

US1

Grundlagen der Ultraschalltechnik

Philip Jaletzky
philip.jaletzky@udo.edu

Matthias Maile
matthias.maile@udo.edu

Durchführung: 13. April 2021

Abgabe: 20. April 2021

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1. Theorie	3
1.1. Grundlagen zu Schallwellen	3
1.2. Erzeugung von Ultraschall	4
1.3. Verwendung in der Medizin	4
2. Durchführung	5
2.1. Acrylquader mit Fehlstellen	5
2.2. Ausmessung des Augenmodells	5
3. Auswertung	5
3.1. Acrylquader	5
3.1.1. Schallgeschwindigkeit	5
3.1.2. Dämpfung	7
3.2. Augenmodell	8
4. Diskussion	9
Literatur	9
A. Anhang	11

Zielsetzung

In diesem Versuch soll mittels Ultraschallechographie die Schallgeschwindigkeit in Acryl bestimmt werden.

1. Theorie

1.1. Grundlagen zu Schallwellen

Schallwellen lassen sich gemäß ihrer Frequenz in verschiedene Bereiche aufteilen. Einige wichtige Frequenzbereiche sind

- Infraschall ($f < 16 \text{ Hz}$),
- das vom Menschen wahrnehmbare Spektrum ($16 \text{ Hz} < f < 20 \text{ kHz}$),
- Ultraschall ($20 \text{ kHz} < f < 1 \text{ GHz}$),
- und Hyperschall ($f > 1 \text{ GHz}$).

In Luft breitet sich Schall als longitudinale Welle aus, die sich aufgrund von Druckschwankungen

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

fortbewegt. Wie bei elektromagnetischen Wellen lassen sich auch bei Schallwellen Phänomene wie Reflexion und Brechung beobachten. Im Gegensatz zum Licht ist bei Schall die Phasengeschwindigkeit druck-, dichte- und somit materialabhängig. Für Flüssigkeiten wird das durch die Kompressibilität κ ausgedrückt. Damit lautet die Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten

$$c_{\text{Fl}} = \sqrt{\frac{1}{\kappa \rho}}. \quad (2)$$

Die Betrachtung von Schallwellen in Festkörpern bringt jedoch mehrere Hürden mit sich: Aufgrund von Schubspannungen sind hier auch transversale Wellen möglich. Diese haben dabei auch eine andere Schallgeschwindigkeit als die longitudinalen Wellen im selben Festkörper. Für Festkörper lässt sich die Schallgeschwindigkeit

$$c_{\text{Fe}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

berechnen. Dabei tritt der Elastizitätsmodul E als Pendant zur Kompressibilität κ^{-1} eine Flüssigkeit auf. Die Schallgeschwindigkeit ist aber grundsätzlich richtungsabhängig. Schallausbreitung ist allermeistens verlustbehaftet. Die Intensität nimmt dabei exponentiell ab gemäß

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad (4)$$

mit dem Absorptionskoeffizienten α . Luft hat einen sehr großen Absorptionskoeffizienten, weswegen zwischen Schallgeber und zu untersuchendem Objekt ein Kontaktmittel verwendet wird.

Wie oben schon beschrieben, kann bei Schall Reflexion beobachtet werden. Der Reflexionskoeffizient

$$R = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right) = \frac{\text{Intensität des reflekt. Schalls}}{\text{Intensität des einfallenden Schalls}} \quad (5)$$

setzt sich aus den akkustischen Impedanzen

$$Z = \rho \cdot c \quad (6)$$

der beiden Materialien zusammen.

1.2. Erzeugung von Ultraschall

Ultraschall kann auf unterschiedlicher Weise erzeugt werden, hier wird die Erzeugung mittels piezoelektrischer Kristalle erläutert. Eben erwähnter Kristall wird dazu in einem zeitlich veränderlichen, elektrischen Feld zu Schwingungen angeregt. Bei diesen Schwingungen werden Ultraschallwellen abgestrahlt, bei Resonanz (Anregfrequenz \approx Eigenfrequenz) sind sehr große Amplituden möglich. Ein Vorteil vom Piezokristall ist, dass er auch als Schallempfänger benutzt werden kann; die eintreffenden Schallwellen regen dann den Kristall zu Schwingungen an.

1.3. Verwendung in der Medizin

Ein wichtiges Anwendungsgebiet des Ultraschalls liegt in der Medizin als bildgebendes Verfahren. Zwei Verfahren sind das Durchschallungs- und das Impuls-Echo-Verfahren.

Beim *Durchschallungs-Verfahren* wird mit getrenntem Sender und Empfänger gearbeitet, wobei der Schallgang durch das Probenstück durchführt. Fehlstellen werden dann als abgeschwächtes Signal am Empfänger deutlich, die Tiefe einer Fehlstelle kann bei einer einzelnen Messung allerdings nicht bestimmt werden.

Beim *Impuls-Echo-Verfahren* ist der Ultraschallsender gleichzeitig auch der Empfänger. Das Verfahren beruht auf der zuvor beschriebenen Reflexion an Grenzflächen, welche ebenfalls an der Fehlstelle in der Probe auftritt. Nach ausgesendetem Impuls werden die reflektierten Schallsignale aufgenommen.

Der Vorteil des Impuls-Echo-Verfahren ist der, dass auch die Tiefe der Fehlstelle detektiert werden kann. Aus der Latenz des Echos kann bei bekannter Schallgeschwindigkeit die Tiefe gemäß

$$s = \frac{1}{2}ct \quad (7)$$

bestimmt werden.

[1]

2. Durchführung

Nach dem theoretischen Hintergrund soll nun die Durchführung beschrieben werden. Von den erwähnten Verfahren wird das Impuls-Echo-Verfahren angewendet, die zu untersuchenden Objekte sind ein Acrylquader und ein vergrößertes Modell vom menschlichen Auge.

2.1. Acrylquader mit Fehlstellen

Damit im Messprogramm die tatsächlichen Tiefen bekannt sind, sollen die im Acrylquader eingelassenen Fehlstellen mit einer Schieblehre bemessen werden.

Mit einer 2MHz-Sonde wird nun die Schalllaufzeit von den Rändern zu den Fehlstellen gemessen werden. Dabei muss zwischen Sonde und Quader destilliertes Wasser oder Hydrogel aufgetragen werden. Für ein genaues Ergebniss sollen möglichst viele Fehlstellen ausgemessen werden.

Aus der Laufzeit kann mit den zuvor bestimmten, tatsächlichen Distanzen die Schallgeschwindigkeit bestimmt werden.

2.2. Ausmessung des Augenmodells

Im zweiten Versuchsteil sollen die Ausmessungen im Inneren eines Augenmodells bestimmt werden. Mit leichtem Druck wird die Sonde auf die Hornhaut gepresst und der Winkel variiert, bis das Echo von der Retina auf dem A-Scan zu sehen ist. Mit bekannten Schallgeschwindigkeiten können die Distanzen einzeln berechnet werden.

Beide Bauteile sollen nach dem Versuch gereinigt bzw. getrocknet werden.

3. Auswertung

3.1. Acrylquader

3.1.1. Schallgeschwindigkeit

Bei der Ultraschalluntersuchung des Acrylquaders wurde mittels Impuls-Echo-Verfahrens die Laufzeit der Ultraschallimpulse für verschiedene Fehlstellen im Acrylquader gemessen. Dazu wurden die Positionen der Fehlstellen mit einer Schieblehre ausgemessen. Da der Acrylquader 9 Fehlstellen hat und von 2 Seiten gemessen wurde ergeben sich 18 Datenpaare. Die Aufnahmen des A-Scans sind im Anhang zu finden. In Tabelle 1 sind die Ergebnisse mit der gemessenen Position der Fehlstelle und der Laufzeit des Ultraschallimpulses aufgelistet.

Tabelle 1: Messergebnisse zum Acrylquader

Position der Fehlstelle[mm]	Laufzeit Ultraschallimpuls [μs]
7	5,9
15,2	11,8
23,2	17,5
30,9	23,35
39,2	29,2
46,4	34,5
54,4	40
61,45	45,4
55,65	41,2
70,65	46,8
62,6	46,5
54,55	40,7
46,55	34,9
38,6	29,1
30,25	22,9
21,7	16,8
13,2	10,5
15,45	11,9

Aus diesen Daten lässt sich nach Gleichung 7 mit einer linearen Ausgleichsrechnung die Schallgeschwindigkeit in dem Acrylquader berechnen. Dies wird in Abbildung 1 dargestellt.

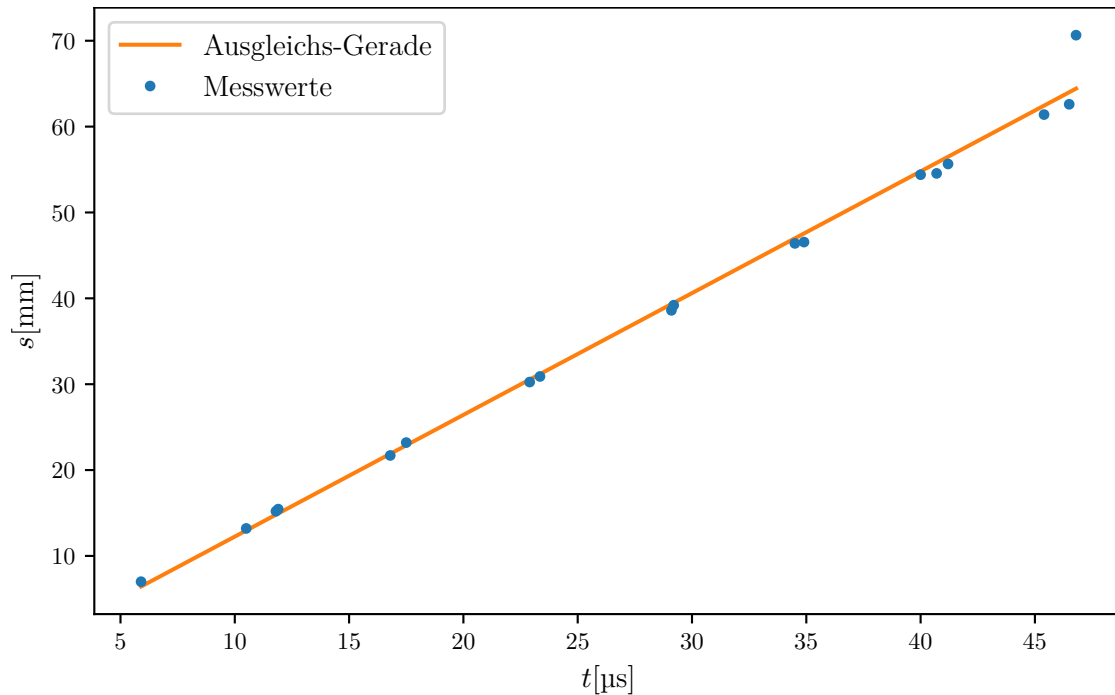


Abbildung 1: Diagramm: Position der Fehlstellen(s)-Laufzeit des Ultraschall Impulses(t), mit Ausgleichsgerade

Die lineare Ausgleichsrechnung mit Python ergibt für die Parameter der Geraden:
 $a = (1.41789 \pm 0.03051) \frac{mm}{\mu s}$ (Steigung)
 $b = -(1.92975 \pm 0.95282) mm$ (y-Achsenabschnitt)
 Diese Steigung entspricht also einer Schallgeschwindigkeit von:

$$c = 2 * a = (2835.78 \pm 61.02) \frac{m}{s}$$

3.1.2. Dämpfung

Zur Bestimmung des materialspezifischen Schwächungskoeffizienten von Acryl wurde die Schwächung der Amplitude der Pulse zwischen einer Fehlstelle und dem Ende des Acrylquaders untersucht. In Tabelle 2 wurden dazu jeweils beide Amplituden und die ausgemessene Distanz der beiden Stellen aufgelistet.

Tabelle 2: Messdaten zur Dämpfung

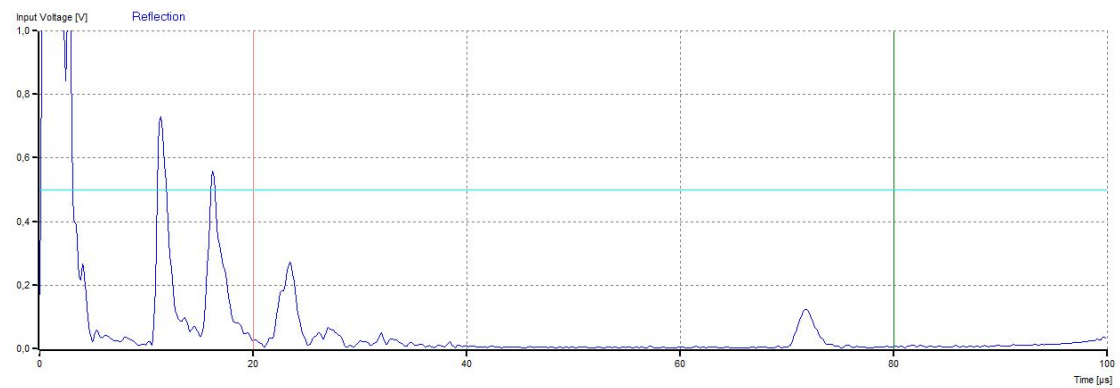
Amplitude1 [V]	Amplitude2 [V]	Distanz[mm]
1.196	0.445	48.65
1.168	0.385	65.3
0.9	0.569	57.3
0.841	0.403	49.6
0.975	0.477	41.3
0.927	0.354	34.1
0.852	0.253	26.1
0.645	0.244	19.1
1.229	0.219	65.05
0.435	0.258	17.9
0.683	0.205	25.95
0.984	0.194	33.95
1.098	0.226	41.9
0.798	0.274	50.25
1.229	0.219	65.05
0.994	0.145	67.3

Nach Gleichung 4 kann aus diesen Daten der Absorptionskoeffizient α berechnet werden. Eine Ausgleichsrechnung ergibt für α :

$$\alpha = (-0.0292 \pm 0.0131) \frac{1}{mm}$$

3.2. Augenmodell

In Abbildung 2 sind die Ergebnisse der Untersuchung des Augenmodells mit einem A-Scan mit Impuls-Echo-Verfahren zu sehen.

**Abbildung 2:** Spannungs-Zeit Diagramm zum A-Scan des Augenmodells

Die ersten beiden in Abbildung 2 zu sehenden Peaks werden als der Ein- und Austritt des Ultraschalls in die bzw. aus der Linse interpretiert. Der dritte Peak entspricht dem Echo des Ultraschalls von der Rückwand der Retina. Mit den bekannten Schallgeschwindigkeiten für die Linse ($c_L = 2500m/s$) und die Glaskörperflüssigkeit ($c_{GK} = 1410m/s$) sowie den Daten des A-Scans lassen sich die Abmessungen des Augenmodells berechnen. Aus den Messdaten konnten die Zeiten der 3 Peaks ermittelt werden:

1.Peak: $11,4\mu s$

2.Peak: $16,3\mu s$

3.Peak: $23,2\mu s$

Mit Gleichung 7 ergeben sich für die Maße des Augenmodells:

Tabelle 3: Abmessungen des Augenmodells

Strecke	Zeit [μs]	Weg[mm]
Hornhaut-Linse	11,4	8,037
Innerhalb der Linse	4,9	6,125
Linse-Retina	6,9	4.865

4. Diskussion

Für die Schallgeschwindigkeit c in Acrylglas wurde in der Auswertung des Versuchs ein Wert von $c = (2835.78 \pm 61.02)m/s$ ermittelt. Eine vorherige Literaturrecherche ergab einen Literaturwert von $c_{Lit} = 2750m/s$ für die Schallgeschwindigkeit in Acrylglas. Somit ist der im Versuch ermittelte Wert für c relativ nah am Literaturwert. Die geringe Abweichung vom Literaturwert ist mit systematischen Fehlern bei der Messung zu begründen. So führt unter anderem die Anpassungsschicht der Ultraschallsonden zu einem systematischen Fehler bei den Messungen.

Bei der Untersuchung des Augenmodells hat sich als Gesamtlänge (bzw. Durchmesser) des Auges ein Wert von circa 19 mm ergeben. Dies ist ein realistischer Wert. Geringfügige Abweichungen können damit erklärt werden, dass das Augenmodell schon etwas älter war und ein paar leichte Risse auf der Oberfläche aufwies, was den systematischen Fehler bei der Messung noch erhöhen kann.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuchsanleitung zu Versuch US1: Grundlagen der Ultraschalltechnik*.

A. Anhang

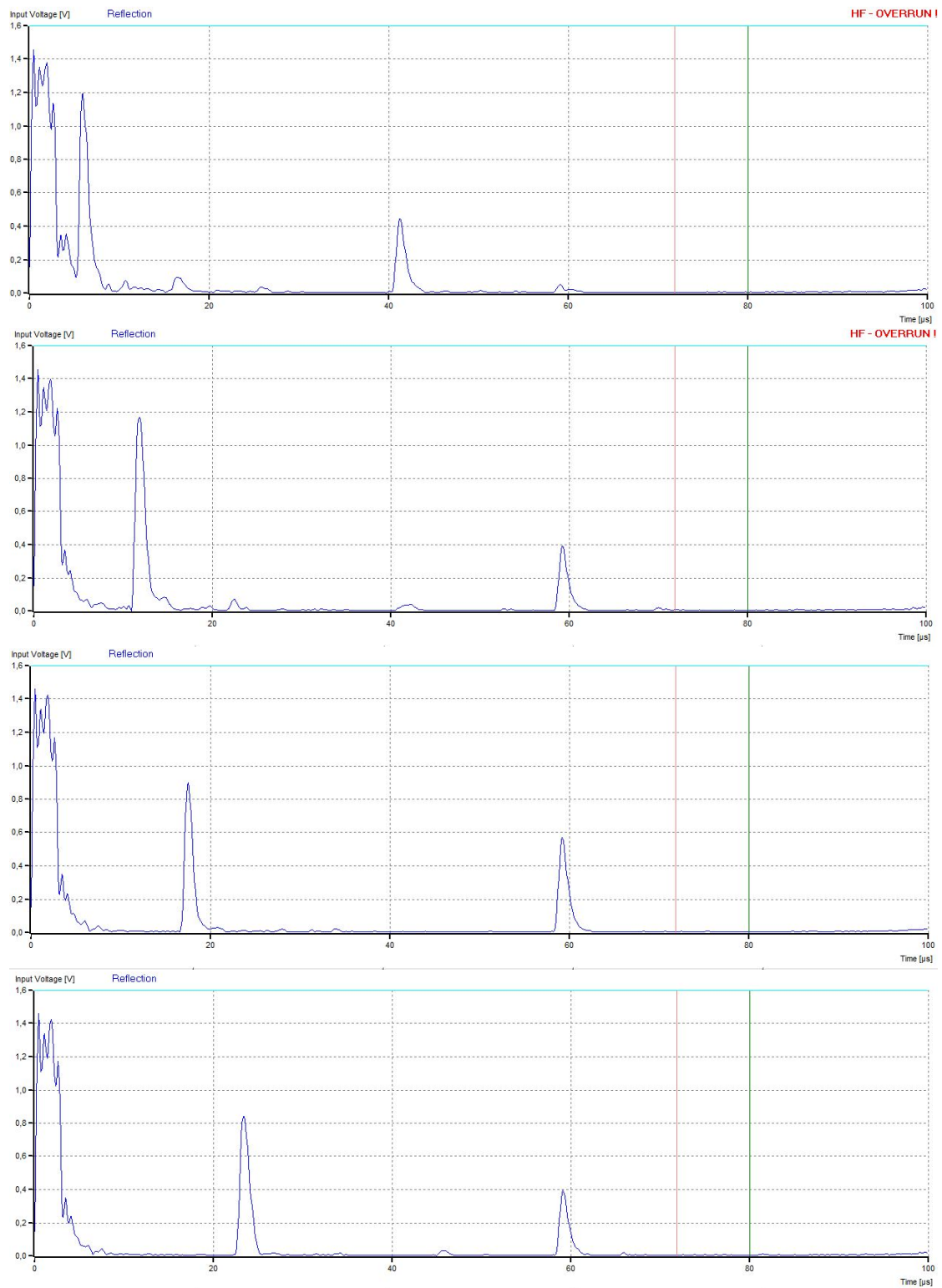


Abbildung 3: Messergebnisse1

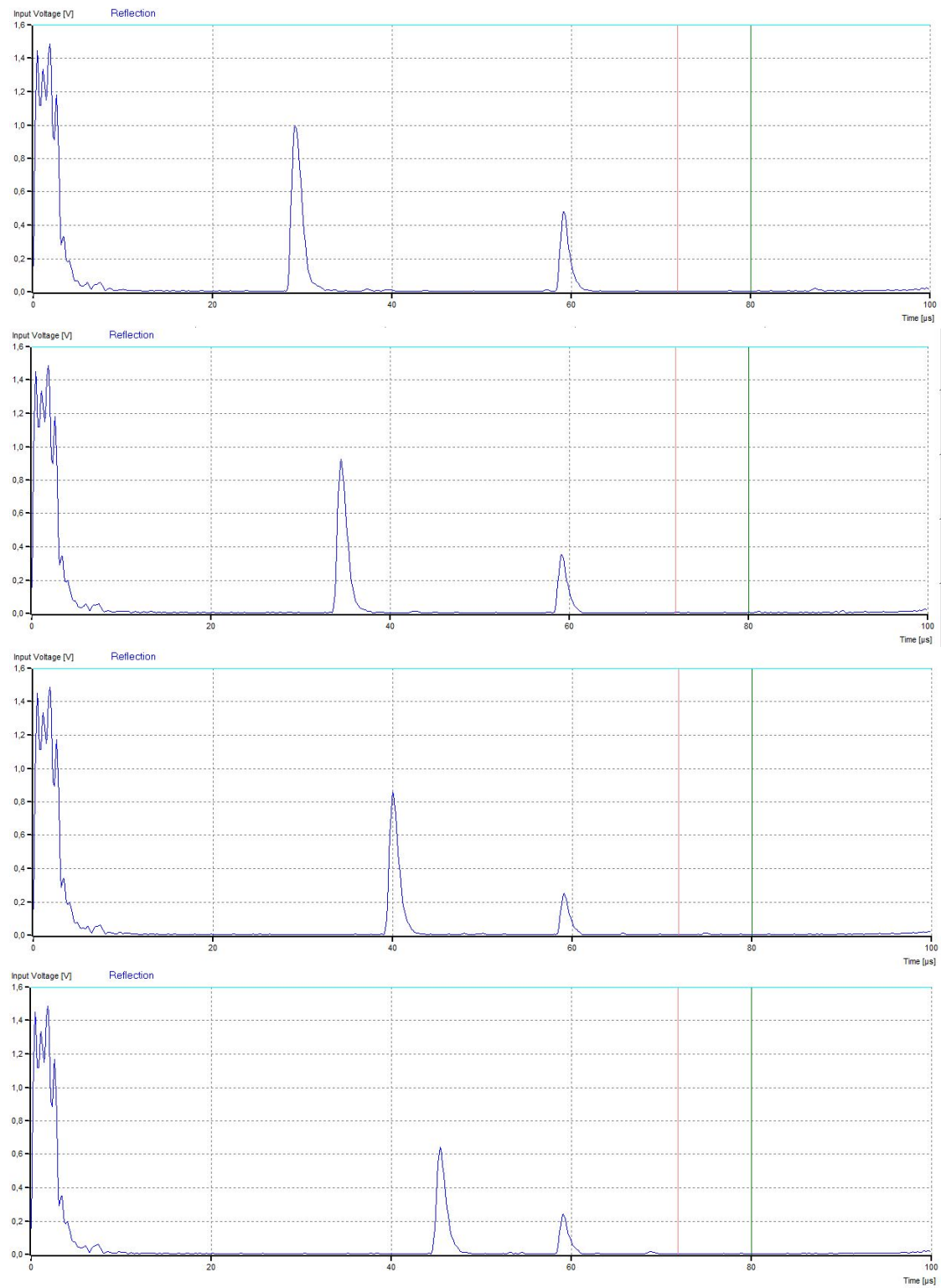


Abbildung 4: Messergebnisse2

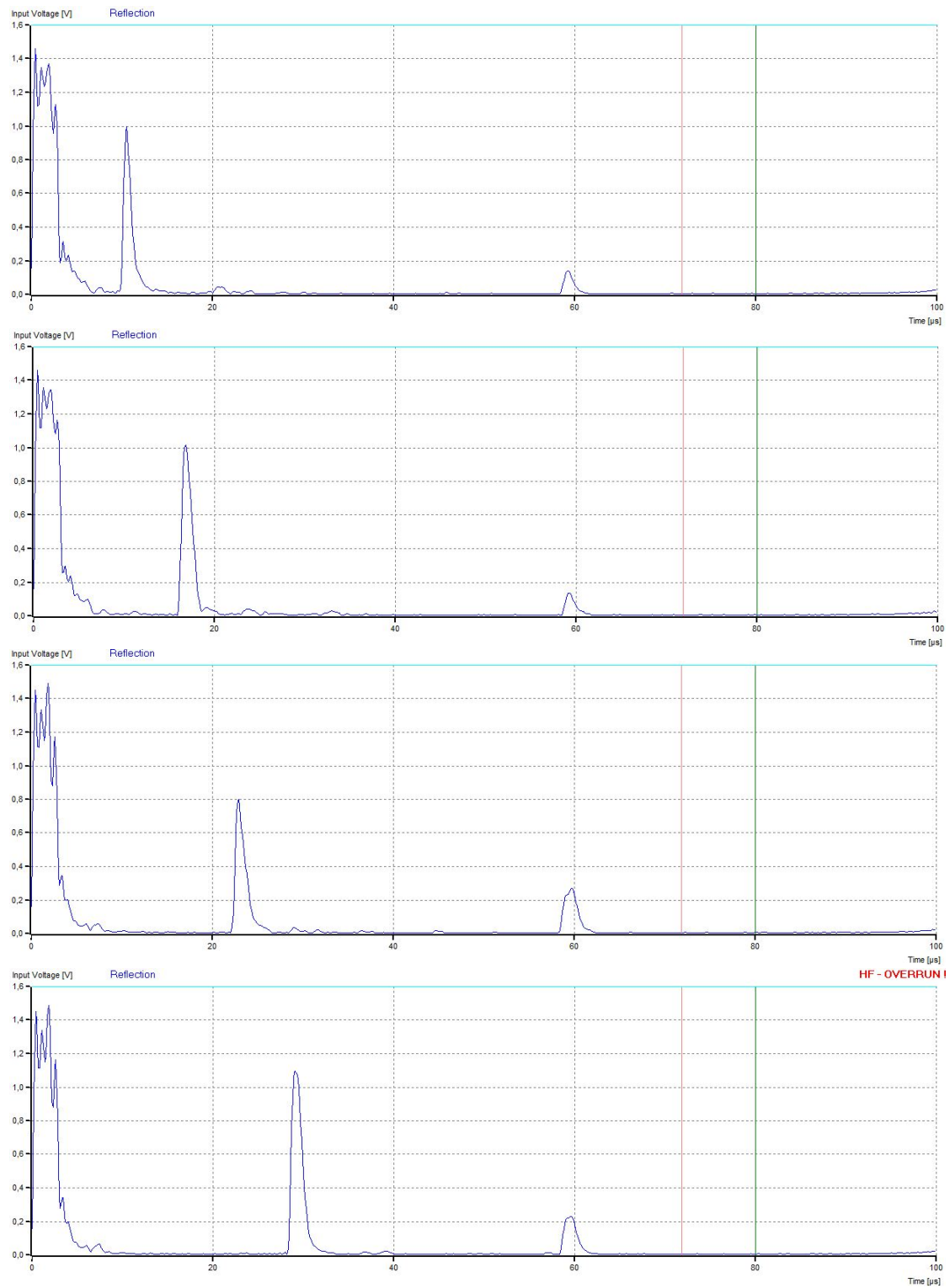


Abbildung 5: Messergebnisse3

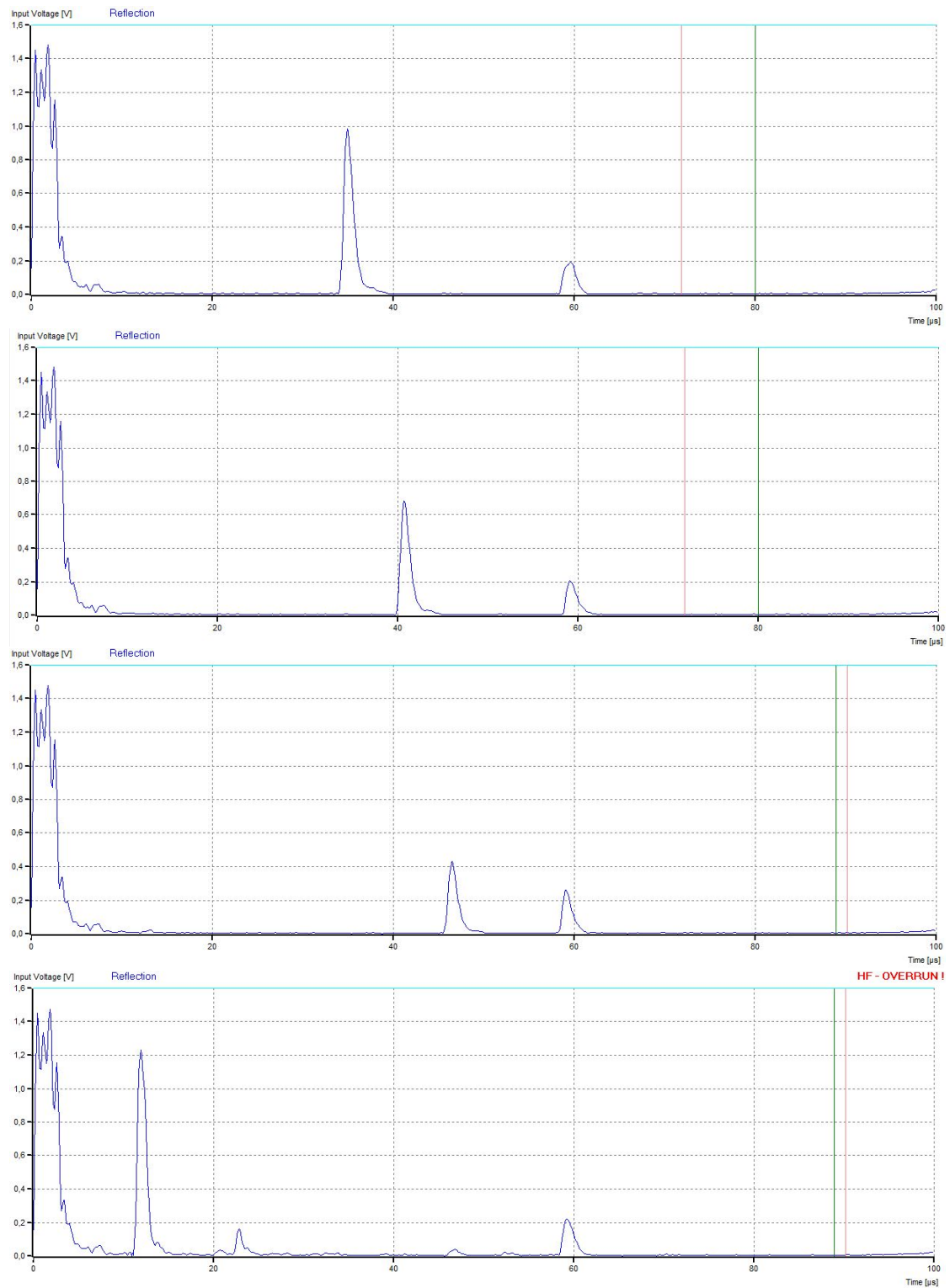


Abbildung 6: Messergebnisse4