

US1: Grundlagen der Ultraschalltechnik

Felix Geyer Rune Dominik
felix.geyer@tu-dortmund.de rune.dominik@tu-dortmund.de

Durchführung: 25. April 2017
Abgabe: 02. Mai 2017

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	3
2	Durchführung	4
2.1	Versuchsaufbau	4
2.2	Versuchsdurchführung	5
3	Auswertung	5
3.1	Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Acryl	5
3.2	Betrachtung des Dämpfungsverhaltens von Acryl	6
3.3	Vermessung des Augenmodells	8
3.4	Bestimmung der Dicke von Acrylplatten mithilfe des Cepstrum	8
4	Diskussion	10
4.1	Schallgeschwindigkeitsmessung	10
4.2	Dämpfungsverhalten	10
4.3	Messung am Augenmodell	10
4.4	Dickenbestimmung per Cepstrum	11
	Literatur	12

1 Theorie

Zentrales Thema des Versuchs ist Ultraschall. Dieser liegt ungefähr im Frequenzband von 20 kHz bis 1 GHz. Unterhalb dieser Frequenz, von 16 Hz bis 20 kHz, liegt der menschliche Hörbereich. Oberhalb der Frequenz von Ultraschall gibt es noch den Hyperschall und unterhalb des menschlichen Hörbereichs den Infraschall. Schall lässt sich darstellen als longitudinale Welle

$$\rho(x, t) = \rho_0 + v_0 Z \cos(\omega t - kx) \quad (1)$$

mit $Z = c \cdot \rho$ als akustische Impedanz, die abhängig ist von der Dichte ρ des Materials und der materialabhängigen Schallgeschwindigkeit c . Durch Absorption verliert die Schallwelle bei der Ausbreitung Energie. Beschreiben lässt sich dies durch die exponentielle Abnahme der Intensität I

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\alpha x} . \quad (2)$$

Dabei fällt die Intensität nach der Strecke x exponentiell mit dem Absorptionskoeffizienten α ab. Dieser ist zum Beispiel für Luft sehr groß, sodass in der Medizin ein Ultraschallgel als Medium zwischen Ultraschallsender und Material genutzt wird.

Außerdem wird ein Teil der Schallwelle reflektiert, sobald diese auf eine Grenzfläche trifft. Das Verhältnis aus reflektierter und einfallender Intensität wird als Reflexionskoeffizient R bezeichnet.

Erzeugt werden kann Ultraschall unter Zuhilfenahme des piezo-elektrischen Effekts. Ein piezoelektrischer Kristall, meist ein Quarz, wird durch ein sich periodisch änderndes elektrisches Feld zu Schwingungen angeregt und strahlt dadurch Ultraschallwellen ab. Stimmt die Frequenz des elektrischen Wechselfeldes mit der Eigenfrequenz des Kristalls überein (liegt also ein Resonanzfall vor), erreichen die abgestrahlten Ultraschallwellen hohe Amplituden und damit auch hohe Energieichten. Der piezo-elektrische Effekt lässt sich umkehren und somit lassen sich die Kristalle auch als Schallempfänger nutzen. Einlaufende Schallwellen regen den Kristall dabei zu Schwingungen an.

Häufig werden in der Medizin Laufzeitmessungen mittels Ultraschall durchgeführt, um an Informationen zu gelangen. Dabei gibt es zwei Verfahren:

- **Durchschallungsverfahren** Bei diesem Verfahren befinden sich Sender und Empfänger gegenüber voneinander. Dazwischen befindet sich das zu durchschallende Material. Bei einer Fehlstelle in der Probe wird die Intensität abgeschwächt. Im Gegensatz zum Impuls-Echo-Verfahren ist keine quantitative Aussage darüber möglich, vgl. Abbildungen 1 und 2.
- **Impuls-Echo-Verfahren** Im Gegensatz zum Durchschallungsverfahren fungiert hier der Sender auch als Empfänger. Dabei kommt zum Tragen, dass Schallwellen an Grenzwellen teilweise reflektiert werden (siehe oben). Mit diesem Verfahren können Fehlstellen bestimmt werden, so kann man aus der Höhe des Echos auf die Größe der Fehlstelle schließen. Außerdem kann mithilfe der Formel

$$s = \frac{1}{2} c t \quad (3)$$

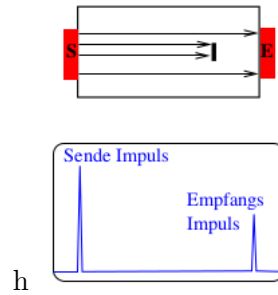


Abbildung 1: Das Prinzip des Durchschallungsverfahrens [Dor17].

bei bekannter Schallgeschwindigkeit c und Zeit t die Position s der Fehlstelle bestimmt werden, siehe Abbildung 2. Für die Darstellung der Laufzeitmessung gibt es den A-Scan, B-Scan und TM-Scan. Beim A-Scan wird die Amplitude gemessen (A: Amplitude), beim B-Scan wird die Amplitude in Helligkeit (B steht für Brightness) umgewandelt und beim TM-Scan wird die Amplitude gegen die gegeneinander verschobenen Echozüge von hintereinander liegenden Impulsen aufgetragen (TM: time motion).

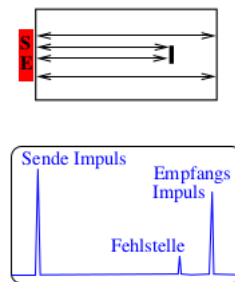


Abbildung 2: Skizze des Impuls-Echo-Verfahrens [Dor17].

2 Durchführung

2.1 Versuchsaufbau

Der Aufbau des Versuchs besteht aus Ultraschallechoskop, einer Ultraschallsonde mit 2 MHz und einem Rechner mit dem Programm EchoView, um die Daten darstellen zu können. Am Echoskop lässt einstellen, ob eine (Impuls-Echo-Verfahren) oder zwei (Durchschallungsverfahren, siehe Kapitel 1) Ultraschallsonden verwendet werden. Außerdem lässt sich eine Verstärkung in dB und der TGC, ein zeitabhängiger Verstärkungsfaktor, (TGC: Time Gain Control, auch in dB) wählen. Als Untersuchungsmaterial stehen verschieden lange Acrylzylinder und -platten, ein Augenmodell und als Kontaktmittel bidestilliertes Wasser zur Verfügung.

2.2 Versuchsdurchführung

Zuerst werden einige Testmessungen durchgeführt und probeweise die Schallgeschwindigkeit bestimmt. Diese Messungen werden aber im Folgenden nicht weiter behandelt. Danach wird das Impuls-Echo-Verfahren angewandt. Zu diesem Zweck wurden alle Acrylzylinder mit einer Schieblehre mit einer Genauigkeit von 0.2 mm vermessen. Als nächstes werden Zylinder und Ultraschallsonde mit bidestilliertem Wasser gekoppelt. Mittels eines A-Scans und Makern werden Amplitude der Reflexion und Laufzeit des Impulses festgehalten und notiert. Außerdem wird eine eventuell eingestellte Verstärkung (TGC) aufgeschrieben. Dies wird für insgesamt sieben verschiedene Zylinder durchgeführt.

Als nächstes wird das Durchschallungsverfahren angewandt. Dafür wird eine zweite Sonde angeschlossen, die als Empfänger fungiert. Die Acrylzylinder werden der Länge nach in eine Apparatur eingespannt, die an beiden Enden jeweils eine Sonde hat. Dann werden wieder Amplitude, Laufzeit und TGC mittels A-Scan für sieben Zylinder aufgenommen.

Danach wird ein ca. 40 mm Acrylzylinder auf zwei Acrylplatten gestellt, um mithilfe des Cepstrums Mehrfachreflexionen zu analysieren. Der Zylinder und die Platten werden mit bidestilliertem Wasser gekoppelt und mithilfe des Impuls-Echo-Verfahrens werden die Reflexionen aufgenommen. Dabei ist zu beachten, dass die Verstärkung so aufgenommen wird, dass drei Reflexionen zu sehen sind. Im Programm EchoView lässt sich dann das Cepstrum als Diagramm auftragen.

Als letztes wird das Augenmodell mit dem Impuls-Echo-Verfahren untersucht. Dazu wird bidestilliertes Wasser auf die Hornhaut gegeben und dann mit der Ultraschallsonde die Reflexionen von Iris, Linse und Retina untersucht, siehe Abbildung 3. Zu diesem Zweck werden die verschiedenen Laufzeiten der Reflexionen aufgenommen und später mit den realen Längen eines menschlichen Auges abgeglichen.

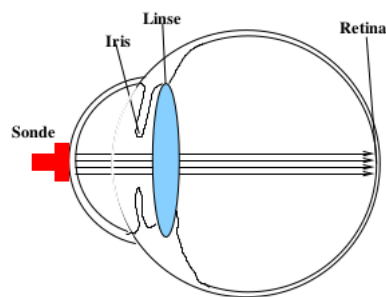


Abbildung 3: Augenmodell im Querschnitt [Dor17].

3 Auswertung

3.1 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Acryl

Die aus der Messung nach dem Impuls-Echo-Verfahren gewonnenen Messwerte finden sich in Tabelle 1a, die aus dem Durchschallungsverfahren in Tabelle 1b. Die Bestim-

l/mm	U/V	$\Delta t/\text{s}$	TGC/dB	l/mm	U/V	$\Delta t/\text{s}$	TGC/dB
31.00	0.202	23.16	0	31.00	0.729	12.48	0
40.10	0.193	29.68	0	40.10	0.759	15.46	0
61.58	0.310	45.62	17.81	61.58	0.271	23.70	0
71.30	-	52.46	20.58	71.30	-	27.18	0
80.20	0.154	59.66	18.16	80.20	0.154	30.50	0
102.00	0.105	75.90	32.85	102.00	0.271	38.71	15.48
121.18	0.105	88.38	32.85	121.18	0.329	45.19	17.99

(a) Messwerte der Messung per Impuls-Echo-Verfahren. Bei den Δt -Werten handelt es sich um die doppelte Laufzeit. (b) Messwerte der Messung per Durchschallungsverfahren.

Tabelle 1: l bezeichnet jeweils die Höhe der Zylinder, U die Spannungsamplitude des gemessenen Peaks, Δt den zeitlichen Abstand zwischen Senden des Schallimpulses und Empfangen des Signals und TGC gibt den verwendeten Verstärkungsfaktor für den Amplitudenwert an. Die Längenmessung ist auf einen Fehler von $\pm 0.02 \text{ mm}$ genau.

Die Bestimmung der Schallgeschwindigkeiten geschieht nun durch lineare Regression. Zu beachten ist, dass sich die Laufzeiten bei der Messung per Impuls-Echo-Verfahren auf die doppelte Länge beziehen. Es werden daher in den Rechnungen die halben gemessenen Laufzeiten betrachtet. Dies ist notwendig, da innerhalb des Sondenmaterials eine gewisse Strecke zurückgelegt werden muss, die ansonsten als systematischer Fehler in die Rechnung eingehen würden. Regression der Länge-Laufzeit Wertepaare mit

$$t(l) = l \cdot \frac{1}{c} + t_0 \quad (4)$$

(wobei c die Schallgeschwindigkeit im Zylinder und t_0 die Laufzeit innerhalb der Sonde ist) liefert für das Impuls-Echo-Verfahren:

$$c = (2740 \pm 24) \text{ m s}^{-1}$$

$$t_0 = (0.28 \pm 0.25) \text{ s}$$

und für das Durchschallungsverfahren:

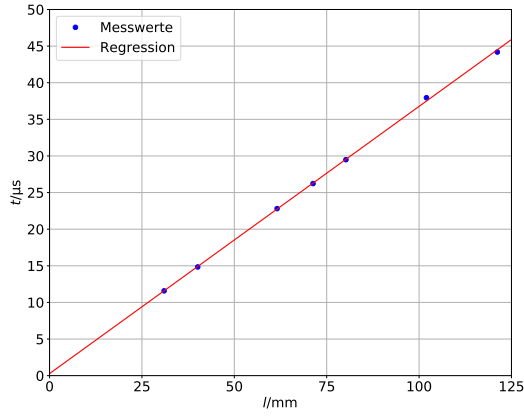
$$c = (2727 \pm 21) \text{ m s}^{-1}$$

$$t_0 = (1.0 \pm 0.2) \text{ s}$$

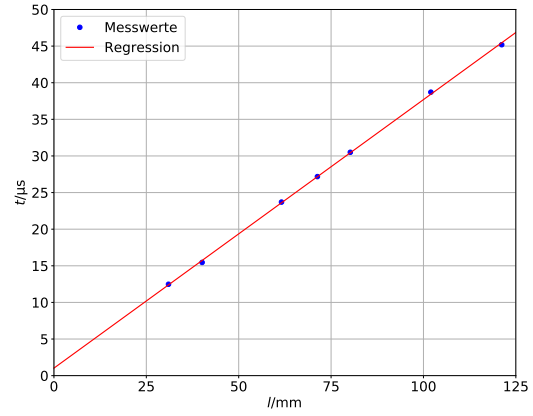
Messwerte und Regression sind in Abbildung 4a für das Impuls-Echo-Verfahren, sowie in Abbildung 4b für das Durchschallverfahren dargestellt.

3.2 Betrachtung des Dämpfungsverhaltens von Acryl

Nun werden die Dämpfungseigenschaften von Acryl betrachtet. Dabei wird die gemessene Spannungsamplitude des Signals in Abhängigkeit der zurückgelegten Wegstrecke betrachtet. Zu beachten sind hier drei Dinge:



(a) Impuls-Echo-Verfahren



(b) Durchschallverfahren

Abbildung 4: Dargestellt sind die gemessenen Laufzeiten bei beiden Messmethoden mit Regression. Insbesondere in b erkennt man die Verschiebung des Graphen auf der y-Achse, verursacht durch die Schalllaufzeit innerhalb der Sonde, deutlich.

1. Beim Impuls-Echo-Verfahren wird Verfahrensbedingt die doppelte Strecke zurückgelegt.
2. Manche Amplituden mussten mit Verstärkung gemessen werden. Diese ist in den Tabellen 1a und 1b als TGC-Wert in dB angegeben. Die Umrechnung in einen linearen Faktor geschieht durch:

$$G(g) = 10^{(g \cdot \frac{1}{20})} \quad (5)$$

mit TGC-Wert g .

3. Beim Durchschallverfahren wurde eine Empfangsverstärkung von 10 dB zugeschaltet. Diese kann auch nach 5 eliminiert werden. Die für beide Verfahren genutzte Sendeverstärkung von ebenfalls 10 dB verbleibt in den Messwerten, da sie die gesuchte Größe α sowie die Vergleichbarkeit beider Verfahren nicht beeinflusst.

Die Dämpfung verläuft exponentiell, der Dämpfungskoeffizient α wird daher durch Regression mit einer Funktion:

$$U(l) = U_0 \cdot e^{\alpha l} \quad (6)$$

in PHYTON-SCIPY bestimmt. Zu erwähnen ist, dass die für die Zylinder mit Länge $l = 71.3\text{mm}$ gemessenen Werte nicht genutzt werden können, da dieser Zylinder aus zwei kürzeren Stücken zusammengesetzt wurde und sich so eine Signalabschwächende Grenzschicht zwischen den beiden Zylindern bildet. Für das Impuls-Echo-Verfahren ergeben sich:

$$U_0 = (0.84 \pm 0.33) \text{ V}$$

$$\alpha = (-21 \pm 5) \text{ m}^{-1}$$

und für das Durchschallungsverfahren:

$$U_0 = (0.69 \pm 0.18) \text{ V}$$

$$\alpha = (-32 \pm 11) \text{ m}^{-1}$$

Die Verläufe mit Regression sind in den Abbildungen 5a und 5b dargestellt.

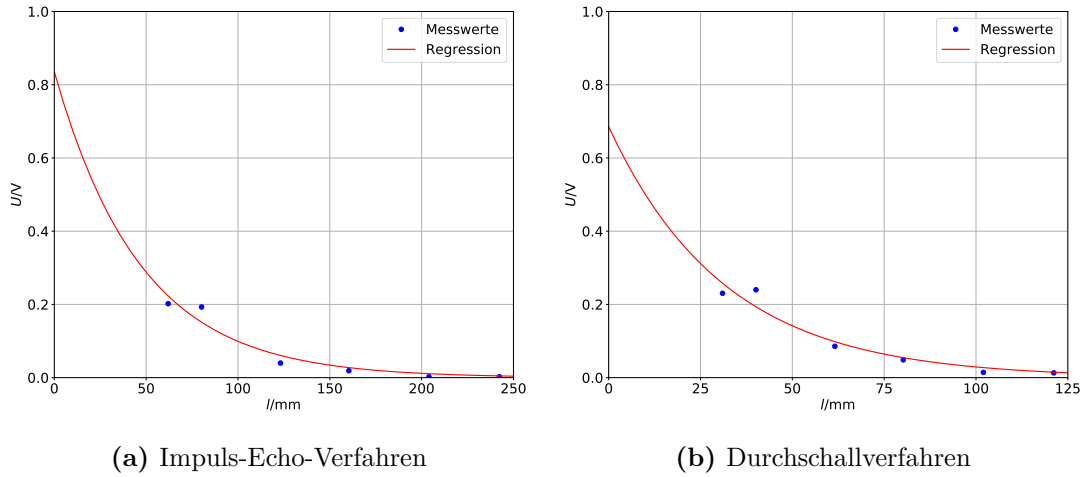


Abbildung 5: Dargestellt sind die gemessenen Signalamplituden in Abhängigkeit der Signallaufzeit bei beiden Messmethoden mit Regression.

3.3 Vermessung des Augenmodells

Die gewonnenen Messwerte sind in Tabelle 2a dargestellt. Für die Schallgeschwindigkeit [Dor17] in der Glaskörperflüssigkeit gilt $c_{GK} = 1410 \text{ m s}^{-1}$ und für die Linse $c_L = 2500 \text{ m s}^{-1}$. Sind die Laufzeitdifferenzen Δt zwischen den Grenzflächen bekannt, kann nach

$$S = \frac{1}{2} c \cdot \Delta t \quad (7)$$

der Abstand zwischen den Schichten bestimmt werden. Der Faktor $1/2$ ist notwendig, da beim Impuls-Echo-Verfahren die doppelten Laufzeiten gemessen werden.

3.4 Bestimmung der Dicke von Acrylplatten mithilfe des Cepstrum

Das vermessene Cepstrum findet sich in Abbildung 6a, die daraus erhaltenen Messwerte in Tabelle 6b. Es ergeben sich also zwei Werte für die Dicke der Platten. Als Schallgeschwindigkeit wird der aus dem Durchschallverfahren bestimmte Wert genutzt, da sein Fehlerintervall kleiner ist. In Tabelle 3a sind die bestimmte Werte für die Plattendicke angegeben. Die Laufzeitdifferenzen ergeben sich aus

$$\Delta t = \frac{t_2 - t_1}{2}. \quad (8)$$

Grenzschicht	$\Delta t/s$
Iris	5.82
Linse ein	10.68
Linse aus	16.50
Retina	69.60

(a) Messergebnisse.

Grenzschicht	l/mm	$\frac{l}{3}/mm$
Iris	4.11	1.37
Linse ein	7.53	2.52
Linse aus	14.81	4.94
Retina	52.24	17.42

(b) Berechnete Werte.

Tabelle 2: Dargestellt sind in a die Ergebnisse der Vermessung des Augenmodells im Maßstab 3:1, angegeben als Verfahrensbedingt doppelte Laufzeiten. In b finden sich die berechnete Abstände zwischen Schallsonde und den angegebenen Grenzschichten für das Augenmodell (Maßstab 3:1) und zurückgerechnet auf ein menschliches Auge.



(a) Ausschnitt des aufgenommenes Cepstrum.

Peak	t/s
1	4.43
2	8.67
3	13.19
4	17.43

(b) Messwerte.

Abbildung 6: Das Bild des Aufgenommenen Cepstrums wurde derart beschnitten, dass die Reflexionen der Grenzschichtend der Vorlaufstrecke nicht mitaufgenommen werden. Ebenfalls wurde der Bereich Oberhalb von 100 Einheiten der y-Achse (im Original ebenfalls Einheitenlos) abgeschnitten, da dort keine Informationen enthalten sind. Bei den Messwerten in b gehören 1. und 2. sowie 3. und 4. Messwert so zusammen, dass 3. und 4. Reflexionen von 1. und 2. sind. Wieder handelt es sich um die doppelten Werte.

Paar	Platte 1		Platte 2	
	$\Delta t/s$	d/mm	$\Delta t/s$	d/mm
1	2.215	6.04 ± 0.05	4.335	11.82 ± 0.09
2	2.260	6.16 ± 0.05	4.380	11.95 ± 0.09

(a) Berechnete Werte.

Platte	d/mm
1	7
2	12

(b) Vergleichswerte.

Tabelle 3: Dargestellt sind in a die Ergebnisse für beide gemessenen Paare von Peaks. Die Differenz Δt der Laufzeiten ist dabei aus den Messwerten (siehe Tabelle 6b) berechnet und halbiert, da die doppelte Laufzeit gemessen wurde. In b finden sich die durch direkte Vermessung der Platten erhaltenen Werte.

Wieder ist der Faktor $1/2$ notwendig, da doppelte Laufzeiten gemessen wurden. Aus dem Wert für Δt lässt sich dann durch $d = ct$ der Durchmesser der vermessenen Platte bestimmen.

4 Diskussion

Bei allen Messwerten ist zu beachten, dass die erhaltenen Abweichungen bei den hohen Schallgeschwindigkeiten in den Material leicht zu großen Abweichungen führen. Dieser Fehler wiegt insbesondere bei den letzten beiden Versuchsteilen schwer, da der erhobene Datensatz dort extrem klein war, weshalb ein ansonsten durch die statistische Behandlung der Daten veringert Fehler dort ungedämpft in die Ergebnisse eingeht.

4.1 Schallgeschwindigkeitsmessung

Beide Ergebnisse liegen innerhalb der gegenseitigen Messungenauigkeit. Ebenfalls liegt der Literaturwert [Oly17] von 2730 m s^{-1} in den Intervallen beider Ergebnisse. Das Fehlerintervall des durch die Durchschallungsmessung gewonnen Wertes ist jedoch geringer als das des Wertes aus der Impuls-Echo-Methode. Dies erscheint logisch, muss das Signal bei der Impuls-Echo-Methode den doppelten Weg zurücklegen, weshalb eventuelle Fehler im Material einen größeren Einfluss haben und somit eine größere systematische Fehlerquelle bieten. Auffällig ist die große Abweichung zwischen den Werten der sondeninternen Laufzeit. Da der Fehler des bei der Messung per Impuls-Echo-Verfahren gewonnenen Wertes jedoch annähernd so groß ist wie der Wert selbst liegt die Vermutung nah, dass hier ein Problem vorliegt. Da jedoch beide Werte aus einer Ausgleichsrechnung mit einem sehr begrenzten Datensatz gewonnen wurden und keine Literaturwerte vorhanden sind, kann hier nur vermutet werden. Das aufnehmen weiterer Messwerte würde helfen, die Ergebnisse zu verifizieren.

4.2 Dämpfungsverhalten

Die erhaltenen Werte liegen jeweils im Bereich der gegenseitigen Messungenauigkeit. Hohe relative Fehler der Werte lassen sich wieder durch den begrenzten Datensatz erklären. Ebenfalls problematisch sind die langen Laufzeiten bei der Impuls-Echo-Messung. Die erhaltenen Daten sind daher bereits stärker gedämpft, weshalb die Ausgleichsrechnung statisch signifikantere Fehler ergeben sollte. Ein Literaturwert [mbH17] von $1.41/\text{cm}$ liegt in keinem der beiden Fehlerintervalle. Auch die relativen Fehler sind mit 85 % für die Durchschallungsmessung sowie 77 % sehr hoch. Der Schluss eines systematischen Fehlers liegt nahe.

4.3 Messung am Augenmodell

Für das Augenmodell ergeben sich realistische Werte. Der Durchmesser eines menschlichen Auges liegt laut Literatur [Mat17] zwischen 17 mm und 30 mm, je nach Alter des

betrachteten Präparates. Der ermittelte Werte trifft daher auf das Auge eines Kleinkindes zu.

4.4 Dickenbestimmung per Cepstrum

Im Vergleich mit den durch direkte Vermessung erhaltenen Werten zeigen sich Abweichungen. Lediglich bei einem der vier Werte liegt der Vergleichswert im Fehlerintervall. Die maximale relative Abweichung ist mit 0.96 mm (dies entspricht 13 %) jedoch vergleichsweise gering. Insbesondere bei den in Acryl vorhandenen hohen Schallgeschwindigkeiten kann dies leicht zu großen Abweichungen führen.

Literatur

- [Dor17] TU Dortmund. *US1: Grundlagen der Ultraschalltechnik*. 25. Apr. 2017. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/UltraschallGL.pdf>.
- [Mat17] Mathematik.de. *Hintergrund-Information: Das Menschliche Auge in Zahlen*. 28. Apr. 2017. URL: http://www.mathematik.de/spudema/spudema_beitraege/rooch/fenster/auge.html.
- [mbH17] GAMPT mbH. *Versuchsanleitungen - Ultraschall im Praktikum*. 9. Mai 2017. URL: http://www.gampt.de/content/cms/downloads/pdf/experiments_deu_web.pdf.
- [Oly17] Olympus. *Material Sound Velocities*. 28. Apr. 2017. URL: <http://www.olympus-ims.com/de/ndt-tutorials/thickness-gage/appendices-velocities>.