Volumenstrom, die angibt wie viel Volumen in einer bestimmten Zeit durch die Rohre fließt.  $\Delta\nu_\theta$  sind die Dopplerverschiebungen bei den verschiedenen Prismenwinkeln  $\theta$ . Für die nachfolgenden Rechnungen wird allerdings nicht  $\theta$  benötigt, sondern der Dopplerwinkel  $\alpha$ . Dieser kann über Gleichung 5 bestimmt werden. Die Schallgeschwindigkeit in beiden Medien betragen  $c_L = 1800 \text{ m/s}$  und  $c_P = 2700 \text{ m/s}$ . Damit berechnen sich die drei Dopplerwinkel

$$\alpha_1 = 80,06^\circ \quad (8)$$

$$\alpha_2 = 70,53^\circ \quad (9)$$

$$\alpha_3 = 54,74^\circ \quad (10)$$

Über Gleichung 4 kann nun aus allen vorhandenen Werten die Strömungsgeschwindigkeit  $v$  berechnet werden. Die Konstante  $c$  ist die Schallgeschwindigkeit in der Dopplerflüssigkeit  $c_L$  und  $\nu_0$  die Frequenz der verwendeten Ultraschallsonde mit  $\nu_0 = 2 \text{ MHz}$ . In Tabelle 2 befinden sich die eingestellten Werte des Volumenstroms  $\dot{v}$  und die jeweils über einen Dopplerwinkel  $\alpha$  berechneten Werte für die Strömungsgeschwindigkeiten  $v$ . Als Vergleichswert wird noch  $\dot{v}$  über

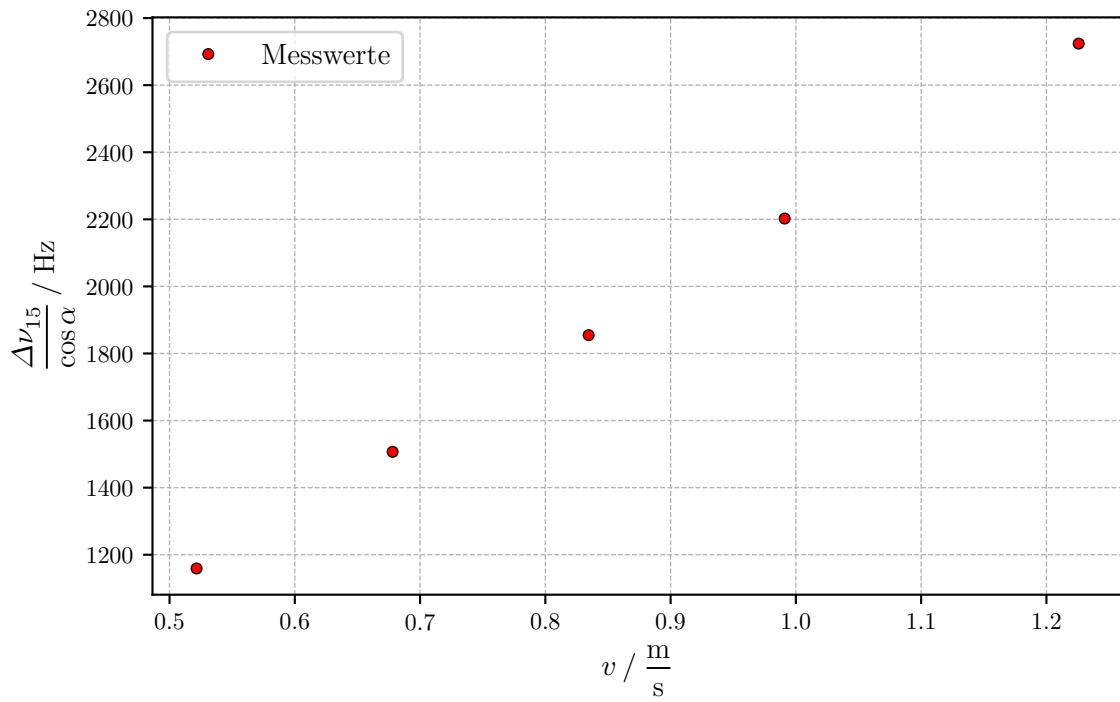
$$v = \frac{\dot{v}}{\pi \cdot R^2} \quad (11)$$

in eine Strömungsgeschwindigkeit  $v$  umgerechnet,  $R$  beträgt hier  $R = 0,005 \text{ m}$ .

Anschließend werden drei Plots für die verschiedenen Dopplerwinkel erstellt, diese sind in Abbildung 4, Abbildung 5 und Abbildung 6 zu finden.

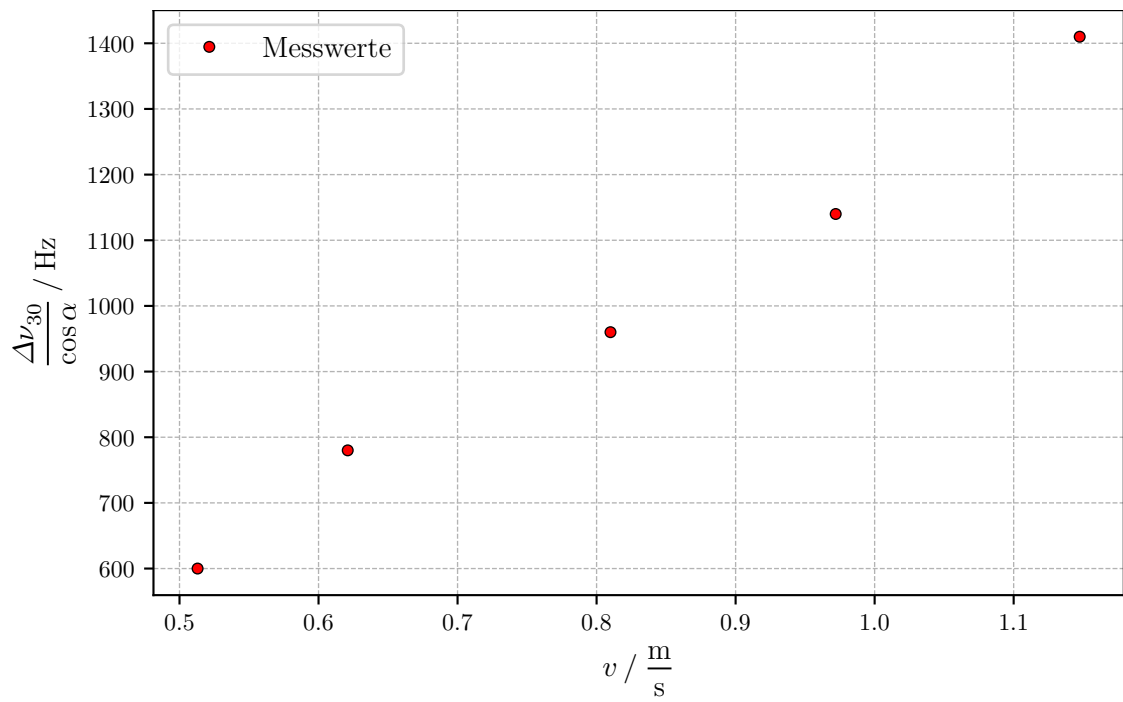
**Tabelle 2:** Berechnete Strömungsgeschwindigkeiten

| $\dot{v} / \frac{\text{L}}{\text{min}}$ | $v / \frac{\text{m}}{\text{s}}$ | $v_{15} / \frac{\text{m}}{\text{s}}$ | $v_{30} / \frac{\text{m}}{\text{s}}$ | $v_{60} / \frac{\text{m}}{\text{s}}$ |
|---|---------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 3,0                                     | 0,64                            | 0,52                                 | 0,51                                 | 0,52                                 |
| 3,5                                     | 0,74                            | 0,68                                 | 0,62                                 | 0,64                                 |
| 4,0                                     | 0,85                            | 0,84                                 | 0,81                                 | 0,81                                 |
| 4,5                                     | 0,95                            | 0,99                                 | 0,97                                 | 0,97                                 |
| 5,0                                     | 1,06                            | 1,23                                 | 1,15                                 | 1,18                                 |

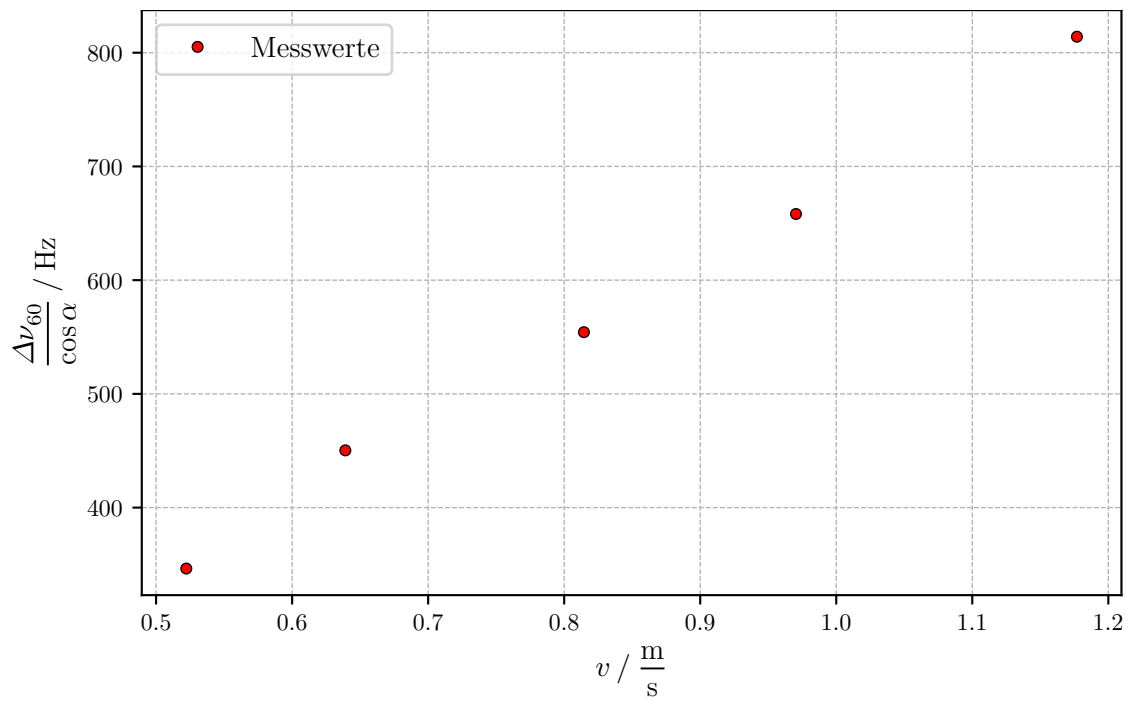


**Abbildung 4:** Plot der Abhängigkeit zwischen der Strömungsgeschwindigkeit und dem ersten Dopplerwinkel





**Abbildung 5:** Plot der Abhängigkeit zwischen der Strömungsgeschwindigkeit und dem zweiten Dopplerwinkel



**Abbildung 6:** Plot der Abhängigkeit zwischen der Strömungsgeschwindigkeit und dem dritten Dopplerwinkel

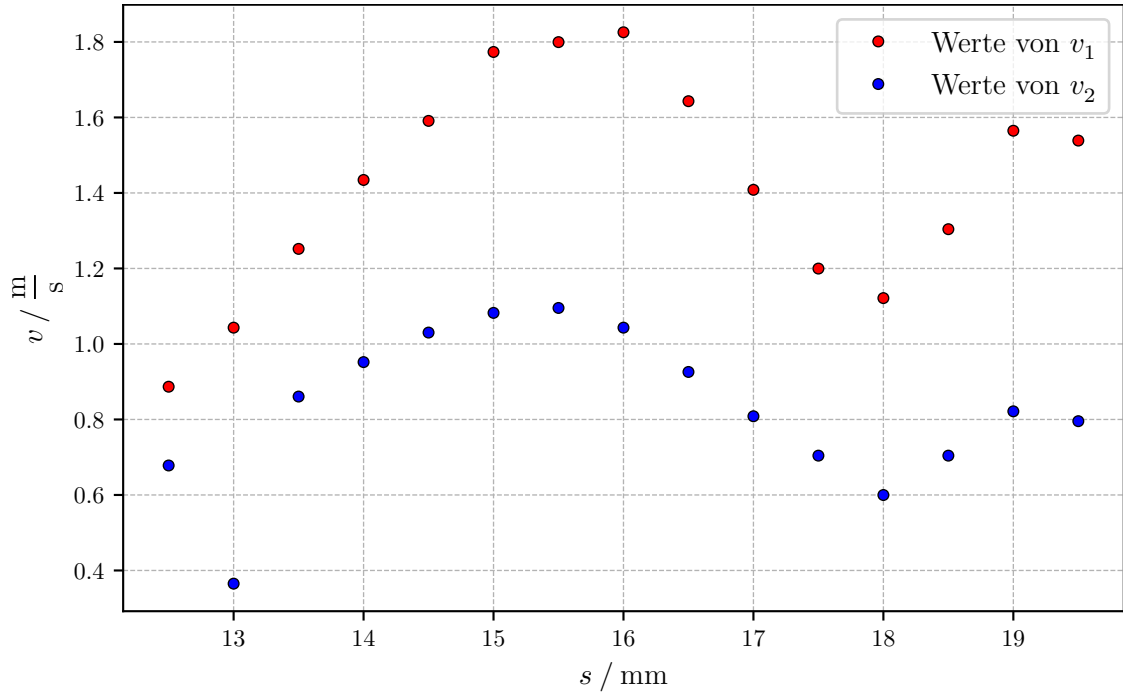
## 5.2 Erstellung eines Strömungsprofils

**Tabelle 3:** Messwerte des Strömungsprofils

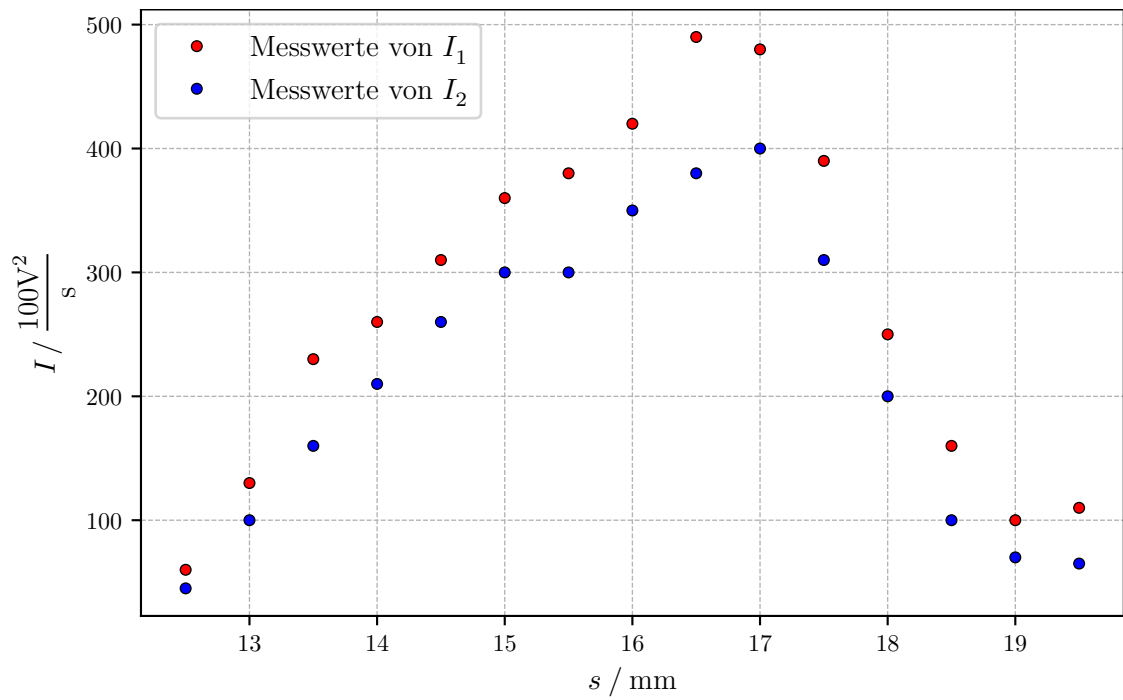
| $s / \text{mm}$ | $\nu_1 / \text{Hz}$ | $I_1 / \frac{100\text{V}^2}{\text{s}}$ | $v_1 / \frac{\text{m}}{\text{s}}$ | $\nu_2 / \text{Hz}$ | $I_2 / \frac{100\text{V}^2}{\text{s}}$ | $v_2 / \frac{\text{m}}{\text{s}}$ |
|-----------------|---------------------|--|-----------------------------------|---------------------|--|-----------------------------------|
| 8,33            | 340                 | 60                                     | 0,89                              | 260                 | 45                                     | 0,68                              |
| 8,67            | 400                 | 130                                    | 1,04                              | 140                 | 100                                    | 0,37                              |
| 9,00            | 480                 | 230                                    | 1,25                              | 330                 | 160                                    | 0,86                              |
| 9,33            | 550                 | 260                                    | 1,43                              | 365                 | 210                                    | 0,95                              |
| 9,67            | 610                 | 310                                    | 1,59                              | 395                 | 260                                    | 1,03                              |
| 10,00           | 680                 | 360                                    | 1,77                              | 415                 | 300                                    | 1,08                              |
| 10,33           | 690                 | 380                                    | 1,80                              | 420                 | 300                                    | 1,10                              |
| 10,67           | 700                 | 420                                    | 1,83                              | 400                 | 350                                    | 1,04                              |
| 11,00           | 630                 | 490                                    | 1,64                              | 355                 | 380                                    | 0,93                              |
| 11,33           | 540                 | 480                                    | 1,41                              | 310                 | 400                                    | 0,81                              |
| 11,67           | 460                 | 390                                    | 1,20                              | 270                 | 310                                    | 0,70                              |
| 12,00           | 430                 | 250                                    | 1,12                              | 230                 | 200                                    | 0,60                              |
| 12,33           | 500                 | 160                                    | 1,30                              | 270                 | 100                                    | 0,70                              |
| 12,67           | 600                 | 100                                    | 1,56                              | 315                 | 70                                     | 0,82                              |
| 13,00           | 590                 | 110                                    | 1,54                              | 305                 | 65                                     | 0,80                              |

Die Messungen wurden bei einem Prismenwinkel von  $\theta = 15^\circ$  durchgeführt. Alle Messwerte mit dem Index 1 sind bei  $\dot{v} = 5,2 \text{ L/s}$  gemessen worden, entsprechend dazu die mit Index 2 bei  $\dot{v} = 3,4 \text{ L/s}$ . Wie zuvor kann nun über Gleichung 4 aus den Dopplerverschiebungen die Strömungsgeschwindigkeit gemessen werden, diese stehen als  $v_1$  und  $v_2$  in Tabelle 3. Diese Geschwindigkeiten werden dann gegen die Messtiefe  $s$  geplottet. Es entstehen die Plots in Abbildung 7.

Außerdem wird ebenfalls die Messtiefe  $s$  gegen die Streuintensität  $I_1$  und  $I_2$  geplottet. Die Plots dafür sind in Abbildung 8 dargestellt.



**Abbildung 7:** Plot der Abhängigkeit der Messtiefe und der Geschwindigkeit



**Abbildung 8:** Plot der Abhängigkeit der Messtiefe und der Streuintensität

## 6 Diskussion

In Tabelle 4 sind die berechneten Geschwindigkeiten  $v_\theta$  und die Referenzgeschwindigkeit  $v$  eingetragen. Außerdem sind die Abweichungen  $\Delta v_\theta$  vom Referenzwert aufgelistet.

**Tabelle 4:** Vergleich der berechneten Strömungsgeschwindigkeiten mit der eingestellten Strömungsgeschwindigkeit

| $v / \frac{\text{m}}{\text{s}}$ | $v_{15} / \frac{\text{m}}{\text{s}}$ | $\Delta v_{15} / \%$ | $v_{30} / \frac{\text{m}}{\text{s}}$ | $\Delta v_{30} / \%$ | $v_{60} / \frac{\text{m}}{\text{s}}$ | $\Delta v_{60} / \%$ |
|---------------------------------|--------------------------------------|----------------------|--------------------------------------|----------------------|--------------------------------------|----------------------|
| 0,64                            | 0,52                                 | 18,75                | 0,51                                 | 20,31                | 0,52                                 | 18,75                |
| 0,74                            | 0,68                                 | 8,10                 | 0,62                                 | 16,21                | 0,64                                 | 13,51                |
| 0,85                            | 0,84                                 | 1,18                 | 0,81                                 | 4,71                 | 0,81                                 | 4,71                 |
| 0,95                            | 0,99                                 | 4,21                 | 0,97                                 | 2,11                 | 0,97                                 | 2,11                 |
| 1,06                            | 1,23                                 | 16,04                | 1,15                                 | 8,49                 | 1,18                                 | 11,32                |

Die Abweichungen variieren recht stark, aber befinden sich bis auf eine Ausnahme unter 20 %. Es fällt auf, dass die Messung mit der geringsten Geschwindigkeit für jeden Dopplerwinkel am ungenauesten ist. Die Werte werden dann zunehmend genauer, bis sie am Ende wieder teilweise sehr stark schwanken.

Hier ist wichtig anzumerken, dass die aus dem Messprogramm abgelesenen Werte teils stark geschwankt haben. Daher musste ein Kompromiss gefunden werden, bei dem etwa der mittlere Wert geschätzt wurde. Diese Vorgehensweise war jedoch sehr ungenau, was sich teilweise hier widerspiegelt.

Die drei Plots der Strömungsgeschwindigkeiten (Abbildung 4, Abbildung 5 und Abbildung 6) stellen alle einen linearen Zusammenhang dar. Es gibt in keinem der Plots zu große Abweichungen, die lineare Gestalt ist in jedem Fall erkennbar, also kann hier von einem erfolgreichen Ergebnis gesprochen werden.

Für den zweiten Teil der Auswertung gibt es größtenteils nur Plots, die diskutiert werden können. Dabei stellen Abbildung 7 und Abbildung 8 in guter Näherung Parabeln dar.

Allerdings gibt es in Abbildung 7 einen starken Ausreißer. Dieser lässt sich rückblickend nicht eindeutig erklären, eventuell ist während dieser Messung die Sonde leicht verrutscht. Von einer fehlerhaften Messung kann nicht ausgegangen werden, da alle folgenden Werte wieder eine Parabel ergeben. Außerdem fallen in Abbildung 7 die letzten Messwerte aus dem Parabelmuster heraus und es scheint, als würde dort eine neue Parabel beginnen. Warum dieser Effekt auftritt lässt sich hier nicht erklären, da ein vergleichbarer Knick in Abbildung 8 nicht auftaucht. Dort sind die Werte weniger präzise als zuvor, aber sie repräsentieren den zu erwartenden Verlauf.

Zuletzt sei zu erwähnen, dass der Verlauf des Strömungsprofils wie erwartet ausgefallen ist, da beide Größen in der Mitte des Rohres ihr Maximum haben und an den Rändern jeweils eine Schwächung auftaucht.

## Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuchsanleitung zu Versuch US3 Doppler-Sonographie*. 2020.