

US3

Doppler-Sonographie

Lukas Bertsch

lukas.bertsch@tu-dortmund.de

Steffen Kober

steffen.kober@tu-dortmund.de

Durchführung: 12.04.2022

Abgabe: 19.04.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel	3
2	Theorie	3
2.1	Erzeugung von Ultraschall	3
2.2	Physikalische Grundlagen der Scanverfahren	3
2.3	Scanverfahren	4
2.4	Doppler-Effekt	5
2.5	Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit	5
3	Durchführung	5
3.1	Vorbereitungsaufgaben	6
3.2	Versuchsaufbau	6
3.3	Messaufgaben	6
4	Auswertung	7
4.1	Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit	7
4.2	Bestimmung des Strömungsprofils	9
5	Diskussion	11

1 Ziel

Im folgenden Experiment wird mittels Doppler-Sonographie die Strömung einer Testflüssigkeit untersucht. Die Doppler-Sonographie ist eine Ultraschallmethode, welche es ermöglicht Strömungsgeschwindigkeiten einer Flüssigkeit zu ermitteln, obgleich diese von einem anderem Medium umschlossen ist.

2 Theorie

Schallwellen sind Druckschwankungen in einem Medium, welche sich gemäß der Wellengleichung

$$p(x, t) = p_0 + v_0 Z \cos(\omega t - kx)$$

ausbreiten. $Z = c \cdot \rho$ beschreibt dabei die materialabhängige akustische Impedanz, p_0 den Normaldruck des Mediums. Der Frequenzbereich des Schalls von 20 MHz bis 1 GHz befindet sich über dem Hörbaren und wird als *Ultraschall* bezeichnet. Schall dieses Frequenzbereiches kann zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung genutzt werden und findet so unter anderem Anwendung in der Medizin.

2.1 Erzeugung von Ultraschall

Um Ultraschall zu erzeugen, kann der *piezo-elektrische Effekt* genutzt werden. Ein piezoelektrischer Kristall wird in ein elektrisches Wechselfeld gesetzt, welches bei paralleler Anordnung einer polaren Achse des Kristalls zu den elektrischen Feldlinien diesen in Schwingung versetzt, wodurch Ultraschallwellen erzeugt werden. Passt die Anregungsfrequenz zur Eigenfrequenz des Kristalls (Resonanzfall), können große Schwingungsamplituden (Schallenergiedichten) erzeugt werden. Umgekehrt kann ein solcher Kristall als Empfänger genutzt werden, da er bei Anregung durch Schallwellen ebenfalls in Schwingung versetzt wird.

2.2 Physikalische Grundlagen der Scanverfahren

Bei Scanverfahren mit Ultraschall wird das Wellenverhalten des Schalls ausgenutzt. Anhand der Medium-abhängigen Schallgeschwindigkeit c können mithilfe der Laufzeit t eines Impulssignals und dem Weg-Zeit-Gesetz

$$s = v \cdot t \tag{1}$$

Abstände bestimmt werden. In Flüssigkeiten kann die Schallgeschwindigkeit mit der Kompressibilität κ über $c_{\text{Fl}} = \sqrt{1/\kappa\rho}$ bestimmt werden. In Feststoffen lautet die Gleichung $c_{\text{Fe}} = \sqrt{E/\rho}$, mit dem Elastizitätsmodul E . Über die Schallgeschwindigkeit c und die Frequenz f der Schallwelle kann die Wellenlänge

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{2}$$

der Schallwelle berechnet werden. Die Intensität I des Signals nimmt exponentiell mit der Strecke x ab

$$I(x) = I_0 \cdot e^{\alpha x},$$

wobei α ein materialabhängiger Absorptionskoeffizient ist. Da die Absorption in Luft sehr stark ist, wird in der Regel ein Kontaktmittel (z.B. Wasser) zwischen Sender und Material verwendet. An Grenzflächen verschiedener Stoffe wird ein Teil der Schallwelle reflektiert. Der reflektierte Anteil R kann mit den akustischen Impedanzen $Z = \rho \cdot c$ der angrenzenden Materialien über

$$R = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2$$

bestimmt werden. $T = 1 - R$ ist der transmittierte Anteil.

2.3 Scanverfahren

Grundlegend können zwei verschiedene Verfahren angewendet werden.

Bei dem *Durchschallungsverfahren* wird ein Schallimpuls an einer Seite des zu analysierenden Stückes ausgesendet und an der Anderen von einem Empfänger aufgenommen. Das Vorhandensein von Störstellen im Material lässt sich über abweichende Intensitäten des Empfangsimpulses feststellen. Über die Größe dieser Störstelle kann keine Aussage getroffen werden.

Bei dem *Impuls-Echo-Verfahren* wird die Reflektion der Schallwelle an Grenzflächen ausgenutzt, indem der Sender gleichzeitig als Empfänger dient und den reflektierten Teil des Signals an Grenzflächen von Stoffen detektiert. Bei bekannter Schallgeschwindigkeit lässt sich so eine Aussage über die Tiefe der Störstelle mit dem Weg-Zeit-Gesetz (1) und der Signallaufzeit treffen.

Aufgenommene Messdaten der Signallaufzeit können in einem *A-Scan*, *B-Scan* oder *TM-Scan* dargestellt werden.

- Beim **A**mplituden-Scan werden lediglich die empfangenen Echoamplituden als Funktion der Laufzeit (oder als Funktion der Tiefe, unter Angabe von c) in einem Diagramm dargestellt.
- Beim **B**rightness-Scan kann der Sender entlang einer Linie bewegt werden, wobei ein zweidimensionales Bild des Querschnitts des untersuchten Materials erstellt wird. Die gemessenen Amplituden werden zu jeder Tiefe (Laufzeit) in Helligkeitsstufen (oder wahlweise Farbstufen) dargestellt.
- Beim **T**ime-**M**otion-Scan wird durch Aussenden mehrerer Signale eine Bildfolge aufgenommen. Dies macht es möglich Bewegungen, wie beispielsweise die eines Organs, in dem untersuchten Objekt/Körper sichtbar zu machen.

2.4 Doppler-Effekt

Der Doppler-Effekt beschreibt das Phänomen der Änderung der Wellenlänge, wenn sich Sender und Empfänger relativ zueinander bewegen. Dabei können drei verschiedene Fälle auftreten. Im ersten Fall wird angenommen, dass sich der Sender bewegt und sich der Empfänger in Ruhe befindet. Wenn sich der Sender auf den Empfänger zu bewegt, steigt die Frequenz ν_{kl} . Bewegt sich der Sender jedoch weg von dem Empfänger sinkt die vom Empfänger aufgenommene Frequenz ν_{gr} .

$$\nu_{\text{kl/gr}} = \frac{\nu_0}{1 \mp \frac{v}{c}}$$

Im zweiten Fall bewegt sich der Empfänger und der Sender soll sich in Ruhe befinden. Bewegt sich der Empfänger auf den Sender zu steigt die Frequenz ν_{h} . Wenn er sich entfernt, dann sinkt die aufgenommene Frequenz ν_{n} .

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

Im dritten Fall ändert sich die Frequenz in Abhängigkeit beider Bewegungen.

2.5 Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit

Wird der Doppler-Effekt auf eine Flüssigkeit angewendet, welche mit Ultraschall untersucht wird, so trifft die Schallwelle unter einem Winkel α auf die Flüssigkeit und wird in einem Winkel β reflektiert. Aufgrund des Doppler-Effekts ändert sich dabei die Frequenz. Die Frequenzänderung kann mittels

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

berechnet werden. α und β beschreiben den Winkel zwischen der Wellengeschwindigkeit und der Wellennormalen. Wird das Ultraschalloskop im Impuls-Echo-Verfahren verwendet gilt $\alpha = \beta$, sodass die Frequenzänderung durch

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

berechnet werden kann. Die Größe des Winkel α folgt aus dem Brechungsgesetz. Mit den Schallgeschwindigkeiten der beiden Grenzmedien c_{L} und c_{P} ergibt sich

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \arcsin \left(\sin(\theta) \frac{c_{\text{L}}}{c_{\text{P}}} \right) \quad (4)$$

für einen Einstrahlwinkel θ .

3 Durchführung

In diesem Versuch werden die gemessene Fließgeschwindigkeit und das Strömungsprofil als Funktion der realen Strömungsgeschwindigkeit und des Dopplerwinkels untersucht. Es werden drei verschiedene Leitungen mit Innenradien von 7, 10 und 16 mm verwendet.

3.1 Vorbereitungsaufgaben

Zur Vorbereitung des Versuches sollen die Dopplerwinkel α_i zu verschiedenen Prismenwinkeln θ_i berechnet werden. Dazu werden der entsprechende Winkel θ , die Ausbreitungsgeschwindigkeit $c_P = 2700 \text{ m/s}$ des Schalles im Prisma und die Ausbreitungsgeschwindigkeit $c_L = 1800 \text{ m/s}$ in der Dopplerphantomflüssigkeit in Gleichung 4 eingesetzt, wodurch die Werte

$$\begin{aligned}\theta = 15^\circ : & \quad \alpha = 80,04^\circ \\ \theta = 30^\circ : & \quad \alpha = 70,47^\circ \\ \theta = 45^\circ : & \quad \alpha = 60,00^\circ \\ (\theta = 60^\circ : & \quad \alpha = 54,72^\circ)\end{aligned}$$

berechnet werden können.

3.2 Versuchsaufbau

Zur Durchführung des Versuches wird ein Ultraschall-Doppler-Generator verwendet. Dieser wird im Impuls-Echo-Verfahren mit einer 2 MHz Sonde betrieben. Untersucht wird ein Rohrkreislauf, in welchem drei Rohre mit unterschiedlichen Durchmessern und zugehörige Prismen verbaut sind. Die Prismen sind an den jeweiligen Rohrdurchmesser angepasst und verfügen über je drei Flächen mit verschiedenem Dopplerwinkel, wobei alle Flächen den gleichen Abstand zur Probe (Flüssigkeit) garantieren. Der Aufbau der Prismen ist Abbildung 1 zu entnehmen. Es wird eine aus Wasser, Glycerin und Glasperlen bestehende Dopplerphantomflüssigkeit verwendet, dessen Viskosität η und akustischen Eigenschaften auf den Versuchsaufbau abgestimmt sind. Der Wasserkreislauf wird durch eine Zentrifugalpumpe angetrieben, welche die Durchflussmengen von 0 bis 10 L liefert. Die Signale des Echoscops werden an einen Rechner übertragen, an welchem sie mithilfe des Programms *FlowView* ausgewertet werden können.

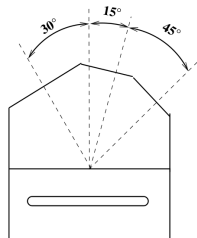


Abbildung 1: Skizze des Prismas.

3.3 Messaufgaben

Zuerst wird die Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit zum Dopplerwinkel untersucht. Dazu muss der Regler *SAMPLE VOLUME* des Ultraschall-Echoscops auf *LARGE*

gestellt werden. An der Zentrifugalpumpe wird eine Drehzahl (Fließgeschwindigkeit) eingestellt. An den drei Flächen der Prismen werden Messwerte zur Bestimmung der Frequenzverschiebung $\Delta\nu$ genommen, welche sich aus der Differenz der Anzeigen f_{mean} und f_{max} berechnet. Dieses Vorgehen wird für alle drei Rohrdurchmesser mit je fünf Fließgeschwindigkeiten wiederholt. Aus den erhaltenen Werten lässt sich die Strömungsgeschwindigkeit zu den verschiedenen Dopplerwinkeln berechnen. Anschließend wird der Ausdruck $\Delta\nu / \cos(\alpha)$ als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit in einem Diagramm aufgetragen.

Im zweiten Teil des Versuches wird das Strömungsprofil der Dopplerflüssigkeit vermessen. Es wird lediglich der mittlere Schlauch mit einem Durchmesser von 15 mm unter einem Einstrahlwinkel von $\theta = 15^\circ$ verwendet. *SAMPLE VOLUME* muss dabei auf *SMALL* gestellt werden, um die Messtiefe regulieren zu können. Diese ist in μs angegeben und kann unter *DEPTH* eingestellt werden. In Acryl (Material des Prismas) entsprechen $4\mu\text{s}$ 10 mm, in der Dopplerflüssigkeit entspricht dies 6 mm. Die Messung beginnt in einer Tiefe von $12\mu\text{s}$ und endet mit einer Schrittweite von $0,5\mu\text{s}$ bei $19,5\mu\text{s}$. Zu jedem Messpunkt werden die Intensität I , die Frequenzverschiebung $\Delta\nu$ und die momentane Geschwindigkeit v notiert. Dieses Messprogramm wird bei einer Pumpleistung von 45 % und 70 % der Maximalleistung durchgeführt. Aus den Messwerten lässt sich die Struktur des Strömungsprofils ermitteln, indem Intensität und Geschwindigkeit gegen die Messtiefe aufgetragen werden.

4 Auswertung

Für die Auswertung der Messungen sind einige Materialkonstanten relevant. Die Dopplerphantomflüssigkeit hat eine Dichte $\rho = 1,15 \text{ g/cm}^3$, eine Viskosität von $\eta = 12 \text{ mPa s}$ und die Schallgeschwindigkeit in dieser beträgt $c_L = 1800 \text{ m/s}$. Die Geschwindigkeit des Schalls im Dopplerprisma beträgt $c_P = 2700 \text{ m/s}$. Die Länge der Vorlaufstrecke im Prisma ist $l = 30,7 \text{ mm}$. Die Senderfrequenz beträgt $\nu_0 = 2 \text{ MHz}$. Die Rohre, durch welche die Dopplerphantomflüssigkeit fließt, haben Innendurchmesser von 7 mm, 10 mm und 16 mm. Die Außendurchmesser betragen 10 mm, 15 mm und 20 mm.

4.1 Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit

Die Strömungsgeschwindigkeit der Dopplerphantomflüssigkeit kann aus Gleichung 3 berechnet werden. Dazu wird diese Formel auf v umgestellt.

$$v_{\text{Strömung}} = \frac{\Delta\nu \cdot c}{\nu_0 \cos \alpha}$$

Die Frequenzverschiebung $\Delta\nu$ wird aus den gemessenen Werten f_{max} und f_{mean} gemäß $\Delta\nu = f_{\text{max}} - f_{\text{mean}}$ berechnet. Diese können dem Anhang entnommen werden. In den folgenden Abbildungen 2, 3 und 4 wird die Frequenzverschiebung dividiert durch $\cos \alpha$ in Abhängigkeit zur berechneten Strömungsgeschwindigkeit für die verschiedenen Rohrdurchmesser dargestellt.

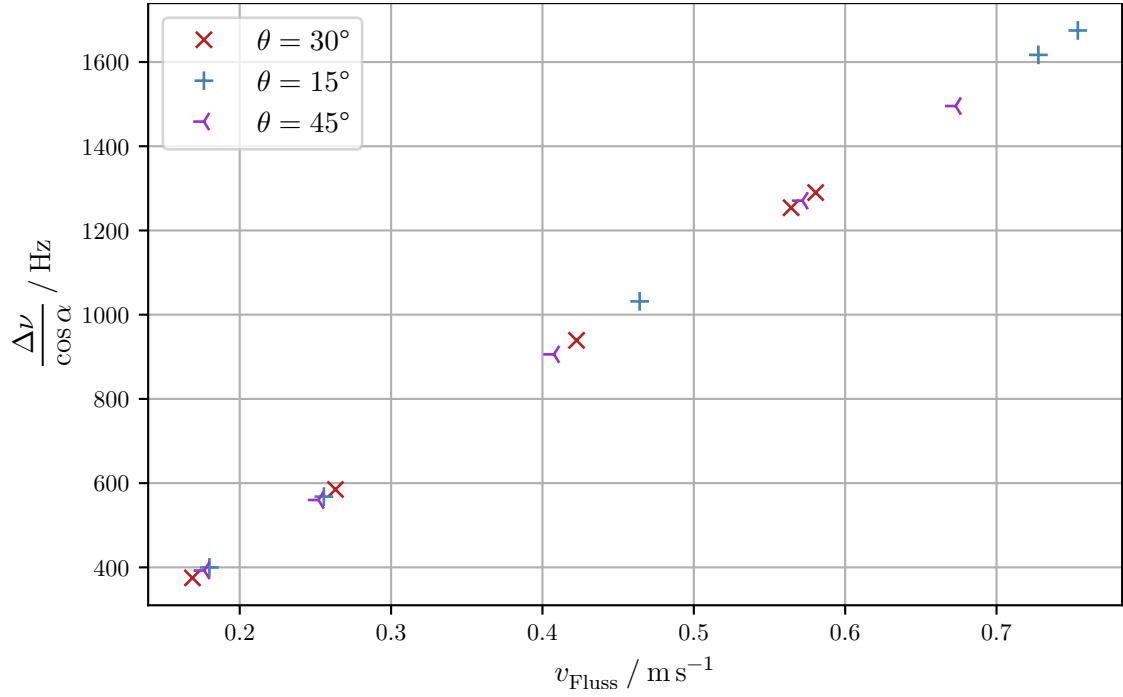


Abbildung 2: Messwerte zu verschiedenen Einstrahlwinkeln gegen die berechnete Strömungsgeschwindigkeit zum (Innen-)Rohrdurchmesser $d = 7$ mm.

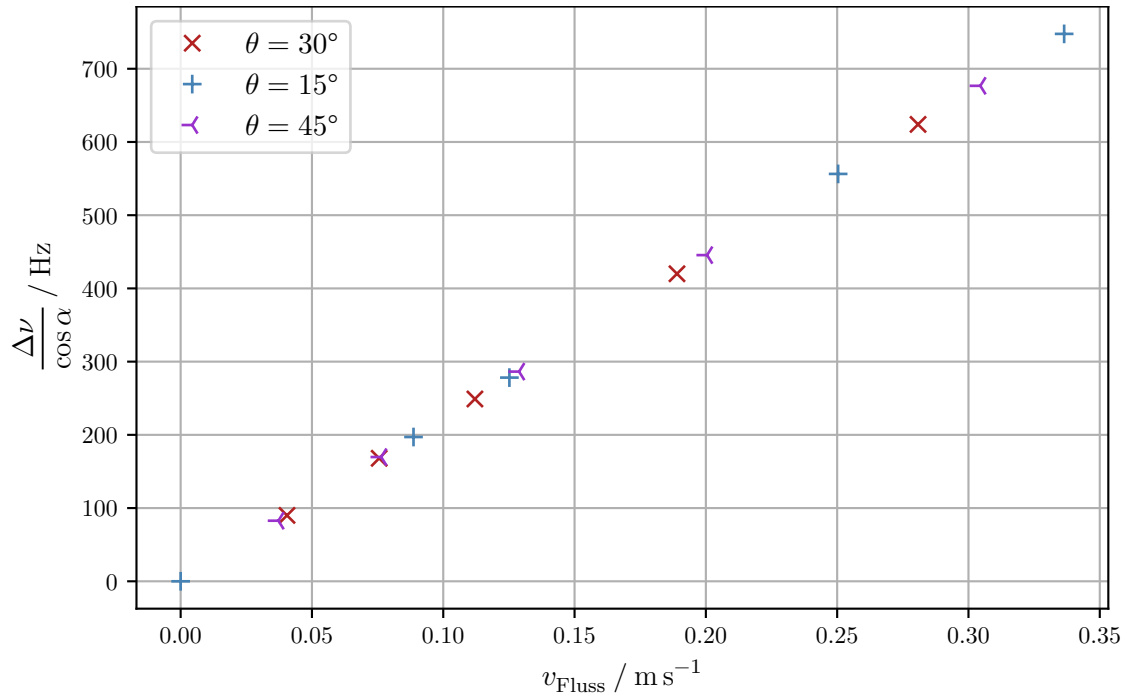


Abbildung 3: Messwerte zu verschiedenen Einstrahlwinkeln gegen die berechnete Strömungsgeschwindigkeit zum (Innen-)Rohrdurchmesser $d = 10$ mm.

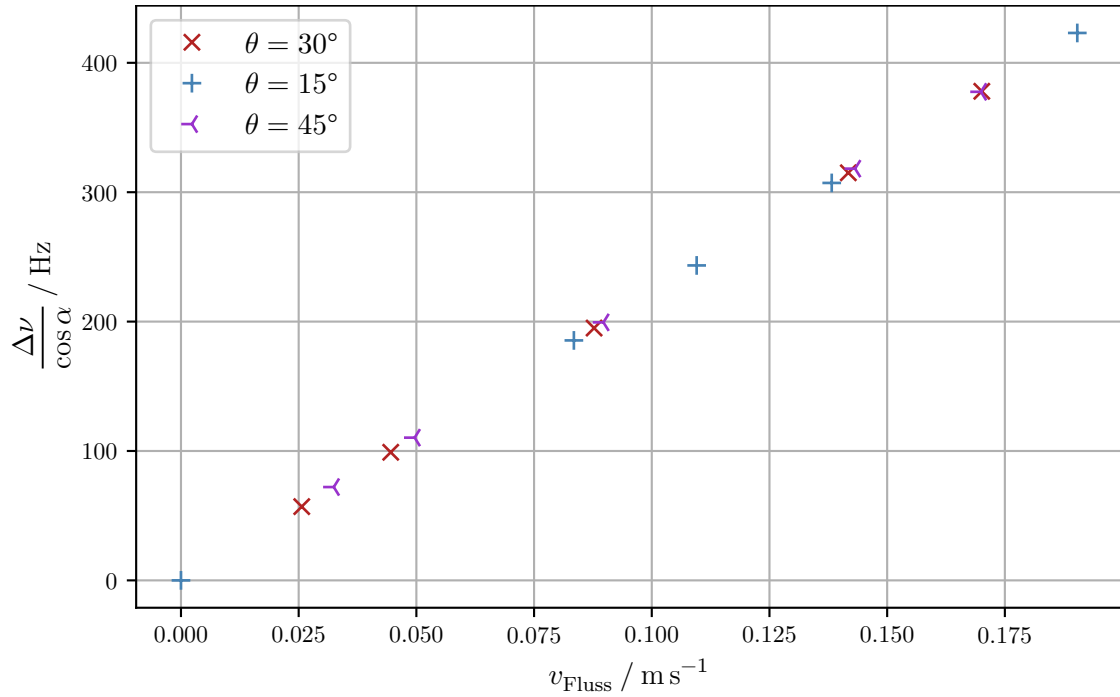


Abbildung 4: Messwerte zu verschiedenen Einstrahlwinkeln gegen die berechnete Strömungsgeschwindigkeit zum (Innen-)Rohrdurchmesser $d = 16 \text{ mm}$.

4.2 Bestimmung des Strömungsprofils

Wie in Unterabschnitt 3.3 beschrieben werden Messwerte zur Frequenzverschiebung, zur Streuintensität und zur momentanen Strömungsgeschwindigkeit zu verschiedenen Messtiefen genommen. Die originalen Messdaten können dem Anhang entnommen werden. In den Abbildungen 5 und 6 wird für zwei unterschiedliche Pumpleistungen die Streuintensität I und die Momentangeschwindigkeit v gegen die Messtiefe dargestellt. Des Weiteren wurde ein Ausgleichspolynom zweiten Grades eingefügt.

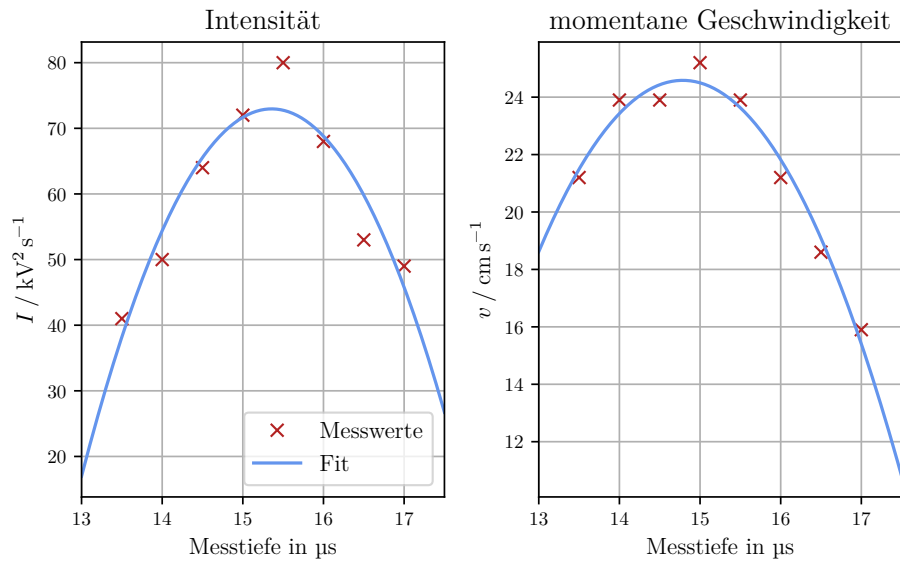


Abbildung 5: Intensität und Momentangeschwindigkeit der Flüssigkeit in Abhängigkeit der Messtiefe mit einer Pumpleistung von 45 % der maximalen Leistung.

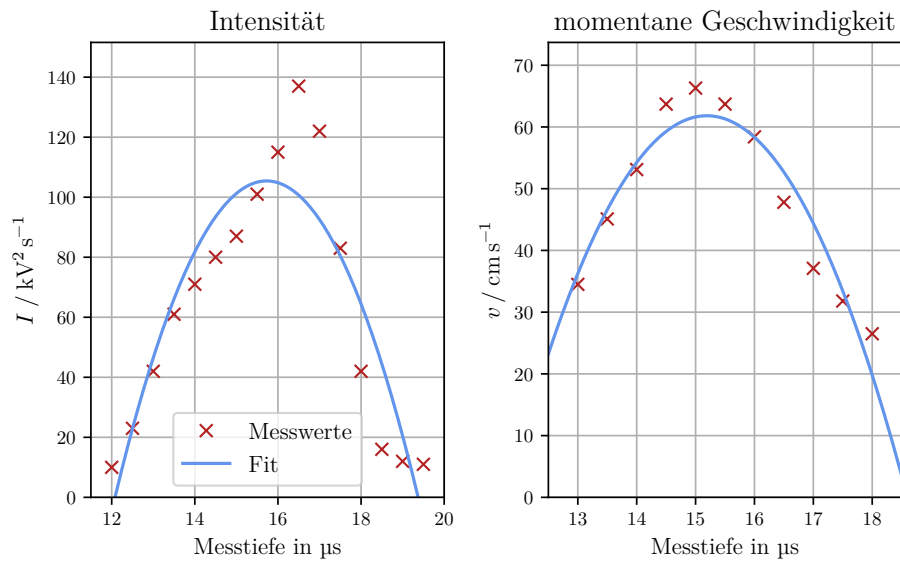


Abbildung 6: Intensität und Momentangeschwindigkeit der Flüssigkeit in Abhängigkeit der Messtiefe mit einer Pumpleistung von 70 % der maximalen Leistung.

5 Diskussion

Im ersten Teil des Versuches wird der Zusammenhang zwischen Dopplerwinkel α und Strömungsgeschwindigkeit v_{Fluss} untersucht. Anhand der Gleichung 3 lässt sich erkennen, dass der Quotient $\Delta\nu / \cos\alpha$ nicht mehr von α abhängig ist und sich proportional zu v_{Fluss} verhält. Demnach sollten die in den Abbildungen 2 bis 4 dargestellten Messwerte eine Gerade ergeben, auf welcher die Messpunkte zu verschiedenen Winkeln θ gruppiert sind. Es fällt jedoch auf, dass besonders bei höheren Fließgeschwindigkeiten eine große Streuung der Messwerte auftritt, obwohl diese die gleichen Punkte abbilden sollten. Dies deutet auf die Ungenauigkeit des Verfahrens hin. Eine Ursache dafür ist, dass die Messwertanzeige der mittleren Frequenz f_{mean} und jener der maximalen Frequenz f_{max} starken Schwankungen unterliegt, wodurch die daraus bestimmte Frequenzverschiebung eine große Ungenauigkeit vorweist. Weitere Fehlerquellen sind die manuelle Führung der Messsonde und die Drehzahlschwankungen der Pumpe.

Bei der Bestimmung des Strömungsprofils ergeben sich die Grafiken 5 und 6. Es lässt sich erkennen, dass der Verlauf der Messpunkte der Momentangeschwindigkeit parabelähnlich ist, weshalb die Vermutung nahe liegt, dass ein quadratischer Zusammenhang zwischen Messtiefe und Geschwindigkeit der Flüssigkeit besteht. Auch die Messwerte der Intensität stellen einen ähnlichen Verlauf dar, jedoch könnte hier eine Hutfunktion eine bessere Approximation liefern. Bei höherer Pumpleistung (Strömungsgeschwindigkeit) können mehr Messwerte genommen werden, da bei geringeren Geschwindigkeiten die Streuintensität des Signals an den Rändern der Wasserleitung nicht mehr ausreicht. Wie auch im ersten Teil ist die starke Fluktuation der in *Flow View* angezeigten Messwerte eine potenzielle Fehlerquelle.

Anhang

VUJ 3

$$V_{\text{max}} = 9200 \text{ rpm}$$

Rotordurchmesser mit Hohlrad d:

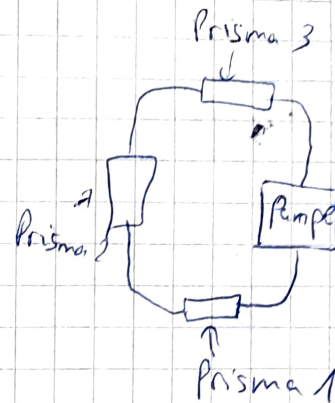
$$\phi 12 \text{ mm} : 2470 \text{ rpm}$$

80°:

$$30^\circ: f_{\text{max}}: 79 \text{ Hz} \quad f_{\text{mean}}: 49 \text{ Hz}$$

$$15^\circ: f_{\text{max}}: 0 \text{ Hz} \quad f_{\text{mean}}: 0 \text{ Hz}$$

$$45^\circ: f_{\text{max}}: 118 \text{ Hz} \quad f_{\text{mean}}: 79 \text{ Hz}$$



~~3200 rpm~~

$$3370 \text{ rpm}: 30^\circ: f_{\text{max}}: 141 \text{ Hz} \quad f_{\text{mean}}: 85 \text{ Hz}$$

$$15^\circ: f_{\text{max}}: 95 \text{ Hz} \quad f_{\text{mean}}: 61 \text{ Hz}$$

$$45^\circ: f_{\text{max}}: 214 \text{ Hz} \quad f_{\text{mean}}: 134 \text{ Hz}$$

$$4660 \text{ rpm}: 30^\circ: f_{\text{max}}: 193 \text{ Hz} \quad f_{\text{mean}}: 110 \text{ Hz}$$

$$15^\circ: f_{\text{max}}: 121 \text{ Hz} \quad f_{\text{mean}}: 73 \text{ Hz}$$

$$45^\circ: f_{\text{max}}: 330 \text{ Hz} \quad f_{\text{mean}}: 195 \text{ Hz}$$

$$5080 \text{ rpm}: 30^\circ: f_{\text{max}}: 311 \text{ Hz} \quad f_{\text{mean}}: 171 \text{ Hz}$$

$$15^\circ: f_{\text{max}}: 206 \text{ Hz} \quad f_{\text{mean}}: 110 \text{ Hz}$$

$$45^\circ: f_{\text{max}}: 527 \text{ Hz} \quad f_{\text{mean}}: 317 \text{ Hz}$$

$$6000 \text{ rpm}: 30^\circ: f_{\text{max}}: 477 \text{ Hz} \quad f_{\text{mean}}: 269 \text{ Hz}$$

$$15^\circ: f_{\text{max}}: 275 \text{ Hz} \quad f_{\text{mean}}: 146 \text{ Hz}$$

$$45^\circ: f_{\text{max}}: 783 \text{ Hz} \quad f_{\text{mean}}: 464 \text{ Hz}$$

Lehring Rohr:

	30°	15°	45°
3280 rpm			
f_{max} in Hz	284	167	666
f_{mean} in Hz	155	98	283 281
4030 rpm			
f_{max} in Hz	415	232	703
f_{mean} in Hz	220	134	639
5010 rpm			
f_{max} in Hz	655	373	1074
f_{mean} in Hz	342	195	647
6000 rpm			
f_{max} in Hz	937 937	572	1755
f_{mean} in Hz	507	293	1050
5510			
f_{max} in Hz	882	558	1478
f_{mean} in Hz	464	269	879

großes Rohr	30°	15°	45°
2930rpm			
f _{max} inltz	68	0	95
f _{mean} inltz	49	0	61
4030			
"	106	81	162
"	73	49	110
5000rpm			
"	163	104	253
"	98	61	159
6000rpm			
"	251	138	382
"	146	85	232
6600			
"	309	171	471
"	183	98	293

Messung 2:

70% vom max rpm (real 6400 rpm)

Messlage ^{in MS}	$f_{max} [Hz]$	$f_{mean} [Hz]$	$v [cm/s]$	$lin kV_s^2$
12	0	0	0	810
12,5	0	0	0	1823
13	312*	188 159	34,5	2742
13,5	395	208	45,1	87 61
14	446	256	53,1	71
14,5	494	281	63,7	80
15	509	305	66,3	87
15,5	498	293	63,7	10,1
16	461	269	58,4	115
16,5	404	214	47,8	137
17	349	183	37,1	122
17,5	302	146	31,8	83
18	255	110	26,5	62
18,5	0	0	0	16
19	0	0	0	12
19,5	0	0	0	11

65% vom Maxrpm (real: 6110 rpm)

Mess-tiefe in μs	f_{max} in Hz	f_{mean} in Hz	v in $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$	l in $\frac{\text{V}^2}{\text{s}}$
12	0	0	0	/
12,5	0	0	0	/
13	0	0	0	/
13,5	174	104	21,2	41
14	182	110	23,9	50
14,5	190	110	23,9	64
15	197	122	25,2	72
15,5	183	110	23,9	80
16	161	98	21,2	68
16,5	144	85	18,6	53
17	141	85	18,9	49
17,5	0	0	0	/
18	0	0	0	/
18,5	0	0	0	/
19	0	0	0	/
19,5	0	0	0	/

J. Ritter