

Ultraschall 1

# Grundlagen

1. Januar 1970

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
2.1	Ultraschall . . . . .	3
2.2	Beschreibung durch Wellenfunktionen . . . . .	3
2.3	Reflexion und Transmission . . . . .	4
2.4	Messverfahren . . . . .	4
2.4.1	Durchschallungsverfahren . . . . .	4
2.4.2	Impuls-Echo-Verfahren . . . . .	4
2.5	Scanmethoden . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Durchführung</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>6</b>
4.1	Messung der Schallgeschwindigkeit . . . . .	6
4.2	Bestimmung der Dämpfung . . . . .	7
4.3	Schallgeschwindigkeit mit Puls-Echo Verfahren . . . . .	7
4.4	Schallgeschwindigkeitsmessung mit dem Durchschallungsverfahren . . . . .	9
4.5	Bestimmung der Plattendicke . . . . .	10
4.6	Bestimmung der Abstände in einem Augenmodell . . . . .	11
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>12</b>
	<b>Literatur</b>	<b>12</b>

# 1 Zielsetzung

Ziel dieses Versuches ist die Bestimmung von Längen mittels Ultraschall. Zum einen die Längen von Acrylzylindern und zum anderen Abmessungen in einem Augenmodell.

## 2 Theorie

Ultraschall liegt in der Frequenz über dem hörbaren Schall, folglich beginnt der Ultraschallbereich bei  $\nu = 20 \text{ kHz}$ . Er endet beim Übergang zum Hyperschall bei  $\nu = 1 \text{ GHz}$ .

### 2.1 Ultraschall

Die Ultraschallwellen breiten sich, wie Schallwellen, in Luft und Gasen longitudinal aus. Die Amplituden sind Druckschwankungen, sodass die Ultraschalltechnik in der Werkstoffprüfung als Methode der zerstörungsfreien Prüfung verwendet werden kann. Ultraschallwellen können mit Piezokristallen erzeugt werden. Diese werden in einem elektrischen Feld zu Schwingungen angeregt, sodass Ultraschallwellen abgestrahlt werden. Dieser piezo-elektrische Effekt kann auch zum detektieren von Ultraschallwellen verwendet werden.

### 2.2 Beschreibung durch Wellenfunktionen

Die Wellenfunktion, nach [1],

$$p(x, t) = p_0 + v_0 Z \cos(\omega t - k x) \quad (1)$$

beschreibt die Ausbreitung der longitudinalen Schallwelle.

$$Z = c \cdot \rho \quad (2)$$

ist die akustische Impedanz des jeweiligen Materials. Dabei ist  $c$  die Schallgeschwindigkeit im Medium:

$$c_{\text{Fl}} = \sqrt{\frac{1}{\kappa \cdot \rho}}, \quad (3)$$

mit der Kompressibilität  $\kappa$  des Stoffes und der Dichte  $\rho$ . In Festkörpern ist die Schallausbreitung nicht rein longitudinal, sondern durch Schubspannungen auch transversal. Für die Schallgeschwindigkeit wird daher nicht die Kompressibilität, sondern das Elastizitätsmodul verwendet

$$c_{\text{Fest}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (4)$$

Durch die Streuungen und Absorptionen im Festkörper nimmt die Intensität der Welle exponentiell mit

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad (5)$$

ab.

## 2.3 Reflexion und Transmission

Die durch eine Grenzschicht transmittierte Welle hat den Anteil

$$T = 1 - R \quad (6)$$

an der einfallenden Welle.  $R$  ist der Reflexionskoeffizient

$$R = \left( \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2. \quad (7)$$

Mit den jeweiligen akustischen Impedanzen

$$Z_i = c_i \cdot \rho_i. \quad (8)$$

## 2.4 Messverfahren

Beim messen mit Ultraschall gibt es verschieden Methoden wie die Messwerte genommen werden, sowie welche Messwerte beim quasi gleichen Messaufbau genommen werden.

### 2.4.1 Durchschallungsverfahren

Beim Durchschallungsverfahren wird der Ultraschall in eine Probe geleitet und auf der gegenüberliegenden Seite vom Sender aufgefangen. Wenn die Probe inhomogen ist, kann dies durch die abgeschwächte Intensität erkannt werden. Weitere Aussagen, wie die Position der Inhomogenität sind nicht möglich.

### 2.4.2 Impuls-Echo-Verfahren

Wie der Name des Verfahrens sagt, wird eine Ultraschallwelle als Impuls in das Probestück geschickt, durch die Reflexion an den Grenzflächen von Inhomogenitäten entstehen zurücklaufende Wellen. Diese werden von der Ultraschallsonde detektiert.

Durch die Laufzeit  $t$  kann bei bekannter Schallgeschwindigkeit im Material die Strecke bis zur Verunreinigung nach

$$s = \frac{1}{2} \cdot c \cdot t \quad (9)$$

berechnet werden. Ist die Länge der Probe bekannt, kann alternativ auch die Schallgeschwindigkeit in dem Medium bestimmt werden:

$$c = 2 \cdot \frac{s}{t}. \quad (10)$$

## 2.5 Scanmethoden

Für das Impuls-Echo-Verfahren gibt es verschiedene Auswertungsmethoden.

A-Scan steht für Amplitudenscan, hierbei werden die Amplituden betrachtet, um auch die Abschwächung bestimmen zu können.

Bei einem B-Scan wird ein zweidimensionales Graustufenbild aufgenommen. Der Grauton steht dann für die Intensität der zurücklaufenden Welle.

Beim TM-Scan wird ein Ultraschallsignal mit hoher Wiederholungsfrequenz verwendet. Durch die schnelle Abfolge an Signalen kann ein Videoähnliches Signal aufgenommen werden.

### 3 Durchführung

Alle Messungen werden mit einer 2 MHz-Sonde durchgeführt und mit einem bereitgestellten Programm ausgewertet.

Die ersten Messungen werden alle als Impuls-Echo-Scan durchgeführt, als Koppelmittel wird bei allen Messungen mit den Acrylzyklindern bidestilliertes Wasser verwendet.

Zuerst wird von einem Acrylzyklinder die Länge mit einer Schieblehre bestimmt, dann werden in einem A-Scan die Differenz zwischen den detektierten Impulsen gemessen. Aus diesen Werten wird die Schallgeschwindigkeit in Acryl bestimmt und ins Programm eingetragen, zur Tiefenmessung.

Für alle 7 Acrylzyklindern wird ein A-Scan durchgeführt, um die Dämpfung bestimmen zu können. Von allen Acrylzyklindern wird die Länge mit der Schieblehre bestimmt und in der gleichen Messung wie davor, die Länge, sowie die Laufzeit bestimmt, ebenso für zwei Kombinationen von Zylindern.

Mit einer zweiten Ultraschallsonde werden bei allen Zylindern die Laufzeiten beim Durchschallungs-Verfahren bestimmt.

Zwei Acrylplatten und ein Zylinder mit der Länge 40 mm gestapelt, es wird eine Ultraschallsonde am Zylinder angekoppelt und eine Messung mit 3 Peaks gespeichert. Mit einer Fast-Fourier-Transformation wird die Frequenzverteilung bestimmt.

Die letzte Messung wird an einem Augenmodell im Maßstab 1:3, [1], durchgeführt. Mit Koppelgel wird eine Ultraschallsonde an der Hornhaut angekoppelt, vgl. Abbildung 1, und die Winkelkombination gesucht, bei der die Maximale Anzahl an Peaks angezeigt wird.

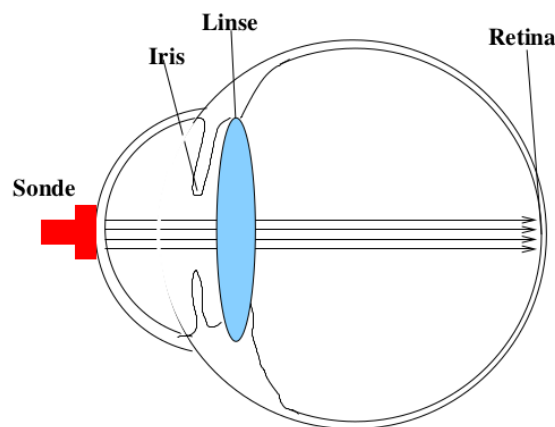


Abbildung 1: Skizze des Augenmodells aus [1]

## 4 Auswertung

### 4.1 Messung der Schallgeschwindigkeit

Mit Formel (10) wird die Schallgeschwindigkeit aus der ersten Messung in Acryl bestimmt. Die Werte stehen in Tabelle 1. Nachdem die berechnete Geschwindigkeit im Programm eingetragen wurde, wird eine Tiefenmessung durchgeführt.

**Tabelle 1:** Werte der Schallgeschwindigkeitsmessung.  $c_{lit}$  aus [2].

Schieblehre $l / \text{mm}$	Tiefenmessung $h / \text{mm}$	Puls 1		Puls 2		$\Delta t / \mu\text{s}$	Schallgeschwindigkeit	
		$U / \text{V}$	$t / \mu\text{s}$	$U / \text{V}$	$t / \mu\text{s}$		$c_l / \text{m/s}$	$c_{lit} / \text{m/s}$
39,7	41	1,21	30,1	0,15	59,2	29,1	2728,5	2730

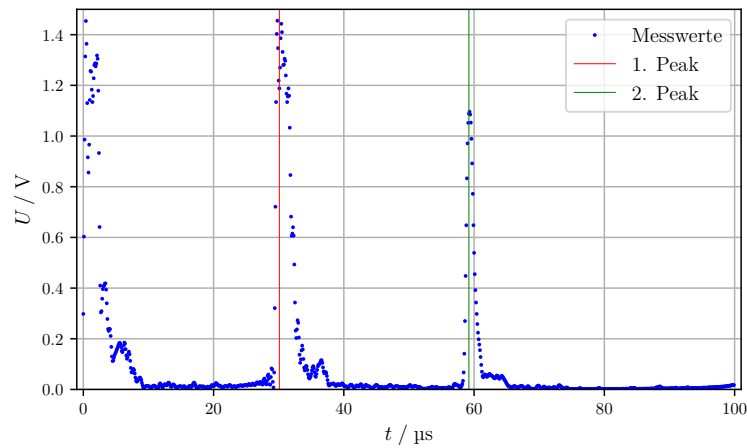
Es ergibt sich eine prozentuale Abweichung der beiden bestimmten Längen zueinander von

$$\Delta s_{\%} = \frac{|\text{Soll} - \text{Ist}|}{\text{Soll}} \cdot 100 \% = \frac{(41 - 39,7) \text{mm}}{39,7 \text{mm}} \cdot 100 \% = 3,275 \% . \quad (11)$$

Für die Schallgeschwindigkeit ergibt sich

$$\Delta c_{\%} = \frac{2730 - 2728,5}{2730} \cdot 100 \% = 0,05 \% . \quad (12)$$

Mit einer eingestellten Verstärkung verschiebt sich das Bild zu dem in Abbildung 2.



**Abbildung 2:** Messwerte der ersten Tiefenmessung, mit Verstärkung.

## 4.2 Bestimmung der Dämpfung

Um die Dämpfung zu bestimmen wird ein Fit der Form

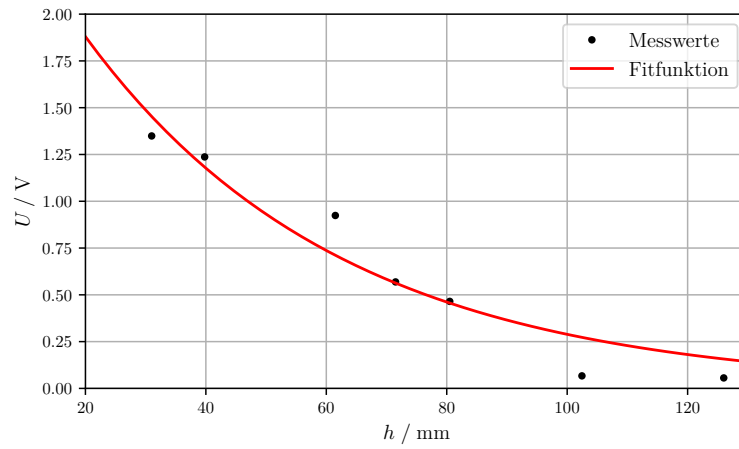
$$f(x) = \exp(\alpha \cdot x + b) \quad (13)$$

angesetzt. Die Parameter folgen mit Scipy zu

$$\alpha = \frac{-0,023 \pm 0,004}{\text{mm}} \quad (14)$$

$$b = 1,10 \pm 0,18. \quad (15)$$

Der Graph mit Fit ist in Abbildung 3 dargestellt.



**Abbildung 3:** Messwerte und Fit für die Dämpfung.

Für die Regression wurden nur die Zylinder benutzt, welche einzeln gemessen wurden, da bei den zusammengesetzten Zylinder nicht ganz klar war, welcher Peak nun die Reflektion an der hintersten Wand darstellt.

## 4.3 Schallgeschwindigkeit mit Puls-Echo Verfahren

Mit den Werten aus Tabelle 2 wird die Schallgeschwindigkeit nach Gleichung (10) bestimmt. Der Mittelwert

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N x_i \quad (16)$$

mit dem Fehler

$$\Delta \bar{x} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{k=0}^N (x_k - \bar{x})^2} \quad (17)$$

**Tabelle 2:** Messwerte und Ergebnisse der Absorptions- und Schallgeschwindigkeitsmessung mit dem Puls-Echo-Verfahren.

$h_{\text{schieb}} / \text{cm}$	$U_2 / \text{V}$	$h_{\text{tief}} / \text{cm}$	$t / \mu\text{s}$	$c / \text{m/s}$
31,0	1,349	32,6	23,9	2728,03
39,8	1,237	41,3	30,3	2726,07
61,5	0,924	63,4	46,4	2732,76
71,5	0,569	41,8	30,7	2723,13
80,5	0,465	81,8	60,0	2726,67
92,7	0,038	95,1	69,7	2728,84
102,45	0,067	104,6	76,8	2723,96
126,0	0,056	121,7	89,0	2734,83

ist

$$c = (2728 \pm 1) \frac{\text{m}}{\text{s}} . \quad (18)$$

Eine lineare Ausgleichsrechnung nach

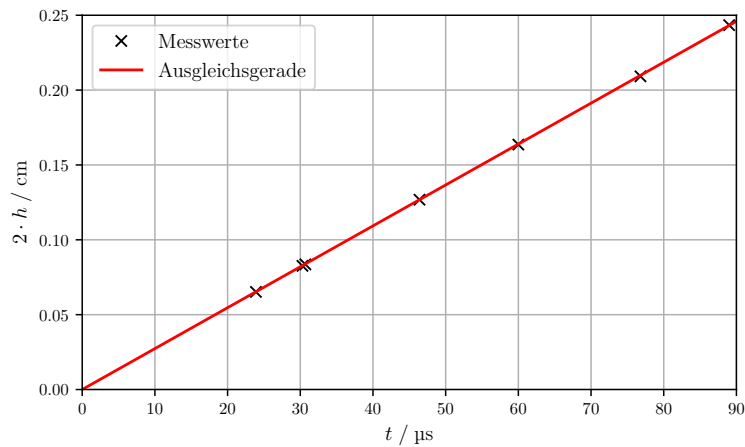
$$2 \cdot h = m \cdot t + b \quad (19)$$

ergibt

$$m = (2732 \pm 4) \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (20)$$

$$b = (-0,0002 \pm 0,0003) \text{ m} . \quad (21)$$

Dieses ist in Abbildung 4 zu sehen.



**Abbildung 4:** Messwerte und Ausgleichsgerade zur Schallgeschwindigkeitsmessung mit dem Puls-Echo-Verfahren.



#### 4.4 Schallgeschwindigkeitsmessung mit dem Durchschallungsverfahren

Mit den Messwerten aus Tabelle 3 berechnet sich der Mittelwert der Schallgeschwindigkeit nach Gleichung (16), mit dem Fehler nach Gleichung (17), zu

$$c = (2584 \pm 24) \frac{\text{m}}{\text{s}} . \quad (22)$$

Eine lineare Ausgleichsrechnung nach Formel (19) ergibt

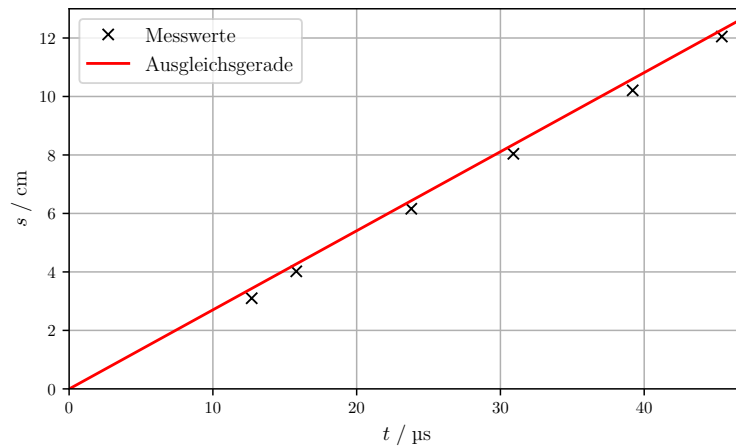
$$m = (2705 \pm 23) \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (23)$$

$$b = (-0,0030 \pm 0,0007) \text{ m} . \quad (24)$$

Die Steigung  $m$  ist gerade die Schallgeschwindigkeit mit dem prozentualen Fehler (11)

$$\Delta c_{\%} = \frac{2730 - 2705}{2730} \cdot 100 \% = 0,9 \% . \quad (25)$$

Die Ausgleichsgerade ist in Abbildung 5 abgebildet.



**Abbildung 5:** Messwerte und Ergebnisse des Durchschallungsverfahrens.

**Tabelle 3:** Messwerte und Ergebnisse des Durchschallungsverfahrens.

$s / \text{cm}$	$t / \mu\text{s}$	$c / \text{m/s}$
31,0	35,8	2597,77
40,2	45,7	2638,95
31,0	12,7	2440,94
40,2	15,8	2544,30
61,6	23,8	2588,24
80,4	30,9	2601,94
102,1	39,2	2604,59
120,5	45,4	2654,19

#### 4.5 Bestimmung der Plattendicke

Die Messwerte aus Tabelle 4 sind aus der Abbildung 6 genommen. Die Höhe  $h$  bestimmt sich nach

$$h = c \cdot t, \quad (26)$$

die Differenzen der Höhen mit

$$h_{\text{diff},i} = |h_i - h_{i+1}|. \quad (27)$$

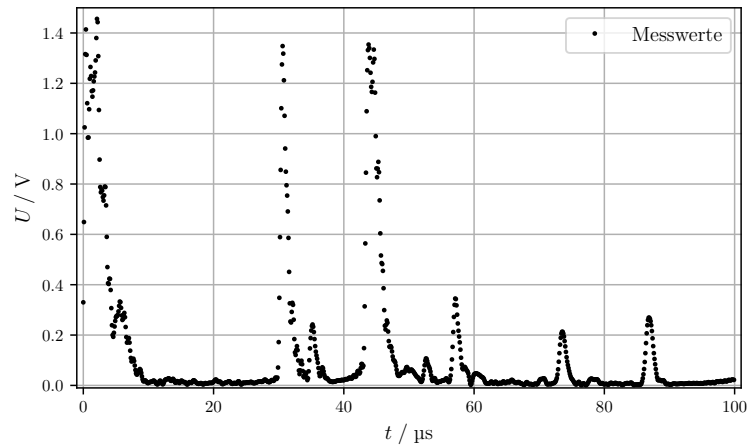
Als Schallgeschwindigkeit wird der Wert

$$c_{\text{lit}} = 2730 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (28)$$

aus [2] verwendet.

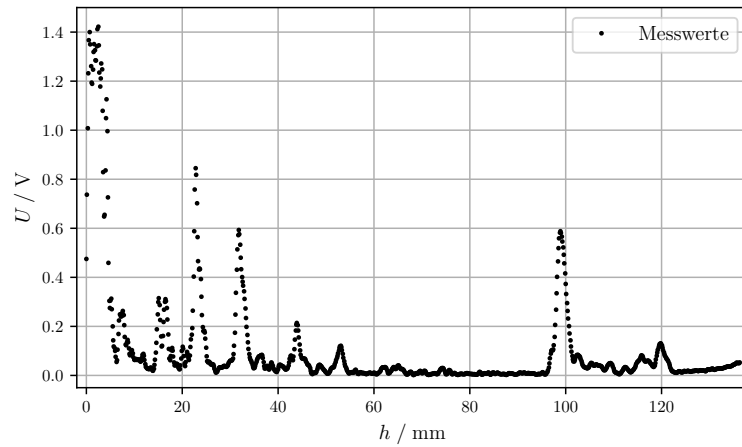
**Tabelle 4:** Höhen der Platten und des Zylinders.

Objekt	$t / \mu\text{s}$	$h / \text{cm}$	$h_{\text{diff}} / \text{cm}$	$h_{\text{schieb}} / \text{cm}$
Wasserschicht	0,4	0,546	0,546	
Zylinder	30,6	41,769	41,223	41,17
Platte 1	43,8	59,787	18,018	19,7
Platte 2	57,1	77,941	18,155	19,4



**Abbildung 6:** Messwerte der Mehrfachreflexionsmessung.

#### 4.6 Bestimmung der Abstände in einem Augenmodell



**Abbildung 7:** Echo-Puls Verfahren für ein gegebenes Augenmodell.

Um die Abstände in einem Augenmodell zu bestimmen wurde zunächst mit einem A-Scan die Iris, die Linse und die Retina gescannt. In Abbildung 7 ist die Tiefenmessung aufgetragen. Als Iris wurde das erste Maximum identifiziert, das zweite Maximum wird die Position der Linse darstellen. Das dritte Maximum ist vermutlich ein Messfehler und wird daher ignoriert. Das letzte Maximum wird bei der Retina liegen. Die Abstände des Auges sind im folgenden dargestellt und können aus dem Diagramm entnommen werden.

**Tabelle 5:** Abstände des Augenmodells.

Abstände	Messwert / cm
Sonde-Iris	0,125
Sonde-Linse	1,14
Sonde-Retina	4,495

## 5 Diskussion

Die erste Messung der Schallgeschwindigkeit mit dem Puls-Echo-Verfahren an nur einem Zylinder liefert ein Ergebnis mit nur 0,05 % Abweichung. Die Koppelschicht mit Wasser hat bei dieser Messung also keinen großen Einfluss.

Die Dämpfungskonstante  $\alpha$  ist bei uns negativ, was im Exponenten zu einem Abfall führt. Das ist sinnvoll. Der Vergleich mit der Dämpfungskonstanten, einer anderen Messung am gleichen Objekt, von  $\alpha = 0,017$  [3] zeigt, dass unser Wert von  $\alpha = -0,023 \pm 0,004$  eine Abweichung von 2  $\sigma$ -Umgebungen hat. Da der erste Wert aus einer Messung stammt, ist dieser auch mit einem unbekannten Fehler behaftet. Die Messungen mit den gestapelten Zylindern mussten ausgelassen werden, da die Reflexionen nicht eindeutig zugeordnet werden konnten.

Die Schallgeschwindigkeitsbestimmung mit diesen Werten ergibt einen Wert von  $c = (2732 \pm 4) \text{ m/s}$ , der Literaturwert liegt somit in der 1- $\sigma$ -Umgebung unseres Wertes. Auch das Durchschallungsverfahren liefert eine Schallgeschwindigkeit nahe des Literaturwertes, hier war das Auftragen des Wassers als Koppelschicht aufgrund der Schwerkraft schwieriger, was eine mögliche systematische Fehlerquelle ist.

Die Plattendicken, sowie die Zylinderhöhe stimmen gut mit den gemessenen Werten überein. Hier ist das Wasser als Koppelmittel wieder der größte Fehler.

Die Messwerte der Messung mit dem Auge sehen zunächst zu groß aus, da das Augenmodell jedoch im Maßstab 1:3 war, passen diese doch.

## Literatur

- [1] *Anleitung zu US1, Ultraschall - Grundlagen*. URL: <http://129.217.224.2/HOME/PAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/UltraschallGL.pdf> (besucht am 12.06.2018).
- [2] *Schallgeschwindigkeit in Materialien*. URL: <https://www.olympus-ims.com/de/ndt-tutorials/thickness-gage/appendices-velocities/> (besucht am 17.06.2018).
- [3] *V35 Musterprotokoll*. URL: [https://www.tu-chemnitz.de/physik/FPRAK/F-Praktikum/Versuche\\_alt/V35\\_Musterprotokoll.pdf](https://www.tu-chemnitz.de/physik/FPRAK/F-Praktikum/Versuche_alt/V35_Musterprotokoll.pdf) (besucht am 26.06.2018).