

VERSUCH US3

Dopplersonographie

Fabian Koch
fabian3.koch@udo.edu

Tom Rosenstein
tom.rosenstein@udo.edu

Durchführung: 03.07.2018

Abgabe: 10.07.2018

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
3 Durchführung	4
4 Auswertung	5
4.1 Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeiten für verschiedene Rohre, Flussgeschwindigkeiten und Winkel	5
4.2 Bestimmung des Geschwindigkeitsprofils in einer Röhre	8
5 Diskussion	10
Literatur	11

1 Zielsetzung

2 Theorie

Bei Schallwellen mit Frequenzen im Bereich von 20 kHz bis 1 GHz handelt es sich um Ultraschall. Dieser wird genutzt um Informationen über nicht einsehbare Strukturen oder Flüsse zu erhalten, ohne das Objekt, welches diese beinhaltet, zu beschädigen. Dies ist durch Aussenden eines Ultraschallpulses und Messen der Laufzeit und Frequenz der Reflexion möglich. So kann zum Beispiel die Geschwindigkeit eines Teilchens unter Ausnutzung des Doppler-Effektes bestimmt werden. Dieses Verfahren wird Doppler-Sonographie genannt. Der Doppler-Effekt tritt auf wenn sich die Quelle und/oder der Beobachter einer Welle relativ zueinander bewegen. Falls Quelle oder Beobachter ruhen, verschiebt sich die Frequenz ν_0 zu einer höheren Frequenz ν_h , falls sich Quelle oder Beobachter auf den jeweils ruhenden Beobachter oder Quelle zu bewegen. Bewegt sich einer vom anderen weg, wird die Frequenz zu einer niedrigeren Frequenz ν_n verschoben. Quantitativ wird dies durch

$$\nu_{h,n} = \frac{\nu_0}{1 \mp \frac{v}{c}} \quad (1)$$

für den ruhenden Beobachter, und

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

für die ruhende Quelle, mit der jeweiligen Geschwindigkeit des bewegten Objektes v und der Ausbreitungsgeschwindigkeit c , beschrieben. Wird nun ein Fluss in einem Gefäß mit

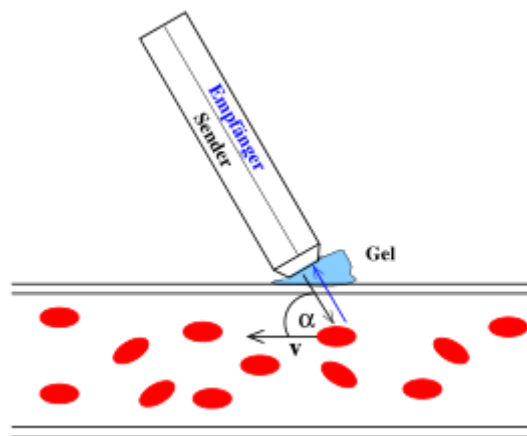


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Doppler-Sonographie Messung an einem Blutgefäß.[1]

einem Gemisch aus kleinen Festkörpern und Flüssigkeit, wie zum Beispiel Blut, untersucht,

lässt sich mit den in Abbildung 1 dargestellten geometrischen Zusammenhängen und unter Berücksichtigung der doppelten Doppler-Verschiebung durch das Reflektieren der Welle am bewegten Körper folgender Ausdruck für die Änderung der Frequenz herleiten:

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

Zur genauen Untersuchung des Flusses in einem Rohr mittels Doppler-Sonographie werden Doppler-Prismen verwendet, welche bauartbedingt eine Untersuchung der Strömung aus verschiedenen Winkeln unter gleichbleibenden Voraussetzungen erlauben. Dabei lässt sich

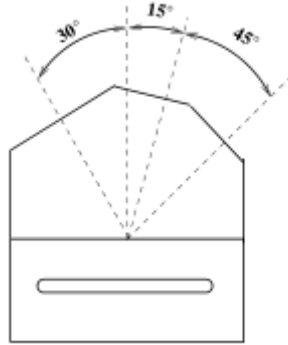


Abbildung 2: Dopplerprisma.[1]

für das in Abbildung 2 dargestellte Prisma folgender Zusammenhang zwischen Prismen- und Dopplerwinkel herleiten:

$$\alpha = 90^\circ - \arcsin\left(\sin(\theta) \cdot \frac{c_L}{c_P}\right). \quad (4)$$

3 Durchführung

Die 2 MHz-Ultraschallsonde wird mit dem Ultraschall Doppler-Generator verbunden. Dieser ist zur Datenaufnahme und Auswertung mit einem Rechner verbunden. Die vom Echoskop aufgenommenen Messwerte werden durch das Programm FlowView ausgewertet und angezeigt.

Untersucht wird eine Anordnung von Röhren mit verschiedenen Durchmessern, die mit einer steuerbaren Pumpe verbunden sind. Das Flüssigkeitsgemisch besteht dabei aus Wasser, Glycerin und Glaskugeln. Die Viskosität ist so beschaffen, dass sich für die im Messbereich enthaltenen Pumpfrequenzen laminare Strömungen ausbilden. Die drei Messstellen haben die Innendurchmesser 7 mm, 10 mm 16 mm. Um konsistente Messungen mit verschiedenen Winkeln vornehmen zu können werden Dopplerprismen (s.h. Abbildung 2) mit einem Koppelmittel präpariert und auf die Messstellen gesetzt.

Um die Strömungsgeschwindigkeit bestimmen zu können, wird für fünf Pumpfrequenzen/ Spannungen an jeder Messstation für alle drei Dopplerwinkel die Frequenzverschiebung

$\Delta\mu$ gemessen. Dafür muss in dem Programm FlowView das Sample Volume auf Large gestellt werden. Anschließend soll das Strömungsprofil der Flüssigkeit in dem 10 mm Schlauch bestimmt werden. Die Messung erfolgt an dem Prismenwinkel von 15° . Dafür wird das Sample Volume auf Small gestellt. Am Ultraschall Doppler-Generator kann mit dem Regler Depth die Messtiefe eingestellt werden. Um den Schlauch einmal vollständig erfassen zu können, wird die Messung von 12 bis $19\mu\text{s}$ durchgeführt. Dies wird für Pumpleistungen von 70 % und 30 % durchgeführt.

4 Auswertung

4.1 Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeiten für verschiedene Rohre, Flussgeschwindigkeiten und Winkel

Zunächst werden nach Gleichung (4) die Dopplerwinkel α_i für die Prismenwinkel 15° , 30° und 60° berechnet:

$$\begin{aligned}\alpha_{15} &= 80,06^\circ \\ \alpha_{30} &= 70,53^\circ \\ \alpha_{60} &= 54,74^\circ.\end{aligned}$$

Dabei wurden die Schallgeschwindigkeiten $c_P = 2700\text{ m/s}$ und $c_L = 1800\text{ m/s}$ aus [1] entnommen. Zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeiten aus den in 1, 2 und 3 aufgetragenen Messdaten wird Gleichung (3) nach der Geschwindigkeit v umgestellt:

$$v = \frac{\Delta\nu c}{2\nu_0 \cos(\alpha)}. \quad (5)$$

Nun werden mit dieser Gleichung, $\nu_0 = 2\text{ MHz}$, $c = c_L$ und den zuvor bestimmten α_i die Strömungsgeschwindigkeiten für die verschiedenen Rohre und Winkel berechnet. Dann werden die Geschwindigkeiten der verschiedenen Winkel mit

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (6)$$

gemittelt und der entsprechende Fehler mit

$$\Delta\bar{x} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (7)$$

berechnet. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 1, 2 und 3 dargestellt.

Nun wird für einen Prismenwinkel von 30° bei jedem Rohr $\Delta\nu / \cos(\alpha)$ gegen v aufgetragen. Dies ist in den Abbildungen 3, 4 und 5 dargestellt.

Tabelle 1: Messdaten und -ergebnisse für das 7 mm-Rohr.

$v_{\text{Fluss}} / \%$	$\Delta\nu_{15} / \text{Hz}$	$v_{15} / \text{m/s}$	$\Delta\nu_{30} / \text{Hz}$	$v_{30} / \text{m/s}$	$\Delta\nu_{60} / \text{Hz}$	$v_{60} / \text{m/s}$	$\bar{v} / \text{m/s}$
43	269	0,70	464	0,63	830	0,65	$0,66 \pm 0,02$
46	269	0,70	476	0,64	874	0,68	$0,68 \pm 0,02$
49	305	0,80	525	0,71	1019	0,79	$0,77 \pm 0,03$
54	391	1,02	690	0,93	1260	0,98	$0,98 \pm 0,03$
60	488	1,27	806	1,09	1636	1,28	$1,21 \pm 0,06$

Tabelle 2: Messdaten und -ergebnisse für das 10 mm-Rohr.

$v_{\text{Fluss}} / \%$	$\Delta\nu_{15} / \text{Hz}$	$v_{15} / \text{m/s}$	$\Delta\nu_{30} / \text{Hz}$	$v_{30} / \text{m/s}$	$\Delta\nu_{60} / \text{Hz}$	$v_{60} / \text{m/s}$	$\bar{v} / \text{m/s}$
43	146	0,38	220	0,30	378	0,29	$0,32 \pm 0,03$
46	159	0,41	256	0,35	427	0,33	$0,36 \pm 0,03$
49	159	0,41	281	0,38	476	0,37	$0,39 \pm 0,01$
54	183	0,48	330	0,45	586	0,46	$0,46 \pm 0,01$
60	238	0,62	409	0,55	757	0,59	$0,59 \pm 0,02$

Tabelle 3: Messdaten und -ergebnisse für das 16 mm-Rohr.

$v_{\text{Fluss}} / \%$	$\Delta\nu_{15} / \text{Hz}$	$v_{15} / \text{m/s}$	$\Delta\nu_{30} / \text{Hz}$	$v_{30} / \text{m/s}$	$\Delta\nu_{60} / \text{Hz}$	$v_{60} / \text{m/s}$	$\bar{v} / \text{m/s}$
43	61	0,16	110	0,15	183	0,14	$0,15 \pm 0,00$
46	73	0,19	122	0,16	183	0,14	$0,17 \pm 0,01$
49	85	0,22	134	0,18	208	0,16	$0,19 \pm 0,02$
54	98	0,26	159	0,21	269	0,21	$0,23 \pm 0,01$
60	110	0,29	183	0,25	317	0,25	$0,26 \pm 0,01$

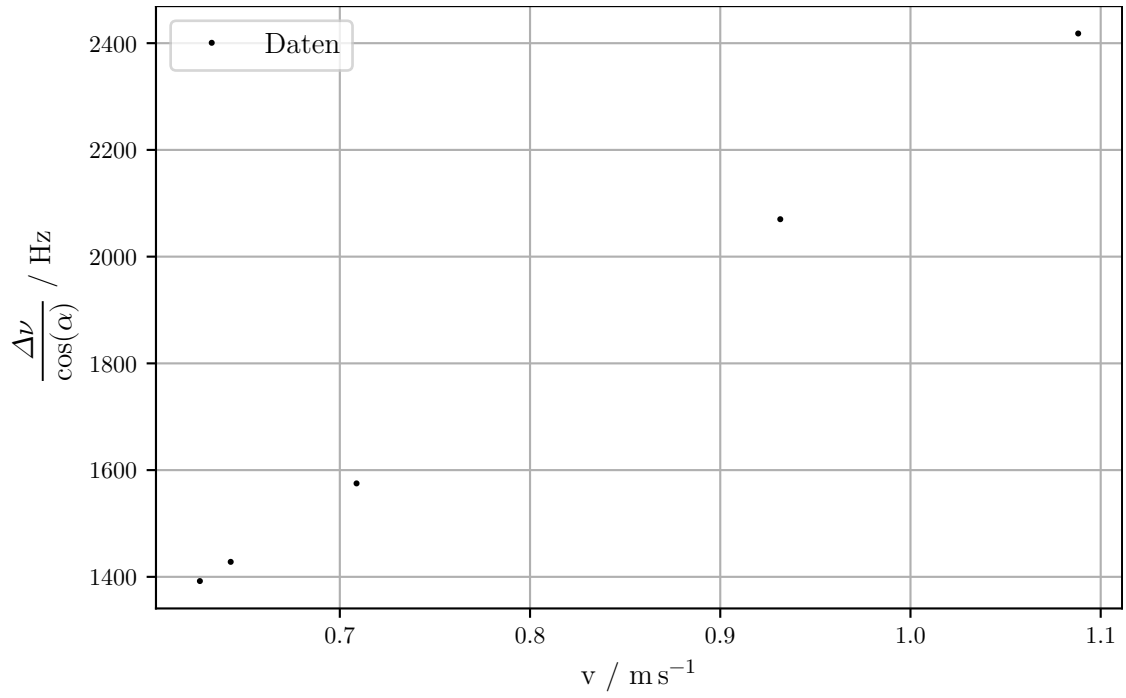


Abbildung 3: Grafische Darstellung der Daten für das 7 mm-Rohr bei einem Winkel von 30°.

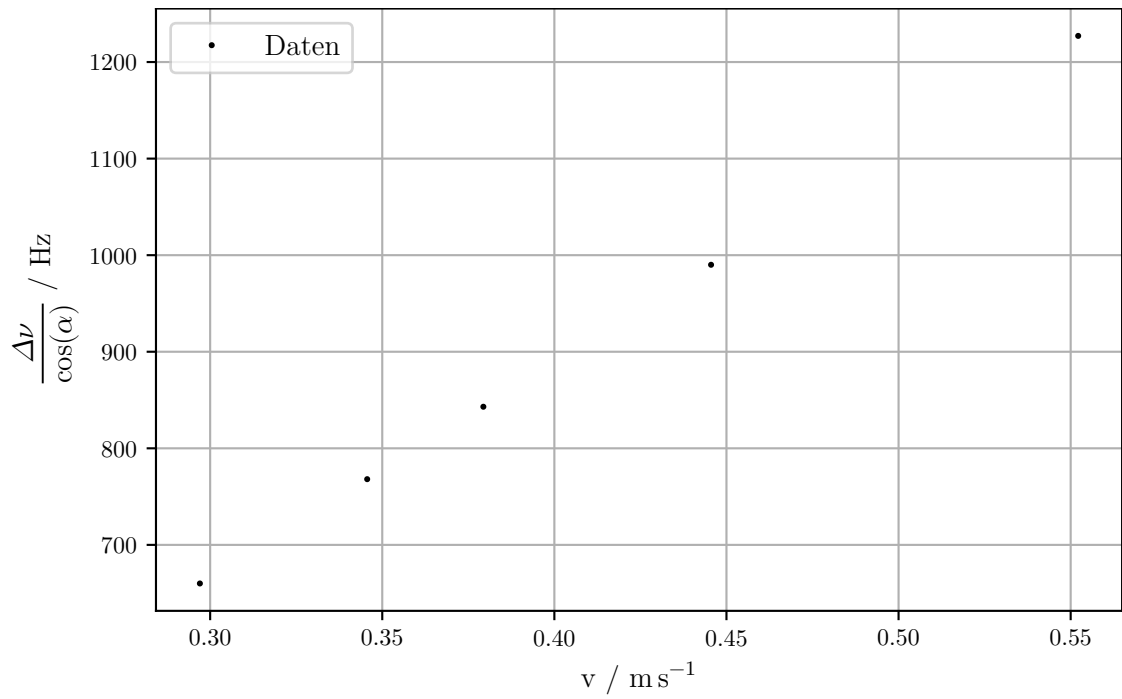


Abbildung 4: Grafische Darstellung der Daten für das 10 mm-Rohr bei einem Winkel von 30°.

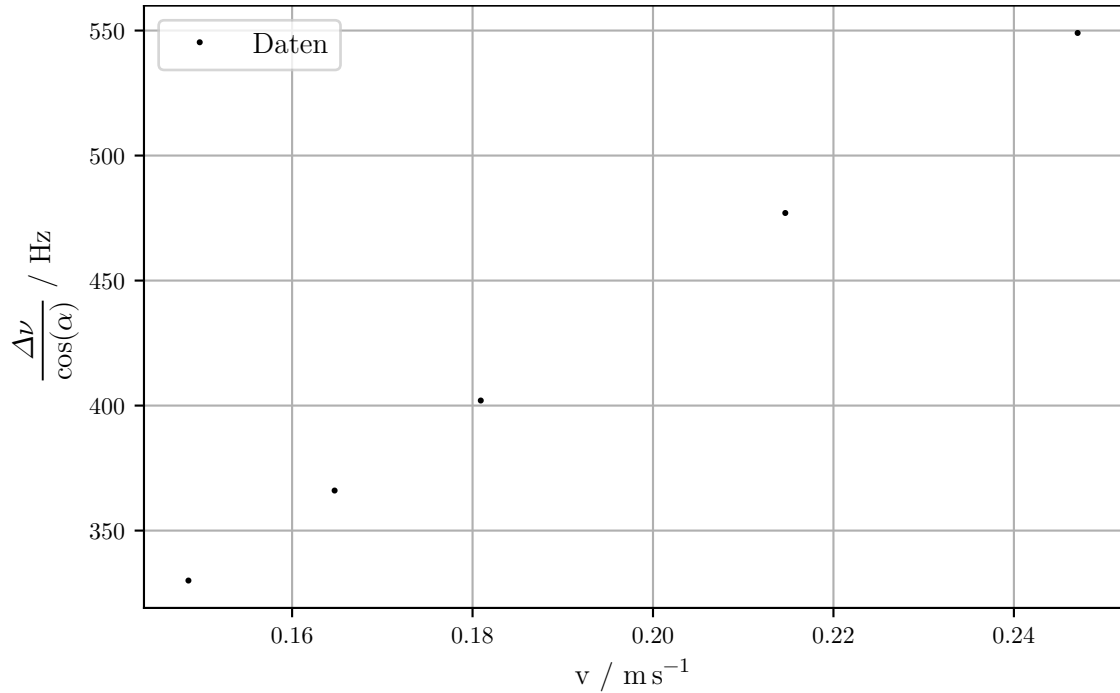


Abbildung 5: Grafische Darstellung der Daten für das 16 mm-Rohr bei einem Winkel von 30° .

4.2 Bestimmung des Geschwindigkeitsprofils in einer Röhre

Die Messwerte zur Bestimmung des Geschwindigkeitsprofils sind in Tabelle 4 dargestellt. Die Geschwindigkeiten wurden mit Gleichung (5) berechnet. Die Tiefe im Rohr z wird mit den aus [1] entnommenen Umrechnungen zwischen μs und mm , sowie der Vorlaufstrecke im Prisma von 30,7 mm durch folgende Formel bestimmt:

$$z = \frac{3}{2} \cdot \left(t - 30,7 \cdot \frac{2}{5} \right). \quad (8)$$

Die entsprechenden Plots des Geschwindigkeitsprofils mit entsprechenden Streuintensitäten ist für eine Pumpleistung von 70 % in Abbildung 8 und für eine Pumpleistung von 45 % in Abbildung 7 dargestellt.

Tabelle 4: Messdaten und -ergebnisse für das Geschwindigkeitsprofil des 10 mm-Rohr.

$t / \mu\text{s}$	z / mm	$\Delta f_{70} / \text{Hz}$	$v_{70} / \text{m/s}$	$I_{\text{Streu},70} / \%$	$\Delta f_{45} / \text{Hz}$	$v_{45} / \text{m/s}$	$I_{\text{Streu},45} / \%$
12,0	−0,04	171	0,45	9,5	110	0,29	10,0
12,5	0,71	232	0,60	6,7	122	0,32	9,8
13,0	1,46	293	0,76	5,8	134	0,35	7,5
13,5	2,21	317	0,83	4,7	159	0,41	6,0
14,0	2,96	391	1,02	3,5	183	0,48	4,2
14,5	3,71	427	1,11	3,2	195	0,51	4,1
15,0	4,46	452	1,18	2,8	195	0,51	3,0
15,5	5,21	439	1,14	3,1	183	0,48	4,4
16,0	5,96	378	0,99	3,3	159	0,41	6,0
16,5	6,71	293	0,76	4,8	134	0,35	6,0
17,0	7,46	208	0,54	7,0	98	0,26	9,6
17,5	8,21	171	0,45	10,4	98	0,26	12,2
18,0	8,96	195	0,51	13,5	110	0,29	10,0
18,5	9,71	269	0,70	10,3	134	0,35	12,2
19,0	10,46	269	0,70	7,8	134	0,35	9,5

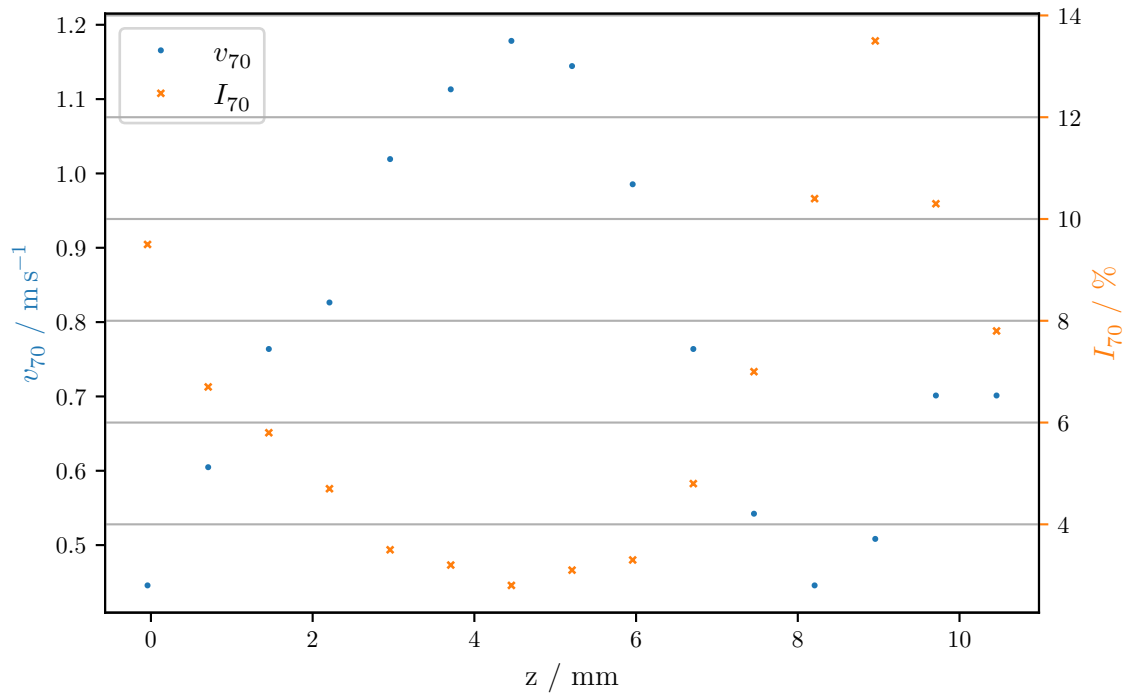


Abbildung 6: Grafische Darstellung der Daten des Geschwindigkeitsprofils bei einer Pumpleistung von 70 %.

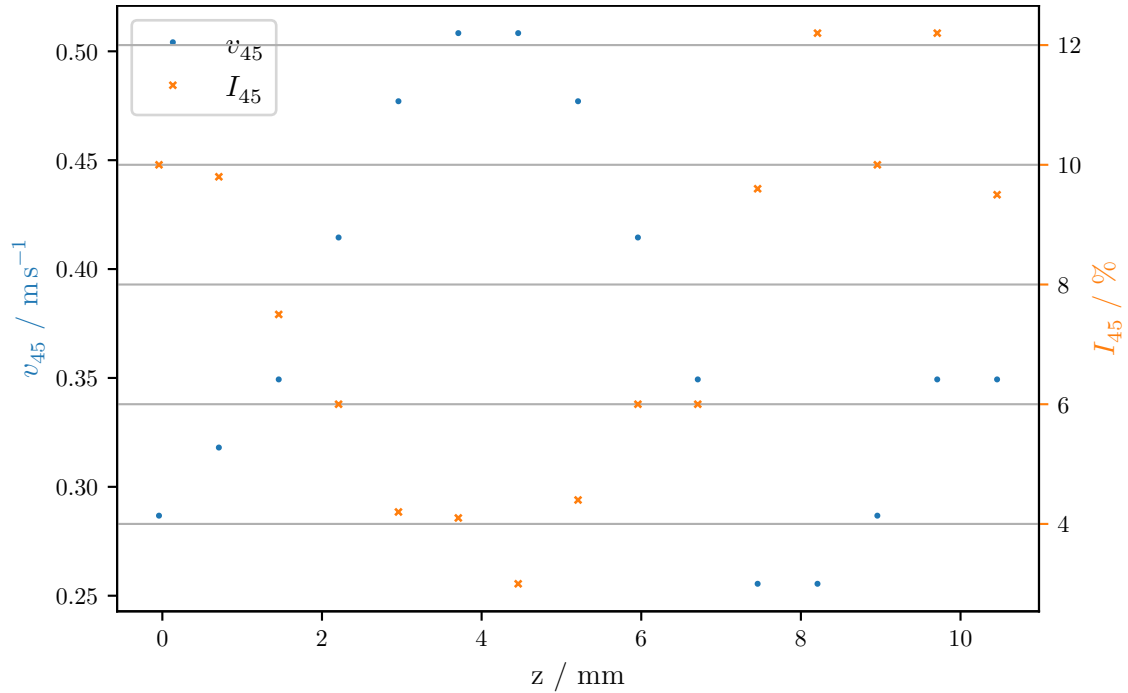


Abbildung 7: Grafische Darstellung der Daten des Geschwindigkeitsprofils bei einer Pumpleistung von 45 %.

5 Diskussion

Die in den Abbildungen 3, 4 und 5 dargestellten Kurven zeigen eine lineare Abhängigkeit zwischen der Frequenzverschiebung durch den Kosinus des Dopplerwinkels im Vergleich zur bestimmten Strömungsgeschwindigkeit. Das heißt, dass bei geringeren Strömungsgeschwindigkeiten eine geringere Frequenzverschiebung stattfindet. Werden die Frequenzverschiebungen untereinander verglichen, so ergibt sich, dass die Messbereiche für kleinere Rohrdurchmesser größer sind als für die größeren Rohrdurchmesser.

Die in den Abbildungen 8 und 7 dargestellten Strömungsprofile zeigen die typischen Geschwindigkeitsverteilungen, wie man sie von einer laminaren Strömung erwarten würde. Ein Vergleich zwischen einer laminaren und turbulenten Strömung ist in Abbildung ?? dargestellt.

Es fällt allerdings auf, dass die Messwerte ab einer Eindringtiefe von 8 mm nicht mehr dem zu erwartendem Profil entsprechen. Dies lässt sich damit erklären, dass diese Werte nicht mehr innerhalb des Rohres sind. Die Streuintensität verhält sich entgegengesetzt zu den Geschwindigkeiten und ist für hohe Geschwindigkeiten geringer. Dies geht darauf zurück, dass bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten die Frequenzverschiebungen größer sind. Das Spektrum der Frequenzverschiebungen ist breiter und Abweichungen vom Durschnitt weniger signifikant, die Streuintensität also geringer.

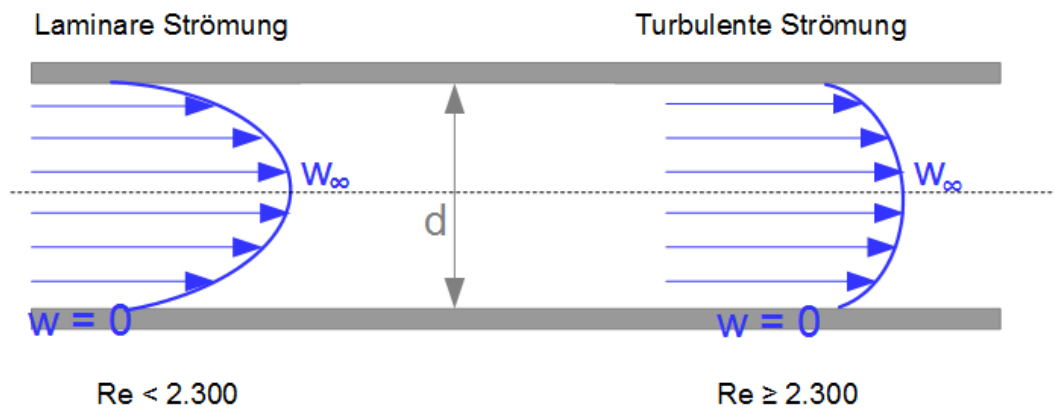


Abbildung 8: Vergleich zwischen turbulenter und laminarer Strömung [2]

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Anleitung zum Versuch US3: Dopplersonographie*. 2018.
- [2] *Kreisförmige Rohrströmungen*. URL: <https://www.ingenieurkurse.de/waermeuebertragung-waermeleitung/erzwungene-konvektion/rohrstroemungen-kreisfoermig.html> (besucht am 07.07.2018).