

US3: Doppler-Sonographie

Simon Schulte
simon.schulte@udo.edu

Tim Sedlaczek
tim.sedlaczek@udo.edu

Durchführung: 27.06.2017

Abgabe: 04.07.2017

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	1
2 Theorie	1
3 Durchführung	2
3.1 Versuchsaufbau	2
3.2 Versuchsablauf	3
4 Auswertung	4
4.1 Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit für die Dopplerwinkel.	4
4.2 Bestimmung der Streuintensität und der Momentangeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Messtiefe	7
5 Diskussion	10
Literatur	11

1 Zielsetzung

Bei diesem Versuch wird das Verhalten von Rohrströmungen mit Ultraschall untersucht.

2 Theorie

Als Ultraschall werden Schallwellen mit Frequenzen zwischen 20 kHz und 1 GHz bezeichnet. Diese Frequenzen liegen oberhalb von dem, was Menschen hören können. Für die Erzeugung dieser Schallwellen wird der piezo-elektrische Effekt verwendet. Dabei wird ein geeigneter Kristall elektrisch zu Schwingungen angeregt. Gleichzeitig kann die Resonanz eines solchen Kristalls für die Messung von entsprechend hoch frequenten Schallwellen verwendet werden. Bei dem Versuch wird, zur Messung der Geschwindigkeit der Strömung, der Doppler-Effekt ausgenutzt. Durch die Geschwindigkeit der Strömung wird die Frequenz der Welle verändert und die Differenz der Frequenzen kann zur Bestimmung der Geschwindigkeiten verwendet werden. Die Differenz der Frequenzen ergibt sich nach:

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

Dabei ist ν_0 die ursprüngliche Frequenz, v die Geschwindigkeit der Strömung, c die Schallgeschwindigkeit der Flüssigkeit und α der Winkel, in dem die Schallwelle auf die Röhre trifft. Demnach lässt sich die Geschwindigkeit nach

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

bestimmen.

Um reproduzierbare Winkel verwenden zu können und um die Ultraschall-Sonde besser an die Röhren koppeln zu können werden bei dem Versuch Acryl-Prismen verwendet. Wegen Brechung entsprechen die vorgegebenen Prismenwinkel nicht den für die Bestimmung der Geschwindigkeit nötigen Dopplerwinkeln. Diese lassen sich jedoch nach

$$\alpha = 90^\circ - \arcsin\left(\sin(\theta) \cdot \frac{c_L}{c_P}\right) \quad (3)$$

berechnen. Dabei ist c_L die Schallgeschwindigkeit der Flüssigkeit und c_P die von Acryl.

3 Durchführung

3.1 Versuchsaufbau

Der Aufbau besteht aus einer Schleife aus Silikonröhren, welche an eine Zentrifugalpumpe angeschlossen ist. Sie ist zudem mit einer Phantomflüssigkeit aus Wasser, Glycerin und Glaskugeln gefüllt. In der Schleife befinden sich drei Abschnitte mit unterschiedlichen Durchmessern. An ihnen wird später die Strömungsgeschwindigkeit gemessen. Für die Mesungen wird eine 2 MHz-Sonde verwendet, welche gleichzeitig als Sender und Empfänger dient. Das Signal wird dann an einem PC ausgewertet, welcher dann die Differenz der Frequenzen anzeigt. Zur Kopplung zwischen Sonde und Röhre werden, wie bereits erwähnt, Acryl-Prismen verwendet. Diese liegen in drei Varianten vor, welche an die verschiedenen Durchmesser der Röhren angepasst sind. Zusätzlich wird ein Ultraschall-Kopplungsgel verwendet. In Abbildung 1 ist ein Acryl-Prisma mit den drei Prismenwinkeln zu sehen.

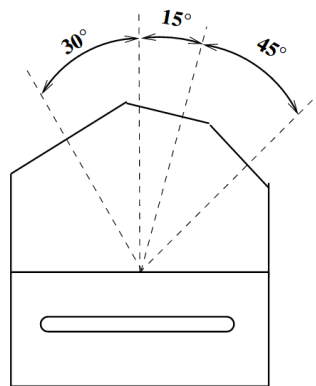


Abbildung 1: Querschnitt eines Prismas. [TUD17]

Für die Phantomflüssigkeit, die Prismen und die Röhren sind die in Tabelle 1 stehenden Werte gegeben.

Tabelle 1: Technische Vorgaben.

Phantomflüssigkeit	1,15 g/cm ³	Dichte ρ
	1800 m/s	Schallgeschwindigkeit c_L
	12 mPa s	Viskosität η
Prismen	2700 m/s	Schallgeschwindigkeit c_P
	30,7 mm	Länge der Vorlaufstrecke l
Röhren	Innendurchmesser	Außendurchmesser
1	7 mm	10 mm
2	10 mm	15 mm
3	16 mm	20 mm

3.2 Versuchsablauf

Zuerst werden verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten bestimmt. Dazu werden für die drei Röhren, mit den drei Prismenwinkeln, für fünf verschiedene Pumpleistungen (30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 70 %) die durch den Doppler-Effekt entstehenden Frequenzdifferenzen gemessen. Es werden also 45 Messwerte genommen. Für diese Geschwindigkeitsmessung ist am Ultraschallgenerator das Sample Volume auf Large zu stellen. Aus den Differenzen wird dann die Strömungsgeschwindigkeit bestimmt.

Im zweiten Teil des Versuchs wird das Strömungsprofil der mittleren/zweiten Röhre (10 mm Innendurchmesser) unter zwei verschiedenen Pumpleistungen (45,2 %, 70 %) vermessen. An dem Prisma wird dabei immer der Winkel 15° verwendet. Zum Einstellen der Messtiefe wird an dem Generator das Sample Volume auf Small gestellt. Anschließend wird für Messtiefen von $12\mu\text{s}$ bis $19,5\mu\text{s}$ in $0,5\mu\text{s}$ Schritten die Frequenzdifferenz und die Streuintensität gemessen.

4 Auswertung

4.1 Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit für die Dopplerwinkel.

Um die Strömungsgeschwindigkeit zu bestimmen, wird (2) genutzt. Mit (3) folgt für die Dopplerwinkel α mit $c_L = 1800$ m/s und $c_P = 2700$ m/s. Damit folgen die Ergebnisse

θ	α
15°	80.1°
30°	70.5°
60°	54.7°

Tabelle 2: Dopplerwinkel α zu den vordefinierten Einfallswinkeln θ .

für die drei Dopplerwinkel mit $\nu_0 = 2$ MHz und $c = 1800$ m/s mit dem jeweils passendem Diagramm.

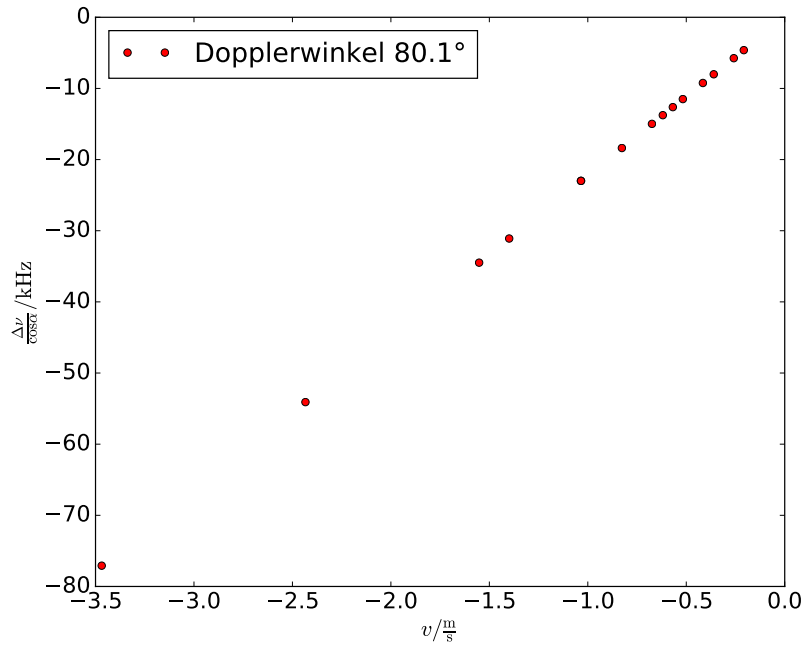


Abbildung 2: Die Frequenzverschiebung geteilt durch den cos des Dopplerwinkels 80.1° aufgetragen gegen die Geschwindigkeit.

Pumpleistung / %	$\Delta\nu$ / Hz	v / m/s	Rohrdicke mm
30	49	0.21	16
40	61	0.26	16
50	98	0.42	16
60	122	0.52	16
70	146	0.62	16
30	85	0.36	10
40	134	0.57	10
50	195	0.83	10
60	244	1.04	10
70	330	1.40	10
30	159	0.67	7
40	244	1.04	7
50	366	1.56	7
60	574	2.43	7
70	818	3.47	7

Tabelle 3: Die Pumpleistung, die Frequenzverschiebung (aus den Messungen) und die Geschwindigkeit aus (2) berechnet für einen Einfallswinkel von 15° .

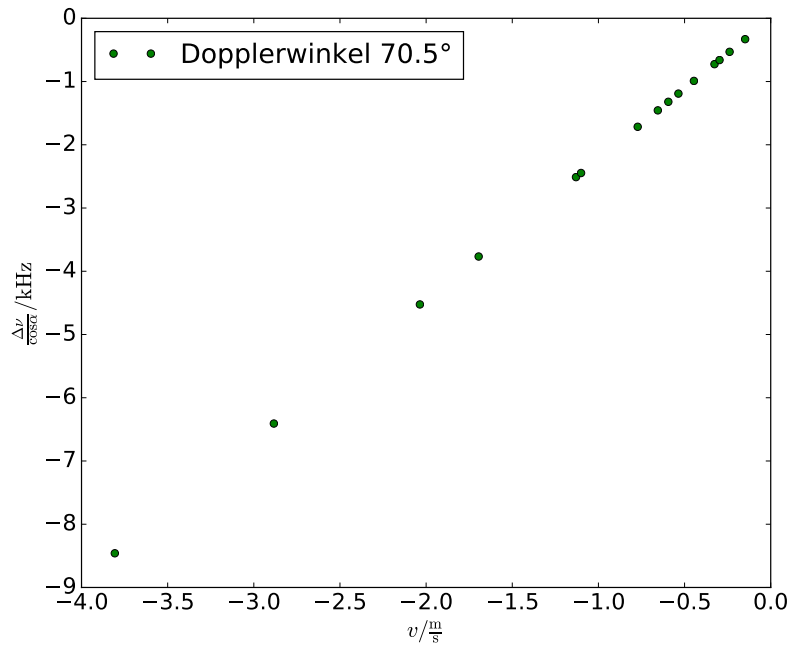


Abbildung 3: Die Frequenzverschiebung geteilt durch den cos des Dopplerwinkels 70.5° aufgetragen gegen die Geschwindigkeit.

Pumpleistung / %	$\Delta\nu$ / Hz	v / m/s	Rohrdicke mm
30	-61	0.15	16
40	-98	0.24	16
50	-134	0.33	16
60	-183	0.45	16
70	-244	0.59	16
30	-122	0.30	10
40	-220	0.54	10
50	-317	0.77	10
60	-464	1.13	10
70	-696	1.70	10
30	-269	0.66	7
40	-452	1.10	7
50	-836	2.04	7
60	-1184	2.88	7
70	-1563	3.81	7

Tabelle 4: Die Pumpleistung, die Frequenzverschiebung (aus den Messungen) und die Geschwindigkeit aus (2) berechnet für einen Einfallswinkel von 30° .

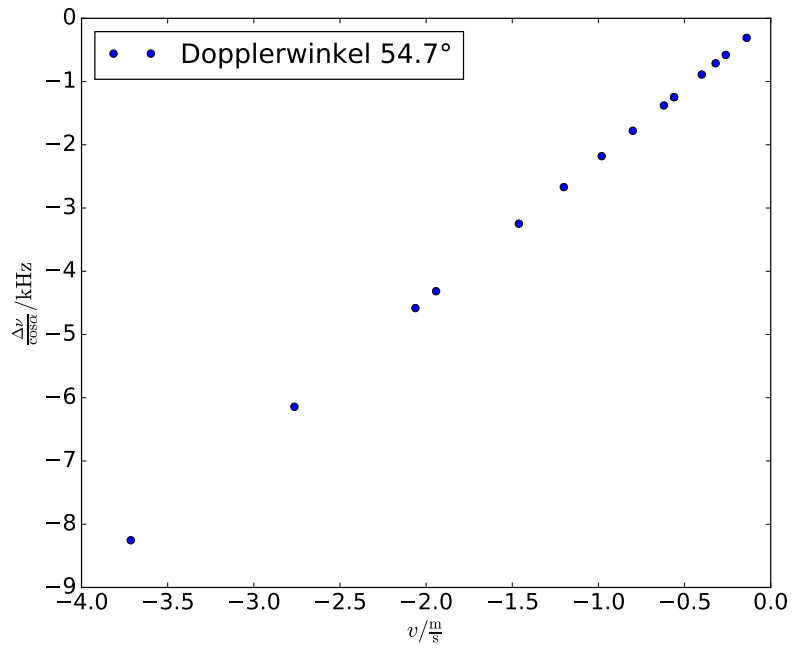


Abbildung 4: Die Frequenzverschiebung geteilt durch den cos des Dopplerwinkels 54.7° aufgetragen gegen die Geschwindigkeit.

Pumpleistung / %	$\Delta\nu$ / Hz	v / m/s	Rohrdicke mm
30	85	0.14	16
40	159	0.26	16
50	244	0.40	16
60	342	0.56	16
70	488	0.80	16
30	195	0.32	10
40	378	0.62	10
50	598	0.98	10
60	891	1.46	10
70	1184	1.94	10
30	342	0.56	7
40	732	1.20	7
50	1257	2.06	7
60	1685	2.76	7
70	2264	3.71	7

Tabelle 5: Die Pumpleistung, die Frequenzverschiebung (aus den Messungen) und die Geschwindigkeit aus (2) berechnet für einen Einfallswinkel von 60° .

4.2 Bestimmung der Streuintensität und der Momentangeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Messtiefe

Zur Bestimmung der Momentangeschwindigkeit wird (1) genutzt mit $\alpha = 80.1^\circ$ und dem gemessenen Wert für $\Delta\nu$. Für ν_0 wird 2 MHz und für c 1800 m/s verwendet. Für die Messtiefe wird die Umrechnung $4\mu\text{s} = 6\text{ mm}$ verwendet. Im Folgenden sind die Ergebnisse als Tabelle und Diagramm aufgelistet.

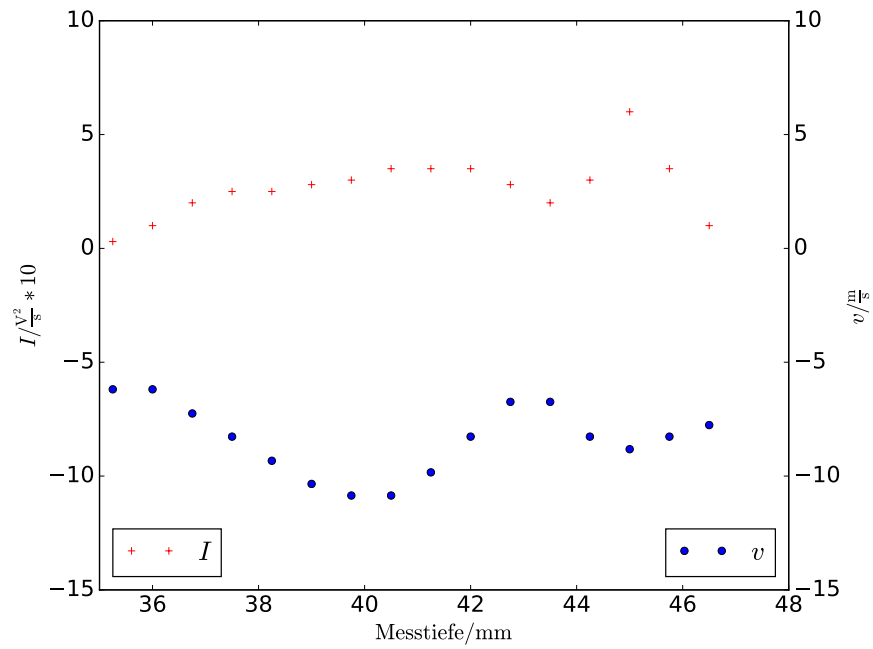


Abbildung 5: Momentangeschwindigkeit und Streuintensität in Abhängigkeit von der Messtiefe aufgetragen.

Messtiefe / mm	$v / \text{m/s}$	$I / \text{V}^2/\text{s} \cdot 1000$
30	6.19	30
30.75	6.19	100
31.5	7.25	200
32.25	8.27	250
33	9.33	250
33.75	10.35	280
34.5	10.86	300
35.25	10.86	350
36	9.84	350
36.75	8.27	350
37.5	6.74	280
38.25	6.74	200
39	8.27	300
39.75	8.82	600
40.5	8.27	350
41.25	7.76	100

Tabelle 6: Messtiefe, Momentangeschwindigkeit v und Streuintensität I .

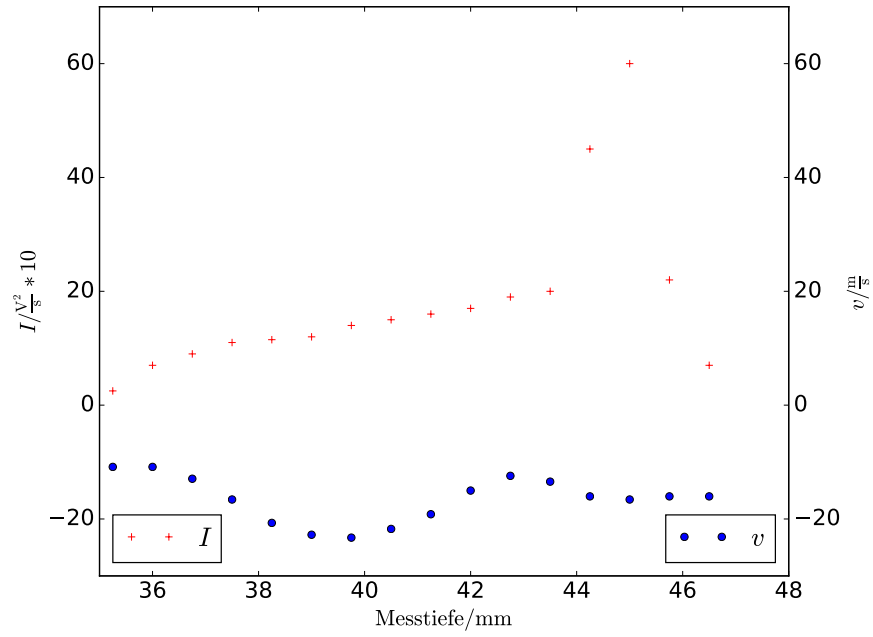


Abbildung 6: Momentangeschwindigkeit und Streuintensität in Abhängigkeit von der Messtiefe aufgetragen.

Messtiefe / mm	$v / \text{m/s}$	$I / \text{V}^2/\text{s} \cdot 1000$
30	10.86	250
30.75	10.86	700
31.5	12.93	900
32.25	16.58	1100
33	20.69	1150
33.75	22.77	1200
34.5	23.28	1400
35.25	21.75	1500
36	19.17	1600
36.75	15.01	1700
37.5	12.42	1900
38.25	13.44	2000
39	16.03	4500
39.75	16.60	6000
40.5	16.03	2200
41.25	16.03	700

Tabelle 7: Messtiefe, Momentangeschwindigkeit v und Streuintensität I .

5 Diskussion

Aus den Diagrammen 2 bis 4 folgt, dass ein linearer Zusammenhang zwischen dem Verhältnis aus Frequenzverschiebung und dem Cosinus des Dopplerwinkels und der Strömungsgeschwindigkeit vorliegt. Außerdem stimmen die Strömungsgeschwindigkeiten bei den Einstrahlwinkeln 30° und 60° mit einer maximalen Abweichung von $0,33 \text{ m/s}$ gut überein. Die Werte für den Einstrahlwinkel von 15° weichen etwas stärker ab. Hier liegt die maximale Abweichung bei $0,48 \text{ m/s}$ im Vergleich zu der Messung bei 30° bzw. bei $0,50 \text{ m/s}$ unter einem Winkel von 60° . Aus Abbildung 5 lässt sich erkennen, dass die Geschwindigkeit in der Mitte des Rohrs ein Maximum hat und zum Rand hin abnimmt, was zu erwarten war, da bei laminarer Strömung die Reibung der Wände die Strömung am Rand bremst. Ähnliches gilt für Abbildung 6. Wobei das Maximum sich bei einer größeren Pumpleistung deutlicher hervorhebt. Die negativen Vorzeichen sind der Messrichtung verschuldet und spiegeln sich schon in den Frequenzdifferenzen wieder. Die Streuintensität in Abbildung 5 hat einen proportionalen Zusammenhang zur Geschwindigkeit. Die Streuintensität in Abbildung 6 verläuft bis zu einer Messtiefe von 44 mm linear. Danach gibt es bei beiden einen Ausschlag, der darauf zurück zu führen ist, dass das Rohr zuende ist und damit Störungen die Messung beeinflussen. Eine mögliche Fehlerquelle ist eine nicht zu 100% korrigierbare Blockade des Flüssigkeitsstroms durch Knicke in den nicht starren Kurvenstücken. Außerdem lässt sich sagen, dass sich das Ablesen der vom Computer angezeigten Werte bei beiden Versuchsteilen als schwierig gestaltet hat, da die Werte teilweise stark schwankten. Dadurch sind systematische Fehler nicht auszuschließen. Abschließend lässt sich feststellen, dass der Versuch insgesamt gute Ergebnisse geliefert hat, während der zweite Teil mit einigen systematischen Fehlern belastet ist.

Literatur

- [Hun07] 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/>.
- [J+] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u. a. *SciPy: Open source scientific tools for Python*. Version 0.16.0. URL: <http://www.scipy.org/>.
- [Leb] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [Oli07] 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/>.
- [TUD17] TU-Dortmund. *US3 : Doppler-Sonographie*. 3. Juli 2017. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/DopplerSonogr.pdf>.