

US 3

Doppler-Sonographie

Timo Gräßer
timo.graesser@udo.edu

Jasper Karl Lammering
jasper.lammering@udo.edu

Durchführung: 10.5.16

Abgabe: 17.5.16

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1. Theorie	3
1.1. Fehlerrechnung	3
1.2. Einleitung und Zielsetzung	3
1.3. Der Dopplereffekt	3
1.4. Erzeugung von Ultraschallwellen	4
2. Durchführung	4
2.1. Vorbereitungsaufgabe	4
2.2. Versuchaufbau	5
2.3. Technische Daten	6
2.4. Messprogramm	6
2.4.1. Strömungsgeschwindigkeiten als Funktion des Dopplerwinkels . . .	6
2.4.2. Strömungsprofil der Dopplerflüssigkeit	6
3. Auswertung	7
3.1. Strömungsgeschwindigkeit	7
3.2. Strömungsprofil	10
4. Diskussion	12
4.1. Strömungsgeschwindigkeit	12
4.2. Strömungsprofil	12
Literatur	13
A. Kopie der Originaldaten	13

1. Theorie

1.1. Fehlerrechnung

Für die Fehlerfortpflanzung bei Gleichungen mit N fehlerbehafteten Größen wird jeweils die Formel zur Gaußschen Fehlerfortpflanzung

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i} \sigma_i \right)^2} \quad (1)$$

mit der jeweiligen Funktion $f(x_i)$, den Messgrößen x_i und den zugehörigen Fehlern σ_i verwendet. Zur Berechnung des arithmetischen Mittels von N Messwerten wird jeweils die Formel

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

mit den Messwerten x_i benutzt. die Standardabweichung des Mittelwerts wird jeweils mit der Gleichung

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

mit den N Messwerten x_i berechnet.

1.2. Einleitung und Zielsetzung

Das menschliche Gehör ist in der Lage, Frequenzen von ca. 16 Hz bis ca. 20 kHz wahrzunehmen. Frequenzen unter dieser Hörschwelle werden Infraschall genannt und solche, die über der Hörschwelle und unter 1 GHz sind, werden Ultraschall genannt. Frequenzen über 1 GHz werden als Hyperschall bezeichnet. In diesem Versuch sollen mit Hilfe von Ultraschallwellen Strömungsgeschwindigkeiten in einem Schlauch untersucht werden.

1.3. Der Dopplereffekt

Der sogenannte Dopplereffekt tritt im Allgemeinen auf, wenn sich eine Schallquelle und ein Beobachter relativ zueinander bewegen. Die ausgesendeten Schallwellen der Frequenz ν_0 , werden je nach Geschwindigkeit in die Länge gezogen oder gestaucht, sodass die vom Beobachter wahrgenommenen Frequenzen verschoben sind. Mit der Formel

$$\nu_{q,+/-} = \frac{\nu_0}{1 + v_{q,+/-}} \quad (4)$$

berechnet sich diese verschobene Frequenz $\nu_{q,+/-}$, wenn die Quelle sich entweder mit $v_{q,+}$ zum Beobachter bewegt, oder mit $-v_{q,-}$ vom Beobachter entfernt. Wenn die Quelle sich

in Ruhe befindet und der Beobachter sich mit $v_{b,+}$ zur Quelle oder mit $-v_{b,-}$ von der Quelle wegbewegt, wird die verschobene Frequenz $\nu_{b,+/-}$ mit

$$\nu_{b,+/-} = \nu_0 \left(1 + \frac{v_{b,+/-}}{c} \right) \quad (5)$$

berechnet. Der Dopplereffekt kann ausgenutzt werden, um Strömungsgeschwindigkeiten, zum Beispiel in einem Blutgefäß, zu bestimmen. Mit einem Schallsender wird dabei, wie in Abbildung 1 dargestellt, ein Signal an der Strömung ausgesendet und dann nach der Reflektion wieder am Sender empfangen. Bei diesem sogenannten Impuls-Echo-Verfahren berechnet sich die Frequenzverschiebung mit

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

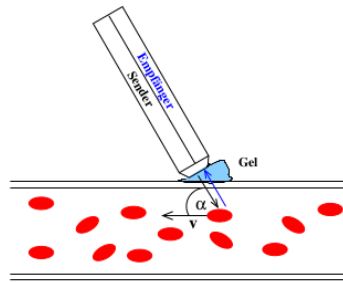


Abbildung 1: Skizze zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit mit dem Impuls-Echo-Verfahren. [1]

1.4. Erzeugung von Ultraschallwellen

Ultraschallwellen können durch den sogenannten reziproken piezo-elektrischen Effekt erzeugt werden. Dabei wird ein piezo-elektrischer Kristall durch ein elektrisches Wechselfeld, das in Richtung einer der polaren Achsen des Kristalls steht, angeregt und beginnt zu schwingen und Ultraschallwellen auszusenden. Der Kristall kann außerdem auch als Schallempfänger genutzt werden, da er auch durch Ultraschallwellen angeregt werden kann.

2. Durchführung

2.1. Vorbereitungsaufgabe

Mit Formel (7) werden aus den Prismenwinkeln

$$\theta_1 = 15^\circ$$

$$\theta_2 = 30^\circ$$

$$\theta_3 = 60^\circ$$

die Dopplerwinkel

$$\alpha_1 = 80.06^\circ$$

$$\alpha_2 = 70.53^\circ$$

$$\alpha_3 = 54.74^\circ$$

bestimmt.

2.2. Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau besteht aus einem Schlauchsystem, durch welches mit einer Zentrifugalpumpe eine Dopplerphantomflüssigkeit, bestehend aus Wasser, Glycerin und Glaskugeln, gepumpt wird. Das Schlauchsystem ist ein Kreislauf mit drei verschiedenen Rohrdicken und somit auch drei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten. Mit der Ultraschallsonde und mehreren Doppler-Prismen für die verschiedenen Schlauchdurchmesser können mit Hilfe eines Ultraschall-Doppler-Generators Schallfrequenzunterschiede und Intensitäten gemessen werden. Dabei muss darauf geachtet werden, dass sich ausreichend Gel zwischen Sonde und Prisma und Prisma und Schlauch befindet, damit die Schallwellen an den Grenzflächen nicht bereits vollständig abgeschirmt werden, bevor sie die Flüssigkeit erreichen. Mit einem Computer werden die Daten aufgenommen und mit Hilfe des Programms *FlowView* analysiert, sodass die Frequenzdifferenz abgelesen werden kann. Bei der Analyse werden die Prismenwinkel mit der Formel

$$\alpha = 90^\circ - \arcsin\left(\sin \theta \frac{c_L}{c_P}\right) \quad (7)$$

umgerechnet, wobei c_L die Schallgeschwindigkeit der Dopplerflüssigkeit und c_P die des Prismas (Acryl) ist. Das Dopplerprisma ist in Abbildung 2 dargestellt.

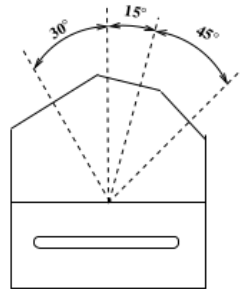


Abbildung 2: Skizze des Dopplerprismas von der Seite. In diesem Versuch wird ein Dopplerprisma mit einem Winkel von 60° statt 45° benutzt. [1]

2.3. Technische Daten

Für den Versuchsaufbau sind folgende technische Daten gegeben:

Dopplerphantomflüssigkeit:

Dichte	$\rho = 1.15 \text{ g cm}^{-3}$
Schallgeschwindigkeit	$c_L = 1800 \text{ m s}^{-1}$
Viskosität	$\eta = 12 \text{ mPa s}$

Dopplerprisma:

Schallgeschwindigkeit	$c_P = 2700 \text{ m s}^{-1}$
Länge der Vorlaufstrecke	$l = 30.7 \text{ mm}$

Strömungsrohre:

Innendurchmesser	$l_I = [7, 10, 16] \text{ mm}$
Außendurchmesser	$l_A = [10, 15, 20] \text{ mm}$

2.4. Messprogramm

2.4.1. Strömungsgeschwindigkeiten als Funktion des Dopplerwinkels

1. Zunächst wird das *SampleVolume* an dem Ultraschallgenerator auf *Large* gestellt.
2. An einem beliebigen Schlauch werden jeweils fünf Frequenzdifferenzmesswerte bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten mit einer Pumpleistung von 40 % bis 70 % pro Winkel aufgenommen. Insgesamt werden also 15 Messwerte aufgenommen, da das Dopplerprisma drei Winkel besitzt.
3. Die Messung wird an den anderen zwei Schläuchen wiederholt, sodass insgesamt weitere 30 Messwerte hinzukommen.

2.4.2. Strömungsprofil der Dopplerflüssigkeit

1. Zunächst wird das *SampleVolume* an dem Ultraschallgenerator auf *Small* gestellt.
2. Die Strömungsleistung an der Zentrifugalpumpe wird auf 70 % gestellt. Das Strömungsprofil wird nur an dem 10 mm-Schlauch, bei einem Dopplerwinkel von 15° , gemessen.
3. Mit dem Regler *Depth* kann die Messtiefe am Ultraschallgenerator eingestellt werden. Es sollen nun für alle 32 möglichen Tiefen, die eingestellt werden können, sowohl Streuintensität, als auch die Frequenzdifferenz aufgenommen werden.
4. Diese Messung wird für eine Pumpleistung von 45 % wiederholt.

3. Auswertung

3.1. Strömungsgeschwindigkeit

Mit Formel (7) wird der zum Prismawinkel θ passende Dopplerwinkel α bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zu sehen.

$\theta / ^\circ$	$\alpha / ^\circ$
15	80.06
30	70.53
60	54.74

Tabelle 1: Prismawinkel θ und der dazu passende Dopplerwinkel α .

Mit den Dopplerwinkeln und Formel (6) wird dann aus den gemessenen Frequenzverschiebungen $\Delta\nu$ an jedem Rohr die Geschwindigkeit bestimmt. Die bestimmten Strömungsgeschwindigkeiten sind dann in den Tabellen 2, 3 und 4 für das jeweilige Rohr mit unterschiedlichem Innendurchmesser d zu sehen.

$v / \%$	$v_{15^\circ} / \text{m s}^{-1}$	$v_{30^\circ} / \text{m s}^{-1}$	$v_{60^\circ} / \text{m s}^{-1}$
40	0.271	0.189	0.160
45	0.334	0.231	0.190
50	0.391	0.277	0.238
55	0.446	0.332	0.291
60	0.514	0.398	0.335

Tabelle 2: Strömungsgeschwindigkeiten v im Rohr mit $d = 16 \text{ mm}$.

$v / \%$	$v_{15^\circ} / \text{m s}^{-1}$	$v_{30^\circ} / \text{m s}^{-1}$	$v_{60^\circ} / \text{m s}^{-1}$
40	0.508	0.462	0.457
45	0.589	0.567	0.528
50	0.701	0.675	0.647
55	0.795	0.759	0.756
60	0.923	0.857	0.857

Tabelle 3: Strömungsgeschwindigkeiten v im Rohr mit $d = 10 \text{ mm}$.

In den folgenden Diagrammen ist nun $\Delta\nu/\cos(\alpha)$ als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit v aufgetragen. Dies wurde in den Abbildungen 3, 4 und 5 aufgetragen und durch eine Ausgleichsgerade der lineare Zusammenhang verdeutlicht.

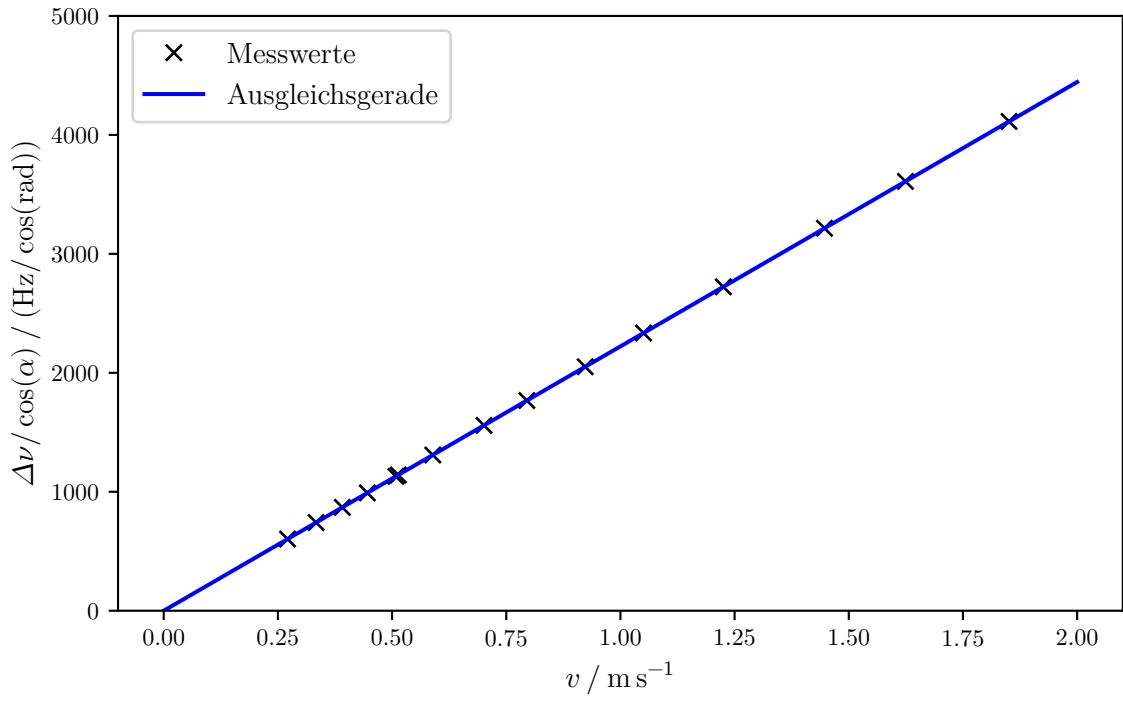


Abbildung 3: Zusammenhang von v und $\Delta\nu / \cos(\alpha)$ bei Dopplerwinkel $\alpha = 15^\circ$.

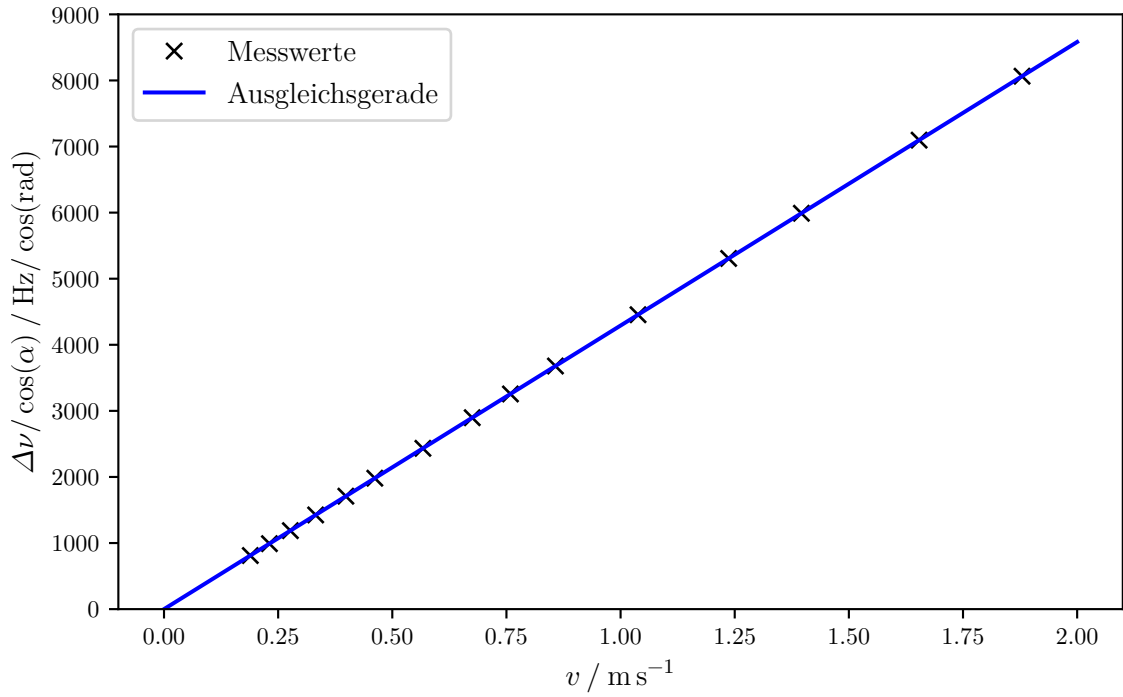


Abbildung 4: Zusammenhang von v und $\Delta\nu / \cos(\alpha)$ bei Dopplerwinkel $\alpha = 30^\circ$.

$v / \%$	$v_{15^\circ} / \text{m s}^{-1}$	$v_{30^\circ} / \text{m s}^{-1}$	$v_{60^\circ} / \text{m s}^{-1}$
40	1.051	1.038	0.893
45	1.225	1.237	1.094
50	1.447	1.396	1.282
55	1.624	1.654	1.477
60	1.851	1.879	1.713

Tabelle 4: Strömungsgeschwindigkeiten v im Rohr mit $d = 7 \text{ mm}$.

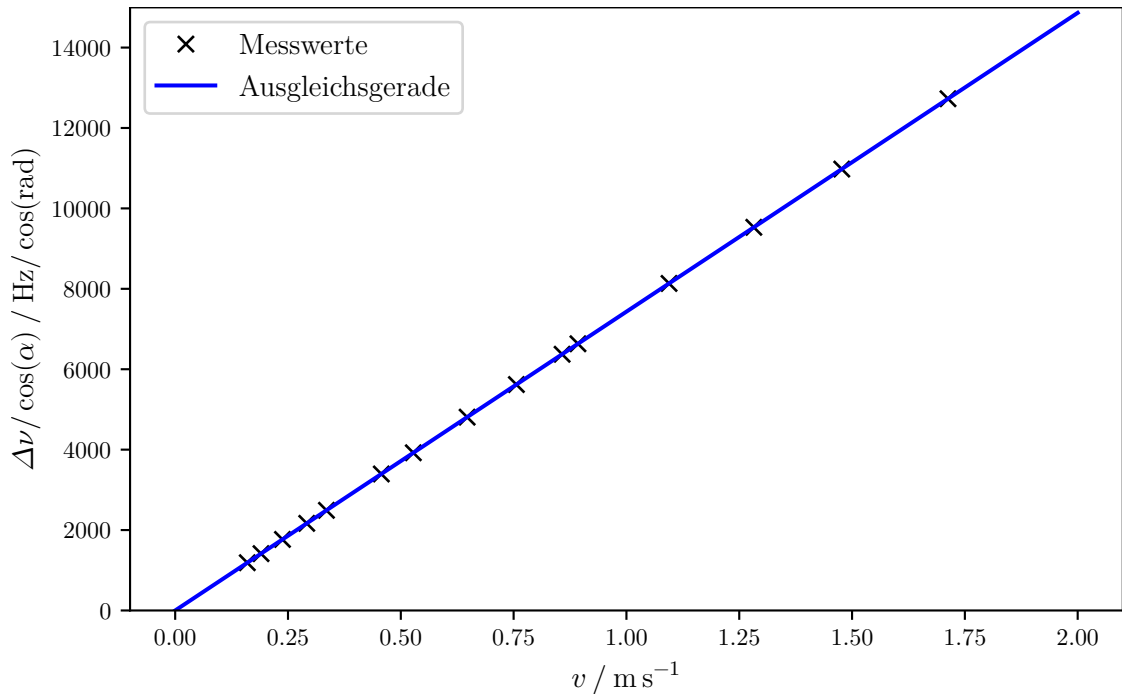


Abbildung 5: Zusammenhang von v und $\Delta\nu / \cos(\alpha)$ bei Dopplerwinkel $\alpha = 60^\circ$.

3.2. Strömungsprofil

Das Strömungsprofil wird am Rohr mit Durchmesser $d = 10$ mm aufgenommen. Aus den Werten von $\Delta\nu$ wird wie im vorangegangenen Kapitel die Strömungsgeschwindigkeit bestimmt. Die Intensität wird direkt im Diagramm gegen die Tiefe aufgetragen. Für die Geschwindigkeit $v = 70$ % sind die Diagramme in den Abbildungen 6 und 7 zu sehen. Die Abbildungen 8 und 9 passen dann zur Geschwindigkeit $v = 45$ %.

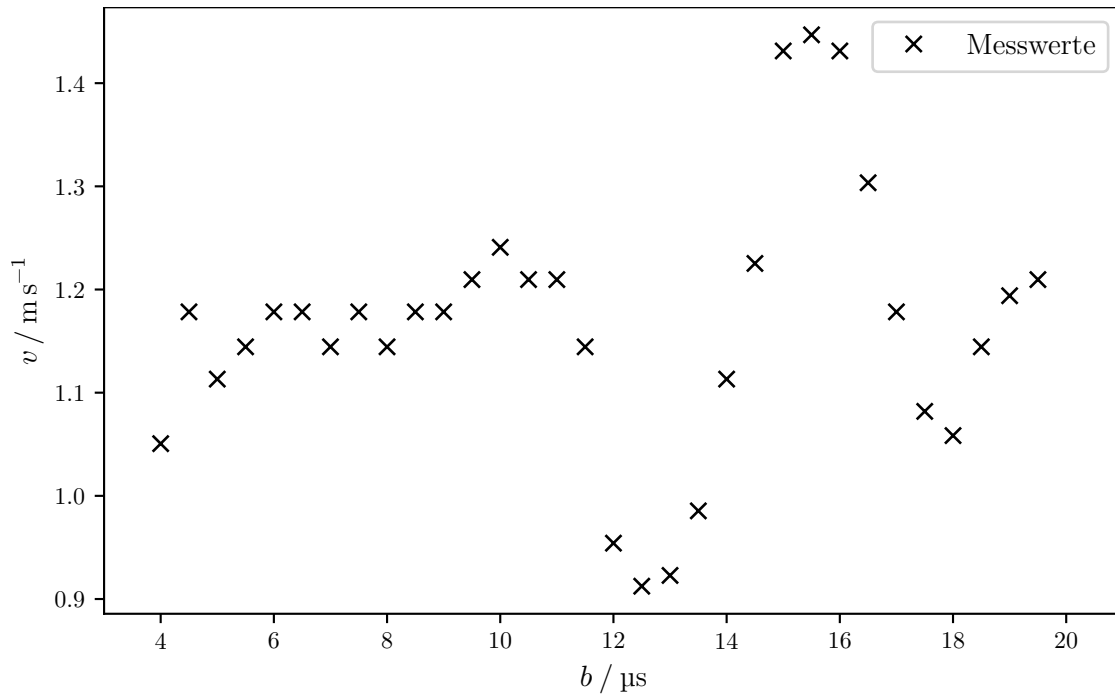


Abbildung 6: Geschwindigkeitsprofil bei $v = 70$ %.

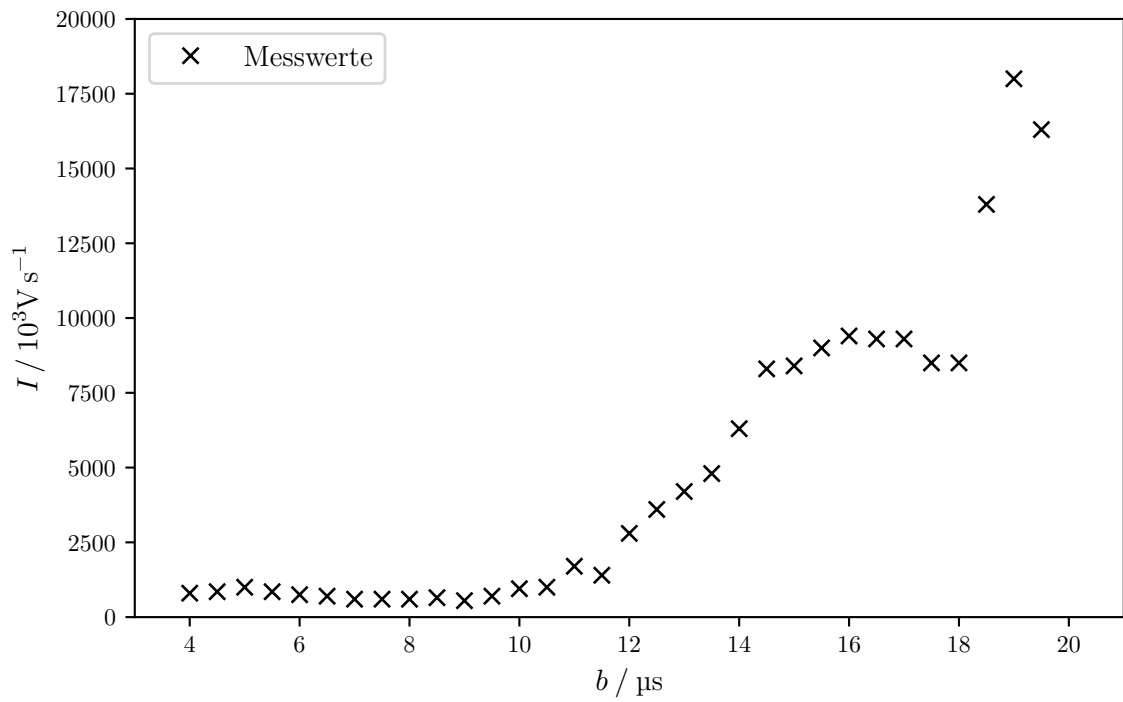


Abbildung 7: Intensitätsprofil bei $v = 70 \%$.

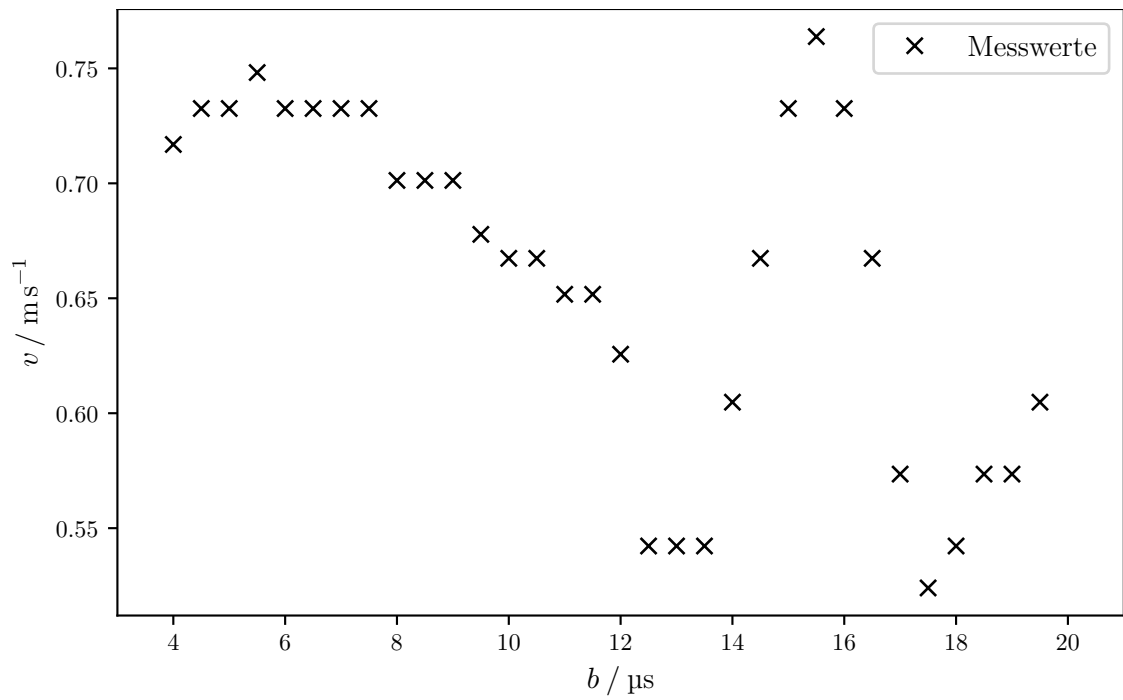


Abbildung 8: Geschwindigkeitsprofil bei $v = 45 \%$.

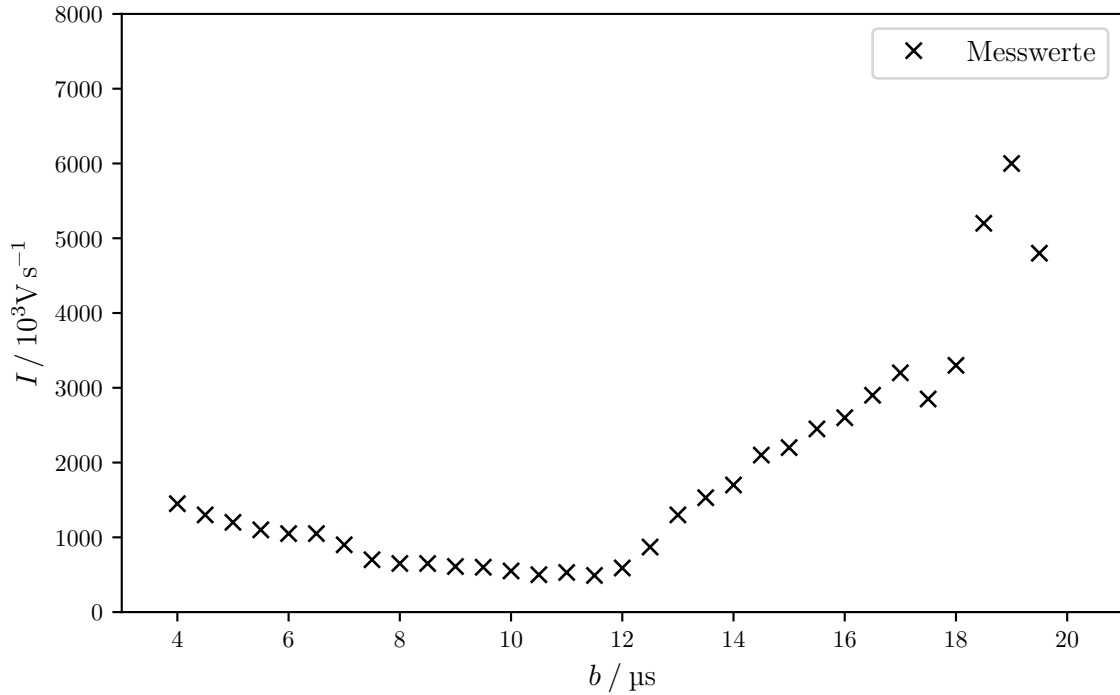


Abbildung 9: Intensitätsprofil bei $v = 45\%$.

4. Diskussion

4.1. Strömungsgeschwindigkeit

Die Strömungsgeschwindigkeit konnte unter verschiedenem Winkel bei jedem Rohr zufriedenstellend bestimmt werden. Beachtenswert ist, dass die Abweichung der Messreihen unter verschiedenem Winkel bei höherer allgemeiner Geschwindigkeit, also geringerem Rohrdurchmesser kleiner werden. Dieses Verhalten lässt sich so erklären, dass dort kleinere Schwankungen in der Anzeige einen geringeren Beitrag leisten.

Mit den Diagrammen von $\Delta\nu/\cos(\alpha)$ in Abhängigkeit von v konnte ein sehr gut erkennbarer linearer Zusammenhang gezeigt werden.

4.2. Strömungsprofil

Nach der Anleitung ist die Vorlaufstrecke im Prisma 30.7 mm lang. Mit den Angaben für die Messtiefe in Acryl sollte das Signal also nach 12.28 s auf das Rohr treffen. Dies ist in allen Diagrammen bezüglich des Strömungsprofils gut zu erkennen, da immer dort Flanken beginnen oder fallen.

Die eigentliche Breite des Rohres ist allerdings nicht gut zu erkennen. Theoretisch müsste mit den Angaben der Anleitung die Breite des klar zu erkennenden Bergs $6.67 \mu\text{s}$ betragen. Zu erkennen ist aber eher eine Breite von Tiefpunkt zu Tiefpunkt von $5 \mu\text{s}$, was einem Innendurchmesser von ca. 7.5 mm entspräche.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Doppler-Sonographie*. 2016. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/DopplerSonogr.pdf>.

A. Kopie der Originaldaten