



Forschungszentrum  
Ultraschall

Zur Erlangung des akademischen Grades  
Bachelor of Engineering (B. Eng.)

# **Optimierung der Reproduzierbarkeit von Transmissions- und Plattenwellenmessungen mit luftgekoppeltem Ultraschall**

Bachelorarbeit

eingereicht am 06.12.2023

von

Christian Gragert

Betreuer:

Prof. Dr. rer. nat. Klaus-Vitold Jenderka  
(Hochschule Merseburg)

Dr. rer. nat. Christoph Pientschke  
(Forschungszentrum Ultraschall gGmbH, Halle)



## Fachbereich Ingenieur- und Naturwissenschaften

Prof. Dr. Klaus-Vitold Jenderka  
Eberhard-Leibnitz-Straße 2  
06217 Merseburg  
Telefon + 49 3461 46-2185  
[klaus.jenderka@hs-merseburg.de](mailto:klaus.jenderka@hs-merseburg.de)

### Aufgabenstellung für die Bachelorarbeit

**Thema:** Optimierung der Reproduzierbarkeit von Transmissions- und Plattenwellenmessungen mit luftgekoppeltem Ultraschall

**Bearbeiter:** Christian Gragert

**Themenstellende(r) Hochschullehrer(in):** Prof. Dr. Klaus-Vitold Jenderka

**Betriebliche(r) Betreuer(in):** Dr. Christoph Pientschke  
Forschungszentrum Ultraschall gGmbH,  
Halle (Saale)

Formulierung der Problemstellung aus der Fachrichtung (Art der Aufgabe)

Die Luftultraschallprüfung wird in zunehmendem Maße für die zerstörungsfreie und berührungslose Prüfung von Klebeverbindungen eingesetzt. Es ist wünschenswert, frühzeitig Veränderungen der Fügequalität mit Veränderungen im Ultraschallsignal detektieren zu können. Solche Ansätze zur vorbeugenden Instandhaltung sind Gegenstand aktueller Untersuchungen. Für quantitative Beurteilungen ist es notwendig, Veränderungen an Materialien und Fügeverbindungen im Vergleich zu einem Referenzzustand zu ermitteln. Der Reproduzierbarkeit der Messbedingungen kommt hierbei große Bedeutung zu. In der Bachelorarbeit sollen deswegen am Beispiel von Klebeverbindungen Messanordnungen zur Charakterisierung mit Luftultraschall entwickelt werden, welche eine hohe Reproduzierbarkeit der Messung erlauben. Dafür sollen zwei verbreitete Messkonfigurationen betrachtet werden: die Transmissionsmessung und die einseitige Anregung von Plattenwellen (pitch-catch-Anordnung). Es soll getestet werden, ob Unterschiede zwischen Proben unterschiedlichen Altersgrades aufgespürt werden können.

#### Teilaufgaben:

1. Aufbau von Transmissions- und pitch-catch-Anordnung zur reproduzierbaren Messung
2. Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Reproduzierbarkeit von Luftultraschallmessungen in Transmissionsanordnung und bei der Anregung von Plattenwellen in pitch-catch-Anordnung
3. Anwendung der Methoden auf die Charakterisierung von Klebeverbindungen
4. Machbarkeitsuntersuchung zur Anwendbarkeit der Methoden zur Unterscheidung von gealterten und ungealterten Zuständen von Klebeverbindungen

abzugebende Exemplare: 2 + pdf-Datei

Prof. Dr. Julia Beate Langer  
Vorsitzende(r) des Prüfungsausschusses

Prof. Dr. Klaus-Vitold Jenderka  
Themenstellende(r) Hochschullehrer(in)



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1	Physikalische Grundlagen . . . . .	3
2.1.1	Ultraschall . . . . .	3
2.1.2	Schallwellenarten . . . . .	7
2.1.3	Plattenwellen/Lamb-Wellen . . . . .	8
2.1.4	Schallpegel . . . . .	9
2.2	Luftultraschallprüfung . . . . .	10
2.2.1	Abgrenzung von konventioneller Ultraschallprüfung . . . . .	10
2.2.2	Gerätetechnik . . . . .	11
2.2.3	Prüfbilder . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Methodik</b>	<b>15</b>
3.1	Luftschallmessplatz . . . . .	15
3.1.1	SonoAir/Ultraschallmesstechnik . . . . .	15
3.1.2	Isel-Scanner . . . . .	15
3.1.3	Datenanalyse und Datenauswertung . . . . .	16
3.2	Transmission . . . . .	17
3.2.1	Transmissionsscans mit luftgekoppeltem Ultraschall . . . . .	17
3.2.2	Auswertung der Transmission . . . . .	17
3.3	Pitch-Catch . . . . .	18
3.3.1	Anregung von Plattenwellen . . . . .	20
3.3.2	Plattenwellenauswertung . . . . .	20
<b>4</b>	<b>Entwicklung der Messmethoden</b>	<b>27</b>
4.1	Anforderung an den Messplatz hinsichtlich der Reproduzierbarkeit der Messung . . . . .	27
4.2	Proben . . . . .	27
4.2.1	Plexiglas-Proben . . . . .	27
4.2.2	Klebewinkel-Proben . . . . .	28
4.3	Entwicklung der Plattenwellen-Messung mit der Pitch-Catch-Anordnung	29
4.3.1	Einfluss der Messanordnung . . . . .	29
4.3.2	Einfluss der Umgebungsbedingungen . . . . .	36
4.3.3	Einfluss der Auswerteparameter . . . . .	39
4.4	Entwicklung der Transmissionsmessung . . . . .	41
4.4.1	Einfluss der Justage . . . . .	41
4.4.2	Positionierung der Ultraschallwandler . . . . .	42
4.4.3	Ausrichtung der Ultraschallwandler . . . . .	43
4.4.4	Positionierung der Probe . . . . .	43
4.4.5	Schallpegel- und Empfangserhöhung . . . . .	44

---

<b>5</b>	<b>Charakterisierung von Klebeverbindungen</b>	<b>45</b>
5.1	Probenbeschreibung . . . . .	45
5.2	Transmissionsmessung . . . . .	47
5.2.1	Scans . . . . .	47
5.2.2	4-Punkt-Messung . . . . .	48
5.3	Auswertung der Plattenwellenmessung . . . . .	50
5.3.1	Momentanphasengeschwindigkeit . . . . .	51
5.3.2	Pegelauswertung . . . . .	53
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>57</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>59</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Transmissions- und Reflexionsanteile an einer Grenzfläche schematisch, entnommen aus internen Schulungsunterlagen des FZU . . . . .	6
2.2	Brechung und Reflexion eines Ultraschallbündels an einer ebenen Grenzfläche (Quelle: Seite 24, Abb. 2.6 in <sup>[2]</sup> ) . . . . .	6
2.3	Plattenwellenmoden a) Zur Oberfläche parallele Transversalwelle, b) Symmetrische Lambwellenmode (Dehnungswelle), c) Asymmetrische Lambwellenmode (Biegewelle) / Zitat aus <sup>[2]</sup> Seite 38 Abb. 2.21 . . . . .	8
2.4	Dispersionsdiagramm einer 3 mm dicken Aluminiumplatte / Zitat aus dem DispersionCalculator2 Version 2.4 - compiled April 19, 2023 Copyright © 2018-2023 DLR . . . . .	9
2.5	Dispersionsdiagramm einer 3 mm dicken Aluminiumplatte im Detail / Zitat aus dem DispersionCalculator2 Version 2.4 - compiled April 19, 2023 Copyright © 2018-2023 DLR . . . . .	9
2.6	Transmissionsanordnung schematisch . . . . .	10
2.7	Schema eines Vier-Kanal-Prüfsystems . . . . .	11
2.8	B-Bild einer Lambwellenmessung mit örtlich variablem Receiver . . . . .	12
2.9	C-Bild einer Transmissionsmessung eines Klebewinkels . . . . .	13
3.1	Isel-Scanner . . . . .	16
3.2	Transmissions-Anordnung . . . . .	17
3.3	Differenzbild von Klebewinkel 10 (gealterte Probe - ungealterte Probe) . . . . .	18
3.4	Einseitige Messung einer Plattenwelle mit luftgekoppeltem Ultraschall . . . . .	19
3.5	Pitch-Catch-Anordnung, links statischer Sender, rechts horizontal-verfahrbare Empfänger . . . . .	19
3.6	Schema der Nullstellenverfolgung . . . . .	21
3.7	Orts und Zeitwerte einer Nullstellenverfolgung gegeneinander aufgetragen . . . . .	21
3.8	Ausreißer und negative Phasengeschwindigkeiten beim Differenzieren . . . . .	22
3.9	Detailansicht der Orts- und Zeitwerte . . . . .	22
3.10	Regressionsgeraden in kleinen Intervallen . . . . .	22
3.11	Benutzeroberfläche für die B-Bild-Auswertung . . . . .	23
4.1	Plexiglas-Proben . . . . .	28
4.2	Klebewinkel-Probe . . . . .	28
4.3	Klebewinkel-Halterung . . . . .	29
4.4	Lambwellen-Messung in niedriger gelegener Spur . . . . .	30
4.5	US-Wandlermontage/Stellelement . . . . .	31
4.6	Verschraubung von Montageplatte und Befestigungswinkel . . . . .	32
4.7	Verschraubung von Befestigungsstruktur und US-Wandler-Halterung . . . . .	33
4.8	US-Transmitter-Montage . . . . .	33
4.9	Luftstreckenmessung unter Nutzung von Thermoelementen . . . . .	34
4.10	Vergleich der Momentanphasen-Geschwindigkeiten . . . . .	34
4.11	Vergleich der Momentanphasen-Geschwindigkeiten . . . . .	35
4.12	Momentanphasen-Geschwindigkeiten-Differenz . . . . .	36

4.13	Messaufbau für die Plattenwellenmessung des Klebewinkels 3, Thermo- element mit Knetmasse an Stahlplatte befestigt für Temperaturlaufzeich- nung während des Sinkens der Temperatur . . . . .	37
4.14	Messungen der Momentanphasengeschwindigkeit von Klebewinkel 3 bei Temperaturen 11 °C (1) und 17 °C (2) . . . . .	37
4.15	Differenz der Momentanphasengeschwindigkeiten von Klebewinkel 3 bei den Temperaturen 11 °C und 17 °C . . . . .	38
4.16	Differenz der Momentanphasengeschwindigkeiten von Klebewinkel 12 bei den Temperaturen 12 °C und 19 °C . . . . .	38
4.17	Mittlung der Momentan-Phasengeschwindigkeiten über x Messpunkte .	39
4.18	Darstellung der Momentanphasengeschwindigkeiten einer Plexiglasplatte der Dicke von 6 mm mit einer Mittlungsfensterbreite von 50 Punkten .	40
4.19	Fixier-Tool für Transmissionsanordnung der Ultraschallwandler . . . . .	42
4.20	Wandlerpositionierung in Transmissionsanordnung, unten Receiver, oben Transmitter . . . . .	43
4.21	Klebewinkelprobe mit Pins auf Scanner eingespannt . . . . .	43
5.1	Messpunkte für Dickenmessung der Klebeschicht . . . . .	46
5.2	Vergleich der Amplitudenmittelwerte mit den Standardabweichungen über der Klebeschicht . . . . .	47
5.3	Relative Abweichung nach der Alterung der Klebewinkel-Proben . . . . .	48
5.4	Biegung der einer Klebewinkelprobe nach dem Alterungsprozess . . . . .	49
5.5	Relative Abweichung nach der Alterung gleichartiger Probengruppen gemittelt . . . . .	50
5.6	Gemittelte Momentanphasengeschwindigkeit über 4 Messungen mit De- montage der Ultraschallwandler-Halterungen und Probe vor der Alterung des Klebewinkels 8 . . . . .	51
5.7	Gemittelte Momentanphasengeschwindigkeit über 4 Messungen mit De- montage der Ultraschallwandler-Halterungen und Probe vor der Alterung des Klebewinkels 5 . . . . .	51
5.8	Vergleich der Momentanphasengeschwindigkeiten vor und nach der Al- terung des Klebewinkels 1 . . . . .	53
5.9	Gemittelte Schallpegel über 4 Messungen mit Demontage der Ultraschall- wandler-Halterungen und Proben vor der Alterung des Klebewinkels 8 .	53
5.10	Gemittelte Schallpegel über 4 Messungen mit Demontage der Ultraschall- wandler-Halterungen und Probe 12 vor der Alterung des Klebewinkels 12	54
5.11	Vergleich der Schallpegel vor und nach der Alterung des Klebewinkels 1	54
5.12	Vergleich des Schallpegels vor und nach der Alterung des Klebewinkels 6	55
5.13	Vergleich des Schallpegels vor und nach der Alterung des Klebewinkels 9	55



# Tabellenverzeichnis

2.1	Verwendung des Ultraschalls . . . . .	4
2.2	Materialeigenschaften. Die Daten wurden teilweise aus <sup>[3]</sup> , <sup>[6]</sup> entnommen und durch kurze Internetrecherchen vervollständigt. . . . .	5
5.1	Materialkombinationen der Klebewinkel . . . . .	46
5.2	Dickenunterschied der Klebeschichten . . . . .	46



# 1 Einleitung

Der Leichtbau findet in vielen Wirtschaftsbereichen zunehmende Verbreitung. Die Gründe hierfür sind Gewichtseinsparungen bei gleichzeitiger Festigkeit. In den Bereichen Mobilität führt eine Gewichtsreduktion immer zu einer Ersparnis von Treibstoffen sowie einer CO<sub>2</sub>-Reduktion. Es gibt viele Arten von Leichtbaumaterialien, die eingesetzt und teilweise auch miteinander verbunden werden. Unter den Fügearten kommt der Klebung eine große Bedeutung zu. Die Qualitätssicherung dieser Klebeverbindungen ist derzeit ein aktueller Forschungsgegenstand. Als besonders herausfordernd gestaltet sich dabei die Einschätzung des Alterungszustandes solcher Klebeverbindungen. Bisher werden Klebeverbindungen häufig zerstörend geprüft, was in der Praxis zu hohen Kosten und größerem Aufwand führt. Daher ist ein zerstörungsfreies Prüfverfahren wünschenswert.

Die ZfP (Zerstörungsfreie Prüfung) gehört zu den wichtigsten Methoden sicherheitstechnischer Überwachung, die – vergleichbar mit der medizinischen Diagnostik – verborgene Fehler in Bauteilen und Konstruktionen vor und während ihres Betriebes so rechtzeitig erkennen soll, dass deren unvorhergesehenes Versagen verhütet wird.<sup>[1]</sup>

Die angekoppelte Ultraschallprüfung mit dem Impuls-Echo-Verfahren ist seit Jahrzehnten z.B. bei der Prüfung von Schweißnähten im Einsatz<sup>[2]</sup>. In den vergangenen Jahren werden verstärkt Prüfaufgaben mit luftgekoppeltem Ultraschall durchgeführt, was angepasste Gerätetechnik erfordert. Insbesondere für die Prüfung von Leichtbaumaterialien sind luftschallbasierte Methoden geeignet. Häufig ist es damit möglich zu ermitteln, ob die Klebeverbindungen intakt sind. Jedoch gibt es bisher noch keine Ansätze zur Charakterisierung des Alterungszustandes mit Luftultraschall. In der vorliegenden Arbeit werden dafür Machbarkeitsuntersuchungen vorgestellt. Besonders interessant sind dabei Methoden mit einseitiger Zugänglichkeit, da viele Bauteile im eingebauten Zustand überhaupt erst auf diese Weise geprüft werden können. Wenn das gelänge, wäre das ein wertvoller Beitrag zur vorbeugenden Instandhaltung (Predictive Maintenance).

Voraussetzung hierfür ist eine hohe Reproduzierbarkeit der Messungen beim Vergleich verschiedener Alterungszustände. Das bildete einen Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit. Nachdem in Kap. 2 die Grundlagen der Luftultraschallprüfung erläutert werden, wird in Kap. 3 auf die Methodik der Luftultraschallprüfung in Transmissions- und einseitiger Pitch-Catch-Anordnung eingegangen. Die Entwicklung und damit verbundene umfangreiche Untersuchungen der Messaufbauten werden in Kap. 4 behandelt. Die Anwendung der entwickelten Methodik wird in Kap. 5 anhand von Messungen ausgewählter Klebewinkel-Proben demonstriert. Eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse in Kap. 6 schließt die Arbeit ab.



# 2 Grundlagen

## 2.1 Physikalische Grundlagen

In diesem Kapitel werden zunächst physikalische Gesetze und die Hintergründe für die Ultraschalluntersuchung und im späteren Verlauf für die luft-gekoppelte Ultraschalluntersuchung und deren Einsatz in der Praxis erläutert.<sup>[4-7]</sup>

### 2.1.1 Ultraschall

Um zu verstehen, was Ultraschall ist, werden zunächst die Begriffe Schwingung und Welle erklärt.

**Schwingung und ihre Eigenschaften** Eine Schwingung ist ein sich ändernder und dabei wiederkehrender Zustand mit folgenden Eigenschaften. Sie hat eine maximale Auslenkung, auch Amplitude genannt. Ein weiteres Merkmal einer Schwingung ist ihre Frequenz  $f$ . Diese beschreibt, wie oft pro Sekunde der gleiche Zustand wieder erreicht wird.

Die Frequenz  $f$  und die Periodendauer  $T$  sind umgekehrt proportional zu einander. Es gilt:

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.1)$$

Eine weitere Kennzahl einer Schwingung ist deren Phasenlage. Es ist der derzeitige Zustand einer Schwingung gemeint, also in welcher Phase sie sich gerade befindet. Oft werden die Phasenlagen in Relation zu einer weiteren Schwingung ermittelt oder angegeben. Man stellt so den zeitlichen Abstand eines definierten Zustandes der einen Schwingung zu genau dem gleichen Zustand der anderen Schwingung dar.

**Wellen** Eine Welle ist eine sich räumlich und zeitlich ausbreitende Schwingung. Sie entsteht, wenn benachbarte Teilchen durch die Schwingung beeinflusst werden. Diese benachbarten Teilchen beeinflussen wiederum weitere benachbarte Teilchen. So wird die Schwingung auf immer weiter weg entfernte Teilchen übertragen. Sofern dies durch eine Schwingung passiert, nennt sich dieser Prozess Welle.

Eine Welle kann im einfachsten Fall mit eindimensionaler Ausbreitungsrichtung wie folgt beschrieben werden:

$$p(x, t) = p_0 \sin \left( 2\pi \left[ \frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right] + \phi_0 \right) = p_0 \sin (kx - \omega t + \phi_0) \quad (2.2)$$

Die beschriebene Formel (2.2) beschreibt eine Sonderform einer Welle, angeregt mit nur einer Frequenz, ohne Dämpfung, in eindimensionaler Ausdehnung. Der jeweilige Schalldruck  $p$  ist sowohl vom Ort  $x$  als auch der Zeit  $t$  abhängig.  $p_0$  ist hierbei der

maximale Schalldruck ohne den Umgebungsdruck, die Wellenlänge  $\lambda$  und der Periodendauer  $T$  sind ebenfalls Eigenschaften einer Welle.  $\phi_0$  stellt die Phasenverschiebung der Welle dar. Mit der Wellenzahl  $k$  und die Kreisfrequenz  $\omega$  wird die Formel vereinfacht.

**Interferenz** Schwingungen und Wellen können sich auch überlagern. Diesen Effekt nennt man Interferenz. Wenn sich zwei oder mehr Wellen so überlagern, dass deren Wellenberge bei der Überlagerung höher sind als einzeln zuvor, so spricht man von konstruktiver Interferenz. Löschen sich die beiden Wellen gegenseitig aus oder reduzieren ihre gemeinsame Amplitude im Verhältnis zur vorherig höchsten Amplitude der stärkeren beider Wellen, so ist dies eine destruktive Interferenz.

**Ultraschallwellen** Hörbare Wellen nennt man Schallwellen. Schallwellen, die der Mensch mit seinem Gehör nicht mehr wahrnehmen kann, werden bei höherer Frequenz als der hörbaren als Ultraschall bezeichnet. Diese Wellen entstehen durch ein Anschwingen der Luftteilchen oder eines anderen Trägermediums, was eine periodische Druckänderung an dieser Stelle zur Folge hat. Diese Druckänderung bewegt sich in Form einer longitudinale Welle (in Kap. 2.1.2 erläutert) durch den Raum.

**Ultraschallspektrum** In Tab. 2.1 sind einige Frequenzen im Ultraschallbereich mit dem jeweiligen Anwendungsgebiet aufgelistet. Das genutzte Ultraschallspektrum erstreckt sich über drei Größenordnungen und hält je nach Tiefe, Material und Auflösungsanforderung die entsprechende Frequenz bereit.

Tab. 2.1: Verwendung des Ultraschalls

Einsatzgebiet	Genutzte Frequenzen
Hörschall	20 Hz bis 20 kHz
Ultraschall	20 kHz aufwärts
Hyperschall	1 GHz aufwärts
Sonar/Unterwasseranwendungen	50 kHz bis 200 kHz
Medizinische Diagnostik	1 MHz bis 40 MHz
Zerstörungsfreie Prüfung (Klassisch)	1 MHz bis 50 MHz
Leistungultraschall	20 kHz bis 40 kHz
Luftgekoppelter Ultraschall	20 kHz bis 1 MHz

**Schallgeschwindigkeit** Die Schallgeschwindigkeit  $c$  einer Welle gibt an, wie schnell sich der gleiche Zustand der Welle von einem zum anderen Ort ausbreitet. Sie ist für jedes Material/Medium charakteristisch. Dadurch ändert sich bei beim Eindringen in ein Material nur die Wellenlänge  $\lambda$  und nicht die Frequenz  $f$ . Es gilt:

$$c = \lambda \cdot f \quad (2.3)$$

Die Wellenzahl  $k$  ist definiert als

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (2.4)$$

Die Phasengeschwindigkeit  $c_{ph}$  ist die Geschwindigkeit, mit welcher sich eine konkrete Phase, z. B. ein Maximum, einer Welle einer bestimmten Frequenz ausbreitet. Die Gruppengeschwindigkeit  $c_g$  hingegen gibt an, mit welcher Geschwindigkeit sich das Maximum eines Wellenpaketes in Ausbreitungsrichtung bewegt. Misst man die Geschwindigkeit eines zuvor ausgesandten Impulses, welcher aus einer Vielzahl an überlagerten Schwingungen enthält, so misst man i.d.R. die Gruppengeschwindigkeit der Welle/des Wellenpaketes. In dieser Arbeit und den damit verbundenen Messungen wird ausschließlich die Phasengeschwindigkeit betrachtet.

**Schallschwächung/-dämpfung** Die Schalldämpfung erfolgt über zwei Effekte. Die verschiedenen Materialien streuen und absorbieren den Schall unterschiedlich stark. Der Schalldruck  $p_0$  ist der Schallwechseldruck an der Referenzposition. Die Wandlung von Schallenergie in Wärme- und mechanische Energie im Material/Medium nennt man Absorption. Der Absorptionskoeffizient  $\alpha$  in der Gleichung (2.5) ist hierbei vom Material und der Sendefrequenz abhängig. Je höher die Frequenz ist, desto stärker ist auch die Schallschwächung. In Abhängigkeit der Entfernung  $d$  von der Schallquelle kann man die Schwächung des Schalldrucks  $p$  wie folgt beschreiben:

$$p = p_0 \cdot e^{-\alpha \cdot d} \quad (2.5)$$

**Schallkennimpedanz** Als akustische Impedanz  $Z$  oder auch Schallkennimpedanz wird der Schallwellenwiderstand bezeichnet. Sie wird wie folgt berechnet:

$$Z = c \cdot \rho \quad (2.6)$$

wobei  $c$  die Schallgeschwindigkeit im Material ist und  $\rho$  die Dichte des Materials. Die Einheit der Impedanz ist Rayl, welches umgerechnet in SI-Einheiten  $\frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}}$  ergibt. Um so größer der Unterschied zweier Impedanzen beim Grenzflächenübergang einer Ultraschallwelle ist, desto stärker wird die Schallwelle reflektiert.

Entsprechend der Formel (2.6) sind verschiedene Impedanzen ermittelt worden. In Tab. 2.2 sind einige Materialien und hierzu mit ihrer Dichte und Schallgeschwindigkeit aufgelistet.

Tab. 2.2: Materialeigenschaften. Die Daten wurden teilweise aus<sup>[3], [6]</sup> entnommen und durch kurze Internetrecherchen vervollständigt.

Material	Schallgeschwindigkeit m/s	Dichte kg/m <sup>3</sup>	Schallkennimpedanz MRayl
Luft	344	1,2	0,00041
Wasser	1480	1000	1,48
Kunststoff	2200 ± 400	800 – 2300	ca. 3
Aluminium	6300	2700	17
Stahl	5900	7850	45

**Transmissionsgrad** Die Transmission ist ein Grenzflächenphänomen und beschreibt den Anteil ausgesandter Ultraschallwellen, in diesem Fall den Ultraschalldruck, der über eine Material- oder Mediumsgrenze hinaus weiterläuft. Andere Teile des ausgesandten Ultraschallbündels werden an der Grenzschicht reflektiert oder in dem Material absorbiert und treten somit hinter der Grenzschicht nicht aus.<sup>[3]</sup>

Der Transmissionsgrad  $T_p$  kann bei Kenntnis der Impedanzen  $Z_1$  und  $Z_2$  wie folgt berechnet werden.

$$T_p = \left( \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \right) \quad (2.7)$$

In Abb. 2.1 durchläuft der Schall zwei Grenzschichten, weshalb der Transmissionsgrad  $T_{p123}$  für diesen Fall aus dem Produkt zweier Transmissionsgrade ( $T_{p12} \cdot T_{p23}$ ) entsteht.

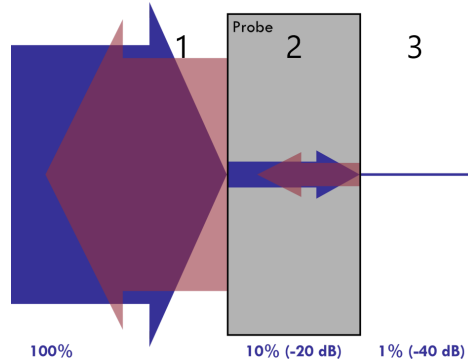


Abb. 2.1: Transmissions- und Reflexionsanteile an einer Grenzfläche schematisch, entnommen aus internen Schulungsunterlagen des FZU

**Reflexionsgesetz** In Abb. 2.2 ist das Reflexionsgesetz gut dargestellt. Wenn ein Ultraschallbündel mit einem Winkel  $\alpha_e$  zum Lot hin auf eine glatte Oberfläche trifft, so ist der Ausfallswinkel  $\alpha_r$  genauso groß wie der Einfallswinkel  $\alpha_e$ . In nachstehender Gleichung ist dies beschrieben.

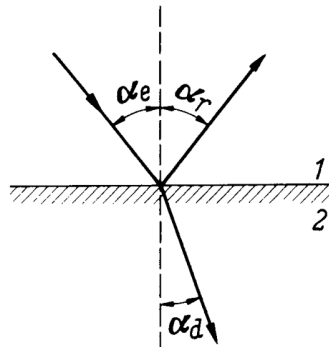


Abb. 2.2: Brechung und Reflexion eines Ultraschallbündels an einer ebenen Grenzfläche (Quelle: Seite 24, Abb. 2.6 in [2])

$$\alpha_e = \alpha_r \quad (2.8)$$

**Reflexionsgrad** Reflexionsgrad  $R_p$  bei senkrechtem Einfall für den Schalldruck ist wie folgt von den Impedanzen des zuerst durchlaufenen Materials  $Z_1$  und dem anschließend durchlaufenen Materials  $Z_2$  abhängig:

$$R_p = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right) \quad (2.9)$$

Der Reflexionsgrad ist zudem von dem Einschallwinkel abhängig.



Eine gute Impedanzanpassung führt zu einer möglichst geringen Reflexion. Um so größer der Impedanzunterschied ist, um so größer ist auch die Reflexion. Beim Grenzflächenübergang wird daher oft ein Koppelmittel verwendet, welches die Transmission in Luft verhindert und damit die starken Reflexionen abschwächt.

**Brechungsgesetz** Das Brechungsgesetz beschreibt die Änderung des Winkels durch die Schallgeschwindigkeitsänderung beim Grenzübergang, da sich der Austrittswinkel  $\alpha_d$  beim Eintritt in anderes Material vom Eintrittswinkel  $\alpha_e$  unterscheidet, falls die Schallgeschwindigkeit  $c_e$  im ersten Material von der des zweiten  $c_d$  abweicht. Nachzuvollziehen ist dies in Abb. 2.2.

$$\frac{\sin(\alpha_e)}{\sin(\alpha_d)} = \frac{c_e}{c_d} \quad (2.10)$$

**Beugung** Beugung bezeichnet die Ausbreitung einer Welle um ein Objekt herum in dessen geometrischen Schatten hinein.<sup>[6]</sup> Das heißt, obwohl man bei einem geradlinigen Verlauf hinter einer Wand im Freien nichts hören dürfte, hört man die Schallquelle auf der anderen Seite dennoch.

## 2.1.2 Schallwellenarten

### Longitudinalwellen

Longitudinalwellen sind Längswellen. Deren Ausbreitungsrichtung der Schallwelle ist zugleich die Schwingungsrichtung. Sie können in Festkörpern, Flüssigkeiten oder Gasen auftreten. Die Teilchen schwingen im Raum von der Schallquelle weg und wieder zu ihr hin. Zeitgleich wird der Schalldruck an benachbarte Teilchen übertragen und das sich radial entfernend von der Schallquelle. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit  $c_l$  der longitudinalen Welle kann mit dem Elastizitätsmodul  $E$ , der Dichte  $\rho$  des Mediums und der Querkontraktionszahl  $\mu$  des Materials berechnet werden:

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}} \quad (2.11)$$

### Transversalwellen/Scherwellen

Transversalwellen sind Querwellen. Deren Ausbreitungsrichtung der Schallwelle erfolgt rechtwinklig zur Schwingungsrichtung. Da es keine feste Verbindung der Teilchen in Gasen und Flüssigkeiten gibt, können Scherwellen hier nicht oder nur über sehr kurze Strecken übertragen werden. Somit pflanzen sich Transversalwellen nur in Festkörpern fort.

### Geführte Wellen: Rayleigh-Wellen, Lamb-Wellen

Es gibt zudem Mischformen aus Transversal- und Longitudinalwellen. Zum einen sind das Oberflächenwellen/Rayleigh-Wellen. Geführte Wellen oder Rayleigh-Wellen werden an Oberflächen von festen Körpern, die dicker als Platten sind, gemessen. An Grenzflächen und Oberflächen breiten sie sich aus. Plattenwellen/Lamb-Wellen hingegen sind geführte Wellen in dünnschichtigen Materialien (Platten). Sie können in unterschiedlichen Moden auftreten

## Schwingungsmoden

Geführte Wellen können in verschiedenen Moden auftreten. In erster Linie sind das die symmetrische und die asymmetrische Mode. Die symmetrische Mode zeichnet sich durch eine symmetrische Schwingung im Bezug auf die mittlere Faser in Ausbreitungsrichtung der Welle aus. Sie dehnt und staucht die Platte und sorgt so für örtliche Dichteunterschiede (Abb. 2.3 b). Durch die asymmetrische Mode wird die Platte periodisch gebogen. Auch hier treten ähnliche Dichteunterschiede auf, nur sind diese bezogen auf die mittlere Faser an den jeweils gegenüberliegenden Stellen höher bzw. niedriger (Abb. 2.3 c). Die in Abb. 2.3 a) dargestellte Transversalwelle tritt ebenso in Platten auf, wurde in den beschriebenen Messungen allerdings nicht berücksichtigt.

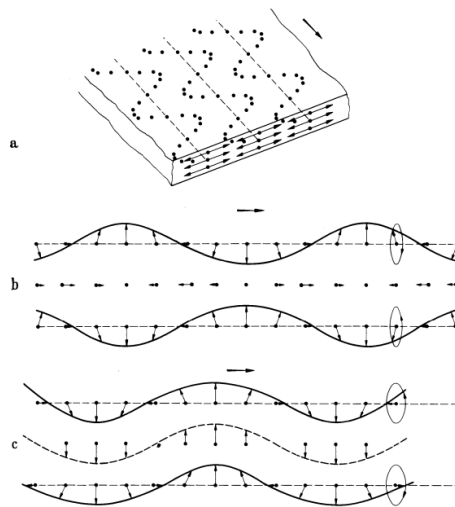


Abb. 2.3: Plattenwellenmoden a) Zur Oberfläche parallele Transversalwelle, b) Symmetrische Lambwellenmode (Dehnungswelle), c) Asymmetrische Lambwellenmode (Biegewelle)  
/ Zitat aus<sup>[2]</sup> Seite 38 Abb. 2.21

### 2.1.3 Plattenwellen/Lamb-Wellen

Plattenwellen pflanzen sich in flachen Körpern (Platten) fort und können auf beiden Seiten der Platte detektiert werden. Es treten sowohl Longitudinal- als auch Transversalwellen auf, wobei die longitudinalen Wellen, mit welchen ausschließlich in dieser Arbeit gearbeitet wird, ca. doppelt so schnell sind wie die transversalen.

Die Plattenwellenanregung richtet sich nach den Schallgeschwindigkeiten in den Materialien bzw. sie ist abhängig vom Medium, aus welchem der Schall kommt ( $c_e$ ) und in welches Material der Schall eingetragen wird ( $c_d$ ). Das Verhältnis aus beiden Materialien/Medien bedingt einen konkreten Einfallswinkel  $\alpha_e$  für jede Materialkonstellation und Schwingungsmode, welche angeregt werden soll. Der Schall wird beim Übergang ins angrenzende Material gebrochen. Das heißt, es muss, um eine Plattenwelle zu erzeugen, so gebrochen werden, dass der Austrittswinkel  $\alpha_d$  im zweiten Material  $90^\circ$  beträgt und die longitudinale Plattenwelle längs der Platte verläuft. Nur so ist die Bedingung erfüllt, dass sich die Lamb-Welle parallel zur Oberfläche fortbewegt. Ausgehend vom Brechungsgesetz aus (2.10) führt dies zu:

$$\alpha_e = \arcsin \frac{c_e}{c_d} \quad (2.12)$$

## Dispersionsbeziehung

Welche Art und Mode einer Welle angeregt wird, richtet sich nach der Sendefrequenz und der Dicke einer Platte. Exemplarisch ist ein Dispersionsdiagramm (Abb. 2.4) eingefügt, welches die Abhängigkeit der angeregten Mode von der Frequenz aufzeigt.

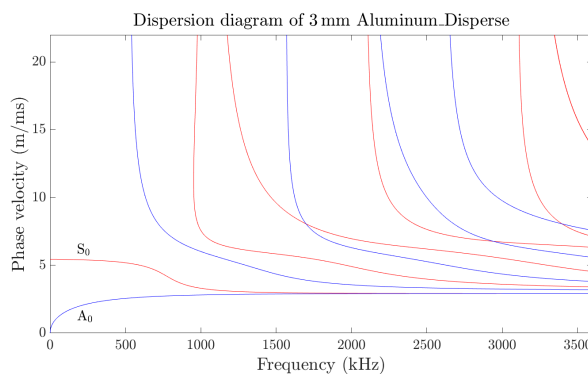


Abb. 2.4: Dispersionsdiagramm einer 3 mm dicken Aluminiumplatte / Zitat aus dem Dispersion-Calculator2 Version 2.4 - compiled April 19, 2023 Copyright © 2018-2023 DLR

Etwas detaillierter wird in Abb. 2.5 die genutzte Frequenz in ihrer Auswirkung auf die angeregte Mode dargestellt. Der genutzte Ultraschallwandler, welcher mit 210 kHz betrieben wurde, sorgt so für die Anregung einer asymmetrischen Mode, welche sich mit einer Phasengeschwindigkeit von ca. 2 km/s durch die Platte bewegt.

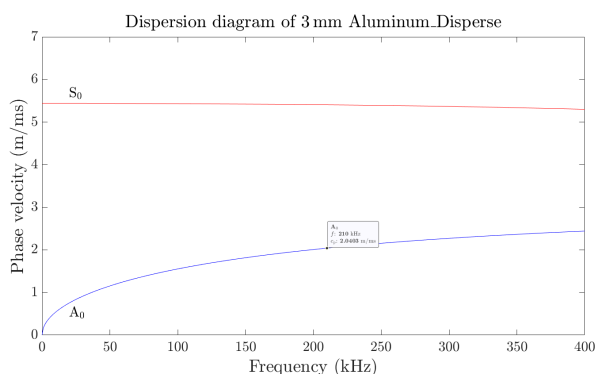


Abb. 2.5: Dispersionsdiagramm einer 3 mm dicken Aluminiumplatte im Detail / Zitat aus dem DispersionCalculator2 Version 2.4 - compiled April 19, 2023 Copyright © 2018-2023 DLR

### 2.1.4 Schallpegel

Mit dem Ausdruck Schallpegel ist entweder der Schalldruckpegel, der Schalleistungspegel oder der Schallintensitätspegel (Akustische Größen) gemeint. In dieser Arbeit wird ausschließlich der Schalldruckpegel  $L_p$  genutzt. Er beschreibt die Auswirkung einer Schallwelle (Schallimmission) auf einen Ort. Er wird in der Einheit Dezibel dB gemessen und hängt von den Umgebungsbedingungen und der Entfernung von der Schallquelle ab.

$$L_p = 10 \log_{10} \left( \frac{\tilde{p}^2}{p_0^2} \right) \text{ dB} = 20 \log_{10} \left( \frac{\tilde{p}}{p_0} \right) \text{ dB} \quad (2.13)$$

Das ist nötig, da die Verhältnisse bzw. die Effektivwerte des Schalldruckes  $p$  um mehrere Größenordnungen vom Referenzdruck  $p_0$  abweichen. Erhöht sich der Schalldruck um eine Größenordnung, also um den Faktor 10, erhöht sich der Schalldruckpegel um 20 dB. Zeitgleich erhöht sich die Schallintensität um zwei Größenordnungen, also das 100-fache.

## 2.2 Luftultraschallprüfung

Die Transmissionsanordnung, welche bevorzugt in der Luftultraschallprüfung eingesetzt wird, bedarf eines Senders und eines Empfängers. Auf einer Seite der Probe wird ein Sender positioniert und auf der gegenüberliegenden Seite der Probe der Empfänger. In Abb. 2.6 ist diese Anordnung schematisch dargestellt. Sender und Empfänger liegen, sofern beide eine parallele akustische Achse zum Wandler ermöglichen, genau auf einer Achse. Die Probe wird in aller Regel senkrecht zur akustischen Achse platziert. So kann möglichst viel Schallenergie durch die Probe gelangen und beim Empfänger ankommen. Zudem wird versucht, das Nahfeld des Ultraschallwandlers, welches teils durch destruktive Interferenzen gekennzeichnet ist, zu meiden. Das bedeutet, dass jeder Ultraschallwandler einen Mindestabstand zur Probe aufweist, der je nach Durchmesser des Ultraschallwandlers variiert.

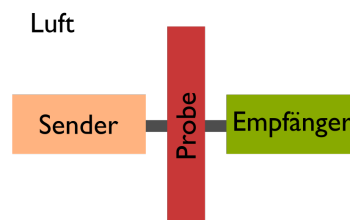


Abb. 2.6: Transmissionsanordnung schematisch

### 2.2.1 Abgrenzung von konventioneller Ultraschallprüfung

Im Falle der Luftultraschallprüfung sind die Impedanzunterschiede zwischen der Luft und dem zu durchdringenden Material derart hoch, dass viel mehr Energie eingekoppelt werden muss als in der konventionellen Ultraschallprüfung. Dies kann man entsprechend der Formeln (2.7) und (2.6) gut überprüfen. Das Verhältnis des Schalldruckes  $p$  nach dem Durchdringen des Materials und dem Druck  $p_0$  davor beträgt somit  $9,73 \cdot 10^{-5}$ . Dieses Verhältnis wiederum in die Formel (2.13) eingesetzt ergibt einen Schalldruckpegel von  $-86$  dB.

Es werden also nur noch rund 0,01 % des ursprünglichen Schalldrucks transmittiert und dies nur beim Durchdringen zweier Grenzflächen. Die Schallschwächung durch Dämpfung, Streuung oder eines nicht senkrecht auftreffenden Schallbündels sind hierbei noch nicht berücksichtigt worden. Der Empfang des Signals muss auf Grund der hohen Abschwächung des Signals daher sehr sensitiv sein, was sowohl empfindliche Ultraschallwandler erfordert als auch eine entsprechende Verstärkung dieses sehr schwachen Signals. Es bedarf demnach eine angepasste Sende- und Empfangselektronik. Da die Schallschwächung mit höherer Frequenz zunimmt, wird auch hier mit niedrigeren Frequenzen im Bereich von ca. 40 kHz bis 1 MHz gearbeitet, welche im Schnitt eine Größenordnung unter den Frequenzen der angekoppelten Ultraschalltechnik liegen.

Des Weiteren wächst die Auflösung mit der Frequenz, was im Falle des niedrigeren Luftultraschalles die Auflösung etwas schmälert.

### 2.2.2 Gerätetechnik

Neben eines Computers mit hohem Arbeitsspeicher für die Vielzahl an Daten, die empfangen werden, besteht ein luftgekoppeltes Ultraschallprüfsystem aus den in Abb. 2.7 dargestellten Elementen. Es bedarf eines Funktionsgenerators (Signal processor), der

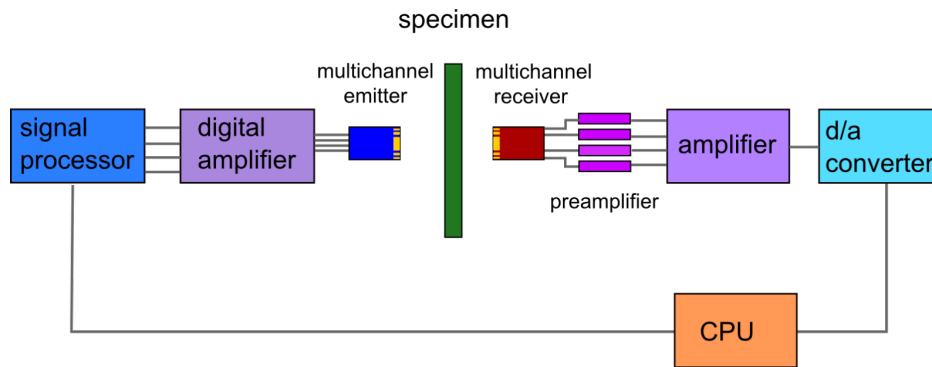


Abb. 2.7: Schema eines Vier-Kanal-Prüfsystems

die gewünschten Frequenzen ausgeben kann. In diesem Fall werden Frequenzen von 40 kHz bis 400 kHz Burst-Signale ausgegeben. Zudem muss dies in kurzen Abständen erneut möglich sein, da binnen einer Sekunde mehrere Pulse ausgesendet werden, um z. B. Strecken oder Flächen abscannen zu können. Das ausgesandte Signal muss anschließend durch einen Digitalverstärker verstärkt werden, um eine möglichst große Auslenkung des Piezoelementes zu erzeugen, welches der Schalldruck erzeugende Teil des Ultraschall-Transmitters ist. Dies geschieht zum Teil auch durch die genannten Bursts, indem der Ultraschallwandler mit seiner Eigenfrequenz mehrfach angeregt wird, um eine möglichst hohe Auslenkung zu erreichen. Die durch den Ultraschallwandler erzeugte Ultraschallwelle durchläuft nun die Luft, das zu untersuchende Material und wieder die Luft, bis es zum Ultraschall-Receiver gelangt. Der Empfänger ist sensibel und nimmt die Drücke des Signals wie auch andere auf. Diese Drücke und die damit verbundene Verformung erzeugen im dortigen Piezoelement eine Spannung, die abgegriffen werden kann und hinter dem Receiver von einem Vorverstärker verstärkt wird. Das so fortlaufende Signal wird vor dem A/D-Wandler noch ein mal verstärkt und anschließend digitalisiert. Im Computer werden aus den Signalen A-Bilder und dergleichen erzeugt. Um schnell viele A-Bilder und damit andere Darstellungsvarianten zu ermöglichen, bedarf es eines Scanners, der die zu prüfenden Flächen überfährt und je gewünschter Auflösung neue Impulse aussendet und wieder empfängt. So können die in folgendem Kapitel erläuterten Darstellungsvarianten in kurzer Zeit generiert werden.

### 2.2.3 Prüfbilder

#### A-Bilder

A-Bilder stellen die Spannungswerte einer Laufzeit gegenüber und bilden die Momentanwerte des Hochfrequenz-Signalsbildes (HF-Bild) ab. Im Gegensatz zu einem A-Bild in der Medizin wird in dieser Arbeit das HF-Bild als A-Bild bezeichnet. Dieses A-Bild hat in diesem Fall keine Beträge des HF-Bildes sondern das eingefangene Signal mit den Spannungswerten in positive wie negative Richtung. Dies hat den Vorteil, dass man bei

Bedarf Phasenverschiebungen ermitteln kann und Frequenzanalysen wie die Fouriertransformation angewandt werden können. In dieser Arbeit wurden die A-Bilder für die Ausrichtung der Ultraschallwandler und für das zu speichernde Zeitintervall verwendet, da sowohl Amplituden als auch die relevanten Signalanteile darauf zu erkennen sind.

Da beim Scannen einer Fläche sowohl in horizontaler als auch vertikaler Richtung Daten entstehen, welche durch die A-Bilder mit ihren Zeitinformationen noch repräsentativ für die Tiefenlagen sind, wird ein daraus erzeugtes Datenpaket im FZ-U auch als »Volumendatensatz« bezeichnet.

## B-Bilder

In dieser Arbeit wird der Begriff B-Bild für eine andere Aneinanderreihung von HF-Bildern genutzt, welche sich von denen in der Medizin (Impuls-Echo-Verfahren) unterscheidet. Für die Lambwellenmessung wurde eine separate Anordnung der Ultraschallwandler konzipiert, welche eine andere Art von (B-)Bildern und deren Deutung erfordert. In diesem B-Bild (Bsp. in Abb. 2.8) ist die Zeit gegen den Ort aufgetragen und der Spannungswert ist in einem Farbcode (Rot positiv, Weiß gegen Null, Blau negativ) dargestellt. Die einzelnen HF-Signale verlaufen von unten nach oben und sind neben einander angeordnet. Allerdings werden im Gegensatz zum Phased-Array-Wandler nur ein Transmitter und ein Receiver für die Messung verwendet. Also wird jedes HF-Signal von dem gleichen Ultraschallwandler-Paar erzeugt. Nur geschieht dies mit einer zunehmenden Abstandsänderung des Receivers zum Transmitter (siehe Kap. 3.3). Der erste vertikale Streifen links im Bild entspricht somit der ersten Messung nach dem ersten ausgesandten Ultraschallimpuls. Daneben schließt sich das zweite Signal an, welches bereits durch einen größeren Abstand zum Transmitter erzeugt wurde. Dies wiederholt sich. Es werden also gleichartige Signale zu gleichen Startbedingungen an immer weiter entfernten Stellen gemessen. Um so größer der Abstand vom Receiver zum Transmitter (bei gleichbleibender Auflösung) wird, um so breiter wird somit auch das B-Bild bzw. um so mehr Spalten erhält es. Da der Receiver verfahren wird, sind ausgesandte Signale

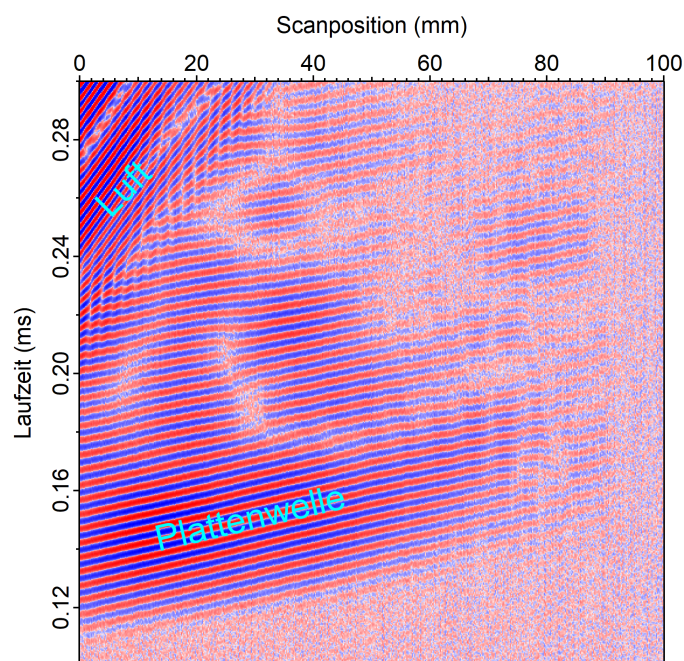


Abb. 2.8: B-Bild einer Lambwellenmessung mit örtlich variablem Receiver

in der nächsten Spalte zeitlich weiter fortgeschritten und wandern im B-Bild nach oben. Diese Darstellung erzeugt im B-Bild der Plattenwelle bei günstigen Messbedingungen durch das Verfahren des Receivers auf Grund der leicht versetzten Wellenberge und -täler ein angeschrägtes Streifenmuster. Je nach Geschwindigkeit der Ultraschallwelle hat dieses Streifenmuster einen stärkeren oder schwächeren Anstieg, wobei hier ein stärkerer Anstieg einer geringeren Phasengeschwindigkeit entspricht (siehe Abb. 2.8)

### C-Bilder

Die in dieser Arbeit verwendeten C-Bilder entstehen durch Transmissionsscans. Das C-Bild (siehe Abb. 2.9) entspricht einer Draufsicht aus Richtung des Receivers und stellt die Klebeschicht (lila, gelb), eine Metallplatte (lila) und eine Plastikplatten-/Luftfläche (weiß) dar. In einem Farbcode ist pro Messpunkt/A-Bild die Amplitude eines definierten Zeitbereiches dargestellt. Stellen geringerer Signalstärke (lilane Stellen) deuten auf eine höhere Dämpfung des Ultraschallsignales hin. Die ist z. B. bei Delaminationen oder Lunkern innerhalb eines Werkstückes der Fall, da an Grenzübergängen von Materialien i.d.R. viel Schallenergie reflektiert wird. Die Unterscheidung der Plastikplatte und der Luftfläche ist anhand dieses C-Bildes nicht möglich, da beides weiß dargestellt ist. Die Zeitblende wird also immer auf den zu untersuchenden Bereich angepasst und stellt hier somit die Klebefläche günstig dar.

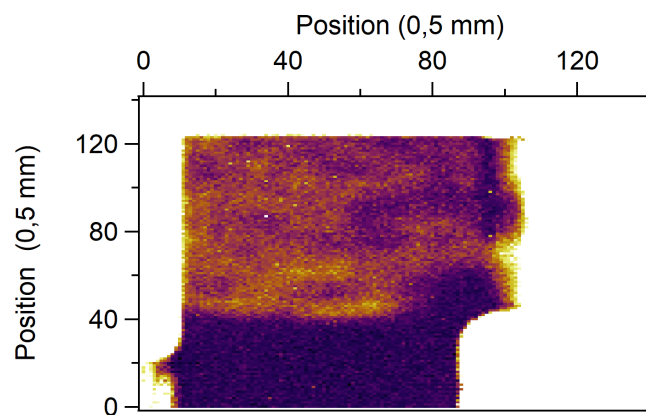


Abb. 2.9: C-Bild einer Transmissionsschulmessung eines Klebewinkels

### D-Bilder

D-Bilder haben aus Richtung des Ultraschallreceivers ebenso eine Draufsicht auf das gemessene Objekt und erzeugen daher ein Flächenbild. Hierbei wird pro Messpunkt lediglich die zeitliche Verortung des jeweiligen Maximums dargestellt. Kommen alle Spannungsmaxima in einem homogenen und überall gleichbleibend dicken Objekt zum gleichen Zeitpunkt an, so erhält man ein Flächenbild gleicher Farbe. Gibt es hingegen unterschiedliche Dicken, welche dazu führen, dass an anderen Stellen des Bildes Signale zu einer anderen Zeit auftreffen, so wird dies im D-Bild farblich von einander abgegrenzt. Diese Darstellungsform wird nicht weiter berücksichtigt, da sie in dieser Arbeit nicht verwendet wurde.





# 3 Methodik

## 3.1 Luftschallmessplatz

Der Luftschallmessplatz befindet sich in einem Ultraschalllabor, in welchem die Temperaturen zwischen 19°C und 25°C schwanken können. Für die Machbarkeitsuntersuchung, ob Klebezustände vor dem Bruch mittels luftgekoppeltem Ultraschall erfasst werden können, steht ein Scanner der Firma Isel Germany AG zur Verfügung. Dieser wiederum ist mit der Laboranlage SonoAir des Unternehmens SONOTEC GmbH kombiniert. Fast alle Machbarkeitsuntersuchungen mit luftgekoppeltem Ultraschall werden mit diesem System sowie daran angeschlossene Ultraschalltransmitter und -receiver durchgeführt. Ziel dieser Machbarkeitsuntersuchungen ist es i.d.R. einen Weg zu finden, qualitätsmindernde Stellen und deren Ausmaß im Material oder Werkstück detektieren zu können. Hierfür werden je Projekt diverse Proben- und Ultraschallwandlerhalterungen entwickelt und getestet. Pro Auftrag kommen oft mehrere Ultraschallwandler verschiedener Frequenzen zum Einsatz, um das bestmögliche Ergebnis zwischen Auflösung und Signal-Rausch-Verhältnis zu ermitteln. In der PC-Software SonoStudio werden dann sowohl das SonoAir als auch der Scanner angesteuert und konfiguriert.

### 3.1.1 SonoAir/Ultraschallmesstechnik

Das SonoAir unterstützt 1 bis 4 Ausgangs- wie Eingangskanäle, welche Signale auf Ultraschallwandler transferieren und abgreifen bzw. die A/D-Wandlung vornehmen. Es können Ultraschalltransmitter mit bis zu 800 V betrieben werden. Die integrierte Hardware unterstützt die vom FZ-U verwendeten Prüfköpfe der Frequenzen 50 kHz bis 400 kHz. Die Empfangselektronik bietet eine analoge Verstärkung von bis zu 120 dB. Bei stärker dämpfenden Werkstücken oder Materialien wird so dennoch ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis gewährleistet.<sup>[9]</sup>

Für die Signalerzeugung und den Empfang wurden sowohl in Transmission als auch in der Pitch-Catch-Anordnung 200-kHz-Ultraschallwandler (Sonoscan CF 200) von SONOTEC verwendet.

In diesem Fall wird der Ultraschallwandler mit 400 V betrieben und es gibt hinter dem Empfänger noch einen Vorverstärker, der das Signal mit bis zu 60 dB verstärkt und innerhalb des Sonoairs kann das Signal erneut bis zu 60 dB verstärkt. Diese Verstärkung ermöglicht den Empfang und die Darstellung sehr schwacher Signale und führt somit auch zu einem respektablen Signal-Rausch-Verhältnis. Zusätzlich ist ein Bandpassfilter aktiv, welches eine definierte Ultraschallfrequenz je nach Bedarf begünstigt durchlässt.

### 3.1.2 Isel-Scanner

Für die meisten Ultraschall-Messungen steht ein Luftultraschallscanner von Isel zur Verfügung (Abb. 3.1). Dieser misst in der Länge 2,3 m, in der Breite 0,7 m und in der Höhe 1,6 m. Er kann auf insgesamt drei Achsen sowohl vertikal als auch horizontal verfahren werden. Zwei hochkant-Achsen (In der Bedien-Software SonoStudio x- und

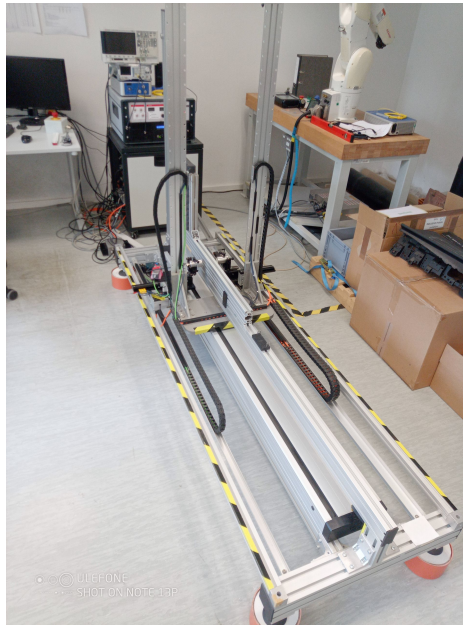


Abb. 3.1: Isel-Scanner

y-Achse) können sowohl einzeln als auch parallel zu einander bis zu einem Meter hoch verfahren werden. Horizontal kann der Scanner (Im SonoStudio ist dies als z-Achse bezeichnet) ca. 2 m verfahren werden. Somit sind Flächenscans von 2 m x 1 m möglich. Abhängig von der Auflösung, mit welcher gemessen wird und der Aufnahmezeit pro Messpunkt/A-Bild ist die tatsächlich mögliche Scanfläche sehr viel kleiner. Eine Auflösung von 1 mm pro Messpunkt in Höhe und Breite und einer Zeitspanne von nur 200  $\mu$ s Aufnahmezeit pro Messpunkt bewirkt eine Überlastung des Arbeitsspeichers bereits nach einer Fläche von einem viertel Quadratmeter. Aufnahmezeit pro Messpunkt wie auch die Auflösung werden also pro Scanfläche und Kundenanforderung angepasst.

### 3.1.3 Datenanalyse und Datenauswertung

Um Daten aus einem Scanvorgang auslesen und verarbeiten zu können, stehen derzeit die zwei Programme SonoStudio, Version: 1.1.1.31375, exceeding solutions GmbH, Halle Deutschland und Igor Pro 8, ©1988-2018 WaveMetrics, Inc., Lake Oswego, Oregon, USA zur Verfügung.

Das SonoStudio enthält neben den Programmbausteinen für die Ansteuerung des Isel-Scanners und des SonoAirs noch ein digitales Oszilloskop und die Möglichkeit, erfasste Scan-Daten als A-, B-, C- und D-Bilder darzustellen. Für die Bild- und Datenverarbeitung wurde nach ersten Einblicken über das SonoStudio die Daten-Analyse-Software Igor Pro (kurz Igor) verwendet.

Für die Auswertung der Messwerte stehen verschiedene Routinen (Teilprogramme), welche in Igor erstellt worden sind, zur Verfügung. Zunächst werden die Volumendatensätze eingelesen und in eine für Igor nutzbare Form gewandelt. So entstehen innerhalb Igers mehrere Arrays und Ordnerstrukturen, welche je die Informationen über eine Messung (in diesem Fall Position, Zeit und Schallpegel) in sich tragen. Diese werden dann für die Erstellung von A-, B- oder C-Bildern genutzt, welche, wie in Kap. 3.2.2 und in Kap. 3.3.2 erklärt, verarbeitet werden können.

## 3.2 Transmission

### 3.2.1 Transmissionsscans mit luftgekoppeltem Ultraschall

Das in Kap. 2.2 behandelte Prinzip der Transmission mittels Luftultraschall ist in Abb. 3.2 umgesetzt worden. Es kommen Ultraschallwandler der Frequenz 200 kHz zum Einsatz. In Abb. 3.2a ist eine Draufsicht dargestellt, die der Ultraschallreceiver selbst in Form von Ultraschallamplituden einfängt, wenn er über die Probe fährt. Die in Abb. 3.2b dargestellte Ansicht von der Seite, verdeutlicht die Gegenüberstellung des Ultraschallwandlerpaares. Der Ultraschalltransmitter rechts sendet ein Burstsinal und der gegenüberliegende Receiver empfängt das Signal. Die Abstände zur Probe hin orientieren sich hierbei am Fokuspunkt der Ultraschallwandler und an der Kollisionsmöglichkeit mit anderen Bauteilen. Das bedeutet, dass der Abstand des Fokuspunktes (ca. 10 mm), welcher das Maximum des ausgesandten Ultraschallbündels enthält, nicht oder kaum unterschritten wird aber sofern es einer Anpassung der Konstruktion bedarf, können die Ultraschallwandler etwas von der Probe entfernt werden. Der Grund hierfür ist die Schallfeldgeometrie, die dafür sorgt, dass die Intensität hinter dem Fokuspunkt nur langsam schwächer wird. In Abb. 3.2c wird zudem deutlich, dass die Proben in der Transmissionsanordnung sehr gerade eingespannt werden, um eine maximal mögliche Transmission, welche anschließend vom Receiver detektiert wird, zu gewährleisten.

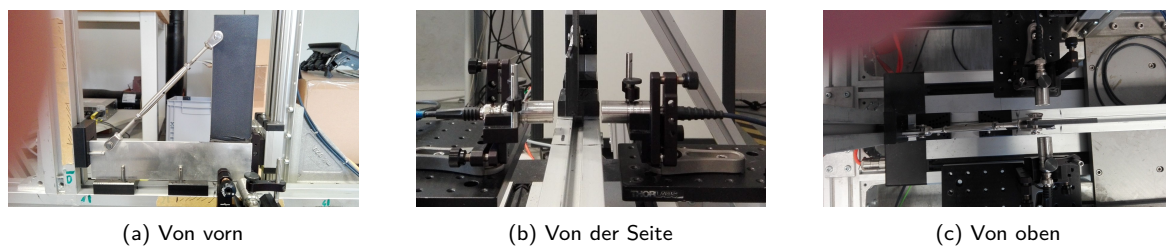


Abb. 3.2: Transmissions-Anordnung

### 3.2.2 Auswertung der Transmission

Für die Auswertung der C-Scans stehen halbautomatische Software-Tools (Igor-Routinen) zur Verfügung. Die in Kap. 2.2.3 erläuterten C-Bilder werden mit den Volumendaten erzeugt. So entsteht in Igor das C-Bild mit den Maxima der jeweiligen Messpunkte. Aus den C-Bildern lässt sich bereits erkennen, an welchen Stellen die Schallenergie besonders gut durch das Material gelangt. Um qualitative Aussagen über eine Änderung der Proben treffen zu können, müssen verschiedene Zustände derselben Probe miteinander verglichen und damit verrechnet werden.

Die IGOR-Routine erstellt mehrere Bilder aus der Verrechnung der C-Bilder vor (Referenz) und nach der Alterung (Bild) einer Probe (links oben im Bild), wie sie in Abb. 3.3 zu sehen sind. Die drei Bilder unten zeigen von links nach rechts ein Differenzbild (Bild/Gealterte Probe - Referenz/ungealterte Probe), ein Bild der Absolutbeträge aus dem Differenzbild sowie das Verhältnis der Pegel von gealterter zu ungealterter Probe. Rechts oben im Bild ist das zugehörige Histogramm eingefügt, welches die Häufigkeit und Stärke der Differenzen der abgewichenen Amplituden über einen Teil von ca. 7 cm<sup>2</sup> im inneren der Klebeschicht ausweist.

Der Nutzen dieses Vorgehens bzw. dieser Routine liegt darin, dass man selbst bei schwächeren Differenzen zwischen der gealterten und der Referenzprobe eine Änderung

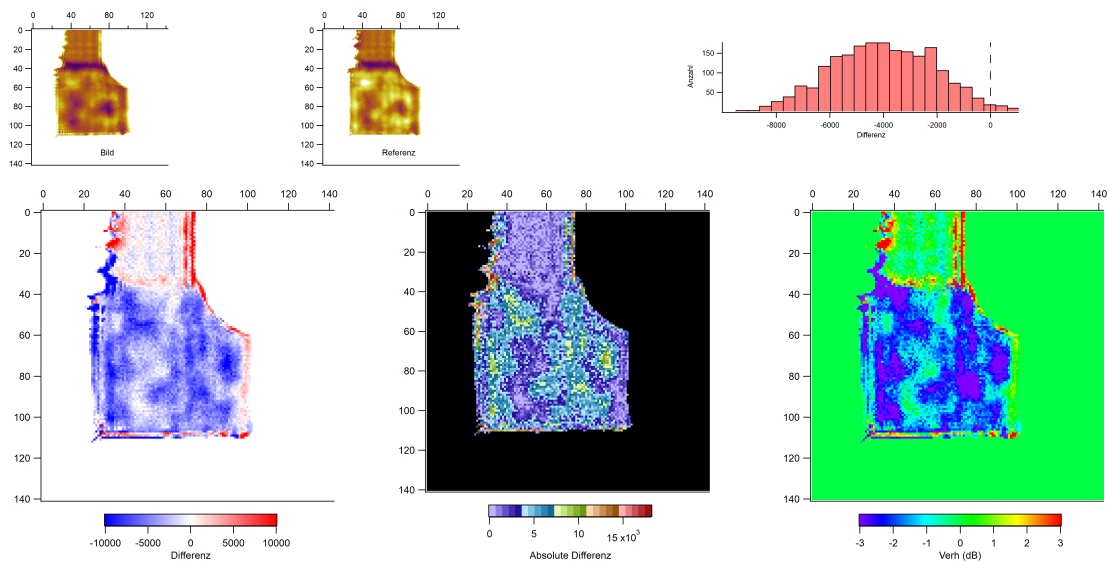


Abb. 3.3: Differenzbild von Klebewinkel 10 (gealterte Probe - ungealterte Probe)

in der Klebeschicht deutlich sichtbar macht (siehe Abb. 3.3 links unten). Etwas schwieriger im Bild sind die Referenzflächen des Metalls und der Plastikplatte zu erkennen. Durch eine gewählte Zeitblende werden Teile des Klebewinkels besser hervorgehoben (Klebeschicht) und andere dezenter (dünner Streifen nach oben der Metallplatte) oder gar nicht (Nach rechts von der Klebeschicht verläuft die Plastikplatte, welche durch die Zeitblende nicht mehr zu erkennen ist.) dargestellt. Die blaue Farbe deutet hierbei auf eine Abschwächung des Signals im Vergleich zur Referenz vor der Alterung hin. Die Prägnanz der Abweichung wird über das Histogramm deutlich. Es ist also möglich Änderungen zu erfassen.

Schwieriger ist es, treffende Aussagen über die Charakteristik der einzelnen Klebeschichten zu finden. Das C-Bild gibt eine Information über die Durchlässigkeit des Materials für den Ultraschall wieder. In welchem Zustand sich eine Klebeschicht hinsichtlich der baldigen Ablösung befindet, ist Gegenstand aktueller Untersuchungen und wird in dieser Arbeit nur leicht angerissen.

#### 4-Punkt-Messung

Als Referenz wurden außerdem an vier definierten Punkten (reine Luftstrecke, Luft und Kunststoffstrecke, Luft und Metallstrecke, Luft Kunststoff Kleber Metallstrecke) A-Scans aufgenommen, welche sowohl für den Vergleich unterschiedlicher Laufzeiten als auch Intensitäten genutzt werden. Die reine Luftstrecke bildet meist einen guten Vergleich mit anderen Materialien, was die Laufzeit angeht. Das bedeutet, in den meisten Fällen kann man bei Kenntnis über die Dicke eines zu messenden Materials einen zeitlichen Versatz der Empfangsimpulse feststellen und hieraus eine Schallgeschwindigkeit im Material ermitteln.

### 3.3 Pitch-Catch

Bei der Transmissionsmessung werden sowohl Transmitter wie auch Receiver zeitgleich zu einander verfahren. Das heißt, beide Ultraschallwandler bewegen sich nicht in Relation zu einander. In der Pitch-Catch-Anordnung der umgesetzten Methode wird

nur der Receiver radial weg vom Transmitter verfahren. Die Darstellung in Abb. 3.4 verdeutlicht dieses Verfahren. Mit jedem neuen Ultraschallimpuls ist der Receiver bereits weiter gefahren und misst eine Plattenwelle, die örtlich und zeitlich länger als jene zuvor durch die Platte geführt wurde.

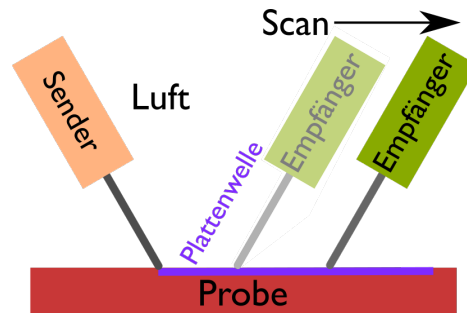


Abb. 3.4: Einseitige Messung einer Plattenwelle mit luftgekoppeltem Ultraschall

In der Abb. 3.5 ist die einseitige Prüfungsanordnung mittels Plattenwellen praktisch umgesetzt worden. Der Ultraschalltransmitter links ist hierbei fest an dem Scanner montiert und bewegt sich während der Messung nicht. Der Ultraschallreceiver wird hingegen während der Messung aus dieser Position nach rechts verfahren um alle 0,2 mm ein neues Signal zu empfangen. In dieser Abbildung gibt es noch einen Höhenversatz beider Ultraschallwandler zu einander. Dies wurde bei späteren Messungen korrigiert und dient lediglich der Kenntlichmachung eines Parameters von vielen, welche beim Wiederaufbau der Messanordnung berücksichtigt werden müssen.

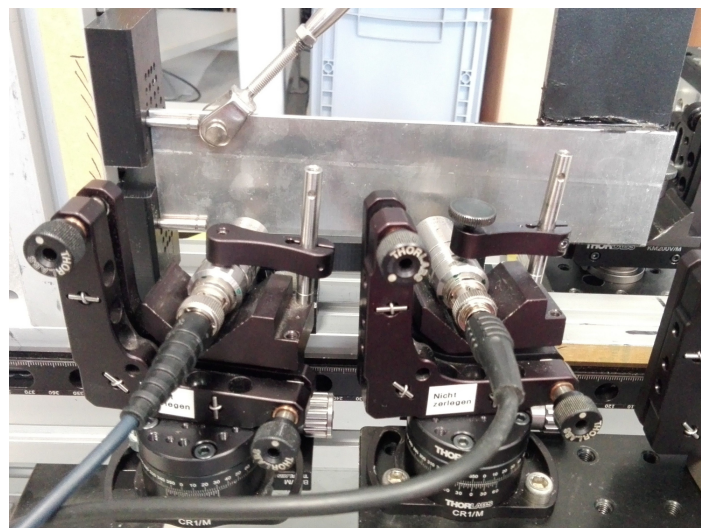


Abb. 3.5: Pitch-Catch-Anordnung, links statischer Sender, rechts horizontal-verfahrbare Empfänger

Es ist auch möglich eine beidseitige Prüfung durchzuführen. Dies hat den Vorteil, dass das Luftschallsignal noch um die Probe herum gelangen muss, um eingefangen zu werden. Dies wiederum separiert das Plattenwellensignal weiter vom Luftschallsignal, was die Auswertung etwas erleichtert. Da die einseitige Prüfung jedoch praktikabler ist, wurde sie bevorzugt.

### 3.3.1 Anregung von Plattenwellen

Laut dem in Kapitel 2.1 erläuterten Brechungsgesetz ist der Einschallwinkel von der Plattenwellengeschwindigkeit in dem Material abhängig. Wenn man also eine Lambwelle erzeugen will bzw. eine ganz bestimmte Mode einer Lambwelle, dann sollte man die Schallgeschwindigkeit im Material idealerweise kennen. Aus dem Verhältnis der Schallgeschwindigkeiten  $c_{\text{Luft}}$  in der Luft und jener in dem Material  $c_{\text{Al}}$  lässt sich so der Einschallwinkel  $\alpha_{\text{Luft}}$  entsprechend des Brechungsgesetzes (2.10) ermitteln. Der errechnete Einschallwinkel  $\alpha_{\text{Luft}}$  von  $3,1^\circ$  bietet somit eine grobe Orientierung für die Ausrichtung der Ultraschallwandler bezogen auf die Messung einer Lambwelle in einer Aluminiumplatte.

Da Materialunterschiede wie Variationen von Legierungen, unterschiedliche Zusammensetzungen von den einzelnen Kunststoffverbindungen und dergleichen immer eine Abweichung der Plattenwellengeschwindigkeit in den Werkstücken hervorrufen, geben die errechneten Werte eher eine grobe Richtung der Winkel vor. Selbst die Herstellung der Ultraschallwandler und deren Abstrahlwinkel hat einen Einfluss auf deren Ausrichtung.

Des Weiteren spielen Nah- und Fernfeld eine Rolle beim Abstand der Ultraschallwandler zur Probe und es gibt je Probe mehrere Orte an denen der Schall in das Material eingetragen werden kann, was wiederum das Messergebnis maßgeblich beeinflusst. Die eingetragene Energie muss zudem ausreichen, um sie an einem anderen Ort wieder messen zu können, was weder eine zu kurze Strecke für den Messbeginn noch eine zu lange erfordert. Der Grund hierfür liegt zum einen in der Nähe vom Ultraschallempfänger zum -sender und zum anderen in einer günstigen Mindeststrecke, welche die Plattenwelle überhaupt erst benötigt, um sich durch die überlagerten Anregungen vollständig auszubilden. Ist der Abstand beider Wandler zu gering, kommt das Luftschallsignal über den direkten Weg noch vor der Plattenwelle an und überlagert diese, sodass sie nicht mehr zu erfassen ist. Ist die Dämpfung im Material sehr hoch, so wird die Plattenwelle evtl. noch vor ihrer Messung absorbiert, was die Messung unmöglich macht.

Das Anregen und Messen einer Plattenwelle ist also von mehreren Faktoren abhängig und die Ausrichtung auf etwaige Moden und deren Maxima stellt eine zusätzliche Herausforderung dar. Wie die Anregung und Messung letztlich realisiert wurde, wird in Kap. 4.3 beschrieben.

### 3.3.2 Plattenwellenauswertung

In Kapitel 2.2.3 wird beschrieben, wie B-Bilder in Igor erzeugt werden. Diese werden wiederum für die in diesem Kapitel beschriebene Nullstellenverfolgung genutzt, um eine Grundlage für die Berechnung der ortsbezogenen Plattenwellengeschwindigkeit im Material zu erhalten. Wie bereits erwähnt werden die B-Bilder in Form von nebeneinanderliegenden A-Bildern erzeugt. Im Vergleich zum ersten Sendesignal hat das zweite Sendesignal entsprechend der in Abb. 3.4 dargestellten Pitch-Catch-Anordnung somit mehr Weg und Zeit sich bis zu seiner Messung auszubreiten bzw. weiter durch die Platte geführt zu werden. Diesen Versatz von Spalte zu Spalte im B-Bild, der sowohl im Ort als auch in der Zeit entsteht, kann man nutzen um einen Anstieg von einem zum nächsten gleichwertigen Punkt derselben Phase zu ermitteln. Hierfür werden gleichphasige Nullstellen genutzt, welche im angrenzenden A-Bild versetzt sind, da das Signal in jenem weiter vorangeschritten ist.

Eine automatisierte Verfolgung dieser gleichphasigen Nullstellen (Grüne Punkte in Abb. 3.6 markieren gleichphasige Nullstellen) im jeweils daneben gelegenen A-Bild und die Erfassung deren Orts-(Positions-) und Zeitwerte erstellt somit ein neues Weg-Zeit-Diagramm mit ebendiesen Nullstellenkoordinaten. Bei geringen Messabständen

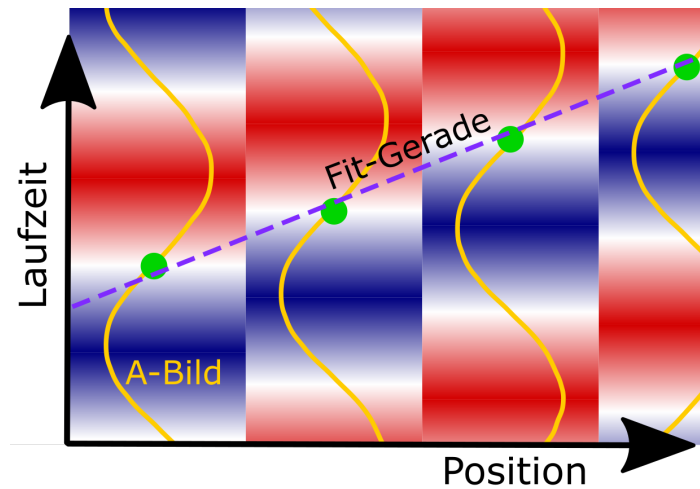


Abb. 3.6: Schema der Nullstellenverfolgung

von ca. 0,2 mm und durch nur geringe Geschwindigkeitsunterschiede innerhalb dieser gleichartigen Plattenwellen entsteht durch die erzeugte Punktfolge im neuen Diagramm nahezu ein geradliniger Verlauf (Abb. 3.7).

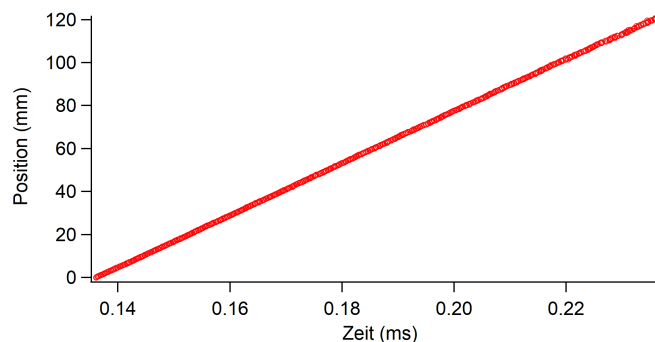


Abb. 3.7: Orts und Zeitwerte einer Nullstellenverfolgung gegeneinander aufgetragen

Um die Momentan-Phasengeschwindigkeiten aus einer Messung zu gewinnen, ist die Ableitung nach der Zeit eine gängige Lösung. Allerdings ergibt sich aus unterschiedlichen Impulsen in Verbindung mit dem Rauschen hierbei ein Problem. In Abb. 3.6 erkennt man den Versatz der einzelnen Phasen von einem Messort zum nächsten. Da diese Messungen sehr genau sind, können schon kleinere Abweichungen für einen negativen Anstieg sorgen. Das heißt, wenn ein Folgeimpuls zu früh gesandt wurde oder durch einen anderen Effekt die gleichphasige Nullstelle zeitlich vor der vorherigen liegt, dann entsteht bei einer Ableitung ein negativer Anstieg. Eine Differenzierung der Nullstellenwerte wie in Abb. 3.8 erzeugt somit starke Ausreißer und Negativgeschwindigkeiten. Daraus ergibt sich zudem ein sehr breiter Geschwindigkeitsbereich.

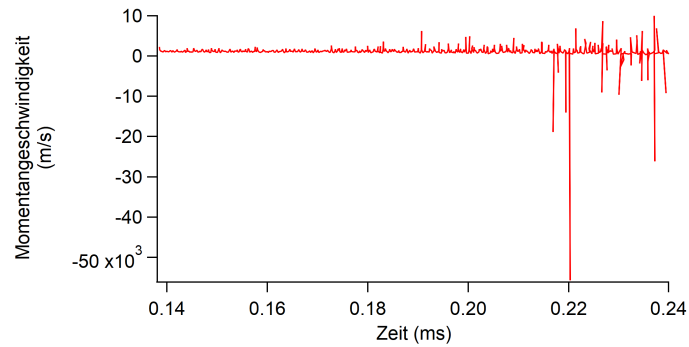


Abb. 3.8: Ausreißer und negative Phasengeschwindigkeiten beim Differenzieren

In Abb. 3.9 lässt sich der Ursprung der Ausreißer erahnen. Es gibt beim Verbinden der Punkte teils ein zeitliches Zurücklaufen und teils ein nach vorn (im Diagramm nach oben) Schnellen des Graphen. Das Differenzieren erzeugt somit bei fallenden Positionen pro Zeit eine negative Geschwindigkeit.

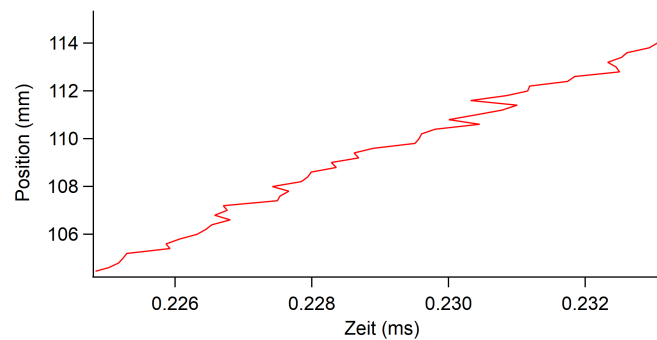


Abb. 3.9: Detailansicht der Orts- und Zeitwerte

Dieses Problem wurde wie folgt umgangen. Es wurden die entstandenen Messpunkte aus der Nullstellenverfolgung nicht miteinander verknüpft sondern über ein gewähltes Intervall eine Regressionsgerade durch alle Messpunkte ermittelt, welche die Momentangeschwindigkeit zuverlässiger wiedergibt. Zur Veranschaulichung ist dies in Abb. 3.10 dargestellt.

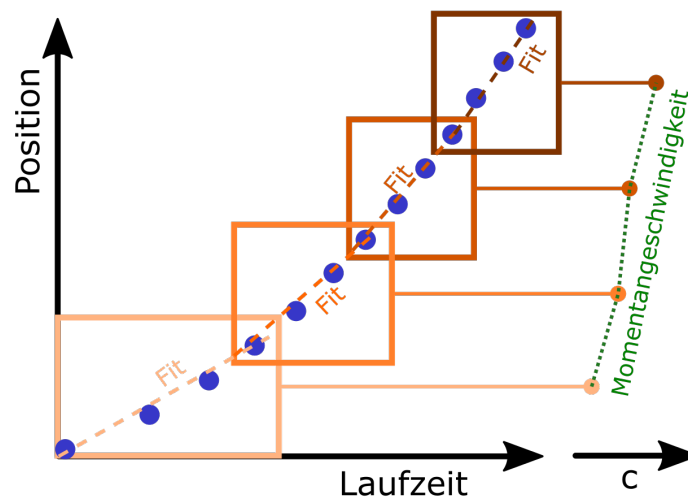


Abb. 3.10: Regressionsgeraden in kleinen Intervallen



Über ein nicht zu klein gewähltes Intervall ist die Wahrscheinlichkeit für ermittelte Negativgeschwindigkeiten gering und da keine Anstiege durch das Differenzieren ermittelt werden, werden die Momentangeschwindigkeiten kaum verzerrt.

Zudem werden in dieser Routine die Nullstellen vor und nach dem Startmesspunkt erfasst. Der Startmesspunkt liegt z. B. auf einem Wellenberg. Dann liegt zeitlich vor diesem Wellenberg ein Wellental und der durchs Interpolieren entstandene Durchgang durch die x-Achse enthält einen positiven Anstieg (steigende Nullstelle). Hinter dem Wellenberg ist der Anstieg an der zeitlich darauf folgenden Nullstelle negativ (fallende Nullstelle).

Es wurde erwartet, dass sich die Momentan-Phasengeschwindigkeiten um einen sich fortbewegenden Wellenberg herum nicht groß unterscheiden. Die Routine ermöglicht jedoch diesen Vergleich und zeigt auf, dass es Unterschiede bis hin in den Prozentbereich gibt.

Links im B-Bild (siehe Abb. 3.11) ist die Zeit gegen die Messpunkte/den Ort aufgetragen. Das Zeitintervall verläuft von 100 bis 300 Mikrosekunden nach dem Sendeimpuls eines 200 kHz-Burst-Signals auf eine Aluminiumplatte. Die Messpunkte können jeweils in einen Messort umgerechnet werden, wenn man weiß, mit welchem Abstand von Messpunkt zu Messpunkt gescannt wurde. In diesem Fall wurde je 0,2 mm gemessen, was bedeutet, dass jeder der 500 Messpunkte 0,2 mm entspricht. 0,2 mm mal 500 Messpunkte entsprechen somit 10 cm Fahrtweg des Scanners zuzüglich des Messpunktes, der zu Beginn erfasst wurde. Insgesamt erhält man mit dem Messpunkt 0 somit 501 Messpunkte mit A-Bildern im Abstand von 0,2 mm.

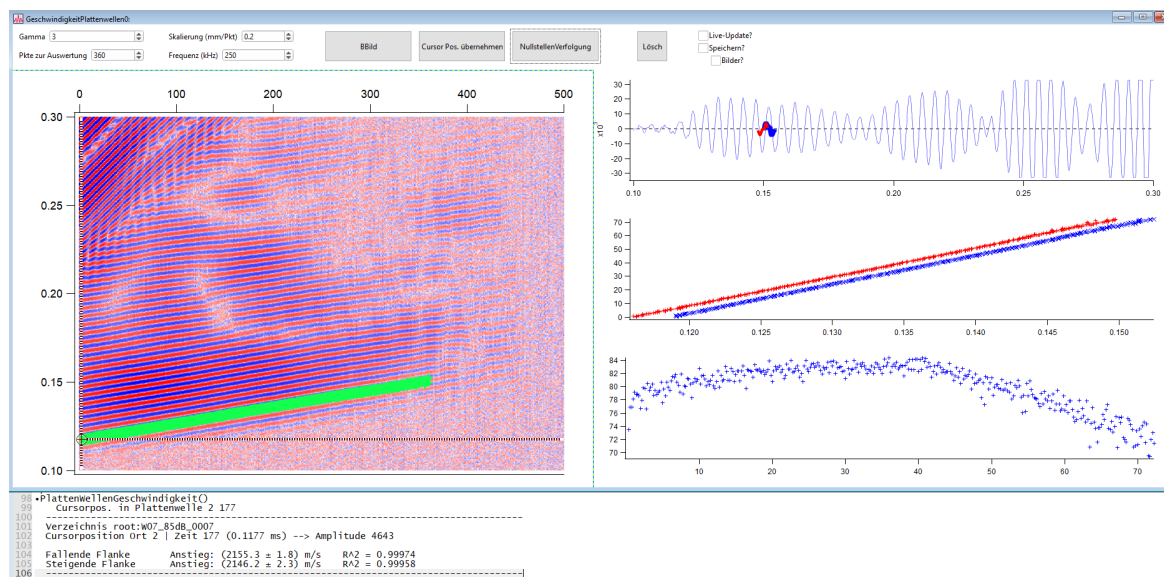


Abb. 3.11: Benutzeroberfläche für die B-Bild-Auswertung

Das Zeitintervall wurde so gewählt, dass es die zu messende Plattenwelle bzw. deren Schallpegel ausreichend darstellt, um jene(n) auswerten zu können. Unten im Bild und nach rechts einen größeren Bereich einnehmend erkennt man ein weißes Rauschen, welches für die Signalauswertung unerheblich ist, weshalb dieses in der Zeit zuvor herausgeschnitten wurde mittels des gewählten Intervalls. Dieses Rauschen ist auch rechts der 450 Messpunkte zu sehen. Diese Strecke wurde mit aufgezeichnet, um Beschleunigungseffekte des Scanners auf die Messung über der Probe zu reduzieren. Links oben im Bild erkennt man viele steile wie auch sehr klare Linien. Diese werden durch das Luft-Schall-Signal erzeugt, welches im Verhältnis zu anderen Wellen wie den Lambwellen sehr markant sind. Da sich der Empfänger während der Messung

immer weiter vom Sender entfernt, rückt das gemessene Luft-Schall-Signal zeitlich nach hinten (nach oben im Bild), da es immer später auf den Empfänger trifft. Ein weiteres Signal ist das Plattenwellen-Signal in der Mitte. Auch dieses rückt zeitlich nach hinten mit der Entfernung des Empfängers vom Sender jedoch nicht in dem gleichen Maß wie das Luft-Schall-Signal, da die Schallgeschwindigkeit in der Luft eine ca. 6-fach niedrigere ist als die Ultraschallgeschwindigkeit der niedrigsten asymmetrischen Mode in Aluminium. Der Schrägegrad entspricht somit einer Geschwindigkeit und da das Diagramm entgegen anderer die Zeit gegen die Position aufgetragen hat, entspricht ein steilerer Anstieg einer niedrigeren Geschwindigkeit.

Aus dem B-Bild resultiert bei günstigen Messbedingungen und einem gut platzierten Startpunkt für die Nullstellenverfolgung eine Art Gerade. Mit diesen Punkten kann man nun weitere Analysen durchführen. Eine erste Regressionsgerade zeigt eine Durchschnittsphasengeschwindigkeit einer gewählten Wellenfront. Pro Wellenfront weicht die Phasengeschwindigkeit etwas ab und zudem sind die Momentangeschwindigkeiten je nach Beschaffenheit der Probe und den Messbedingungen an den verschiedenen Orten auf der Probe unterschiedlich. Für einen Vergleich verschiedener Proben müssen also die Messbedingungen möglichst gleich sein und die Wellenfront sollte ebenso die gleiche sein.

In dem rechten oberen Diagramm ist ein A-Bild einer Ultraschall-Messung zu sehen, welches eine der senkrechten Linien aus dem B-Bild links repräsentiert. Der Schallpegel ist gegen die Zeit aufgetragen. Die übersteuerten Maxima haben oben keine Spitze wie unten die Minima ebenso keine haben. Die y-Achse wird mit ca. 65000 ( $2^{16}$ ) Punkten aufgelöst, wobei ca. 32000 und -32000 die obere und unter Grenze darstellen. Auf der x-Achse ist das gleiche Zeitintervall wie in dem B-Bild aufgetragen. In dem A-Bild rechts oben erkennt man grob drei verschiedene Bereiche. In dem vorderen Bereich von 100  $\mu\text{s}$  bis ca. 120  $\mu\text{s}$  existiert scheinbar nur ein Rauschen. Es schließt sich der interessante Bereich von ca. 120  $\mu\text{s}$  bis 240  $\mu\text{s}$  für die Auswertung an, welcher mehrere eingefangene Plattenwellensignale beinhaltet und in dem Diagramm mit seinen Maxima und Minima innerhalb der Grenzen der Skala liegt. Dahinter erstrecken sich bis zum Ende des Diagramms mehrere übersteuerte Luftschallsignale, welche an mehreren Stellen reflektiert werden aber sich auch über den direkten Weg von Transmitter zu Receiver ausbreiten. Da diese Signale ungleich stärker als das Plattenwellensignal sind, wurde die Verstärkung so angepasst, dass man das Plattenwellensignal bestens erkennt und auswerten kann. Dies führt dazu, dass die viel stärkeren Luftschallsignale weit unteren ihren Maxima abgeschnitten dargestellt sind.

In dem rechten mittleren Diagramm ist die Position/der Ort gegen die Zeit aufgetragen. Die enthaltenen Daten sind den Spurdaten der gewählten Wellenfront aus dem linken B-Bild entnommen. Auf der x-Achse ist zu erkennen, dass der Zeitwert bei knapp unter 116  $\mu\text{s}$  beginnt und bis ca. 152  $\mu\text{s}$  verläuft. Dies entspricht den gewählten Grenzen der Spur, welche im B-Bild erzeugt wurde. Da alle 0,2 mm ein neuer Impuls ausgesandt und eine erneute Messung vorgenommen wurde, werden in diesem Diagramm die Messpunkte in einen Ort in mm entsprechend der gewählten Spur im B-Bild umgerechnet. Hieraus errechnet sich mittels einer Regressionsgeraden die Durchschnittsgeschwindigkeit der gewählten Plattenwellenfront, welche links unten im Kommandoblock ausgegeben wird.

Im unteren rechten Diagramm ist der Schallpegel gegen den Ort aufgetragen. Die Grundverstärkung von 90 dB schwächt sich entsprechend mit fortlaufender Welle nach dem Schwächungsgesetz weiter ab und ist am Ende der gewählten Spur nur noch bei ca. 75 dB, weshalb das Hintergrundrauschen immer präsenter wird. Wenn die

---

Probe homogen ist und die Messbedingungen optimal eingestellt sind, ist durch die logarithmische Betrachtung bei homogenen Proben ein linearer Abfall des Schallpegels zu erwarten. Warum es ein periodisches Auf und Ab bei der Schallamplitude gibt, ist noch unklar.



# 4 Entwicklung der Messmethoden

Die Messmethoden an sich werden in der Praxis bereits in ähnlicher Form verwendet. Das häufige Scannen von Werkstücken und Materialien in Transmission ist Gegenstand vieler Projekte in dem Forschungszentrum Ultraschall gGmbH. Der Isel-Scanner wie auch das SonoAir-Gerät wird entsprechend viel genutzt. Jedoch ist je andersartiger Probe immer eine Anpassung des Messaufbaus erforderlich, welcher anschließend hinsichtlich der Auflösung und Geschwindigkeit optimiert wird.

Die Entwicklung einer Pitch-Catch-Anordnung ist hingegen im FZ-U zuvor kaum betrachtet worden und stellte eine neue Herausforderung dar. Es mussten sowohl Anordnungen ausprobiert, als auch Möglichkeiten gefunden werden, die Messergebnisse zu deuten und überhaupt erst ein mal zu verwerten. Thematisiert werden in den folgenden Kapiteln daher vorwiegend der Aufbau der umgesetzten Pitch-Catch-Anordnung und die Auswertung von den damit gemessenen Plattenwellen.

## 4.1 Anforderung an den Messplatz hinsichtlich der Reproduzierbarkeit der Messung

Um eine Messung wiederholt unter gleichen Bedingungen zu ermöglichen, sind die relevanten Bedingungen, die das Messergebnis maßgeblich beeinflussen, zu kennen und für jede neue Messung auf den gleichen Wert einzustellen. Für die einzelnen Auswertemethoden in beiden gewählten Messanordnungen waren vorwiegend die gleichbleibende Lage der Probe wie auch die Position und Ausrichtung der Ultraschallwandler in Bezug auf die Probe elementar. Andere Umgebungsbedingungen wie die Lufttemperatur und -feuchtigkeit wurden ebenso erfasst und teilweise intensiver untersucht. Zudem haben die gewählte Verstärkung des Empfangssignals und die gewählten Mittelungsparameter einen erhöhten Einfluss auf die Auswertung.

## 4.2 Proben

Es standen für diese Arbeit 12 Klebewinkel-Proben, sowie zusätzlich mehrere Plexiglasplatten verschiedener Dicke bereit. Für Voruntersuchungen wurden hauptsächlich Plexiglas-Proben verwendet, um ein besseres Verständnis über den Messprozess und die Auswirkungen sich ändernder Parameter zu erlangen. Durch die Komplexität der Klebeverbindungen war dieser Schritt logisch und konnte bei der Interpretation von Messergebnissen der Klebewinkel-Proben helfen.

### 4.2.1 Plexiglas-Proben

Die in Abb. 4.1 abgebildeten Plexiglasplatten sind dem Anschein nach homogen und haben bis auf die Dickenunterschiede (von links nach rechts: 4 mm, 5 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm, 15 mm, 20 mm und rechts oben 2 mm) von Probe zu Probe die



Abb. 4.1: Plexiglas-Proben

gleichen Maße von 200 mm x 150 mm. Plexiglasplatten haben den Vorteil, dass schon recht kleine Fehlerstellen innerhalb des Materials per Auge zu erkennen sind. In diesem Fall ist durch deren definierte Dicke ein Vergleich der Plattenwellengeschwindigkeiten unter der Änderung nur eines Parameters möglich.

Von den zur Verfügung stehenden Plexiglas-Platten wurden jene mit den Dicken 2 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 8 mm und 20 mm gescannt und jene mit 6 mm Dicke bevorzugt für weitere Untersuchung verwendet.

Zudem wurden Plexiglasplatten in verschiedenen Höhen abgescannt. Dabei wurde festgestellt, dass es an den Grenzen/Rändern der Platte zu einer Amplitudenerhöhung kommt. Vermutlich kann hier nicht nur die Oberflächenwelle sondern auch jene an der Seite eingefangen werden oder es gibt Randeffekte, die die Welle etwas weniger dämpfen oder konstruktiv mit anderen überlagern.

In weiteren Versuchen wurden Flexusplatten mit Plexiglas an der Hinterseite der Plexiglasprobe befestigt, um festzustellen, ob es einen Unterschied in der Plattenwellengeschwindigkeit dadurch gibt. Auswertungen hierzu bedürfen allerdings weitere Untersuchungen.

#### 4.2.2 Klebewinkel-Proben

Wie in Abb. 4.2 zu erkennen ist, werden vier Hauptkomponenten zu einer Klebewinkel-Probe miteinander verbunden. Darunter befinden sich je eine Plastikplatte (200 mm x 50 mm x 5 mm (grünes Plaste) bzw. 4 mm (schwarzes Plaste)) und eine Metallplatte (200 mm x 50 mm x 3 mm), welche mit einem Klebstoff verbunden sind. Die Klebefläche selbst ist 50 mm x 50 mm groß und die Schichtdicke beträgt zwischen 2,5 und 4 mm bei der grünen Plastikplatte und zwischen 3 und 4 mm bei der schwarzen Plastikplatte.

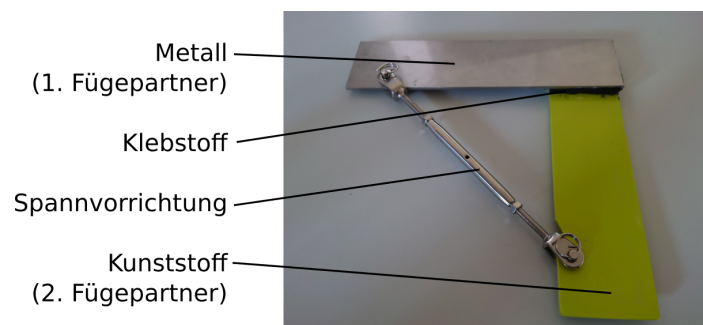


Abb. 4.2: Klebewinkel-Probe

Für einen Alterungsschritt wurden die Proben jeweils mit einer Spannvorrichtung versehen, um Scherspannungen in der Klebeschicht verursachen zu können.

Diese Klebewinkel wurden vor dem Alterungsschritt zum einen in Transmission und zum anderen mit geführten Wellen per Luftultraschall untersucht. Für einen Vergleich wurden die Proben nach dem Alterungsschritt wiederholt in den gleichen Anordnungen untersucht.

## 4.3 Entwicklung der Plattenwellen-Messung mit der Pitch-Catch-Anordnung

Wie bereits erwähnt war die Plattenwellenmessung in der Vergangenheit des FZ-U keine gängige Praxis. Dennoch sollten über ein Forschungsprojekt Klebewinkel in der Pitch-Catch-Anordnung untersucht werden. Es wurde vermutet, dass gestufte Klebezustände gemessen werden können, die eine Art Zeitspanne für die Haltbarkeit der Klebeverbindung bis zum Abreißen vorgeben. Eine Möglichkeit der Plattenwellenmessung und wie diese generiert wurde, wird in folgenden Kapiteln thematisiert.

Um mit weniger Aufwand ein Messergebnis zu erzielen, ist eine einseitige Prüfmethode wünschenswert. Aus diesem Grund wurde die Pitch-Catch-Anordnung gewählt. In den folgenden Kapiteln wird behandelt, wie diese Messanordnung umgesetzt wurde. Damit in einer späteren Messung die Messbedingungen nicht zu stark von einander abweichen, wurden überdies Einflussfaktoren und deren Einflussgrad auf die Messung ermittelt.

Um die einzelnen Einflüsse der verschiedenen Faktoren hinsichtlich ihrer Wirkung einordnen zu können, wurde der Messaufbau in Teilen immer wieder abgebaut und neu montiert bzw. erneut gemessen. Mit dem Ändern der Parameter konnte so ermittelt werden, welche Faktoren welchen Einfluss auf die Messung haben.

### 4.3.1 Einfluss der Messanordnung

#### Positionierung der Probe

Die Positionierung der Probe hat einen maßgeblichen Einfluss auf das Messergebnis. Da die Lambwellen-Erzeugung in einer Metallplatte einen verhältnismäßig kleinen Einschallwinkel voraussetzt, sollte die Probe während der Messung fest an ihrem Ort bleiben und sich nicht drehen. Hierzu wurden, wie in Abb. 4.3 dargestellt, Befestigungspins genutzt, mit denen die Bewegung oder Drehung der Probe verhindert wird. Zudem liegt die Probe unten auf dem Scanner auf bzw. ist links angelehnt. Dies ist mit jeder

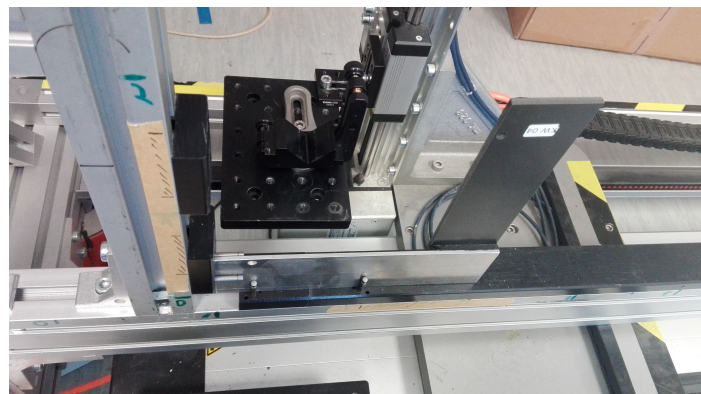


Abb. 4.3: Klebewinkel-Halterung

neuen Messung leicht zu reproduzieren und mit nicht signifikanten Positionsänderungen im Vergleich zur Vormessung verbunden.

Da auch in anderen Höhen zum Vergleich Lambwellen erzeugt werden sollten, wurde die Probe, wie in Abb. 4.4 abgebildet, in eine höhere Position gebracht. Die Ultraschallwandler-Halterung zu erhöhen wäre nicht nur komplizierter geworden. Sie hätte auch eine höhere Abweichung der Messung durch die erneute Montage zur Folge gehabt. Die Messungen aus dieser Position führten zu sehr ähnlichen Ergebnissen wie in der zuvor betrachteten Probenposition. Da diese Halterung allerdings etwas komplexer und weniger stabil war, wurde die weniger aufwändige Positionierung (siehe Abb. 4.3) weiter genutzt.

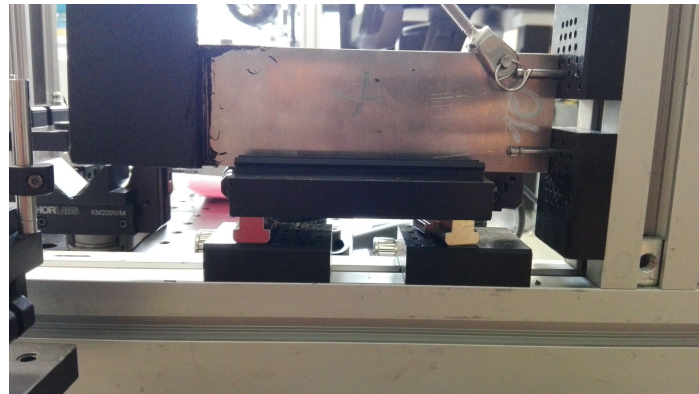


Abb. 4.4: Lambwellen-Messung in niedriger gelegener Spur

### Positionierung der Ultraschallwandler

Der Messaufbau soll sowohl einfach sein als auch bei nochmaligem Aufbau möglichst gleiche Ergebnisse erzielen. Die Ultraschallwandler müssen demnach fest montiert sein und zeitgleich den gleichen Abstand zur Probe über die gesamte Messdauer einhalten. In vorherigen Messungen wurden Linienscans durchgeführt, welche auch hier zur Anwendung kommen. Solche Linienscans sind durch einen statischen Ultraschallsender und einen ortsvariablen Ultraschallempfänger, welcher sich bei der Messung radial entfernt, charakterisiert. Dies hat den Vorteil, dass für jeden neuen Abstand (z. B. 0,5 mm) ein weiterer Impuls an der gleichen Stelle ausgesandt wird, welcher sich durch die gleichbleibenden Bedingungen beim Einschallen in die Probe auch weitestgehend gleich verhält. So kann über mehrere gleichartige Signale ein Wellenmuster erzeugt werden, welches die Wellenberge und -täler zu den entsprechenden Ort-Zeit-Koordinaten beinhaltet. Während der Ultraschallsender fest an einem Ort verbleibt, muss sich der Empfänger parallel zur Oberfläche der Probe fortbewegen. Die Radialbewegung sollte ebenso entlang der Probe verlaufen.

### Ausrichtung der Ultraschallwandler

Die Ausrichtung der Ultraschallwandler ist entsprechend des Brechungsgesetzes abhängig von der Materialkombination und den Schallgeschwindigkeiten in jenen. Je höher die Schallgeschwindigkeit im Material ist, desto steiler ist der Einschallwinkel. Da es pro Material oft mehr als nur eine anregbare Mode gibt, wird in diesem Fall mit der am leichtesten anregbaren gearbeitet. Das bedeutet, dass die Winkeleinstellungen der Ultraschallwandler so angepasst werden, dass ein möglichst starkes Signal mit möglichst geringen Interferenzen für die Auswertung entsteht. Die Wandlerhalterungen haben



neben einer ablesbaren Winkeleinstellung um die vertikale Achse herum noch zwei weitere Stellschrauben, welche das Kippen um die horizontale und um die vertikale Achse herum erlauben. Diese werden für eine Signalsoptimierung hinsichtlich der Stärke des Signals genutzt. Es ist darauf zu achten, das Maximum des Signals einzufangen, wie auch geringe oder keine Überlagerungen mit anderen Signalen zu erwirken.

### Schallpegel- und Empfangserhöhung

Je höher die eingesandte Schallenergie ist, um so besser ist das Signal-Rausch-Verhältnis. Das SonoAir stellt theoretisch bis zu 800 V Ausgangsleistung für das Anregen der Ultraschallwandler zur Verfügung. Jedoch sind diese nur unter bestimmten Bedingungen möglich. Die höchstmögliche Ausgangsspannung ohne Modifizierung des SonoAirs liegt bei 400 V. Mit diesen werden die Ultraschallsignale erzeugt.

Im Gegensatz zur Ausgangsverstärkung verändert die Empfangsverstärkung nichts am Signal-Rausch-Verhältnis. Da allerdings auch das Rauschen selbst sehr gering ist, werden in diesem Projekt Signalbilder mit bis zu 100 dB verstärkt, um überhaupt Aussagen über das Signalverhalten treffen zu können. Die Verstärkung bei der Untersuchung der Klebwinkel richtet sich nach dem höchsten Ausschlag nach der Ausprägung der Lambwelle. Das heißt, der Ultraschallempfänger wird an eine Stelle gefahren, bei der die Plattenwelle voll ausgeprägt zu sein scheint und an dieser wird die Verstärkung auf das gewünschte Signal hin angepasst, also verstärkt, sodass die Maxima gerade noch auf dem Signalbild erscheinen.

Da sowohl die Materialien unterschiedlich stark dämpfen wie auch die Impedanzunterschiede zwischen Luft und den Materialien verschieden sind, wird auch die Amplitudenverstärkung demnach variabel geregelt. Da das Rauschen selbst mit verstärkt wird, ändert sich hierbei zwar nichts am Signal-Rausch-Verhältnis, allerdings gibt es über eine längere Laufzeit des Signals auch verschiedenartige Wellen, die erfasst werden.

### Einflussfaktor Winkel

Da für die nötige Lambwellen-Erzeugung teils geringe Einschallwinkel erforderlich sind und die Messung sehr empfindlich gegenüber Winkelveränderungen reagiert, wurden entsprechend Abb. 4.5 verstellbare Montageelemente der Firma Thorlabs genutzt, welches die Ultraschallwandler in einer V-Lagerung arretiert. Anschließend werden sie



Abb. 4.5: US-Wandlermontage/Stellelement

um die vertikale Achse gedreht und zudem um die vertikale wie auch horizontale Achse leicht geschwenkt, um die eingefangene Signalintensität zu erhöhen. In der Pitch-Catch-Anordnung können die Einschallwinkel an den Ultraschallwandler-Halterungen mit einer Genauigkeit von ca. 5 Winkelminuten eingestellt werden. Diese wurden während der Justierung zunächst senkrecht zur Probenoberfläche eingestellt, um  $0^\circ$  um die vertikale Drehachse herum zu definieren. Dann wurden verschiedene Winkel ausprobiert, die das Signalbild veränderten und möglichst eindeutig ein sich abgrenzendes Signal einer Plattenwelle darstellen. Anschließend wurden die Stellschrauben für das Schwenken der Ultraschallwandler um die x- (Aus Senderichtung des US-Wandlers von links nach rechts), und y-Achse (Aus Senderichtung des US-Wandlers von unten nach oben) für ein nochmaliges Erhöhen der Signalamplitude genutzt.

### **Einflussfaktor Bauteile**

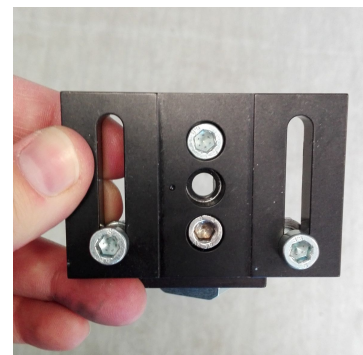
Der Ultraschallwandler muss zunächst senkrecht auf die Probenoberfläche zielen, um einen Startpunkt für die Ausrichtung der Ultraschallwandler zu bestimmen. Um Effekte wie frühe Reflexionen an Rändern zu vermeiden soll der Transmitter zudem in die Mitte der Plattenoberfläche schallen. Hierzu ist eine Halterung (Abb. 4.6) von Nöten, die an der x-Achse des Scanners angebracht werden kann. Der mit der Befestigungsplatte verschraubte Winkel weist auf beiden Flächen je ein Langloch und außen 6 Innengewinde auf. Die Befestigungsplatte wiederum hat innen auf der Platte drei Löcher und außen



(a) Montageplatte und Befestigungswinkel von unten



(b) Montageplatte und Befestigungswinkel von hinten



(c) Montageplatte und Befestigungswinkel von oben

Abb. 4.6: Verschraubung von Montageplatte und Befestigungswinkel

je ein Langloch. Beide Teile werden über das in der Mitte liegende Langloch und die in der Mitte liegenden Löcher mit Innensechskantschrauben, Unterlegscheiben und Muttern miteinander wie in Abb. 4.6 (a) und (c) verschraubt. Die Befestigungsplatte selbst dient wiederum als Anbringvorrichtung für die Ultraschallwandler-Halterung (Abb. 4.7). Die beiden Innensechskantschrauben verbinden beide Fügeteile zunächst nur locker und werden erst am Anschlag mit händischer Arretierung festgeschraubt, sodass kein Teil während des Verschraubens verrutscht.

Für eine genaue Ortsbestimmung der Befestigung am Scanner wird zunächst ein umgedrehtes Lineal in der oberen Schiene (siehe Abb. 4.8) an der Seite der x-Achse des Scanners befestigt. Mit Hilfe eines Winkels oder geraden Objektes kann die 330 mm Marke des Lineals mit der horizontalen Achse auf eine Höhe gebracht werden. Da das Lineal auf Grund der näher an der Achse liegenden Skala um  $180^\circ$  gedreht wurde, wird deren Skala von links nach rechts kleiner. Die 330 mm Marke wurde auf Grund von Barrieren auf der linken Seite des horizontalen Trägers gewählt, hätte aber auch weiter nach rechts verschoben werden können, um z. B. die 400 mm Marke zu nutzen.



(a) US-Wandler-Halterung von rechts



(b) US-Wandler-Halterung von hinten

Abb. 4.7: Verschraubung von Befestigungsstruktur und US-Wandler-Halterung

Nach dem Verfahren der horizontalen Achsen zum Offset für die Plattenwellenmessung wird nun die Ultraschallwandler-Halterung in der unteren Schiene an der Seite der x-Achse befestigt. Von hier aus wird ein Abstand beider Befestigungsplatten von 17,5 mm abgemessen und die Befestigungsplatte des Senders fest angeschraubt. Da der Winkel mit nur einer Schiebemutter bzw. einer Schraube an die Schiene angebracht wird, liefert das Lineal gleichermaßen eine Anlegefläche für die Befestigungsplatte von vorn und für den Metallwinkel von unten. So kippt die Sendevorrichtung nicht, ist aber dennoch so flexibel, dass sie bei kurzzeitiger Berührung der Empfängerplatte etwas verschoben und nicht zerstört wird, bis man den Not-Aus-Knopf drücken kann.

Bedingt durch die verschiedenen Bauteile, welche teilweise zerlegt werden, um andere Messungen durchführen zu können, ändert sich die Positionierung der Ultraschallwandler-Halterungen etwas mit. Zudem werden teils die Befestigungsplatten der y-Achsen demontiert und wieder montiert, was einen weiteren Fehler verursacht. Dieser Fehler ist allerdings sehr gering, da diese Platten an festgelegten Positionen durch deren integrierte Gewindelochbohrungen verschraubt werden.

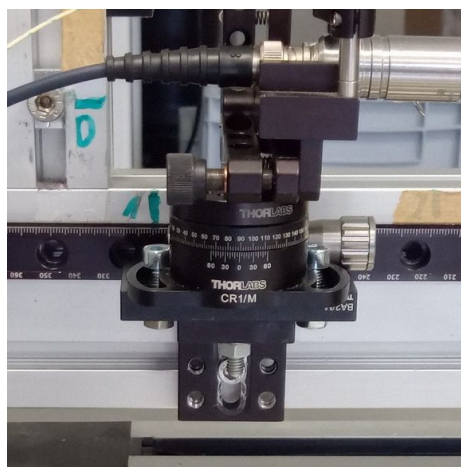


Abb. 4.8: US-Transmitter-Montage

### Einflussfaktor Position auf dem Scanner

Um den Einfluss des Ortes auf dem Scanner zu ermitteln, wurden zwei verschiedene Messaufbauten verwendet. Zum einen war dies die in Abb. 4.9 dargestellte Luftstreckenmessung, welche ähnlich der Plattenwellenmessung einen variablen Receiver (rechts auf größerer Platte) und einen statischen Transmitter enthält. Dabei waren beide Wandler auf einander ausgerichtet und der Receiver wurde auf der akustischen Achse verfahren. Mit sehr geringer Verstärkung wurden so Absolutmessungen der Schallgeschwindigkeit in der Luft durchgeführt, welche wie folgt ausgewertet wurden.

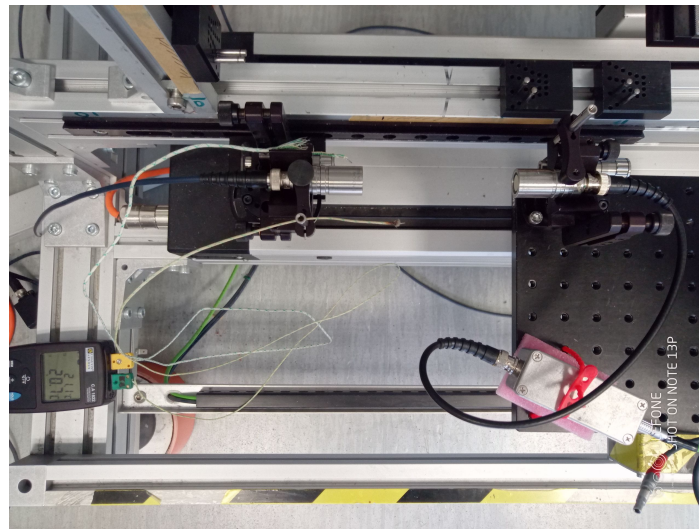


Abb. 4.9: Luftstreckenmessung unter Nutzung von Thermoelementen

In Abb. 4.10 sind Momentanphasengeschwindigkeiten von Luftultraschallwellen gegen die Position aufgetragen. Der Receiver fuhr während der schrittweisen Messung jeweils 28 cm vom Transmitter weg. Diese Messung wurde an drei verschiedenen Stellen auf dem Scanner wiederholt, um Abweichungen ermitteln zu können, die systembedingt auftreten. Vor allem bei einer Messung (Dreiecke) sind Abweichungen erkennbar. Es wurde darüber hinaus festgestellt, dass zum einen die Schallgeschwindigkeit in der

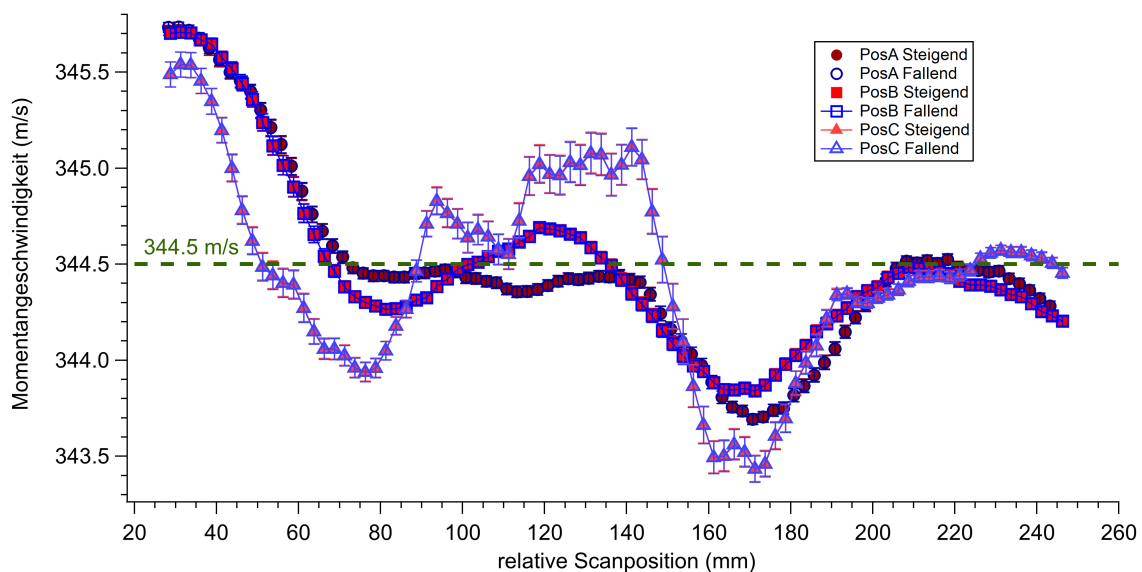


Abb. 4.10: Vergleich der Momentanphasen-Geschwindigkeiten

Luft sehr genau bestimmt werden konnte. Der Fehler hierbei lag bei ca. 5 Promille im Vergleich zu dem errechneten Wert anhand der örtlichen Messbedingungen. Des Weiteren lag die Abweichung der Schallgeschwindigkeiten an den verschiedenen Orten bei nur 3 Promille. Auch wenn die Intensitäten der Berge und Täler in den drei Graphen unterschiedlich stark ausgeprägt sind, so erkennt man, dass alle Graphen einen nicht nur ähnlichen Verlauf haben sondern eben auch an gleichen Stellen örtliche Maxima oder Minima. Das deutet darauf hin, dass die Schwankungen ortsunabhängig sind. Sie könnten mit Beschleunigungseffekten des Scanners verbunden sein, was jedoch weitere Untersuchungen erfordert.

In Abb. 4.11 sind die Momentanphasen-Geschwindigkeiten der Plattenwellen von zwei verschiedenen Startpunkten auf dem Scanner gegen die fortlaufende Position des Receivers aufgetragen. Beide Messungen wurden mit einer Plexiglasplatte der Dicke 6 mm vorgenommen. Die Position 0 cm steht für die gängige Probeneinspannung links unten auf dem Scanner und bei der Position 60 cm wurden sowohl Probe als auch die Ultraschallwandler-Halterungen um 60 cm nach rechts auf der horizontalen Achse versetzt. »fallend« und »steigend« stehen für die durchlaufenen Nullstellen, welche in Kap. 3.3.2 näher erläutert wurden.

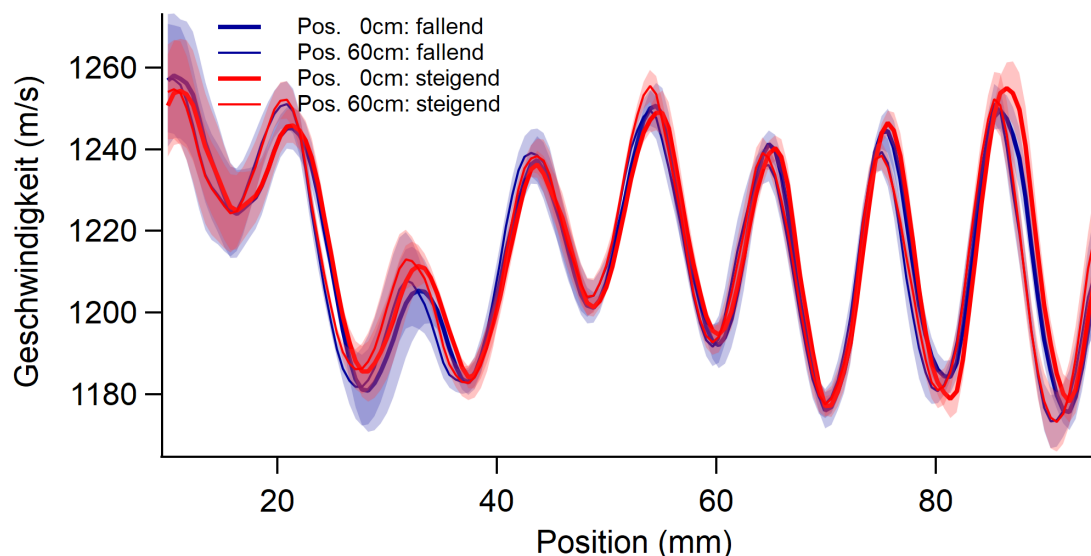


Abb. 4.11: Vergleich der Momentanphasen-Geschwindigkeiten

Die Momentanphasen-Geschwindigkeiten beider Messorte liegen fast übereinander. Eine Phasenverschiebung um ca. 1 mm sorgt in Abb. 4.12 ebenfalls für eine Periodizität, die bei direkt übereinanderliegenden Graphen nahezu verschwinden sollte, da beide Messorte für sich die gleiche Periodizität aufweisen. Die Herkunft der Periodizität ist derzeit noch nicht geklärt. Die Vermutung, dass der Encoder der vertikalen Achse des Scanners die Ursache ist, konnte durch das Nicht-Auftreten dieser Periodizität bei den Klebwinkel-Messungen und der Luftmessung widerlegt werden. Der Herstellungsprozess der Plexiglasplatten könnte ebenso hierfür verantwortlich sein, sodass evtl. eine periodische Inhomogenität in der Platte auftritt. Belegt ist dies jedoch noch nicht.

Die Phasenverschiebung könnte den Ursprung in einer leicht versetzten Montage haben, bei der der Abstand von Sender und Empfänger im Vergleich zum Startpunkt links unten etwas kleiner ist. So erreicht das Signal den Receiver etwas eher.

In Abb. 4.12 ist die Differenz (Pos. 60 cm - Pos. 0 cm) beider Momentanphasen-Geschwindigkeiten von einander dargestellt und ebenfalls gegen die Position aufgetragen.

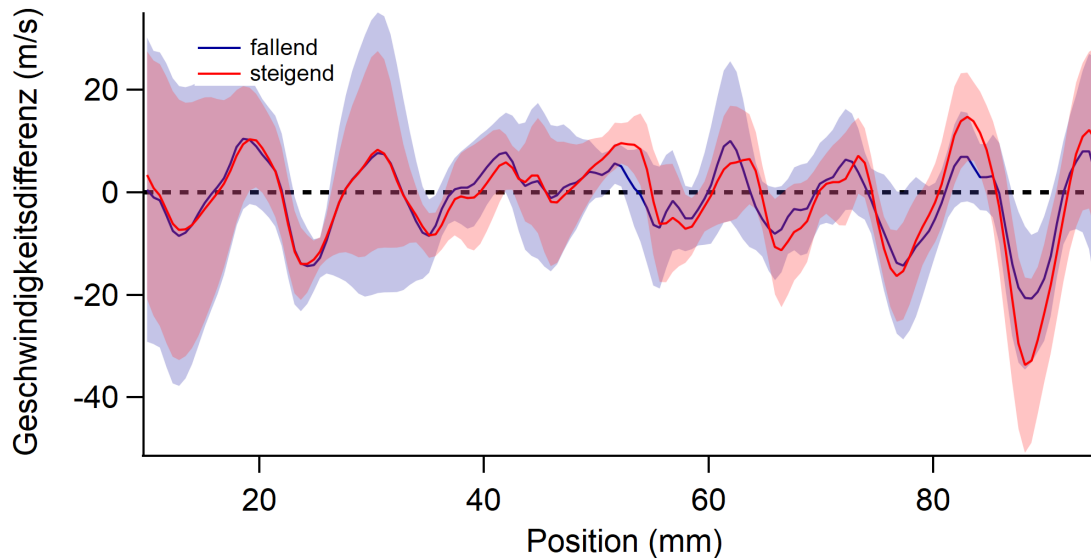


Abb. 4.12: Momentanphasen-Geschwindigkeiten-Differenz

Analog zum darüber liegenden Diagramm wurden die fallenden und steigenden Nullstellenverfolgungen getrennt von einander erfasst. Es ist zu erkennen, dass sich die Differenzen der einzelnen Geschwindigkeiten um die Nulllinie herum bewegen. Die Nulllinie liegt größtenteils innerhalb des Konfidenzintervalls. Die Periodizität tritt wegen der Phasenverschiebung in Abb. 4.11 im darunter liegenden Bild wieder auf. Es scheint ab 65 mm eine Abwärtstendenz zu geben. Da die Messungen allerdings sehr genau bzw. empfindlich sind, kann der Abwärtstrend auch nicht von der Plattenwelle selbst verursacht worden sein.

Es wurden weitere Positionen (0 cm, 30 cm, 60 cm, 90 cm) auf dem Scanner miteinander verglichen und Ähnliches festgestellt. Die Position auf dem Scanner nimmt somit bezogen auf die Reproduzierbarkeit eine untergeordnete Rolle ein.

### 4.3.2 Einfluss der Umgebungsbedingungen

#### Einflussfaktor Temperatur

Die Temperatur beeinflusst die Geschwindigkeit einer Ultraschallwelle. Daher wurde die Raumtemperatur während der Messungen aufgezeichnet. Um den Einfluss der Temperatur zu ermitteln wurden Klebewinkel-Proben herunter gekühlt und während des Aufwärmprozesses in der Plattenwellen-Anordnung, wie in Abb. 4.13 abgebildet, untersucht. Das heißt es wurden Metallplatten mit einer Temperatur von anfangs ca. 10 °C bis hin zu ca. 20 °C immer wieder erneut durchschallt, um eine Änderung der Phasengeschwindigkeit in Verbindung mit der Senkung der Temperatur untersuchen zu können. Die Umgebungstemperatur lag während dieser Messreihe konstant bei 23,7 °C. Durch die zu Beginn kühleren Stahlplatten sank jedoch die Temperatur in der Mitte zwischen den Ultraschallwandlern und der Probe während der Messung auf 22 °C ab.

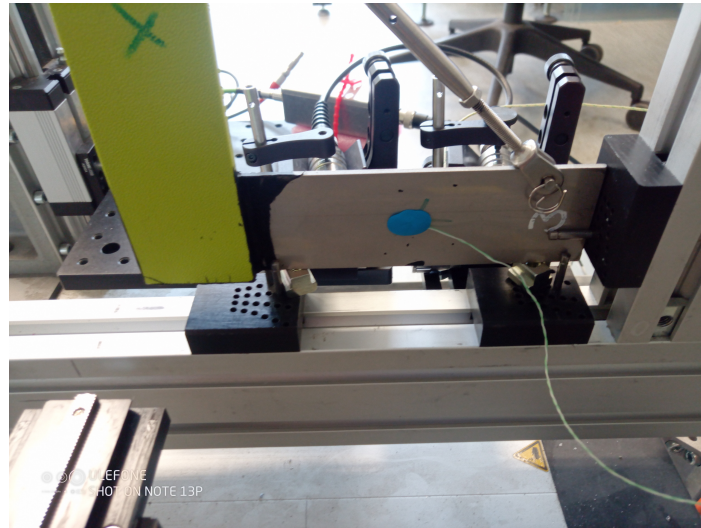


Abb. 4.13: Messaufbau für die Plattenwellenmessung des Klebewinkels 3, Thermoelement mit Knetmasse an Stahlplatte befestigt für Temperaturaufzeichnung während des Sinkens der Temperatur

In Abb. 4.14 sind die Momentanphasengeschwindigkeiten zweier solcher Messungen gegen den Ort aufgetragen. Die Messung 1 wurde bei einer Oberflächentemperatur des Stahls unter der Knetmasse (siehe Abb. 4.13) von 11 °C durchgeführt und die zweite Messung bei einer Oberflächentemperatur von 17 °C. Man erkennt, dass bei der Messung mit der kühleren Temperatur die Phasengeschwindigkeit zu Beginn ca. 50 m/s geringer ist als bei der höheren Temperatur von 17 °C.

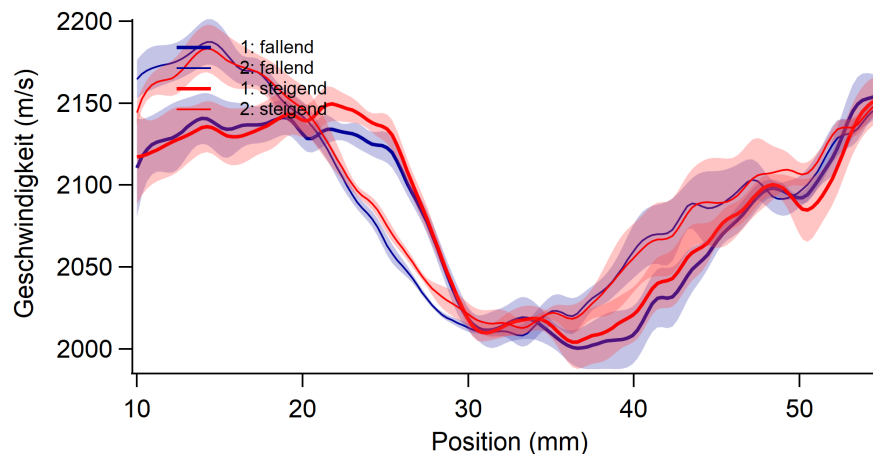


Abb. 4.14: Messungen der Momentanphasengeschwindigkeit von Klebewinkel 3 bei Temperaturen 11 °C (1) und 17 °C (2)

In Abb. 4.15 wurden zwei Momentanphasengeschwindigkeiten von zwei Messungen von einander abgezogen. Die Differenzen ergeben teilweise ein positives und negatives Ergebnis, was die Deutung erschwert. Andere Differenzmessungen zu den Temperaturuntersuchungen weisen ein ähnliches Verhalten auf. Warum genau die Phasengeschwindigkeiten auf diese Weise schwanken, muss noch untersucht werden. Es lässt sich aus dem Ergebnis jedoch erkennen, dass es einen Zusammenhang zwischen einer Temperaturänderung der Probe und einer Phasengeschwindigkeitsänderung gibt.

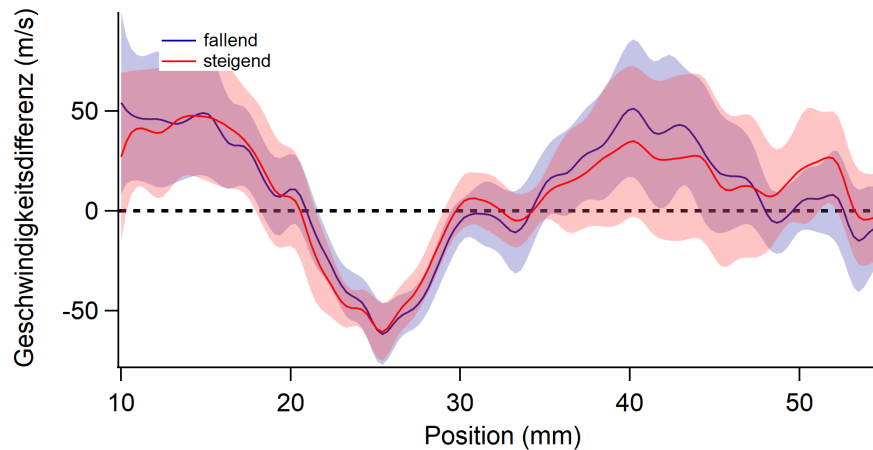


Abb. 4.15: Differenz der Momentanphasengeschwindigkeiten von Klebewinkel 3 bei den Temperaturen 11 °C und 17 °C

Es wurden weitere Messungen mit dem gekühlten Klebewinkel 12 durchgeführt (Abb. 4.16). Dabei hatte der Klebewinkel zunächst eine Temperatur von 12 °C und wurde bei der Erwärmung bis hin zu 19 °C häufiger abgescannt. Die Raumtemperatur betrug hierbei durchgängig 24 °C. Die Temperatur zwischen den Ultraschallwandlern und der Probe betrug hierbei anfangs 23,4 °C und gegen Ende der Messung 23,8 °C. Die Ausprägung der Differenzen sind in dieser Darstellung etwas deutlicher. Wieder weichen die Phasengeschwindigkeiten voneinander ab. Teils unterscheiden sich die Geschwindigkeiten um ca. 70 m/s, was eine relative Abweichung von ca. 2,5 % zur Plattenwellengeschwindigkeit im Material bedeutet. Zudem fällt auf, dass die Änderung der Abweichung fast geradlinig verläuft. Auch deren Ursachen sind noch nicht geklärt.

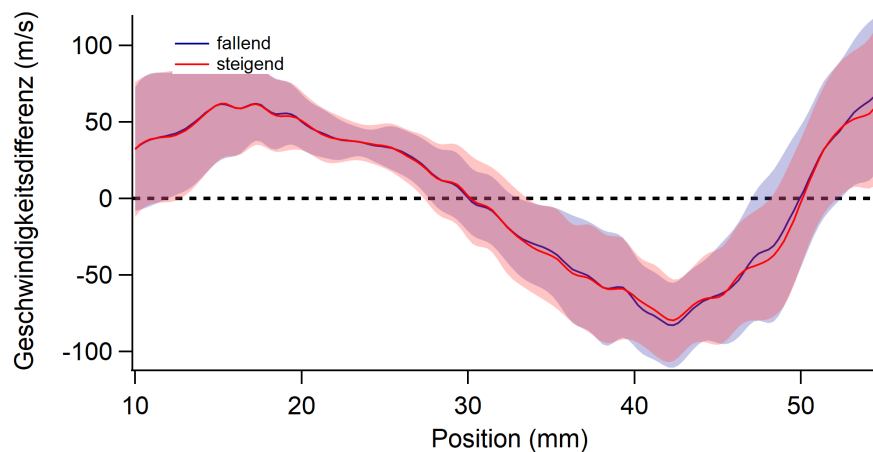


Abb. 4.16: Differenz der Momentanphasengeschwindigkeiten von Klebewinkel 12 bei den Temperaturen 12 °C und 19 °C

Die Abweichung auf Grund der Temperatur wurde somit für die zu untersuchenden Metallplatten auf kleiner als 10 m/s pro K ermittelt.

### Einflussfaktor Luftfeuchtigkeit

Die Luftfeuchtigkeit wurde während der Messungen zwar aufgezeichnet, übt allerdings einen vernachlässigbar kleinen Einfluss auf die Phasengeschwindigkeit aus, weshalb sie nicht weiter berücksichtigt wird.



### 4.3.3 Einfluss der Auswerteparameter

#### Mittlungsfensterbreite

In Abb. 3.10 auf Seite 22 erkennt man, wie eine definierte Mittlungsfensterbreite von 4 Werten die Anstiegsgeraden mit den daraus resultierenden Momentangeschwindigkeiten entwickelt. Diese ändern sich allerdings mit diesem selbst gewählten Intervall. Um ein aussagefähiges Ergebnis zu generieren, wurden daher mehrere Mittlungsfensterbreiten einer Plexiglas-Platte der Dicke von 6 mm miteinander verglichen. In Abb. 4.17 sind fünf verschiedene Graphen mit unterschiedlichen Mittlungsintervallen der lokalen Plattenwellengeschwindigkeit gegen den Ort aufgetragen. Der Graph, bei welchem

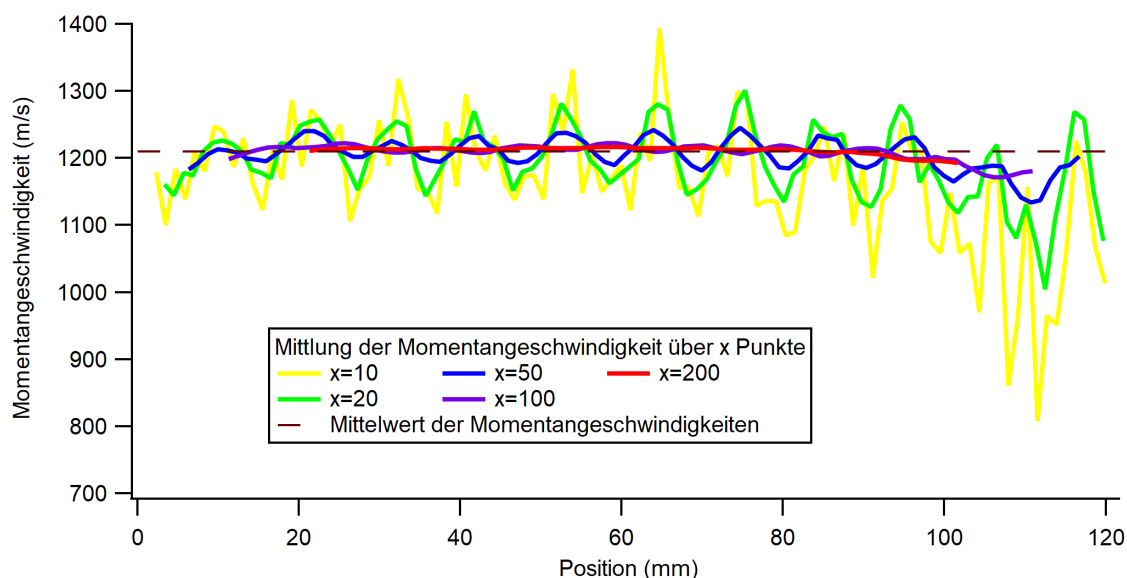


Abb. 4.17: Mittlung der Momentan-Phasengeschwindigkeiten über x Messpunkte

die Momentangeschwindigkeiten über 10 Messpunkte gemittelt wurden, sieht stark nach einem verrauschten Signal aus, allerdings sind schon hier leichte Tendenzen einer Periodizität zu erkennen. Durch die geringe Fensterbreite werden nach rechts und links lediglich 5 Werte für die Mittlung benötigt, was den auszuwertenden Bereich bis auf 5 Punkte (1 mm) an die linke und rechte Grenze der Nullstellenverfolgung heranführt. Eine kleine Mittlungsfensterbreite hat also den Vorteil, dass über einen möglichst großen Raum bzw. eine möglichst lange Strecke Momentangeschwindigkeiten ermittelt werden können. Dies ist zeitgleich der Nachteil eines großen Mittlungsintervalles. Allerdings werden Tendenzen des Verlaufes so nicht gut erkannt und das Signal erscheint sehr verrauscht. Das Gegenstück hierzu liefert die Fensterbreite von 200 Punkten. Mit Ausnahme des Bereiches bei der 100 mm Marke ist hierbei nahezu eine Gerade entstanden, welche bei einer homogenen Plexiglasplatte an sich auch zu erwarten wäre. Der Nachteil hierbei ist, dass die nicht auswertbaren Bereiche an den Rändern bereits 100 Messpunkte umfassen und damit eine Strecke von 20 mm. Zudem erkennt man keine Periodizität, welche bei allen anderen Mittlungsfensterbreiten deutlich wird. Durch eine gewählte Fensterbreite von 100 Punkten im Vergleich zu den kleineren resultiert eine Verschiebung der Periodizität um ca.  $180^\circ$ . Tendenzen zu Beginn des Graphen wie auch am Ende sind dennoch gut dargestellt. Letztlich wurde eine Mittlungsfensterbreite von 50 Punkte genutzt, was ein abgerundetes Signal inklusive der Periodizität und Tendenzen darstellt. Es werden 5 mm an den Rändern nicht ausgewertet, was akzeptabel ist.

In Abb. 4.18 ist der Momentanphasengeschwindigkeitsverlauf einer Plexiglasplatte gegen den Ort aufgetragen. Was oben in Abb. 4.17 beschrieben wurde, führte letztlich zu dieser Darstellung. Der blaue Graph im obigen Diagramm ist der Repräsentant dieses Graphen. Es wurden Fehlerbalken eingefügt, um die Variabilität der Werte einschätzen zu können. An den Rändern schwanken die Werte immer stärker, vor allem um so weiter der Receiver vom Transmitter entfernt ist. Die Dämpfung der Welle könnte die Ursache für dieses Schwanken sein. Um so stärker die Welle gedämpft wurde, um so schlechter ist das Signal-Rausch-Verhältnis. Es könnte also sein, dass das Rauschen in Relation zur Welle sehr groß wurde. Dann wird das Rauschen so sehr verstärkt, dass das eigentliche Signal im Rauschen untergeht. Die Genauigkeit im mittleren Bereich der gemessenen Plattenwelle liegt allerdings im Promillebereich, was die Messmethode stützt.

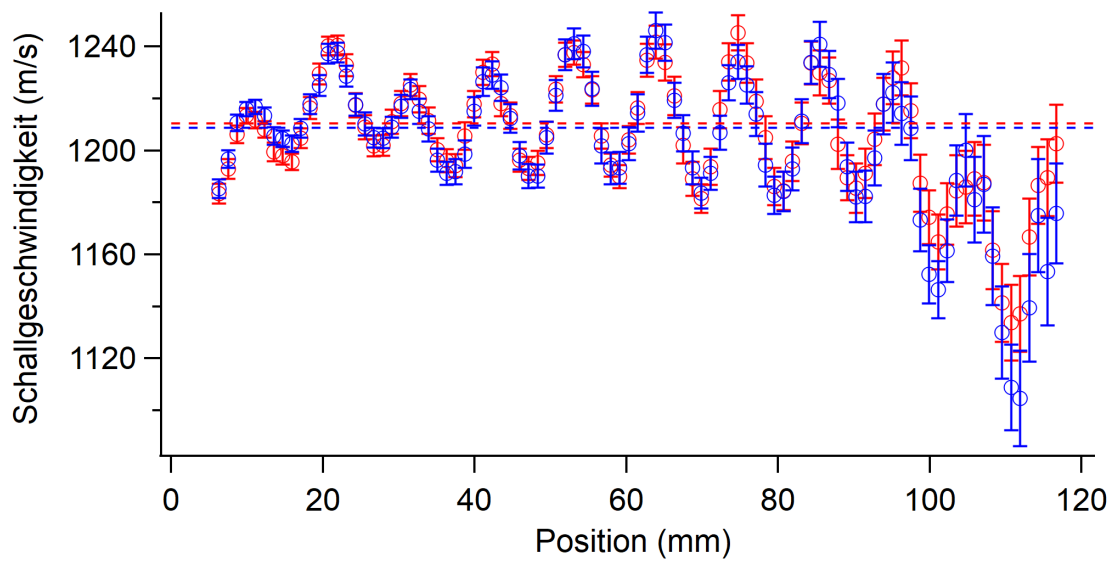


Abb. 4.18: Darstellung der Momentanphasengeschwindigkeiten einer Plexiglasplatte der Dicke von 6 mm mit einer Mittlungsfensterbreite von 50 Punkten

## 4.4 Entwicklung der Transmissionsmessung

In nachstehenden Kapiteln wird die Hinführung zur letztlich verwendeten Transmissionsanordnung beschrieben. Einflussfaktoren mit ihren Auswirkungen auf die Messung werden näher beleuchtet und wie das sichere Wiederherstellen der Messanordnung gelingt.

Die Transmissionsanordnung sollte sowohl leicht zu realisieren sein als auch unter gleichen Bedingungen gleiche Ergebnisse liefern. Da bisher im Ultraschalllabor Proben fast ausschließlich in Transmission untersucht werden und die Herausforderungen und Probleme solcher Messungen bekannt sind, konnte auf dieses Wissen zurückgegriffen werden. Es gilt also ein C-Bild zu generieren, welches Signale kurz vor der Übersteuerung darstellt, um die einzelnen Intensitätsstufen des Durchschallens darzustellen.

### 4.4.1 Einfluss der Justage

Unter zahlreichen Einflussfaktoren wurden jene mit dem scheinbar größten Einfluss auf das Messergebnis gewählt und näher beleuchtet. Der Positionierung und Ausrichtung von Probe und Ultraschallwandlern werden hierbei besondere Rollen zuteil. Aber auch die Schallpegel- und Empfangserhöhung werden behandelt.

Für eine möglichst hohe Amplitude im Signal müssen die Wandler auf einander gerichtet sein, sodass ein möglichst großer Anteil der Wellenfronten des Ultraschalls genau parallel auf die Probe trifft.

Um die höchstmögliche Amplitude zu erreichen wurde in der Transmissionsanordnung ein Tool zur Justierung der Ultraschallwandler genutzt, welches extra hierfür hergestellt wurde. Der Scanner wird hierbei an die linke untere Ecke gefahren, wo sowohl Ultraschallsender als auch -empfänger angebracht werden. Zunächst werden die Haltevorrichtungen einander gegenübergestellt und nur leicht angeschraubt, damit man sie in x-Richtung verschieben und auf einander ausrichten kann. Das Tool sorgt für eine optimale Ausrichtung beider Wandler auf einander, wenn es links unten am Scanner angebracht wird. Beide Ultraschallwandlerhalterungen auf beiden Seiten werden so weit nach links geschoben, bis das Tool in der Führung optimalen Halt hat. Die beiden Platten in y-Richtung werden nach dem Hinunterfahren um einige Millimeter anschließend vorsichtig nach oben gefahren, bis sie das Tool berühren. I.d.R. liegt das Tool dabei zu Beginn nicht korrekt auf und die Stellschrauben der Ultraschallwandlerhalterungen in y-Richtung werden genutzt, um Wandlerhalterung und Tool parallel auf einander auszurichten um anschließend die y-Achsen des Scanners wieder leicht nach oben zu korrigieren. Das einzelne Hochfahren der beiden y-Achsen und das Verstellen der Stellschrauben erfolgt solange, bis das Tool fest in den Wandlerhalterungen sitzt und zudem immer noch unten links am Scanner aufliegt.

Sobald die Wandlerhalterungen angebracht und justiert wurden, erfolgt der Einbau der Ultraschallwandler. Durch eine leichte Abweichung des Abstrahlwinkels der Ultraschallwandler ist eine Korrektur genau dieses Winkels erforderlich, welche mit den Stellschrauben mit der Drehung um die x- und y-Achse vorgenommen werden kann. So wird im Abgleich mit dem Signalbild des SonoStudios an den Stellschrauben des Senders und dann an denen des Empfängers gedreht, bis das Signal ein Maximum erfährt, welches durch Nutzung der Stellschrauben nicht weiter vergrößert werden kann. Damit wird gewährleistet, dass die Wellenfronten nahezu parallel auf die Probe treffen, was das Signal noch ein mal erhöht.

Zudem gibt es im Nah- wie im Fernfeld verschiedene Intensitäten des Schalldruckes. Im Fokuspunkt, an welchen beide Felder grenzen, ist die Intensität im Regelfall am

höchsten, sodass die Entfernung der Wandler zur Probe eine weitere wichtige Rolle für die Erhöhung des gemessenen Schalldruckes spielt. Es empfiehlt sich die Entfernung von den Ultraschallwandlern hin zur oder weg von der Probe so zu wählen, dass das Fernfeld in der Nähe des Fokuspunktes genutzt wird. Durch die Bewegung der Ultraschallwandler entlang der Probe und durch Unebenheiten auf der Probenoberfläche kann die Messung auch innerhalb des Nahfeldes erfolgen, welches sich durch starke Unregelmäßigkeiten in der Amplitude bei verschiedenen Entfernungen zeigt. Am Beginn des Fernfeldes treten zumindest bezogen auf die Messung kaum störende Interferenzen auf. Dies macht man sich bei der Messung zunutze. Da der Schallintensitätspegel mit dem Abstand zum Ultraschallwandler abnimmt, sollte die Messung zeitgleich so nah am Fokuspunkt wie möglich erfolgen.

Bedingt durch die Konstruktion und Schadenminimierung werden die Wandler teils etwas weiter von einander entfernt, um nicht mit anderen Bauteilen des Scanners zu kollidieren.

#### 4.4.2 Positionierung der Ultraschallwandler

Ein Ultraschallwandler-Paar der Eigenfrequenz von 200 kHz wurde bereits an anderen Proben erfolgreich angewandt und somit ebenso für dieses Projekt gewählt. Die Montage der Ultraschallwandler an den Befestigungsplatten beider vertikaler Achsen am Isel-Scanner erfolgt mit je nur einer Innensechskantschraube. Sowohl der Ultraschallsender als auch -empfänger wurden auf dem in Kapitel 3.1.2 beschriebenen Flächenscanner einander gegenüber positioniert (Abb. 3.2). Hierzu wurde ein Fixier-Tool (Abb. 4.19) verwendet, welches eine Ausrichtung möglichst auf derselben akustischen Achse ermöglicht. Zudem werden durch die Segmente größeren Durchmessers feste Abstände der Ultraschallwandlerhalterungen zueinander bestimmt, was die Nutzung nahe der Fokuspunkte beider Wandler bezogen auf dünne Platten begünstigt. Beide Ultraschallwandler erzeugen somit bei deren optimaler Herstellung und Umgebungsbedingungen ein bestmögliches Signal-Rausch-Verhältnis. Jedoch schallt kein Ultraschallwandler exakt senkrecht zu seiner Oberfläche ab, was größtenteils fertigungsbedingt zu sein scheint.

Diese Abweichung um wenige Grad oder Winkelminuten werden durch Stellschrauben an den Halterungen ausgeglichen, sodass letztlich beide Wandler auf ein vom digitalen Oszilloskop angezeigtes Maximum justiert werden. Die Entfernung von den Ultraschallwandlern zur Probe wurde einige Millimeter weiter als der Fokuspunkt von ca. 10 mm gewählt, um einer Schädigung des Scannersystems durch die sich bewegenden Ultraschallwandler vorzubeugen. Hierbei wurde die Amplitude nur unwesentlich verkleinert.



Abb. 4.19: Fixier-Tool für Transmissionsanordnung der Ultraschallwandler

Nachdem die Probe am Scanner ausreichend und leicht reproduzierbar befestigt wurde, wurden entsprechend der Transmissionsanordnung ein Ultraschallsender auf

einer Seite der Probe und ein Ultraschallempfänger auf der gegenüberliegenden Seite der Probe platziert (siehe Abb. 4.20). Um sowohl die gesamte Klebefläche abscannen zu können als auch Referenzflächen für eine anspruchreichere Auswertung zu erfassen, wurden die Ultraschallwandler über einen Bereich von 70 mm × 70 mm gefahren.

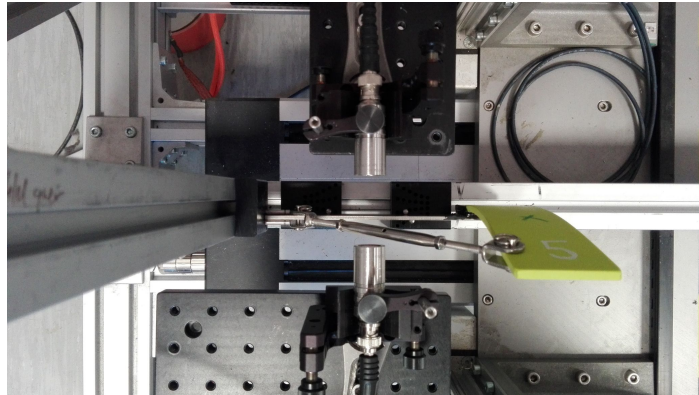


Abb. 4.20: Wandlerpositionierung in Transmissionsanordnung, unten Receiver, oben Transmitter

### 4.4.3 Ausrichtung der Ultraschallwandler

Die Ausrichtung der Ultraschallwandler erfolgte zunächst wie in Kapitel 4.4.2 mit dem Fixiertool. Da dieses jedoch für optimal hergestellte Ultraschallwandler konstruiert wurde, die exakt gerade nach vorn schallen, muss nach dem Einbau der Wandler erneut justiert werden. Sowohl Transmitter als auch Receiver werden so eingespannt, dass die Aufschrift SSN:"nach oben gerichtet ist. Schallt ein Ultraschallwandler mit einem leichten Winkel nach links ab, so muss er in die entgegengesetzte Richtung geschwenkt werden. Das Schwenken um die horizontale Achse erfolgt analog.

### 4.4.4 Positionierung der Probe

Damit die Klebewinkel-Proben immer die gleiche Ausrichtung zu den Ultraschallwandlern haben, wurden die Metallflächen der Klebewinkel in der Transmissionsanordnung mittels 6 Pins (3 vorn, 3 hinten) senkrecht zur akustischen Achse und fest auf der unteren Auflagefläche und am linken Rand des Scanners positioniert (siehe Abb. 4.21). Dies ermöglichte zum einen ein dauerhaft senkrechtes Auftreffen der Ultraschallwellen

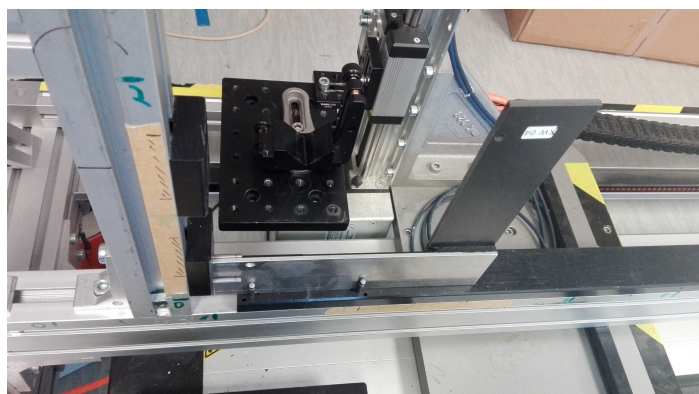


Abb. 4.21: Klebewinkelprobe mit Pins auf Scanner eingespannt

auf die Proben und zum anderen eine feste Position, welches eine Bedingung für künftig gleichwertige Messungen darstellt.

Es handelte sich hierbei nicht um eine statisch bestimmte Lagerung, dennoch lagen die Klebewinkel fest auf dem Scanner auf und bewegten sich zumindest augenscheinlich nicht. Zudem ist die Streubreite des Ultraschallbündels im Verhältnis zu den Bewegungen durch die Vibrationen des Scanners recht hoch. Die Freiheitsgrade in positiver x- wie auch y-Richtung sind somit vernachlässigbar, da die Klebewinkelprobe ausreichend fest sitzt.

Damit Probenmessungen der Transmissionsanordnung miteinander verglichen werden können, sollte die Probe möglichst am gleichen Ort auf dem Scanner gemessen werden. Zudem ist für einen Vergleich verschiedener Proben oder auch Probenzustände eine Halterung wichtig, die Unebenheiten in der Auflage der Probe vermeidet, da es an den Klebewinkel-Proben mögliche Auflageflächen gibt, die mal mehr und mal weniger eben sind. Ein Kippen der Probe ist zu vermeiden, da die Transmissionsrate durch eine Schrägstellung zu den Wellenfronten reduziert wird.

#### **4.4.5 Schallpegel- und Empfangserhöhung**

Je nach Durchlässigkeit einer Probe wird die Empfangsverstärkung angepasst. Dämpft das durchschallte Material die eingetragene Schallenergie sehr stark, also absorbiert diese, so ist wenn möglich die Spannung, mit welcher der Transmitter angeregt wird, zu erhöhen. Erhält man trotz dieser Maßnahme keine ausreichend starke Signalamplitude, so ist die Verstärkung des Empfängers zu erhöhen. Die maximale Empfangsverstärkung von 120 dB lässt meist schon das Rauschen bis hin zum Übersteuern mit verstärken, daher ist eine Verstärkung bis maximal 100 dB sinnvoll.

Des Weiteren ist es wünschenswert auch verschiedene Proben miteinander zu vergleichen, weshalb man theoretisch das Maximum auf der gesamten Scanfläche und von allen miteinander zu vergleichenden Proben als Anhaltspunkt für die Verstärkung nutzt. In diesem Fall wurde dieser Wert geschätzt und liegt für die grünen Klebewinkel bei 90 dB.

# 5 Charakterisierung von Klebeverbindungen

Die Arbeiten zu den Klebewinkeln wurden im Rahmen des vom FZ-U bearbeiteten INNO-KOM-Projektes »Signatures für die Alterung von Klebeverbindungen mit Ultraschall« (SAIKU) durchgeführt (siehe<sup>[8]</sup>). Dieses Projekt wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert (Förderkennzeichen 49MF200217). Die Proben wurden gefertigt und gealtert vom Günther-Köhler-Institut für Füge-technik und Werkstoffprüfung GmbH Jena (ifw), wo ein korrespondierendes Forschungsprojekt unter dem Titel »Analyse von Spannungen in Klebeverbindungen« (ASpiK) durchgeführt wurde (Förderkennzeichen 49MF200130).

Inhomogenitäten sind in verschiedenen Formen vorhanden. Es können örtlich andere Materialzusammensetzungen oder Dichteunterschiede auftreten. Zudem können Form, Dicke oder Oberflächenbeschaffenheit selbst von Ort zu Ort abweichen. Innerhalb der Klebeschicht können sich zudem Spannungszustände ändern, was durch einen gewollten Alterungsschritt hier auch herbeigeführt wurde. Die Plattenwellengeschwindigkeit ist vom Material und auch der Dicke der Platte abhängig. Somit sollte es einen Unterschied von der reinen Metallplatte zur Klebeschicht, welche aus Metallplatte, Klebeschicht und Plastikplatte besteht, geben.

Dies wurde wie folgt untersucht: Zunächst wurden nicht gealterte Referenzproben mittels luftgekoppeltem Ultraschall charakterisiert. Hierfür dienten die Pitch-Catch-Anordnung und die Transmissionsanordnung. Während des Projektes entstanden partiell automatisierte Analysetools, welche die Auswertung der über 10.000 Dateien erst effizient ermöglichte und für künftige Analysen zur Verfügung steht. Die Charakterisierung kann mit diesen vorgenommen werden. Die mit Hilfe der Analysetools entstandenen Auswertemethoden zeigen im Vergleich der Referenz- und gealterten Probe Unterschiede sowohl in der Amplitude als auch in der örtlichen Plattenwellengeschwindigkeit. Dies gilt sowohl für die Transmission als auch die Pitch-Catch-Anordnung. Die Differenz-C-Bilder sind jedoch nur bei der Probengruppe 7 - 12 auffällig. Bei den Proben 1 - 6 konnten zunächst keine signifikanten Änderungen nachgewiesen werden.

Die Deutung der Unterschiede ist jedoch etwas schwieriger. Es ist derzeit nicht klar, ob die Änderungen durch die Klebeschicht entstehen oder ggf. durch andere Probenbestandteile oder gar bisher nicht erkannte Messfehler.

## 5.1 Probenbeschreibung

Alle Klebewinkel wurden in Absprache mit dem FZ-U von dem ifw-Jena mit den in Kap. 4.2 beschriebenen Geometrien hergestellt. Um den Erfolg der Messung auf mehrere Anwendungen beziehen zu können, wurden verschiedene Materialkombinationen gewählt, welche in Tab. 5.1 einzusehen sind. Die Klebewinkel-Proben selbst wurden händisch verklebt.

Tab. 5.1: Materialkombinationen der Klebewinkel

Klebstoff	Stahl/ABS V0	Alu/SUSTAVACU
Sika Powercure	KW 1-3	KW 7-9
SikaForce	KW 4-6	KW 10-12

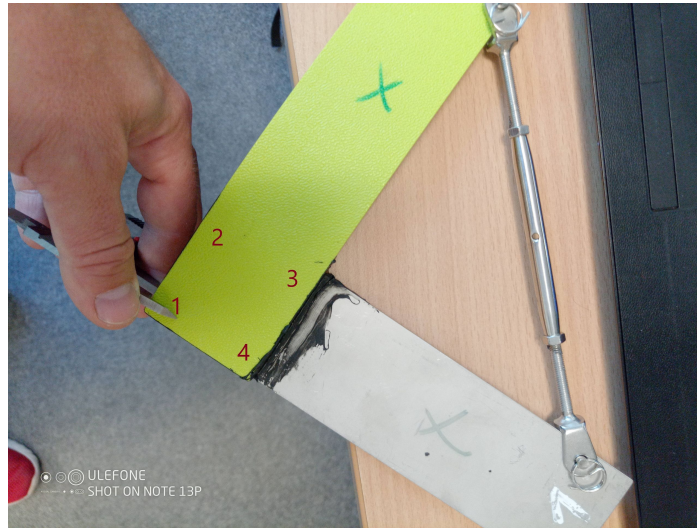


Abb. 5.1: Messpunkte für Dickenmessung der Klebeschicht

Die Klebewinkel 1-6 (Abb. 5.1) enthalten je eine Edelstahlplatte und eine ABS V0 Platte (Acrylnitril-Butadien-Styrol), welche rechtwinklig übereinander kleben. Innerhalb dieser Proben wurden Probe 1-3 mit dem Klebstoff Sika Powercure 268 verklebt und die Proben 4-6 mit dem Klebstoff SikaForce - 803 L45. Die Klebewinkel 7-12 (Abb. 4.21 auf Seite 43) enthalten je eine Aluminiumplatte und eine SUSTAVACU 6GF Platte (glasfaserverstärktes Polyamid). Innerhalb dieser Proben wurden die Proben 7-9 mit dem Klebstoff Sika Powercure 268 verklebt und die Proben 10-12 mit dem Klebstoff SikaForce - 803 L45.

## Schichtdicke

Die Schichtdicke der Klebeverbindung wurde an vier Ecken nach der Alterung gemessen. Eine Messung vor der Alterung fand nicht statt. Die Lage der Messpunkte ist in Abb. 5.1 dargestellt. Die Ergebnisse aus der Dickenmessung sind in Tab. 5.2 zusammengestellt. Es zeigten sich relativ große Dickenunterschiede.

Tab. 5.2: Dickenunterschied der Klebeschichten

Klebewinkel	Messpunkt 1	Messpunkt 2	Messpunkt 3	Messpunkt 4	Durchschnitt
KW 1	10,92 mm	11,22 mm	11,20 mm	10,85 mm	11,05 mm
KW 2	11,02 mm	11,37 mm	11,39 mm	11,08 mm	11,22 mm
KW 3	10,81 mm	11,24 mm	11,33 mm	10,89 mm	11,07 mm
KW 4	11,74 mm	11,89 mm	11,94 mm	11,58 mm	11,79 mm
KW 5	10,98 mm	11,28 mm	11,43 mm	10,81 mm	11,13 mm
KW 6	10,63 mm	10,97 mm	11,04 mm	10,54 mm	10,80 mm
KW 7	10,27 mm	10,26 mm	10,06 mm	10,07 mm	10,17 mm
KW 8	10,38 mm	10,39 mm	10,24 mm	10,25 mm	10,32 mm
KW 9	10,41 mm	10,36 mm	10,24 mm	10,18 mm	10,30 mm
KW 10	10,92 mm	10,73 mm	10,54 mm	10,68 mm	10,72 mm
KW 11	10,95 mm	10,94 mm	10,51 mm	10,54 mm	10,74 mm
KW 12	10,95 mm	10,76 mm	10,89 mm	11,03 mm	10,91 mm



## Materialbeschaffenheit

Die Oberflächenbeschaffenheit der Kunststoffe ist bei den Proben 1 - 6 auf der Vorderseite strukturiert und auf der Rückseite sehr glatt. Die Klebewinkel-Proben 7 - 12 haben im Vergleich zur strukturierten Vorderseite der anderen Klebewinkel eine glatte Oberfläche des Kunststoffes und im Vergleich zur Rückseite eine leicht rauere. Die Metalloberflächen sind allesamt glatt und spiegelnd.

## Alterungsprozess

Die Klebewinkel-Proben wurden einem Alterungsprozess von dem ifw-Jena, welches zudem die Klebewinkel-Proben herstellte, unterzogen. Dabei wurden über eine Spannvorrichtung u.a. innerhalb der Klebung Scherspannungen erzeugt. Thermische Belastungen wirkten ebenso auf die Klebewinkel ein.

## 5.2 Transmissionsmessung

### 5.2.1 Scans

Unter Nutzung der Routine für die Auswertung der Transmissionsmessungen konnten beim Vergleich der gealterten zu den Referenzproben 7 - 12 Änderungen nachgewiesen werden. In Abb. 5.2 sind Differenzen aus Amplitudenmittelwerten über einem Teilbereich der Klebefläche von je zwei Messungen der 12 Klebewinkel aufgetragen. Es sind jeweils drei Klebewinkel gleicher Bestandteile miteinander verbunden. Die Klebewinkel 1 - 6 haben zwar die gleichen Plattenmaterialien inne, unterscheiden sich jedoch in der Klebeschicht vom Material (siehe Tab. 5.1). Dennoch zeigen die Messungen, dass hinsichtlich der Transmissionsmessung mit luftgekoppeltem Ultraschall keine nennenswerten Unterschiede vor und nach der Alterung dieser Platten nachgewiesen werden konnten. Die zweifache Messung der gealterten Proben und deren Differenz zeigt zudem eine gute Reproduzierbarkeit der Messung. Dies gestaltet sich bei den Proben 7 - 12 etwas anders. Hier sind vor allem bei den Klebewinkeln 7 - 9 Abweichungen bei der

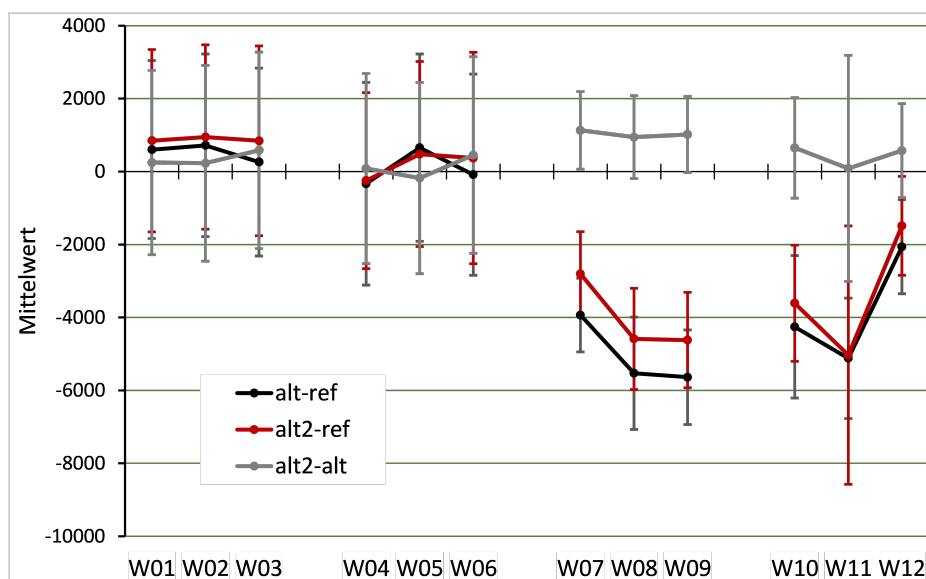


Abb. 5.2: Vergleich der Amplitudenmittelwerte mit den Standardabweichungen über der Klebeschicht

Verrechnung von beiden Messungen nach der Alterung (grau) zu erkennen, welche bei einer reproduzierbaren Messung in geringerer Abweichung wünschenswert wären. Die Messungen 10 - 12 hingegen sind, was die Abweichung beider Messungen mit Alterung angeht, unauffällig. Was die Differenzen von gealterten zu den Referenzmessungen angeht, so erkennt man bei den Proben von 7 - 12, dass die Abweichung so groß ist, dass sie sehr wahrscheinlich durch die Alterung hervorgerufen wurde.

Jedoch ist noch nicht klar, wo genau in der Probe die Änderungen aufgetreten sind, da in der Transmissionsmessung sowohl je beide Platten (Metall und Plastik) als auch die Klebeschicht durchdrungen wurden. Da die Differenz bei den Proben 1-6 faktisch nicht vorhanden ist, jedoch verschiedene Klebstoffe verwendet wurden, könnte die Ursache in einer Veränderung der Platten selbst oder dem Übergang von der Klebeschicht zu den Platten liegen. Da bei früheren Alterungsvorgängen anderer Klebewinkel häufiger die Verbindung von der Aluminiumplatte zum Klebstoff gerissen ist, könnten die Differenzbilder ein Indikator für eine Schwächung genau dieser Verbindung sein. Ob die Verbindung von der Aluminiumplatte zur Klebeschicht tatsächlich betroffen ist, lässt sich so allerdings nicht sagen. Hierfür müssen weitere Untersuchungen stattfinden, die mit einem weiteren Alterungsschritt der Klebewinkel-Proben verbunden sind.

### 5.2.2 4-Punkt-Messung

In Abb. 5.3 sind die relativen Abweichungen, welche mit

$$\text{Abw} = \frac{\sum_i |a_i - r_i|}{n \cdot \frac{\max(a) - \min(a) + \max(r) - \min(r)}{4}} \quad (5.1)$$

berechnet wurden, an vier verschiedenen Messorten (Klebestelle, Metall, Plastik und Luft) gegen die 12 Klebewinkel-Proben aufgetragen.

Wie erwartet sind die geringsten Abweichungen in der Luft zu verzeichnen. Für alle Messungen ist das Ergebnis hier sehr ähnlich. Vermutlich sind die Abweichungen hauptsächlich durch Temperaturschwankungen herbeigeführt worden. Auch das Metall sollte eine verhältnismäßig geringe Abweichung nach einem Alterungsvorgang niedriger Temperatur und Spannung aufweisen, was hier zunächst nicht so erscheint.

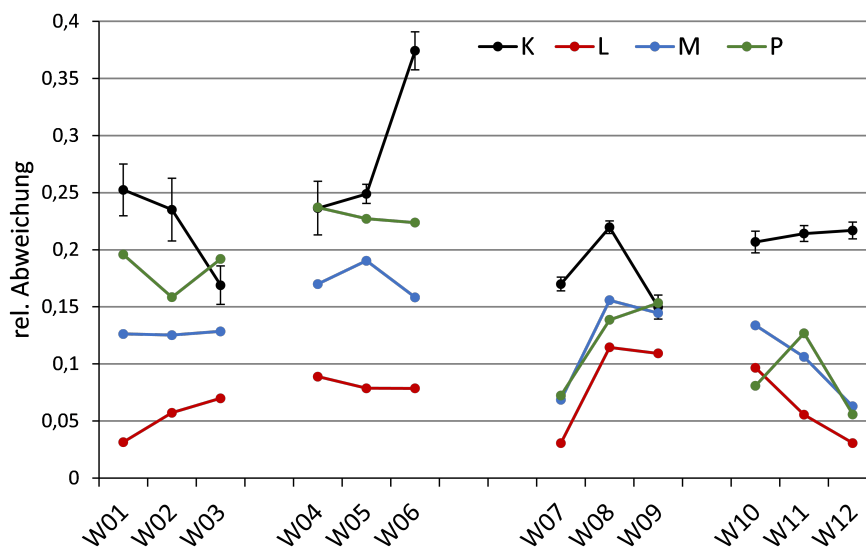


Abb. 5.3: Relative Abweichung nach der Alterung der Klebewinkel-Proben

Die Messungen über dem Metall erfolgten mit einer Verstärkung von ca. 90 dB. Jede Messung wird durch ein Hintergrundrauschen gestört. Dieses Hintergrundrauschen wurde somit ebenso überdurchschnittlich verstärkt und könnte zumindest für einen Teil der Abweichung verantwortlich sein.

Bei der Luftstreckenmessung kann es, selbst wenn der Fehler nur gering ist, keinen Einfluss der Probenlage geben, da sich diese in besagter Messanordnung nicht zwischen den Ultraschallwandlern befindet.

Die Plastikplatten der Klebewinkel-Proben 1 - 6 zeigen eine höhere Abweichung. Sie wurden durch den Alterungsschritt sichtlich verbogen (Abb. 5.4). Daraus folgten größere Auswirkungen auf die 4-Punkt-Messung, da sich bei gleichartiger Einspannung wie zuvor der Winkel zum einen näher am Receiver befindet und zum anderen treffen die Wellenfronten des Ultraschalles jetzt nicht mehr senkrecht durch die Biegung auf der Oberfläche auf. Dies erzeugt an dem Messpunkt auf der Plasteplatte ein signifikant abgeschwächtes Empfangssignal.

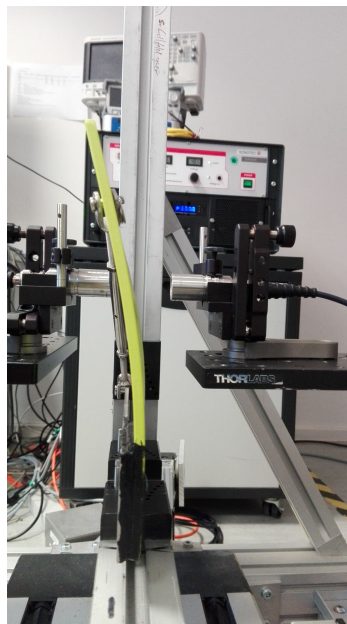


Abb. 5.4: Biegung der einer Klebewinkelprobe nach dem Alterungsprozess

Die Plastikplattenabweichungen der Klebewinkel-Proben 7 - 12 gleichen nahezu denen der Aluminiumplatte.

Die Messung über der Klebeschicht findet sowohl durch die Luftstrecke, die Plastik- und Metallplatte als auch die Klebeschicht statt und weicht am meisten von der Referenzmessung ab. Dies könnte ebenso mit der hohen Verstärkung von 90 dB zusammenhängen. Allerdings ist auch hier die Wahrscheinlichkeit, dass Änderungen in höherem Maß auftreten, durch die Kombination von allen gemessenen Materialien am höchsten. Da die Plastikplatte aus den Proben 7 - 12 mit 74 dB durchschallt wurden und die Proben 1 - 6 mit nur 64 dB kann zumindest die Verstärkung an sich, wenn überhaupt, nicht allein für die stärkere Änderung verantwortlich sein. Wahrscheinlicher ist hier die Materialkombination und/oder verschiedene Schichtdicken.

In Abb. 5.5 wurden die Abweichungen über die jeweils gleichartigen Proben gemittelt. Wie auch in Abb. 5.3 weisen hierbei die Messungen an der Luft, gefolgt vom Metall, die geringsten Abweichungen auf. Auffällig ist dennoch, dass die Luftmessungen schon einen ähnlichen Abstand zwischen den Messungen 4 - 9 und dem Rest haben. Dies sollte mit den Temperaturdaten dieser Messungen noch mal abgeglichen werden, um

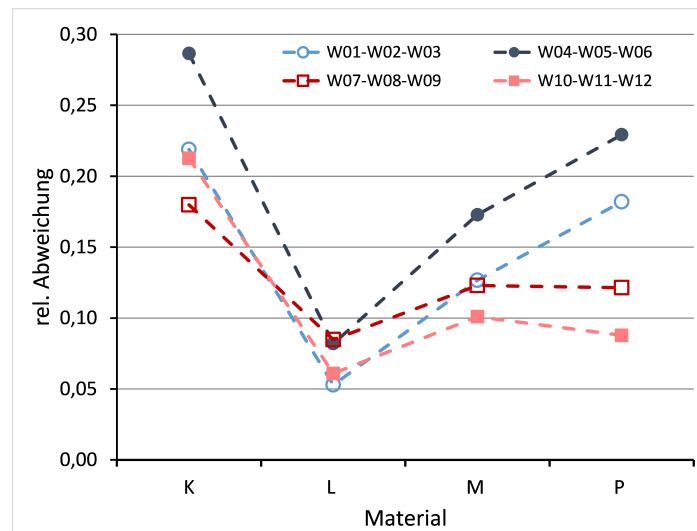


Abb. 5.5: Relative Abweichung nach der Alterung gleichartiger Probengruppen gemittelt

diese wahrscheinliche Ursache entweder zu bestätigen oder auszuschließen. Die Anstiege von Luft über die Metall- bis hin zur Plastikplatte sind für die gleichartigen Proben hinsichtlich der Platten sehr ähnlich. Dies sollte zu ähnlichen Verhältnissen über der Klebung führen, wenn die Klebeschichten selbst gleichartig wären. Da der Klebstoff jeweils bei den Proben 1 - 3 und 7 - 9 der gleiche ist und auch der Klebstoff der Proben 4 - 6 und 10 - 12 gleich ist, könnte der Einfluss der Proben auf die Messung bei den Proben 1 - 6 vorwiegend durch die Plattenarten bestimmt sein. Erst bei der Unterscheidung der Klebeschichten der Proben 7 - 12 scheint der gewählte Klebstoff einen größeren Einfluss auf die Messung auszuüben. In Relation zu allen anderen Messpunkten ist die Abweichung in der Klebeschicht hier im Schnitt für die Klebewinkel 7 - 9 deutlich geringer.

Es wurde vermutet, dass es Korrelationen zwischen den Scandaten und der Dickenmessung gibt. Doch trotz einiger Vergleiche und Bestrebungen, Zusammenhänge zwischen der Dicke der Klebewinkel und den Scandaten herzustellen, konnte bisher keine Korrelation nachgewiesen werden.

### 5.3 Auswertung der Plattenwellenmessung

Im Rahmen der Untersuchung zu den Alterungszuständen wurden unter anderem 12 verklebte Winkel jeweils vor und nach der Alterungssimulation 10-fach in der Plattenwellenanordnung gescannt. Es entstanden dabei eine Vielzahl an Daten. Diese Daten wurden für die Ermittlung der Plattenwellengeschwindigkeiten mit einem halbautomatischen Analysetool bearbeitet. In diesem Rahmen wurden pro Messung zusätzlich je 7 Spurdaten teils in Handarbeit erzeugt, welche folglich für die Verarbeitung für weiteren Routinen bereitstanden. Bereits in diesem Teil der Arbeit wurden über 9000 Dateien erzeugt, von denen hier nur eine kleine Auswahl ihren Platz findet.

### 5.3.1 Momentanphasengeschwindigkeit

In Abb. 5.6 sind die Konfidenzintervalle zu den gemittelten Momentanphasengeschwindigkeiten aus 4 verschiedenen Messungen dargestellt. Zwischen jeder Messung wurden sowohl Probenhalterung als auch die Ultraschallwandler-Halterungen entfernt und wieder montiert. Es wurden nach jeder Demontage alle 12 Klebewinkel erneut gescannt. Sowohl die Geschwindigkeitsverläufe der steigend wie auch fallend durchlaufenen Nullstellen sind aufgetragen. Alle Messungen haben einen sehr ähnlichen Verlauf der Phasengeschwindigkeiten. Unterschiede sind dennoch vor allem in den Gruppen unterschiedlicher Platten zu verzeichnen. Die verschiedenen Klebstoffe scheinen eine untergeordnete Rolle zu spielen.

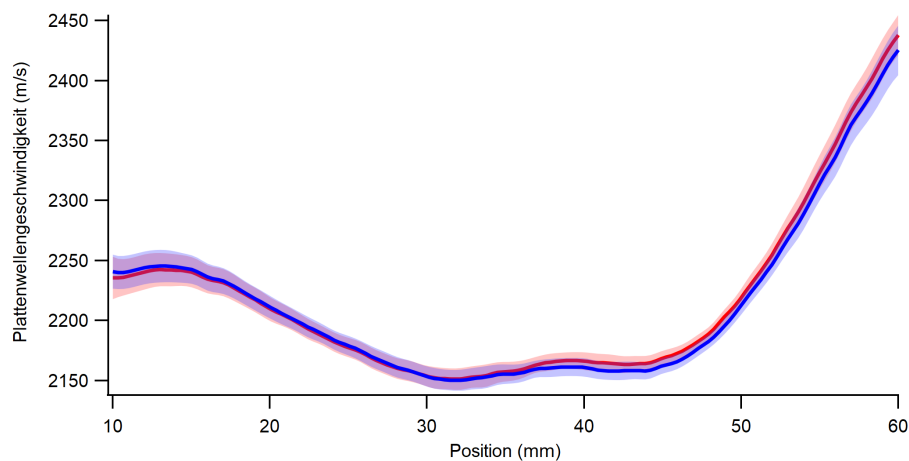


Abb. 5.6: Gemittelte Momentanphasengeschwindigkeit über 4 Messungen mit Demontage der Ultraschallwandler-Halterungen und Probe vor der Alterung des Klebewinkels 8

Die Abb. 5.6 kann stellvertretend für die Klebewinkel 7 - 12 vor dem Alterungsschritt angesehen werden. Die Klebewinkel-Proben 1 - 6 sind ausreichend durch die Abb. 5.7 vertreten. Alle Klebewinkelmessungen in der Pitch-Catch-Anordnung weisen zu Beginn der Messung eine Art Plateau in der Momentanphasengeschwindigkeit auf. Lediglich die Klebewinkel 1 - 6 beginnen, wie in Abb. 5.7 erkennbar ist, mit einem kurzen Anstieg bis zu diesem Plateau. Bis ca. 30 mm fallen die Phasengeschwindigkeiten bei allen Messungen. Bei ca. 40 mm entsteht vor allem in den Diagrammen der Proben 7 - 12

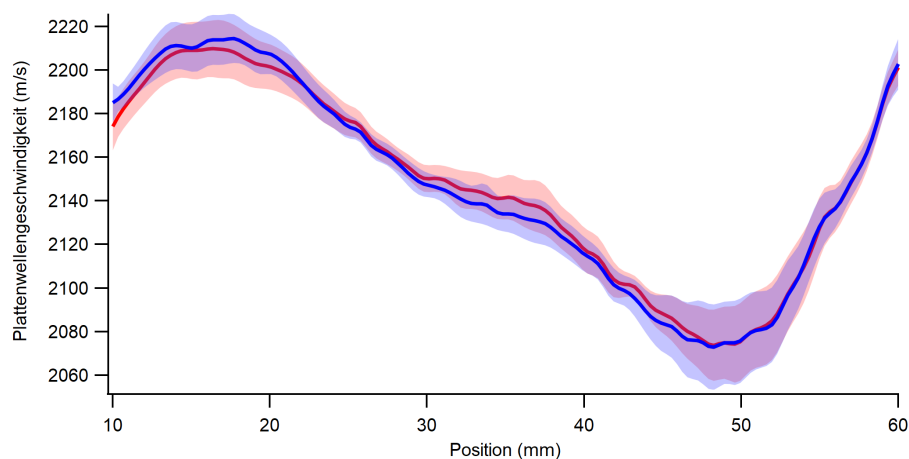


Abb. 5.7: Gemittelte Momentanphasengeschwindigkeit über 4 Messungen mit Demontage der Ultraschallwandler-Halterungen und Probe vor der Alterung des Klebewinkels 5

ein weiteres Plateau, welches mal höher und mal niedriger liegt aber immer vorhanden ist. Bei den Proben 1 - 6 ist dieser Effekt auch zu erkennen, allerdings gibt es nicht immer ein Plateau. Manchmal wie bei dem Klebewinkel 5 wird der negative Anstieg für eine kurze Strecke von nicht ganz 10 mm flacher. Danach fällt die Phasengeschwindigkeit wieder rasanter ab bis zu ihrem Minimum kurz vor der 50 mm Marke der Messung. Ab diesem Minimum steigen die Momentanphasengeschwindigkeiten der ungealterten Klebewinkel stets an und erst bei ca. 60 mm gibt es teilweise erneut ein Plateau oder schon wieder einen Abwärtstrends. Dies trifft nicht auf die Klebewinkel 1 - 6 zu. Hier endet der Aufwärtstrend noch nicht. Da die Auswertung hier endet, kann aktuell nicht genau gesagt werden, ab wo dahinter ein weiteres Plateau oder ein Abwärtstrend folgt. Weiterhin fallen größere Schwankungen bzw. erkennbare Periodizitäten bei den Klebewinkeln 1 - 6 auf, welche vermutlich mit der höheren Verstärkung zusammenhängen. Diese Periodizität, sofern es wirklich eine oder mehrere sind, haben jedoch eine wesentlich höhere Frequenz als jene bei den Plexiglasplatten in Kap. 4.3.3. Diese dort auftretende Periodizität ist also bei den Klebewinkeln nicht vorhanden oder zumindest nicht signifikant. Eine weitere Auffälligkeit, die alle Messungen teilen sind die Verhältnisse der Momentanphasengeschwindigkeiten der fallend und steigend durchlaufenen Nullstellen zu einander. Die fallenden Nullstellen (blau) haben zu Beginn der Messung eine höhere Phasengeschwindigkeit und werden ab der Position 20 mm von den steigenden Nullstellen (rot) »eingeholt«. Bei den Proben 7 - 12 verlaufen beide Momentanphasengeschwindigkeiten ca. bis zur 40 mm Marke nebeneinanderher. Danach ist die steigende Nullstelle fast durchgängig schneller als die fallende. Auch dieses Phänomen stellt sich bei den Proben 1 - 6 nicht ein. Hier wird die steigende Nullstelle vor der 30 mm Marke schneller als die fallende. Dieser Zustand hält sich über fast 20 mm, also bis kurz vor der 50 mm Marke. Ab dann wird die fallende Nullstelle etwas schneller als die steigende oder beide Verläufe gleichen sich nahezu.

Die durchschnittliche Phasengeschwindigkeit einer Plattenwelle kann mit den verwendeten Methoden zuverlässig und reproduzierbar ermittelt werden. Es wurden im Vergleich zur Schallgeschwindigkeitsmessung in Luft auch auf den verschiedenen Platten unterschiedlichen Materials plausible Plattenwellengeschwindigkeiten gemessen. Die Vergleiche mit Dispersionsdiagrammen stützen diese Zuverlässigkeit der Messung. Die Methode für die Ermittlung von Plattenwellengeschwindigkeiten ist demnach solide. Es wurden einige Messungen nach der wiederholten Montage des Messaufbaus durchgeführt. Diese waren erfolgreich und belegen die Reproduzierbarkeit ebenfalls. Nach der Alterung an sich treten jetzt aber andere Fragen auf, da sich die Momentanphasengeschwindigkeiten anders verhalten als es zu erwarten wäre. In Abb. 5.8 erkennt man nicht vorhergesehene Unterschiede im Verlauf der Plattenwellengeschwindigkeiten im Vergleich zur Messung vor der Alterung. Die Ursache hierfür ist noch ungeklärt und bedarf weiterer Forschung. Dennoch konnte erneut ein Abbild der örtlichen Plattenwellengeschwindigkeiten erstellt werden. Wie die Änderungen hinsichtlich der Alterung zu bewerten sind, muss weiter untersucht werden. Eine Änderung konnte dennoch festgestellt werden. Die Momentanphasengeschwindigkeiten der einzelnen Klebewinkel-Proben können wiedergegeben werden.

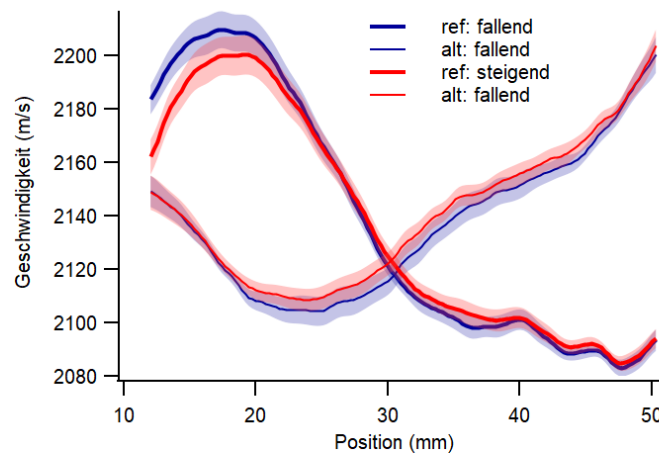


Abb. 5.8: Vergleich der Momentanphasengeschwindigkeiten vor und nach der Alterung des Klebewinkels 1

### 5.3.2 Pegelauswertung

In Abb. 5.9 ist der Schallpegel gegen den Ort aufgetragen. Die dargestellte Probe bzw. deren Empfangssignal wurde mit 85 dB verstärkt und es wurden ca. 3 cm von der Metallplatte abgescannt und zwei weitere auf der Klebefläche. Die Verstärkung wurde hier so angepasst, dass das Signal nicht übersteuert, um den Pegel über die gesamte Zeit beobachten zu können. Es ist zu erkennen, dass es einen stärkeren Intensitätsabfall ab dem 40-ten Millimeter gibt. Dies gilt für die Proben 7 - 12. In

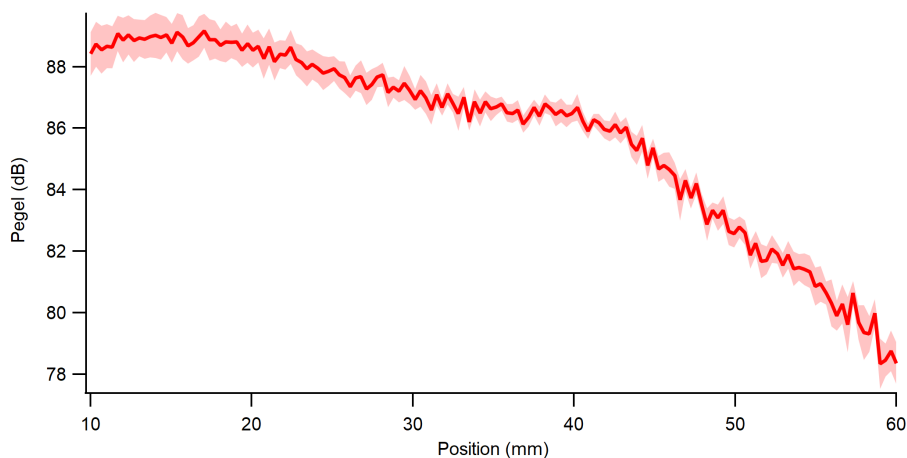


Abb. 5.9: Gemittelte Schallpegel über 4 Messungen mit Demontage der Ultraschallwandler-Halterungen und Proben vor der Alterung des Klebewinkels 8

anderen Empfangssignalen wie in Abb. 5.10 steigt der Pegel kurzzeitig wieder wieder an. Die Herkunft dieses Verhaltens ist noch ungeklärt. Die Klebeschicht wurde händisch aufgetragen. Es könnten hier stärkere Unstetigkeiten vorhanden sein in der Anhaftung und Schichtdicke. Zusätzlich könnte der Übergang von der dünnen Metallplatte zur dickeren Klebeschicht (Metallplatte, Klebeschicht, Plastikplatte) dazu führen, dass das eingefangene Luftschallsignal kurz vor dem Übergang mit dem Signal dahinter interferiert. Somit können die Empfangssignale je nach Phasenlage beider Signale zu einander an den verschiedenen Messorten mal stärker und mal schwächer sein.

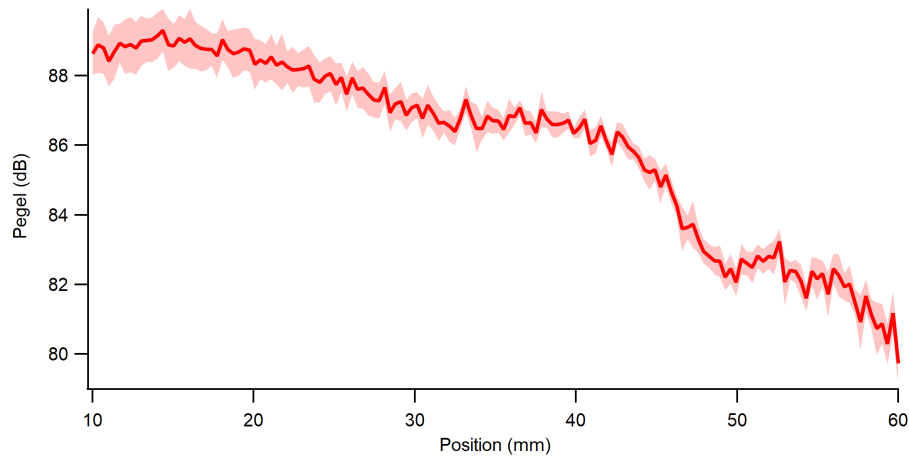


Abb. 5.10: Gemittelte Schallpegel über 4 Messungen mit Demontage der Ultraschallwandler-Halterungen und Probe 12 vor der Alterung des Klebewinkels 12

Das in Abb. 5.11 dargestellte Diagramm zeigt die Abweichung des Schallpegels des Klebewinkels 1 vor und nach der Alterung. Sie ist Sinnbild für die Klebewinkel 1 - 5, 8 und 12, da sie sehr ähnliche Verläufe zeigen. Der 6. Klebewinkel hat die gleichen Platten und den gleichen Klebstoff wie die Klebewinkel 4 und 5 und dennoch ist der Verlauf entsprechend Abb. 5.12 stark abweichend. Die Reduktion des Pegels zu Beginn der Aufzeichnung wie bei den anderen Klebewinkeln ist praktisch nicht vorhanden. Dafür gibt es einen durchgängigen Abwärtstrend, als wäre die Probe an allen Stellen egal ob Metall oder Klebefläche gleichmäßig durch den Alterungsschritt beeinflusst worden, was kaum vorstellbar ist.

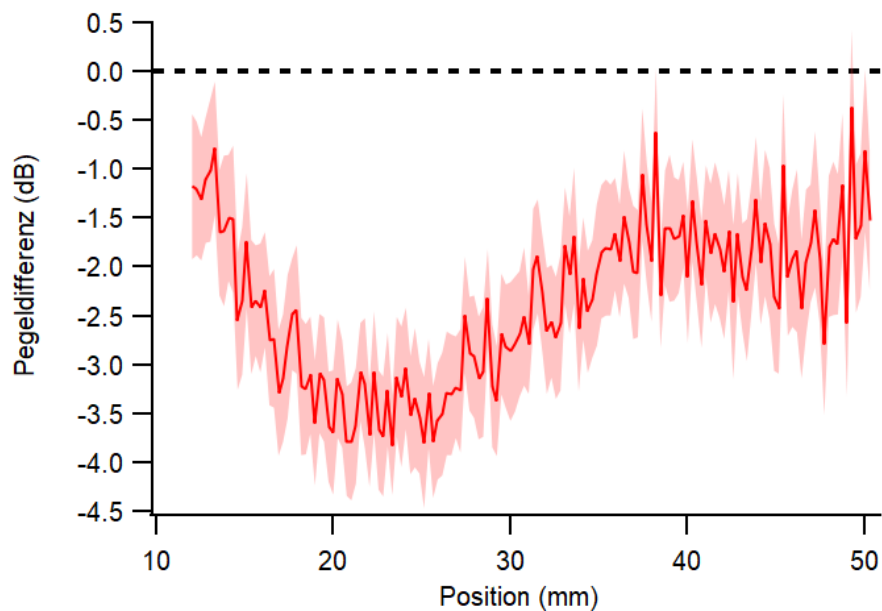


Abb. 5.11: Vergleich der Schallpegel vor und nach der Alterung des Klebewinkels 1



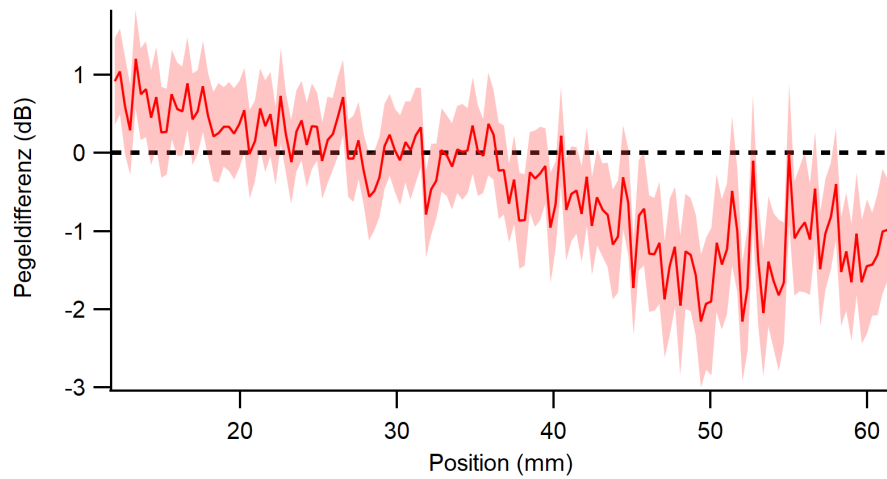


Abb. 5.12: Vergleich des Schallpegels vor und nach der Alterung des Klebewinkels 6

Die Klebewinkel 7, 9, 10 und 11 haben sehr ähnliche Trendlinien wie in Abb. 5.13. Der Pegel fällt leicht bis ca. 40 mm, anschließend gibt es einen stärkeren Abwärtstrend, der bei 50 mm wieder zu einem Anstieg des Pegels führt.

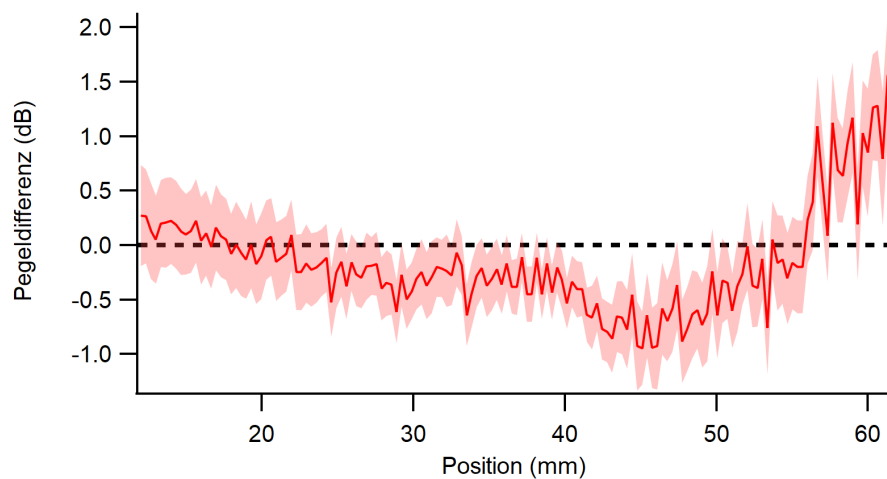


Abb. 5.13: Vergleich des Schallpegels vor und nach der Alterung des Klebewinkels 9



## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollte eine Machbarkeitsuntersuchung zur Charakterisierung von Alterungszuständen praxisrelevanter Klebeverbindungen mit Hilfe von Luftultraschall durchgeführt werden.

Innerhalb dieser Aufgabe sollten reproduzierbare Messmethoden entwickelt werden, die an Klebewinkel-Proben den Vergleich von einem Referenzzustand zu dessen künstlich gealtertem Zustand ermöglichen. Ziel war dabei berührungslos zu arbeiten, weshalb verschiedene luftgekoppelte Ultraschallverfahren adaptiert wurden. Zum einen wurden zwei Varianten der Transmissionsanordnung erarbeitet, um Ultraschallamplituden vergleichbar zu messen. Zum anderen wurde eine Pitch-Catch-Anordnung zur einseitigen Anregung von Plattenwellen, deren Phasengeschwindigkeiten und Amplituden ermittelt wurden, genutzt. Da zwischen den Messungen der Referenzzustände und den gealterten Zuständen einige Zeit verging, war es notwendig, die Messbedingungen reproduzierbar zu gestalten.

Um dies zu erreichen wurde für die Transmissionsanordnung mittels Stativmaterial und Fixiertool ein Messaufbau entwickelt und getestet. Es zeigte sich, dass die Reproduzierbarkeit in hinreichendem Maße gewährleistet ist.

Für die Pitch-Catch-Anordnung wurde ein neuartiger Messaufbau entwickelt. Dabei werden die Plattenwellen durch schräg einfallenden Luftultraschall angeregt. Daher kommt der reproduzierbaren Winkeleinstellung eine besondere Rolle zu, wofür eine separate Vorrichtung entwickelt wurde. Es wurde eine Methode zur Auswertung der Plattenwellen genutzt, mit welcher die Phasengeschwindigkeiten und Schallpegel ermittelt werden können. Der Einfluss der Montage/Justage, der Umgebungsbedingungen und der Auswerteparameter wurde umfassend untersucht. Es zeigte sich, dass die Plattenwellengeschwindigkeit mit hinreichender Genauigkeit gemessen werden kann, wobei die Reproduzierbarkeit ausreichend gewährleistet ist.

Die entwickelten Methoden wurden im Rahmen einer Machbarkeitsuntersuchung für den Vergleich gealterter und ungealterter Proben angewandt. Unterschiede der transmittierten Amplituden wurden teilweise beobachtet. Zudem konnten partiell Abweichungen in den Plattenwellengeschwindigkeiten festgestellt werden. Allerdings wurden uneinheitliche Ergebnisse bei nominell gleichartigen Proben gewonnen, was die Interpretation erschwert. Diese sind vermutlich auf die ungleichartige Probenherstellung zurückzuführen. Außerdem wären zusätzliche Alterungsstufen für eine genauere Alterungscharakteristik wünschenswert. Die Anwendung der Methoden auf weitere Materialsysteme wäre eine weitere erstrebenswerte Forschungsaufgabe.

Insgesamt ist es mit dieser Arbeit gelungen, taugliche Methoden für die Charakterisierung von Alterungszuständen von Klebeverbindungen mit Luftultraschall zu entwickeln.



# Literaturverzeichnis

- [1] Deutsch, Volker u.a., Die Ultraschallprüfung (UT) ZfP kompakt und verständlich, Band 1, 2. Auflage, / Castell-Verlag GmbH, Wuppertal, Unveränderter Nachdruck 2012
- [2] Joseph Krautkrämer, Herbert Kautkrämer, Werkstoffprüfung mit Ultraschall, 5., vollst. überarb. Auflage / Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1986
- [3] Forschungszentrum Ultraschall gGmbH Workshop Materialprüfung mit luftgekoppeltem Ultraschall, Grundkurs 22.06.2016
- [4] Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann, Stahlbau Kalender, Dauerhaftigkeit Ingenieurtragwerke, 19. Jahrgang/ Ernst & Sohn, 2017
- [5] J. David N. Cheeke, Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves, 2nd ed., / CRC Press, Taylor & Francis Group, Version Date: 20120518
- [6] Reinhard Lerch, Gerhard Sessler, Dietrich Wolf, Technische Akustik, Grundlagen und Anwendungen, / Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009
- [7] Vladimir A. Šutilov, Physik des Ultraschalls, Grundlagen, Aus d. Russ. übers. u. hrsg. von Peter Hauptmann./ Springer-Verlag Wien New York, 1984
- [8] Sachbericht zum FuE-Vorhaben, *Signaturen für die Alterung von Klebeverbindungen mit Ultraschall (SAIKU)*, Projektleiter: Dr. Mario Kiel, Dr. Christoph Pientschke, 2023
- [9] <https://www.sonotec.de/produkte/zerstoerungsfreie-materialpruefung/luftultraschall/sonoair-research-and-development/>, Abgerufen am 28.09.2023
- [10] <https://www.scribbr.de/hausarbeit/eidesstattliche-erklaerung-hausarbeit/>, aufgerufen am 28.11.2023



# Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die Ihnen vorliegende Arbeit eigenständig angefertigt habe. Wortwörtlich übernommene Textanteile habe ich kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde ausschließlich der Prüfungsbehörde der Hochschule Merseburg vorgelegt und nicht anderweitig veröffentlicht.

Halle (Saale), 06.12.2023

---

Christian Gragert

Text der Eidesstattlichen Erklärung wurde aus<sup>[10]</sup> entnommen.