

US

## **Doppler-Sonographie**

Umut Aydinli  
umut.aydinli@tu-dortmund.de

Muhammed-Sinan Demir  
sinan.demir@tu-dortmund.de

Durchführung: 04.04.2022

Abgabe: 11.04.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1 Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
<b>3 Vorbereitungsaufgabe</b>	<b>5</b>
<b>4 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung</b>	<b>5</b>
<b>5 Auswertung</b>	<b>6</b>
5.1 Strömungsgeschwindigkeit aus der Dopplerverschiebung . . . . .	6
5.2 Strömungsgeschwindigkeit und Streuintensität in Abhängigkeit der Messtiefe	9
<b>6 Diskussion</b>	<b>12</b>
<b>Literatur</b>	<b>12</b>

## 1 Zielsetzung

In dem Versuch US3 geht es um die Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit und die Bestimmung des Strömungsprofils durch Ultraschallwellen.

## 2 Theorie

Unter Ultraschall werden Longitudinalwellen die eine Frequenz von ca. 20 kHz bis 1 GHz verstanden. Diese sind nicht in dem hörbaren Frequenzbereich der Menschen, welcher sich auf 16 Hz bis 20 kHz begrenzt. Einer von zwei Effekten ist der Doppler-Effekt. Bei diesem Effekt bewegen sich Beobachter und Schallquelle relativ zueinander und die Änderung der dabei auftretenden Frequenz ist der sogenannte Doppler-Effekt. Die Richtung, in welche sich die Schallquelle bewegt, spielt dabei eine wichtige Rolle. Bewegt sich die Schallquelle von dem Beobachter weg, wird die Frequenz zu einer kleineren verschoben  $\nu_{\text{gr}}$ . Bewegt sich die Schallquelle hingegen auf den Beobachter zu, wird die Frequenz zu einer höheren verschoben  $\nu_{\text{kl}}$ .

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

Das  $\nu_0$  steht dabei für die Ausgangsfrequenz. Wenn sich der Beobachter bewegt und die Quelle ruht sieht dies jedoch anders aus. Bewegt sich der Beobachter auf die Quelle zu, wird die Frequenz zu einer höheren verschoben  $\nu_{\text{h}}$ . Bewegt sich der Beobachter von der Quelle weg, wird die Frequenz zu einer niedrigeren verschoben  $\nu_{\text{n}}$ .

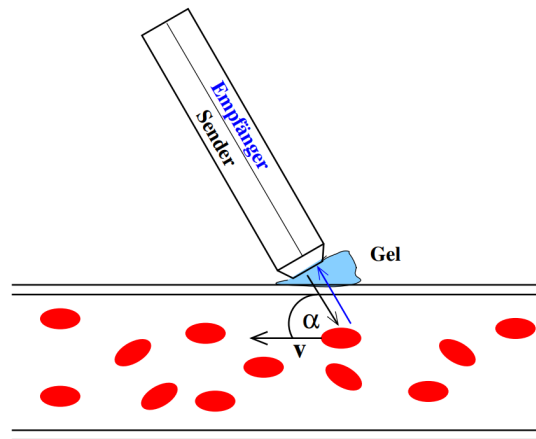
$$\nu_{\text{h/n}} = \nu_0 \left( 1 \pm \frac{v}{c} \right). \quad (2)$$

Verwendung findet dieser Effekt beispielsweise in der Medizin um Blutströmungsgeschwindigkeiten zu bestimmen. Dabei trifft die Ultraschallwelle auf das Blutkörperchen und durch den Doppler-Effekt wird die Frequenz verschoben um

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

Hierbei ist  $v$  die Geschwindigkeit des Blutes,  $c$  die Schallgeschwindigkeit und  $\alpha$  und  $\beta$  die Winkel, in welchen die Ultraschallwellen auf die Blutkörperchen auftreffen. Die Winkel  $\alpha$  und  $\beta$  sind bei diesem Verfahren, Impuls-Echo-Verfahren, identisch. Dadurch folgt die Frequenzverschiebung durch

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



**Abbildung 1:** Verbildlichung der Frequenzverschiebung durch den Doppler Effekt [1].

Eine von vielen Methoden Ultraschallwellen zu erzeugen ist die Anwendung von dem reziproken piezo-elektrischen Effekt. Hierbei wird ein piezoelektrischer Kristall in Schwingung gebracht, indem der Kristall in ein elektrisches Wechselfeld gebracht wird. Beim Schwingen werden Ultraschallwellen abgestrahlt und bei Übereinstimmung der Eigenfrequenz des Kristalls mit der Frequenz des Anregers, so können wiederum große Schwingamplituden erzeugt werden mit sehr hohen Energiedichten.

Der Piezokristall kann nicht nur als Schallsender sondern auch als Schallempfänger verwendet werden, wobei Schallwellen auf den Kristall treffen und diesen zum Schwingen bringen. Die Ultraschallsonde die in diesem Versuch verwendet wird ist Ultraschallsender sowie Empfänger.

### 3 Vorbereitungsaufgabe

Die Vorbereitungsaufgabe für diesen Versuch besteht aus der Berechnung der Dopplervinkel  $\alpha$  für die Prismenwinkel für  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ . Dafür wird die Gleichung

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

verwendet. Dabei sind  $c_L = 1800 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  und  $c_p = 2700 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  [1]

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

$$\alpha_{30^\circ} = 90^\circ - \arcsin \left( \sin 30^\circ \cdot \frac{1800}{2700} \right) = 70,52^\circ$$

$$\alpha_{60^\circ} = 90^\circ - \arcsin \left( \sin 60^\circ \cdot \frac{1800}{2700} \right) = 54,73^\circ$$

### 4 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Der Versuchsaufbau zu diesem Versuch besteht aus einem Wasser-Glycerin-Kreislauf, welcher durch eine Pumpe angetrieben wird. Dieser Kreislauf teilt sich in ca. drei Teile mit verschiedenen Rohrdicken, welche in der Tabelle 1 aufgelistet werden, auf. In diesem Wasser-Glycerin-Gemisch befinden sich Glaskugeln, welche mit der Flüssigkeit durch den Kreislauf strömen. Auf diesen Strömungsröhren befindet sich jeweils ein Doppler-Prisma mit drei verschiedenen Einschallwinkeln ( $15^\circ$ ,  $30^\circ$  und  $45^\circ$ ).

Dazu wird ebenfalls ein Ultraschall Doppler-Generator mit einer Ultraschallsonde mit einer Frequenz von bis zu 2 MHz, ein Rechner zur Datenauswertung und Ultraschallgel benötigt. Auf dem Rechner sollte das Programm Flowview installiert sein und der Rechner sollte mit dem Generator verbunden sein um die Daten aufnehmen zu können. Das Ultraschallgel muss auf dem Prisma sowie auf dem Strömungsrohr aufgetragen werden, weil Luft zwischen dem Prisma und dem Strömungsrohr als drittes Medium wirkt und dadurch die Messung manipuliert bzw. gar nicht erst durchgeführt werden kann.

Eine wichtige Randbemerkung ist zu dem, dass die Ultraschallsonde sehr empfindlich ist und deswegen sehr vorsichtig mit dieser umgehen sollte.

**Tabelle 1:** Die Auflistung der verschiedenen Rohrdicken

	Innendurchmesser	Außendurchmesser
kleine Rohrdicke	7mm	10mm
mittlere Rohrdicke	10mm	15mm
große Rohrdicke	16mm	20mm

Für den ersten Arbeitsauftrag wird die Strömungsgeschwindigkeit bestimmt, dies geschieht wie folgt. Man wählt eines der drei verschieden dicken Rohre und beschmiert dieses mit Ultraschallgel. Auf dieses wird das Prisma gesetzt und auf das Prisma wird wieder Ultraschallgel gegeben. Die Ultraschallsonde wird an einem der drei wählbaren Winkeln angesetzt. Der Generator wird bei *Sample Volume* auf Large gestellt. Flowview wird auf dem Rechner geöffnet und die nötigen Parameter ergänzt, wie z.B. Winkel und Rohrdicke. Danach wird gemessen und Werte wie die maximale Frequenz die erzeugt wird, die Flowrate und die Geschwindigkeit der Glaskugeln. Die Messung wird für alle drei Winkel durchgeführt mit jeweils 5 verschiedenen Geschwindigkeiten durchgeführt, alle jedoch nur an einem der drei Rohrdicken

Der zweite Arbeitsauftrag besteht aus der Bestimmung des Strömungsprofils des mitteldicken Rohres. Der Aufbau ist der selbe wie davor jedoch werden einige kleine Veränderungen vorgenommen. Die Ultraschallsonde wird nur bei dem Prismawinkel von  $15^\circ$  befestigt. Der Ultraschall-Generator wird bei *Sample Volume* auf Small gestellt und die Einstellung *Depth* wird in 0,5 Schritten erhöht. Begonnen wird bei 12,5 und geht bis 18,5. Aufgenommen werden diesmal maximale Frequenz und die Intensität. Dies wird für eine Pumpleistung von 70% und danach mit einer Pumpleistung von 45% durchgeführt.

## 5 Auswertung

### 5.1 Strömungsgeschwindigkeit aus der Dopplerverschiebung

Im ersten Teil der Versuchsreihe wird die Strömungsgeschwindigkeit an einem Rohr mit einem Innendurchmesser von 10 mm, mit Hilfe des Impuls-Echo-Verfahren, bestimmt. Dabei wird das Ultraschallgerät an drei verschiedene Einstellwinkel angesetzt ( $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ). Zuvor berechnet sich der Dopplerwinkel  $\alpha$  mit der Formel (5).

$$\alpha_{15^\circ} = 80,06^\circ$$

$$\alpha_{30^\circ} = 70,52^\circ$$

$$\alpha_{45^\circ} = 61,87^\circ$$

Demnach wird die Strömungsgeschwindigkeit für fünf verschiedene Flussgeschwindigkeiten für alle drei Dopplerwinkel durchgeführt. Die Voreinstellung der Sonde beträgt 2 MHz. Die Frequenzverschiebung sowie flow und speed werden tabellarisch festgehalten in der Tabelle 3, 4 und 5. Die theoretische Strömungsgeschwindigkeit berechnet sich durch die Formel (4), durch das Umformen folgt:

$$v = \frac{\Delta\nu \cdot c}{2 \cdot \nu_0 \cos \alpha} \quad (6)$$

Die errechneten Strömungsgeschwindigkeiten von den drei verschiedenen Winkeln werden mit den Theoriewerten, welche sich durch die Formel

$$v = \frac{\dot{v}}{\pi \cdot R^2} \quad (7)$$

errechnen lässt, verglichen.

**Tabelle 2:** Theoriewerte zu den Flussgeschwindigkeiten.

Flussgeschwindigkeit / $\frac{1}{\text{min}}$	$v_{\text{theo}} / \frac{\text{m}}{\text{s}}$
3,0	0.63
3.5	0.74
4.0	0.85
4.5	0.95
5.0	1.06

**Tabelle 3:** Die Messwerte des ersten Arbeitsauftrages für den Winkel 15°

Pumprate / $\frac{\text{L}}{\text{min}}$	$\Delta\nu / \text{Hz}$	speed / $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	flow / $\frac{\text{L}}{\text{min}}$	$v / \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$\frac{\Delta\nu}{\cos \alpha}$
3,0	190	2,39	1,1	0,49	1100,70
3,5	161	2,12	1,0	0,41	932,70
4,0	281	3,45	1,6	0,73	1627,88
4,5	243	2,65	1,2	0,46	1407,74
5,0	404	4,48	2,3	1,05	2340,44

**Tabelle 4:** Die Messwerte des ersten Arbeitsauftrages für den Winkel  $30^\circ$ 

Pumprate / $\frac{\text{L}}{\text{min}}$	$\Delta\nu$ / Hz	speed / $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	flow / $\frac{\text{L}}{\text{min}}$	v / $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	$\frac{\Delta\nu}{\cos \alpha}$
3,0	605	3,71	1,7	0,81	1814,21
3,5	607	4,12	1,9	0,81	1820,21
4,0	898	5,77	2,7	1,21	2692,83
4,5	904	6,01	2,8	1,21	2710,82
5,0	1270	8,38	4,0	1,71	3808,34

**Tabelle 5:** Die Messwerte des ersten Arbeitsauftrages für den Winkel  $45^\circ$ 

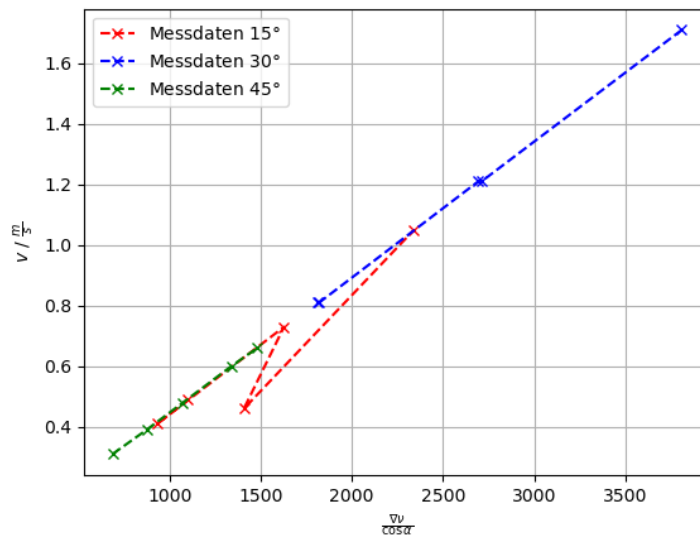
Pumprate / $\frac{\text{L}}{\text{min}}$	$\Delta\nu$ / Hz	speed / $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	flow / $\frac{\text{L}}{\text{min}}$	v / $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	$\frac{\Delta\nu}{\cos \alpha}$
3,0	324	1,55	0,7	0,31	687,20
3,5	412	1,94	0,9	0,39	873,85
4,0	506	2,23	1,1	0,48	1073,23
4,5	631	3,01	1,4	0,60	1338,35
5,0	698	3,11	1,5	0,66	1480,46

Daraus folgt

$$\begin{aligned}\nu_{15^\circ} &= (0,459 \pm 0,303) \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ \nu_{30^\circ} &= (1,150 \pm 0,371) \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ \nu_{45^\circ} &= (0,488 \pm 0,128) \frac{\text{m}}{\text{s}}.\end{aligned}$$

Zudem wird das Verhältnis  $\frac{\Delta\nu}{\cos \alpha}$  gegen die errechneten Strömungsgeschwindigkeiten der drei Dopplerwinkel geplottet.





**Abbildung 2:** Geschwindigkeit gegen das Verhältnis der Dopplerwinkel.

Wie zu beobachten, steigen die Geschwindigkeiten bei zunehmenden Verhältnis linear. Die Messdaten für 30° sowie 45° liegen mehrfach auf der Gerade, wohingegen bei 15° einige Abweichungen vorhanden sind.

## 5.2 Strömungsgeschwindigkeit und Streuintensität in Abhängigkeit der Messtiefe

Im nächsten Teil der Versuchsreihe wird die Flussgeschwindigkeit auf 70% der maximalen Leistung des Gerätes gebracht welche  $5,2 \frac{l}{min}$  entspricht. Es wird mit einem Einstellwinkel von 15° und einem Rohrdurchmesser von 10 mm durchgeführt. Die Messtiefe beginnt bei 12 µm und wird in 0,5 µm bis 18 µm gemessen. Dies entspricht einer Messtiefe von 11 mm bis 30 mm. Die Streuintensität sowie die Strömungsgeschwindigkeit werden in Abhängigkeit der Messtiefe werden in der Tabelle 6 festgehalten.

**Tabelle 6:** Die Messwerte des zweiten Arbeitsauftrages für 45% der maximal Pumpleistung

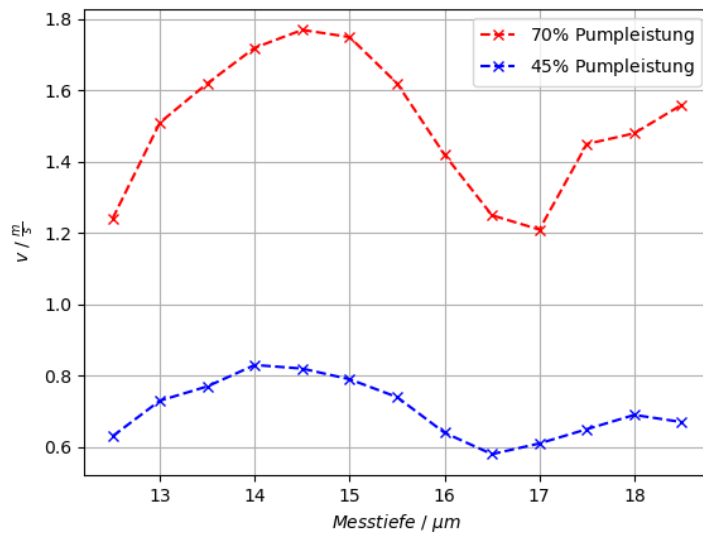
Messtiefe	$\Delta\nu$ / Hz	Intensität / $1000 \cdot \frac{V^2}{s}$	$v$ / $\frac{m}{s}$
12,5	479	61	1,24
13,0	583	87	1,51
13,5	623	102	1,62
14,0	663	131	1,72
14,5	680	140	1,77
15,0	675	161	1,75
15,5	625	177	1,62
16,0	546	190	1,42
16,5	480	145	1,25
17,0	466	130	1,21
17,5	560	115	1,45
18,0	568	98	1,48
18,5	599	92	1,56

Die Durchführung wird wiederholt für 45% der maximalen Leistung des Gerätes anschließend die Messwerte in Tabelle 7 festgehalten.

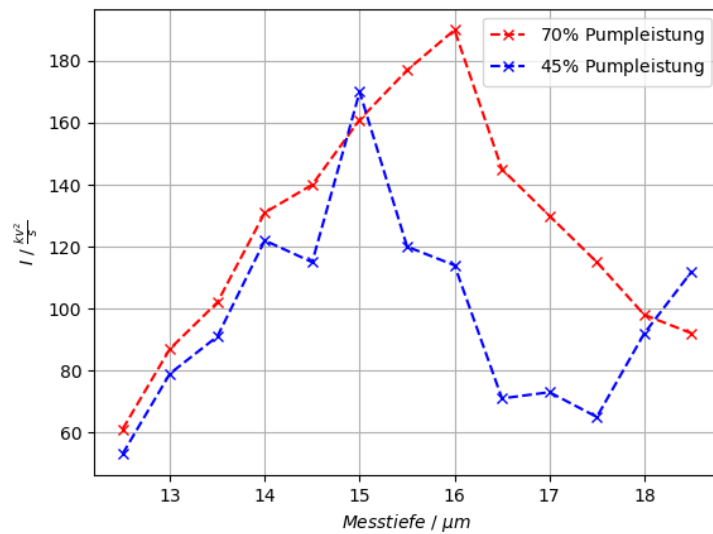
**Tabelle 7:** Die Messwerte des zweiten Arbeitsauftrages für 70% der maximal Pumpleistung

Messtiefe	$\Delta\nu$ / Hz	Intensität / $1000 \cdot \frac{V^2}{s}$	$v$ / $\frac{m}{s}$
12,5	244	53	0,63
13,0	281	79	0,73
13,5	299	91	0,77
14,0	319	122	0,83
14,5	317	115	0,82
15,0	304	170	0,79
15,5	287	120	0,74
16,0	247	114	0,64
16,5	224	71	0,58
17,0	235	73	0,61
17,5	251	65	0,65
18,0	266	92	0,69
18,5	259	112	0,67

Daraufhin werden die Geschwindigkeiten und Streuintensitäten der einzelnen Messtiefe in einem Diagramm in Abhängigkeit der Messtiefe dargestellt.



**Abbildung 3:** Die Geschwindigkeiten gegen die Messtiefe geplottet.



**Abbildung 4:** Die Intensität gegen die Messtiefe geplottet.

Im Diagramm 3 ist es zu erkennen, dass die Geschwindigkeit der höheren Leistung deutlich größer sind. Zudem zeigt sich bei beiden eine Wellenartige Funktion, die durch das Absenden der Impulse erklären lässt. Je tiefer die Messtiefe ist, desto größer die Wartezeit zwischen den Impulsen. Am Anfang ist der Sendeimpuls klein und wird größer

mit zunehmender Messtiefe. Dazu kommt noch ein Schallimpuls, für Hin- und Rückweg, was dafür sorgt, dass die Funktion wellenartig wird. Diese Deutung kann ebenso auf das Diagramm 4 hergeleitet werden, wobei eine größere Messung mit mehr Messtiefen benötigt wird.

## 6 Diskussion

Anhand der zwei Versuchsteile konnten verschiedene Erkenntnisse erbracht werden. Beim Vergleich der mit Strömungsgeschwindigkeiten mit den Theoriewerten der einzelnen Flussgeschwindigkeiten, aus dem ersten Teil, folgt

**Tabelle 8:** Abweichung in % für die Einstellwinkel

$\frac{1}{\text{min}}$	15°	30°	45°
3.0	22,2	28,0	50,7
3.5	44,5	9,40	47,2
4.0	14,1	42,3	43,5
4.5	51,5	27,3	36,8
5.0	0,90	61,3	37,7

Auffällig hierbei ist, dass die Abweichungen für einen Einstellwinkel von 15° genug sind um mit zunehmender Winkel, sich die Abweichung vergrößert. Die Zunahme der Abweichung lässt sich auf mögliche Fehlerquellen herleiten, wie durch das Ablesen der Messwerte. Es ist zu beachten, dass die Werte beider Messung sich sehr schnell verändert haben, wodurch sich keine genauen Wertepaare ablesen ließen. Dadurch entsteht eine Abweichung der Werte und somit eine Ungenauigkeit der Ergebnisse. Trotz alledem befinden sich die Werte in einem annehmbaren Bereich, z.B. die geringste Abweichung beträgt 0,9% und die meisten Werte befinden sich im Abweichungsbereich.

Die Fehlerquellen lassen sich ebenso auf den zweiten Versuchsteil herleiten. Die Sonde musste präzise gehalten werden da bei einer geringen Bewegung das Messprogramm aufgehört hatte, die Messung durchzuführen. Unbeschadet dessen sind die Messergebnisse bzw. Diagramme entsprechend der Erwartungen.

## Literatur

- [1] TU Dortmund. *US3: Doppler-Sonographie*. 2022. URL: [https://moodle.tu-dortmund.de/pluginfile.php/1977200/mod\\_resource/content/2/US3.pdf](https://moodle.tu-dortmund.de/pluginfile.php/1977200/mod_resource/content/2/US3.pdf) (besucht am 06.04.2022).