

US3

Doppler-Sonographie

Fritz Agildere
fritz.agildere@udo.edu

Amelie Strathmann
amelie.strathmann@udo.edu

Durchführung: 23. Mai 2023

Abgabe: 28. Mai 2023

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	2
2 Theorie	2
2.1 Doppler-Effekt	2
2.2 Messverfahren	3
2.2.1 Impuls-Echo-Ultraschalltechnik	3
2.2.2 Piezoelektrische Erzeugung und Detektion	4
2.2.3 Doppler-Winkel und akustisches Prisma.....	4
3 Durchführung	5
4 Auswertung	5
4.1 Strömungsgeschwindigkeit	5
4.2 Strömungsprofil	9
5 Diskussion	11
Literatur	12
Anhang	13

1 Zielsetzung

Im nachfolgenden Versuch werden die charakteristischen Strömungseigenschaften der Flussgeschwindigkeit und des räumlichen Geschwindigkeitsprofils bei spezifischen Rohrdurchmessern untersucht. Als Unterkategorie der Doppler-Sonographie wird dazu das Impuls-Echo Verfahren verwendet. Auf diese Weise lässt sich anschließend die Laminarität der Strömung bewerten.

2 Theorie [1]

Das menschliche Gehör ist für Frequenzen von 16 Hz bis 20 kHz empfindlich. Außerhalb der unteren Hörschwelle handelt es sich um Infraschall, der Bereich von 20 kHz bis 1 GHz wird als Ultraschall bezeichnet. Oberhalb davon liegen noch die Hyperschallfrequenzen.

2.1 Doppler-Effekt

Mit dem Doppler-Effekt wird die Frequenzänderung $\Delta\nu$ beschrieben, welche als Resultat der Bewegung von Beobachter und Quelle mit relativer Geschwindigkeit v zueinander auftritt. Die Wellen mit Ausgangsfrequenz ν_0 breiten sich mit Schallgeschwindigkeit c im Raum aus. Sollte sich die Quelle in Richtung des Beobachters bewegen, so wächst ν auf

$$\nu_{\text{gr}} = \frac{\nu_0}{1 - \frac{v}{c}}$$

an. Entfernt sie sich vom Beobachter, sinkt die Frequenz bis

$$\nu_{\text{kl}} = \frac{\nu_0}{1 + \frac{v}{c}}$$

ab. Für eine ruhende Quelle erhöht sich ν nach

$$\nu_{\text{h}} = \nu_0 \left(1 + \frac{v}{c}\right)$$

wenn sich der Beobachter auf die Quelle zubewegt. Vergrößert sich sein Abstand gibt

$$\nu_{\text{n}} = \nu_0 \left(1 - \frac{v}{c}\right)$$

die Verschiebung der Frequenz in niedrigere Bereiche an.

2.2 Messverfahren

In der Ultraschalltechnik wird der Doppler-Effekt ausgenutzt, um die Geschwindigkeit von Strömungen zu ermitteln. Medizinisch finden solche Verfahren zur Bestimmung der Flussgeschwindigkeit in Blutbahnen Anwendung. Wird die Ultraschallwelle mit ν_0 von einem bewegten Objekt reflektiert, erfährt deren Frequenz gemäß

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

eine Verschiebung, wobei α und β die Winkel von Geschwindigkeit v mit den Normalen von einlaufender und auslaufender Welle bezeichnen.

2.2.1 Impuls-Echo-Ultraschalltechnik

Für das Impuls-Echo Verfahren sind Sender und Empfänger wie in Abbildung 1 angeordnet, sodass immer $\alpha = \beta$ gilt.



Abbildung 1: Schematische Darstellung der Messanordnung zum Impuls-Echo Verfahren. [1]

Aus dem vorherigen Zusammenhang ergibt sich in diesem Fall

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

als Ausdruck für die Frequenzverschiebung.

2.2.2 Piezoelektrische Erzeugung und Detektion

Wird ein elektrisches Wechselfeld parallel zu einer polaren Achse eines piezoelektrischen Kristalls geschaltet, kann dieser zu Schwingungen im Ultraschallbereich angeregt werden. Abstimmung von Anregungs- und Eigenfrequenz erlaubt durch Resonanz das Erzeugen großer Wellenamplituden. Verwenden dieses mit dem Begriff reziproker piezoelektrischer Effekt bezeichneten Phänomens ermöglicht die Nutzung extrem hoher Schallenergiedichten. Über den umgekehrten Effekt dient der Piezokristall auch als Detektor, indem er durch eintreffende Schallwellen in Schwingung versetzt wird. Wegen ihrer gleichbleibenden physikalischen Eigenschaften werden solche Messapparaturen typischerweise mithilfe von Quarzen realisiert.

2.2.3 Doppler-Winkel und akustisches Prisma

Um präzise Ankopplungswinkel der Ultraschallsonde an die Strömungsrohe zu garantieren, werden Doppler-Prismen mit drei speziell angeordneten Einstellflächen eingesetzt.

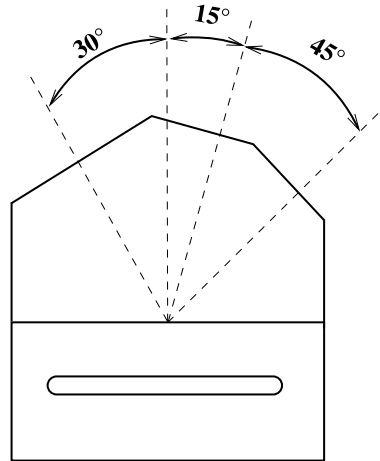


Abbildung 2: Schema zum an ein Strömungsrohr angesetzten Doppler-Prisma. [1]

Aus Abbildung 2 geht hervor, dass sowohl Abstand und Winkel zur strömenden Flüssigkeit mithilfe des Aufbaus reproduzierbar definiert sind. Mit den angegebenen Winkeln θ ergibt sich unter Ausnutzung des Brechungsgesetzes über

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

der Doppler-Winkel, wobei c_L und c_P den Schallgeschwindigkeiten von Flüssigkeit und Prismenmaterial entsprechen.

3 Durchführung

Zur Vorbereitung lassen sich für Prismenwinkel θ von 15° , 30° und 60° die entsprechenden Doppler-Winkel $\alpha(\theta)$ berechnen, indem die Schallgeschwindigkeiten $c_L = 1800 \text{ m s}^{-1}$ und $c_P = 2700 \text{ m s}^{-1}$ [1] in Ausdruck (2) eingesetzt werden:

$$\alpha(15^\circ) = 80,06^\circ \qquad \alpha(30^\circ) = 70,53^\circ \qquad \alpha(60^\circ) = 54,74^\circ$$

Der Messapparat setzt sich aus einem Ultraschall-Doppler-Generator im Pulsbetrieb und einer daran angeschlossenen Ultraschallsonde zusammen, welche 2 MHz als Arbeitsfrequenz verwendet. Zur Aufnahme und Analyse der gewonnenen Daten ist ein Rechner mit dem entsprechenden Auswertungsprogramm **FlowView** angeschlossen. Damit wird ein Strömungsrohr mit Durchmesser 10 mm untersucht, das die Dopplerphantomflüssigkeit enthält. Dabei handelt es sich um eine Mischung aus Wasser, Glycerin und Glaskugeln, dessen Viskosität so gewählt ist, dass sich bei den verwendeten Flussgeschwindigkeiten eine laminare Strömung ausbildet. Um die Strömungsgeschwindigkeit zu variieren, ist zudem eine Zentrifugalpumpe mit maximaler Leistung von 7,5 L/min im Kreislauf verbaut. Zur Schonung der Gerätschaft werden 70 % dieser Spitzenleistung nicht überschritten.

Zunächst soll die Strömungsgeschwindigkeit als Funktion des Dopplerwinkels bestimmt werden. Dazu ist am Ultraschall-Generator das **SAMPLE-VOLUME** auf **LARGE** gestellt. An der Pumpe wird die Leistung beginnend bei 2,0 L/min in Stufen von 0,5 L/min erhöht. Mithilfe von Doppler-Prisma und Kontakt-Gel werden dazu jeweils 15° , 45° und 60° als Winkel bei gleichbleibendem Abstand zum Rohr betrachtet.

Zur Untersuchung des Strömungsprofils am Schlauch wird bei **SAMPLE-VOLUME** auf **SMALL** und festem Ansetzwinkel gleich 15° über den Regler **DEPTH** die Messtiefe in aufsteigenden Schritten von $0,5 \mu\text{s}$ eingestellt. In Acryl entsprechen $2 \mu\text{s} = 5 \text{ mm}$, in der Flüssigkeit sind $2 \mu\text{s} = 3 \text{ mm}$. Bei 45 % und 70 % der maximalen Pumpleistung wird je die gesamte Rohrtiefe abgetastet, Momentangeschwindigkeit und Streuintensität werden aufgezeichnet.

4 Auswertung

Im Folgenden wird die Strömungsgeschwindigkeit der aufgenommen Messwerte bestimmt. Außerdem wird das Strömungsprofil für zwei Pumpleistungen betrachtet.

4.1 Strömungsgeschwindigkeit

In der Tabelle 1 sind die die aufgenommenen Messwerte der Frequenzdifferenzen $\Delta\nu = \nu_{\text{mean}} - \nu_{\text{max}}$ der jeweiligen Prismenwinkel θ dargestellt. Die Frequenzdifferenz wird für fünf verschiedene Leistungen für die drei Winkel θ gemessen. Die verwendete Pumpe hat dabei eine maximale Leistung von $7,5 \text{ L min}^{-1}$.

Tabelle 1: Die Frequenzverschiebung der drei Prismenwinkel.

$v/\text{L min}^{-1}$	$\Delta\nu_{15^\circ}$	$\Delta\nu_{30^\circ}$	$\Delta\nu_{60^\circ}$
2	56	94	153
2.5	65	132	208
3.0	90	167	292
3.5	114	253	334
4	165	311	468

Anhand der Gleichung 1 wird die Strömungsgeschwindigkeit berechnet. Für die verwendete Sonde ist ν_0 angegeben als 2 MHz.

Tabelle 2: Die Strömungsgeschwindigkeit der drei Prismenwinkel.

$v_{15^\circ}/\text{m s}^{-1}$	$v_{30^\circ}/\text{m s}^{-1}$	$v_{60^\circ}/\text{m s}^{-1}$
0.243	0.211	0.199
0.282	0.297	0.270
0.391	0.376	0.379
0.495	0.569	0.434
0.716	0.699	0.608

In den Abbildungen 3, 4 und 5 wird das Verhältnis von $\Delta\nu$ in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit ν aufgetragen. Zudem wurde eine Ausgleichgerade der Form

$$ax + b$$

durch die Messwerte gefittet.

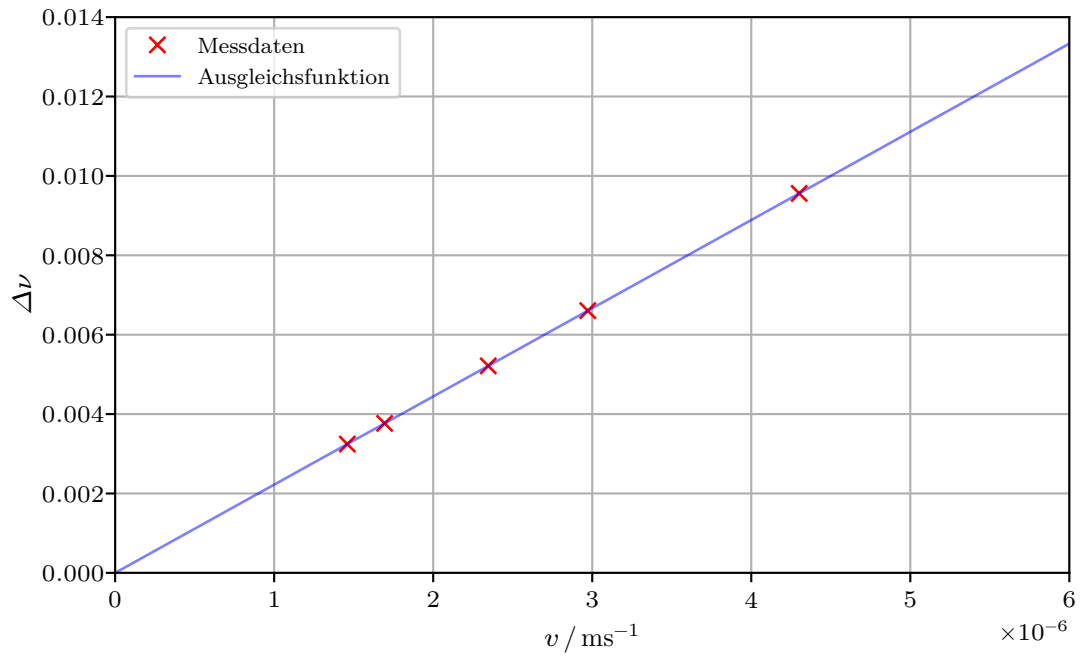


Abbildung 3: Die Frequenzverschiebung in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit für $\theta = 15^\circ$.

Die Parameter der Fitfunktion für den Winkel $\theta = 15^\circ$ entsprechen

$$a = (2222.222 \pm 0.0000028) \text{m}^{-1}$$

$$b = -(2.5 \pm 0.8) \cdot 10^{-11} \text{s}.$$

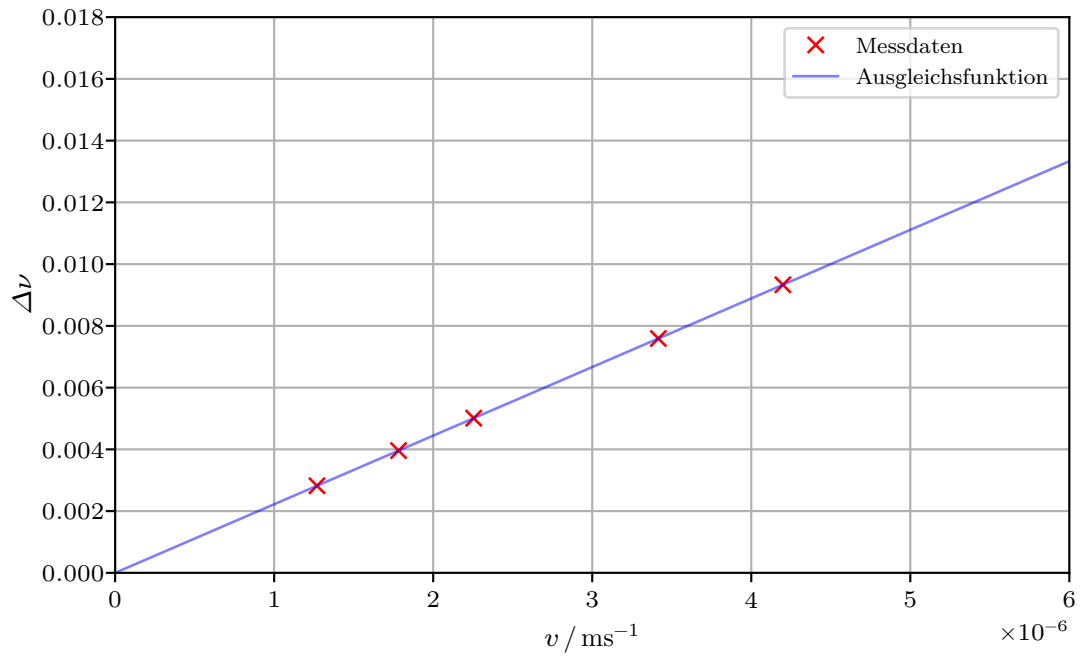


Abbildung 4: Die Frequenzverschiebung in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit für $\theta = 30^\circ$.

Die Parameter der Fitfunktion für den Winkel $\theta = 30^\circ$ entsprechen

$$a = (2222.222 \pm 0.0000027) \text{m}^{-1}$$

$$b = -(2.4 \pm 0.6) \cdot 10^{-11} \text{s}.$$

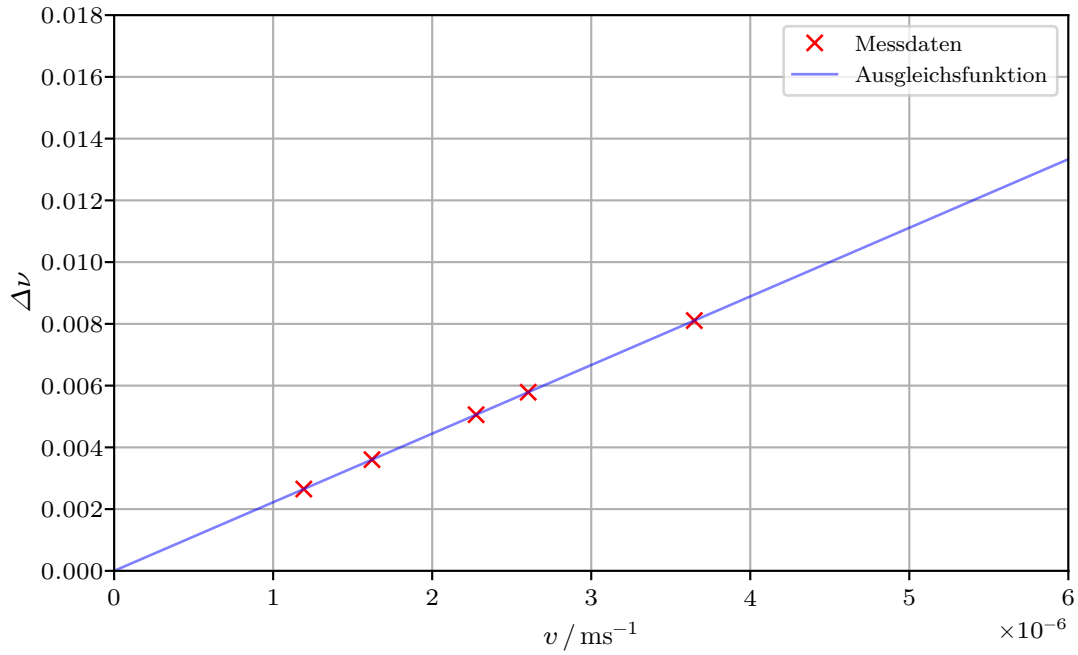


Abbildung 5: Die Frequenzverschiebung in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit für $\theta = 60^\circ$.

Die Parameter der Fitfunktion für den Winkel $\theta = 60^\circ$ entsprechen

$$a = (2222.222 \pm 0.0000017) \text{m}^{-1}$$

$$b = -(1.58 \pm 0.18) \cdot 10^{-11} \text{s}.$$

4.2 Strömungsprofil

Für den Prismawinkel $\theta = 15^\circ$ wird für die Pumpleistungen 3.4L min^{-1} und 5.2L min^{-1} , was jeweils 45% und 70% der maximalen Pumpleistung entspricht, die Strömungsgeschwindigkeit sowie die Streuintensität in Abhängigkeit der Tiefe gemessen. Dabei entspricht eine Messtiefe von $4 \mu\text{s}$ in der Dopplerflüssigkeit 6 mm. Die aufgenommenen Werte sind in der Tabelle 3 und der Tabelle 4 aufgetragen.

Tabelle 3: Die Strömungsgeschwindigkeit und die Streuintensität für größer werdende Tiefen bei einer Leistung von 45%.

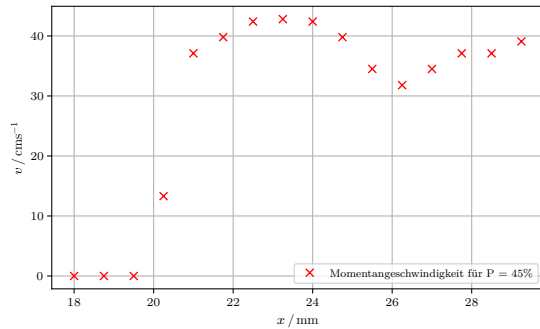
$d/\mu\text{s}$	$v/\text{cm s}^{-1}$	$I_S/1000\text{V}^2/\text{s}$
12	0	20
12.5	0	22
13	0	25
13.5	13.3	28
14	37.1	35
14.5	39.8	38
15	42.4	40
15.5	42.8	44
16	42.4	46
16.5	39.8	47
17	34.5	46
17.5	31.8	43
18	34.5	65
18.5	37.1	114
19	37.1	117
19.5	39.08	81

Tabelle 4: Die Strömungsgeschwindigkeit und die Streuintensität für größer werdende Tiefen bei einer Leistung von 70%.

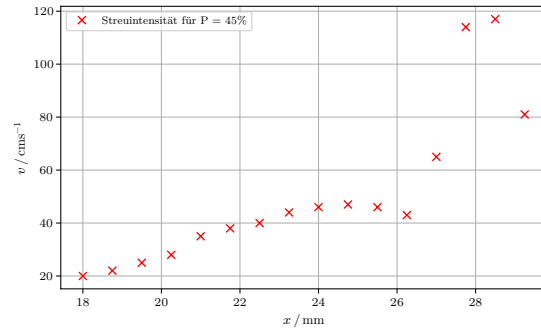
$d/\mu\text{s}$	$v/\text{cm s}^{-1}$	$I_S/1000\text{V}^2/\text{s}$
12	71.6	119
12.5	63.7	170
13	69.0	256
13.5	82.2	332
14	98.2	440
14.5	106.1	561
15	108.8	600
15.5	103.5	640
16	95.5	630
16.5	82.2	663
17	74.3	865
17.5	76.9	1399
18	87.5	2060
18.5	90.2	2478
19	87.5	2174

In der Abbildung 6 und der Abbildung 7 sind die Momentangeschwindigkeiten und die

Streuintensitäten für die jeweiligen Pumpleistungen graphisch dargestellt.

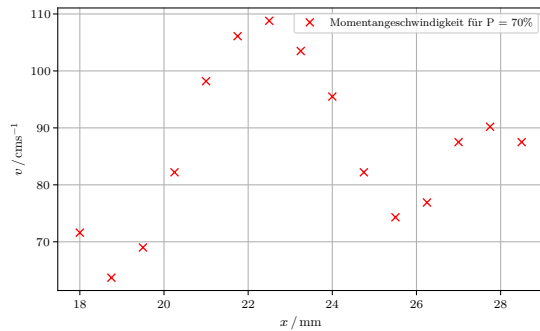


(a) Momentangeschwindigkeit für $v = 45\%$.

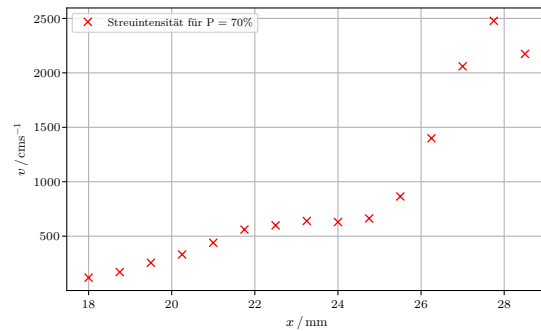


(b) Streuintensität für $v = 45\%$.

Abbildung 6: Strömungsprofil für 45% der maximalen Pumpleistung.



(a) Momentangeschwindigkeit für $v = 70\%$.



(b) Streuintensität für $v = 70\%$.

Abbildung 7: Strömungsprofil für 70% der maximalen Pumpleistung.

5 Diskussion

Bei der Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit fällt ein linearer Zusammenhang zwischen der auf den Cosinus des Prismawinkels normierten Frequenzverschiebung und der Strömungsgeschwindigkeit auf. Dementsprechend kann durch die experimentell aufgenommenen Werte festgestellt werden, dass die Strömungsgeschwindigkeit mit der Leistung zunimmt.

Theoretisch wird erwartet, dass die Strömungsgeschwindigkeit an den Rändern des Rohres geringer ist als in der Mitte. Dies lässt sich über die an den Rändern aufkommende Reibung erklären. In der Mitte des Rohres sollte also voraussichtlich die Streuintensität maximal sein, da das gestreute Doppler-Signal proportional zur Geschwindigkeit ist. Experimentell konnten diese Annahmen ansatzweise, aber nicht eindeutig bestätigt werden.

Zu den Fehlerquellen, welche die Ergebnisse hervorgerufen haben, gehört zunächst, dass die Sonde per Hand an das Prisma gehalten worden ist. Daher ist die US-Sonde mehrmals verrutscht und hatte eine sehr unruhige Position. Bei dem Aufschreiben der Messwerte kam es dazu, dass nur ein ungefähres Mittel der Signale abgelesen wurde, da die Signalstärken stark geschwankt haben. Für die Bestimmung des Strömungsprofils wurden mehr Messwerte in einem längeren Zeitraum aufgenommen, dementsprechend wirkte die unruhige Position der US-Sonde stärker. Wichtig war, darauf zu achten, dass sich ausreichend Ultraschall-Gel zwischen dem Prisma und der Sonde befindet. Das konnte nicht ideal umgesetzt werden, sodass Luftblasen zwischen die Sonde und das Prisma gekommen sind.

Literatur

- [1] *Anleitung zu Ultraschall 3, Dopplersonographie*. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2023.

Anhang

Leistung	fmax/hz	fmean/hz	winkel °	
2 l/min	129	205 73	15	→ 56
	228	134	30	94
	348	195 220	60	153
2,5	175	110	15	65
	315	183	30	132
	501	293	60	208

Leistung	fmax	fmean	winkel	
3.0	212	122	15	90
	417	250	30	167
	695	403	60	292
3,5	260	146	15	114
	595	342	30	253
	859	525	60	334
4	360	195	15	165
	6720	409	30	311
	1115	647	60	468

Depth [m]	Speed [cm/s]	sig intensity $\frac{1000 \cdot U^2}{1.5}$
12.	0	20
12.5	0	22
13	0	25
13.5	10.8 13.3	28
14	30.1 24 37.1	35
14.5	39.8	38
15	42.4	40
15.5	43.8	44
16	42 42.4	46
16.5	39.8	47
17	34.5	46
17.5	31.8	43
18	34.5	65
18.5	37.1	114
19	37.1	117
19.5	33.08	81

Run 3.4 (1/min)

5,2 l/min

Depth [ms]	Speed [cm/s]	Intensity [L]
12	71,6	119
12,5	63,7	170
13	69,0	256
13,5	82,2	332
14	98,2	440
14,5	106,1	561
15	108,8	600
15,5	103,5	640
16	95,5	630
16,5	82,2	663
17	74,3	865
17,5	76,9	1399
18	87,5	2060
18,5	90,2	2478
19	87,5	2174

Ruen