

US3: Doppler-Sonographie

Clara Sondermann
clara.sondermann@tu-dortmund.de

Enno Wellmann
enno.wellmann@tu-dortmund.de

Durchführung: 06.06.2023, Abgabe 13.06.2023

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Ziel	1
2 Theorie	1
2.1 Ultraschall	1
2.2 Der Doppler-Effekt	1
3 Durchführung	2
3.1 Aufbau	2
3.2 Messprogramm	3
3.2.1 Messreihe zur Bestimmung der Geschwindigkeit der Glaskugeln . .	3
3.2.2 Messreihe zur Untersuchung des Strömungsprofils	3
4 Vorbereitungsaufgabe	3
5 Auswertung	4
5.1 Geschwindigkeit der Flüssigkeit und das Dopplersignal	4
5.2 Untersuchung des Strömungsprofils	6
6 Diskussion	7
6.1 Flussgeschwindigkeit	7
6.2 Strömungsprofil	8
6.3 Fehlerabschätzung	8
Literatur	8
Anhang	9

1 Ziel

In diesem Versuch wird mit Hilfe der Doppler-Sonografie die Strömungsgeschwindigkeit verschiedener Strömungsröhren untersucht. Außerdem wird das Strömungsprofil in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit und des Dopplerwinkels bestimmt.

2 Theorie¹

2.1 Ultraschall

Ultraschall befindet sich im Frequenzbereich von 20 kHz bis 1 GHz und liegt damit oberhalb des für Menschen hörbaren Bereichs (16 Hz bis 20 kHz).

Ultraschallwellen können mit Hilfe des piezoelektrischen Effekts erzeugt werden, bei dem piezoelektrische Kristalle in einem elektrischen Wechselfeld zum Schwingen angeregt werden. Dabei muss die polare Achse in Richtung des elektrischen Feldes zeigen. Durch die angeregten Schwingungen werden dann Schallwellen im Ultraschallbereich emittiert. Sehr hohe Energiedichten des Schalls können im Resonanzfall (Erreger- entspricht der Eigenfrequenz des Kristalls) erreicht werden. Der Effekt ist reziprok, d.h. treffen Ultraschallwellen auf den Kristall, wird ein elektrisches Wechselfeld erzeugt. Ein Piezokristall kann somit als Sender und Empfänger genutzt werden. Trotz des relativ geringen piezoelektrischen Effekts wird häufig Quarz als Kristall benutzt, da es gleichbleibende physikalische Eigenschaften besitzt.

2.2 Der Doppler-Effekt

Der Doppler-Effekt besagt, dass es Frequenzänderungen gibt, wenn sich Beobachter und Quelle relativ zu einander bewegen. Sei im Folgenden f_0 die Frequenz, mit der die Quelle sendet, v die relative Geschwindigkeit zwischen Quelle und Beobachter und c die Wellengeschwindigkeit im betrachteten Medium.

Hat der Beobachter eine feste Position, vergrößert sich die empfangene Frequenz hin zu f_{gr} , wenn sich die Quelle auf den Beobachter zu bewegt. Bewegt sie sich vom Beobachter weg, wird die Frequenz kleiner und erreicht den Wert f_{kl} . Es gilt

$$f_{\text{gr/kl}} = \frac{f_0}{1 \mp \frac{v}{c}}. \quad (1)$$

Ist hingegen die Quelle fest und der Beobachter bewegt sich, kommt es zu einer höheren Frequenz f_{h} , wenn sich der Beobachter auf die Quelle zu bewegt, und zu einer niedrigeren Frequenz f_{n} , wenn er sich weg bewegt. In diesen Fällen gilt

$$f_{\text{h/n}} = f_0 \left(1 \pm \frac{v}{c} \right). \quad (2)$$

¹Unter Verwendung von [1].

Der Doppler-Effekt findet unter anderem in der Medizin seine Anwendung, um z.B. die Geschwindigkeit von Blutströmungen zu bestimmen. Beim Auftreffen einer Ultraschallwelle auf ein bewegtes Objekt, wird die Frequenz um

$$\Delta f = f_0 \frac{v}{c} (\cos \alpha + \cos \beta) \quad (3)$$

verschoben. Die beiden Winkel α und β sind dabei die Winkel zwischen der Ausbreitungsrichtung (Normale) der einlaufenden bzw. reflektierten Welle und der Geschwindigkeit v des Objektes an. Im hier verwendeten Impuls-Echo-Verfahren ist der Sender auch gleichzeitig der Empfänger, sodass sich mit $\alpha = \beta$ die obige Gleichung zu

$$\Delta f = 2f_0 \frac{v}{c} \cos \alpha \quad (4)$$

vereinfacht, vgl. Abbildung 1.

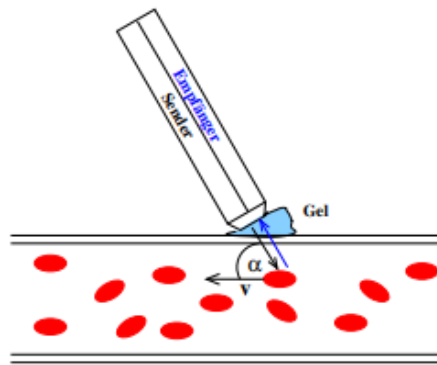


Abbildung 1: Doppler-Sonografie am Beispiel des Impuls-Echo-Verfahrens [1].

3 Durchführung

3.1 Aufbau

Der Versuch besteht aus einem Ultraschall-Doppler-Generator, der sich im Pulsbetrieb befindet, einer Ultraschallsonde, die eine Frequenz von 2 MHz aussendet, und einem Rechner zur Datenaufnahme und -analyse. Es wird eine Strömungsröhre mit einem Innendurchmesser von 10 mm und einem Außendurchmesser von 15 mm untersucht. Die verwendete Flüssigkeit ist ein Gemisch aus Wasser, Glycerin und Glaskugeln. Dabei ist die Viskosität des Gemisches so gewählt, dass bei mittlerer Strömungsgeschwindigkeit eine laminare Strömung vorhanden ist. Die Flüssigkeit hat dabei eine Dichte von $1,15 \text{ g/cm}^3$ und eine Viskosität von $12 \text{ mPa} \cdot \text{s}$. Die Strömungsgeschwindigkeit selbst kann dabei zwischen 0 und $7,5 \text{ L/min}$ eingestellt werden. Ferner gibt es ein Doppler-Prisma aus Acryl, das die drei Einschallwinkel $\theta = 15^\circ$, 30° und 60° hat, vgl. Abbildung 2. Der Dopplerwinkel α kann gemäß

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

berechnet werden, wobei $c_L = 1800 \text{ m/s}$ und $c_P = 2700 \text{ m/s}$ jeweils die Schallgeschwindigkeit in der Flüssigkeit bzw. dem Prisma sind. Alle drei Auflageflächen haben den gleichen Abstand von 30,7 mm zwischen Sonde und Flüssigkeit. Die verschiedenen Winkel dienen dem Zwecke der Reproduzierbarkeit. Um Verluste beim Übergang zwischen Sonde und Prisma bzw. Prisma und Rohr zu vermeiden, steht ein Kontaktgel zu Verfügung. In Abbildung 2 ist außerdem erkennbar, dass das Prisma eine Aussparung für eine Platte hat, mit der das Rohr auf der richtigen Höhe für das Prisma gehalten werden kann.

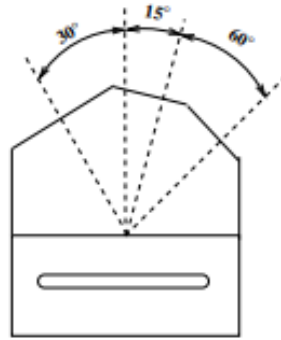


Abbildung 2: Ein Doppler-Prisma [1].

3.2 Messprogramm

3.2.1 Messreihe zur Bestimmung der Geschwindigkeit der Glaskugeln

Zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit der Kugeln in Abhängigkeit des Dopplerwinkels und der Flussgeschwindigkeit wird am Ultraschallgenerator der Regler **SAMPLE VOLUME** auf **LARGE** gestellt. Für insgesamt 5 Flussgeschwindigkeiten wird die Frequenzverschiebung bei jedem Dopplerwinkel gemessen.

3.2.2 Messreihe zur Untersuchung des Strömungsprofils

Für den Prismawinkel von 15° wird bei einer einer Pumpleistung von 5 L/min und 3 L/min die Strömungsgeschwindigkeit und der Streuintensitätswert (als Maß für den Dopplerwinkel) gemessen. Dies entspricht ca. 67 % bzw. 40 % der maximalen Leistung. Die beiden Größen werden in Abhängigkeit der Tiefe gemessen.

4 Vorbereitungsaufgabe

Gemäß Gleichung (5) kann der Dopplerwinkel in Abhängigkeit von θ bestimmt werden. Mit Hilfe der oben angegebenen Werte ergibt sich dann Tabelle 1.

Tabelle 1: Der Dopplerwinkel α in Abhängigkeit des Prismawinkels θ .

$\theta/^\circ$	$\alpha/^\circ$
15	80
30	71
60	55

5 Auswertung

5.1 Geschwindigkeit der Flüssigkeit und das Dopplersignal

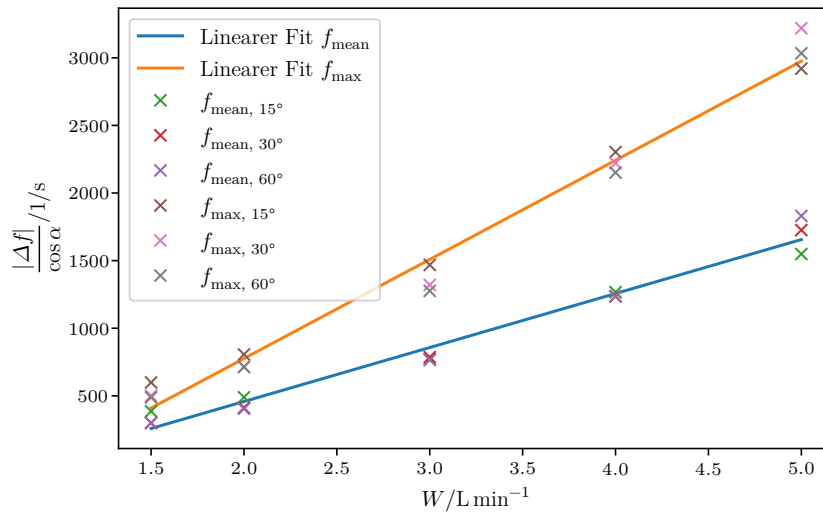


Abbildung 3: Die Frequenzverschiebungen f_{\max} und f_{mean} zu den Verschiedenen Winkeln mit linearen Ausgleichsrechnungen.

$\theta/^\circ$	15	30	60	15	30	60
$\alpha/^\circ$	80	71	55	80	71	55
$W/(L/\text{min})$	$\Delta f_{\text{mean}}/\text{Hz}$			$\Delta f_{\text{max}}/\text{Hz}$		
1,5	−67	98	−171	−104	163	−280
2,0	−85	134	−232	−140	232	−410
3,0	−134	256	−439	−255	430	−732
4,0	−220	403	−708	−400	723	−1234
5,0	−269	562	−1050	−507	1048	−1740

Tabelle 2: Die gemessenen Frequenzverschiebungen bei einer Schalllaufzeit von $15,5 \mu\text{s}$

$\theta/^\circ$	15	30	60
W/L/min	$v/(\text{cm/s})$	$v/(\text{cm/s})$	$v/(\text{cm/s})$
1,5	-17,4	13,5	-13,4
2,0	-22,0	18,5	-18,2
3,0	-34,7	35,4	-34,4
4,0	-57,0	55,7	-55,5
5,0	-69,7	77,7	-82,4

Tabelle 3: Die aus den Frequenzverschiebungen berechneten Mittleren Geschwindigkeiten unter Verwendung von f_{mean} .

In Abbildung 3 werden die Frequenzverschiebungen nach der eingestellten Strömungsgeschwindigkeit eingestellt. Es kann ein linearer Zusammenhang zwischen Pumpleistung und auf $\cos(\alpha)$ normierter Frequenzverschiebung gefunden werden. Mit einer linearen Ausgleichsrechnung der Form $aW + b$ ergibt sich für die gemessenen Werte folgende Parameter

$$a_{\text{mean}} = (399 \pm 17) \frac{\text{L}}{\text{min s}} \quad b_{\text{mean}} = (-340 \pm 85) \text{ 1/s} \quad (6)$$

$$a_{\text{max}} = (733 \pm 27) \frac{\text{L}}{\text{min s}} \quad b_{\text{max}} = (-690 \pm 90) \text{ 1/s} \quad (7)$$

In Tabelle 3 werden die Geschwindigkeiten aus der mittleren Frequenzverschiebung mit

$$v = \frac{\Delta f c_L}{2f_0 \cos(\alpha)} \quad (8)$$

berechnet.

5.2 Untersuchung des Strömungsprofils

$T/\mu\text{s}$	D/mm	$W = 3 \text{ L/min}$		$W = 5 \text{ L/min}$	
		Signal ₃	speed ₃	signal ₅	speed ₅
12,5	31,03	20	0	20	0
13,0	31,78	34	33	29	70
13,5	32,53	40	37	55	90
14,0	33,28	50	42	57	100
14,5	34,03	52	45	70	110
15,0	34,78	60	48	70	115
15,5	35,53	56	48	77	108
16,0	36,28	61	42	80	100
16,5	37,03	61	37	85	82
17,0	37,78	56	34	70	80
17,5	38,53	55	34	50	80
18,0	39,28	105	39	135	90
18,5	40,03	80	35	300	98
19,0	40,78	100	40	300	98
19,5	41,53	60	38	230	90

Tabelle 4: Geschwindigkeitsprofil der Flüssigkeit in Abhängigkeit von D

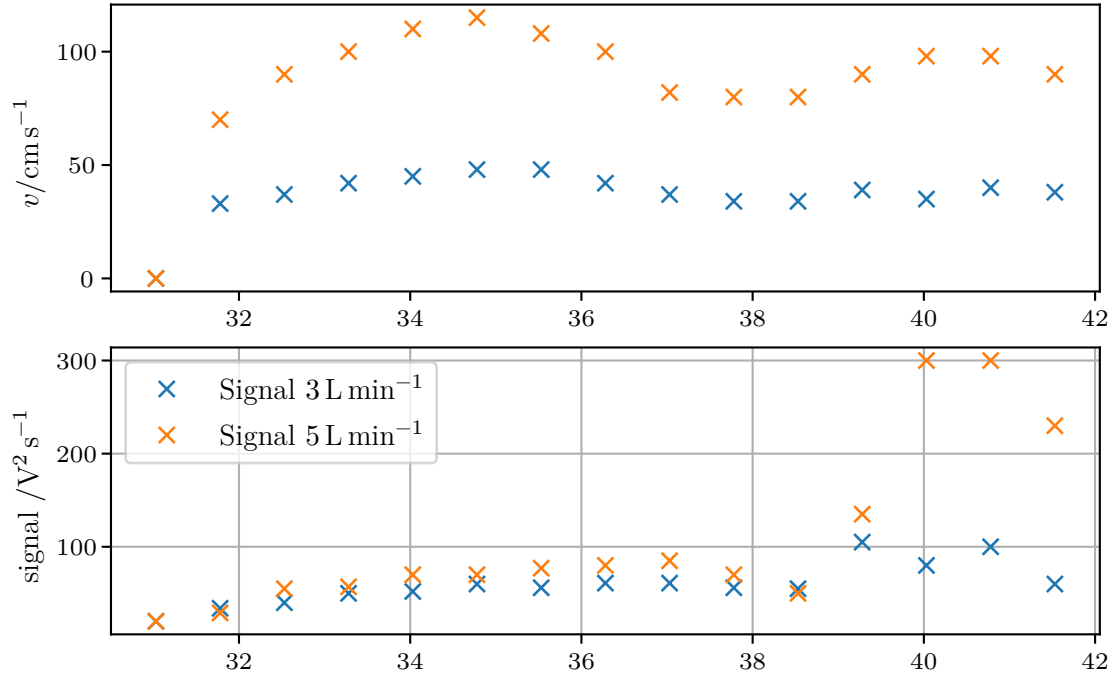


Abbildung 4: Graphische Darstellung des Strömungsprofils

In Tabelle 4 werden die Geschwindigkeiten und die Signalstärken in Abhängigkeit von der Strecke D in dem Material aufgelistet. Die Strecke D wird aus den Schallgeschwindigkeiten in den Materialien berechnet. Es entsprechen $4\text{ }\mu\text{s} \approx 10\text{ mm}$ im Acrylglas und $4\text{ }\mu\text{s} \approx 6\text{ mm}$ in der Flüssigkeit. Der Kristall hat eine Tiefe von $30,7\text{ mm}$ bei einem Winkel von $\theta = 15^\circ$ und $\alpha = 80^\circ$ hat das Rohr eine diagonale Tiefe von

$$H = \frac{10\text{ mm}}{\sin(80^\circ)} = 10,15\text{ mm} \quad (9)$$

Es sind also nur Werte von $D \leq 40,85\text{ mm}$ für das Strömungsprofil relevant.

6 Diskussion

6.1 Flussgeschwindigkeit

Es wurde gezeigt, dass ein linearer Zusammenhang zwischen Pumpleistung und Frequenzverschiebung existiert. In Tabelle 3 ist darüber hinaus erkennbar, dass der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit v für jeden Winkel θ mit der Fließgeschwindigkeit W steigt. Die entgegen gesetzten Vorzeichen lassen sich dabei durch die „Blickrichtung“ begründen, von der aus beim Prisma gemessen wird, vgl. Abbildung 2.

6.2 Strömungsprofil

In Abbildung 4 ist erkennbar, dass für eine größere W höhere Momentangeschwindigkeiten vorhanden sind. Für die Tiefe 31,03 mm sind noch keine Geschwindigkeiten vorhanden. Es lässt sich darauf schließen, dass durch die Ausdehnung des Kontaktgels tatsächlich nicht in der Flüssigkeit, sondern in der Rohrhülle gemessen wurde. Vernachlässigt man diesen Wert, ergeben sich durchschnittliche Werte von $v_3 = (37 \pm 11) \text{ cm/s}$ und $v_5 = (94 \pm 12) \text{ cm/s}$. Aufgrund der nicht allzu großen Standardabweichungen dieser Werte kann von laminaren Strömungen ausgegangen werden. Ferner ist erkennbar, dass für beide Fließgeschwindigkeiten die Maxima in einer Tiefe von ca. 34,78 mm liegen, was nahe am Mittelpunkt des Rohres liegt. Bei der höheren Strömungsgeschwindigkeit W ist dies deutlicher erkennbar als bei einer Leistung von 45%.

Wird die Streuintensität betrachtet, so ist erkennbar, dass je tiefer gemessen wird der Dopplereffekt umso größer ist. Dies wird insbesondere bei der höheren Pumpleistung deutlich.

6.3 Fehlerabschätzung

Da die Messgeräte und Instrumente dieses Versuchs keine Fehlerangaben haben und das Ablesen ausschließlich anhand von digitalen Werten erfolgt, ist es nicht möglich eine Fehlerabschätzung über die statistischen Abweichungen, die beispielsweise aus der Ausgleichsrechnung folgen, hinaus vorzunehmen. Ferner gibt es keine Literaturwerte für das hier verwendete Gemisch bzw. die ermittelten Werte, sodass eine Beurteilung der Messergebnisse nicht möglich ist.

Literatur

- [1] *Versuch US3: Doppler-Sonografie*. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2023.

Anhang

US S Duff
max Power less than W max
DEPTH = 1500 US
to surface
150 150 150
150
Pmax Pmax Pmax Pmax
-100 Hz -67 Hz 163 38
500
Pmax Pmax
-200 Hz -121
200
150
Pmax Pmax
-140 -85 R 52 154
500
Pmax Pmax
-40 -256

Time	Flow rate	Flow rate	Flow rate
15°	- 255	- 134	
30°	- 430	- 256	
60°	- 732	- 439	
4.0 L/min			
15°	- 100	- 270	
30°	- 223	- 403	
60°	- 426	- 708	
5.0 L/min			
15°	- 502	- 269	
30°	- 1048	- 562	
60°	- 1760	- 1050	

Fish [LWS]	Length (mm)	Weight (g)
12,5	20	0
13	29	20,2
13,5	55	30
14,00	5?	100
14,5	20	110
15	20	115
15,5	27	108
18	80	100
18,5	85	81
19,0	70	80
19,5	70	80

100	135	90
8	700	85
8.5	500	88
19	230	90
13.5	50	100
20		

$\frac{r}{\rho}$	$\frac{\rho}{\sigma} \text{ cm/sec}$
$\frac{r}{\rho} \text{ [cm]} \cdot \frac{\rho}{\sigma}$	$\frac{\rho}{\sigma} \text{ [cm]} \cdot \frac{\sigma}{\rho}$
12.5	70
43	36
13.5	60
16	50
14.5	52
16	60
16.5	50
18	61
16.5	61
18	55 55
19.5	55

18	105	59/6
18.5	80	35
19	83 100	60
19.5	60	38
		Puen