

US3

## **Doppler-Sonographie**

Samuel Haefs

samuel.haefs@tu-dortmund.de

Max Koch

max.koch@tu-dortmund.de

Durchführung: 30.06.2020

Abgabe: 24.07.2020

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
2.1 Frequenzbereiche . . . . .	3
2.2 Doppler-Effekt . . . . .	3
2.3 Ultraschalltechnik . . . . .	3
<b>3 Durchführung</b>	<b>4</b>
<b>4 Auswertung</b>	<b>5</b>
<b>5 Diskussion</b>	<b>11</b>
<b>6 Anhang</b>	<b>11</b>
<b>Literatur</b>	<b>14</b>

# 1 Zielsetzung

Ziel des Versuches ist die Untersuchung der Eigenschaften von Strömungen mithilfe des Impuls-Echo-Verfahrens. Die Dopplersonographie wird bereits heute in der Medizin eingesetzt um Blutströmungen im Körper sichtbar zu machen.

## 2 Theorie

### 2.1 Frequenzbereiche

Allgemein kann der Frequenzbereich in vier Bereiche unterteilt werden. Das menschliche Ohr kann Frequenzen im Bereich von ca. 16 Hz bis ca. 20 kHz wahrnehmen. Dieser Bereich wird als Hörschwelle bezeichnet. Unterhalb der Hörschwelle spricht man vom Infraschall und Oberhalb bis ca. 1 GHz vom Ultraschall. Frequenzen über 1 GHz werden Hyperschall genannt.

### 2.2 Doppler-Effekt

Der Doppler-Effekt beschreibt die Frequenzänderung, welche bei einer relativen Bewegung der Schallquelle und des Beobachter auftritt. Die Frequenz steigt, sobald der Beobachter sich mit der Geschwindigkeit  $v$  auf die ruhende Quelle zubewegt ( $\nu_{kl}$ ) und sinkt wenn dieser sich von der Quelle entfernt ( $\nu_{gr}$ )

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

Dabei steht  $c$  für die Lichtgeschwindigkeit und  $\nu_0$  für die Ausgangsfrequenz. Befindet sich der Beobachter in Ruhe und die Quelle bewegt sich mit der Geschwindigkeit  $v$  auf den Beobachter zu, so wird die Frequenz  $\nu_0$  zu einer höheren Frequenz  $\nu_h$  verschoben. Entfernt sich die Quelle vom Beobachter, wird die Frequenz  $\nu_0$  zur niedrigeren Frequenz  $\nu_n$  verschoben

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

### 2.3 Ultraschalltechnik

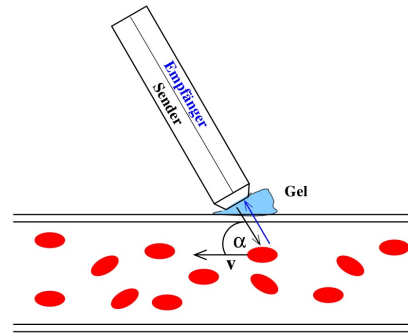
In der Ultraschalltechnik wird der Doppler-Effekt zum Beispiel zur Bestimmung der Geschwindigkeit von Strömungen genutzt. Trifft Schall auf ein bewegtes Objekt (z.B. Blutkörper), wird die Frequenz  $\nu_0$  gemäß dem Doppler-Effekt verschoben. In Abb. 1 ist die Untersuchung von Blutströmungen schematisch dargestellt.

Die Frequenzverschiebung wird durch

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

beschrieben, wobei  $\alpha$  und  $\beta$  die Winkel zwischen der Geschwindigkeit  $v$  und der Wellennormale sind. In diesem Versuch (bzw. bei dem verwendeten Impuls-Echo-Verfahren) gilt  $\alpha = \beta$  und es folgt für die Frequenzverschiebung

$$\Delta\nu = 2\nu_0 \frac{v}{c} \cdot \cos \alpha .$$



**Abbildung 1:** Eine schematische Darstellung einer Untersuchung von Blutströmungen mit einem Ultraschallgerät. [1, S. 1]

Ultraschall kann auf verschiedenen Wegen

erzeugt werden. Eine Methode ist die Nutzung des piezo-elektrischen Effekts. Befindet sich ein piezo-elektrischer Kristall in einem elektrischen Wechselfeld und eine polare Achse des Kristalls zeigt in Richtung des Feldes, dann wird dieser zum Schwingen angeregt. Die Schwingung des Kristalls erzeugt Ultraschallwellen.

Stimmt die Anregungsfrequenz des elektrischen Feldes mit der Eigenfrequenz des Kristalls überein, kommt es zur Resonanz und es können große Schwingungsamplituden erzeugt werden. Dabei entstehen hohe Schallenergiedichten die zur Untersuchung von Strömungen genutzt werden können.

Ein Piezokristall kann auch als Empfänger von Schallwellen genutzt werden. Treffen Schallwellen auf den Kristall wird dieser zum Schwingen angeregt. Durch die Schwingung wird der Kristall verformt und die elektrische Polarisation verändert. Dies erzeugt eine elektrische Spannung, welche gemessen werden kann.

Am häufigsten werden Quarze als Piezokristall verwendet. Die verwendete Ultraschallsonde in dem Versuch wird als Ultraschallsender und -empfänger genutzt.

### 3 Durchführung

Zum experimentellen Aufbau gehört ein Ultraschall Doppler-Generator, eine Ultraschallsonde mit einer Frequenz von 2 MHz und ein Computer der mit der Sonde zur Datenaufnahme und -analyse verbunden ist. Zusätzlich stehen Strömungsröhre mit verschiedenen Innen- und Außendurchmessern zur Untersuchung zur Verfügung.

Durch die Röhren strömt ein Gemisch aus Wasser, Glycerin und Glaskugeln. Die Eigenschaften der Flüssigkeit wurden an die Frequenz der Ultraschallsonde angepasst. Die Viskosität  $\eta$  der Dopplerphantomflüssigkeit wird so verändert, dass sich bei einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit eine laminare Strömung bildet. Die Strömungsgeschwindigkeit wird mit einer Zentrifugalpumpe gesteuert. Das Maß der Strömungsgeschwindigkeit ist die Umdrehungszahl der Pumpe  $N$ .

Die durch die Ultraschallsonde gemessenen Daten werden vom Computer erfasst und mit

dem Programm FlowView verarbeitet.

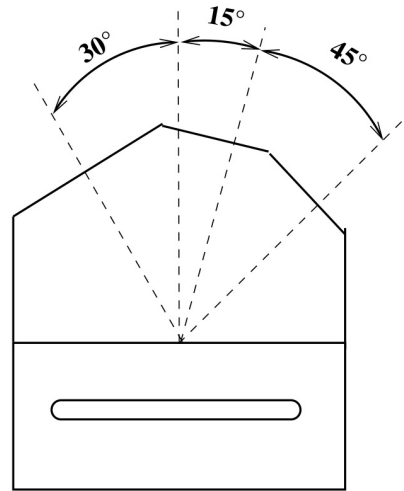
Um mit der Sonde das Strömungsprofil zu messen wird ein Doppler-Prisma auf ein Rohr mit passendem Durchmesser gestellt. Mit dem Ultraschallgel kann der Übergang zwischen Sonde zum Doppler-Prisma und Doppler-Prisma zum Rohr geschlossen werden.

Das Doppler-Prisma ist in Abb. 2 skizziert. Das Prisma besitzt drei Einstellwinkel  $\theta$  mit gleichem Abstand zwischen Sonde und Rohr. Der Dopplerwinkel ergibt sich aus dem Brechungsgesetz

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

wobei  $c_L$  die Schallgeschwindigkeit der Doppler-Flüssigkeit und  $c_P$  die des Prismamaterials (hier Acryl) ist.

Zuerst soll die maximale Frequenz  $f_{\max}$  in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit  $N$  bestimmt werden. Bei Geschwindigkeitsmessungen muss bei dem Ultraschallgenerator das SAMPLE VOLUME auf LARGE stehen. Die Strömungsgeschwindigkeit wird an der Zentrifugalpumpe auf einen Wert festgelegt und dann dreimal die Frequenzverschiebung  $\Delta\nu$  mit der Ultraschallsonde durch alle drei Dopplerwinkel gemessen. Die Messung wird für fünf unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten durchgeführt. Aus der Verschiebung kann die Strömungsgeschwindigkeit bestimmt werden.



**Abbildung 2:** Eine schematische Darstellung des Doppler-Prisma. [1, S. 3]

Im Anschluss soll das Strömungsprofil der Dopplerflüssigkeit an einem 3/8 Zoll -Schlauch mit dem Dopplerwinkel  $\theta = 15^\circ$  untersucht werden. Hier ist es notwendig am Ultraschallgenerator das SAMPLE VOLUME auf SMALL zu stellen, damit die Messtiefe variiert werden kann. Diese kann nun mit dem Regler DEPTH eingestellt werden. Die Messtiefe ist in  $\mu\text{s}$  angegeben und für Acryl entsprechen  $4\mu\text{s} = 6\text{ mm}$ .

Zunächst wird die Pumpleistung auf 70 % bzw.  $N = 6000 \frac{1}{\text{min}}$  eingestellt und die Strömungsgeschwindigkeit und den Streuintensitätswert gemessen. Die Messtiefe  $D$  wird im Intervall  $12,5\mu\text{s} \leq D \leq 19,0\mu\text{s}$  in  $\Delta D = 0,5\mu\text{s}$ -Schritten variiert.

Die Messung wird für eine Pumpleistung von 45 % bzw.  $N = 3880 \frac{1}{\text{min}}$  wiederholt.

## 4 Auswertung

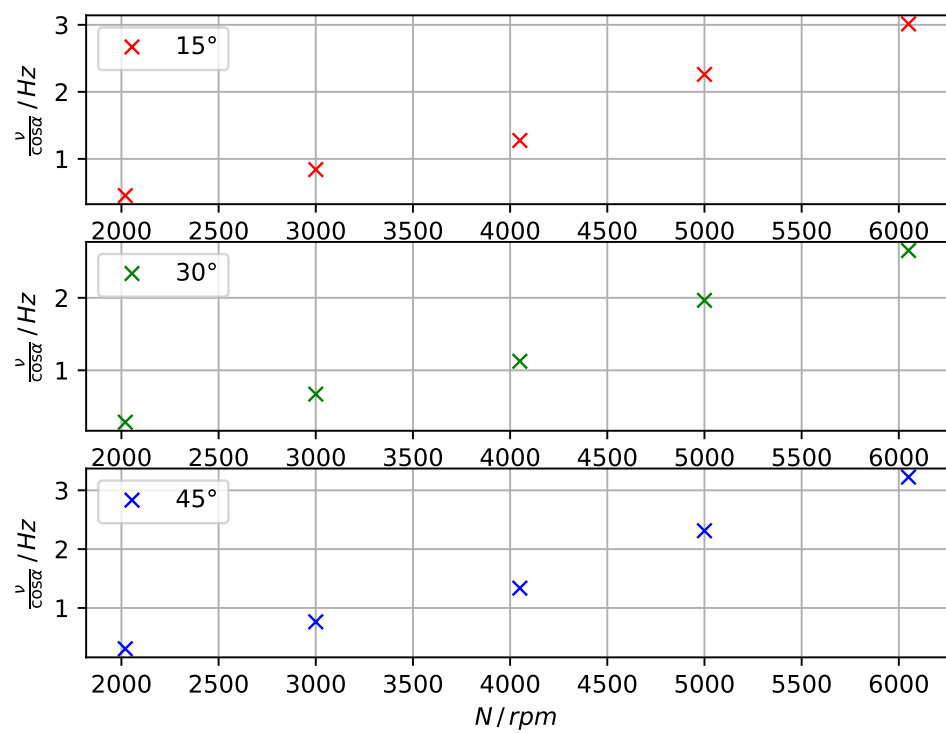
Die Messwerte welche im ersten Teil des Experiments aufgenommen wurden sind in Tabelle 1 zu finden. Dafür wurde die Frequenz des reflektierten Schalls unter Variation des

Einstellwinkels und der Umdrehungsgeschwindigkeit gemessen. Die verwendete Pumpe lies keine direkte Einstellung der Fließgeschwindigkeit zu. Stattdessen wird als Maß die Umdrehungen pro Minute der Pumpe (*rpm*) verwendet.

Prismenwinkel/°	$N/rpm$	$\nu_g/Hz$
15	2020	78
15	3000	145
15	4050	220
15	6050	520
15	5000	390
30	2020	95
30	3000	224
30	4050	375
30	5000	655
30	6050	884
45	2020	144
45	3000	360
45	4050	630
45	6050	1520
45	5000	1090

**Tabelle 1:** Die gemessenen Frequenzen in Abhängigkeit des Prismenwinkel und der Umdrehungen pro Minute der Pumpe.

Das Verhältnis  $\frac{\nu_g}{\cos \alpha}$  ist in Abbildung 3 graphisch gegen die Umdrehungsgeschwindigkeit der Pumpe aufgetragen. Alle Plots wurden mit dem Python-Paket matplotlib [2] erstellt.



**Abbildung 3:** Die aufgenommenen Frequenzen aufgetragen gegen die Umdrehungsgeschwindigkeit der Pumpe.

Im nächsten Teil des Experiments wurde die Streuintensität  $I$  sowie die maximale Frequenz  $f_{\max}$  des reflektierten Schalls in Abhängigkeit der Messtiefe der Schallsonde gemessen. Dafür wurden an der Sonde verschiedene Messtiefen in  $\mu\text{s}$  eingestellt. Die so aufgenommenen Werte sind in Tabelle 2 zu finden. In dem linken Teil der Tabelle sind dabei die Messwerte für eine Umdrehungsgeschwindigkeit von  $N = 3880 \text{ rpm}$  zu sehen und im rechtem Teil der Tabelle die Messwerte für  $N = 6000 \text{ rpm}$ .

$Tiefe / \mu\text{s}$	$I / 100 \frac{\text{V}^2}{\text{s}}$	$f_{\max} / \text{Hz}$	$Tiefe / \mu\text{s}$	$I / 100 \frac{\text{V}^2}{\text{s}}$	$f_{\max} / \text{Hz}$
12.5	93	400	12.5	100	800
13.0	130	430	13.0	120	860
13.5	200	500	13.5	200	1020
14.0	207	502	14.0	235	1092
14.5	215	514	14.5	260	1185
15.0	160	490	15.0	350	1206
15.5	160	457	15.5	370	1225
16.0	300	420	16.0	400	1020
16.5	301	380	16.5	390	930
17.0	190	400	17.0	420	950
17.5	155	400	17.5	345	980
18.0	184	390	18.0	320	990
18.5	196	400	18.5	300	1100
19.0	225	430	19.0	260	1200

**Tabelle 2:** Die Streuintensität und die maximale Frequenz des reflektierten Schalls in Abhängigkeit der Messtiefe. Die Messwerte der linken Tabelle wurden bei  $N = 3880 \text{ rpm}$  gemessen, die der rechten bei  $N = 6000 \text{ rpm}$

Für eine graphische Auftragung der Messwerte wird zunächst aus der Messtiefe  $s$  in  $\mu\text{s}$  die Messtiefe in  $\text{mm}$  berechnet. Dafür wird zunächst die Strecke  $s_{\text{prism}}$  subtrahiert, die der Schall im Prisma zurücklegt.

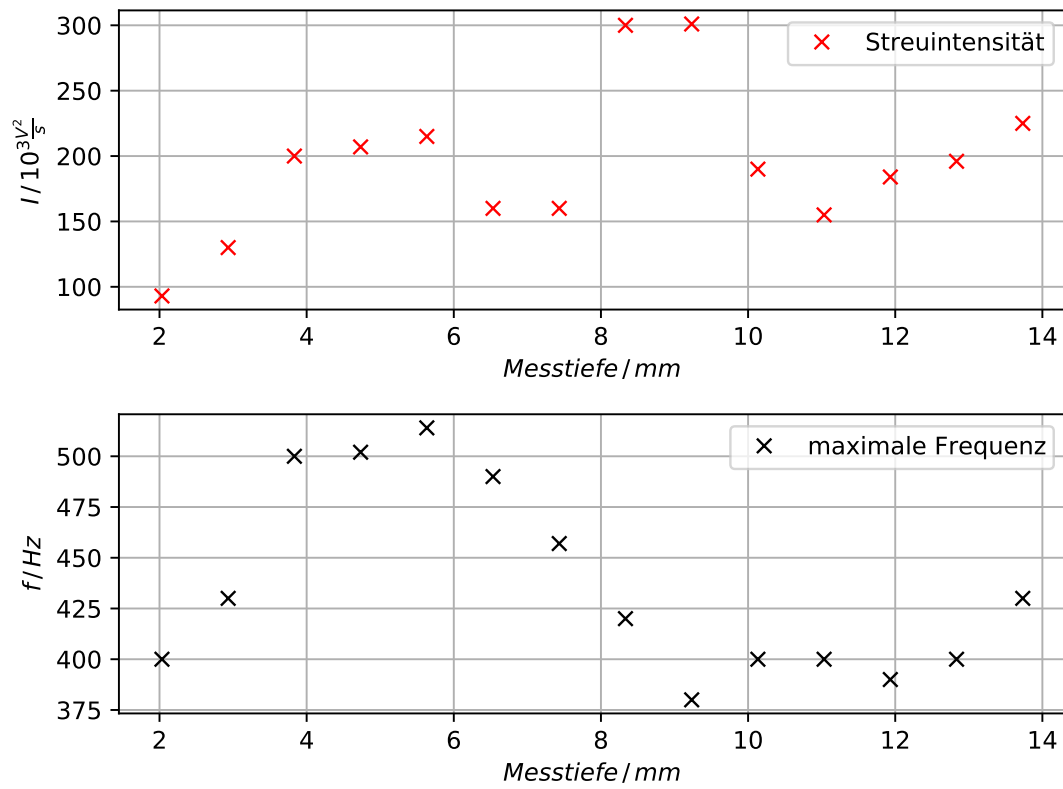
$$s_{\text{liquid}} = s - \frac{s_{\text{prism}}}{c_{\text{prism}}}$$

$c_{\text{prism}}$  entspricht dabei der Schallgeschwindigkeit im Prisma. Daraufhin wird mit dem Weg-Zeit-Gesetz

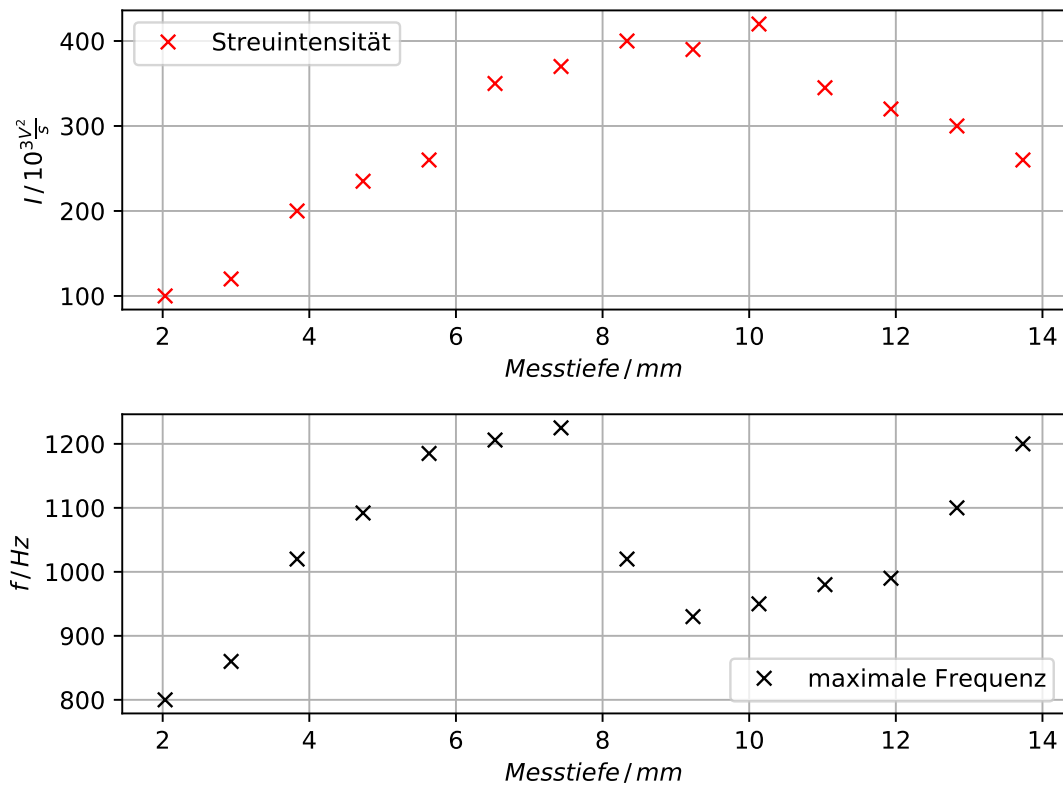
$$l = c_{\text{liquid}} \cdot s,$$

die Messtiefe  $s$ , mithilfe der Schallgeschwindigkeit  $c_{\text{liquid}}$  in der Flüssigkeit, in eine Distanz  $l$  in  $\text{mm}$  umgerechnet. Gegen diese wird nun die Streuintensität  $I$  und die maximale Frequenz  $f_{\max}$  graphisch aufgetragen. Die graphisch aufgetragenen Messwerte sind für  $N = 3880 \text{ rpm}$  in Abbildung 4 und für  $N = 6000 \text{ rpm}$  in Abbildung 5 zu finden.





**Abbildung 4:** Die obere Graphik zeigt die Streuintensität aufgetragen gegen die Messtiefe, die untere die Frequenz aufgetragen gegen die Messtiefe.  
 $N = 3880 \text{ rpm}$



**Abbildung 5:** Die obere Graphik zeigt die Streuintensität aufgetragen gegen die Messtiefe, die untere die Frequenz aufgetragen gegen die Messtiefe.  $N = 6000 \text{ rpm}$

## 5 Diskussion

Aufgrund der Fehlfunktion der Pumpe konnte die Fließgeschwindigkeit der Flüssigkeit nicht bestimmt werden. Der Verlauf der Frequenzdifferenz in Abhängigkeit von  $N$  zeigt, dass bei höherer Umdrehungsgeschwindigkeit die Frequenzdifferenz abnimmt. Das ist damit zu erklären, dass sich die Flüssigkeit in dem Rohr in die Richtung bewegt, in die sich auch der Schall der Sonde ausbreitet. Demnach folgen die Messwerte den Erwartungen und der Doppler-Effekt führt so bei höherer Geschwindigkeit zu einer geringeren Frequenzverschiebung. Beziehungsweise bei anderer Fließrichtung der Flüssigkeit zu einer höheren Frequenzverschiebung.

In der Abbildung 4 im zweiten Teil der Auswertung ist zu sehen, dass die Messwerte der Streuintensität sehr stark gestreut sind. Diese hätten theoretisch konstant bleiben müssen. Allerdings war die Messung der Streuintensität ungenau, da die Angaben an dem Messgerät schon bei kleinsten Bewegungen, große Unterschiede aufwies. Wenn zwischen der Sonde und dem Prisma nur ein paar Luftblasen sind, können schon kleinste Bewegungen der Sonde die Streuintensität stark verändern. Dasselbe gilt für die Messung der Streuintensität für  $N = 6000$  rpm.

Bei der Messung der maximalen Frequenz fällt auf, dass diese bis zu einer bestimmten Messtiefe steigt und dann wieder abfällt. Bei der Messung mit  $N = 3880$  rpm, dessen Messwerte in Abbildung 4 zu sehen sind, wird das Maximum bei einer Messtiefe von 6 mm erreicht. Die maximale Frequenz für  $N = 6000$  rpm wird bei ungefähr 7 mm erreicht. Die Maxima der maximalen Frequenz liegen also für beide Umdrehungsgeschwindigkeiten nah beieinander. Aus dem restlichen Verlauf der beiden Messungen ist zu schließen, dass die Geschwindigkeit der Flüssigkeit und somit auch die maximale Frequenz bis zu einer Messtiefe von 6 – 7 mm zunimmt. Nach diesem Punkt nimmt sie wieder ab. Also ist die Geschwindigkeit der Flüssigkeit an den Rändern der Röhre niedriger als in der Mitte. Da für beide Umdrehungsgeschwindigkeiten dasselbe Rohr genutzt wurde, ist es nicht verwunderlich, dass beide Frequenzverläufe eine starke Ähnlichkeit aufweisen. Allerdings waren auch bei der Messung der Frequenz schon kleine Änderungen der Positionen der Sonde für große Unterschiede in der Messung verantwortlich. Damit sind auch die Sprünge in den Verläufen zu erklären, die bei beiden Umdrehungszahlen  $N$  auftreten.

## 6 Anhang

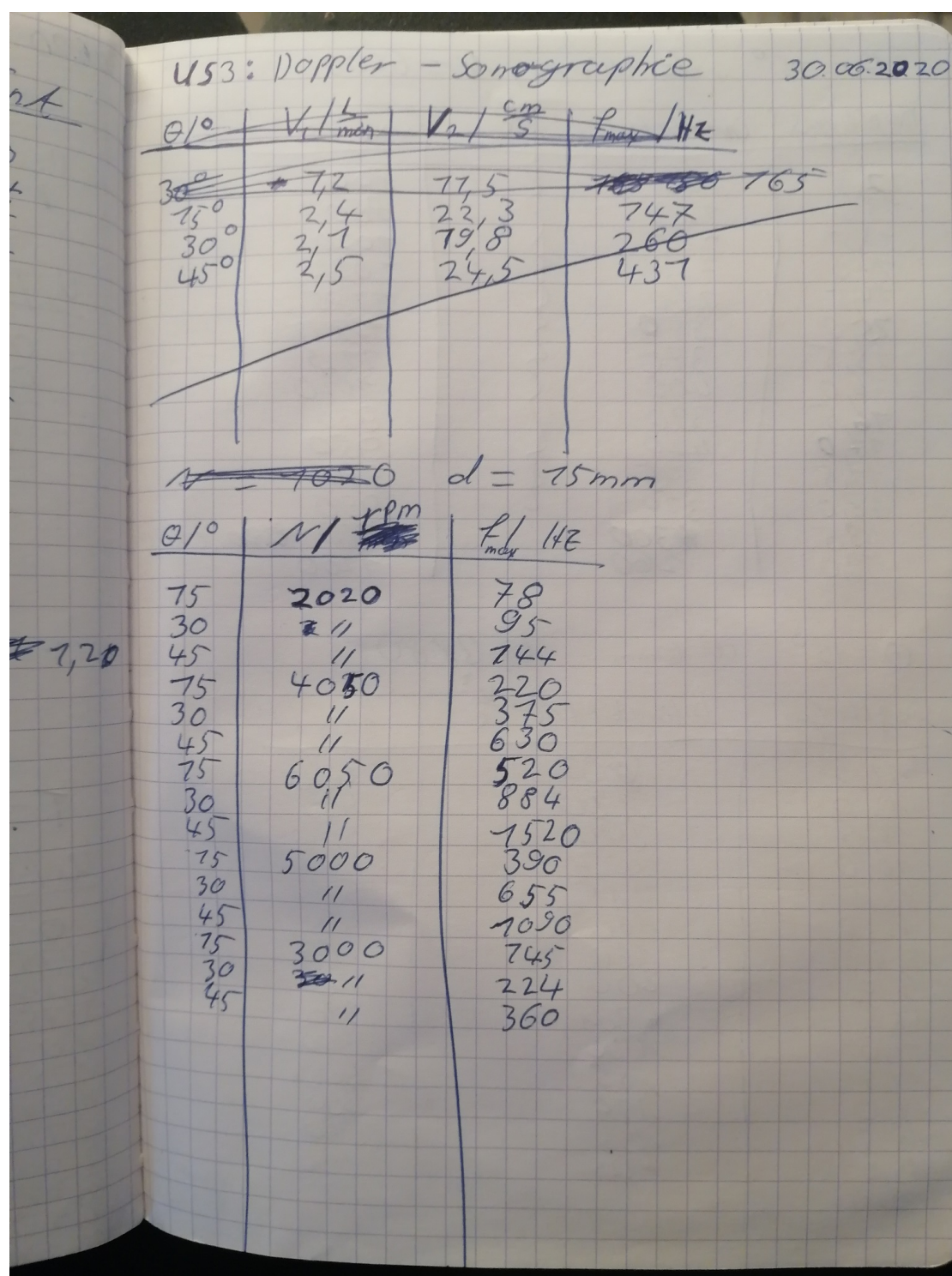


Abbildung 6: Originaldaten aus dem Laborheft (Seite 1).

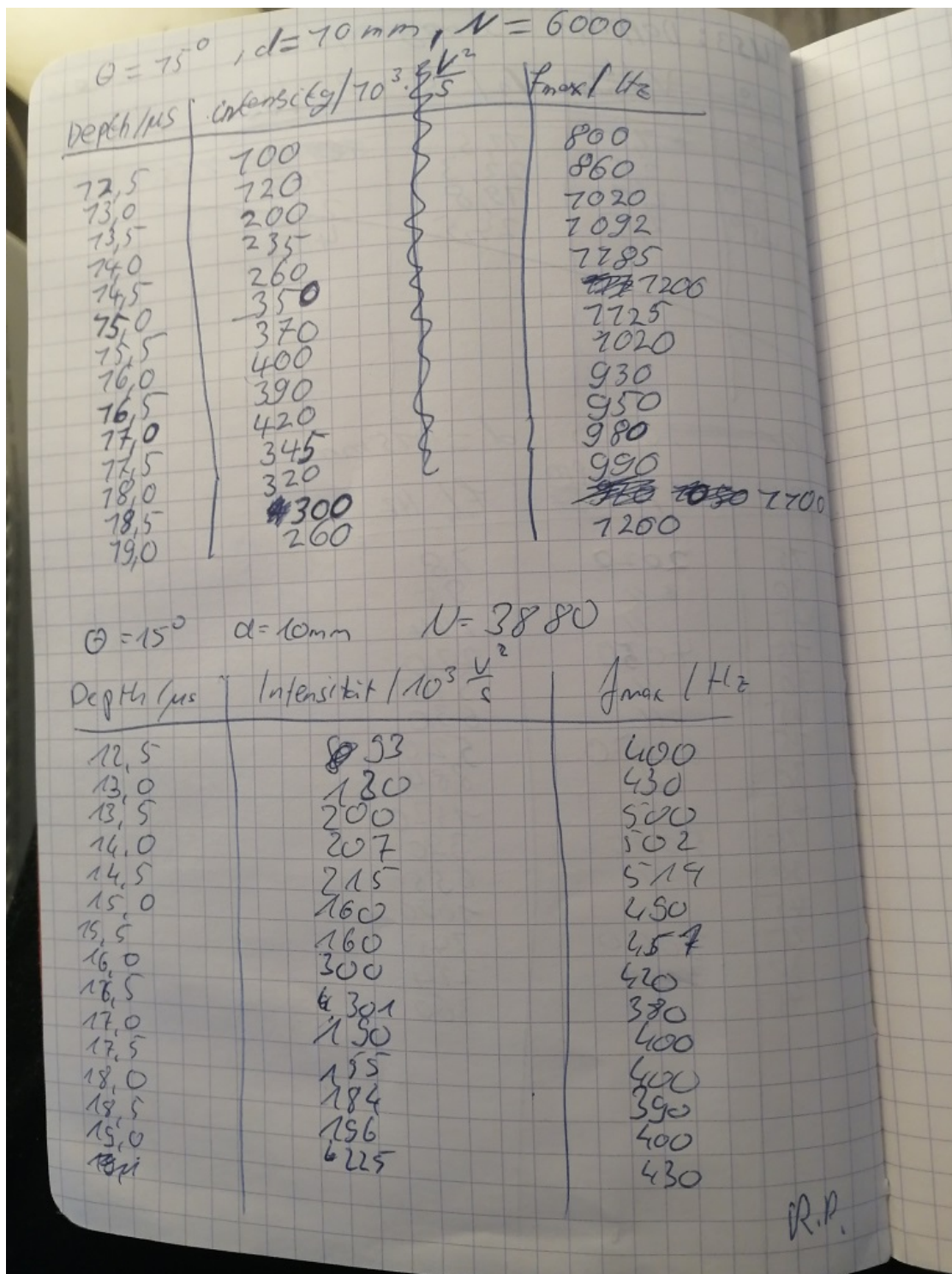


Abbildung 7: Originaldaten aus dem Laborheft (Seite 2).

## Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuch zur Doppler-Sonographie US3*. 2014.
- [2] 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/>.