

US3

## **Doppler-Sonographie**

Yanick Sebastian Kind  
yanick.kind@udo.edu

Till Willershausen  
till.willershausen@udo.edu

Durchführung: 11.05.2021

Abgabe: 15.05.2021

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Durchführung</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Auswertung</b>	<b>5</b>
3.1	Bestimmung der Dopplerwinkel . . . . .	5
3.2	Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit der Dopplerflüssgkeit . . . . .	5
3.3	Bestimmung des Strömungsprofils . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Diskussion</b>	<b>10</b>
	<b>Literatur</b>	<b>10</b>

# 1 Theorie

In diesem Versuch sollen die charakteristischen Eigenschaften von Strömungen mit dem Impuls-Echo-Verfahren untersucht werden.

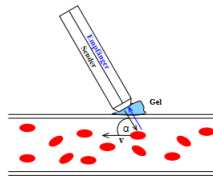
Der Doppler-Effekt tritt auf, wenn sich ein Beobachter und eine Schallquelle relativ zueinander bewegen, wodurch es zu einer Änderung der Frequenz kommt. Bewegt sich die Quelle auf den Beobachter zu, verschiebt sich die Frequenz  $\nu_0$  zu höheren Frequenzen  $\nu_{kl}$ . Entfernt sich die Quelle vom Beobachter sinkt die Frequenz  $\nu_{gr}$  nach

$$\nu_{kl/gr} = \frac{\nu_0}{1 \mp \frac{v}{c}} . \quad (1)$$

Dabei ist  $v$  die Geschwindigkeit und  $c$  die Schallgeschwindigkeit. Bei ruhender Quelle und sich auf die Quelle zu bewegendem Beobachter, verschiebt sich die Frequenz in höhere Frequenzen  $\nu_h$ . Entfernt sich der Beobachter, verringert sich die Frequenz zu  $\nu_n$  nach

$$\nu_{h/n} = \nu_0 \left( 1 \pm \frac{v}{c} \right) . \quad (2)$$

Der Doppler-Effekt kann im Bereich der Ultraschalltechnik verwendet werden um z.B. die Geschwindigkeit von Blutströmungen zu bestimmen. Dabei tritt der Doppler-Effekt



**Abbildung 1:** Darstellung des Impuls-Echo-Verfahren [1]

auf, wenn eine Ultraschallwelle auf ein bewegtes Objekt trifft, wie in Abbildung 1 zu sehen ist. Die Frequenzverschiebung

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

wird neben der Geschwindigkeit  $v$  und der Schallgeschwindigkeit  $c$  durch die Winkel  $\alpha$  und  $\beta$  bestimmt. Bei dem verwendeten Impuls-Echo-Verfahren sind die Winkel  $\alpha$  und  $\beta$  identisch, sodass sich für die Geschwindigkeit  $v$

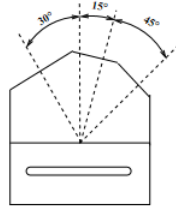
$$v = \frac{\Delta\nu c}{2\nu_0 \cos \alpha} \quad (4)$$

ergibt. Dabei ist  $\alpha$  der Winkel zwischen der Geschwindigkeit und der Wellennormalen der einlaufenden Welle. Schallwellen können auf verschiedene Arten erzeugt werden. Eine Methode ist die Ausnutzung des piezo-elektrischen Effekts. Dabei wird ein Piezoelektrischer Kristall in einem elektrischem Wechselfeld in Schwingung angeregt. Beim Schwingen strahlt der Kristall Ultraschallwellen ab. Es können große Schwingungsamplituden erreicht werden, wenn es zur Resonanz kommt, sodass extrem hohe Schallwellendichten genutzt werden können. Der Piezokristall kann auch als Empfänger von Schallwellen genutzt werden.

## 2 Durchführung

Für den Aufbau des Experiments sind im wesentlichen ein Ultraschall Doppler-Generator, eine Ultraschallsonde mit einer Frequenz von 2 MHz und ein Rechner für die Datenaufnahme notwendig. Untersucht wird eine Strömungsröhre mit verschiedenen Innen- und Außendurchmessern. Als Flüssigkeit wird ein Gemisch aus Wasser, Glycerin und Glaskugeln verwendet. Mit einer Zentrifugalpumpe kann die Strömungsgeschwindigkeit von 0 rpm bis 8600 rpm eingestellt werden. Die mit dem Echoskop gemessenen Daten werden mit dem Rechner erfasst und ausgewertet.

Für die Untersuchung der Strömungsgeschwindigkeit und des Strömungsprofils werden Strömungsröhre mit Innendurchmessern von 7 mm, 10 mm und 16 mm verwendet. Für die Ankopplung der Ultraschallsonde an die Röhre werden Doppler-Prismen mit drei verschiedenen Einfallswinkeln verwendet (s. Abbildung 2). Es wurden jedoch die Einstellwinkel  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  und  $60^\circ$  verwendet. Der Abstand zwischen Sonde und Flüssigkeit ist für alle drei Winkel gleich. Der Dopplerwinkel lässt sich mit



**Abbildung 2:** Doppler-Prisma mit  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  und  $45^\circ$  Einstellwinkeln [1]

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\sin\theta \frac{c_L}{c_P}\right) \quad (5)$$

berechnen. Dabei ist  $c_L = 1800 \text{ m/s}$  die Schallgeschwindigkeit in der Dopplerflüssigkeit und  $c_P = 2700 \text{ m/s}$  die Schallgeschwindigkeit des Prismenmaterials.

Zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit werden fünf verschiedene Flüssigkeitsgeschwindigkeiten als Funktion des Dopplerwinkels bestimmt. Die Messungen erfolgen an den drei verschiedenen Rohrdurchmessern. Die Frequenzverschiebung kann direkt am Rechner abgelesen werden, sodass sich die Flüssigkeitsgeschwindigkeiten direkt berechnen lassen.

Um das Strömungsprofil der Dopplerflüssigkeit zu untersuchen, wird an dem 10 mm Schlauch gemessen. Es soll nur die Meßtiefe am Ultraschallgenerator variiert werden. Dazu muss zuerst die Anfangstiefe bestimmt werden. Aufgrund der verschiedenen Schallgeschwindigkeiten in den Materialien muss eine kleine Zwischenrechnung durchgeführt werden. Die Anfangstiefe kann danach auf den errechneten Wert  $13 \mu\text{s}$  gestellt werden. Nachdem die Zentrifugalpumpe auf 70% der Maximalleistung gestellt wurde, wird die Tiefe in  $0,5 \mu\text{s}$  erhöht, bis sie die maximale Tiefe  $d = 20 \mu\text{s}$  erreicht. Es werden die Werte für die Frequenzverschiebung und die Streuintensität vom Rechner abgelesen. Danach wird die Zentrifugalpumpe auf 60% der Maximalleistung eingestellt und die Messung wird erneut durchgeführt.

### 3 Auswertung

Allgemeine Rechnungen wurden mit der python-Bibliothek numpy [3] automatisiert. Die graphischen Unterstützungen wurden mit Hilfe der python-Bibliothek matplotlib [2] erstellt.

#### 3.1 Bestimmung der Dopplerwinkel

Bevor die gemessenen Daten ausgewertet werden können, müssen die Dopplerwinkel  $\alpha$  mit den Prismawinkeln  $\theta$  gemäß (5) berechnet werden. Diese lassen sich zu

$$\theta = 15^\circ \rightarrow \alpha = 80,06^\circ$$

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

$$\theta = 45^\circ \rightarrow \alpha = 54,74^\circ$$

errechnen.

#### 3.2 Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit der Dopplerflüssigkeit

Mit Hilfe der Gleichung (4) lässt sich die Strömungsgeschwindigkeit der Dopplerflüssigkeit bestimmen. Zu den verschiedenen Rohrdurchmessern ( $D_{\text{groß}} = 16 \text{ mm}$ ,  $D_{\text{mittel}} = 10 \text{ mm}$ ,  $D_{\text{klein}} = 7 \text{ mm}$ ) sind die zu den Umdrehungen gemessenen Frequenzverschiebungen  $\Delta\nu$  und die daraus errechneten Strömungsgeschwindigkeiten in den Tabellen 1, 2 und 3 aufgetragen. In den Abbildungen 3, 4 und 5 sind für die jeweiligen Prismawinkel bzw.

**Tabelle 1:** Gemessene Frequenzverschiebungen und die daraus errechneten Strömungsgeschwindigkeiten ( $D_{\text{groß}} = 16 \text{ mm}$ )

rpm	$\theta = 15^\circ$		$\theta = 30^\circ$		$\theta = 60^\circ$	
	$\Delta\nu / \text{Hz}$	$v / \text{mm s}^{-1}$	$\Delta\nu / \text{Hz}$	$v / \text{mm s}^{-1}$	$\Delta\nu / \text{Hz}$	$v / \text{mm s}^{-1}$
5400	49	24,366	73	18,790	110	16,347
6200	61	30,333	98	25,225	146	21,697
7000	73	36,300	116	29,858	183	27,196
7800	85	42,267	122	31,403	208	30,911
8400	98	48,731	159	40,927	250	37,152

Dopplerwinkel der Quotient  $\Delta\nu/\cos(\alpha)$  aufgetragen. Es ist zu beobachten, dass der Quotient eine konstante Steigung hat und die Geraden der jeweiligen Winkel übereinander liegen. Somit lässt sich sagen, dass das Verhältnis für jeden Dopplerwinkel und die damit errechnete Geschwindigkeit konstant bleibt.

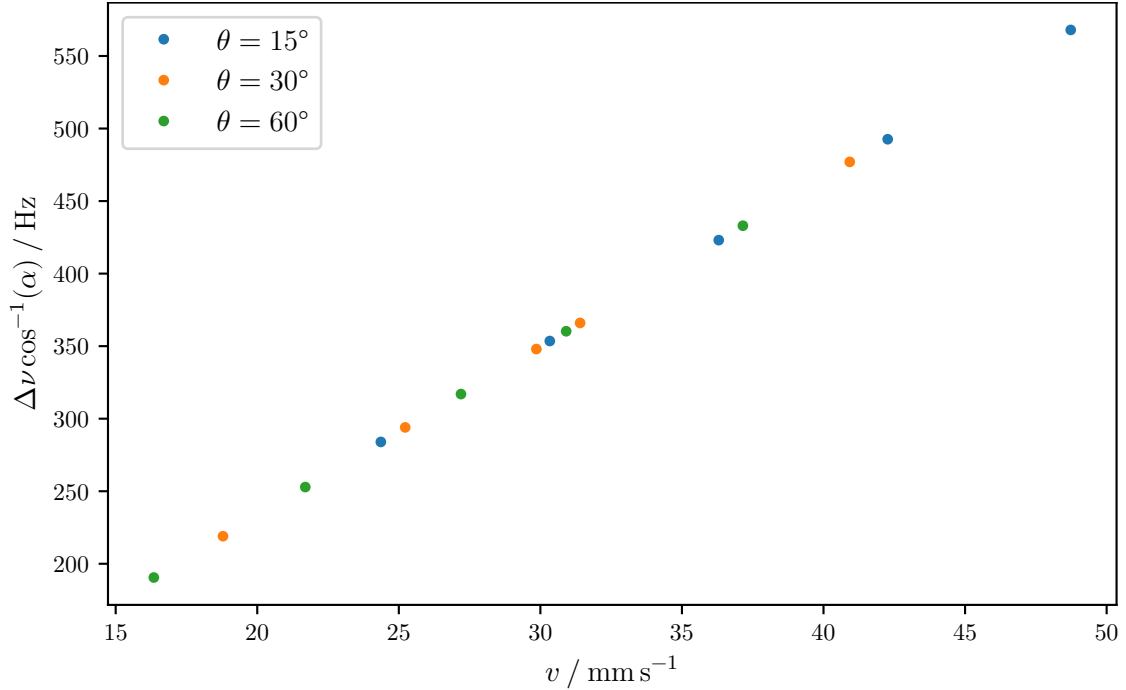
**Tabelle 2:** Gemessene Frequenzverschiebungen und die daraus errechneten Strömungsgeschwindigkeiten ( $D_{\text{mittel}} = 10 \text{ mm}$ )

rpm	$\theta = 15^\circ$		$\theta = 30^\circ$		$\theta = 60^\circ$	
	$\Delta\nu / \text{Hz}$	$v / \text{mm s}^{-1}$	$\Delta\nu / \text{Hz}$	$v / \text{mm s}^{-1}$	$\Delta\nu / \text{Hz}$	$v / \text{mm s}^{-1}$
5400	98	48,731	159	40,927	317	47,109
6200	122	60,666	208	53,539	354	52,608
7000	140	69,616	256	65,894	476	70,738
7800	171	85,031	330	84,942	610	90,652
8400	195	96,965	366	94,208	700	104,027

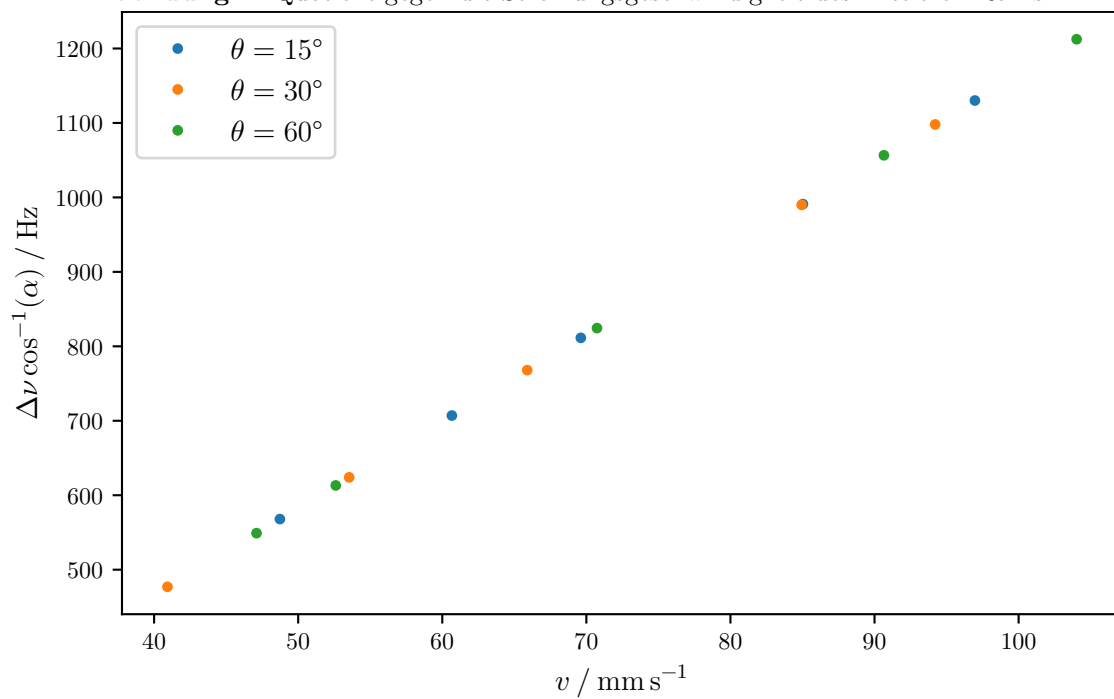
**Tabelle 3:** Gemessene Frequenzverschiebungen und die daraus errechneten Strömungsgeschwindigkeiten ( $D_{\text{klein}} = 7 \text{ mm}$ )

rpm	$\theta = 15^\circ$		$\theta = 30^\circ$		$\theta = 60^\circ$	
	$\Delta\nu / \text{Hz}$	$v / \text{mm s}^{-1}$	$\Delta\nu / \text{Hz}$	$v / \text{mm s}^{-1}$	$\Delta\nu / \text{Hz}$	$v / \text{mm s}^{-1}$
5400	171	85,031	300	77,220	627	93,178
6200	220	109,397	427	109,910	720	106,999
7000	262	130,282	500	128,700	848	126,021
7800	317	157,631	635	163,449	1100	163,471
8400	366	181,997	745	191,763	1324	196,760

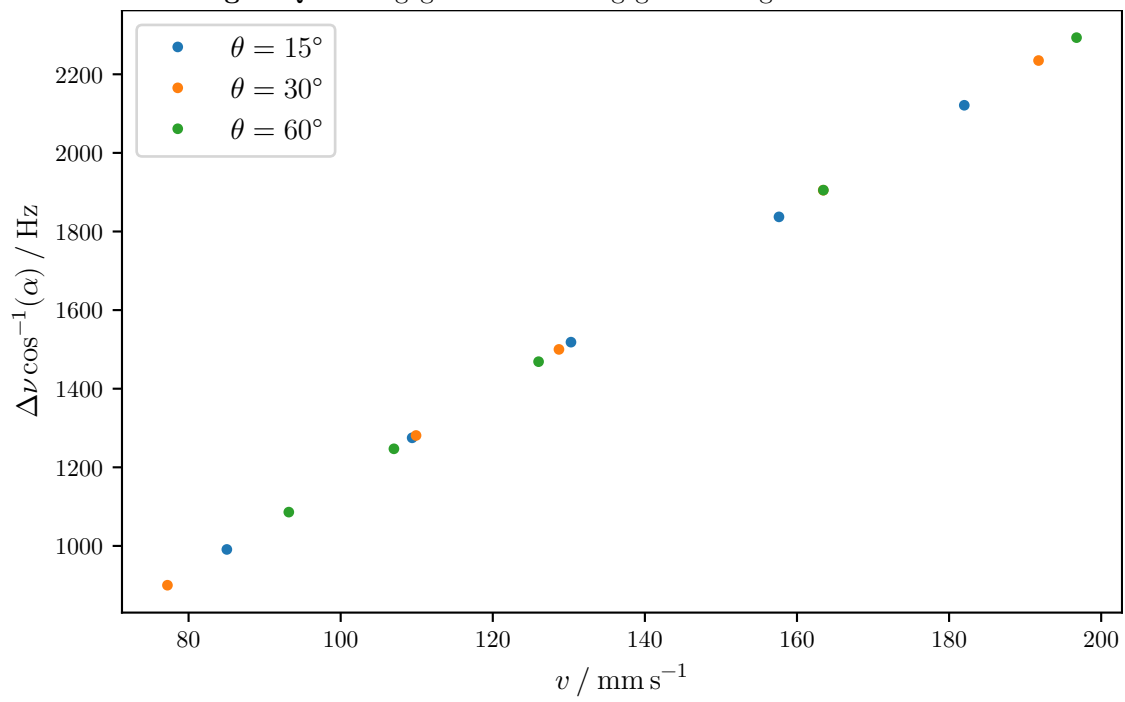
**Abbildung 3:** Quotient gegen die Strömungsgeschwindigkeit des großen Rohrs



**Abbildung 4:** Quotient gegen die Strömungsgeschwindigkeit des mittleren Rohrs



**Abbildung 5:** Quotient gegen die Strömungsgeschwindigkeit des dünnen Rohrs



### 3.3 Bestimmung des Strömungsprofils

Die Strömungsgeschwindigkeiten lassen sich erneut gemäß der Beziehung (4) ermitteln. In der Tabelle 4 sind die gemessenen Frequenzverschiebungen und Streuintensitäten mit den errechneten Strömungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Tiefe aufgezeichnet. Die dazu erstellten Abbildungen 6 und 7 stellen einerseits das Geschwindigkeitsprofil und die Streuintensitäten in Abhängigkeit der Messtiefe graphisch dar. Dabei sind die Messdaten bei den beiden Pump-Drehzahlen 6110 rpm und 5040 rpm aufgetragen. Normalerweise

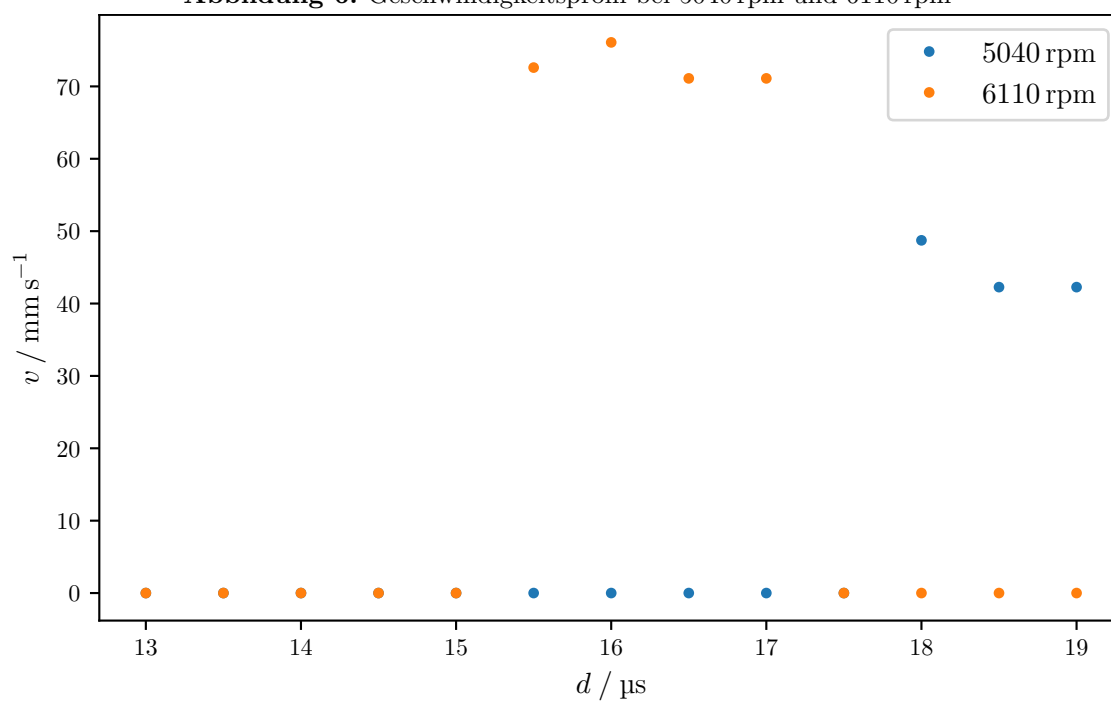
**Tabelle 4:** Gemessene Frequenzverschiebungen und Streuintensität mit den errechneten Strömungsgeschwindigkeiten bei variierter Tiefe

$d / \mu\text{s}$	6110 rpm			5040 rpm		
	$\Delta\nu / \text{Hz}$	$I$	$v / \text{mm s}^{-1}$	$\Delta\nu / \text{Hz}$	$I$	$v / \text{mm s}^{-1}$
13	0	5	0	0	10	0
13,5	0	12	0	0	10	0
14	0	22	0	0	10	0
14,5	0	27	0	0	20	0
15	0	45	0	0	26	0
15,5	146	70	72,6	0	25	0
16	153	68	76,081	0	25	0
16,5	143	70	71,108	0	20	0
17	143	56	71,108	0	18	0
17,5	0	30	0	0	29	0
18	0	5	0	98	60	48,731
18,5	0	19	0	85	60	42,267
19	0	23	0	85	60	42,267

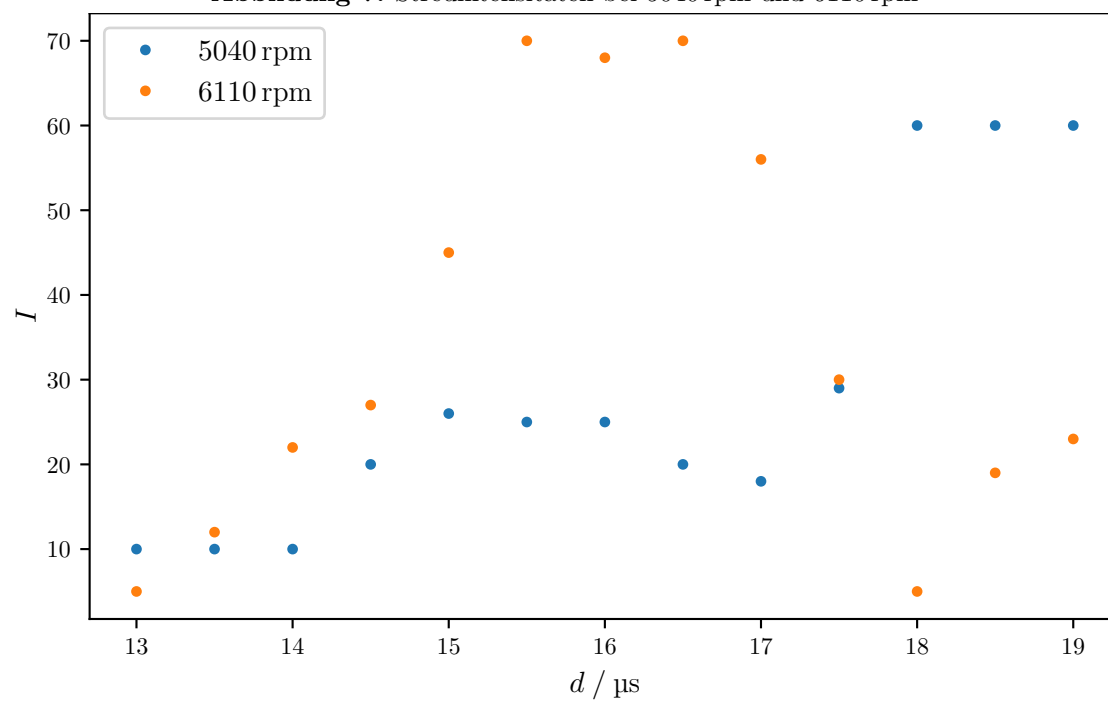
wird ein Strömungsprofil erwartet, welches nah an der Rohrwand aufgrund der Viskosität der Flüssigkeit langsamer wäre und zu der Mitte des Rohrs hin höhere Geschwindigkeiten aufweist. Jedoch lässt sich hier nicht solch eine Struktur aufweisen, da es trotz den mutmaßlich richtigen Tiefen zu keiner Frequenzverschiebungen kam. Somit lässt sich bei diesen Tiefen eine Strömungsgeschwindigkeit von 0 m/s errechnen. Die Ursachen für diese Messwerte werden im weiteren Verlauf in Abschnitt 4 diskutiert.



**Abbildung 6:** Geschwindigkeitsprofil bei 5040 rpm und 6110 rpm



**Abbildung 7:** Streuintensitäten bei 5040 rpm und 6110 rpm



## 4 Diskussion

Die errechneten Strömungsgeschwindigkeiten in dem Abschnitt 3.2 weisen eine klare Tendenz auf. Je kleiner der Rohrdurchmesser ist desto schneller fließt die Dopplerflüssigkeit durch das Rohr. Jedoch lässt sich erkennen, dass die errechneten Geschwindigkeiten zu den jeweiligen Rohren zwischen den jeweiligen Winkeln abweicht. Dies sollte in der Theorie nicht der Fall sein, da die Geschwindigkeit unabhängig von dem Prismawinkel ist. Schon während der Durchführung wurde es ersichtlich, dass die Messung relativ ungenau ist bzw. die Messaperatur sehr empfindlich ist, was diese Abweichungen verursachen könnte. Die hohen Ungenauigkeiten werden in dem zweiten Abschnitt 3.3 der Auswertung jedoch deutlich größer. Dort lassen sich sehr viele Nulleinträge erkennen, weshalb eine Struktur des Strömungsprofils nicht ersichtlich wird. Da dort eine hohe Priorität auf die richtigen Messtiefen gelegt wurde, lässt sich dort ein systematischer Fehler mit einer hohen Wahrscheinlichkeit ausschließen. Jedoch fiel es schon während der Messung auf, dass die Frequenzverschiebungen schon nach einer Distanzerhöhung von  $\Delta d = 0,5 \mu\text{s}$  sprunghaft auf einen Wert oder auf 0 an- bzw. abstiegen. Somit steht die Vermutung im Raum, dass nach solch einer Veränderung der Distanz außerhalb des Rohrs gemessen wurde.

## Literatur

- [1] TU Dortmund. *v903, Dopplersonographie*.
- [2] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [3] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.