

# **Ganzheitliche Betrachtung zur zerstörungsfreien Prüfung von thermoplastischen CFK-Tapes mittels Luftultraschall**

---

von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik  
der Universität Stuttgart  
genehmigte Dissertation  
zur Erlangung des Grades

**Doktor-Ingenieur**

vorgelegt von:

Dipl.-Ing. Wolfgang Essig

**Fachgutachter:**

Prof. Dr. rer. nat. habil. M. Kreuzbruck

Prof. Dr.-Ing. Peter Horst

## **Für die Nutzung dieser Dissertation gelten folgende rechtliche Bestimmungen**

- Die vorliegende Dissertation darf von der Universität Stuttgart frei im Internet angeboten werden. Eine weitere Verbreitung oder öffentliche Wiedergabe ist nicht gestattet und kann nur mit ausdrücklicher Genehmigung des Autors (Promovierten) geschehen.
- Die Vervielfältigung ist nur im Rahmen des privaten und eigenen wissenschaftlichen Gebrauchs (§ 53 UrhG) erlaubt.
- Die Publikation darf nicht bearbeitet oder in anderer Weise verändert werden.
- Der Autor hat das Recht, sein Werk, auch auszugsweise, anderweitig verfügbar zu machen und zu verbreiten.
- Für den Inhalt des Dokuments ist allein der Autor verantwortlich.

## **This publication (dissertation) is subject to the following terms of use:**

- The University of Stuttgart is entitled to give open access to this publication. Further publication or public broadcasting needs explicit authorization of the copyright owner (doctor).
- Copying is permitted only for private or the own scientific purposes of the person who performs copying (according to § 53 of the German Copyright Act). The copyright owner grants production of complete single copies of this publication by means of a print on demand service.
- This publication may not be edited or changed otherwise.
- The copyright owner has got the right to publish or broadcast this publication as a whole or parts thereof elsewhere.
- The author is exclusively responsible for the content of this publication.

## **Kurzfassung**

Pultrudierte, faserverstärkte Tapes werden bisher lediglich zerstörend oder optisch zerstörungsfrei geprüft. Wünschenswert wäre daher ein zerstörungsfreies Prüfverfahren, das kontaktfrei und schnell Risse, Einschlüsse und Änderungen in der Imprägnierung detektieren, also im Gegensatz zu optischen Verfahren das komplette Tapevolumen erfassen kann. Das in dieser Arbeit dazu verwendete Luftultraschallverfahren erfüllt all diese Anforderungen. Hierzu wurden auf beiden Seiten des Tapes Prüfköpfe angebracht (Sender und Empfänger) und der Einfluss auf die empfangene Amplitude in Durchschallung ausgewertet. Durch Schrägeinschallung konnten zudem sogenannte Plattenwellen angeregt werden, deren Geschwindigkeit und Ausbreitung ebenfalls Informationen über die Tapeeigenschaften beinhalten.

Für den Einsatz von Luftultraschall in der Prüfung von thermoplastischen, unidirektional kohlenstofffaserverstärkten Tapes (CFK-Tapes) mussten dazu diverse Fragestellungen geklärt werden. Dazu gehören die Fragen nach dem Temperatureinfluss des Tapes auf das Ultraschallsignal, die Bestimmung und Erhöhung der Auflösung, die Detektion von Unterschieden in der Imprägnierung durch vergleichende Messungen und eine Methode zur Evaluierung des Messsystems.

## **Abstract**

Pultruded, fiber-reinforced tapes have so far only been tested destructively or optically non-destructively. It would therefore be desirable to have a non-destructive testing method that can detect cracks, inclusions and changes in the impregnation quickly and without contact, i.e. that can detect the complete tape volume in contrast to optical methods. The air-coupled ultrasonic method used in this work meets all these requirements. For this purpose, probes were mounted on both sides of the tape (transmitter and receiver) and the influence on the received amplitude was evaluated in transmission. In addition, so-called plate waves could be excited, whose velocity and propagation also contain information about the tape properties.

For the use of air-coupled ultrasound in the testing of thermoplastic, unidirectional carbon fiber reinforced tapes (CFRP tapes), various questions had to be clarified. These include the questions of the temperature influence of the tape on the ultrasonic signal, the determination and increase of the resolution, the detection of differences in impregnation by comparative measurements and a method for evaluating the whole system.

# Inhalt

<b>Bildverzeichnis</b> .....	<b>5</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>12</b>
<b>Symbolverzeichnis</b> .....	<b>13</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>16</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>19</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>22</b>
<b>2 Ausgangssituation und Zielsetzung</b> .....	<b>23</b>
2.1 Faserkunststoffverbunde .....	23
2.2 Thermoplastische, kohlenstofffaserverstärkte-Tapes .....	23
2.2.1 Fasern .....	25
2.2.2 Matrix .....	25
2.2.3 Faservolumengehalt .....	26
2.2.4 Imprägnierung .....	27
2.2.5 Herstellung von CFK-Tapes .....	27
2.2.6 Weiterverarbeitung von CFK-Tapes .....	28
2.3 Qualitätskontrolle .....	30
2.3.1 Zerstörende Prüfung .....	31
2.3.2 Zerstörungsfreie Prüfung .....	32
2.4 Ultraschallprüfung .....	34
2.4.1 Grundlagen elastischer Wellen .....	34
2.4.2 Steifigkeitstensor in der linearen Elastizitätstheorie .....	34
2.4.3 Elastische Wellen in unendlich ausgedehnten Festkörpern .....	38
2.4.4 Elastische Wellen an Grenzflächen .....	39
2.4.5 Elastische Wellen in Platten .....	41
2.4.6 Anpassung der Impedanz für Luftultraschallmessungen .....	44
2.4.7 Plattenwellenerzeugung durch Schrägeinschallung .....	45
2.4.8 Bildgebende Verfahren mit Luftultraschall .....	47
2.5 Fokussierung von Luftultraschall .....	49
2.6 Einfluss der Tape-Temperatur .....	51
2.6.1 Temperatureinfluss bei der Kontaktultraschallprüfung .....	51
2.6.2 Temperaturabhängige Ultraschalluntersuchungen in FKV .....	52
2.6.3 Beeinflussung des Luftultraschallsignals durch erhöhte Temperaturen .....	53
2.7 Analyse von Ultraschalldaten .....	53
2.7.1 Optimal Baseline Selection .....	54
2.7.2 Probability of Detection Analyse (POD-Analyse) .....	54
2.7.3 Receiver Operating Characteristic (ROC) .....	58
2.8 Hypothese .....	60
<b>3 Versuchsdurchführung</b> .....	<b>62</b>
3.1 Definition der Hardware und eines Fehlerkatalogs .....	62
3.1.1 Prüfsystem und Fehlerkatalog .....	62
3.2 Untersuchung des Temperatureinflusses .....	65



3.2.1	Ermittlung der Sensortemperatur .....	65
3.2.2	Temperaturabhängige Untersuchung von Tapes mittels Luftultraschall .....	66
3.3	Entwicklung einer Fokussierung für Luftultraschallprüfköpfe .....	69
3.3.1	Reflexionsverhalten.....	69
3.3.2	Trichterform.....	72
3.3.3	Simulation des Schallfelds .....	73
3.3.4	Schallfeldvermessung und Auflösung .....	73
3.4	Entwicklung einer qualitativen Analysemethode .....	76
3.4.1	Verwendete Prüfkörper .....	76
3.4.2	Messaufbau und Einstellungen .....	77
3.4.3	Auswertung von Messergebnissen .....	79
3.4.4	Kalibrierung des Systems .....	81
3.5	Untersuchung mittels einer Probability of Detection Analyse .....	86
3.5.1	Prüfkörperherstellung.....	86
3.5.2	Messaufbau und Messablauf .....	88
3.5.3	Arten der Fehlererfassung .....	89
3.6	Definition der Scanmethodik für einen kontinuierlichen Tapevorschub .....	90
<b>4</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion .....</b>	<b>93</b>
4.1	Untersuchung des Temperatureinflusses.....	93
4.1.1	Ergebnisse der Ermittlung der Sensortemperatur .....	93
4.1.2	Ergebnisse der temperaturabhängigen Untersuchung von CFK-Tapes mittels Luftultraschall.....	94
4.1.3	Diskussion der Ergebnisse des Temperatureinflusses.....	101
4.2	Entwicklung einer Fokussierung für Luftultraschallprüfköpfe .....	104
4.2.1	Ergebnisse des Reflexionsverhaltens .....	104
4.2.2	Ergebnisse der Simulation des Schallfelds .....	105
4.2.3	Ergebnisse der Schallfeldvermessung und der Auflösung .....	108
4.3	Entwicklung einer qualitativen Analysemethode .....	118
4.3.1	Ergebnisse der Versuchsreihen .....	118
4.3.2	Diskussion der Ergebnisse der qualitativen Messreihen .....	121
4.4	Untersuchung mittels einer Probability of Detection Analyse .....	127
4.4.1	Ergebnisse des Schnittmusters 1 .....	128
4.4.2	Ergebnisse des Schnittmusters 2.....	132
4.4.3	Diskussion der POD Messungen .....	134
4.5	Definition der Scanmethodik für einen kontinuierlichen Tapevorschub .....	136
<b>5</b>	<b>Fazit und Ausblick .....</b>	<b>139</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>143</b>
<b>7</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>152</b>
<b>Anhang A</b>	<b>Datenblätter der verwendeten Prüfköpfe .....</b>	<b>152</b>
<b>Anhang B</b>	<b>Auswertung der Coda.....</b>	<b>154</b>
<b>Anhang C</b>	<b>Entwicklung einer qualitativen Analysemethode .....</b>	<b>155</b>
<b>Anhang D</b>	<b>POD-Analyse .....</b>	<b>165</b>
<b>Anhang E</b>	<b>Konstruktionsentwurf einer Prüfanlage.....</b>	<b>168</b>

## Bildverzeichnis

Bild 2.1: Auf einer Rolle aufgerolltes CFK-Tape .....	24
Bild 2.2: Thermoplastisches Granulat (links) und Kohlenstofffasern (Mitte), die Komponenten aus denen CFK-Tapes (rechts) hergestellt werden .....	24
Bild 2.3: Schema einer Pultrusionsanlage zur Tapeherstellung .....	28
Bild 2.4: Schema des automatisierten Tapelegeverfahrens in Seitenansicht und Draufsicht .....	29
Bild 2.5: Beispiele des automatisierten Tapelegens in der Luftfahrt, automatischer Tapelegeautomat (links) und Darstellung der Dimensionen der Produkte (rechts) .....	29
Bild 2.6: Schematische Darstellung des Hot Forming Verfahrens .....	30
Bild 2.7: Übersicht über die Bandbreite elektromagnetischer Felder und Wellen ....	33
Bild 2.8: Schematische Darstellung eines Feder-Masse-Modells mit Masseteilchen (rund) und Federn mit Federkonstante $D$ .....	34
Bild 2.9: Darstellung des Spannungszustandes eines infinitesimal kleinen kubischen Volumenelements .....	36
Bild 2.10: Schematische Darstellung von Wellenmoden, Transversalwelle (links) und Longitudinalwelle (rechts) .....	39
Bild 2.11: Einfallende Longitudinalwelle, ihre reflektierten und transmittierten Wellen inklusive Modenkonversion .....	40
Bild 2.12: Entstehung einer Lambwelle in einer Platte der Dicke $D_P$ . Die Platte ist so orientiert, dass ihre Oberflächennormale parallel zur $x_3$ -Achse und die Mittelebene in der $x_1$ - $x_2$ -Ebene liegt .....	42
Bild 2.13: Schematische Darstellung von Plattenwellen, symmetrische $s_0$ (links) und antisymmetrische $a_0$ Plattenwelle (rechts) .....	43
Bild 2.14: Dispersionsrelation der $s_0$ - (oben) und der $a_0$ -Mode (unten) in Abhängigkeit von der Querkontraktion eines isotropen Materials. Für $\nu_R$ wurde $\nu = 0,3$ verwendet .....	43
Bild 2.15: Röntgenbilder eines Ultrason® NCG50-D25-P76 Prüfkopfs, Seitenansicht (links) und Ansicht von schräg hinten (rechts). Die aktive Phase wird dunkel, die Passive hell dargestellt .....	44
Bild 2.16: Anpassungsschicht für Ultraschallwandler .....	45
Bild 2.17: Entstehung einer Plattenwelle durch Schrägeinschallung sowie das Abstrahlen von Luftultraschall .....	46
Bild 2.18: Abhängigkeit des empfangenen Signals vom Einfallswinkel .....	46
Bild 2.19: Schematische Anordnung eines Aufbaus zur scannenden Untersuchung senkrecht eingeschallten Luftultraschalls in Transmissionsanordnung .....	47

Bild 2.20: Schematische Anordnung eines Aufbaus zur scannenden Untersuchung durch schräg eingeschallten Luftultraschall in Transmissionsanordnung .....	48
Bild 2.21: Schematische Anordnung eines Aufbaus zur scannenden Untersuchung durch schräg eingeschallten Luftultraschall in Re-Emissionsanordnung .....	49
Bild 2.22: Ideale POD-Kurve mit kritischer Fehlergröße „akrit“ .....	55
Bild 2.23: Realistische POD-Kurve mit Normalverteilungen .....	56
Bild 2.24: POD-Kurve nach Hit-Miss-Kriterium, Fehlerwerte zufällig erstellt .....	57
Bild 2.25: ROC-Kurve .....	59
Bild 2.26: Aufteilung der empfangenen Messsignale in Fehlersignal und Bildrauschen .....	59
Bild 3.1: Prüfstand für kurze Tapeabschnitte .....	63
Bild 3.2: Tapeprüfstand für Endlosbänder zur Simulation einer Pultrusionsanlage .....	64
Bild 3.3: Prinzipskizze (links) und Versuchsaufbau (rechts) zur Temperaturbereichsbestimmung mittels Thermoelementen, der Abstand der Keramikstrahler zum Tape wurde zur besseren Darstellung vergrößert .....	66
Bild 3.4: Anbau der Infrarot-Bauelemente am Prüfstand für Endlosbänder .....	67
Bild 3.5: Prinzipskizze der Untersuchungsanordnung eines CFK-Tapes in senkrechter Durchschallung (links), in schräg versetzter Durchschallung (Mitte) und in schräger Durchschallung (rechts) .....	67
Bild 3.6: Reflexion und Modenkonzersion von Luftultraschall an der Wand der Fokussierung .....	70
Bild 3.7: Schematischer Aufbau (links) und Aufbau mit eingespanntem Prüfkopf (rechts) der ACU-Vibrometry-Methode .....	74
Bild 3.8: Messaufbau zur direkten Durchschallungsmessung an Luft, es sind die Fokussierungstrichter FOK-linear angebracht .....	75
Bild 3.9: Aluminium Lochblech zur quantitativen Messung der Auflösung von Luftultraschallmessungen .....	75
Bild 3.10: Präpariertes CFK-Tape mit Markierung aus Klebestreifen und notierter Identifikation .....	77
Bild 3.11: Automatische Darstellung mit MATLAB®-Skript. Zugeschnittener und skaliertes Bereich im C-Scan (oben) und A-Bild mit markiertem Bereich der maximalen Amplitude und des Abschwingverhaltens (unten) .....	78
Bild 3.12: Schematische Darstellung der Kalibrierkurve zur Punktevergabe der Kategorie „Mittelwert“ .....	82

Bild 3.13: Schematische Kalibrierkurve zur Punktevergabe der Kategorie „maximale Amplitude“ .....	83
Bild 3.14: Darstellung der Kalibrierkurve zur Punktevergabe der Kategorie „Standardabweichung“ .....	84
Bild 3.15: Beispielhafter C-Scan, neu skaliert (oben) und Ausschnitt aus der Darstellung der Gesamtauswertung mit tabellarischer und optischer Bewertung (unten) .....	85
Bild 3.16: Schematische Skizze der Fehlereinbringung, Schnitte mit variierender Länge (links) und Schnitte mit variierender Breite (rechts) .....	87
Bild 3.17: CNC gesteuerte Schneidevorrichtung basierend auf einem x-y-Scantisch, Draufsicht mit markierten Stellschrauben (links) und Schneidevorrichtung mit Rasiermesser Klinge (rechts) .....	87
Bild 3.18: Zusätzliche Tapeführung in der Nähe des Messbereichs und der Einsatz eines Fokussierungstrichters .....	89
Bild 3.19: Scanmethodik der Tapeprüfung für die theoretische Betrachtung der Auflösung .....	91
Bild 4.1: Darstellung der Prüfkopftemperatur über der Tape-Temperatur .....	93
Bild 4.2: Strukturzustand eines CFK-Tapes bei Tape-Temperaturen von 200 °C (links) und 210 °C (rechts) .....	94
Bild 4.3: Senkrechte Durchschallung: Werte der mittleren Amplitude über der Tape-Temperatur .....	95
Bild 4.4: Senkrechte Durchschallung: Werte der mittleren Phase über der Tape-Temperatur .....	96
Bild 4.5: Senkrechte Durchschallung: A-Bilder von Messungen bei Tape-Temperaturen von 25 °C und 40 °C. ....	96
Bild 4.6: Schräg versetzte Durchschallung: Werte der mittleren Amplitude über der Tape-Temperatur .....	97
Bild 4.7: Schräg versetzte Durchschallung: Werte der mittleren Phase über der Tape-Temperatur .....	98
Bild 4.8: Schräge Durchschallung: Werte der mittleren Amplitude über der Tape-Temperatur .....	99
Bild 4.9: Schräge Durchschallung: Werte der mittleren Phase über der Tape-Temperatur .....	100
Bild 4.10: Schräge Durchschallung: A-Bilder von Messungen bei Tape-Temperaturen von 25 °C und 40 °C .....	100
Bild 4.11: Fokussierungstrichter, hergestellt durch FDM, linear (links), exponentiell (Mitte) und parabolisch (rechts) .....	104
Bild 4.12: Verlauf des Reflexionsfaktors des Kunststoffes ABS der Firma iGo3D® in Abhängigkeit vom Einfallswinkel .....	105

Bild 4.13:Verlauf des Schalldrucks in Abhängigkeit vom Abstand zum Trichteraustritt für FOK-linear, FOK-parabolisch und FOK-exponentiell..	106
Bild 4.14:Verlauf des radialen Schalldrucks am Empfänger in Abhängigkeit vom Abstand zum Mittelpunkt für FOK-linear, FOK-parabolisch und FOK-exponentiell .....	107
Bild 4.15:Schallfeldvermessung mit der ACU-Vibrometry-Methode ohne Fokussierung (o. l.), FOK-linear (o. r.), FOK-parabolisch (u. l.) und FOK-exponentiell (u. r.) .....	109
Bild 4.16:Vergleichende A-Bilder an Luft ohne Fokussierung (o. l.), FOK-linear (o. r.), FOK-parabolisch (u. l.) und FOK-exponentiell (u. r.).....	110
Bild 4.17:Vergleichende A-Bilder an Luft ohne Fokussierung (o. l.), FOK-linear (o. r.), FOK-parabolisch (u. l.) und FOK-exponentiell (u. r.), neu skaliert.....	111
Bild 4.18:Vergleichende A-Bilder mit Tape mit FOK-linear (links) und FOK-exponentiell (rechts) .....	112
Bild 4.19:Vergleichende A-Bilder an Luft ohne interne Verstärkung mit FOK-linear (Links) und FOK-exponentiell (rechts) .....	113
Bild 4.20:Vergleichende A-Bilder ohne externe Verstärkung mit FOK-linear an Luft (o. l.), FOK-linear am Tape (o. r.), FOK-experimentell an Luft (u. l.) und FOK-exponentiell am Tape (u. r.).....	114
Bild 4.21:C-Scan der Auflösungsmessung an einem Aluminium-Lochblech ohne Fokussierung.....	115
Bild 4.22:C-Scan der Auflösungsmessung an einem Aluminium-Lochblech mit Fokussierung FOK-linear.....	115
Bild 4.23:C-Scan der Auflösungsmessung an einem Aluminium-Lochblech mit Fokussierung FOK-parabolisch .....	116
Bild 4.24:C-Scan der Auflösungsmessung an einem Aluminium-Lochblech mit Fokussierung FOK-exponentiell .....	116
Bild 4.25:Linien-Scan der C-Scans aus Bild 4.21 bis Bild 4.24. Es sind jeweils die maximalen Amplituden entlang der Breite des Lochblechs auf Höhe der kleinsten Bohrung gezeigt .....	117
Bild 4.26:Wertungspunkte aller Abschnitte des Tapes Te1 über beide Versuchsreihen .....	119
Bild 4.27:Wertungspunkte aller Abschnitte des Tapes Te2 über beide Versuchsreihen .....	120
Bild 4.28:Wertungspunkte aller Abschnitte des Tapes Te3 über beide Versuchsreihen .....	120
Bild 4.29:Wertungspunkte aller Abschnitte des Tapes Te4 über beide Versuchsreihen .....	121

Bild 4.30: Wertungspunkte aller Abschnitte aller Tapes, gemittelt über beide Versuchsreihen .....	122
Bild 4.31: Gemittelte Maximalwerte aller Tapes .....	123
Bild 4.32: C-Scan des Tapes Te3-4 aus Versuchsreihe 1 .....	123
Bild 4.33: Fotografie des Tapes Te4-4 mit Hintergrundbeleuchtung .....	124
Bild 4.34: Gemittelte Minimalwerte aller Tapes .....	125
Bild 4.35: Gemessene Tapedicken.....	125
Bild 4.36: Gemittelte Mittelwerte aller Tapes .....	126
Bild 4.37: Gemittelte Standardabweichungen aller Tapes.....	127
Bild 4.38: Darstellung aller Schnittmuster auf einem beispielhaften C-Scan des Prüfkörpers POD-a.....	128
Bild 4.39: C-Scan des Prüfkörpers POD-a mit markierten Fehlerstellen größer 10 dB.....	128
Bild 4.40: POD-Diagramm des Prüfkörpers POD-a mit einem Schwellwert von 10 dB.....	129
Bild 4.41: C-Scan des Prüfkörpers POD-a mit markierten Fehlerstellen größer SUM 200 .....	129
Bild 4.42: POD-Diagramm des Prüfkörpers POD-a mit einem Schwellwert von SUM 200 .....	130
Bild 4.43: C-Scan des Prüfkörpers POD-m mit markierten Fehlerstellen größer 20 dB.....	130
Bild 4.44: POD-Diagramm des Prüfkörpers POD-m mit einem Schwellwert von 20 dB.....	131
Bild 4.45: C-Scan des Prüfkörpers POD-m mit markierten Fehlerstellen größer SUM 3000 .....	131
Bild 4.46: POD-Diagramm des Prüfkörpers POD-m mit einem Schwellwert von SUM 3000 .....	132
Bild 4.47: C-Scan des Prüfkörpers POD-a-b1 mit markierten Fehlerstellen größer 30 dB .....	133
Bild 4.48: POD-Diagramm aller Prüfkörper POD-a-b mit einem Schwellwert von 30 dB.....	133
Bild 4.49: C-Scan des Prüfkörpers POD-a-b1 mit markierten Fehlerstellen größer SUM 2300.....	134
Bild 4.50: POD-Diagramm aller Prüfkörper POD-a-b mit einem Schwellwert von SUM 2300 .....	134
Bild 4.51: Untersucher Tapeabschnitt mit manuell eingebrachtem Riss.....	136
Bild 4.52: C-Scan des untersuchten Tapes, ausgewertet mit der Standardmethode.....	137

Bild 4.53:C-Scan des untersuchten Tapes, dargestellt mit abstrahiertem Zickzackmuster, die Prüfkopfpositionen zu unterschiedlichen Zeiten sind schematisch eingezeichnet.....	137
Bild 4.54:C-Scan des untersuchten Tapes, das abstrahierte Zickzackmuster wurde um die Breite der aktiven Fläche der Prüfköpfe erweitert .....	138
Bild 7.1: Luftultraschallprüfkopf 1, als Empfänger verwendet.....	152
Bild 7.2: Luftultraschallprüfkopf 2, als Sender verwendet.....	153
Bild 7.3: Vergleich der Konturen der Coda, gute Auswahl des Messbereichs (links) und Bereich mit Randeffekten (rechts).....	154
Bild 7.4: Fotografie des Tapes Te1-1. Links: ohne, rechts: mit Hintergrundbeleuchtung .....	157
Bild 7.5: Fotografie des Tapes Te1-2. Links: ohne, rechts: mit Hintergrundbeleuchtung .....	157
Bild 7.6: Fotografie des Tapes Te1-3. Links: ohne, rechts: mit Hintergrundbeleuchtung .....	158
Bild 7.7: Fotografie des Tapes Te1-4. Links: ohne, rechts: mit Hintergrundbeleuchtung .....	158
Bild 7.8: Fotografie des Tapes Te2-1. Links: ohne, rechts: mit Hintergrundbeleuchtung .....	159
Bild 7.9: Fotografie des Tapes Te2-2. Links: ohne, rechts: mit Hintergrundbeleuchtung .....	159
Bild 7.10:Fotografie des Tapes Te2-3. Links: ohne, rechts: mit Hintergrundbeleuchtung .....	160
Bild 7.11:Fotografie des Tapes Te2-4. Links: ohne, rechts: mit Hintergrundbeleuchtung .....	160
Bild 7.12:Fotografie des Tapes Te3-1. Links: ohne, rechts: mit Hintergrundbeleuchtung .....	161
Bild 7.13:Fotografie des Tapes Te3-2. Links: ohne, rechts: mit Hintergrundbeleuchtung .....	161
Bild 7.14:Fotografie des Tapes Te3-3. Links: ohne, rechts: mit Hintergrundbeleuchtung .....	162
Bild 7.15:Fotografie des Tapes Te3-4. Links: ohne, rechts: mit Hintergrundbeleuchtung .....	162
Bild 7.16:Fotografie des Tapes Te4-1. Links: ohne, rechts: mit Hintergrundbeleuchtung .....	163
Bild 7.17:Fotografie des Tapes Te4-2. Links: ohne, rechts: mit Hintergrundbeleuchtung .....	163
Bild 7.18:Fotografie des Tapes Te4-3. Links: ohne, rechts: mit Hintergrundbeleuchtung .....	164

Bild 7.19:Fotografie des Tapes Te4-4. Links: ohne, rechts: mit Hintergrundbeleuchtung .....	164
Bild 7.20:C-Scan des Prüfkörpers POD-a-b2 mit markierten Fehlerstellen größer 30 dB .....	165
Bild 7.21:C-Scan des Prüfkörpers POD-a-b2 mit markierten Fehlerstellen größer SUM 2300.....	165
Bild 7.22:C-Scan des Prüfkörpers POD-a-b3 mit markierten Fehlerstellen größer 30 dB .....	165
Bild 7.23:C-Scan des Prüfkörpers POD-a-b3 mit markierten Fehlerstellen größer SUM 2300.....	166
Bild 7.24:C-Scan des Prüfkörpers POD-a-b4 mit markierten Fehlerstellen größer 30 dB .....	166
Bild 7.25:C-Scan des Prüfkörpers POD-a-b4 mit markierten Fehlerstellen größer SUM 2300.....	166
Bild 7.26:C-Scan des Prüfkörpers POD-a-b5 mit markierten Fehlerstellen größer 30 dB .....	166
Bild 7.27:C-Scan des Prüfkörpers POD-a-b5 mit markierten Fehlerstellen größer SUM 2300.....	167
Bild 7.28:C-Scan des Prüfkörpers POD-a-b6 mit markierten Fehlerstellen größer 30 dB .....	167
Bild 7.29:C-Scan des Prüfkörpers POD-a-b6 mit markierten Fehlerstellen größer SUM 2300.....	167
Bild 7.30:Rendering der Konstruktion eines Prüfstands für beliebige Pultrusionsanlagen.....	168



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Vor- und Nachteile einer thermoplastischen gegenüber einer duromeren Matrix .....	26
Tabelle 2.2: Qualitätskriterien für thermoplastische Tapes.....	30
Tabelle 3.1: Fehlerkatalog für die Tapeprüfung.....	64
Tabelle 3.2: Mechanische Eigenschaften von ABS, hergestellt mit FDM.....	72
Tabelle 3.3: Darstellung der untersuchten Trichterformen .....	72
Tabelle 3.4: Prüfkörperbezeichnungen aller unterschiedlich imprägnierten Tapes ...	77
Tabelle 3.5: Einteilung der berechneten Mittelwerte in Bewertungsbereiche .....	82
Tabelle 3.6: Einteilung der maximalen Amplitude in Bewertungsbereiche .....	82
Tabelle 3.7: Einteilung der Standardabweichung in Bewertungsbereiche.....	83
Tabelle 3.8: Übersicht der Prüfkörper für die POD-Analyse .....	88
Tabelle 4.1: Gemessene Durchmesser der kleinsten Bohrung .....	117
Tabelle 7.1: Inhalt der Datei Wertung.mat.....	155
Tabelle 7.2: Ergebnisse der Tapeabschnitte Te1 und Te2 aus Versuchsreihe 1 ....	155
Tabelle 7.3: Ergebnisse der Tapeabschnitte Te3 und Te4 aus Versuchsreihe 1 ....	155
Tabelle 7.4: Ergebnisse der Tapeabschnitte Te1 und Te2 aus Versuchsreihe 2 ....	156
Tabelle 7.5: Ergebnisse der Tapeabschnitte Te3 und Te4 aus Versuchsreihe 2 ....	156

# Symbolverzeichnis

## Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$a$	$m/s^2$	Beschleunigung
$a_i$	–	antisymmetrische Wellenmode i-ter Ordnung
$\alpha$	$dB/m$	Dämpfungskoeffizient
$b$	$m$	Tapebreite
$C_{ijkl}$	–	Steifigkeitstensor
$D$	$N/m$	Federkonstante
$d_a$	$m$	Dicke der Anpassschicht für Luftultraschallprüfköpfe
$D_p$	$m$	Plattendicke
$e$	$m$	Laufstrecke der Plattenwelle
$E$	$N/m^2$	Elastizitätsmodul
$\epsilon$	–	Dehnung
$\epsilon_{kl}$	–	Dehnungstensor
$\eta$	$Ns/m^2$	Koeffizient der inneren Reibung
$f$	$1/s$	Frequenz
$F$	$N$	Kraft
$\gamma$	$^\circ$	Drehwinkel um die z-Achse
$I$	$N/ms$	Intensität des Ultraschalls
$k$	$1/m$	Wellenvektor
$l$	$m$	Abstand zwischen zwei Luftultraschallprüfköpfen
$\lambda$	$m$	Wellenlänge
$\lambda_{ijkl}$	–	reduzierter Steifigkeitstensor
$\Lambda_{ik}$	–	Christoffel-Tensor
$m$	$g$	Masse
$n$	–	akustischer Brechungsindex
$\vec{n}$	–	Ausbreitungsrichtung einer Welle
$\nu$	–	Querkontraktionszahl
$\omega$	$1/s$	Kreisfrequenz
$\parallel$	–	parallel
$\Delta\phi$	$^\circ$	Phasendifferenz
$\psi$	$^\circ$	Belastungswinkel
$R$	–	Reflexionsfaktor
$\rho$	$g/cm^3$	Dichte
$\perp$	–	senkrecht
$s_i$	–	symmetrische Wellenmode i-ter Ordnung
$\sigma$	$N/m^2$	Spannung
$\delta_{ik}$	–	Kronecker-Delta
$s_v$	$m$	Tape-Versatz
$t$	$s$	Zeit
$T$	–	Transmissionskoeffizient

$\tau$	$N/m^2$	Schubspannung
$\theta$	$^\circ$	Einfallwinkel einer Ultraschallwelle
$\vec{u}$	$m$	Verschiebung
$U$	$V$	Amplitude
$\vec{U}$	–	Eigenvektor
$v$	$m/s$	Phasengeschwindigkeit
$V$	$m^3$	Volumen
$\vartheta$	$^\circ C$	Temperatur
$v_{Fm}$	–	Fasermassengehalt
$v_{FV}$	–	Faservolumengehalt
$v_T$	$m/s$	Tapevorschubgeschwindigkeit
$x$	$m$	normierte, differentielle Längenänderung
$Z$	$kg/m^2s$	akustische Impedanz

### Abkürzungen

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer
A-Bild	zeitliche Darstellung der empfangenen Amplitude
ACU	Air-coupled Ultrasound
B-Scan	farbcodierte Darstellung der Amplitude entlang einer Ortskoordinate
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
C-Scan	farbcodierte Darstellung des maximalen Amplitudenwerts entlang zweier Ortskoordinaten
dB	Dezibel
DFT	Diskrete Fourier-Transformation
DToF	Differential Time of Flight
FDM	Fused Deposition Modeling
FEM	Finite-Elemente-Methode
FKV	Faserkunststoffverbund
FOK	Fokussierungstrichter
FVW	Faserverbundwerkstoff
FVG	Faservolumengehalt
GUI	Grafische Benutzeroberfläche
i. O.	in Ordnung
L	Luft
MW	Mittelwert
NTM	Normal Transmission Mode
P	Platte
PA	Polyamid
PAN	Polyacrylnitril

POD	Probability of Detection
PZT	Blei-Zirkonat-Titanat
QL	Quasilongitudinal
QT	Quasitransversal
RMSE	Root-Mean-Square-Error
ROC	Receiver-Operating-Characteristic
SH	Shear Horizontal
SHM	Structural Health Monitoring
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis
SRM	Slanted Re-emission Mode
Std	Standardabweichung
STM	Slanted Transmission Mode
SUM	Summe der Amplituden im Fehlerbereich
SV	Shear Vertical
ToF	Time-of-Flight
UD	Unidirektional
willk. Einh.	willkürliche Einheit
ZfP	zerstörungsfreie Prüfung

## 1 Einleitung

Das stetige Ziel der zerstörungsfreien Prüfung ist die Sicherstellung der Qualität von Bauteilen, Komponenten, kompletten Strukturen oder Halbzeugen. Dabei kann aus einer großen Auswahl an Verfahren das Optimale ausgewählt werden. Die bekanntesten Standardverfahren sind hierbei die Ultraschallprüfung, die Radiografie, die Thermografie und die optische Prüfung.

Speziell die Luftultraschallprüfung, ein Teilgebiet der Ultraschallprüfung, ist bisher nicht weit verbreitet und nicht als Standardverfahren etabliert. Bei der Luftultraschallprüfung müssen neben Reflexionen aufgrund von akustischen Impedanzen auch weitere Herausforderungen im Bereich der Signal- und Datenverarbeitung überwunden werden. So können unterschiedlichste Prüfanordnungen, wie die Schrägdurchschallung oder die Reemissionsanordnung [1, 2], die Interpretation der empfangenen Signale deutlich komplizieren. Durch diese Prüfanordnungen, die einseitig oder beidseitig durchgeführt werden können, steigt zudem die Komplexität des Verfahrens durch die Generierung von sogenannten Plattenwellen [3] in dem zu überprüfenden Bauteil. Neben der Entstehung dieser Wellen müssen weitere Faktoren, wie zum Beispiel die Wechselwirkung mit Defekten und Grenzflächen für die spätere Ergebnisbeurteilung beachtet werden. Dennoch sollten diverse Vorteile des Luftultraschallverfahrens, beispielsweise die kontaktfreie Prüfung ohne Kontamination der Prüfkörper oder die niedrige Prüffrequenz zur Prüfung von stark dämpfenden Werkstoffen nicht außer Acht gelassen werden. Zu diesen Werkstoffen zählen unter anderem die Faserkunststoffverbunde (FKV), sie werden in der heutigen Zeit nicht mehr nur in der Luft- und Raumfahrtindustrie eingesetzt. Ferner erreichen sie zunehmend Popularität in der Automobilindustrie sowie dem Sport- und Freizeitsektor [4].

Speziell im dynamischen Bereich der Automobilindustrie sind hierfür Fertigungs- und Prüfverfahren für Faserkunststoffverbunde sinnvoll, die sowohl schnell, als auch zuverlässig betrieben werden können. Hier zeigt der Einsatz von thermoplastischen Matrixwerkstoffen sein großes Potential. Die Vorteile sind dabei die schnelle und unkomplizierte Verarbeitung, die bessere Fügbarkeit, eine hohe Schlagzähigkeit, sowie ein hoher Widerstand gegen Delaminationen [5]. Ein neuartiges Fertigungsverfahren zeigt die Herstellung von speziellen Halbzeugen, den sogenannten Tapes, mit Thermoplastmatrix und unidirektionalen Verstärkungsfasern im Strangziehverfahren (Pultrusion) [6]. Für den Einsatz der Tapes ist neben der Weiterentwicklung und Optimierung des Herstellungsprozesses die Qualitätssicherung mittels Methoden der zerstörungsfreien Werkstoff- und Bauteilprüfung ein entscheidender Faktor.

## **2 Ausgangssituation und Zielsetzung**

Nachdem einleitend der Themenkreis der Arbeit zugeordnet wurde, wird in diesem Kapitel - ausgehend von der Darstellung der theoretischen Grundlagen und aktuellen Erkenntnissen zu den Eigenschaften, der Herstellung sowie der Qualitätskontrolle der in Kapitel 1 genannten Tapes - die weitere Zielsetzung dieser Arbeit beschrieben. Schwerpunkt ist die Beantwortung verschiedener Fragestellungen im Kontext der Tapeprüfung entlang der kompletten Prozesskette. Hierzu werden die Themengebiete Pultrusion und zerstörungsfreie Prüfung mit Ultraschall einhergehend betrachtet.

### **2.1 Faserkunststoffverbunde**

Faserverbundwerkstoffe (FVW) werden bereits seit Jahrhunderten als Baumaterial in Form von Ziegeln, die aus mit Pflanzenfasern vermischem Lehm hergestellt werden, verwendet [7]. Mit der Entwicklung technischer Kunststoffe im 20. Jahrhundert und deren Einsatz als Matrixwerkstoff wurden die natürlichen FVW in Bezug auf viele Merkmale weit übertroffen. Im Jahr 1945 konnte das erste Mal erfolgreich eine Serienproduktion mit Faserkunststoffverbunden (FKV) durchgeführt werden. Zunächst wurden jedoch fast ausschließlich Duromere verwendet [6]. Durch eine hohe Schmelzviskosität von Thermoplasten und der dadurch schwierigeren Imprägnierung von Fasern konnten sich erst in den 1970er und 1980er Jahren thermoplastische Matrixwerkstoffe durchsetzen. [8]

Als Faserwerkstoffe für FKV haben sich über die Jahre diverse Werkstoffe qualifiziert, wie zum Beispiel Kohlenstoff, Glas oder Aramid, wobei der weitere Fokus auf den in dieser Arbeit untersuchten Kohlenstofffasern liegen soll. Speziell FKV mit diesen Fasern verzeichnen laut aktuellen Studien ein Wachstum. Der weltweite Bedarf an kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) hat sich zwischen 2010 und 2016 von 51.000 Tonnen auf 101.000 Tonnen pro Jahr verdoppelt, Prognosen zeigen eine weitere Verdopplung des Bedarfs von CFK bis 2020. Der Einsatz von CFK mit thermoplastischer Matrix beträgt aktuell 26,3 % und verzeichnet ebenfalls ein stetiges Wachstum. [4]

### **2.2 Thermoplastische, kohlenstofffaserverstärkte-Tapes**

Kohlenstofffaserverstärkte Tapes, kurz CFK-Tapes, sind Halbzeuge aus in Kunststoff imprägnierten, unidirektionalen (UD) Kohlenstofffasern. In Bild 2.1 ist ein solches Tape auf einer Rolle drapiert zu sehen, dem typischen Auslieferungszustand nach der Produktion.

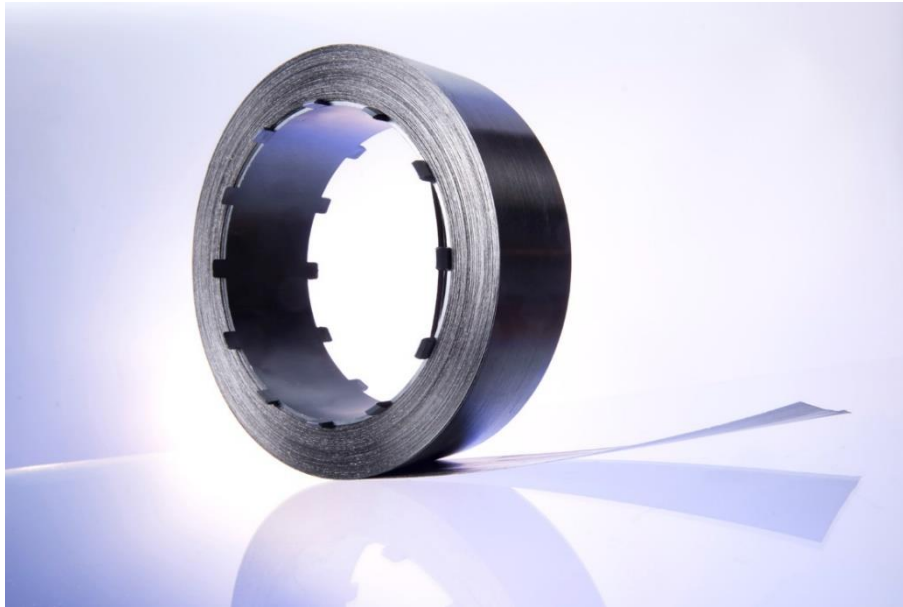


Bild 2.1: Auf einer Rolle aufgerolltes CFK-Tape [9]

CFK-Tapes können sowohl mit duromerer als auch mit thermoplastischer Matrix produziert werden [6, 10], wobei die in dieser Arbeit untersuchten Tapes ausschließlich eine thermoplastische Matrix besitzen. Diese Tapes bestehen aus den in Bild 2.2 dargestellten Hauptkomponenten Kohlenstofffasern und Kunststoffgranulat, die im Folgenden genauer betrachtet werden sollen.



Bild 2.2: Thermoplastisches Granulat (links) und Kohlenstofffasern (Mitte), die Komponenten aus denen CFK-Tapes (rechts) hergestellt werden [9]

### 2.2.1 Fasern

In einem FKV sind Fasern jene Komponenten, die die Hauptlasten tragen, dementsprechend benötigen sie eine hohe (Zug-) Festigkeit und (Zug-) Steifigkeit. Unter Berücksichtigung, dass diese Werkstoffe vor allem im Leichtbau eingesetzt werden, sollte ihre Dichte zusätzlich möglichst gering sein. Viele Tapes werden daher, wie bereits erwähnt, mit Kohlenstofffasern hergestellt [10].

Kohlenstofffasern sind technische Fasern, die bei Temperaturen von 1000 °C bis 2500 °C produziert werden und einen Kohlenstoffgehalt zwischen 92 % und 99,9 % besitzen [11]. Das mittlerweile am häufigsten eingesetzte Herstellungsverfahren ist die Herstellung durch Carbonisierung und Graphitierung von organischen Fasern. Hier werden eine hohe Kohlenstoffausbeute von 55 Gew.-% und hohe mechanische Eigenschaften erreicht [12, 6]. Als organische Fasern werden die Textilfaser Polyacrylnitril (PAN) und Petroleum- oder Steinkohle-Pech verwendet. Kohlenstofffasern können gegenüber anderen Faserwerkstoffen vergleichsweise hohe Zugbelastungen aufnehmen, haben eine hohe Steifigkeit und sind temperaturbeständiger als viele Alternativen. Lediglich ihre Dehnbarkeit auf Zugbelastung ist in diesem Vergleich sehr gering, dementsprechend niedrig fällt das Energieaufnahmevermögen aus [11].

### 2.2.2 Matrix

Die Matrix ist im Verbundwerkstoff für die Formgebung und Übertragung von Kräften zwischen den Fasern verantwortlich. Gleichzeitig trennt die Matrix die Fasern, wirkt somit als Abstandhalter und dient zum Schutz vor Umwelteinflüssen sowie mechanischer Belastung [10].

Die in den bereits vorgestellten Tapes verwendete, thermoplastische Matrix hat diverse Vorteile, die zusammen mit den Nachteilen in Tabelle 2.1 zusammengefasst sind. Hierbei stechen insbesondere die geringen Werkstoffkosten, kurze Zykluszeiten und die Möglichkeit zum vollständigen Recycling hervor. Ein weiterer Vorteil gegenüber duromeren Matrizen ist die Fähigkeit der Halbzeuge, zeitlich nahezu unbegrenzt lagerfähig zu sein, zudem besitzen sie eine hohe Schlagzähigkeit, gute Umformbarkeit und eine gute Schweißbarkeit. Nachteile von Thermoplasten gegenüber Duromeren sind die hohe Kriechneigung, hohe Verarbeitungstemperaturen und eine hohe Viskosität. [8]

Durch das große Angebot thermoplastischer Kunststoffe, kann die Matrix in einem FKV entsprechend den Anforderungen an Preis und Leistung ausgewählt werden.



Tabelle 2.1: Vor- und Nachteile einer thermoplastischen gegenüber einer duromeren Matrix nach [8]

Vorteile	Nachteile
geringe Werkstoffkosten	hohe Verarbeitungstemperaturen
kurze Zykluszeit	hohe Viskosität
unbegrenzt lagerfähig	geringe Faser/Matrix-Haftung
hohe Arbeitshygiene	hohe Kriechneigung
große Matrixauswahl	
hohe Schlagzähigkeit	
hohe Bruchdehnung	
umformbar	
schweißbar	
einfach zu reparieren	
vollständiges Werkstoffrecycling möglich	

Die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Tapes basieren auf einer Matrix aus Polyamid (PA), genauer PA6 und PA12, die zu den technischen Thermoplasten zählen [5].

Polyamide sind zähe Werkstoffe mit hoher Festigkeit, hoher Steifigkeit, sehr guter Schlagzähigkeit sowie guter Abrieb- und guter Verschleißfestigkeit. Die Glastemperatur von PA liegt im Bereich von 50 °C, daher wird der Kunststoff oft mit Fasern verstärkt, um neben einer Erhöhung der Festigkeit und des Elastizitätsmoduls (E-Modul) vor allem die Dauergebrauchstemperatur zu steigern. [13]

### 2.2.3 Faservolumengehalt

Der Faservolumengehalt (FVG) ist der Volumenanteil der Faser im Verhältnis zum Gesamtvolumen des FKV. Der Fasermassengehalt  $v_{Fm}$ , der für die Berechnung notwendig ist, ergibt sich aus dem Verhältnis der Fasermasse  $m_F$  zur Gesamtmasse  $m_{FKV}$  mit (2.1).

$$v_{Fm} = \frac{m_F}{m_{FKV}} \quad (2.1)$$

Mit dem Fasermassengehalt  $v_{Fm}$  und den Dichten der Matrix  $\rho_M$  und der Faser  $\rho_F$  ergibt sich mit (2.2) der FVG  $v_{FV}$ .

$$v_{Fv} = \frac{\frac{v_{Fm}}{\rho_F}}{\frac{v_{Fm}}{\rho_F} + \frac{1 - v_{Fm}}{\rho_M}} \quad (2.2)$$

Die Fasermasse  $m_F$  kann in diesem Fall durch Veraschung der Matrix bei hohen Temperaturen oder (Auf-) Lösen der Matrix mit einem geeigneten Lösungsmittel bestimmt werden [14].

Der FVG wird während der Produktion indirekt durch die Einstellung des Matrixvolumengehaltes gesteuert [10] und hat, genauso wie die Orientierung der Fasern, einen entscheidenden Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Verbunds. Er kann somit zur Kontrolle der Qualität von Tapes eingesetzt werden [10].

#### 2.2.4 Imprägnierung

Ein weiterer wichtiger Faktor für die Qualität eines Tapes ist die Imprägnierung. Der Imprägnierungsgrad gibt die Durchtränkung des Fasermaterials mit Kunststoffmatrix an [10]. Für die Eigenschaften des Werkstoffs ist es wichtig, dass die Fasern möglichst vollständig benetzt und damit imprägniert sind. So soll eine korrekte Verteilung von Matrix und Faser bei der Weiterverarbeitung zum Endprodukt gewährleistet werden. Der Imprägnierungsgrad des Endprodukts hängt von einer Vielzahl von Parametern ab. Dazu gehören unter anderem die verwendeten Materialien, das Verfahren und die dabei angewendeten Parameter bei der Herstellung des Halbzeugs [10].

Eine vollständige und homogene Imprägnierung ist insbesondere bei einer thermoplastischen Matrix von Bedeutung, da die hohe Viskosität der Kunststoffschmelze verhindert, dass die Matrix während der Weiterverarbeitung noch fließen kann. Ist die Imprägnierung mangelhaft, ist die Verbundfestigkeit geringer als erwartet [8].

#### 2.2.5 Herstellung von CFK-Tapes

CFK-Tapes werden mit dem sogenannten Pultrusionsverfahren hergestellt, das aus dem Schmelzeimprägnierungsverfahren hervorgeht [8]. Ein Schema einer solchen Anlage ist in Bild 2.3 zu sehen. Bei der Schmelzeimprägnierung werden die Fasern in Faserrichtung durch ein Schmelzebad gezogen und dabei mit der Matrix beschichtet. Bei der weiterentwickelten Form, der Pultrusion, werden die Fasern zunächst sehr breit aufgefächert und über die Breite eines flachen Werkzeugquerschnitts verteilt. Über einen Linienanguss wird mit einem Extruder Kunststoffschmelze in das Werkzeug eingebracht. Anschließend wird die Schmelze

von der durch das Werkzeug gezogenen Faser in Richtung des Abzugs mitgenommen. Ziel ist es, die Faser mit der Matrix vollständig zu tränken und zu imprägnieren. Durch Umlenkungen in verschiedene Richtungen innerhalb des Werkzeugs werden Druck und Schergeschwindigkeit an den Umlenkpunkten erhöht, beide Faktoren begünstigen den Vorgang der Imprägnierung. Die imprägnierten Fasern werden in Richtung der Austrittsdüse zu- und übereinander gedrängt und verdichtet. Nach Austritt aus der Düse kühlt das Tape ab, wird von einem Abzug abgeführt und auf Rollen (siehe Bild 2.1) aufgewickelt. [8, 15]

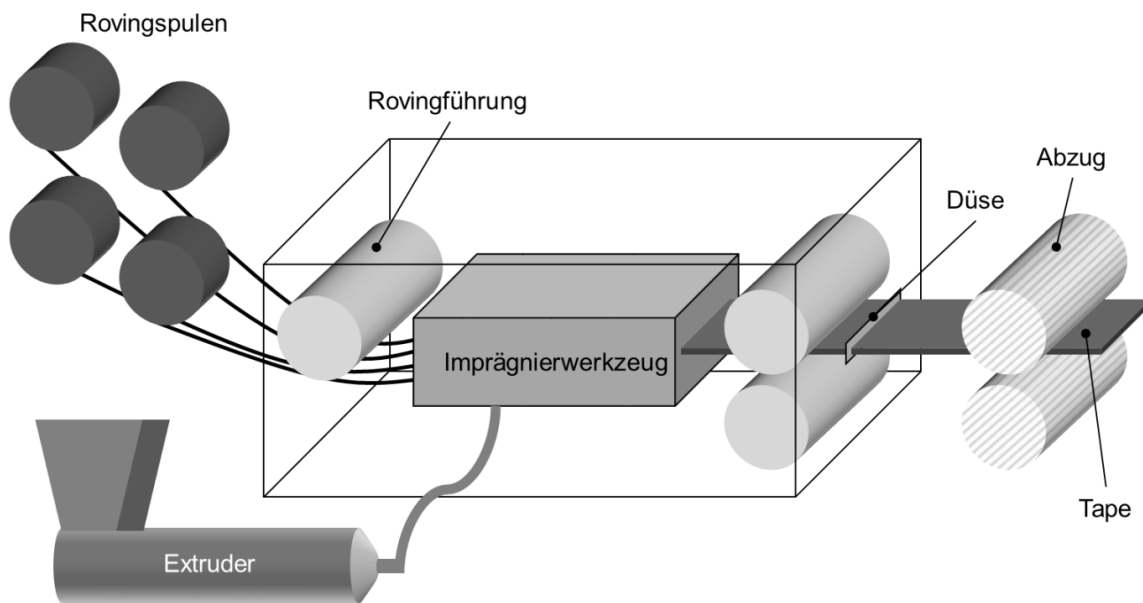


Bild 2.3: Schema einer Pultrusionsanlage zur Tapeherstellung nach [8]

## 2.2.6 Weiterverarbeitung von CFK-Tapes

Thermoplastische CFK-Tapes können in verschiedenen Verfahren weiterverarbeitet werden. Grundsätzlich werden die Tapes entsprechend dem späteren Zweck und der Auslegung des Endprodukts in oder auf einer Form übereinandergelegt, erhitzt und dabei miteinander verbunden.

### Ablegeverfahren

Das Ablegen kann entweder von Hand oder vollautomatisch durchgeführt werden [10]. Ersteres lohnt sich in Bezug auf den Aufwand nur bei kleinen Stückzahlen/Bauteilen mit anspruchsvollen Geometrien, für die sich ein automatisches Verfahren wirtschaftlich nicht rechnet. Weitaus häufiger - insbesondere bei der Herstellung von sehr großen FKV - werden unidirektionale Tapes mit einem automatisierten Ablegeverfahren weiterverarbeitet [10].

In Bild 2.4 ist das Tapelegeverfahren schematisch dargestellt, die von zum Beispiel einem Roboterarm automatisch abgelegten Tapebahnen werden an der Legekante erwärmt und auf die bereits vorhandenen Bahnen aufgedrückt. Die Richtung der Bahnen kann entsprechend der späteren Anforderungen variiert werden, sodass der fertige Faserkunststoffverbund die geforderten Lasten in den jeweiligen Richtungen aufnehmen kann. Am Ende der jeweiligen Bahn wird das Tape automatisch vom Legekopf abgeschnitten.

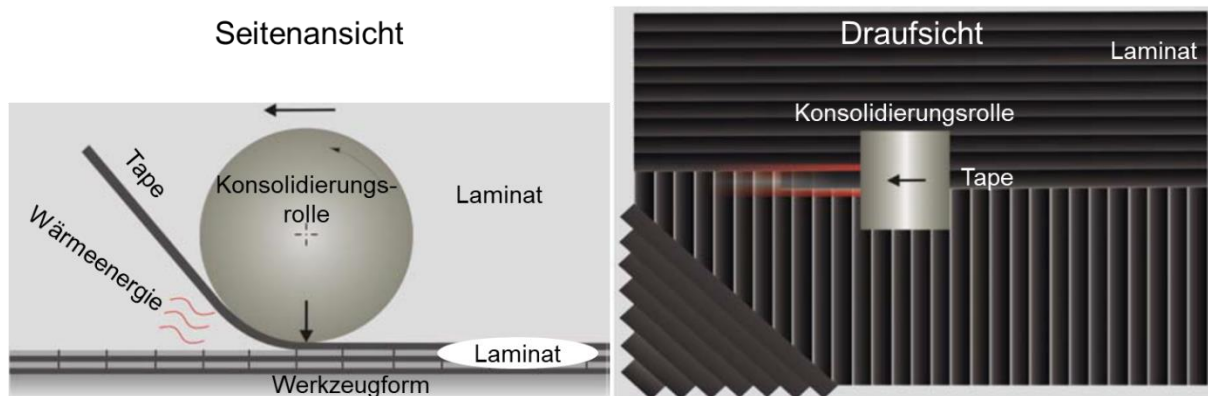


Bild 2.4: Schema des automatisierten Tapelegeverfahrens in Seitenansicht und Draufsicht, nach [16]

In Bild 2.5 ist ein Anwendungsbeispiel aus der Luftfahrtbranche zu sehen. Es zeigt die möglichen Dimensionen der Endprodukte, die mittels des Tapelegeverfahrens hergestellt werden können. Hierbei werden in jedem Schritt mehrere Tapes nebeneinander abgelegt um die Gesamtfläche schneller auslegen zu können.

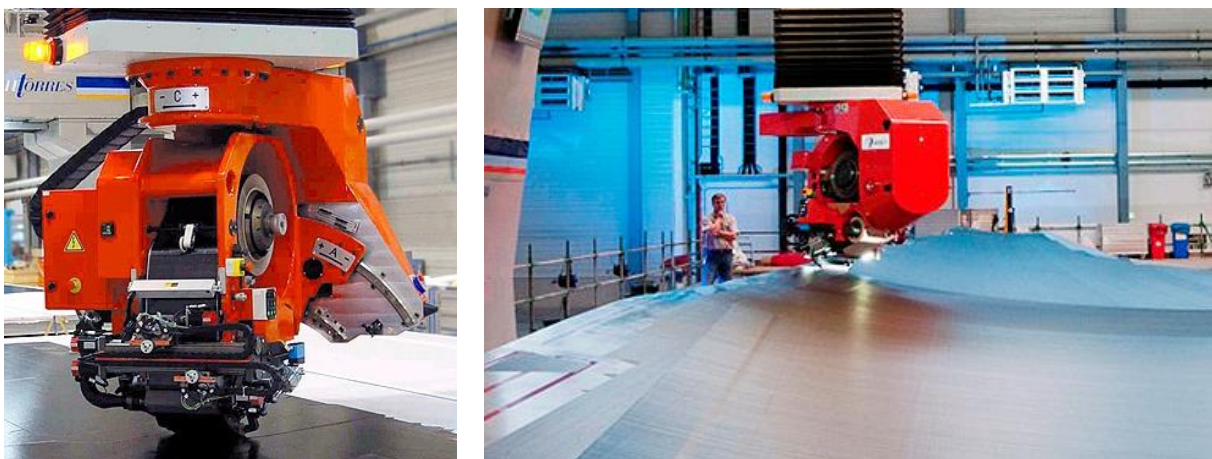


Bild 2.5: Beispiele des automatisierten Tapelegens in der Luftfahrt, automatischer Tapelegeautomat (links) und Darstellung der Dimensionen der Produkte (rechts) [17]

## Hot Forming

Beim Hot Forming wird aus einem zweidimensionalen Tape-Vorgelege, das per Tapelegeverfahren hergestellt wurde, das Endprodukt durch Umformung gefertigt. Zunächst wird das Tape auf dem Formwerkzeug platziert und von einer luftdichten verformbaren Schicht (Diaphragma) abgedeckt. Das Gelege wird anschließend zum Beispiel durch Infrarotstrahlung erhitzt. Durch Anlegen eines Vakuums wird das erhitzte Gelege auf und über das Formwerkzeug gesaugt, siehe Bild 2.6 [10].

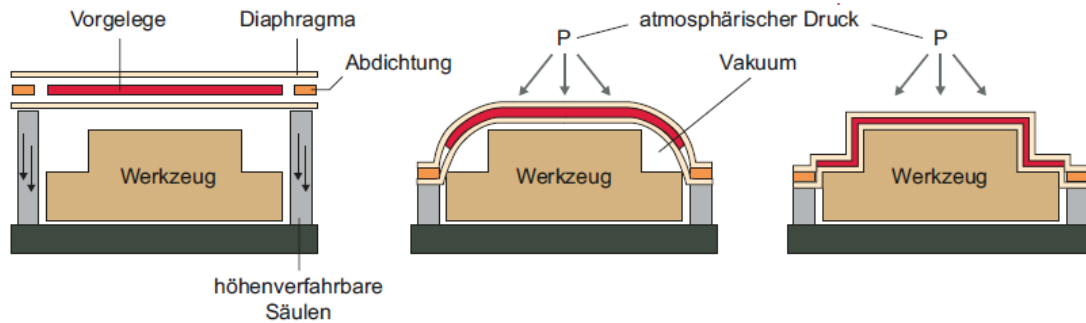


Bild 2.6: Schematische Darstellung des Hot Forming Verfahrens [10]

## 2.3 Qualitätskontrolle

Wie bereits erwähnt, ist die Qualität der CFK-Tape Halbzeuge entscheidend für die Qualität und die gewünschten Eigenschaften des Endprodukts. Daher muss das Tape während oder nach der Produktion auf seine Qualität hin geprüft werden. Für thermoplastische Tapes gibt es, wie für die meisten FKV, verschiedene Qualitätskriterien, die in Tabelle 2.2 aufgeführt sind.

Tabelle 2.2: Qualitätskriterien für thermoplastische Tapes nach [11]

Qualitätskriterium	Erhaltene Information
1. Genauigkeit der Tape-Breite und Dicke	Genauigkeit der Dimensionen im Herstellungsprozess, Prozesseinstellbarkeit
2. Konstanz der Tape-Breite und Dicke	Konstanz der Dimensionen im Herstellungsprozess, Prozesseinstellbarkeit
3. seitliche Tapekante	seitliche Konsolidierung des Tapes
4. Tapeoberfläche	Grad und Geschwindigkeit der Konsolidierung
5. Einhaltung Faservolumengehalt	Beherrschung des Herstellungsprozesses

6. Varianz Faservolumengehalt	Auslegbarkeit, Faserschädigung
7. Vollständigkeit Imprägnierung	mechanische Eigenschaften des Verbunds, Beherrschung des Herstellprozesses
8. Homogenität Faserverteilung	Gleichmäßigkeit der Eigenschaften
9. Faserausrichtung	Beherrschung des Herstellungsprozesses, mechanische Eigenschaften
10. mechanische Charakterisierung (Zugfestigkeit, -steifigkeit, -dehnung)	
11. Scherfestigkeit	

Die Qualitätskriterien 1 bis 4 können einfach zerstörungsfrei und kontinuierlich geprüft werden. Dies kann zum Beispiel mittels optischer oder Laser-Sensoren erfolgen. Alle weiteren Kriterien können bisher nur stichprobenhaft und zerstörend ausgeführt werden [11].

### 2.3.1 Zerstörende Prüfung

Um einen Einblick in das FKV-Teil zu erhalten, muss auf eine stichprobenartige, zerstörende Prüfung zurückgegriffen werden. Bei CFK-Tapes wird dazu ein Stück aus dem ganzen Tape herausgetrennt und analysiert. Die mechanischen Eigenschaften werden mit den im folgenden Abschnitt vorgestellten Verfahren ermittelt, soweit dies in Bezug auf die Dimensionen des Tapes möglich ist.

#### Verbrennen der Matrix

Zur Bestimmung des FVG kann die Veraschungsmethode [18] eingesetzt werden. Dazu wird die Werkstoffprobe in einem Ofen mit einer Temperatur oberhalb der Zersetzungstemperatur der Matrix erhitzt. Die Temperatur wird über einen Zeitraum von mehreren Stunden angelegt, sodass die Matrix restlos verascht. Die übriggebliebenen Fasern, die erst bei höheren Temperaturen angegriffen werden, werden anschließend entnommen und gewogen. Mit dem so ermittelten Fasermassenanteil kann nach (2.2) auf den FVG geschlossen werden. [6]

#### Lösen der Matrix

Eine weitere zerstörende Methode zur Bestimmung des FVG ist die chemische Extraktion der Matrix. Bei Kohlenstofffaserkunststoffen kann hierzu Schwefelsäure und eine Wasserstoffperoxid-Lösung eingesetzt werden [18, 19]. Wie bei der Verbrennung der Matrix kann auch hier aus dem erhaltenen Fasermassenanteil der FVG berechnet werden.

## **Schliffbild**

Die Analyse eines Schliffbildes kann sowohl für die Bestimmung des FVG als auch für die Bestimmung des Imprägniergrades eingesetzt werden. Dabei wird eine Probe quer zu der Faserrichtung in Harz gegossen und abgeschliffen. Das erhaltene Schliffbild wird anschließend unter dem Mikroskop analysiert. Der Faservolumengehalt kann über die erhaltene Fläche der Faser im Verhältnis zur Fläche mit Matrix ermittelt werden. Der Imprägniergrad wird durch den vorhandenen Luftanteil im Halbzeug ermittelt. [10]

## **Water-Pickup-Test**

Der Water-Pickup-Test dient zur Bestimmung des Imprägniergrades. Dabei wird eine definierte Probe des Halbzeugs in Wasser eingetaucht, wodurch dieses durch Kapillaritätseffekte in die Poren gezogen wird. Durch den Vergleich der Masse des FKV vor und nach dem Eintränken kann der Imprägniergrad abgeschätzt werden. [10] Nachteil dieses Verfahrens ist allerdings, dass geschlossene Poren nicht berücksichtigt werden, was in einer vermeintlich besseren Imprägnierung resultiert.

### **2.3.2 Zerstörungsfreie Prüfung**

Die zerstörende Prüfung kann nur einen Hinweis darauf geben, wie die Eigenschaften von Halbzeugen unter denselben Produktionsbedingungen an einer bestimmten Stelle sind und erlaubt somit keine komplette flächige Abdeckung. Insbesondere lokal begrenzte Fehler können sehr einfach übersehen werden oder den Eindruck erwecken, ein dauerhaftes Problem darzustellen.

Für eine lückenlose Qualitätsbestimmung ist daher eine zerstörungsfreie Prüfung unumgänglich, bei der der Prüfkörper während der Prüfung keinerlei Schädigung erfährt. Im Folgenden werden die am weitesten verbreiteten Verfahren und Effekte kurz vorgestellt, das Hauptaugenmerk liegt jedoch auf der Ultraschalltechnik.

## **Elektromagnetische Wellen**

Eine elektromagnetische Welle ist eine sich räumliche und zeitlich ausbreitende Änderung der elektrischen und magnetischen Feldstärke. Ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit hängt vom Werkstoff und dessen Zustand ab [20]. Eine Übersicht über die in der zerstörungsfreien Prüfung eingesetzten elektromagnetischen Felder und Wellen sind in Bild 2.7 schematisch dargestellt [21]. Das wohl bekannteste Verfahren ist hierbei die Röntgenstrahlung, wie sie auch in der Medizin zur Röntgenprüfung oder der Computertomografie eingesetzt wird. Das einfachste Prüfverfahren mittels elektromagnetischer Wellen ist allerdings die visuelle Prüfung mit dem menschlichen Auge.

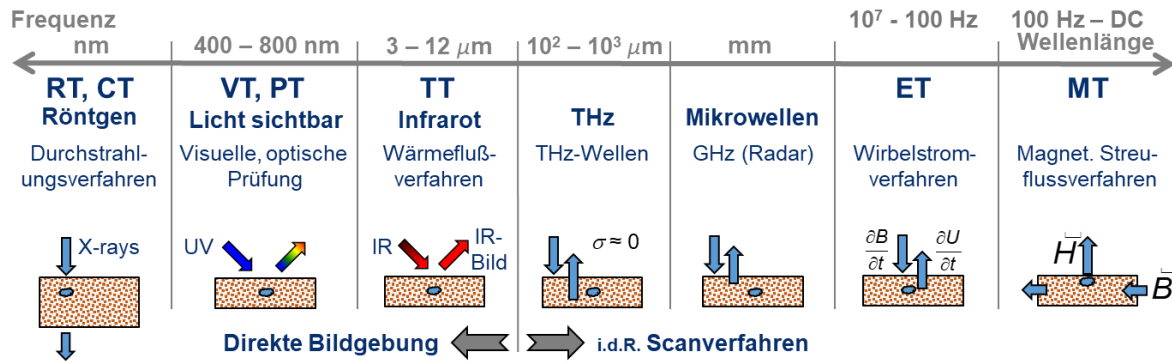


Bild 2.7: Übersicht über die Bandbreite elektromagnetischer Felder und Wellen, nach [21]

Weitere bekannte Prüfverfahren mit elektromagnetischen Wellen sind die Wirbelstromprüfung und das magnetische Streuflussverfahren, sie werden hauptsächlich zur Prüfung von metallisch leitfähigen Werkstoffen eingesetzt [22]. Die Prüfung im Wellenlängenbereich der Wärmeflussverfahren stellt ein Verfahren dar, bei dem häufig thermische Wellen verwendet werden. Hierbei ist die Temperatur die physikalische Größe, die sich wellenartig ausbreitet. Die Welle wird erzeugt, indem Energie zur Erwärmung einer Probe periodisch zugeführt wird. Die thermische Welle breitet sich in fehlerfreien Bereichen anders aus als in Bereichen mit einem Fehler. Diese Unterschiede können anschließend mithilfe einer Thermografiekamera detektiert werden [23].

### Elastische Wellen

Elastische Wellen basieren auf Dehnungsvorgängen im Werkstoff. Sie breiten sich sowohl räumlich als auch zeitlich aus. Beispiele für die Anregung und Analyse mit diesem Prinzip sind die Vibrometrie und das Ultraschallverfahren [24]. Mithilfe der Vibrometrie können zum Beispiel Bauteile auf charakteristische Schwingungsformen und Frequenzen hin untersucht werden. So kann ein Auftreten einer neuen Schwingungsform auf einen lokalen Defekt oder Inhomogenitäten hinweisen. Die Laser-Doppler-Vibrometrie verwendet einen Laser um frequenzabhängige Schwingungsformen zu detektieren [25].

Im folgenden Kapitel werden die elastischen Wellen und ihre theoretischen Grundlagen genauer betrachtet. Ab hier wird, falls der Begriff Wellen genannt und nicht anderweitig darauf hingewiesen wird, stets von elastischen Wellen gesprochen.



## 2.4 Ultraschallprüfung

### 2.4.1 Grundlagen elastischer Wellen

Um zu veranschaulichen wie eine elastische Welle in einem Festkörper entsteht, kann ein Festkörper vereinfacht als Feder-Masse-Modell dargestellt werden (Bild 2.8).

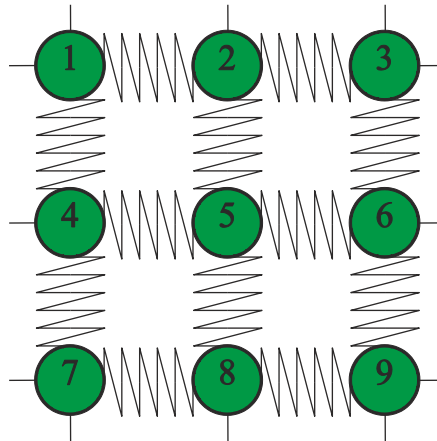


Bild 2.8: Schematische Darstellung eines Feder-Masse-Modells mit Masseteilchen (rund) und Federn mit Federkonstante  $D$ , nach [24]

Lenkt man ein Masseteilchen, zum Beispiel das Teilchen „1“, aus seiner Ruhelage aus, so wirken darauf Rückstellkräfte, die durch die Federn erzeugt werden. Werden die anderen Masseteilchen um „1“ herum starr gehalten, so führt das Teilchen bei seiner Rückkehr zur Ruhelage eine harmonische Schwingung aus. Eine Welle entsteht, wenn man die Teilchen „1“, „4“ und „7“ simultan zu einer Schwingung anregt. Über die elastischen Federn überträgt sich die Schwingung auf die Teilchen „2“, „5“ und „8“ und letztendlich auf die Teilchen „3“, „6“ und „9“. Alle Masseteilchen schwingen, unter Ausschluss von Dämpfung, mit derselben Amplitude und derselben Frequenz, jedoch mit unterschiedlicher Phase. So kann sich eine elastische Welle durch einen Körper bewegen.

### 2.4.2 Steifigkeitstensor in der linearen Elastizitätstheorie

Das makroskopische elastische Verhalten des Elastizitätsmoduls eines aus UD-Schichten aufgebauten Laminats wird in diesem Kapitel mit den Ingenieurskonstanten [6] behandelt.

Der Zusammenhang zwischen einer Spannung  $\sigma$  und der dazugehörigen Dehnung  $\epsilon$ , wird für einen linear-elastischen Festkörper durch das lineare Elastizitätsgesetz, (Hooke'sches Gesetz) beschrieben:

$$\sigma = E * \epsilon \quad (2.3)$$

Der Elastizitätsmodul  $E$  (E-Modul) ist eine Materialkonstante, er und die daraus resultierende Steifigkeit in einem Faserverbundwerkstoff sind abhängig von der Faserorientierung. Entsprechende Zusammenhänge der Belastungsrichtung und dem Faservolumengehalt  $\nu_{Fv}$  sind in (2.4) und (2.5) gezeigt. Für eine Belastung parallel zu den Fasern gilt die Mischungsregel nach Tsai-Halpin [26]:

$$E_{\parallel} = E_F \cdot \nu_{Fv} + E_M \cdot (1 - \nu_{Fv}) \quad (2.4)$$

mit dem Elastizitätsmodul der Faser  $E_F$  und der Matrix  $E_M$ . Für eine senkrechte Belastung werden die gerichteten Kehrwerte addiert:

$$\frac{1}{E_{\perp}} = \frac{\nu_{Fv}}{E_f} + \frac{(1 - \nu_{Fv})}{E_M} \quad (2.5)$$

Es gilt, da  $f \leq 1$ :

$$E_{\parallel} \geq E_{\perp} \quad (2.6)$$

In einer UD-Schicht gilt für den winkelabhängigen E-Modul  $E_{\psi_i}$  mit dem Belastungswinkel  $\psi$  folgende Näherung [6]:

$$E_{\psi} = E_{\parallel} \cos^4(\psi) + E_{\perp} \sin^4(\psi) \quad (2.7)$$

Nachdem das makroskopische elastische Verhalten unter der Benutzung von Ingenieurskonstanten behandelt wurde, wird nun der allgemeine mikroskopische Fall behandelt.

Da es sich bei Ultraschalluntersuchungen nur um kleine Auslenkungen im elastischen Bereich handelt, kann vereinfacht die lineare Elastizitätstheorie zur Herleitung und Beschreibung des Steifigkeitstensors verwendet werden. Betrachtet wird ein infinitesimal kleines kubisches Volumenelement mit den Hauptachsen 1, 2 und 3 (Bild 2.9). Der erste Index bezeichnet die jeweilige Normalenrichtung der betreffenden Würfel­fläche und der zweite die Richtung der anliegenden Kraft.

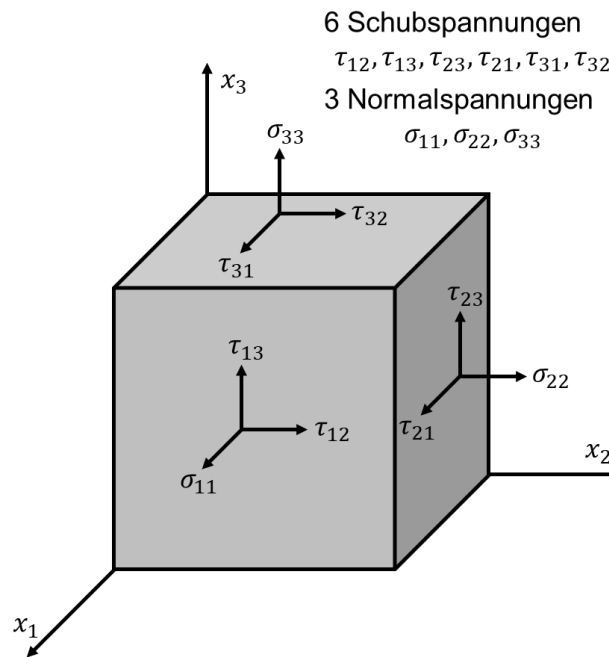


Bild 2.9: Darstellung des Spannungszustandes eines infinitesimal kleinen kubischen Volumenelements, nach [27]

Der komplette Spannungszustand lässt sich durch den Spannungstensor beschreiben:

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

Die drei Spannungskomponenten  $\sigma_{ij}$  mit  $i = j$  werden Normalspannungen genannt, da sie senkrecht zur betreffenden Würfelfläche stehen. Die restlichen sechs Scherspannungskomponenten mit  $i \neq j$  stehen senkrecht zur Normalen der jeweiligen Würfelfläche, das heißt sie liegen in den jeweiligen Flächen. Der symmetrische Tensor kann auch vereinfacht dargestellt werden:

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_1 & \sigma_6 & \sigma_5 \\ & \sigma_2 & \sigma_4 \\ & & \sigma_3 \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Eine anliegende Spannung an einem Volumenelement bewirkt eine Verschiebung  $\vec{u}$ . Die auf die Einheitslänge  $\partial x$  normierte differentielle Längenänderung ergibt die Dehnung:

$$\epsilon = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.10)$$

Mit dem gleichen Koordinatensystem wie in (2.8) ergibt sich der ebenfalls symmetrische Dehnungstensor

$$\epsilon_{kl} = \begin{pmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{pmatrix}, \quad (2.11)$$

mit

$$\epsilon_{kl} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right) \quad (2.12)$$

Dabei sind  $\epsilon_{kl}$  mit  $(k = l)$  die Normaldehnungen und  $\epsilon_{kl}$  mit  $(k \neq l)$  die Scherdehnungen. Wie bei dem Spannungstensor lässt sich der symmetrische Dehnungstensor vereinfacht darstellen als:

$$\epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_1 & \epsilon_6 & \epsilon_5 \\ & \epsilon_2 & \epsilon_4 \\ & & \epsilon_3 \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

Der Spannungstensor (2.8) und der Dehnungstensor (2.11) sind über den sogenannten Steifigkeitstensor

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (2.14)$$

linear miteinander verbunden.  $C_{ijkl}$  ist ein Tensor vierter Stufe mit 81 unabhängigen Komponenten. Aufgrund der Symmetrie von Spannungs- (2.9) und Dehnungstensor (2.13) ist der Steifigkeitstensor ebenfalls symmetrisch und die Zahl der unabhängigen Konstanten reduziert sich auf 36. Nach [28] lässt sich zeigen, dass sich die Zahl der unabhängigen Komponenten für anisotrope Materialien auf 21 reduziert, was in der Voigt'schen Notation [29] ohne Tensoren vierter Stufe darstellbar ist:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ & & & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ & & & & C_{55} & C_{56} \\ & & & & & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

Mit steigender Materialsymmetrie können diese Komponenten weiter reduziert werden. Für isotrope Materialien benötigt man auf diese Weise nur noch zwei Komponenten, um das elastische Verhalten zu beschreiben. Das in dieser Arbeit verwendete UD-Laminat besitzt unter der Annahme von ideal verteilten Fasern einen Sonderfall der sogenannten „orthotropen“ Symmetrie, die „transversale Isotropie“. Zur Beschreibung des elastischen Verhaltens benötigt man hierzu fünf unabhängige Komponenten.

### 2.4.3 Elastische Wellen in unendlich ausgedehnten Festkörpern

Zur Beschreibung von Wellen in unendlich ausgedehnten Festkörpern mit der linearen Wellentheorie, muss das Kräftegleichgewicht in einem kleinen Volumenelement betrachtet werden. In einem homogenen Spannungsfeld wirkt keine Nettokraft auf dieses Volumenelement  $\Delta V$ , während in einem inhomogenen Spannungsfeld die auf gegenüberliegenden Seiten angreifenden Kräfte ungleich sind und somit eine Nettokraft resultiert [30]:

$$F_i = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.16)$$

Mit den Gleichungen (2.12) und (2.14) lässt sich (2.16) erweitern zu:

$$F_i = \frac{\partial}{\partial x_j} C_{ijkl} \epsilon_{kl} = \frac{\partial}{\partial x_j} C_{ijkl} \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right) \quad (2.17)$$

Aus Symmetriegründen [31] lässt sich (2.17) auch schreiben als:

$$F_i = C_{ijkl} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_j \partial x_l} \quad (2.18)$$

Mit der Massendichte  $\rho$  und dem zweiten Newton'schen Gesetz  $F = ma$  ergibt sich aus (2.18) [27]:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = C_{ijkl} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_j \partial x_l} \quad (2.19)$$

Gleichung (2.19) stellt die Wellengleichung eines unendlich ausgedehnten anisotropen Festkörpers dar. Als Lösung dafür wird eine ebene monochromatische Welle angesetzt, die sich in Richtung  $\vec{n}$  ausbreitet [31]:

$$u_i = U_i e^{i(\omega t - k n_j x_j)} \quad (2.20)$$

mit dem Wellenvektor in Ausbreitungsrichtung  $\vec{k} = k \vec{n}$  und der Amplitude  $U_i$  der Welle. Setzt man (2.20) in (2.19) ein und beachtet, dass  $v_p = \omega/k$  die Phasengeschwindigkeit ist, so erhält man die sogenannte Christoffel-Gleichung [31]:

$$(C_{ijkl} n_j n_l - \rho v_p^2 \delta_{ik}) U_k = 0 \quad (2.21)$$

Das sogenannte Kronecker-Delta  $\delta_{ik}$  ist definiert als  $\delta_{ik} = 1$  für  $i = k$ , für alle anderen Fälle gilt  $\delta_{ik} = 0$ . Statt des Steifigkeitstensors kann man auch den reduzierten Steifigkeitstensor  $\lambda_{ijkl} = C_{ijkl}/\rho$  benutzen. Führt man weiterhin den Christoffel-Tensor  $\Lambda_{ik} = \lambda_{ijkl} n_j n_l$  ein, so verkürzt sich (2.21) zu:

$$(\Lambda_{ik} - v_p^2 \delta_{ik}) U_k = 0 \quad (2.22)$$

Alle nichttrivialen Lösungen von Gleichung (2.22) ergeben sich aus:

$$\det(\Lambda_{ik} - v_p^2 \delta_{ik}) = 0 \quad (2.23)$$

Nach [28] ergeben sich drei positiv-reelle Eigenwerte. Zu jedem Eigenwert ( $v^2$ ) gibt es einen dazugehörigen Eigenvektor ( $\vec{U}$ ), der die Polarisationsrichtung der Welle angibt. Des Weiteren kann aus den Eigenschaften von  $\Lambda$  gezeigt werden, dass die Polarisationsrichtungen zueinander orthogonal sind [31]. Es existieren somit pro Ausbreitungsrichtung  $\vec{n}$  drei verschiedene Wellenmoden, die orthogonal zueinander sind und unterschiedliche Geschwindigkeiten besitzen. Steht die Polarisationsrichtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung (Bild 2.10, links), so handelt es sich um eine Transversalwelle. Es existieren pro Ausbreitungsrichtung zwei Transversalwellen (SV und SH, „shear vertical“ und „shear horizontal“). Steht die Polarisationsrichtung parallel zur Ausbreitungsrichtung (Bild 2.10, rechts), so handelt es sich um eine Longitudinalwelle. Diese reinen Moden treten nur in bestimmten Materialsymmetrien und bei Ausbreitung entlang der Hauptrichtungen auf, bei anisotropen Festkörpern erhält man Mischformen (quasi-longitudinale (QL) und quasi-transversale (QT) Wellen). Bei unendlich ausgedehnten Flüssigkeiten und Gasen (Fluiden) existieren nur longitudinale Wellen, da keine richtungsabhängigen Rückstellkräfte vorhanden sind. In diesem Fall bewirkt nur eine Dichteerhöhung die Rückstellung der Atome.

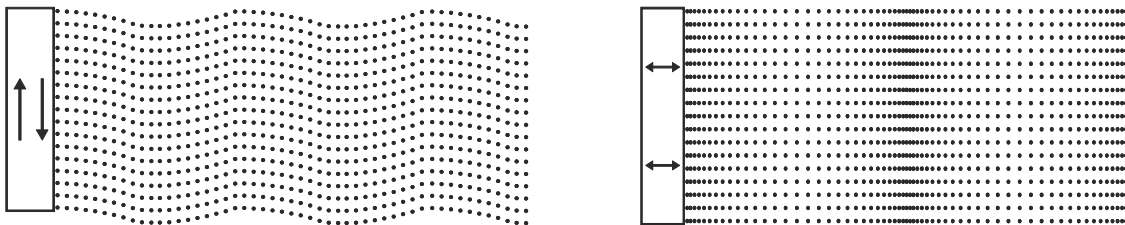


Bild 2.10: Schematische Darstellung von Wellenmoden, Transversalwelle (links) und Longitudinalwelle (rechts), nach [24]

#### 2.4.4 Elastische Wellen an Grenzflächen

Will man Wellen nicht nur in unendlich ausgedehnten Medien betrachten, muss der Effekt der Grenzfläche beachtet werden. Für den Übergang von einem Medium mit der Dichte  $\rho_1$  und der Phasengeschwindigkeit  $v_1$  in ein Medium mit  $\rho_2$  und  $v_2$  gilt nach [27] für den Reflexionsgrad  $R$  und die Transmissivität  $T$ :

$$R = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2} \quad \text{und} \quad T = \frac{2\rho_2 v_2}{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2} \quad (2.24)$$

Aus (2.24) wird ersichtlich, dass das Verhalten von Schall bezüglich der Reflexion und der Transmission vom Produkt der Dichte  $\rho_i$  und der Phasengeschwindigkeit  $v_i$  der beteiligten Medien abhängig ist.  $R$  und  $T$  sind hier über die Amplitude definiert.

Das Produkt aus Dichte und Phasengeschwindigkeit wird akustische Impedanz  $Z$  mit der Einheit  $\text{kg/m}^2\text{s}$  genannt:

$$Z = \rho * v \quad (2.25)$$

Im Folgenden werden nur Grenzflächen von einem Festkörper zu einem Fluid betrachtet, wobei beide Medien isotrop sind. Die Grenzfläche soll sich bei Benutzung des Koordinatensystems nach Bild 2.9 bei  $x_3 = 0$  befinden. Im Bereich  $x_3 > 0$  soll sich Medium 1 und im Bereich  $x_3 < 0$  Medium 2 befinden (Bild 2.11). Trifft eine einfallende Welle (Index „einf“) unter einem Winkel  $\theta$  auf die Grenzfläche, so kommt es nach (2.24) zur Reflexion (Index „ref“) und zur Transmission (Index „trans“). Bei Reflexion wird die einfallende Welle mit demselben Winkel reflektiert. Bei einem Übergang von einer niedrigeren zu einer höheren Impedanz wird der Schall vom Einfallslot weggelenkt. Dies ist analog zum Brechungsgesetz in der Optik. In Anlehnung an den in der Optik benutzten Brechungsindex  $n$  wird folgendes Verhältnis verwendet.

$$n_{ak} = \frac{\sin(\theta_{einf})}{\sin(\theta_{trans})} \quad (2.26)$$

In diesem Fall steht  $n_{ak}$  für den akustischen Brechungsindex. Weiterhin kann es zu Änderungen der Polarisations- und Ausbreitungsrichtung der reflektierten oder transmittierten Welle kommen (Modenkonzersion), Bild 2.11.

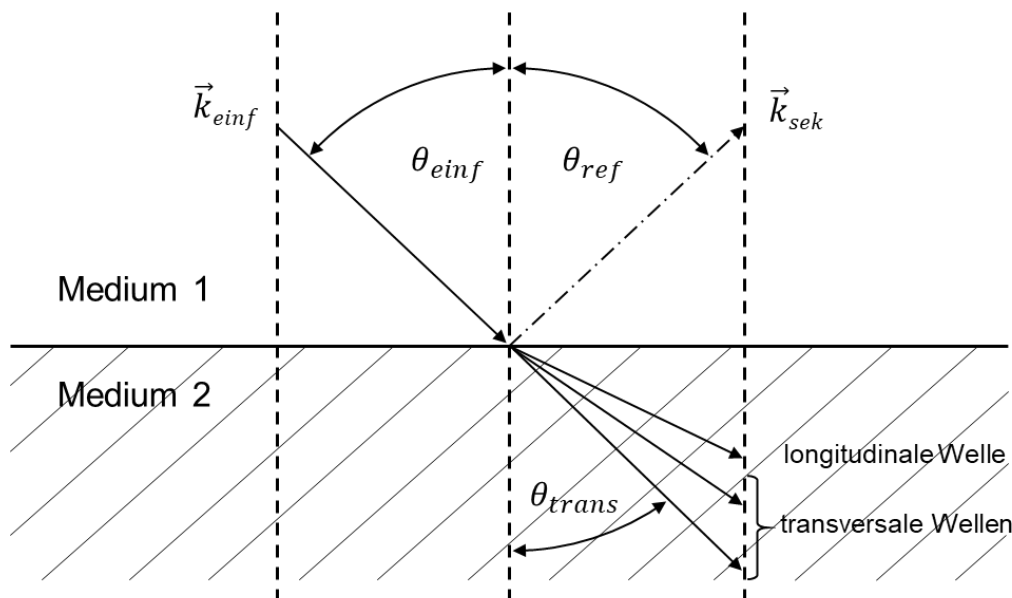


Bild 2.11: Einfallende Longitudinalwelle, ihre reflektierten und transmittierten Wellen inklusive Modenkonzersion, nach [27]

Damit es zu einer Modenkonzersion kommen kann, müssen Verschiebung und Normalspannung in beiden Medien an der Grenzfläche identisch sein:

$$\vec{u}_3^1 = \vec{u}_3^2 \text{ und } \sigma_{33}^1 = \sigma_{33}^2 \quad (2.27)$$

Da eine Grenzfläche zwischen einem Festkörper und einem Fluid betrachtet wird, müssen nur die Normalkomponenten kontinuierlich sein, die Scherkomponenten verschwinden. Die unterschiedlichen Wellen müssen beim Übergang von Medium 1 in Medium 2 dieselbe Periodizität besitzen, dies lässt sich anschaulich zeigen, indem die Projektionen der unterschiedlichen Wellenvektoren auf die Grenzfläche dieselbe Länge haben (Bild 2.11) [32]. Daraus lässt sich das Snellius'sche Brechungsgesetz herleiten:

$$k \cdot \sin\theta = \text{konst} \quad (2.28)$$

Zusammen mit der Phasengeschwindigkeit  $v_p = \omega/k$  ergibt sich bei konstanter Frequenz:

$$\frac{\sin\theta}{v_p} = \text{konst} \quad (2.29)$$

Dies gilt unabhängig von Material und Wellenart. Fasst man die reflektierten und transmittierten Wellen in Bild 2.11 mit dem Index „sek“ zusammen, so ergibt sich zusammen mit (2.29):

$$\sin\theta_{sek} = \frac{v_{sek}}{v_{einf}} \sin\theta_{einf} \quad (2.30)$$

Dies bedeutet, dass der Winkel, unter dem eine bestimmte Mode abgestrahlt wird, von der Phasengeschwindigkeit und dem Einfallswinkel abhängig ist und nur stattfindet wenn (2.30) erfüllt ist. So wird zum Beispiel bei einer mit  $45^\circ$  einfallenden Longitudinalwelle am Übergang Wasser/Gold<sup>1</sup> eine transversale Welle unter einem Winkel von circa  $35^\circ$  abgestrahlt. Betrachtet man bei gleichem Einfallswinkel die Grenzfläche Wasser/Aluminium<sup>2</sup>, so kann keine transversale Welle angeregt werden, da (2.30) nicht erfüllt ist [24].

#### 2.4.5 Elastische Wellen in Platten

Bei der Reflexion einer Longitudinalwelle, die sich wie in Bild 2.12 in einer Platte der Dicke  $D$  ausbreitet, entsteht an der ersten Grenzfläche zusätzlich zur reflektierten Longitudinalwelle eine durch Modenkonzersion entstandene Transversalwelle (SV). Bei jeder weiteren Reflexion beobachtet man ebenfalls diese Modenkonzersion. Sind die einzelnen Wellenmoden nach einer Zeit wieder in Phase, entsteht durch Interferenzeffekte eine sogenannte geführte Welle (Lambwelle) [33].

---

<sup>1</sup>  $v_{l,Wasser} = 1484 \text{ m/s}$ ,  $v_{t,Gold} = 1200 \text{ m/s}$

<sup>2</sup>  $v_{t,Aluminium} = 3100 \text{ m/s}$



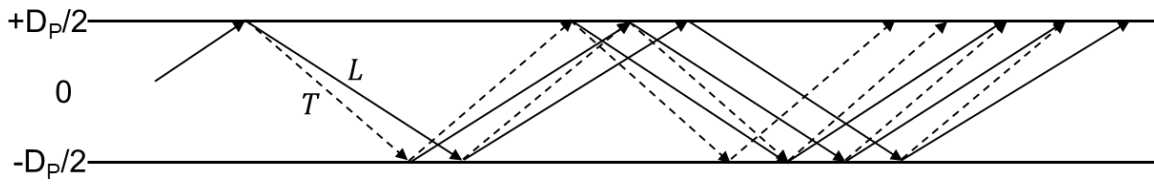


Bild 2.12: Entstehung einer Lambwelle in einer Platte der Dicke  $D_p$ . Die Platte ist so orientiert, dass ihre Oberflächennormale parallel zur  $x_3$ -Achse und die Mittelebene in der  $x_1$ - $x_2$ -Ebene liegt, nach [27]

Die bisher gezeigten Berechnungen sind nur für eine Platte (UD-Lage) gültig. Um auch mehrlagige Lamine berechnen zu können, wie sie zum Beispiel bei der Weiterverarbeitung von CFK-Tapes vorkommen, muss hierfür eine Koordinatentransformation durchgeführt werden, in der die einzelnen Lagen in das Koordinatensystem der gesamten Platte (Index „p“) überführt werden. Die sich in dem neuen Koordinatensystem der Probe ausbreitende Welle kann analog zu (2.19) durch folgende Wellengleichung beschrieben werden [34]:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i^p}{\partial t^2} = C_{ijkl} \frac{\partial^2 u_k^p}{\partial x_j^p \partial x_l^p} \quad (2.31)$$

Als Lösung für diese Differentialgleichung wird eine Welle analog (2.20) angesetzt, die das Snellius'sche Brechungsgesetz erfüllt. Der folgende Rechenweg kann in [34] nachvollzogen werden. Das Ergebnis sind zwei Gleichungen, die Rayleigh-Lamb-Gleichungen [35]:

$$S = (k^2 - \beta^2)^2 \cos\left(\alpha \frac{D_p}{2}\right) \sin\left(\beta \frac{D_p}{2}\right) + 4k^2 \alpha \beta \sin\left(\alpha \frac{D_p}{2}\right) \cos\left(\beta \frac{D_p}{2}\right) = 0 \quad (2.32)$$

$$A = (k^2 - \beta^2)^2 \sin\left(\alpha \frac{D_p}{2}\right) \cos\left(\beta \frac{D_p}{2}\right) + 4k^2 \alpha \beta \cos\left(\alpha \frac{D_p}{2}\right) \sin\left(\beta \frac{D_p}{2}\right) = 0 \quad (2.33)$$

Mit den Variablen  $\alpha$  und  $\beta$ :

$$\alpha^2 = \frac{\omega^2}{v_L^2} - k^2 \quad (2.34)$$

$$\beta^2 = \frac{\omega^2}{v_T^2} - k^2 \quad (2.35)$$

Aus den Gleichungen (2.32) bis (2.35) lässt sich die Form der Bewegung der Plattenwelle berechnen [27]. Aus (2.32) erhält man die in Bild 2.13, links dargestellte Plattenwelle, die sich symmetrisch zur  $x_3 = 0$  Ebene ausbreitet. Symmetrische Moden werden mit  $s_i$ -Moden bezeichnet, wobei der Index „i“ die Ordnung der Mode (beginnend mit der nullten Mode) bezeichnet. Aus (2.33) erhält man eine in Bild 2.13, rechts dargestellte Plattenwelle die zur  $x_3 = 0$  Ebene antisymmetrisch ist. Sie werden

mit  $a_i$  bezeichnet. Symmetrische und antisymmetrische Plattenwelle werden aufgrund ihres Aussehens auch als Dehnwelle beziehungsweise Biegewelle bezeichnet.

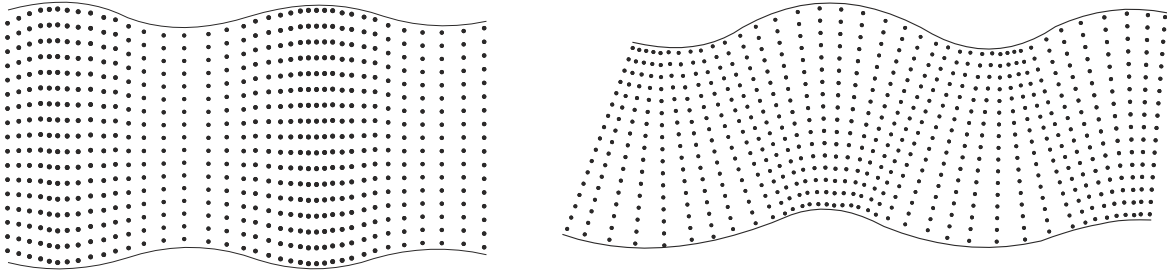


Bild 2.13: Schematische Darstellung von Plattenwellen, symmetrische  $s_0$  (links) und antisymmetrische  $a_0$  Plattenwelle (rechts), nach [31]

Die Phasengeschwindigkeit der behandelten Wellen innerhalb einer Platte ist, im Gegensatz zu den Wellen im unendlich ausgedehnten Festkörper (Kapitel 2.4.3), von der Frequenz abhängig (Dispersion). Eine Dispersionsrelation erhält man nur durch eine numerische Lösung der Rayleigh-Lamb-Gleichungen. Sie ist für einen isotropen Werkstoff für die  $s_0$ - und  $a_0$ -Moden für verschiedene Werte der Querkontraktionszahl  $\nu$  in Bild 2.14 gezeigt.

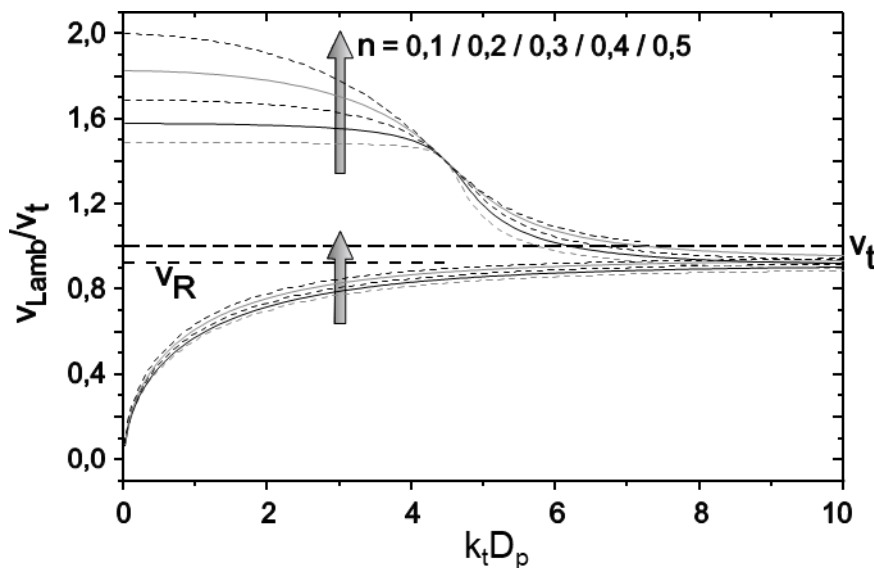


Bild 2.14: Dispersionsrelation der  $s_0$ - (oben) und der  $a_0$ -Mode (unten) in Abhängigkeit von der Querkontraktion eines isotropen Materials. Für  $v_R$  wurde  $\nu = 0,3$  verwendet [27]

Hierbei ist die normierte Geschwindigkeit  $v_{Lamb}/v_t$  gegen die Wellenzahl und die Plattendicke aufgetragen. Die Normierung folgt aus der in  $k_t = \omega/v_t$  enthaltenen Geschwindigkeit. Weiterhin ist die Geschwindigkeit einer Oberflächenwelle (Rayleighwelle [34])  $v_R$  für  $\nu = 0,3$  eingezeichnet. Man erkennt, dass sich die Geschwindigkeit der symmetrischen und der antisymmetrischen Plattenwelle bei hohen Frequenzen und/oder hohen Plattendicken der Geschwindigkeit der

Rayleighwelle annähert. Bei kleinen Werten von  $k_t D_P$  nähert sich  $v_{Lamb}/v_t$  der  $s_0$ -Mode asymptotisch einem endlichen Grenzwert an, während die Geschwindigkeit der  $a_0$ -Mode auf null abfällt. Eine Plattenmode existiert, wenn die Plattendicke kleiner als das Dreifache der Wellenlänge ist [33]. Für einen solchen Fall kann man die Deformation einer  $a_0$ -Mode als reine Biegung der Platte ansehen. Daraus lässt sich eine Näherungsformel für die Dispersion der  $a_0$ -Mode herleiten [34]:

$$v_{a_0} \sim \sqrt[4]{\frac{E}{3\rho(1-\nu^2)}} \sqrt{\frac{\omega D_P}{2}} \quad (2.36)$$

Die Plattengeschwindigkeiten sind demnach proportional zu den Materialeigenschaften Elastizitätsmodul  $E$ , Dichte  $\rho$ , Querkontraktionszahl  $\nu$ , der Kreisfrequenz  $\omega$  und der Plattendicke  $D_P$ .

#### 2.4.6 Anpassung der Impedanz für Luftultraschallmessungen

Das am häufigsten verwendete Material für klassische Ultraschallprüfköpfe ist Bleizirkonattitanat (PZT) mit einer akustischen Impedanz von  $Z_{PZT} = 33,7 * 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$  [36]. Betrachtet man nun den Ultraschall an der Grenzfläche Prüfkopfoberfläche/Luft mit  $Z_{Luft} = 413 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , so wird dieser an der Grenzfläche nach Gleichung (2.24) mit einem Faktor von über 0,99 reflektiert. Dies gilt auch am Übergang von Luft zum Prüfkopf. Um diesen Verlust zu minimieren, werden Prüfköpfe mit Verbundmaterialien verwendet [36], bei denen PZT Stäbchen (aktive Phase) in eine Matrix aus Polymer (passive Phase) eingelassen sind. Dadurch lassen sich die Impedanz des Prüfkopfes und der Impedanzsprung zwischen Prüfkopf und Luft deutlich reduzieren. Ein Röntgenbild eines solchen Prüfkopfes ist in Bild 2.15 gezeigt.

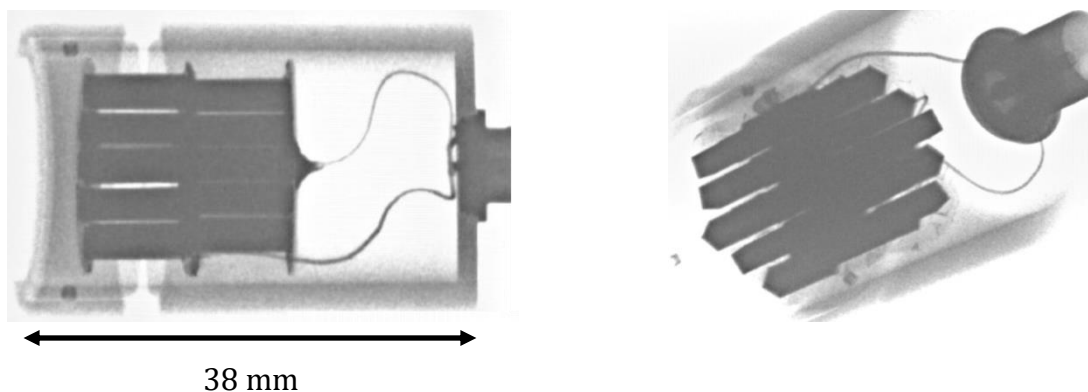


Bild 2.15: Röntgenbilder eines Ultrason® NCG50-D25-P76 Prüfkopfes, Seitenansicht (links) und Ansicht von schräg hinten (rechts). Die aktive Phase wird dunkel, die Passive hell dargestellt

Andererseits kann eine Anpassschicht mit einer optimalen Dicke von  $d_a = \lambda/4$  zwischen aktivem Element und der Luft angebracht werden, wie in Bild 2.16

ersichtlich wird. Die Verwendung einer solchen Schicht bewirkt, dass die Ultraschallwellen an der Grenzfläche reflektiert werden und sich wieder mit der ursprünglichen Welle durch die dadurch resultierende Phasenverschiebung einer halben Wellenlänge destruktiv überlagern. Ein durch unterschiedliche Reflexionsanteile auftretender Amplitudenunterschied wird durch die Anpassung der akustischen Impedanz der Anpassschicht von  $Z_A = \sqrt{Z_W \cdot Z_L}$  ausgeglichen. Hierbei beschreibt  $Z_W$  die akustische Impedanz des Wandlers und  $Z_L$  die der Luft. Durch dieses Verfahren verlassen den Wandler nur Wellen gleicher Phasenlage [37].

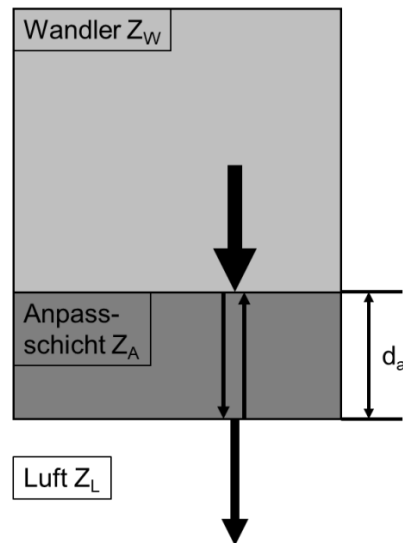


Bild 2.16: Anpassungsschicht für Ultraschallwandler nach [37]

#### 2.4.7 Plattenwellenerzeugung durch Schrägeinschallung

Trifft Luftultraschall mit der Wellenlänge  $\lambda_{US}$  auf eine Grenzfläche, so ergibt sich eine Druckverteilung mit einer Periodizität abhängig vom Einfallswinkel des Luftultraschalls (Bild 2.17).

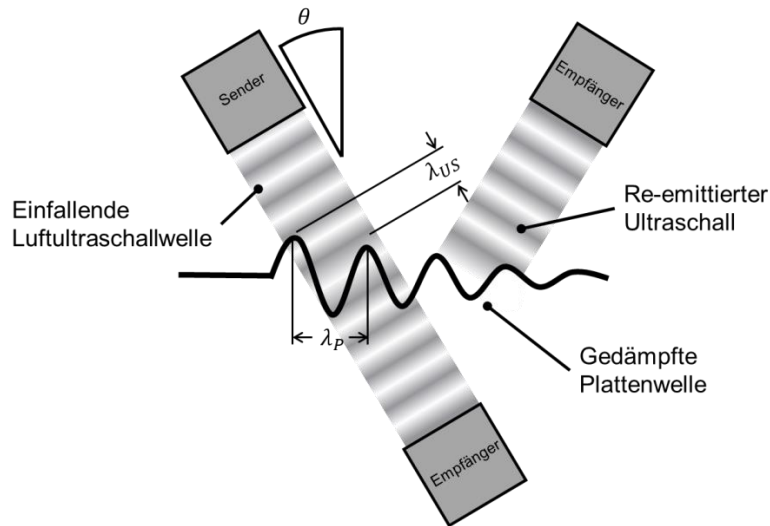


Bild 2.17: Entstehung einer Plattenwelle durch Schrägeinschallung sowie das Abstrahlen von Luftultraschall

Existiert eine geführte Mode mit derselben Periodizität, so wird diese in Richtung der Projektion des Ultraschalls kohärent angeregt. Aus den Geschwindigkeiten des Ultraschalls in Luft  $v_{US}$  und der geführten Plattenwelle  $v_P$  ergibt sich der Einfallswinkel  $\theta_0$  für die Generierung einer Plattenwelle:

$$\sin\theta_0 = \frac{\lambda_{US} \cdot f}{\lambda_P \cdot f} = \frac{v_{US}}{v_P} \quad (2.37)$$

Eine Abhängigkeit der Amplitude des empfangenen Signals vom Einfallswinkel ist in Bild 2.18 dargestellt. Man erkennt die höhere Kopplungseffizienz gegenüber senkrechter Einschallung bei  $0^\circ$ . Eine geringe Abweichung vom optimalen Kopplungswinkel  $\theta_0$  führt zu einem erheblichen Signalabfall.

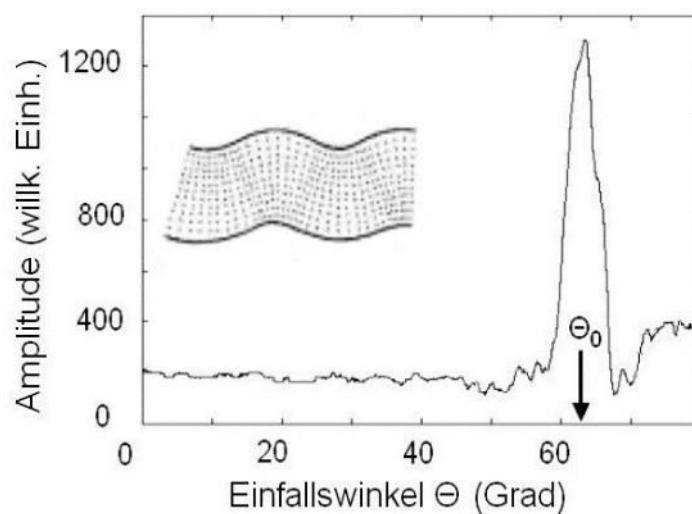


Bild 2.18: Abhängigkeit des empfangenen Signals vom Einfallswinkel [38]

Die Empfindlichkeit gegenüber dem Einfallswinkel bei der Generierung einer Plattenwelle erfordert daher in der Praxis eine exakte Einstellung und Einhaltung des Winkels. Auch die Positionierung und die Geometrie des Prüfobjekts sollten bekannt sein, bei komplex geformten Bauteilen zum Beispiel ist eine Nachführung des Einschallwinkels während der Messung erforderlich.

#### 2.4.8 Bildgebende Verfahren mit Luftultraschall

Im Folgenden werden jene Verfahren mit Luftultraschall gezeigt, die zu einer bildgebenden Ergebnisdarstellung führen. Dies sind zum einen Durchschallungsverfahren, zum anderen Verfahren für die einseitige Prüfung. Prinzipiell kann bei scannenden Luftultraschallmessungen zwischen der Aufnahme des Signals an einer festen Position (A-Bild), entlang einer Achse (B-Scan) und über einer Fläche (C-Scan) unterschieden werden. Die für einen C-Scan erforderlichen Daten werden zum Beispiel aus den maximalen Amplitudenwerten innerhalb eines bestimmten Zeitfensters des A-Bildes entnommen. Weitere Auswertemethoden werden in Kapitel 3, Versuchsdurchführung, genauer erläutert.

#### Senkrechte Durchschallung (NTM)

Das wohl bekannteste Verfahren der Luftultraschallprüfung ist die senkrechte Durchschallung, kurz NTM (Normal Transmission Mode). Diese ist in Bild 2.19 schematisch dargestellt. Die Vorteile dieses Verfahrens spiegeln sich in einer maximal möglichen Auflösung und der einfachen Anordnung wieder.

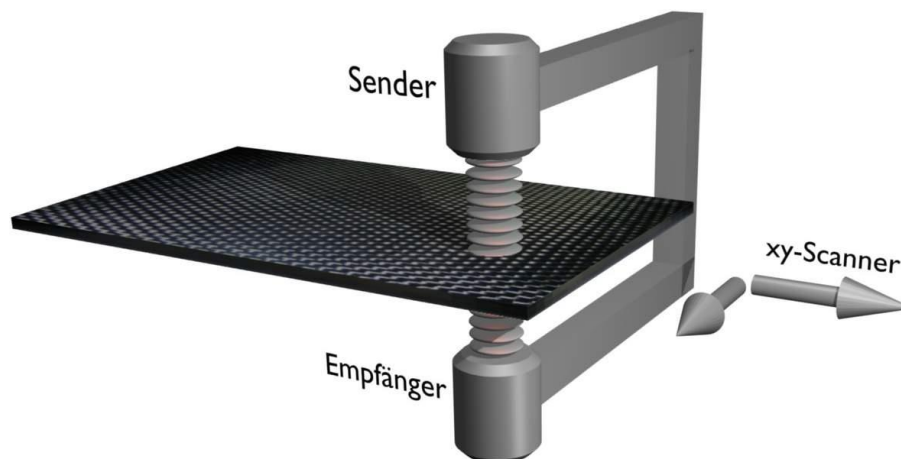


Bild 2.19: Schematische Anordnung eines Aufbaus zur scannenden Untersuchung senkrecht eingeschallten Luftultraschalls in Transmissionsanordnung [27]

Jedoch eignet sich dieses Verfahren nur für Werkstoffe, deren akustische Impedanz sehr niedrig ist und der Werkstoff zugleich nicht stark schallschwächende Eigenschaften besitzt. Andernfalls würde beim Eintritt und Austritt des Ultraschalls

aus dem Prüfkörper nach (2.24) zu viel Signal reflektiert werden. Die in dieser Arbeit vorliegenden UD-Tapes eignen sich dank ihrer geringen Dicke von weniger als einem Millimeter hervorragend für diese Art von Prüfanordnung. Allerdings sollte man darauf achten, dass es zu keiner Mehrfachreflexion zwischen den Prüfköpfen und des Tapes kommt, da diese Signale als doppelte Echos angezeigt werden würden und das ursprüngliche Signal überlagern könnten. Eine Lösung für diese prinzipielle Herausforderung ist im nächsten Abschnitt mit der Schrägdurchschallung gezeigt.

### Schrägdurchschallung (STM)

In Bild 2.20 ist ein weiteres Verfahren der Bildgebung in der Luftultraschall-ZfP, die Schrägdurchschallung mit Luftultraschall STM (Slanted Transmission Mode), dargestellt.

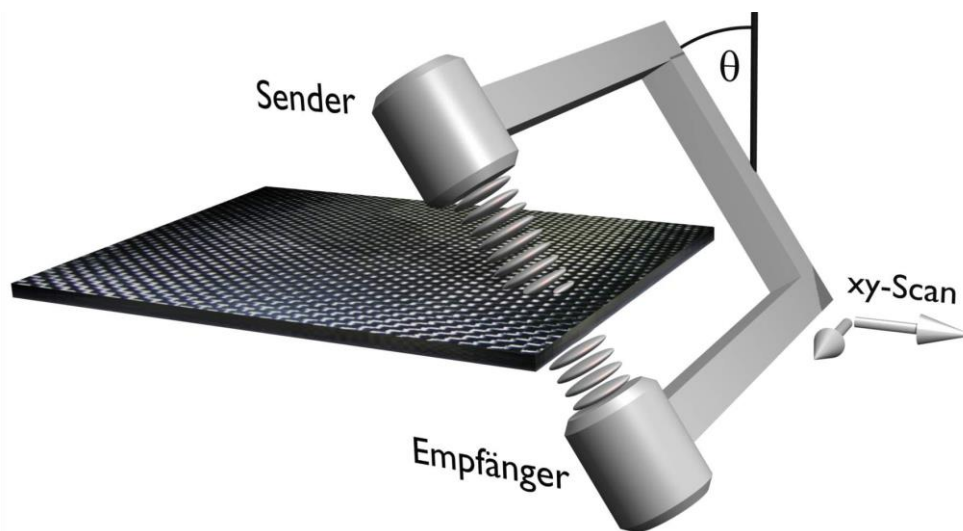


Bild 2.20: Schematische Anordnung eines Aufbaus zur scannenden Untersuchung durch schräg eingeschallten Luftultraschall in Transmissionsanordnung [27]

Die Einstellung des Winkels erfolgt nach (2.37) durch das Verhältnis der Geschwindigkeiten von Luftultraschall und Plattenwelle. Bei diesem Winkel wird die Plattenwelle kohärent angeregt, sodass ein Maximum in der Signalamplitude erreicht wird. Ein Vorteil dieses Verfahrens ist die Empfindlichkeit gegenüber den elastischen Eigenschaften der Platte. Dadurch können Defekte durch einen Abfall der Plattenwellenamplitude detektiert werden. Ein Nachteil der STM besteht darin, dass wie bei der NTM beidseitiger Zugang erforderlich ist.

### Re-Emission nach Schrägeinschallung (SRM)

Nach Bild 2.17 wird der Luftultraschall von der erzeugten Plattenwelle nicht nur auf der Unterseite, sondern auch auf der Seite des Senders emittiert. Daher können beide Prüfköpfe auf derselben Seite angebracht werden (Bild 2.21). Der Aufbau wird

aufgrund des wiederabgestrahlten Ultraschalls und der Ähnlichkeit mit einer Reflexionsanordnung auch Slanted Re-Emission Mode, kurz SRM, genannt. Bei dieser Anordnung gibt es allerdings diverse Nachteile. Beispielsweise ist für die Verwendung dieses Verfahrens eine Abschirmung zwischen Sender und Empfänger notwendig, die direkt reflektierten Ultraschall abschirmt, sodass dieser nicht in den Empfänger gelangt, was zu einer Übersteuerung resultieren würde. Dadurch ist die SRM kein berührungsloses Verfahren und kann somit nicht für die Prüfung oberflächenempfindlicher Werkstoffe eingesetzt werden. Ein weiterer Nachteil ist die Verringerung der Ortsauflösung in Ausbreitungsrichtung der geführten Welle im Vergleich zur Transmissionsanordnung. Durch die verlängerte Laufstrecke der Plattenwelle, wird ein Defekt als solcher detektiert, solange er sich zwischen Sender und Empfänger befindet. Dadurch wird die Dimension eines Defekts vergrößert abgebildet. Außerdem wirkt sich durch die verlängerte Laufstrecke die Dämpfung stärker aus als in der Transmissionsanordnung.

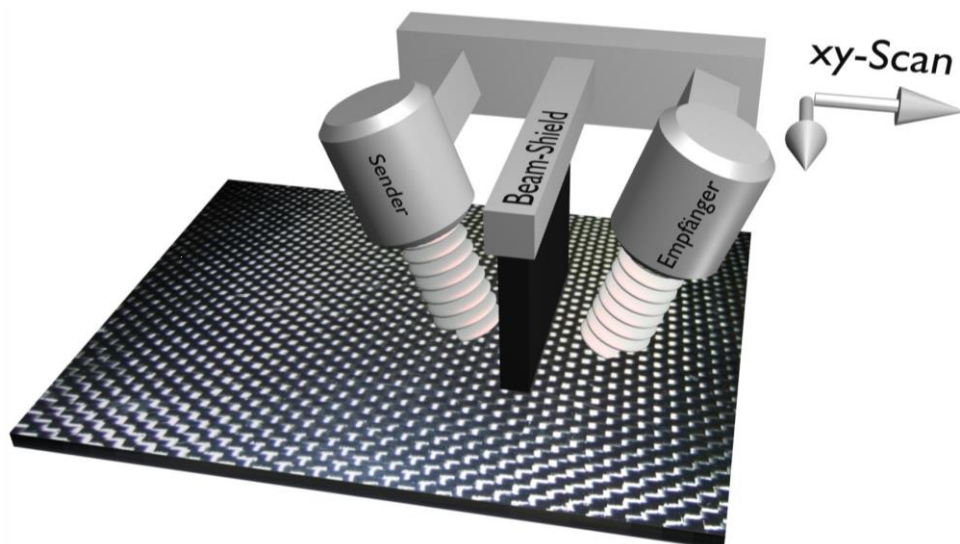


Bild 2.21: Schematische Anordnung eines Aufbaus zur scannenden Untersuchung durch schräg eingeschallten Luftultraschall in Re-Emissionsanordnung [27]

## 2.5 Fokussierung von Luftultraschall

Die Prüfung mit Luftultraschall besitzt einen großen Nachteil gegenüber der klassischen Ultraschallprüfung; eine geringere Auflösung. Dies ist vor allem der niedrigeren Frequenz zuzuschreiben aber auch den größeren Dimensionen der Prüfköpfe, um mehr Energie in die Luft übertragen zu können. Eine Möglichkeit die Auflösung zu verbessern besteht in einer Fokussierung des Luftultraschalls.

In der Literatur findet man diverse Methoden, diese zu erreichen. So konnten durch den Einsatz von Ferroelektret Prüfköpfen [39–41] sehr schmalbandige Signale



erzeugt werden, was in einer schmalen Pulsbreite resultierte. Durch einen schmalen Puls können Überlagerungen mehrerer Pulse verhindert werden. Auch durch Prüfköpfe, bestehend aus nur einem aktiven Ring, konnte unter Berücksichtigung des Bessel Algorithmus [42] bereits eine konzentrische Fokussierung erreicht werden [43]. In [44] wurden Prüfköpfe vorgestellt, deren aktiven Elemente innerhalb konzentrischer Kreise angeordnet wurden, die separat angesteuert werden konnten. Des Weiteren wurden Phased-Array Prüfköpfe vorgestellt, mit denen eine elektronische Fokussierung erreicht wurde [45]. Der Nachteil dieser vorgestellten Prüfköpfe ist die Notwendigkeit einer mehrkanaligen Ansteuerung, was mit hohen Kosten verbunden ist. Auch müssen fundierte Kenntnisse über die vorliegenden Schallgeschwindigkeiten und mechanischen Eigenschaften vorhanden sein, um die Phasendifferenz der einzelnen Elemente berechnen zu können.

Die den bereits erwähnten Methoden der aktiven Fokussierung gegenüberstehenden passiven Methoden können durch unterschiedliche Verfahren erreicht werden. Sie benötigen keine Spannungsversorgung und sind in den meisten Fällen einfach an vorhandene Prüfköpfe anzubringen. So können auf die Prüfkopfoberfläche angebrachte, konkave Spiegel den Ultraschall auf einen Punkt fokussieren. Dieses vor allem in der Immersionstechnik eingesetzte Verfahren kann durch den Einsatz unterschiedlicher Werkstoffe und Formen erreicht werden [46–48]. Speziell für den Einsatz von kapazitiven Prüfköpfen wurden parabolische Spiegel verwendet, um den Luftultraschall zu fokussieren [49–51]. Diese Art der Fokussierung setzte sich allerdings aufgrund der Herstellung der aufwendigen Oberfläche der Spiegel und der schwer zu erreichenden, koaxialen Ausrichtung nicht durch. Eine weitere Methode ist der Einsatz einer Fresnel-Zonenplatte, die durch konzentrische Ringe unterschiedlicher Transparenz eine konstruktive Interferenz im Brennpunkt verstärkt [52–56]. Die Ringe in den Platten müssen in ihrer Anordnung zueinander und in ihrem Radius exakt auf die vorhandene Frequenz angepasst sein. Diese Eigenschaft ermöglicht es nicht, eine Platte für diverse Prüfköpfe zu verwenden. Zudem geht die Fokussierung mit dieser Methode mit einer starken Abschwächung des Schalldrucks einher, da ein Teil des Schalls durch die Ringe abgeschirmt wird. Neueste Forschungen [57] beschreiben eine Fokussierung nach dem Prinzip des Cassegrain-Teleskops [58]. Bei dieser Methode werden von einem Hauptspiegel gebündelte Strahlen über einen Hilfsspiegel durch eine Öffnung im Hauptspiegel fokussiert.

Eine weitere passive Methode zur Fokussierung ist die Anbringung eines Trichters/Konus vor dem Sender. Diese wohl einfachste Methode wird bereits in diversen Methoden der Luftultraschallprüfung eingesetzt [59–61]. Trotz der Verbesserung der Auflösung geht diese Methode stets mit einer Verringerung des Schalldrucks einher. Bei schwach dämpfenden Werkstoffen kann dies allerdings

zugunsten einer besseren Auflösung in Kauf genommen werden. Die Formen für die eingesetzten Trichter beschränken sich bei der angegebenen Literatur auf Trichter mit einer linearen Form der Außenwand.

## **2.6 Einfluss der Tape-Temperatur**

Die in dieser Arbeit untersuchten CFK-Tapes durchlaufen während ihrer Produktion eine Zone mit erhöhter Temperatur [8]. So können die Tapes beim Verlassen des Pultrusionswerkzeugs eine Temperatur von bis zu 150 °C besitzen [62]. Allein aus diesem Grund ist es sinnvoll den Temperatureinfluss auf das Luftultraschallsignal zu untersuchen.

Aus diversen Untersuchungen geht hervor, dass sich Temperatureinflüsse auf Luftultraschallprüfungen in der Änderung der Wellenausbreitung, aber auch in der Änderung der Eigenschaften piezoelektrischer Prüfköpfe auswirken [63, 64]. Prinzipiell kann aber davon ausgegangen werden, dass die Einsatztemperatur luftgekoppelten Ultraschalls nach oben durch die Curie-Temperatur begrenzt ist. Oberhalb dieser werkstoffspezifischen Grenze verlieren Ultraschallprüfköpfe ihre piezoelektrischen Eigenschaften [65].

### **2.6.1 Temperatureinfluss bei der Kontaktultraschallprüfung**

In [66] wurde bei Wellenmodenuntersuchungen bei erhöhter Temperatur an einer Aluminiumplatte festgestellt, dass sich bei steigender Temperatur sowohl eine erhöhte Laufzeit der Wellenmoden einstellt als auch eine Änderung der Amplitude verursacht wird.

In [67] wurden Temperatureinflüsse auf die Signale piezoelektrisch erzeugter Lambwellen im Bereich von 35 °C bis 70 °C untersucht. Zum Zweck der Untersuchung wurden mit einer Bohrung beschädigte und unbeschädigte Aluminiumplatten in Reflexionsanordnung untersucht. Es wurde festgestellt, dass die Amplitude des Antwortsignals mit steigender Temperatur bei der unbeschädigten und der beschädigten Platte abnimmt. Ebenfalls wurde beobachtet, dass die Antwortamplituden bei beschädigten Prüfkörpern bei gleicher Temperatur geringer sind, als bei unbeschädigten. Wesentlich deutlicher fiel der Unterschied zwischen zwei unbeschädigten Prüfplatten unterschiedlicher Temperaturen aus.

Der Einfluss erhöhter Einsatztemperaturen von Luftfahrtkomponenten auf die Ausbreitung von Lambwellen mittels Structural Health Monitoring (SHM) wurde in [68] untersucht. Auf einer Aluminiumplatte mit zwei Klemmen, die zur Reflexion der Lambwelle dienen, wurde ein Sender-Empfänger-Paar angebracht. Es wurden A-Bilder vor einer Erwärmung, bei einer Temperatur von 85 °C und nach einer erneuten

Abkühlung aufgenommen und untereinander verglichen. Es wurde verdeutlicht, dass die Temperaturerhöhung lediglich minimale Auswirkungen auf die Laufzeit des Signals hat, die Amplitude allerdings drastische Veränderungen aufweist.

Untersuchungen bezüglich der Eignung diverser Befestigungsmedien der Aktoren für SHM-Anwendungen wurden in [69] durchgeführt. Hierzu wurden Aktoren mittels Epoxidklebstoff auf einer Aluminiumplatte befestigt und zwischen 20 °C und 150 °C dessen Einfluss auf die Untersuchung mit Lambwellen untersucht. Hierbei wurde festgestellt, dass mit steigender Temperatur die empfangene Amplitude der Lambwelle drastisch sinkt. Des Weiteren wurde beobachtet, dass bei manchen Klebstoffen die Amplitude des Antwortsignals nach dem Durchlaufen eines Test-Zyklus mit steigender Zykluszahl immer weiter sinkt. Der Grund wurde in einer zunehmenden Schädigung der Klebstoffe vermutet.

### **2.6.2 Temperaturabhängige Ultraschalluntersuchungen in FKV**

Im speziellen Fall der Untersuchung des Einflusses erhöhter Temperatur auf das Ausgangssignal bei faserverstärkten, also inhomogenen und anisotropen Bauteilen, ergibt sich ein weiterer Effekt, der bei der Untersuchung homogener Werkstoffe nicht auftritt. Bei Betrachtung von Faserverbundstrukturen fällt auf, dass sich gegensätzliche Trends der Sensorantwort mit steigender Temperatur und veränderter Prüfrichtung bzgl. der Faserorientierung einstellen. In [70] wurde innerhalb einer Untersuchung von Faserverbundwerkstoffen mittels Lambwellen zur SHM-Anwendung ermittelt, dass die Amplitude der Sensorantwort bei Untersuchungen in Faserrichtung mit steigender Temperatur sinkt, senkrecht zur Faserrichtung diese aber steigt.

Ein weiterer Effekt auf das Antwortsignal bei jeglichen Ultraschalluntersuchungen ist die Veränderung der Laufzeit beziehungsweise der Geschwindigkeit der Wellenausbreitung, die häufig unter dem Begriff Time-of-Flight (ToF) in der Fachliteratur auftaucht. In [70] ist neben der bereits erwähnten Veränderung der Amplitude eine Verschiebung des Antwortsignals bezüglich der Zeit zu erkennen. Im Gegensatz zur Amplitude ist die Geschwindigkeitsänderung aber nicht gegenläufig zur Faserorientierung, sondern verhält sich parallel und senkrecht zu dieser gleich. Dies bedeutet, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit in allen Raumrichtungen mit steigender Temperatur sinkt. Dieser Fakt unterstreicht das Vorliegen einer Überlagerung verschiedener Einflussgrößen, da die Laufzeitdifferenz durch die Steifigkeitsabnahme mit steigender Temperatur begründet werden kann, aber nicht die unterschiedlichen Entwicklungen der Amplitude erklärt [64, 70].

### **2.6.3 Beeinflussung des Luftultraschallsignals durch erhöhte Temperaturen**

Die Beeinflussung von Luftultraschall durch eine Temperaturänderung wurde in [71] anhand der Dämpfung untersucht. Hierzu wurde in einem geschlossenen Raum die Temperatur einmal isobar und einmal isochor erhöht und die Dämpfung von Luftultraschall untersucht. Für den in dieser Arbeit vorliegenden Fall kann der isobare Prozess als realitätsnah angesehen werden. Es wurde beobachtet, dass die Dämpfung in einem Temperaturbereich von 0 °C bis 100 °C linear zunahm. Dies galt unabhängig von den gewählten Frequenzen in einem Intervall von 50 kHz bis 1 MHz. Im Gegensatz zu trockener Luft zeigte sich bei erhöhter Luftfeuchtigkeit ein stärkerer Anstieg sowie eine größere Abhängigkeit der Dämpfung bei höheren Frequenzen.

Untersuchungen zur Beeinflussung geführter Wellen, angeregt mit Luftultraschall, konnten in der Literatur nicht gefunden werden. Wie auch bei der konventionellen Ultraschalluntersuchung wird jedoch bei der Luftultraschalluntersuchung ebenfalls eine Veränderung der Amplitude vermutet. Dies kann aufgrund der Impedanzunterschiede zwischen fehlerfreiem Werkstoff und den eingeschlossenen Defekten verursacht sein sowie durch veränderte mechanische Eigenschaften im Kunststoff. Dieses Verhalten an Grenzflächen wurde bereits in Kapitel 2.4.4 anhand der Formeln (2.24) und (2.25) behandelt. Wendet man diese Gleichungen auf eine geführte Welle durch ein Bauteil an und betrachtet zudem das Auftreffen der Welle auf einen Defekt, erhält man einen reflektierenden und transmittierenden Anteil. Die prozentualen Anteile des durch den Defekt transmittierten Signalanteils im Vergleich zu einer unbeschädigten Stelle des Bauteils entsprechen dann der Abschwächung der Amplitude [72].

## **2.7 Analyse von Ultraschalldaten**

In den vorangegangenen Abschnitten wurde anhand einer Reihe von Studien belegt, dass das Ausbreitungsverhalten von Lambwellen unter realen Einsatzbedingungen einer erheblichen Anzahl von Einflussfaktoren unterliegt. Innerhalb jeglicher Anwendungen in der Messtechnik ist es von enormer Bedeutung, Einflüsse, die das fehlerfreie Erkennen von Abweichungen behindern, zu isolieren oder gar vollständig aus den Antwortsignalen herauszufiltern. Dabei sollte die Sensitivität des Systems für Beschädigungen nicht beeinflusst werden, jedoch eine Desensibilisierung bezüglich der vorhandenen Umwelteinflüsse stattfinden. Falls diese Analyse der empfangenen Signale nicht oder nur teilweise funktioniert, könnten falsch-positive beziehungsweise falsch-negative Aussagen über den Bauteilzustand getroffen werden. Diese könnten zu kostenintensiven Ausschüssen innerhalb des Produktionsprozesses bei der Inline-Überwachung führen oder aber bei Anwendungen in der Strukturüberwachung (SHM) zum Austausch eines i. O. Bauteils führen [63].

### **2.7.1 Optimal Baseline Selection**

Eine Variante der Detektion vorliegender Schädigungen in realen Strukturen, basiert auf der Bewertung des Unterschiedes zwischen dem aktiv gemessenen Signal und einer Schwelle im bekannten Gutzustand. Analytisch am einfachsten umzusetzen ist ein Verfahren, das sich Optimal Baseline Selection [73, 74] nennt. Hierbei werden mehrere Schwellen verwendet, die alle möglichen Gutzustände abdecken. Der Vorteil hierbei ist die Möglichkeit beliebig komplexe Signale durch einfache Subtraktionen zu vergleichen, sofern ein Gutsignal des untersuchten Zustandes vorhanden ist. Hierfür werden je nach gewünschter Genauigkeit beliebig viele Messungen schädigungsfreier Zustände aufgezeichnet und das Signal als Schwelle bestimmt. Nach der Aufnahme der Schwellen können die Messungen des Realzustandes aufgenommen und die zugehörige Schwelle abgezogen werden. Die Anwendbarkeit des Verfahrens, wird hauptsächlich durch die Abhängigkeit vom betrachteten System und der benötigten Auflösung großer Datenmengen eingeschränkt. Mit steigendem Auflösungsvermögen und erhöhter Komplexität, steigen ebenfalls die notwendigen Datenmengen, die zum Erlangen korrekter Aussagen über den Zustand des Untersuchungsobjektes notwendig sind [63, 67]. Zudem ist es von Bedeutung, dass das System bereits auf kleinste Unregelmäßigkeiten anspricht ohne diese aufgrund der Subtraktion auszulöschen, aber dennoch zwischen defektbedingten Veränderungen und Veränderungen ohne Relevanz differenziert [75].

Ob sich ein Analyseverfahren für den Anwendungszweck eignet, muss individuell entschieden werden. Es existieren bereits zahlreiche Forschungsarbeiten, die sich auf den jeweiligen Anwendungsfall leicht veränderte Verfahren der Baseline-Subtraktion zu Nutze machen [68, 74, 76–78]. Da es sich bei der vorliegenden Arbeit um eine Untersuchung unter bekannten und nur geringfügig veränderlichen Umgebungsbedingungen handelt, werden diese hier nicht weiter beschrieben.

### **2.7.2 Probability of Detection Analyse (POD-Analyse)**

Mit genügend Aufwand und dem für die Fehler passenden Prüfverfahren, können nahezu alle Fehler in einem Bauteil festgestellt werden. Oftmals genügt es jedoch Fehler einer bestimmten Eigenschaft, zum Beispiel einer gewissen Größe, zu entdecken. Hierbei ist die Probability of Detection Analyse (POD-Analyse) von großer Bedeutung [79]. Sie stellt eine Fehlerauffindungswahrscheinlichkeit dar und gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Fehler eines bestimmten Merkmals aufgefunden werden kann. Diese Fehlermerkmale können eine Tiefenlage, der Abstand zu dem Sensor aber auch die Größe des Fehlers selbst sein. Anhand der POD-Kurve können unterschiedliche Messsysteme oder Messeinstellungen miteinander

verglichen werden um die für den Anwendungsfall bestmöglichen Ergebnisse erzielen zu können.

Die Fehlererkennungswahrscheinlichkeit hat sich im Laufe der Zeit immer weiter gewandelt. Nach [79] bestand die erste POD-Abschätzung aus dem Quotienten der erkannten Fehler und der Gesamtheit aller Messungen:

$$POD_{alt} = \frac{\text{erkannte Fehler}}{\text{Anzahl Messungen}} \quad (2.38)$$

Da jedoch größere Fehler leichter zu finden sind als kleinere, dient diese Definition nur bedingt der Vergleichbarkeit unterschiedlicher Messsysteme. Sie liefert vielmehr eine Aussage über die Güte des Bauteils. Nachfolgend wird die grundsätzliche Definition beibehalten, jedoch wird sie weiter verfeinert. Eine Einteilung der POD in mehrere Bereiche unterschiedlicher Fehlergrößen liefert zusätzliche Informationen über die Erkennungswahrscheinlichkeit bei unterschiedlichen Fehlergrößen. Anders als oftmals gedacht, liefert eine ideale POD-Kurve keine vollständige Fehlererkennung über den kompletten Fehlerbereich, sondern kann Fehler unter einer kritischen Größe (Bezeichnung „akrit“), nicht erkennen. Alle Fehler über der kritischen Größe werden hingegen sicher erkannt. Eine solche POD-Kurve ist in Bild 2.22 dargestellt.

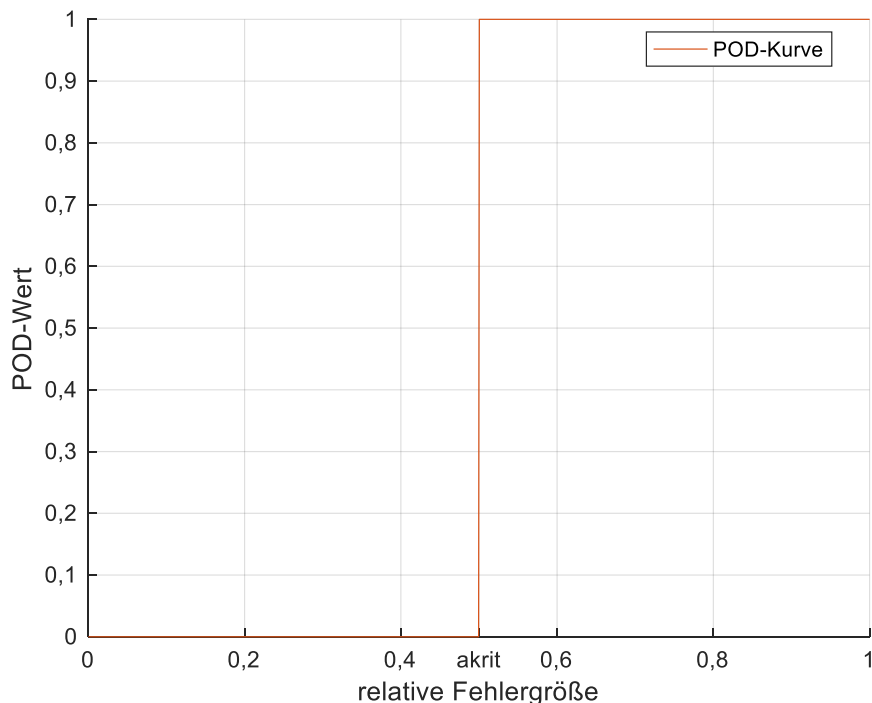


Bild 2.22: Ideale POD-Kurve mit kritischer Fehlergröße „akrit“

In der Realität wird eine solche Kurve nicht erreicht. Oft wird in der Literatur eine Gaußverteilung als Verknüpfung zwischen der POD und der Fehlergröße

herangezogen. Hierbei besteht die Wahrscheinlichkeit einen sehr kleinen Fehler zu finden, aber auch eine Wahrscheinlichkeit, einen großen Fehler nicht zu finden. Durch zum Beispiel die Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung [80] kann eine solche Kurve gut abgebildet werden und bildet eine idealisierte Gaußverteilung der Fehlererkennung ab, siehe Bild 2.23.

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}\tau^2} d\tau \quad (2.39)$$

Neben der POD-Kurve ist auch der Punkt  $a_{90}$  aufgetragen. Dieser gibt die Defektgröße mit einer Erkennungswahrscheinlichkeit von 90 % an. In der Literatur wird zusätzlich oft der Wert  $a_{90/95}$  angegeben. Hierbei gibt der zweite Zahlenwert das Konfidenzband an. Mit einer Vertrauensrate von 95 % wird innerhalb des Konfidenzbands eine Fehlereigenschaft zu 90 % entdeckt. Der wahre Signalwert einer einzelnen Messung liegt also zu 95 % innerhalb des Konfidenzbands [79]. Um diese Konfidenzkurve zu erhalten muss die POD-Kurve oftmals verschoben oder neu berechnet werden.

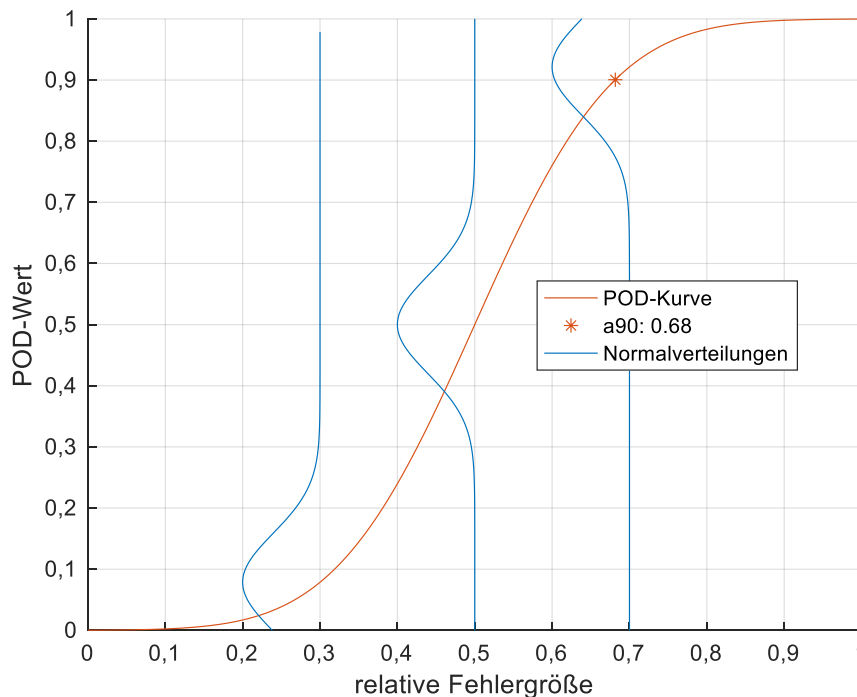


Bild 2.23: Realistische POD-Kurve mit Normalverteilungen

In der POD-Analyse nach dem binären Hit-Miss-Kriterium werden die Messungen in zwei Zustände eingeteilt. Wenn es ein Fehler ist, liegt die POD bei einer Erkennungswahrscheinlichkeit von „1“. Ist es hingegen kein Fehler, liegt sie bei „0“. Trägt man nun die binären POD-Werte in einem Diagramm über der Fehlergröße auf, kann daraus wenig abgelesen werden, siehe Hit-Miss-Werte in Bild 2.24. Hierzu werden Verknüpfungskurven verwendet um daraus POD-Kurven zu bilden. Diese

liefern speziell im Übergangsbereich zwischen der sicheren Erkennung und der unmöglichen Erkennung eine kontinuierliche Erkennungswahrscheinlichkeit.

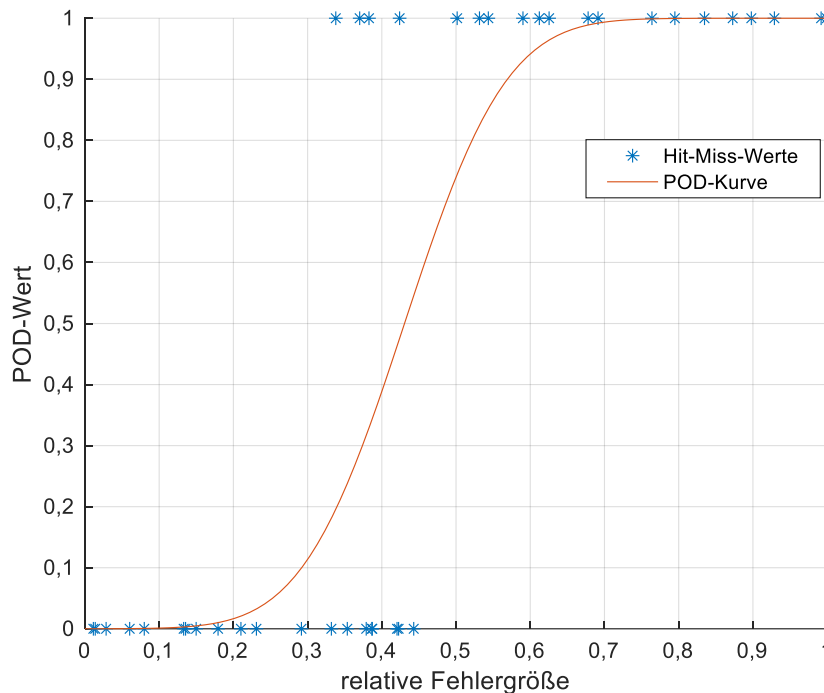


Bild 2.24: POD-Kurve nach Hit-Miss-Kriterium, Fehlerwerte zufällig erstellt

Bei der Signalantwort-Analyse wird anstatt den binären Zuständen Hit und Miss die Signalantwort des Messsystems ausgewertet [81, 80]. Im Falle der Luftultraschallprüfung kann dies zum Beispiel der Maximalwert (Amplitude oder Phase) in einem A-Bild aber auch das Signal-Rausch-Verhältnis an der Fehlerstelle sein.

Liegt eine zu geringe Anzahl an Fehlern vor, kann eine Variation zwischen der binären Hit-Miss Analyse und der Signalantwort-Analyse durchgeführt werden. Hierbei werden an allen Fehlerstellen die jeweiligen Signalantworten herangezogen und zusammen mit Fehlern ähnlicher oder gleicher Größe ausgewertet. Die sich in den einzelnen Bereichen ergebenden POD-Werte werden mit nachfolgender Gleichung errechnet:

$$POD(a) = \frac{\text{Anzahl Messungen}(a) > \text{Schwellwert}}{\text{Anzahl Messungen}(a)} \quad (2.40)$$

Durch einen globalen Schwellwert kann die Fehlererkennung eingestellt werden. Aus den diskreten POD-Werten wird über eine Regressionskurve ein kontinuierlicher Verlauf über der Fehlergröße  $a$  ermittelt. Ähnlich wie der Schwellwert, beeinflusst auch die Wahl der Regressionskurve den Verlauf der POD-Kurve. Neben der oben erwähnten Verteilungsfunktion der Normalverteilung sind auch andere Regressionsmodelle denkbar [82]. Durch die angenommene Normalverteilung der



Fehlererkennung wird auf das gleichnamige Modell zurückgegriffen. Durch die Mehrinformationen der Signalantwort können die entstehenden POD-Kurven hinsichtlich ihres Schwellwerts genauer untersucht werden.

Als ein mögliches Bewertungskriterium der Güte der Regressionskurven durch die diskreten POD-Werte nach Formel (2.40) dient die Wurzel der gemittelten Fehlerquadrate, Root-mean-squared error (RMSE). Dieser berechnet sich nach [83] zu:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (2.41)$$

Wobei  $n$  die Anzahl der Messstellen angibt,  $y_i$  die diskreten POD-Werte und  $\hat{y}_i$  die Werte der Regressionskurve an den diskreten Fehlerstellen von  $y_i$ .

Je kleiner der Wert RMSE wird, desto besser ist die Regression. Dieser nicht normierte Wert hängt sehr stark von den Eingangsgrößen der Regression ab. Aus in den Diagrammen gesammelten Erfahrungen kann ein RMSE Wert kleiner 5 als akzeptable Größe betrachtet werden.

### 2.7.3 Receiver Operating Characteristic (ROC)

Eine POD-Messung kann stark durch den Prüfer sowie auch durch die ausgewählten Messstellen beeinflusst werden. Solange nur Messstellen mit gut erkennbaren Fehlern für die Datenerfassung herangezogen werden, fallen die POD-Kurven entsprechend gut aus. Auch durch Anpassung des Fehlerschwellwerts werden die Kurven beeinflusst. So kann durch Absenken des Schwellwerts auf einen sehr geringen Wert jede Messstelle als ein Fehler dargestellt werden.

Die Receiver Operating Characteristic, kurz ROC-Kurve, dient als Qualitätskriterium einer Messung. In ihr wird die Richtig-Positiv-Rate mit der Falsch-Positiv-Rate verglichen. Unter Richtig-Positiv versteht man die Erkennung eines Fehlers unter der Voraussetzung, dass an der geprüften Stelle ein Fehler vorhanden ist. Die Falsch-Positiv-Rate stellt die Fehlermeldung an einer fehlerfreien Stelle dar. In Bild 2.25 ist die Richtig-Positiv-Rate über der Falsch-Positiv-Rate aufgetragen [84]. Aus mehreren Messeinstellungen oder unterschiedlichen Schwellwerten entsteht aus einzelnen Punkten die ROC-Kurve. Die Winkelhalbierende gibt die willkürliche Fehlererkennung an, der größte Abstand der Punkte zur willkürlichen Erkennung liefert hierbei die bestmöglichen Ergebnisse. Im Idealfall werden alle Fehler und gleichzeitig keine Falschmeldungen erkannt, in diesem Fall ist die ROC ein Punkt im linken oberen Eck.

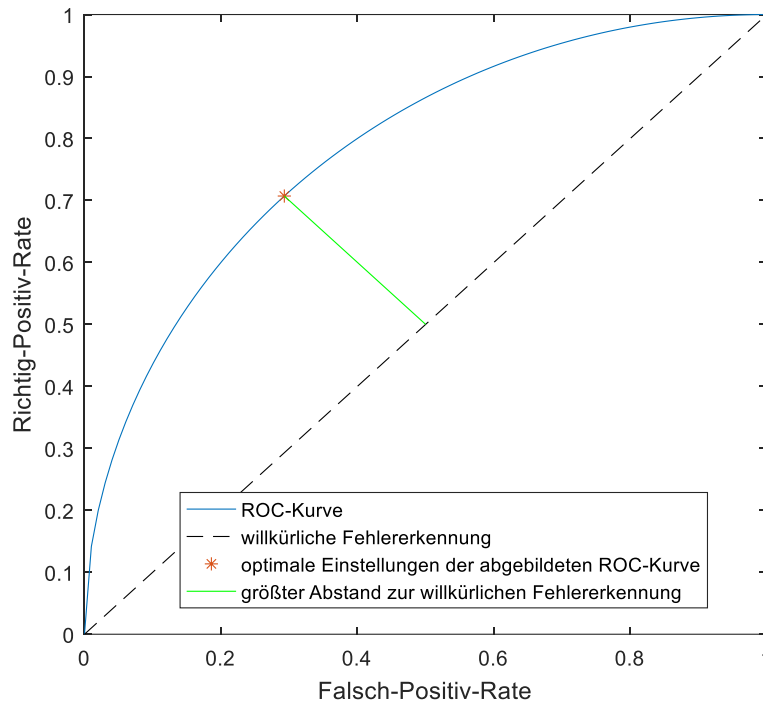


Bild 2.25: ROC-Kurve, nach [84]

In Bild 2.26 wird die Aufteilung der empfangenen Messsignale dargestellt. Der Schwellwert kann nun so gewählt werden, dass möglichst wenig Falsch-Positiv Signale empfangen werden aber gleichzeitig möglichst viele Fehler erkannt werden.

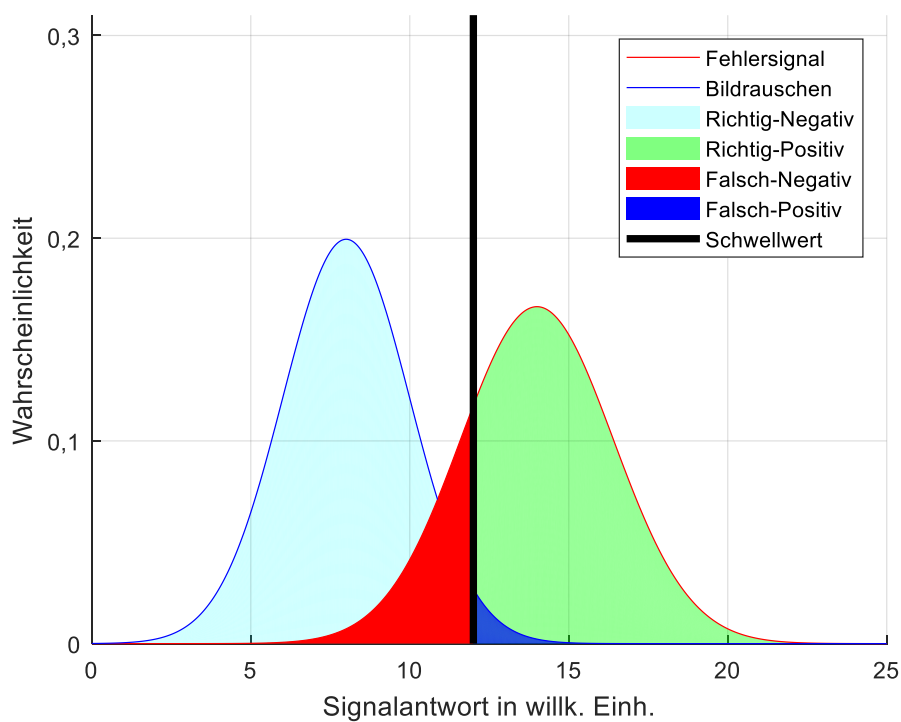


Bild 2.26: Aufteilung der empfangenen Messsignale in Fehlerrisiko und Bildrauschen, nach [85]

Der Quotient aus Richtig-Positiv zu Falsch-Positiv wird bei einer optimalen Einstellung der ROC-Kurve größtmöglich, wobei der POD-Wert für eine bestimmte Fehlergröße, ähnlich definiert wie Formel (2.40), kleiner wird.

$$POD(a) = \frac{RichtigPositiv}{RichtigPositiv + FalschNegativ} \quad (2.42)$$

## 2.8 Hypothese

Aus dem zuvor beschriebenen Stand der Technik lässt sich ableiten, dass die Luftultraschalltechnik sehr gut für die Detektion einer Inhomogenität, die sich auf die mechanischen Eigenschaften des Prüfkörpers auswirkt, geeignet ist. Zusammen mit der kontaktfreien Einschallung des Ultraschalls sollte sich daher die Luftultraschallprüfung sehr gut für eine Prüfung von mit Kohlenstofffasern verstärkten, thermoplastischen Tapes eignen, fortfolgend mit „Tapeprüfung“ bezeichnet.

Ziel dieser Arbeit ist es nun, die komplette Prozesskette der Tapeprüfung mit Luftultraschall zu untersuchen. Dies beinhaltet diverse Herausforderungen, aus denen sich folgende Fragestellungen und Hypothesen ableiten lassen.

**Hypothese 1: Der Einfluss einer erhöhten Tapetemperatur auf Luftultraschallmessungen diverser Prüfanordnungen kann bestimmt und differenziert werden.**

In Kapitel 2.6 wurden bereits diverse Untersuchungen von Ultraschallprüfungen bei erhöhter Temperatur diskutiert. Eine kombinierte Untersuchung des Temperatureinflusses von Luftultraschall und geführten Wellen konnte bisher allerdings nicht in der Literatur gefunden werden. Die sich daraus ableitende Hypothese ist, dass der Einfluss der Tape-Temperatur auf den Luftultraschall in Luft und auf eine Plattenwelle im Tape detektierbar ist, sich differenzieren und auf die mechanischen Eigenschaften des Tapes zurückführen lässt.

**Hypothese 2: Die Auflösung der Luftultraschallprüfung kann durch den Einsatz von Trichtern erhöht werden.**

In Voruntersuchungen [86] hat sich herausgestellt, dass die in dieser Arbeit verwendeten Prüfköpfe nicht ideal auf einen Punkt fokussieren. Trotz genauer Ausrichtung der Prüfköpfe auf einer akustischen Achse und den angegebenen Abständen von 38 mm zum Fokuspunkt zwischen den Prüfköpfen wurden die Ränder der Tapes nicht an der erwarteten Position wiedergegeben. Durch Direktschall, dessen Amplitude gegenüber der des Schalls durch den Prüfkörper wesentlich höher ist, erhielt man schon weit vor Erreichen des Fokuspunkts ein

Übersteuern des Empfängers. Wie in Kapitel 2.5 bereits erwähnt, können Fokussierungstrichter eine Verbesserung der Auflösung bewirken, jedoch mit einer einhergehenden Schallschwächung. Die innere Form des Fokussierungstrichters (zum Beispiel linearer oder exponentieller Verlauf) sollte hierbei einen wesentlichen Einfluss auf die Fokussierung und die Schallschwächung haben. Diese Abhängigkeit sollte sowohl mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) als auch mit der Messung des Schallfelds und experimentellen Messungen bestätigt werden können.

**Hypothese 3: Minimale Qualitätsunterschiede in Tapes können mit einer automatisierten Datenauswertung detektiert werden.**

Es kann bereits vorweggenommen werden, dass in CFK-Tapes die Imprägniergüte, also die Gleichmäßigkeit des Matrixmaterials und die Benetzungsqualität, von besonderem Interesse bei der Qualitätssicherung sind. Für eine industriell eingesetzte Qualitätsprüfung in der Pultrusion ist es zudem von Vorteil, wenn die aufgenommenen Daten automatisiert ausgewertet werden können. Dies führt zur dritten Hypothese, dass durch eine automatisierte Auswertung diverser Tapes mit minimal unterschiedlichen Eigenschaften, Qualitätsunterschiede dargestellt werden können. Weiter stellt sich die Frage, ob diese Unterschiede ohne eine Kalibrierung auf ein Gutteil (i. O.-Teil), also absolut, bestimmt werden können?

## **3 Versuchsdurchführung**

### **3.1 Definition der Hardware und eines Fehlerkatalogs**

Innerhalb dieses Kapitels sollen die Prüfanordnungen vorgestellt werden, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und verwendet wurden. Dies beinhaltet das Luftultraschallsystem, die verwendeten Prüfköpfe sowie diverse Prüfstände. Ebenfalls soll innerhalb dieses Kapitels ein Fehlerkatalog vorgestellt werden, der die Fehler/Defekte beinhaltet, die für die spätere Verwendung der Tapes als kritisch angesehen werden.

#### **3.1.1 Prüfsystem und Fehlerkatalog**

##### **Luftultraschallsystem**

Für die Untersuchungen mit Luftultraschall wurde in dieser Arbeit das Airscope TT<sup>®</sup> System der Firma Dasel-Sistemas<sup>®</sup> verwendet. Dies besteht aus Hardware mit zugehöriger Software sowie der Steuerung eines Scantisches. Die Messsoftware steuert den Luftultraschallgenerator zur Erzeugung und zum Empfang des Luftultraschallsignals an. Neben einer internen digitalen Verstärkung über die Software, ist zudem ein zusätzlicher, externer Verstärker (Panametrics<sup>®</sup>, 40 dB) zwischen Empfängerprüfkopf und Generator geschaltet. Die Kommunikation zwischen Manipulator und Luftultraschallgenerator erfolgt über angeschlossene Encoder. Die optimale Prüffrequenz wurde in einer vom Verfasser betreuten Arbeit untersucht [87], bei der sich herausgestellt hat, dass eine Ultraschallfrequenz von 200 kHz ein optimales Ergebnis bezüglich Auflösung und Signal-Rausch-Verhältnis (kurz SNR) ergibt. Die in dieser Arbeit verwendeten Prüfköpfe des Herstellers ULTRAN<sup>®</sup> mit der Bezeichnung „NCG200-D13-P38“ besitzen eine Mittenfrequenz von 200 kHz und sind theoretisch in einem Abstand von 38 mm auf einen Punkt fokussiert. Datenblätter der Prüfköpfe sind in Anhang A enthalten.

Eine wichtige Einstellung des Generators ist die Anzahl der Pulspakete. Sie bestimmt, mit wieviel Perioden der Sender angeregt wird. Mehrere Pulse bewirken, dass die Schallwelle mehr Energie besitzt als ein einzelnes Pulspaket. Es sollte allerdings die Pulslänge nicht zu lang eingestellt werden, da sich sonst das Signal nebeneinanderliegender Messpunkte überlagert.

##### **Prüfstand für kleine Tapeabschnitte**

Für die Prüfung von kurzen Tapeabschnitten wurde auf einem handelsüblichen xy-Scantisch eine Tape-Aufspannvorrichtung an einem Anschlag positioniert. Hierdurch konnte die Einhaltung derselben Position der Prüfkörper gewährleistet werden. Der gesamte Aufbau ist in Bild 3.1 während einer Messung zu sehen.

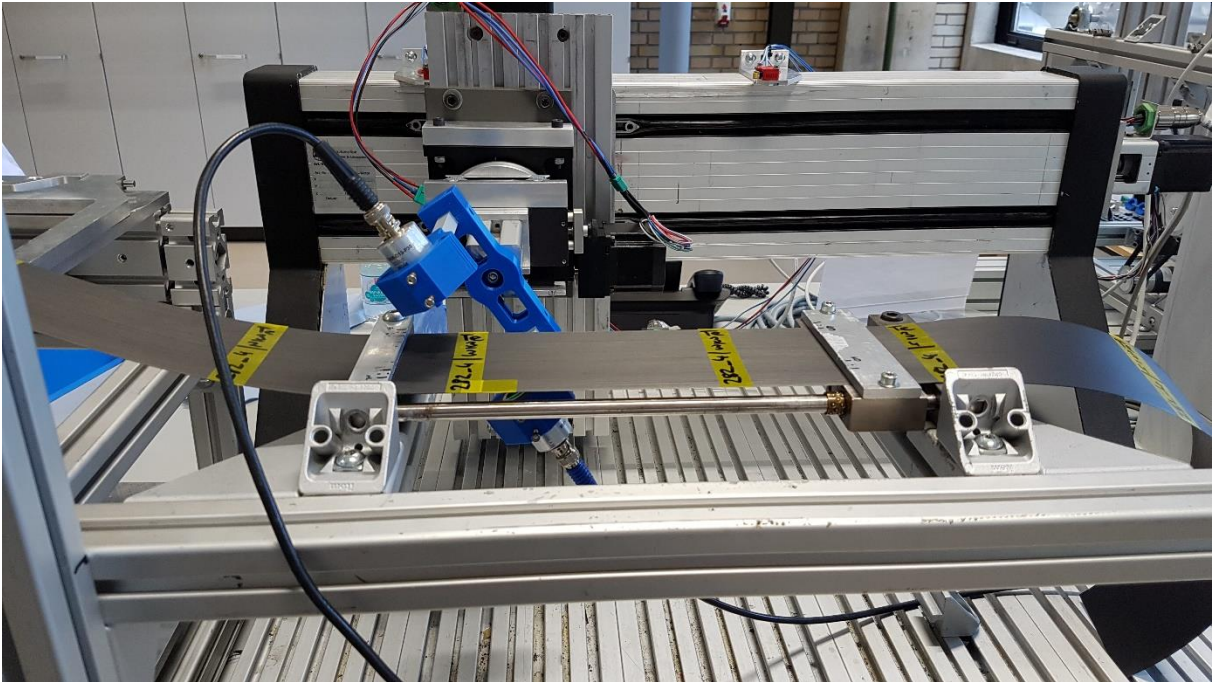


Bild 3.1: Prüfstand für kurze Tapeabschnitte

Beliebige Prüfköpfe können bei diesem Prüfstand in durch Fused Deposition Modeling (FDM) hergestellte Halterungen eingespannt und in ihrem Winkel zur Prüfkörperoberfläche beliebig verdreht werden.

### **Prüfstand für lange Tapeabschnitte**

Für Messungen im Labormaßstab würde es genügen, Ausschnitte von Tapes wie oben beschrieben zu prüfen. Hierbei wird allerdings außer Acht gelassen, dass bei der Pultrusion ein kontinuierlicher Vorschub existiert. Daher wurde eigens ein Tapeprüfstand konstruiert und gefertigt, der eine Pultrusionsanlage durch umlaufendes Tape simuliert, dargestellt in Bild 3.2. Das zu prüfende Tape wird in der Länge zugeschnitten, umlaufend am Tapeprüfstand angebracht und die beiden Enden des Tapes miteinander verklebt. Für die eigentliche Prüfung wird das Tape nun mit einer kontinuierlichen Vorschubgeschwindigkeit parallel zur Faserrichtung und die Prüfköpfe quer zur Faserrichtung bewegt. Die Anordnung der Prüfköpfe kann für die bereits genannten Prüfkfigurationen (NTM, STM oder SRM) beliebig verändert werden.

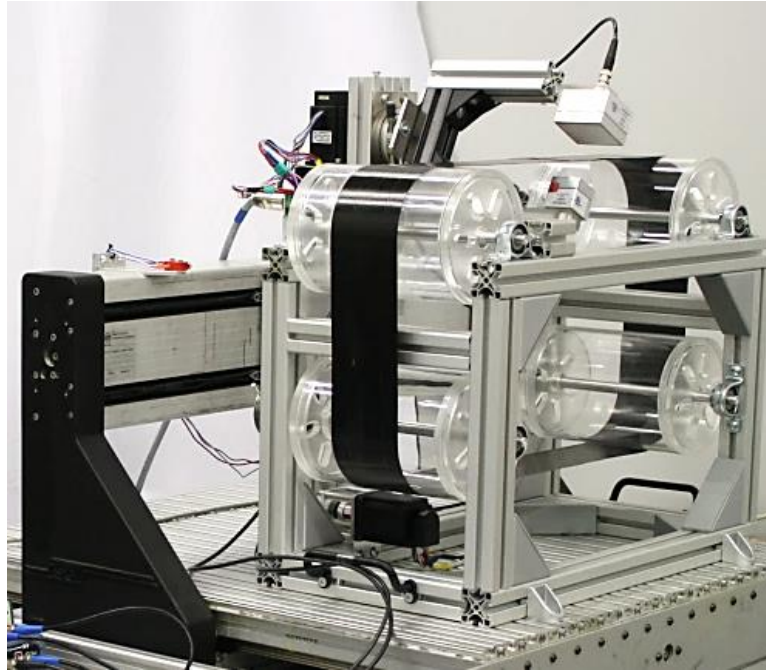


Bild 3.2: Tapeprüfstand für Endlosbänder zur Simulation einer Pultrusionsanlage

Durch den Einsatz des Tapeprüfstands konnten Messungen unter realen Bedingungen der Tapeherstellung durchgeführt werden.

### Fehlerkatalog

Im Folgenden soll ein Fehlerkatalog für die Tapeprüfung in der Pultrusion vorgestellt werden. Dies ermöglicht es, nachfolgende Untersuchungen auf die im Fehlerkatalog aufgelisteten Fehler/Defekte auszurichten. Der Inhalt des Fehlerkatalogs (Tabelle 3.1) wurde in Kooperation mit diversen Tapeherstellern erstellt.

Tabelle 3.1: Fehlerkatalog für die Tapeprüfung

Defektart	Priorität
Risse, quer zur Faser	sehr gering
Einschlüsse	gering
Risse, längs zur Faser	gering bis mittel
Faserverteilung ungleichmäßig	hoch
Imprägnierung unvollständig	hoch
Faservolumengehalt zu hoch/zu niedrig	sehr hoch

Die angegebenen Prioritäten richten sich nach dem Schweregrad und der Auftretswahrscheinlichkeit der Defekte. So hat zum Beispiel ein Riss quer zur Faserrichtung zwar einen sehr großen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften

des später eingesetzten Tapes, das Auftauchen eines solchen Defekts kann aber nahezu ausgeschlossen werden. Prinzipiell können die ersten drei Punkte, also Risse allgemein und Einschlüsse über eine einfache Auswertung der Signalamplitude einer senkrechten Durchschallung mit Luftultraschall detektiert werden. Entscheidend ist, ob die Signalamplitude gegenüber einem fehlerfreien Bereich erhöht oder abgeschwächt wird. Bei Rissen sollte der Luftultraschall ungehindert durchdringen können und somit die empfangene Amplitude wesentlich erhöhen. Einschlüsse aller Art, insofern sie in der Matrix eingeschlossen sind, bewirken durch zwei neue Grenzflächen zwei weitere Reflexionen und sollten somit zu einer Abschwächung des empfangenen Signals führen.

Die letzten drei Punkte, Faserverteilung, Imprägnierung und Faservolumengehalt stellen insofern eine große Herausforderung dar, da diese Defekte keine konkrete Grenzfläche besitzen, an der sich die Eigenschaft des Tapes schlagartig ändert. Eine Möglichkeit der qualitativen Detektion dieser Defekte wird in Kapitel 3.4 beschrieben.

## **3.2 Untersuchung des Temperatureinflusses**

Innerhalb dieses Kapitels soll der experimentelle Aufbau für die Untersuchungen des Temperatureinflusses auf Luftultraschallprüfungen mit und ohne geführte Wellen näher erläutert werden.

### **3.2.1 Ermittlung der Sensortemperatur**

Für den Dauereinsatz von Luftultraschallprüfköpfen in der Tapeproduktion muss sichergestellt werden, dass die Prüfköpfe keine Temperaturbelastung erfahren, die oberhalb der im Datenblatt angegebenen, maximalen Einsatztemperatur liegt. Wie bereits erwähnt, verlassen die Tapes das Pultrusionswerkzeug mit einer Temperatur von circa 150 °C. Um eine gewisse Sicherheit zu gewährleisten, wurde für die folgenden Untersuchungen das Tape bis maximal 210 °C erwärmt. Die Versuche wurden anhand eines Tapeausschnitts durchgeführt, der Versuchsaufbau ist in Bild 3.3 dargestellt. Das Funktionsprinzip gestaltete sich folgendermaßen: Das Tape wurde in einem Metallrahmen fixiert und an einem Grundgestell befestigt, unterhalb dieser Fixierung wurden zwei aktive Keramikstrahler in einem Abstand von 5 mm zum Tape angebracht. Oberhalb des eingespannten Tapes wurde ein ausrangierter Ultraschallprüfkopf in einem Abstand von 38 mm, ausgehend vom Tape, angebracht. Diese Entfernung wurde ausgewählt, da sie laut Datenblatt dem Fokusabstand der später verwendeten Prüfköpfe (Typ NCG200-D13-P38 der Ultrason-Group®) entspricht, siehe Anhang A. Zur Ermittlung der Temperatur des CFK-Tapes und der daraus resultierenden Prüfkopftemperatur wurden zwei Thermoelemente Typ J eingesetzt,



die auf der Tape-Oberfläche und direkt auf der Prüfkopfoberfläche angebracht waren.

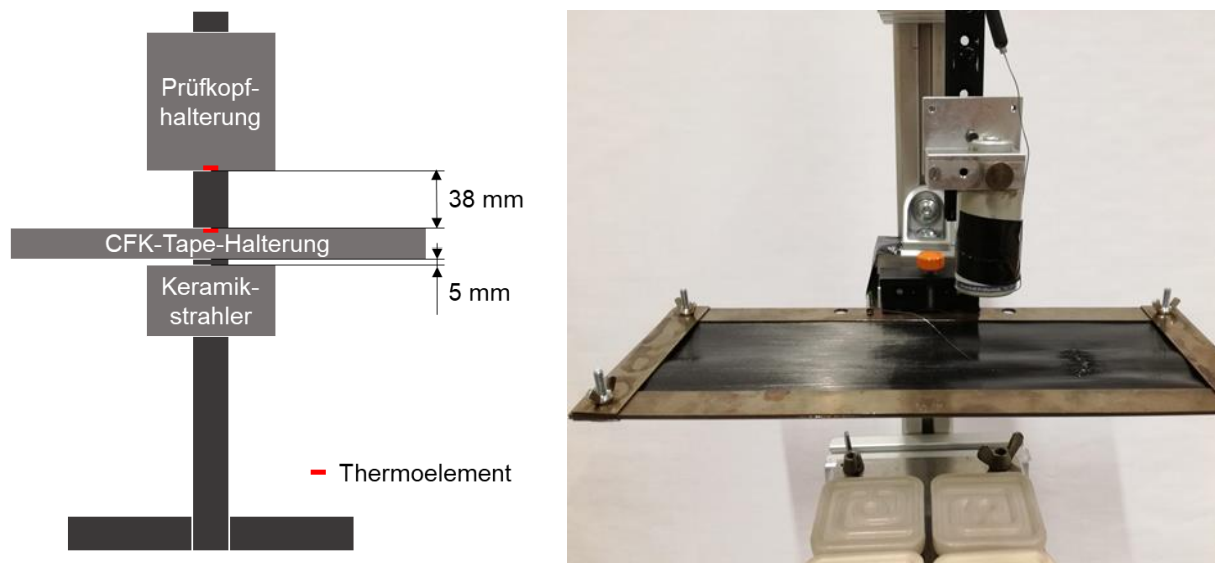


Bild 3.3: Prinzipskizze (links) und Versuchsaufbau (rechts) zur Temperaturbereichsbestimmung mittels Thermoelementen, der Abstand der Keramikstrahler zum Tape wurde zur besseren Darstellung vergrößert

Es wurden Tape-Temperaturen bis zu 210 °C untersucht. Die Tape-Temperatur wurde ausgehend von 135 °C in 5 °C-Schritten bis auf 210 °C erhöht. Auf jeder der sich daraus ergebenden Temperaturstufen wurde das Tape zwei Minuten durchwärmt, bis sich eine konstante Temperatur eingestellt hatte und anschließend über zwei Minuten der Minimal- und Maximalwert der Tape- und Prüfkopf-Temperatur dokumentiert. Die Messungen innerhalb eines Temperaturniveaus wurden fünf Mal wiederholt.

### 3.2.2 Temperaturabhängige Untersuchung von Tapes mittels Luftultraschall

In diesem Kapitel sollen der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung zur eigentlichen Luftultraschallmessung sowie eine Abschätzung der Änderung des Ultraschallsignals bei unterschiedlichen Tape-Temperaturen beschrieben werden. Hierzu wurde der in Bild 3.2 gezeigte Prüfstand für Endlosbänder mit zwei Keramikstrahlern der Firma HASCO® mit einer Leistung von je 500 W ausgestattet, siehe Bild 3.4. Die Kriterien für die Auswahl dieses Strahlersystems wurden in [88] im Detail behandelt und sollen hier nicht weiter aufgeführt werden. Durch den Einsatz der Keramikstrahler konnte eine gleichmäßige Erwärmung des Tapes erreicht werden.

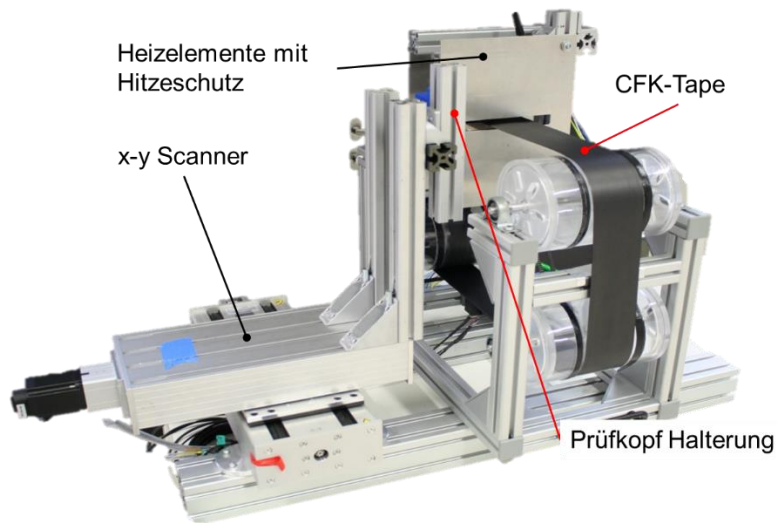


Bild 3.4: Anbau der Infrarot-Bauelemente am Prüfstand für Endlosbänder

Mit dem bereits gezeigten Versuchsaufbau wurde zwischen der Untersuchung in senkrechter Durchschallung (Bild 3.5, links), schräg versetzter Durchschallung (Bild 3.5, Mitte) und der Untersuchung in schräger Durchschallung (Bild 3.5, rechts) unterschieden. Die Winkel der schrägen Anordnungen wurden auf jeweils  $25^\circ$  eingestellt, was bei Raumtemperatur in der Generierung einer Plattenwelle (Ao-Mode) resultiert. Hierbei wurde das System jeweils so eingestellt, dass sich die detektierte Welle bei Raumtemperatur mit mindestens 50 % der Bildschirmhöhe erstreckte. Es wurde darauf geachtet, dass dieser Winkel exakt eingestellt wurde, da die Signalamplitude der Plattenwelle durch eine geringe Abweichung des Einschallwinkels stark abgeschwächt wird, vgl. Bild 2.18. Innerhalb eines Aufbaus wurden die Einstellungen konstant gehalten.

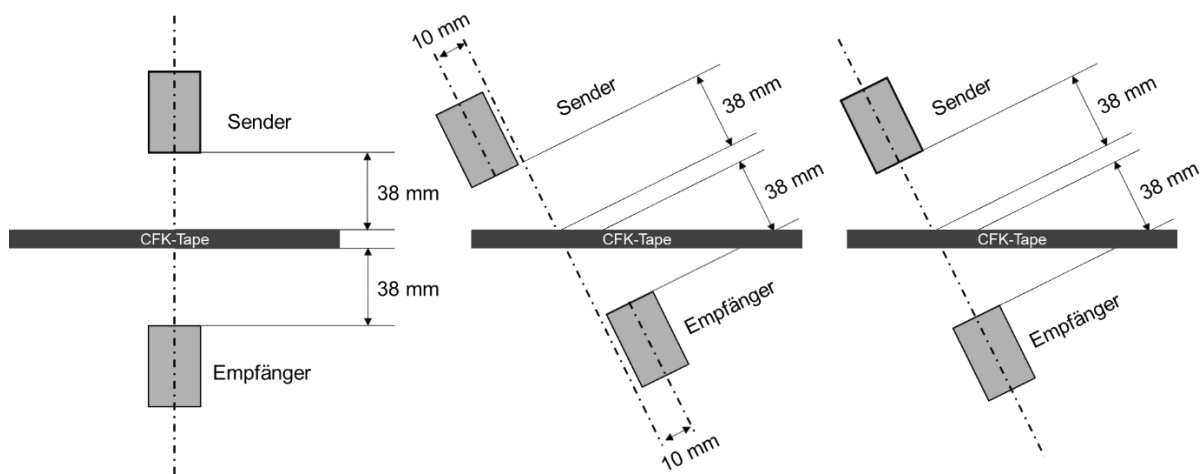


Bild 3.5: Prinzipskizze der Untersuchungsanordnung eines CFK-Tapes in senkrechter Durchschallung (links), in schräg versetzter Durchschallung (Mitte) und in schräger Durchschallung (rechts)

Innerhalb der Untersuchung in senkrechter Durchschallung wurden sich die physikalischen Grundsätze aus Kapitel 2.4 zu Nutze gemacht. Hierbei sind die beiden Prüfköpfe parallel zur Mittelebene der Probe und auf einer Achse ausgerichtet.

Mit der schräg-versetzten Einschallung sollte der prinzipielle Versuchsaufbau bestehen bleiben, es wurde jedoch die Versuchsanordnung der senkrechten Durchschallung geneigt bis sich die erste Plattenwelle einstellte ( $25^\circ$ ,  $A_0$ -Mode). Zusätzlich wurden die Prüfköpfe bezüglich der Mittelachse gegengleich um 10 mm versetzt, sodass ein Abstand von 20 mm zwischen Sender- und Empfänger-Prüfkopf entstand. Mit diesem Aufbau sollten im Folgenden lediglich Plattenwellen angeregt werden.

Bei der schrägen Durchschallung wurde derselbe Einschallwinkel wie bei der schräg versetzten Anordnung eingestellt, die Prüfköpfe befanden sich allerdings entlang einer Mittelachse. Diese Prüfanordnung stellt eine Art Kopplung der beiden vorangegangenen dar. Grund hierfür ist die Generierung einer Plattenwelle (durch Schrägeinschallung) und Direktschall durch das Tape.

Mithilfe des definierten Prüfaufbaus konnten temperaturabhängige Luftultraschallmessungen durchgeführt werden. Hierzu wurde eine Kalibrierungskurve aufgenommen, die die tatsächliche Tape-Temperatur mit der Strahlertemperatur verknüpft. Das Tape wurde hierfür in  $5^\circ\text{C}$  Schritten von  $25^\circ\text{C}$  auf  $120^\circ\text{C}$  erwärmt. Oberhalb dieser Temperatur kam es zu lokalen Schädigungen des Tapes, sodass diese Messungen nicht mehr repräsentativ waren. Bei jeder eingestellten Temperatur wurden anschließend Luftultraschallmessungen quer zum Tape durchgeführt. Hierzu wurden die Prüfköpfe der jeweiligen Anordnung entsprechend an einer Linearachse (vgl. Bild 3.4) angebracht und, während sich das Tape kontinuierlich bewegte, quer zur Taperichtung bewegt. Das aufgenommene Signal wurde bezüglich Phase und Amplitude an jedem einzelnen Messpunkt zu jeder Temperatur ausgewertet.

Für Vorüberlegungen über das Verhalten von Luftultraschall kann nach [89] die temperaturabhängige Schallgeschwindigkeit in Luft berechnet werden.

$$v_L = 331,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \sqrt{1 + \frac{\vartheta}{273,15 \text{ K}}} \quad (3.1)$$

Demnach steigt die Schallgeschwindigkeit in Luft mit der Temperatur  $\vartheta$ , dies sollte sich in einer Verringerung der ToF auswirken. Diesem Effekt wirkt die Verringerung der Geschwindigkeit einer Plattenwelle mit steigender Temperatur entgegen, die mithilfe von Gleichung (2.36) bestimmt werden kann. Hierbei wird mit sinkendem E-

Modul eine Verringerung der Plattenwellengeschwindigkeit herbeigeführt, auch wenn eine Änderung durch die Abhängigkeit der vierten Wurzel gering ausfallen sollte.

Für die Betrachtung der Signalamplitude von Ultraschall in CFK-Tapes bei erhöhter Temperatur muss das viskoelastische Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen [5] beachtet werden. Da die Matrix der in dieser Arbeit verwendeten CFK-Tapes aus einem thermoplastischen Kunststoff besteht, können weitere Überlegungen analog zu denen aus reinem Kunststoffen durchgeführt werden. Erhöht man die Temperatur in viskoelastischen Kunststoffen, so erhöht sich hierdurch ebenfalls die Molekularbewegung. Die Intensität von Ultraschallwellen kann nach [90] mit einer Abhängigkeit vom Dämpfungskoeffizienten  $\alpha$  beschrieben werden.

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x} \text{ mit } \alpha \propto \frac{\eta}{E} \quad (3.2)$$

Zusammen mit der quadratischen Abhängigkeit der Intensität von der Amplitude [91], kann die Änderung der Amplitude zunächst qualitativ bewertet werden. Nach [92] ist die Molekularbewegung proportional zum Koeffizienten der inneren Reibung  $\eta$ . Durch eine Erhöhung der Temperatur kommt es daher nach (3.2) zu einem größeren Dämpfungskoeffizienten. Auch die Verringerung des E-Moduls mit der Temperatur [93–95] unterstützt dieses Verhalten. Nach (3.2) lässt sich daher ableiten, dass die Intensität des Ultraschalls exponentiell mit steigender Temperatur abnehmen sollte. In Luft sollte ein linearer Abfall der Intensität nach [71], siehe auch Kapitel 2.6.3, zu beobachten sein.

### 3.3 Entwicklung einer Fokussierung für Luftultraschallprüfköpfe

Aus eigenen Untersuchungen [86] ist bekannt, dass sich eine Fokussierung von Luftultraschall mit einem Fokussierungstrichter erreichen lässt, auch wenn dadurch die Signalamplitude am Empfänger abnimmt. Mithilfe des in Kapitel 3.1.1 definierten Prüfsystems und der Verwendung von Prüfkörperdicken kleiner einem Millimeter kann in dem vorliegenden Fall dennoch genügend Signalstärke vom Empfänger detektiert werden. In den folgenden Kapiteln werden die Vorgehensweisen bei der Untersuchung der Trichterform und der Simulation aufgezeigt.

#### 3.3.1 Reflexionsverhalten

Anders als bei der Einschallung in einen Prüfkörper, soll der Schall auf seinem Weg durch die Fokussierungsvorrichtung nur wenig Intensität verlieren. Dadurch soll sichergestellt werden, dass die Wellen beim Austritt aus der Vorrichtung über genügend Intensität verfügen. Somit sollte der Werkstoff der Fokussierungsvorrichtung ein hohes Reflexionsvermögen aufweisen. Um berechnen zu können, in welchem Umfang die vom Prüfkopf angeregte Ultraschallwelle an der Fokussierung reflektiert

wird, könnte Gleichung (2.24) verwendet werden. In dieser Gleichung wird allerdings sowohl der Einfallswinkel als auch die Modenkonversion außer Acht gelassen. Aus diesem Grund soll im Folgenden Gleichung (2.24) diesbezüglich erweitert werden.

In dem hier vorliegenden Fall liegt eine Reflexion der Ultraschallwelle an einer Grenzfläche Fluid/Festkörper vor; daher muss die einfallende Welle eine Longitudinalwelle sein. An der Grenzfläche entsteht eine reflektierte Longitudinalwelle, deren Ausfallswinkel nach Gleichung (2.30) gleich groß ist wie der Einfallswinkel der ankommenden Welle. Zusätzlich entstehen eine transmittierte Longitudinal- sowie, der Einfachheit halber, nur eine transmittierte Transversalwelle. SV- und SH-Wellen werden zusammengefasst. Die Schallgeschwindigkeiten der beiden transmittierten Wellen sind unterschiedlich, woraus folgt, dass die beiden Ausbreitungswinkel ebenfalls verschieden sein müssen. In Bild 3.6 ist dieses Verhalten schematisch dargestellt.

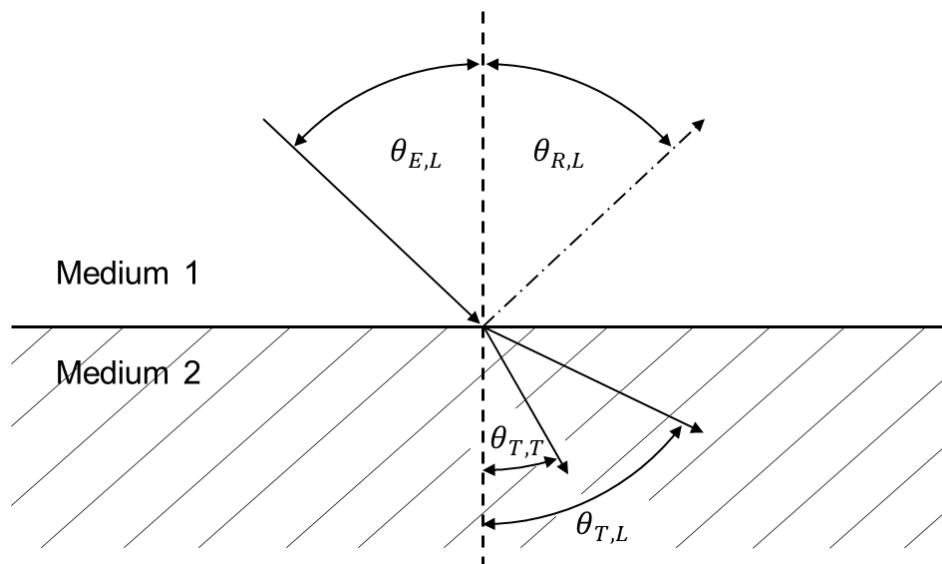


Bild 3.6: Reflexion und Modenkonversion von Luftultraschall an der Wand der Fokussierung

Für eine einfachere Darstellung werden neue Indizes definiert. Die ersten stehen dabei für die Bezeichnung der Welle (E: Einfall, R: Reflexion, T: Transmission). Die zweiten Indizes stehen für die jeweilige Wellenmode (L: Longitudinal, T: Transversal). Die Winkel der beiden transmittierten Wellen können ebenfalls nach Gleichung (2.30) berechnet werden, wenn deren Phasengeschwindigkeiten bekannt sind. Um den Reflexionsfaktor sowie die Transmissionsfaktoren abhängig vom Einfallswinkel und unter Berücksichtigung der Modenkonversion berechnen zu können, müssen die Schallgeschwindigkeiten ( $v_L$ ,  $v_T$ ) sowie die Ausbreitungswinkel ( $\theta_{T,L}$ ,  $\theta_{T,T}$ ) der entstandenen Longitudinal- und Transversalwelle im Festkörper berücksichtigt werden. Zur Herleitung dieser Abhängigkeit sei in diesem Fall auf [24]

verwiesen. Der Reflexionsfaktor für den Fall einer Einschallung mit Modenkonzersion berechnet sich zu:

$$R_{1,2} = \frac{g - h}{g + h} \quad (3.3)$$

Die Variablen  $g$  und  $h$  setzen sich wie folgt zusammen [24]:

$$g = \sin(2\theta_{T,L}) \cdot \sin(2\theta_{T,T}) + \cos^2(2\theta_{T,T})$$

$$h = \frac{\rho_{Luft} \cdot v_{Luft}}{\rho_{Fest} \cdot v_L} \cdot \frac{\cos(\theta_{T,L})}{\cos(\theta_E)} \quad (3.4)$$

Für die Transmissionsfaktoren ergeben sich zwei unterschiedliche Werte, da wie bereits erwähnt, zwei unterschiedliche Wellenmoden auftreten. Für die Transmissionsfaktoren dieser beiden Wellenmoden gelten nach [24] folgende Beziehungen:

$$T_{1,L} = \frac{2}{N} \cdot \cos(2\theta_{T,T}) \quad (3.5)$$

$$T_{1,T} = -\frac{2}{N} \cdot \left(\frac{v_T}{v_L}\right)^2 \cdot \sin(2\theta_{T,L}) \quad (3.6)$$

Die Variable  $N$  setzt sich wie folgt zusammen [24]:

$$N = \left(\frac{v_T}{v_L}\right)^2 \cdot \sin(2\theta_{T,L}) \cdot \sin(2\theta_{T,T}) + \cos^2(2\theta_{T,T}) + h \quad (3.7)$$

Trifft eine Longitudinalwelle aus einem Fluid auf einen Festkörper wird bei senkrechter Einschallung, also bei  $0^\circ$ , lediglich eine Longitudinalwelle in dem Festkörper angeregt. Setzt man die zugehörigen Werte ( $\theta_E = \theta_{T,L} = \theta_{T,T} = 0^\circ$ ) in die Gleichungen (3.4) bis (3.6) ein, erhält man die in Gleichung (2.24) gezeigten Beziehungen. Vergrößert man den Einfallswinkel, bildet sich zusätzlich eine Transversalwelle. Wird der Einfallswinkel weiter vergrößert, verschwindet die transmittierte Longitudinalwelle ab dem Grenzwinkel der Longitudinalwelle gänzlich aus dem Festkörper, die Amplitude der Transversalwelle steigt dafür stärker an. Wird der Einfallswinkel weiter vergrößert, steigt die Amplitude der transmittierten Transversalwelle weiter, bis diese bei Erreichen des Totalreflexionswinkels ebenfalls komplett verschwindet. Ab diesem Einfallswinkel wird sämtlicher Ultraschall reflektiert.

Für die Auslegung der Fokussierungstrichter sollten demnach die Reflexionsflächen so ausgelegt sein, dass der Luftultraschall entweder unterhalb des Grenzwinkels der Longitudinalwelle oder oberhalb des Totalreflexionswinkels auf diese auftrifft.

Da mehrere Fokussierungstrichter hergestellt wurden, hat sich das Herstellungsverfahren Fused Deposition Modeling (FDM) als geeignet herausgestellt. Aus diesem Grund wurden die Berechnungen für einen Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS) Kunststoff durchgeführt, deren mechanischen Eigenschaften in Tabelle 3.2 aufgelistet sind [96–98].

Tabelle 3.2: Mechanische Eigenschaften von ABS, hergestellt mit FDM [97, 98]

Werkstoff	Dichte in kg/m <sup>3</sup>	E-Modul in MPa	Impedanz in kg/m <sup>2</sup> s
ABS Fabb-It UG	1100	2360	1611,21·10 <sup>3</sup>

Es sei bereits hier erwähnt, dass die Oberfläche der mit FDM hergestellten Objekten durch das schichtweise Aufbauen Rillen aufweist. Diese fördern zwar eine geringere Transmission, stellen allerdings Streuzentren für den Ultraschall dar.

### 3.3.2 Trichterform

Die Form des Trichters für die Fokussierung kann beliebige Formen haben. In einer vom Verfasser betreuten Arbeit [99] wurden hierfür diverse Funktionen mit der FEM-Software ANSYS® untersucht. Hierbei wurden der Anfangsdurchmesser des Trichters sowie der Öffnungsdurchmesser konstant gehalten. Der Anfangsdurchmesser war, bedingt durch den äußeren Durchmesser des Prüfkopfs von 26 mm, bereits vorgegeben, wohingegen der Öffnungsdurchmesser in Richtung des Prüfkörpers in [86] experimentell zu einem Durchmesser von 2,6 mm bestimmt wurde. Die simulativ untersuchten Versionen der Fokussierungstrichter (FOK) sind in Tabelle 3.3, zusammen mit deren Funktion und den optimalen Funktionsparametern [99] dargestellt. Die gezeigten Funktionen wurden rotiert, um den Fokussierungstrichter im Gesamten darstellen zu können.

Tabelle 3.3: Darstellung der untersuchten Trichterformen

Bezeichnung	Funktion	
FOK-linear	$y = -mx + c$	$m = -0,32; c = 13$
FOK-parabolisch	$y = ax^2 + b$	$a = -0,009; b = 13$
FOK-exponentiell	$y = ae^{-k(37-x)}$	$a = 1,3; k = 0,062$

Es wurden jeweils zwei Trichterformen mit Solidworks® konstruiert und mit dem bereits erwähnten FDM-Verfahren gefertigt: jeweils ein Trichter für Sender und Empfänger. Für die Fertigung wurde ein ABS-Filament der Firma iGo3D® mit 3 mm Durchmesser verwendet.

### 3.3.3 Simulation des Schallfelds

Die in SolidWorks konstruierten Trichter wurden in die FEM Software ANSYS® importiert. In der Simulation wurden Sender und Empfänger inklusive Trichter in einem Abstand von 30 mm gegenüberliegend positioniert. Anschließend wurde die den Trichter umgebende Luft als Umhüllung der Körper erstellt. Da das Modell achsensymmetrisch ist, wurde es zur Vereinfachung geschnitten, sodass nur noch ein Viertel dargestellt wurde. Die Umhüllung des Aufbaus wurde auf einen Durchmesser von 8 mm reduziert. Dies reduzierte das Modell weiter in Größe, wodurch eine Verringerung der Rechenzeit erreicht wurde. Die Grenzflächen zwischen Trichter und Luft wurden in der Simulation als schallharte Flächen definiert, die die Schallwellen vollständig reflektieren. Hierdurch konnte die Darstellung der Trichter für die Simulation unterdrückt werden. Eine Abschätzung des hierbei entstandenen Fehlers wird in Kapitel 4.2.1 dargestellt.

Die maximale Elementgröße in einer Simulation sollte deutlich kleiner als die kleinste zu untersuchende Wellenlänge sein. In dem vorliegenden Fall wurde sie so klein gewählt, dass die Simulation des in axialer Richtung längsten Modells (abhängig von der Trichterlänge) mit den Lizenzbedingungen noch durchführbar war. Dies resultierte in einer maximalen Elementgröße von 0,295 mm und somit weniger als ein Fünftel der Wellenlänge ( $\lambda = 1,715$  mm). Trotz dieser groben Netzauflösung ließen sich grundsätzliche Tendenzen eruieren. Die Anregung erfolgte über die Schallschnelle, also über der Momentangeschwindigkeit jedes schwingenden Elements der Simulation [91] - diese wirkt transmitterseitig auf die Außenfläche der Luft in axialer Richtung. Die parallel zur axialen Achse verlaufende Außenfläche des Modells sowie die Austrittsfläche auf Seite des Empfängers wurden mit der sogenannten Abstrahlungsrandbedingung versehen. Diese legt fest, dass auftreffende Schallwellen nicht reflektiert, sondern vollständig absorbiert werden. Dadurch wurde ermöglicht, dass die Schallwellen trotz Einschränkung des Modells auf eine möglichst kleine Geometrie ins Unendliche weiterlaufen können.

Für die Auswertung wurde die Schalldruckamplitude bei einer Frequenz von 200 kHz an zwei Stellen betrachtet: zum einen entlang des axialen Verlaufs zwischen den Trichtern entlang der Symmetrieachse und zum anderen im radialen Verlauf an der Austrittsseite des Empfängers.

### 3.3.4 Schallfeldvermessung und Auflösung

Um die Ergebnisse der Simulation überprüfen zu können, wurden die Schallfelder mit der ACU-Vibrometry-Methode nach [100, 101] mithilfe eines Laser-Doppler-Vibrometers vermessen. Bei dieser Methode trifft ein Teil des Laserstrahls auf eine ebene Platte hinter dem Prüfkopf, der andere Strahl wird als Referenzstrahl im



Vibrometer geführt, der Messaufbau hierzu ist in Bild 3.7 dargestellt. Der zu vermessende Prüfkopf wurde währenddessen mit 200 kHz betrieben und mit dem Vibrometer synchronisiert, so wurde jeder Punkt des Schallfelds zur selben Phasenlage vermessen. Die Schwingungen im Strahlengang, also das Schallfeld des Prüfkopfs, beeinflussen den lokalen optischen Brechungsindex und dadurch die Phasenlage des Laserstrahls. Vom Vibrometer wird an jedem Punkt dadurch eine „virtuelle Vibration“ aufgenommen, die über einen linearen Zusammenhang mit dem in der Luft vorherrschenden Druck korreliert werden kann [100]. Das Schallfeld kann somit zweidimensional dargestellt werden. In [101] konnte zudem gezeigt werden, dass hauptsächlich Komponenten des Schallfelds senkrecht zum Laserstrahl (parallel zur Ebene des Reflektors) vom Vibrometer registriert werden. Das mit diesem Verfahren vermessene Schallfeld zeigt also ein Schnittbild des eigentlichen Schallfelds.

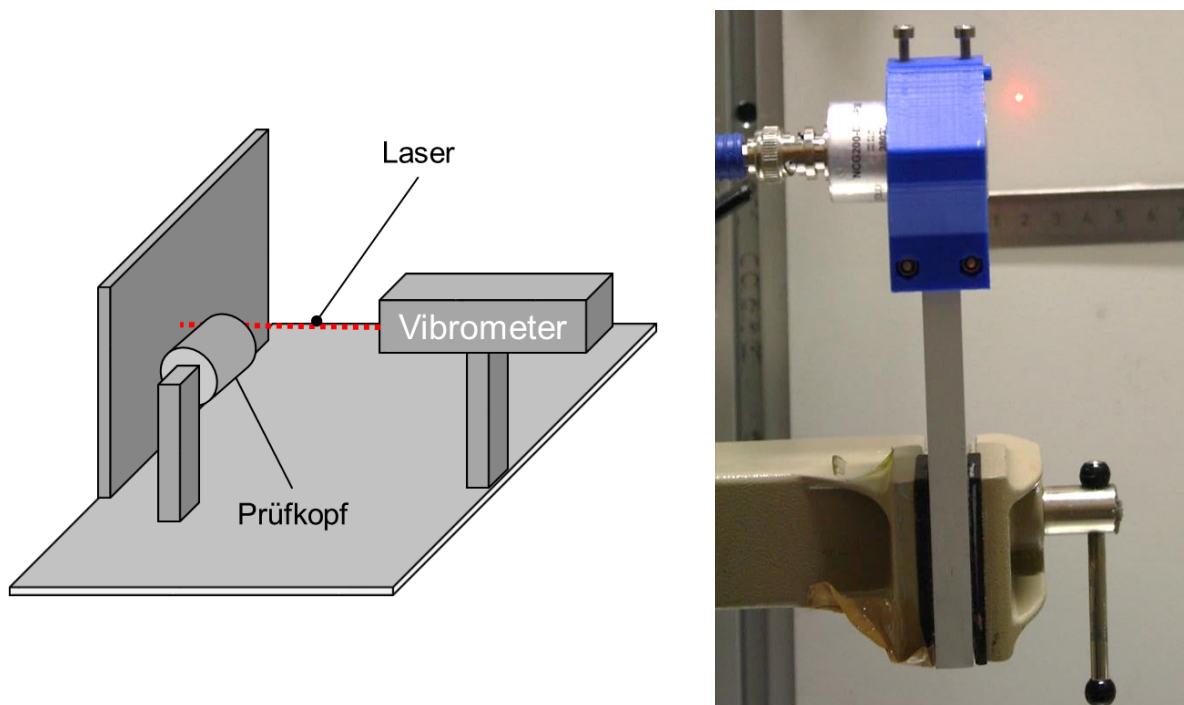


Bild 3.7: Schematischer Aufbau (links) und Aufbau mit eingespanntem Prüfkopf (rechts) der ACU-Vibrometry-Methode

Für eine quantitative Auswertung des Signalverlusts wurden die Prüfköpfe einmal ohne und anschließend mit den unterschiedlichen Aufsätzen auf einer akustischen Achse direkt gegenüber angeordnet. Der Abstand der Prüfkopfoberflächen wurde in jedem Fall konstant auf 76 mm gehalten, dies entspricht dem zweifachen der eigentlichen Fokussierungslänge, siehe Aufbau in Bild 3.8. Ebenfalls wurden alle Einstellungen des Ultraschallgenerators konstant gehalten. Über die Aufnahme eines kontinuierlichen A-Bilds konnte anschließend eine Aussage über die maximal

erreichbare Amplitude sowie eventueller Nebenreflexionen gemacht werden. Diese Versuchsanordnung wurde einmal an Luft und einmal mit einem CFK-Tape zwischen den Prüfköpfen durchgeführt.

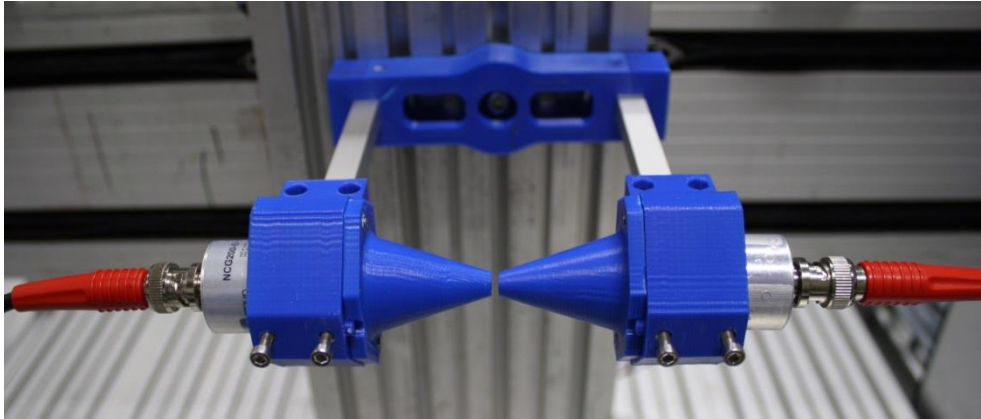


Bild 3.8: Messaufbau zur direkten Durchschallungsmessung an Luft, es sind die Fokussierungstrichter FOK-linear angebracht

Die Messung der Auflösung wurde ebenfalls einmal ohne und anschließend mit jeweils einer Version der Fokussierungstrichter untersucht. Hierzu wurde auf einem nominell fehlerfreien Tape ein Aluminium Lochblech mit den Maßen 60 mm x 15 mm und einer Materialdicke von 2 mm aufgebracht, Bild 3.9.

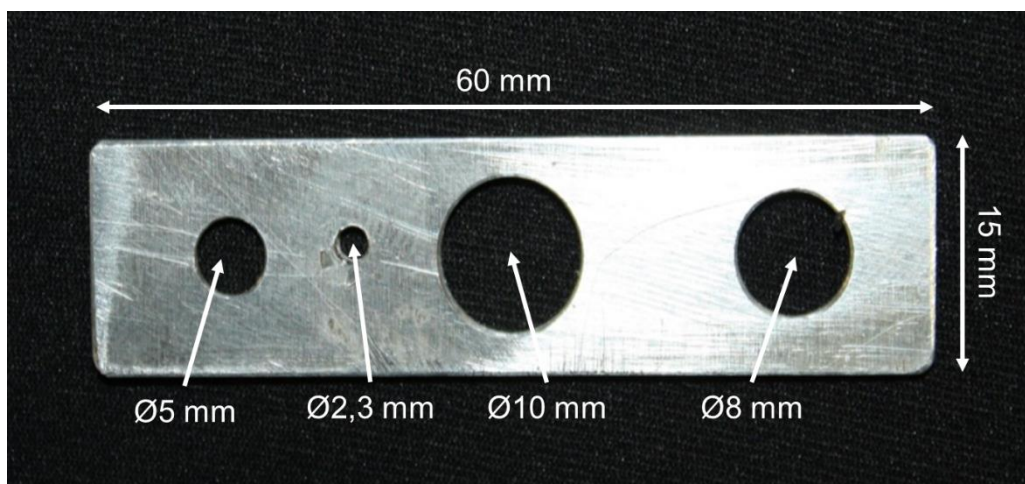


Bild 3.9: Aluminium Lochblech zur quantitativen Messung der Auflösung von Luftultraschallmessungen

Hierin wurden vier Bohrungen mit 2,3 mm, 5 mm, 10 mm und 8 mm Durchmesser eingebracht. Diese Probe wurde mit dem in Bild 3.1 gezeigten Prüfstand mit einem Raster von 0,5 mm abgescannt. Die Ergebnisse wurden sowohl qualitativ über den C-Scan, als auch quantitativ über die Messung der Lochdurchmesser entlang eines Linienscans ausgewertet.

### **3.4 Entwicklung einer qualitativen Analyseverfahren**

In Kapitel 3.1 wurde neben der Detektion von Längsrissen ebenfalls die Detektion von unterschiedlichen Imprägnierungszuständen gefordert. Vorüberlegungen ergaben, dass im Gegensatz zu Rissen, durch die der Luftultraschall ungehindert hindurchdringen kann, die Signaländerungen durch Unterschiede in der Imprägnierungsgüte oder der allgemeinen Gleichmäßigkeit des Tapes relativ gering ausfallen würden. Daher wurde Wert auf eine vergleichbare Messung sowohl innerhalb eines Tapes, als auch bei der Vermessung verschiedener Tapes gelegt. Auch wurde eine quantitative Bestimmung der Imprägnierungsgüte aus diversen Faktoren, die Einfluss auf das detektierte Signal haben, ausgeschlossen. Schon die Verwendung verschiedener Materialien als Matrix, mögliche Lufteinschlüsse (mangelnde Imprägnierung) oder eine unterschiedliche Tapedicke machen eine absolute Bestimmung unmöglich. Daher wurde in Betracht gezogen, die Imprägnierung und die Qualität von Tapes einer Produktionsart über eine Kalibrierung des Systems vergleichend zu erfassen.

#### **3.4.1 Verwendete Prüfkörper**

Die für die qualitative Bestimmung der Imprägnierungsgüte geforderten Tapes sollten nach Möglichkeit einem identischen Herstellungsprozess entspringen und sich nur in ihrem Zusammensetzungsverhältnis von Matrix und Faser unterscheiden. Das Verhältnis sollte über die gesamte Länge der einzelnen Prüfkörper konstant bleiben. Die Idee war dies über die Variation der zugesetzten Matrixmenge zu realisieren. Diese Vorgabe basiert auf den Resultaten der Veröffentlichungen [102, 103]. Hier konnten Unterschiede zwar dargestellt werden, jedoch aufgrund möglicher anderer Einflüsse kein direkter Zusammenhang zwischen gemessenem Signal und der tatsächlichen Imprägnierungsgüte ermittelt werden. Die Veränderungen der Imprägnierung der Tapes wurden hier durch eine sich verändernde Abziehgeschwindigkeit erreicht. Möglicherweise wurden dadurch allerdings auch Parameter wie die Faserorientierung beeinflusst oder sogar Faserschädigung hervorgerufen, die das Signal ebenfalls verändern können. Aus diesen Gründen wurden für diese Arbeit vier Tapes beschafft, die sich laut Hersteller insbesondere in der Imprägnierungsgüte unterscheiden. Weitere Informationen dürfen aus Geheimhaltungsgründen nicht veröffentlicht werden. Die Tapes sind aus Kohlenstofffasern und einer PA12 Matrix aufgebaut und haben laut Herstellerangabe einen konstanten Faservolumengehalt von 45 %.

Von jedem der vier unterschiedlichen Taperollen wurden wiederum vier repräsentative Abschnitte mit jeweils 15 cm Länge vorbereitet und markiert. Die vier Tapes wurden zufällig mit „1“ bis „4“ durchnummeriert. Die Nummerierungen bilden

nach der Bezeichnung „Te“ die erste Zahl der Bezeichnung. Die zweite Zahl entspricht der Durchnummerierung der Abschnitte des jeweiligen Tapes in der Reihenfolge in der sie abgeschnitten wurden. Das Tape in Bild 3.10 mit der Bezeichnung Te2-3 bezeichnet also den dritten Abschnitt des zufällig als Tape Nummer „2“ bezeichneten Tapes.



Bild 3.10: Präpariertes CFK-Tape mit Markierung aus Klebestreifen und notierter Identifikation

Alle präparierten Prüfkörper für die qualitative Analyse sind in Tabelle 3.4 aufgeführt.

Tabelle 3.4: Prüfkörperbezeichnungen aller unterschiedlich imprägnierten Tapes

	<b>Abschnitt 1</b>	<b>Abschnitt 2</b>	<b>Abschnitt 3</b>	<b>Abschnitt 4</b>
<b>Tape 1</b>	Te1-1	Te1-2	Te1-3	Te1-4
<b>Tape 2</b>	Te2-1	Te2-2	Te2-3	Te2-4
<b>Tape 3</b>	Te3-1	Te3-2	Te3-3	Te3-4
<b>Tape 4</b>	Te4-1	Te4-2	Te4-3	Te4-4

### 3.4.2 Messaufbau und Einstellungen

Die verwendete Hardware und der Messaufbau entsprachen denselben wie die in Kapitel 3.1 beschriebenen. Dies beinhaltete das Luftultraschallsystem, den Scantisch, die Motorsteuerung sowie die Tape-Aufspannvorrichtung. Es wurden ebenfalls die Prüfköpfe der Firma ULTRAN® mit einer Mittenfrequenz von 200 kHz verwendet.

Am Empfänger wurde eine Verzögerung von 200  $\mu$ s und eine Gatebreite von 350  $\mu$ s eingestellt. Für die Verstärkung wurde 40 dB (extern) und 10 dB (Software) gewählt. Für einen Schuss wurden fünf Pulse verwendet. Die Prüfkörper wurden mäanderförmig mit einer Rasterauflösung von 1 mm in Schrägdurchschallung mit einem Winkel von 25° abgescannt. Die erhaltene Signalamplitude im Zeitbereich von

200  $\mu\text{s}$  bis 550  $\mu\text{s}$  wurde an jedem einzelnen Punkt aufgenommen und komplett gespeichert, sodass für die nachträgliche Signalauswertung alle Informationen im A-Bild erhalten blieben. Nach der Einstellung durften innerhalb einer Messreihe keine Anpassungen mehr vorgenommen werden. Die einzige Ausnahme war der Austausch des Prüfkörpers.

### Auswertung mittels MATLAB®-Skript

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eigens für die Auswertung der Messungen für die Imprägniergüte ein MATLAB®-Skript erstellt. Im ersten Schritt wurden zunächst Grundfunktionen wie die Darstellung von A-Bild und C-Scan implementiert und die Farbskala des C-Scans im Bereich bis zum maximalen Amplitudenwert skaliert. Im zweiten Schritt wurde der Zeitbereich, in dem sich die maximale Amplitude des A-Bilds befindet, automatisch erkannt und für die Auswertung des C-Scans verwendet. Für die Auswertung ist zunächst der erste detektierte Signalberg relevant (Bild 3.11).

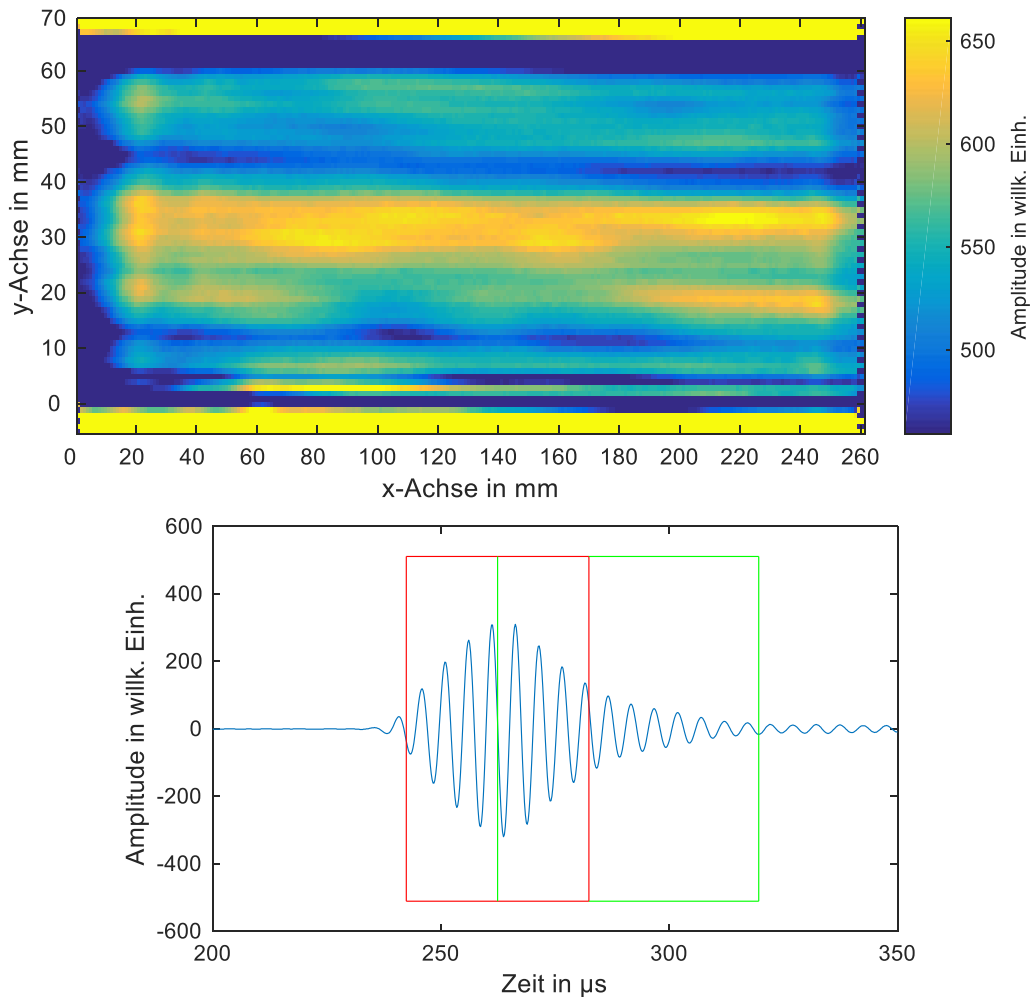


Bild 3.11: Automatische Darstellung mit MATLAB®-Skript. Zugeschnittener und skaliertes Bereich im C-Scan (oben) und A-Bild mit markiertem Bereich der maximalen Amplitude und des Abschwingverhaltens (unten)

Als weiterer Bearbeitungsschritt wurde der für die Auswertung relevante Bereich markiert, in einer neuen C-Scan Darstellung ausgegeben und erneut auf die enthaltenen minimalen und maximalen Amplituden skaliert.

Eine weitere Analysemethode, die Auswertung der sogenannten Coda (Form des Ausschwingens nach Erreichen des ersten Maximums), ist in Anhang B erläutert, sie wurde im Rahmen der Entwicklung dieser Methode untersucht, in dieser Arbeit allerdings aus Übersichtsgründen nicht aufgeführt.

### **3.4.3 Auswertung von Messergebnissen**

Nachdem sichergestellt war, dass aussagekräftige Messungen durchgeführt werden konnten, wird im Folgenden die angewandte Auswertemethode beschrieben. Ist es möglich die vorhandenen Tapeabschnitte derselben Charge und Tapes abweichender Chargen und damit abweichender Qualität zu erkennen, kann mit der so gefundenen Methodik eine allgemeine Einschätzung zur Erfassbarkeit von Qualitätsunterschieden getroffen werden.

#### **Erfassung der Qualität**

Ein Tape einer theoretisch absolut gleichmäßigen Qualität, das mithilfe von Luftultraschall untersucht wird, muss an jeder Stelle ein identisch detektiertes Signal innerhalb der Messunsicherheit ergeben. Ein perfekt gleichmäßiges Tape ist jedoch praktisch nicht herstellbar. Für eine Auswertung der Qualität, bestimmt mit Luftultraschall, scheint eine Form mittels vorheriger Kalibrierung unumgänglich. Es müssen Messwerte der Luftultraschallprüfung eines qualitativ guten Tapes vorliegen, um aus diesen auf die Qualität weiterer Prüfkörper schließen zu können. Daher wird bei der späteren Auswertung eines der Tapes als qualitativ gut angesehen, während die anderen drei Tapes mehr oder weniger stark von dieser Qualität abweichen. Welches Tape tatsächlich als das beste anzusehen ist, ist nicht bekannt.

Es soll zudem eine Möglichkeit gefunden werden, die Gleichmäßigkeit des Tapes zu erfassen. Dazu wurde der gesamte Analysebereich senkrecht zur Faserrichtung in einzelne Abschnitte unterteilt. Die so erhaltenen Abschnitte konnten anschließend miteinander verglichen werden. Hierzu wurde der Mittelwert der Amplituden und die Standardabweichung als Maß für die Gleichmäßigkeit der Qualität in einem vorgegebenen Bereich untersucht. Die beiden Werte werden ebenfalls mit einem kalibrierten Bereich verglichen. Auch wurde kontrolliert, ob in den Abschnitten besonders auffällige Bereiche auftreten. Dies erfolgte durch die Analyse der maximalen, beziehungsweise minimalen Amplituden. So wurden besonders gering und besonders stark dämpfende Stellen erkannt. Anstatt jeden einzelnen Punkt in

Bezug auf die Einordnung der Amplitude zu kontrollieren, wurden der Einfachheit halber nur die größte und die kleinste Amplitude in jedem Abschnitt analysiert.

Der Mittelwert eines Abschnitts wurde mit dem arithmetischen Mittel berechnet. Mit ihm wurde der Durchschnitt aller erfassten maximalen Amplituden der A-Bilder berechnet [104].

$$MW = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad (3.8)$$

Der Mittelwert kann keine Information darüber geben, wie sehr die gemessenen maximalen Amplituden der A-Bilder streuen. Die Varianz ist ein sogenanntes Streuungsmaß, mit dem dieser Unterschied aufgezeigt werden kann. Mit ihr wurde die Standardabweichung (Std) berechnet, der Term unter der Wurzel stellt die Varianz dar [104].

$$Std = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_j - MW)^2} \quad (3.9)$$

Es wurden also insgesamt vier Kategorien – die die unterschiedlichen Qualitätsmerkmale darstellen – bei der Auswertung jedes Abschnitts überprüft und ausgewertet. Diese Kategorien sind der Mittelwert der Amplituden, die maximale und die minimale Amplitude sowie deren Standardabweichung.

### Qualitätskennzahl

Um die Qualität und die Gleichmäßigkeit verschiedener Tapes auf eine simple Art und Weise zu vergleichen, wurde eine Qualitätskennzahl definiert und mittels einem Punktesystem umgesetzt. Um auch größere Abschnitte einfach miteinander vergleichen zu können, wurde die nur theoretisch erreichbare maximale Punktezahl, die ein Abschnitt erreichen kann, auf 1,0 Punkte festgelegt. So konnten zwei verschiedene Prüfkörper gleicher Länge einfach anhand ihrer Punktezahl miteinander verglichen werden. Pro Kategorie in einem Abschnitt wurden zwischen 0 und 0,25 Punkte vergeben.

Die Punkteverteilung geschah über eine Kalibrierkurve, für eine maximale Punktzahl musste das optimale Messergebnis erreicht werden. Deutete das Messergebnis auf eine schlechte Qualität hin, wurden null Punkte vergeben. Weiter ist es sinnvoll, den Unterschied zwischen einem schlechten Tape und einem Tape, das noch in Ordnung ist, möglichst stark abzugrenzen. Unterschiede in einem Bereich eines guten Tapes sollen hingegen weniger stark abgebildet werden. Die zugehörige Grundform dieser Funktion kann mittels einer  $y = 1/x$  Charakteristik abgebildet werden. Diese Funktion

wurde über die x-Achse hinaus nach oben und nach rechts von der y-Achse verschoben, sodass zum einen beim optimalen Ergebnis die Kurve den y-Wert 0,25 erreicht und zum anderen der Schnittpunkt der Kurve mit der x-Achse beim Grenzwert zum schlechten Bereich hin liegt. Diese Änderungen wurden durch folgende Funktion beschrieben:

$$Punkte = \frac{1}{(m * (x_{Messergebnis} - x_V))} + c \quad (3.10)$$

Werte für den Faktor  $m$ , die Verschiebung  $c$  und die Verschiebung  $x_V$  wurden numerisch durch die MATLAB® Funktion „createFit“ bestimmt, die eine Kurve durch vorgegebene Punkte fittet. Für jede Kategorie der bereits erwähnten Qualitätskategorien wurde eine solche Kurve während der Kalibrierung definiert.

#### 3.4.4 Kalibrierung des Systems

Für die spätere Auswertung wurde der C-Scan des Kalibriertapes in Abschnitte unterteilt. Jeder Abschnitt wurde durch die oben genannten vier Kategorien charakterisiert, woraus jeweils eine Kalibrierkurve für die Punktevergabe erstellt wurde. Der für die Näherung nach (3.10) notwendige, dritte Punkt wurde auf eine Schwelle zwischen zwei Bereichen festgelegt. Mit einem Faktor  $a$  wurde die Menge der Punkte eingestellt, die an dieser Schwelle vergeben wurden.

##### Kategorie Mittelwert

Aus den Abschnitten des Kalibrierprüfkörpers wurde der Mittelwert (MW) mit (3.8) gebildet und als optimaler Wert definiert. Für die Abstufung der erreichbaren Punkte wurde die Standardabweichung (Std) (3.9) als Maß der Streuung der Mittelwerte herangezogen. Geht man von einer Normalverteilung aller Messwerte der Kalibrierung aus, liegen nach [105] 68,3 % der erwarteten Messwerte innerhalb des Bereichs der einfachen Standardabweichung, 95,5 % der Werte im Bereich der doppelten Standardabweichung und 99,7 % im Bereich der dreifachen Standardabweichung. Der Bereich bis zur einfachen Standardabweichung (MW-Std und MW+Std) wurde als „sehr gut“ bewertet, der Bereich bis zur doppelten Standardabweichung (MW-2\*Std und MW+2\*Std) als „gut“ und der Bereich bis zur dreifachen Standardabweichung (MW-3\*Std und MW+3\*Std) als „akzeptabel“. Jeder Wert außerhalb wurde als schlecht bewertet.

Ausgehend vom Mittelwert ergeben sich die in Tabelle 3.5 dargestellten Bewertungsbereiche. Die Position des variablen Punktes wurde in diesem Fall auf die Schwelle zwischen „akzeptabel“ und „gut“ gesetzt, siehe Tabelle 3.5.



Tabelle 3.5: Einteilung der berechneten Mittelwerte in Bewertungsbereiche

Bewertung	Schlecht	Akzeptabel	Gut	Sehr gut
Messwert im Bereich bis	$MW \pm >3*Std$	$MW \pm 3*Std$	$MW \pm 2*Std$	$MW \pm Std$

Die aus Tabelle 3.5 ermittelte Kalibrierkurve ist schematisch in Bild 3.12 dargestellt.

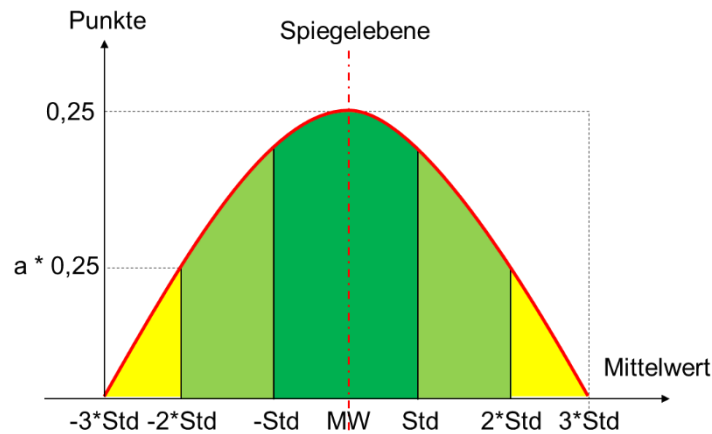


Bild 3.12: Schematische Darstellung der Kalibrierkurve zur Punktevergabe der Kategorie „Mittelwert“

### Kategorie maximale und minimale Amplitude

Für diese beiden Kategorien wurde grundsätzlich ähnlich wie bei der Bewertung des Mittelwerts vorgegangen. Am Beispiel der maximalen Amplitude soll nun die Erstellung der Kalibrierkurve gezeigt werden.

Es wurden die Mittelwerte aller maximalen Amplituden (Amp) der Kalibrierbereiche und deren Standardabweichung (Std) berechnet. Da eine sich dem Mittelwert nähernde (globale) maximale Amplitude auf ein gleichmäßigeres Tape hindeutet, wurde der sehr gut bewertete Bereich von der ersten Standardabweichung bis zum Mittelwert aller Amplituden hin erweitert. Der flexible Punkt wurde hier aufgrund des im Vergleich zur Mittelwertauswertung deutlich größeren Wertebereichs auf die Schwelle zwischen „gut“ und „sehr gut“ gesetzt. Die Bewertungsbereiche sind in Tabelle 3.6 dargestellt.

Tabelle 3.6: Einteilung der maximalen Amplitude in Bewertungsbereiche

Bewertung	Schlecht	Akzeptabel	Gut	Sehr Gut
Messwert im Bereich bis	$Amp + >3*Std$	$Amp + 3*Std$	$Amp + 2Std$	$Amp + Std$

Die aus Tabelle 3.6 schematisch berechnete Kalibrierkurve ist in Bild 3.13 gezeigt.

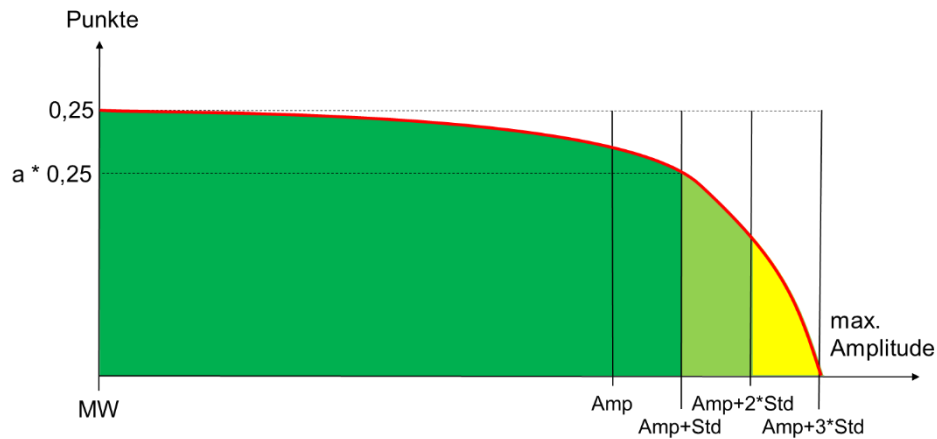


Bild 3.13: Schematische Kalibrierkurve zur Punktevergabe der Kategorie „maximale Amplitude“

Die Kalibrierkurve der minimalen Amplitude wurde gleich ermittelt, allerdings ändert sich das Vorzeichen der Modellfunktion (3.10).

### Kategorie Standardabweichung der Amplituden

Als letzte Kategorie wurde noch die Streuung der jeweils maximalen Amplituden aller A-Bilder in einem Bereich bewertet. Wie zuvor wurden der Mittelwert der Standardabweichung (Std) und deren Streuung, also die Standardabweichung der Standardabweichungen ( $\text{Std}^2$ ) berechnet. Es wurde ähnlich wie bei der Bewertung der maximalen und der minimalen Amplitude der Bereich „sehr gut“ bis zur praktisch nicht erreichbaren Null erweitert. Der flexible Punkt wurde ebenfalls auf die Schwelle zwischen „gut“ und „sehr gut“ gesetzt, die entsprechenden Bewertungsbereiche sind in Tabelle 3.7 dargestellt.

Tabelle 3.7: Einteilung der Standardabweichung in Bewertungsbereiche

Bewertung	Schlecht	Akzeptabel	Gut	Sehr Gut
Messwert im Bereich bis	$MW_{\text{Std}} + >3 \cdot \text{Std}_{\text{Std}}$	$MW_{\text{Std}} + 3 \cdot \text{Std}_{\text{Std}}$	$MW_{\text{Std}} + 2 \cdot \text{Std}_{\text{Std}}$	$MW_{\text{Std}} + \text{Std}_{\text{Std}}$

Die schematische Darstellung der aus Tabelle 3.7 berechneten Kalibrierkurve ist in Bild 3.14 zu sehen.

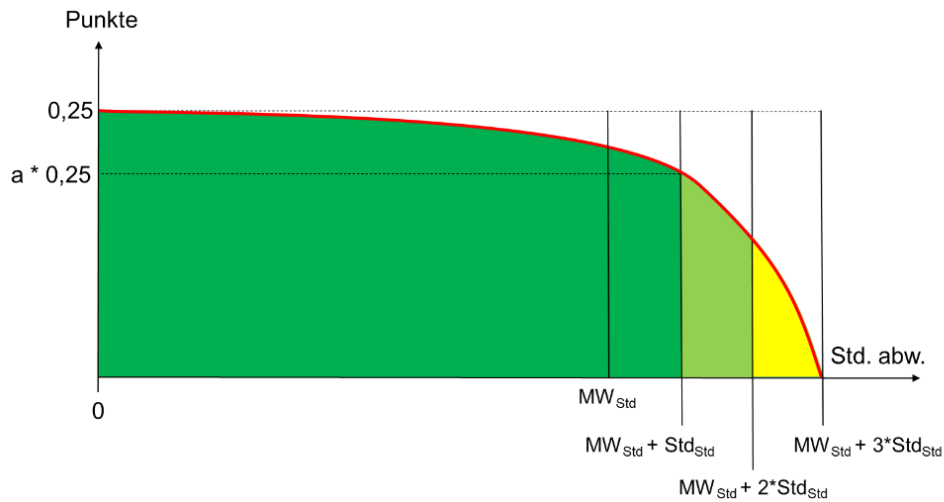


Bild 3.14: Darstellung der Kalibrierkurve zur Punktevergabe der Kategorie „Standardabweichung“

### Auswertung

Nach Erstellung der Kalibrierkurven konnten die Tapes ausgewertet werden. Dazu wurde der auszuwertende Datensatz in Abschnitte unterteilt, dessen Mittelwert und Standardabweichung berechnet, sowie die maximale und minimale Amplitude aus dem Datensatz gesucht. Anschließend wurden diese Werte mithilfe der in der Kalibrierung abgespeicherten Daten ausgewertet. Die gesamte Auswertung des Datensatzes eines mit Luftultraschall vermessen Tapes wurde anschließend in einem neuen Fenster dargestellt, dies ist exemplarisch in Bild 3.15 dargestellt. Es wurde zunächst erneut der Ausschnitt, der ausgewählt und ausgewertet wurde, als C-Scan angezeigt. Unterhalb befindet sich ein Diagramm, in dem die Werte der vier Auswertungskategorien dargestellt sind. Als roter Punkt wurde die maximale Amplitude, als grüner Punkt die minimale Amplitude und blau der Mittelwert mit der zugehörigen Standardabweichung dargestellt.

Zwischen Tabelle und Diagramm wurde an der zugehörigen Position jeweils die schlechteste Einzelbewertung des Abschnitts noch einmal farbig wiedergegeben.

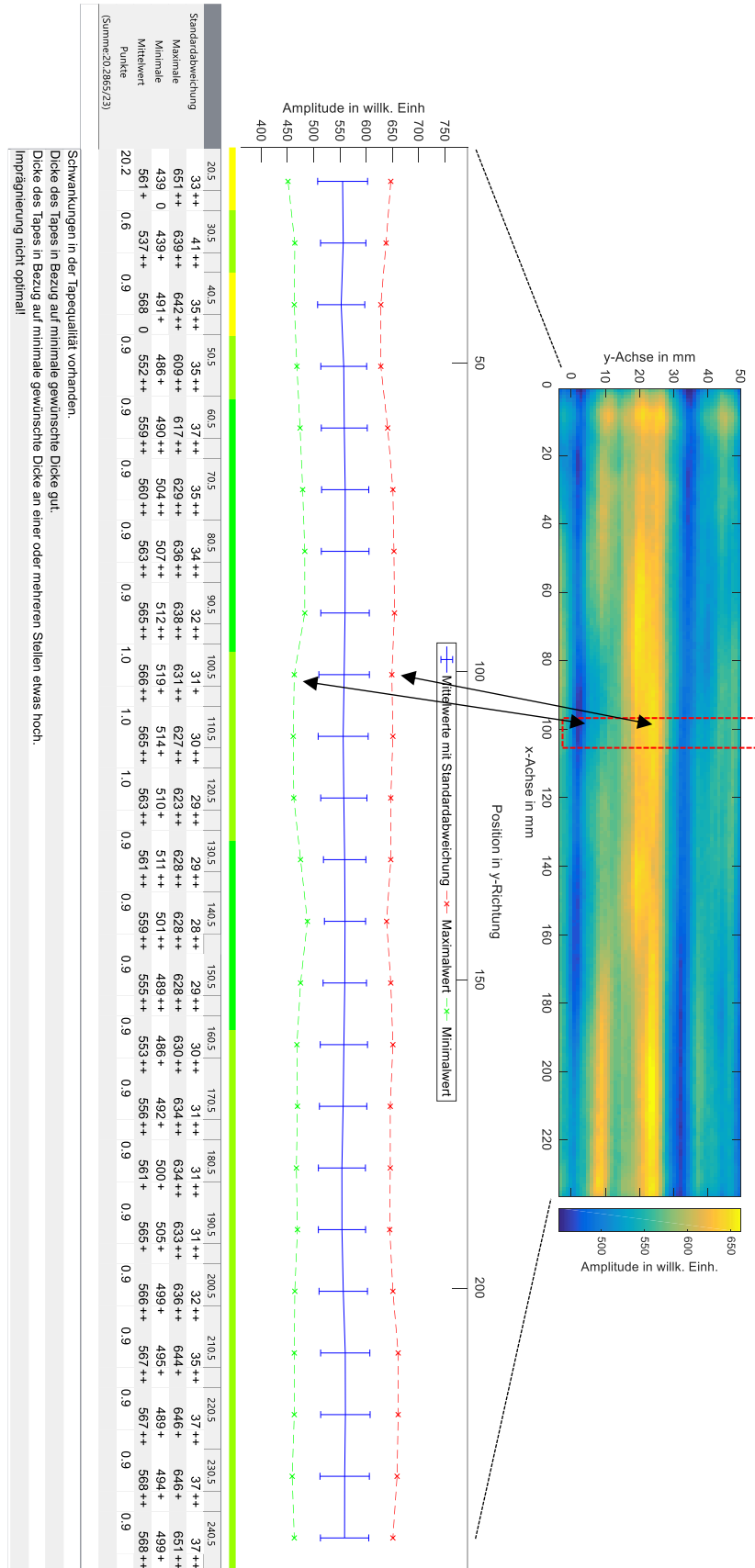


Bild 3.15: Beispielhafter C-Scan, neu skaliert (oben) und Ausschnitt aus der Darstellung der Gesamtauswertung mit tabellarischer und optischer Bewertung (unten)

### **3.5 Untersuchung mittels einer Probability of Detection Analyse**

Nachdem in Kapitel 3.1 unter Anderem unterschiedliche Arten von Längsrissen als zu untersuchende Fehler festgelegt wurden, mussten hierzu Tapes mit entsprechenden Fehlern erstellt werden. Um vergleichende Ergebnisse erzielen zu können, wurde bei allen Messungen für die POD-Analyse Tapes derselben Serie verwendet. Hierzu wurde ein CFK-Tape mit PA6 Matrix, einer Breite von 60 mm, einer Dicke von 0,25 mm und einem Faservolumengehalt von ca. 35 % (laut Herstellerangabe) verwendet, nähere Informationen dürfen auch hier aus Geheimhaltungsgründen nicht angegeben werden.

#### **3.5.1 Prüfkörperherstellung**

In alle untersuchten Tapes wurden künstliche Fehler eingebracht. Hierzu wurden zwei verschiedene Schnittmuster parallel zur Faserrichtung durch die komplette Tapedicke eingebracht, siehe Bild 3.16. Zunächst wurden Fehler gleicher Länge gleichmäßig über die komplette Tapebreite eingebracht, die Risslänge wurde entlang des Tapes variiert (Bild 3.16, links). Dies wurde zum einen mithilfe einer hierfür angefertigten Schablone und eines Skalpells und zum anderen mit einem umgebauten x-y-Scantisch mit einer an der z-Achse installierten Schneidevorrichtung (Bild 3.17) durchgeführt. Mittels zweier unterschiedlicher Arten der Fehlereinbringung können diese bei der späteren Auswertung der POD-Analyse ebenfalls quantitativ ausgewertet werden, dies ermöglicht die Qualifizierung der Fehlereinbringung. Für das zweite Schnittmuster wurden mit der automatisierten Schneidevorrichtung Risse gleicher Länge auf dem kompletten Tape gleichmäßig verteilt. Der Unterschied bestand in der Breite der Risse, hierzu wurden mehrere parallele Schnitte nebeneinander eingebracht (Bild 3.16, rechts).

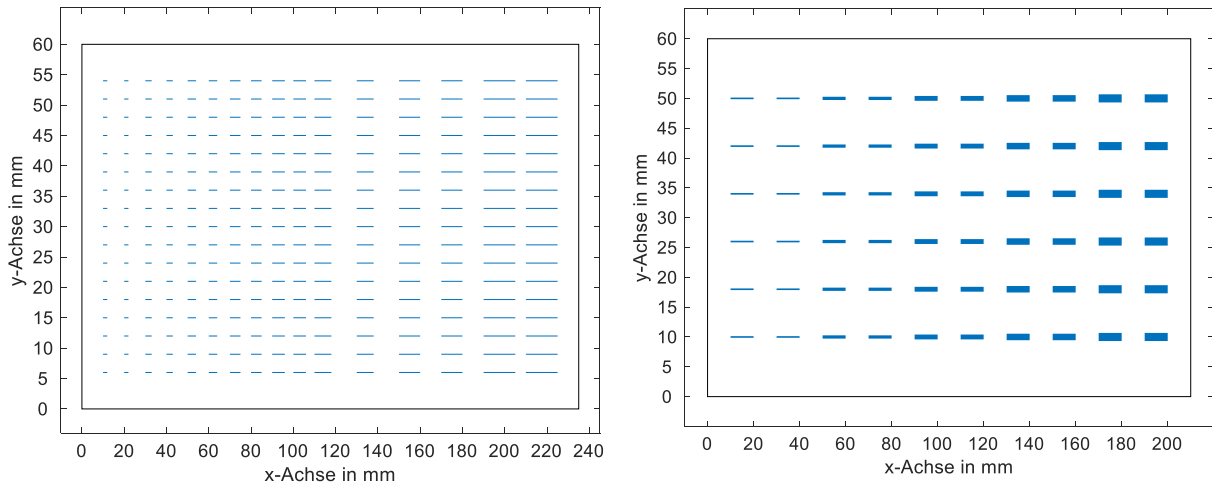


Bild 3.16: Schematische Skizze der Fehlereinbringung, Schnitte mit variierender Länge (links) und Schnitte mit variierender Breite (rechts)

Es wurden, wie in Bild 3.16 schematisch gezeigt, für Schnittlängen von 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10 und 15 mm jeweils 34 einfache Schnitte und für Schnittbreiten von 1, 2, 3, 4 und 5 jeweils 12 Schnitte mit einer Länge von 10 mm erzeugt.

Die automatisierte Schneidevorrichtung besteht aus einem starren Rasiermesser (Bild 3.17, rechts). Die Schnittunterlage aus Aluminium wird über drei Stellschrauben, siehe Markierungen in Bild 3.17, links unter Zuhilfenahme einer Messuhr iterativ parallel zur x-y-Ebene des Koordinatentischs ausgerichtet. Hierbei wurde letztendlich eine Tiefenabweichung zwischen der Schnittunterlage und dem Scantisch über den Schnittbereich von  $\pm 0,005$  mm erzielt, dies entspricht der Genauigkeit der Messuhr.



Bild 3.17: CNC gesteuerte Schneidevorrichtung basierend auf einem x-y-Scantisch, Draufsicht mit markierten Stellschrauben (links) und Schneidevorrichtung mit Rasiermesser Klinge (rechts)

Stellen auf dem Tape mit offensichtlichen Fehlern sowie optisch inhomogenen Stellen wurden für die Einbringung der Fehler nicht herangezogen. Die anschließende automatisierte Einbringung der Fehler geschah wie auch die Ansteuerung des Tapeprüfstands mit der Frässoftware Mach3®. Hierzu wurde ein sogenannter G-Code (auch Maschinencode genannt) verwendet um die einzelnen Eckpunkte des Schneidevorgangs zu definieren.

Es wurden für die Durchführung einer POD-Analyse acht Tapes nach den Vorgaben aus Bild 3.16 hergestellt, diese sind in Tabelle 3.8 aufgelistet.

Tabelle 3.8: Übersicht der Prüfkörper für die POD-Analyse

<b>Fehlermuster</b>	<b>Fehlereinbringung</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Prüfkörperbezeichnung</b>
variierende Länge	manuell	1	POD-m
variierende Länge	automatisch	1	POD-a
variierende Breite	automatisch	6	POD-a-b1 bis POD-a-b6

### 3.5.2 Messaufbau und Messablauf

Für die POD-Analyse wurde das in Kapitel 3.1 bereits erwähnte Luftultraschallsystem und der Prüfstand für Endlosbänder (Prüfkörper mit Fehlermuster 1) und für kurze Tapeabschnitte (Prüfkörper mit Fehlermuster 2) verwendet. Es wurden Prüfköpfe der Firma ULTRAN® mit einer Mittenfrequenz von 200 kHz verwendet, deren Signal mittels eines Fokussierungstrichters (siehe Kapitel 3.3) fokussiert wurde. Beim Verwenden des Tapeprüfstands für Endlosbänder wurde für eine optimale Messung eine Tapeführung installiert, die ein „Flattern“ des Tapes verhinderte (Bild 3.18).

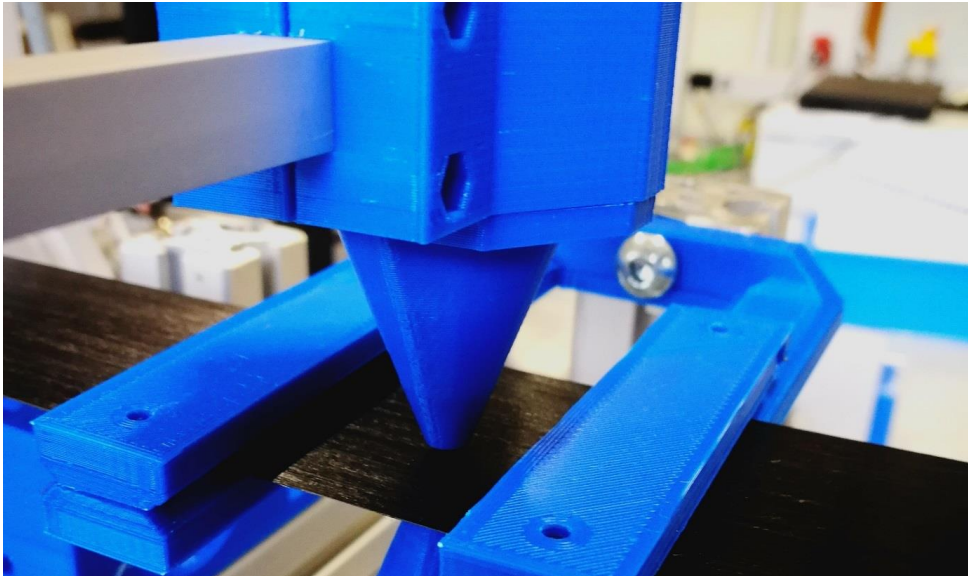


Bild 3.18: Zusätzliche Tapeführung in der Nähe des Messbereichs und der Einsatz eines Fokussierungstrichters

Bei Schnittmuster 1 wurde eine Verzögerung des empfangenen Signals von 200  $\mu\text{s}$  und eine Gatebreite von 350  $\mu\text{s}$  eingestellt, bei Schnittmuster 2 betragen diese Werte 180  $\mu\text{s}$  und 200  $\mu\text{s}$ . Für die Verstärkung wurden bei beiden Messungen 40 dB (extern) und 10 dB (Software) gewählt, es wurden fünf aufeinander folgende Pulse zur Erzeugung des Gesamtpulses verwendet. Die Prüfkörper wurden mäanderförmig mit einer Rasterauflösung von 0,5 mm in Senkrechtdurchschallung abgescannt.

### 3.5.3 Arten der Fehlererfassung

Zur Fehlererfassung wurde ein MATLAB<sup>®</sup> Script verwendet, das an den Fehlerstellen automatisch die unterschiedlichen Fehlergrößen ermittelt.

Die erste Möglichkeit der anschließenden Fehlerberechnung besteht in der Bildung des SNR, es wird in der Bildverarbeitung über nachfolgende Gleichung ermittelt [106].

$$SNR = 10 \log \left( \frac{\text{Fehlersignal} - \text{Mittelwert Tape ohne Fehler}}{\text{rauschen Tape}} \right) \quad (3.11)$$

Das Rauschen  $R$  im Tape wurde über die Standardabweichung einer fehlerfreien Tapefläche berechnet, aus der auch der Mittelwert  $MW$  berechnet wurde.

$$R = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U_i - MW)^2} \quad (3.12)$$

$N$  stellt die Anzahl und,  $U_i$  die Signalwerte der Bildpunkte dar.



$$MW = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i \quad (3.13)$$

Eine zweite Möglichkeit der Fehlererkennung besteht in einer Summenbildung der Messsignale über der Fehlerstelle. Hierbei wurden die entsprechenden Nutzsignale der Bildpunkte über der Fehlerfläche aufsummiert. Das Nutzsignal definiert sich als das Fehlersignal abzüglich des Mittelwerts des Tapes ohne Fehler.

$$SUM = \sum_{i=1}^N (Fehlersignal(i) - MW) \quad (3.14)$$

Die beiden Herangehensweisen unterscheiden sich deutlich in Ihrer Aussage.

Bei dem SNR wird der Fehlerwert über die Größe des Fehlers normiert. So wird bei gleichem mittleren Signal und gleichem Bildrauschen derselbe Fehlerwert ausgegeben. Besonders durch ein geringes Bildrauschen werden hohe SNR-Werte erzielt. Bei den Fehlersummen nimmt das Fehlersignal mit der Größe der Defektstelle zu. Bedingung hierfür ist das Vorhandensein eines Fehlers. Sowohl bei dem SNR als auch bei der Fehlersummenbildung wird an einer fehlerfreien Stelle das Fehlersignal zu null. Das Fehlersignal der Summenbildung ist bedingt durch seine Definition von der Größe des Fehlers abhängig. Fehler mit demselben durchschnittlichen SNR nehmen linear in ihrem Fehlersignal über ansteigende Fehlergrößen zu. So kann sowohl bei bekannten, als auch bei unbekanntem Fehlergrößen, eine Aussage über deren Größe aus dem Fehlersignal getroffen werden. Voraussetzung hierzu ist ein über dem Messbereich gleichmäßig verteiltes Grundrauschen sowie Mittelwert.

### **3.6 Definition der Scanmethodik für einen kontinuierlichen Tapevorschub**

Im Folgenden soll theoretisch dargestellt werden, welche Auflösung bei einer Tapeprüfung abhängig vom Tapevorschub erreicht werden kann. Hierbei soll das Tape quer zur Faserrichtung geprüft werden, dies ist schematisch in Bild 3.19 dargestellt.

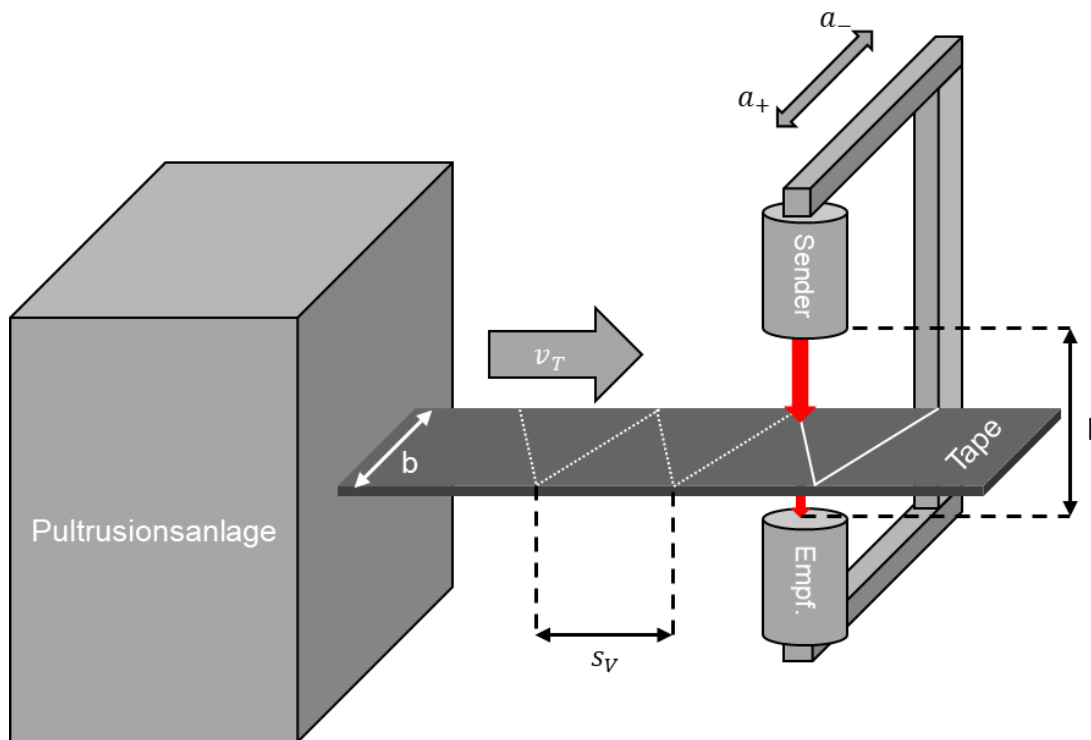


Bild 3.19: Scanmethodik der Tapeprüfung für die theoretische Betrachtung der Auflösung

Wichtigstes Merkmal für die kontinuierliche Prüfung ist der Versatz ( $s_V$ ), der sich durch das zweimalige Fahren des Prüfkopfpaars quer über das Tape ergibt. Zuerst sollten allerdings die physikalischen Grenzen des Luftultraschalls ermittelt werden. Hierzu wird angenommen, dass die Prüfköpfe sich senkrecht gegenüberstehen und eine Luftstrecke von  $l$  besitzen. Die Zeit, die der Luftultraschall für diese Strecke benötigt, kann mit folgender Gleichung berechnet werden.

$$t_{US} = l/v_M \quad (3.15)$$

Wobei mit  $v_M$  die Schallgeschwindigkeit im umgebenden Medium angibt. Die Zeit, die der Schall durch das Tape benötigt, wird in dieser Berechnung vernachlässigt, da diese um mehr als drei Größenordnungen geringer ausfällt.

Zusammen mit der Tapebreite  $b$  und einer lateralen Messauflösung (Aufnahme von Messpunkten pro Strecke) von  $x$ , ergibt sich eine Zeit  $t_{min}$ , die die minimal mögliche Zeit für den Scanvorgang quer zur Tapebreite darstellt.

$$t_{min} = \left(\frac{l}{v_M}\right) * x * b \quad (3.16)$$

Nachdem die theoretisch minimale Zeit - mit der ein Scanvorgang quer zur Tapebreite durchgeführt werden kann - berechnet wurde, erfolgt nun die Berechnung des Versatzes  $s_V$ . Hierzu werden die Beschleunigung  $a$  der Lineareinheit und die

Tapevorschubgeschwindigkeit  $v_T$  benötigt. Mit den Beschleunigungswerten, von auf dem Markt erhältlichen Lineareinheiten mit Zahnriemenantrieb, von maximal  $10 \text{ m/s}^2$  [107] wird erst bei einer Tapebreite von einem Meter die maximale Geschwindigkeit von  $10 \text{ m/s}$  erreicht. Daraus folgt, dass bei der Prüfung von Tapes, deren Breite mit maximal  $0,6 \text{ m}$  angegeben wird, die maximale Geschwindigkeit nie erreicht werden kann. Daher wird die benötigte Zeit ( $t_{real}$ ) aus einem positiven Beschleunigungsvorgang,  $a_+$  bis zur Mitte der Tapebreite und einem negativen Beschleunigungsvorgang  $a_-$  berechnet.

$$t_{real} = \sqrt{\frac{b}{a_+}} + \sqrt{\frac{b}{a_-}} \quad (3.17)$$

Liegt  $t_{real}$  über  $t_{min}$ , ist die physikalische Realisierbarkeit gegeben und es kann zusammen mit der Tapevorschubgeschwindigkeit  $v_T$  der Versatz  $s_V$  berechnet werden.

$$s_V = \left( \sqrt{\frac{b}{a_+}} + \sqrt{\frac{b}{a_-}} \right) * v_T \quad (3.18)$$

Ein Rechenbeispiel soll die Größenordnungen des Versatzes aufzeigen. Es werden in einer Umgebung aus Luft eine Tapebreite von  $0,1 \text{ m}$ , ein Tapevorschub von  $4 \text{ m/s}$ , ein Abstand der Prüfköpfe von  $0,08 \text{ m}$ , eine Auflösung von  $1 \text{ Messung/mm}$  und eine Beschleunigung (pos. und neg.) von  $10 \text{ m/s}^2$  angenommen. Dies ergibt:

$$t_{min} = 23,3 \text{ ms}$$

und

$$t_{real} = 200 \text{ ms}$$

Da die theoretisch minimale Scanzeit weit unter der realen Scanzeit liegt, kann der Versatz berechnet werden.

$$s_V = 13,3 \text{ mm}$$

Mit dieser Berechnung sollte für diesen speziellen Fall also ein Prüfkopf verwendet werden, der einen Durchmesser des Luftultraschalls von mindestens  $14 \text{ mm}$  auf der Tapeoberfläche erzeugt, insofern eine  $100 \%$ -Prüfung gefordert ist.

Durch den Vorschub kann allerdings die wahre Position eines Defekts nicht ohne Rückrechnung bestimmt werden. Infolgedessen wird innerhalb dieser Arbeit - wenn nicht anderweitig erwähnt - der Vorteil des Tapeprüfstands genutzt das Tape jederzeit vor und wieder zurück zu fahren. Hierbei wurden zur Faserrichtung parallele Bahnen geprüft, die anschließend zusammengesetzt wurden.

## 4 Ergebnisse und Diskussion

Einige der hier vorgestellten, gewonnenen Ergebnisse wurden durch vom Verfasser betreute studentische Facharbeiten unterstützt [87, 108–110, 86, 111, 112, 88, 113, 96, 99]. Da alle Ergebnisse und Auswertungen Eigenleistung des Verfassers sind, wird auf eine stellenweise Zitation verzichtet, es sei denn, es wurden Inhalte aus den studentischen Arbeiten übernommen.

### 4.1 Untersuchung des Temperatureinflusses

#### 4.1.1 Ergebnisse der Ermittlung der Sensortemperatur

Die im Folgenden beschriebenen Versuchsergebnisse umfassen die Untersuchung der prinzipiellen Temperaturbereiche, denen die Prüfköpfe ausgesetzt sind. Diese Untersuchung ist notwendig um sicherzustellen, dass die zulässigen Einsatztemperaturen der Ultraschall-Prüfköpfe nicht überschritten werden. Die innerhalb dieser Luftultraschallmessung verwendeten Prüfköpfe der ULTRAN-Group® des Typs NCG200-D13-P38, sind laut Herstellerangaben in einem Temperaturbereich von - 20 °C bis + 65 °C einsetzbar [114].

Der Versuchsaufbau wurde bereits in Kapitel 3.2.1 beschrieben. Das Ergebnis der Messung ist in Bild 4.1 dargestellt. Es ist ein annähernd linearer Anstieg der Prüfkopftemperatur zu erkennen.

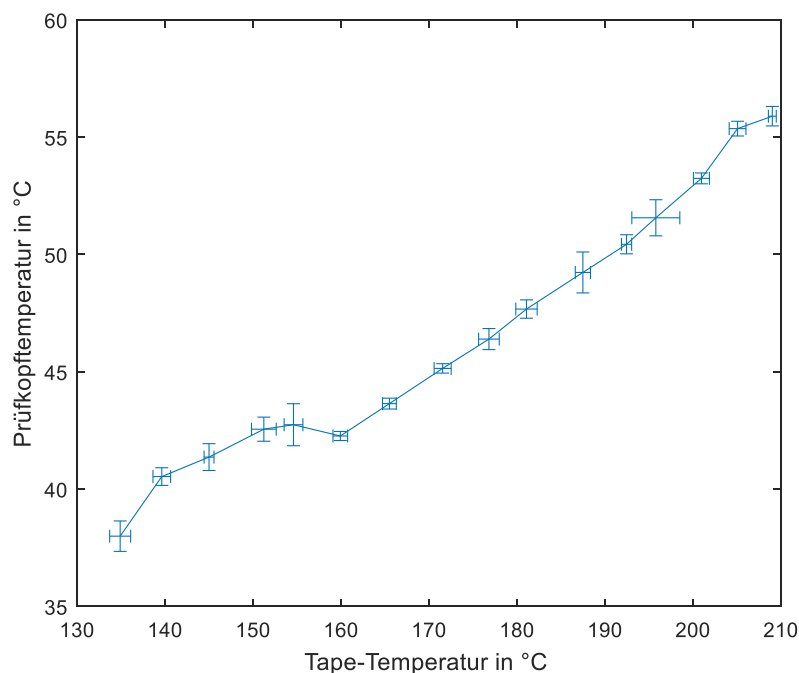


Bild 4.1: Darstellung der Prüfkopftemperatur über der Tape-Temperatur

Weiterhin konnte beobachtet werden, dass schon innerhalb des untersuchten Temperaturbereichs eine leichte Beschädigung des Tapes stattfand. Bei Strahler-

Temperaturen über 375 °C, was mit einer Tape-Temperatur von circa 200 °C einhergeht, konnten leichte strukturelle Beschädigungen festgestellt werden, siehe Bild 4.2. Diese Beschädigungen äußerten sich in lokalem Aufschmelzen der thermoplastischen Matrix. Je höher die Strahler-Temperatur eingestellt wurde, umso drastischer trat diese Beschädigung auf. Teilweise traten bereits Ablösungen zwischen Matrix- und Faserwerkstoff auf. Für weitere Untersuchungen sollten daher Tape-Temperaturen von über 150 °C vermieden werden.

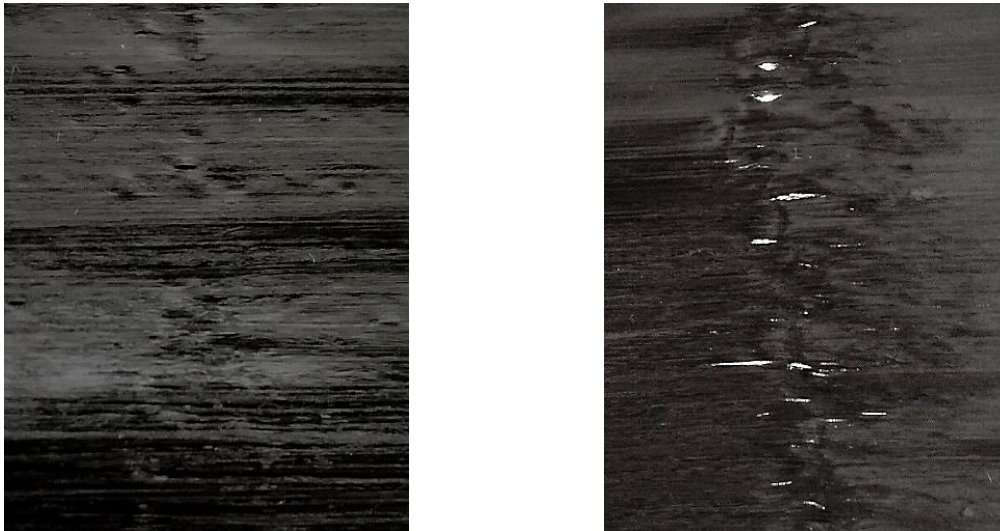


Bild 4.2: Strukturzustand eines CFK-Tapes bei Tape-Temperaturen von 200 °C (links) und 210 °C (rechts)

#### **4.1.2 Ergebnisse der temperaturabhängigen Untersuchung von CFK-Tapes mittels Luftultraschall**

Die nachfolgend zusammengefassten Ergebnisse untergliedern sich, wie auch schon in der Beschreibung der Versuchsdurchführung (Kapitel 3.2.2), in drei Bereiche. Um eine übersichtliche Darstellung der Ergebnisse zu ermöglichen, werden dazu beispielhafte Darstellungen der Ergebnissignale gezeigt. Des Weiteren wird innerhalb der dargestellten Ergebnisse zwischen der Auswertung der Amplitudenwerte und der Phasenverschiebung unterschieden. Alle gezeigten Tapes wurden in einem Temperaturbereich von 25 °C bis 120 °C untersucht, um bei  $\vartheta > 120$  °C eine Verfälschung der Signale durch die zunehmende Welligkeit des Tapes zu verhindern. Bei jeder untersuchten Temperatur wurden über die Tapebreite von 80 mm 20 Messungen aufgenommen und insgesamt viermal wiederholt. Alle Messungen wurden gemittelt und die Standardabweichung berechnet.

### Auswertung der Untersuchung in senkrechter Durchschallung

In Bild 4.3 sind die Amplitudenwerte für die senkrechte Durchschallung gegenüber der Tape-Temperatur gezeigt. Es ist zu erkennen, dass die Amplitudenwerte innerhalb des betrachteten Temperaturbereichs mit Erhöhung der Tape-Temperatur abnehmen.

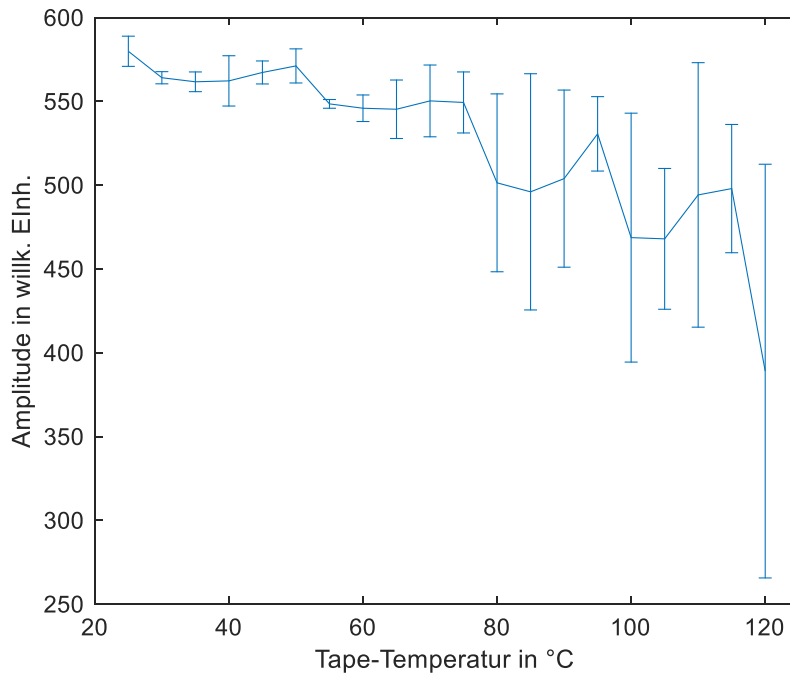


Bild 4.3: Senkrechte Durchschallung: Werte der mittleren Amplitude über der Tape-Temperatur

Die mittlere Amplitude startet mit einem Wert von 580 bei einer Tape-Temperatur von 25 °C und fällt bis auf einen Wert von 390 bei einer Tape-Temperatur von 120 °C ab. Während die mittlere Amplitude um circa 33 % fällt (-3,5 dB), erhöht sich die Streuung der einzelnen Messwerte um über 1000 %. Auffällig ist zudem, dass die Amplitude mit einem Intervall von 25 K periodisch schwankt. So sind lokale Maxima bei Tape-Temperaturen von 25 °C, 50 °C, 75 °C, 95 °C und 115 °C zu beobachten.

In Bild 4.4 sind die jeweils gemittelten Phasenwerte gegenüber der Tape-Temperatur aufgetragen. Ein klarer Trend der Phase ist nur bis zu einer Tape-Temperatur bis circa 45 °C erkennbar. In diesem Bereich verringert sich die Phase bei gleichbleibender Streuung der Phasenwerte von 1 rad bis 0 rad. Ab einer Tape-Temperatur von 50 °C erhöht sich die Streuung derart, dass keine genauen Aussagen gemacht werden können. Auch die gemittelten Phasenwerte schwanken in diesem Bereich zwischen -1 rad und 0,6 rad.

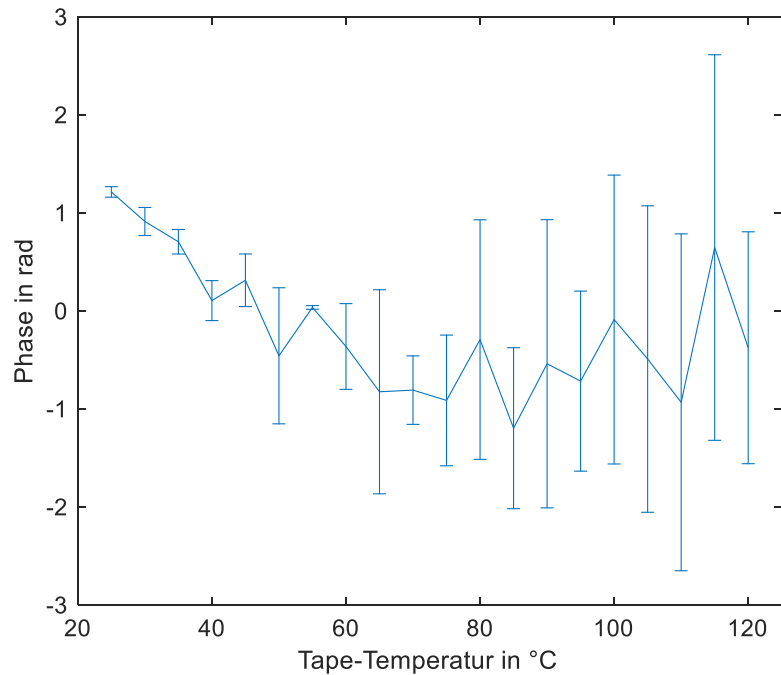


Bild 4.4: Senkrechte Durchschallung: Werte der mittleren Phase über der Tape-Temperatur

In Bild 4.5 sind A-Bilder aus den Messungen bei Tape-Temperaturen von 25 °C und 40 °C gezeigt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird auf eine Darstellung weiterer Temperaturen verzichtet, die hier gezeigten Tendenzen spiegeln das Verhalten des gesamten Temperaturverlaufs wieder.

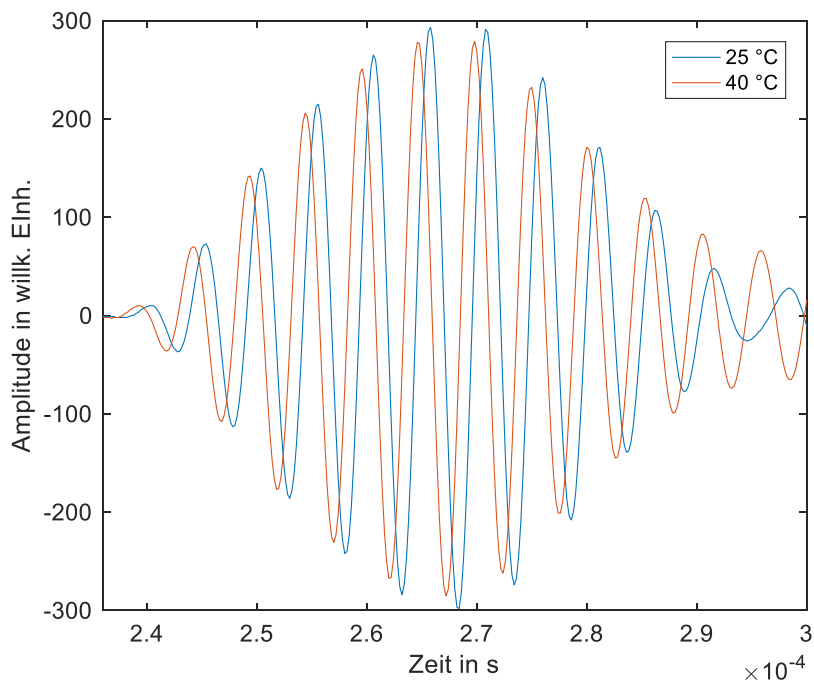


Bild 4.5: Senkrechte Durchschallung: A-Bilder von Messungen bei Tape-Temperaturen von 25 °C und 40 °C.

Die Darstellung in Bild 4.5 soll hierbei verdeutlichen, dass das am Empfänger ankommende Signal mit höher werdender Tape-Temperatur eine geringere Laufzeit

sowie eine geringere Amplitude besitzt. Betrachtet man die den höchsten Peak, so beträgt die Zeitdifferenz  $1,2 \mu\text{s}$  und die Amplitudendifferenz 5 % zwischen den maximalen Amplituden der beiden Tape-Temperaturen.

### Auswertung der Untersuchung von CFK-Tape in schräg versetzter Durchschallung

Analog zur vorangegangenen Durchschallungsart sind in Bild 4.6 die Amplitudenwerte für die schräg versetzte Durchschallung gegenüber der Tape-Temperatur aufgetragen. Hierbei ist mit steigender Tape-Temperatur sehr deutlich ein starker Abfall der Amplitude zu verzeichnen. Eine Regressionsanalyse zeigte, dass der Verlauf dieser Kurve mit einem exponentiellen Ansatz bis zu einer Temperatur von circa  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  darstellbar ist. Oberhalb dieser Temperatur kann der Verlauf nicht mehr gefittet werden, da sich die minimale Amplitude durch das Erreichen des Rauschens einstellte.

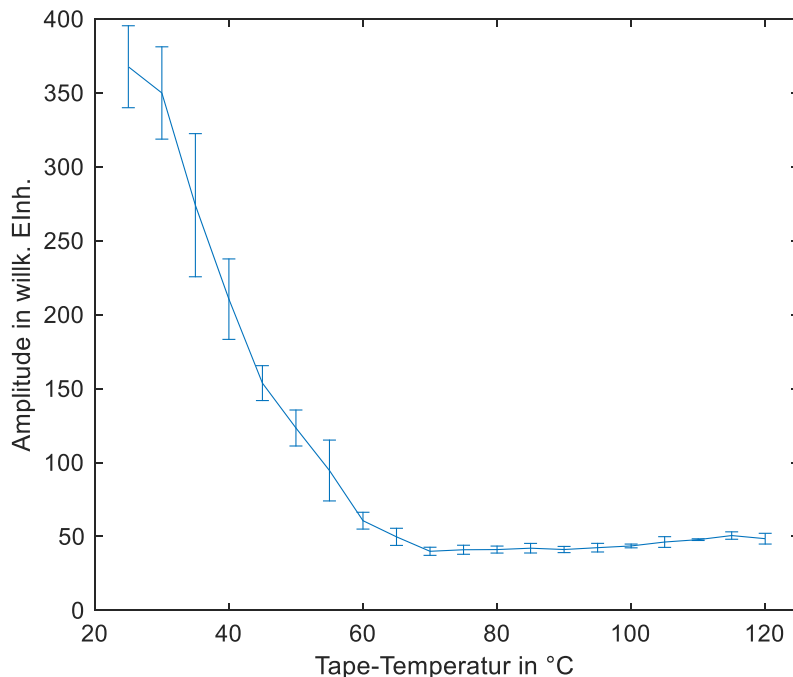


Bild 4.6: Schräg versetzte Durchschallung: Werte der mittleren Amplitude über der Tape-Temperatur

Die mittlere Amplitude startet mit einem Wert von 370 bei einer Tape-Temperatur von  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  und fällt bis auf einen Wert von 50 ab einer Tape-Temperatur von  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  ab, dieser Wert entspricht dem Grundrauschen des Systems für diese Einstellung. Während die mittlere Amplitude um über 86 % fällt (-17 dB), verringert sich die Streuung der einzelnen Messwerte, was ebenfalls mit dem Erreichen des Grundrauschens zu verbinden ist.

Die jeweils gemittelten Phasenwerte gegenüber der Tape-Temperatur sind in Bild 4.7 aufgetragen. Ein klarer Trend der Phase kann hierbei nicht beobachtet werden, da



die Streuung der Werte dies nicht zulassen. Es kann allerdings eine schwache Tendenz zu größer werdenden Phasenwerten beobachtet werden.

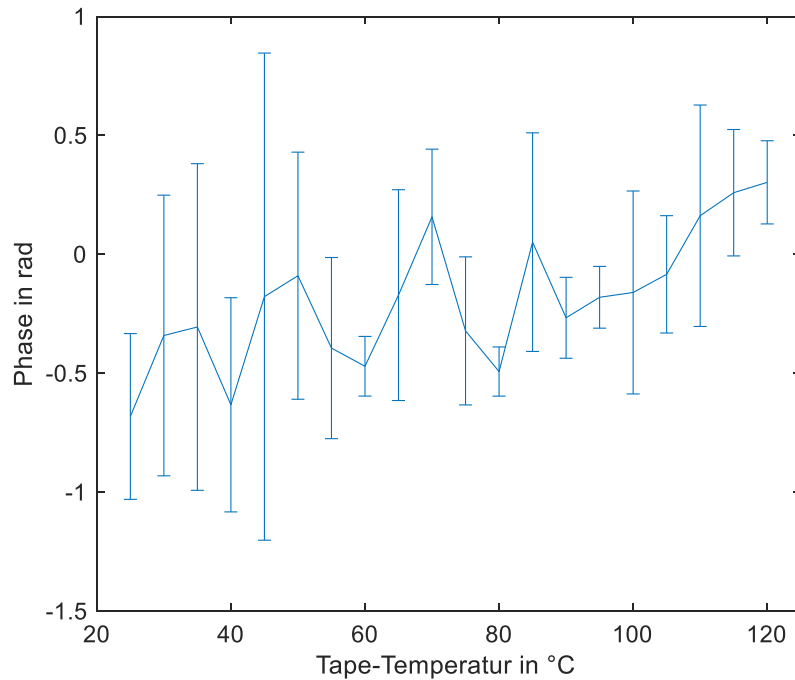


Bild 4.7: Schräg versetzte Durchschallung: Werte der mittleren Phase über der Tape-Temperatur

Auf eine Darstellung von A-Bildern der schräg versetzten Durchschallung wird aufgrund der starken Streuung der Phase verzichtet.

### **Auswertung der Untersuchung von CFK-Tape in schräger Durchschallung**

In Bild 4.8 sind analog zur senkrechten Durchschallung die Amplitudenwerte für die schräge Durchschallung abhängig von der Tape-Temperatur gezeigt. Bei dieser Prüfanordnung ist der Abfall der Amplitudenwerte innerhalb des betrachteten Temperaturbereichs annähernd linear mit Erhöhung der Tape-Temperatur.

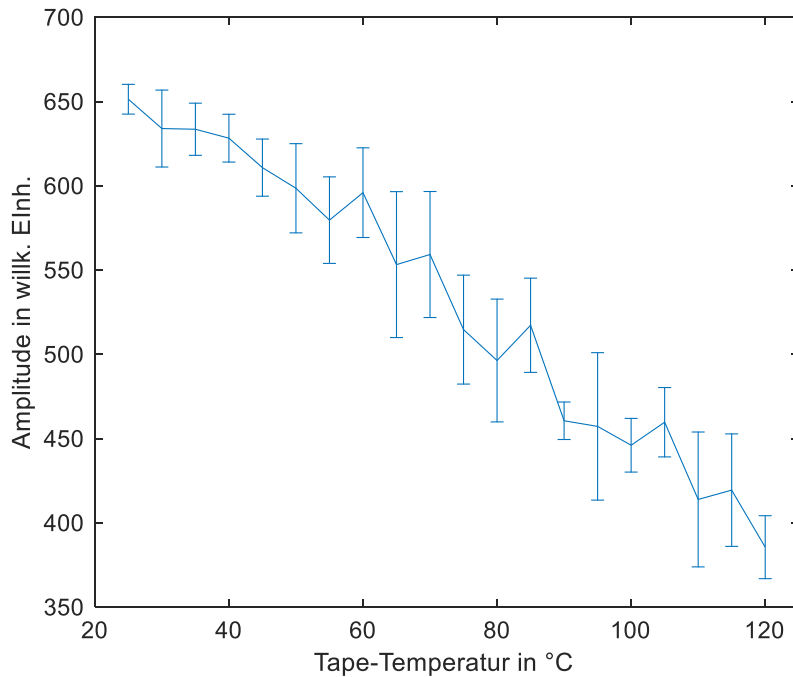


Bild 4.8: Schräge Durchschallung: Werte der mittleren Amplitude über der Tape-Temperatur

Die Amplitude startet mit einem Wert von 650 bei einer Tape-Temperatur von 25 °C und fällt bis auf einen Wert von 385 bei einer Tape-Temperatur von 120 °C ab. Bei der Amplitude kann somit eine Verringerung um circa 41 % (-4,5 dB) bestimmt werden. Die Streuung ist über den gesamten Tape-Temperaturbereich annähernd konstant.

Die in Bild 4.9 aufgetragenen, gemittelten Phasenwerte zeigen bis zu einer Tape-Temperatur von circa 60 °C eine klare Änderung zu kleineren Phasenwerten. Der Bereich der Änderung erstreckt sich von 2 rad bei 25 °C zu 0 rad bei 55 °C. Wie auch bei der senkrechten Durchschallung erhöht sich ab dieser Tape-Temperatur die Streuung derart, dass keine weiteren Aussagen über konkrete Phasenwerte gegeben werden können.

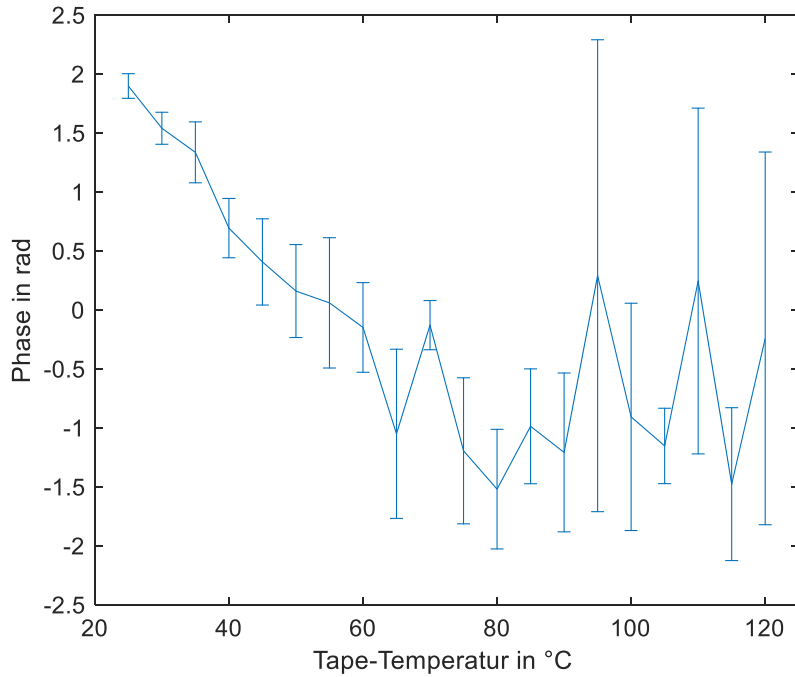


Bild 4.9: Schräge Durchschallung: Werte der mittleren Phase über der Tape-Temperatur

In Bild 4.10 sind A-Bilder aus den Messungen bei Tape-Temperaturen von 25 °C und 40 °C gezeigt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird hier ebenfalls auf eine Darstellung weiterer Temperaturen verzichtet. Es ergeben sich aus den maximalen Peaks eine Zeitdifferenz von 1,0  $\mu$ s und eine Amplitudendifferenz von 2 %.

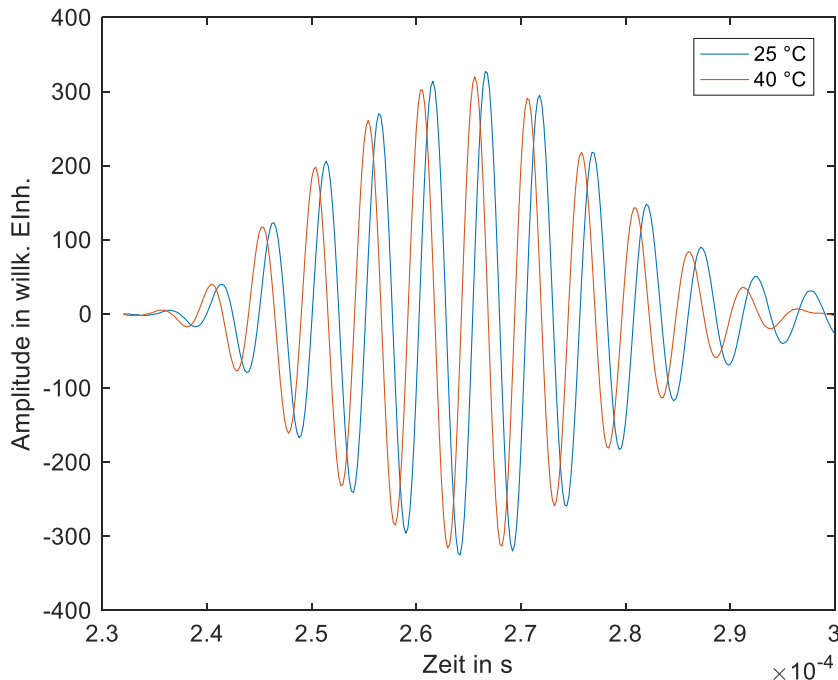


Bild 4.10: Schräge Durchschallung: A-Bilder von Messungen bei Tape-Temperaturen von 25 °C und 40 °C

### 4.1.3 Diskussion der Ergebnisse des Temperatureinflusses

Aus den Ergebnissen der Prüfkopftemperatur ist erkennbar, dass die vom Hersteller angegebene maximale Einsatztemperatur von 65 °C zu keinem Zeitpunkt überschritten wird. Die Einsatzfähigkeit bzgl. der Herstellerangaben ist somit bei den untersuchten Tape-Temperaturen zu jedem Zeitpunkt gegeben. Die Prüfköpfe können daher ohne Gefahr an jeder beliebigen Stelle der Pultrusionsanlage eingesetzt werden, insofern der Abstand zum Tape von mindestens 38 mm eingehalten wird.

Innerhalb der Untersuchungen eines unidirektional verstärkten CFK-Tapes in senkrechter, schräg versetzter und schrägen Durchschallung mittels Luftultraschall konnte festgestellt werden, dass die Amplitude mit steigender Temperatur stets abnimmt. Während bei der senkrechten und schrägen Durchschallung ein annähernd linearer Zusammenhang beobachtet werden konnte, ist der Verlauf bei der schräg versetzten Durchschallung exponentiell. Nach den Vorüberlegungen aus Kapitel 3.2.2 entsprechen diese Verläufe den Erwartungen. Generell gilt bei allen Anordnungen, dass sich der Einfluss der Temperatur auf das Signal in Luft hauptsächlich auf den Bereich oberhalb des Tapes beschränkt, da dieser durch Strahlung und Konvektion beeinflusst ist, während der Bereich unterhalb des Tapes lediglich Strahlung erfährt.

Der lineare Zusammenhang zwischen der Amplitude und der Temperatur kann bei den direkten Durchschallungen damit begründet werden, dass die Luftstrecke von insgesamt 76 mm um einen Faktor 400 größer ist als die Tapedicke (0,18 mm). Der Einfluss des Tapes beschränkt sich auf die Beeinflussung der Streuung, vor allem bei der senkrechten Anordnung. Hierbei kann die Zunahme der Streuung dadurch begründet werden, dass mit zunehmender Temperatur die Matrix durch die geringere Steifigkeit unter Spannung dünner wird. Hierdurch erreicht der Luftultraschall den Empfänger mit einer geringeren Dämpfung. Bei der schrägen Durchschallung tritt dieser Effekt nicht auf, da durch den schräg auftreffenden Ultraschall eine geringere Tapedicke nicht zu einem höheren Signal führt. Durch eine veränderte Dicke müsste der Einfallswinkel geändert werden, um die gleiche Signalhöhe der Plattenwelle zu erreichen. Daraus resultiert auch der lineare Abfall des Signals mit konstanter Streuung der Messwerte über den gesamten Temperaturbereich. Das in Bild 4.3 beobachtete Phänomen der lokalen Amplitudenmaxima kann über den Effekt von konstruktiver und destruktiver Interferenz begründet werden. Verringert sich die Tapedicke mit steigender Temperatur, so verkürzt sich die Laufzeit im Tape minimal, was in einer Phasenverschiebung beim Austritt aus dem Tape resultiert. Die mehrfach im Tape reflektierende Welle könnte demnach mehr oder weniger mit der

ursprünglichen Welle interferieren und somit die periodischen Amplitudenschwankungen hervorrufen.

Auch bei der schräg versetzten Anordnung hat der Luftweg einen Einfluss, nur ist dieser im Verhältnis nicht mehr so ausschlaggebend. Durch den Versatz der Prüfköpfe wurde sichergestellt, dass kein Direktschall zum Empfänger gelangt. Jegliches Signal stammt aus der Re-Emission der angeregten Plattenwelle über eine Strecke von 20 mm. Da diese Strecke eine Abschwächung der Intensität mit exponentieller Abhängigkeit besitzt (vgl. Kapitel 3.2.2), dominiert sie in diesem Fall. Weiterhin sollte nicht außer Acht gelassen werden, dass die Anregung einer Plattenwelle abhängig vom Einschallwinkel des Ultraschalls ist (vgl. Kapitel 2.4.7). Aus diesem Grund ist ein Anteil der Amplitudenänderung auch der Tatsache geschuldet, dass bei erhöhter Temperatur ein anderer Einschallwinkel erforderlich ist. Das viskoelastische Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen erschwert in diesem Fall eine Berechnung des sich ändernden Einfallswinkels, da mit zunehmender Temperatur die Änderungen der mechanischen Eigenschaften nicht linear sind und keine Sprünge aufweisen, wie es zum Beispiel bei Metallen der Fall ist [92]. Die prinzipielle Tendenz ist allerdings, dass der E-Modul, der nach (2.36) und (2.37) die entscheidende Kennzahl ist, mit steigender Temperatur abnimmt [115]. Nimmt man beispielhaft an, dass der E-Modul von Polyamid 6 bei 25 °C gegenüber dem E-Modul bei 60 °C doppelt so groß ist, so ergeben sich nach (2.36) und (2.37) ideale Einfallswinkel von 22° und 26°. Dieser Unterschied von 4° zwischen den beiden Temperaturen erscheint auf den ersten Blick nicht viel, betrachtet man allerdings die Abhängigkeit der Amplitude vom Einfallswinkel aus Bild 2.18, so wird selbst bei dieser Abweichung das Signal drastisch abgeschwächt werden. Dies führt bereits jetzt zu der Aussage, dass sichere und vor allem konsistente Messungen mit geführten Wellen bei Temperaturschwankungen nicht möglich sind. Im Pultrusionsprozess können allerdings diverse Schwankungen auftauchen, da auch die Temperaturregelung einer gewissen Trägheit unterliegt. Ist eine Prüfung mit geführten Wellen erwünscht, so sollte dies nach einer Abkühlstrecke bei konstanter Temperatur (idealerweise Normklima) erfolgen.

Ein weiterer Effekt der Erhöhung der Tape-Temperatur auf das Luftultraschallsignal ist die Veränderung der Phase und damit die Änderung der ToF. Für die Begründung muss hierbei ebenfalls zwischen den Untersuchungen in schräger Durchschallung beziehungsweise senkrechter Durchschallung und der schräg versetzten Durchschallung unterschieden werden. Für die ersten beiden Anordnungen resultiert aus den bereits in Kapitel 3.2.2 dargelegten physikalischen Wirkprinzipien mit steigender Temperatur im Untersuchungsobjekt, letztendlich eine Verkürzung der Laufzeit des Ultraschalls [89]. Eine theoretische Berechnung der ToF-Differenz bei

Temperaturen von 25 °C und 40 °C ergibt 5,3  $\mu$ s bei einer Luftstrecke von 76 mm. Der Unterschied in der experimentell bestimmten ToF-Differenz von 1,2  $\mu$ s in der direkten Durchschallung dadurch begründet werden, dass zum einen die Schallgeschwindigkeit im Tape niedriger ist, zum anderen wird, wie bereits oben erwähnt, die Luft oberhalb des Tapes stärker erwärmt, sodass unterhalb des Tapes die Schallgeschwindigkeit niedriger ist.

Für die Untersuchung mit der schräg versetzten Anordnung kann aufgrund der starken Schwankung keine sichere Aussage über das Verhalten der Phase getroffen werden. Prinzipiell verhält sich die Phase genau umgekehrt zur direkten Durchschallung, sie zeigt eine Erhöhung der ToF. Dies kann nach (2.36) mit der Verringerung des E-Moduls begründet werden. Hierbei verringert sich die Schallgeschwindigkeit mit steigender Temperatur, woraus eine erhöhte Laufzeit resultiert. Des Weiteren ist auffällig, dass die Verschiebung der Phasenwerte bei der Untersuchung mittels Lambwellen weniger stark ausgeprägt ist als bei der Normal- und Schrägtransmission.

Hinsichtlich der später durchgeführten Messungen zur Bestimmung der Qualitätsmerkmale, bei der selbst geringe Unterschiede in der Imprägnierungsqualität erkannt werden sollen, empfiehlt es sich, weitere Messungen bei Raumtemperatur durchzuführen. Leicht zu detektierende Defekte wie Risse oder Inhomogenitäten, die die Amplitude um über 20 dB verstärken oder abschwächen könnten bei erhöhter Tape-Temperatur zuverlässig detektiert werden, Untersuchungen in der Gleichmäßigkeit oder eine PoD-Analyse hingegen nicht.

## 4.2 Entwicklung einer Fokussierung für Luftultraschallprüfköpfe

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Entwicklung der Fokussierungstrichter gezeigt und diskutiert. Diese mittels FDM gefertigten Trichter nach Tabelle 3.3 sind in Bild 4.11 gezeigt.



Bild 4.11: Fokussierungstrichter, hergestellt durch FDM, linear (links), exponentiell (Mitte) und parabolisch (rechts)

Bei den hier gezeigten Fokussierungstrichtern sind bereits Ergebnisse in Bezug auf die Steigung der Funktionen aus den Ausführungen in Kapitel 4.2.1 eingeflossen.

### 4.2.1 Ergebnisse des Reflexionsverhaltens

Mithilfe eines in Matlab® programmierten Codes kann der Reflexionsfaktor in Abhängigkeit vom Einfallswinkel berechnet und in einem Polardiagramm dargestellt werden. Dies ist für den im FDM verwendeten Kunststoff ABS der Firma iGo3D® in Bild 4.12 dargestellt. In dieser Darstellung sieht man sehr deutlich beide Grenzwinkel, den der longitudinalen Welle bei  $11,7^\circ$  ( $R=0,9997$ ) und den der Totalreflexion bei  $22,2^\circ$  ( $R=0,9977$ ). Betrachtet man diese beiden Grenzwinkel, ergibt sich ein Winkelbereich von  $10,4^\circ$ , indem sich der Reflexionskoeffizient aufgrund der Anwesenheit von transmittierten Wellen um  $0,002$  verringert.

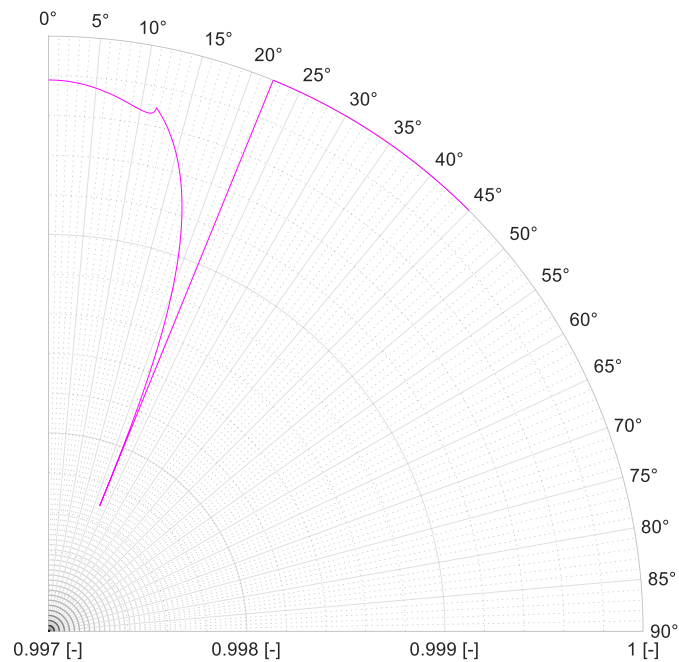


Bild 4.12: Verlauf des Reflexionsfaktors des Kunststoffs ABS der Firma iGo3D® in Abhängigkeit vom Einfallswinkel

Aus dem Ergebnis der Berechnung des winkelabhängigen Reflexionsfaktors lässt sich eine optimale Einschallung des Schalls ableiten. Dieser sollte entweder unterhalb von  $11,7^\circ$  oder oberhalb von  $22,1^\circ$ , ausgehend von der Lotrechten, erfolgen. Andernfalls geht Schalldruck durch die Entstehung von transmittierenden Wellen verloren, auch wenn dieser Effekt sehr gering ausfällt (3 ‰ bei jeder Reflexion). Dieser Fakt wurde in der Konstruktion der Fokussierungstrichter übernommen, sodass der primäre Einschallwinkel stets größer ist. In Bezug auf die spätere Simulation, bei der stets eine Totalreflexion an der Grenzfläche Trichter/Luft angenommen wird, berechnet sich nach einer konservativen Annahme von zehn Reflexionen an der Trichterwand ein Fehler von 3 %, was in dieser Arbeit als vertretbar angenommen wurde. Weitere Einflussfaktoren wie die Rauigkeit oder die Oberflächenqualität haben sicherlich ebenfalls einen Einfluss auf das Signal, für eine Untersuchung der Wirksamkeit der unterschiedlichen Trichterformen sollten diese Faktoren allerdings keine Einschränkung darstellen.

#### 4.2.2 Ergebnisse der Simulation des Schallfelds

Die konstruierten Fokussierungstrichter FOK-linear, FOK-parabolisch und FOK-exponentiell wurden mit den in Kapitel 3.3.3 aufgezeigten Simulationsmethoden in ANSYS® simuliert [99]. Die Ergebnisse werden in dieser Arbeit auf zwei Arten dargestellt: zum einen die Darstellung des Schalldrucks in dB entlang der akustischen Achse, ausgehend vom Austritt aus dem jeweiligen Fokussierungstrichter, zum anderen die Darstellung des radialen Schalldrucks in dB am Empfänger, ausgehend vom Mittelpunkt.



Der Schalldruckverlauf nach Austritt aus dem Trichter für die ersten 20 mm ist in Bild 4.13 dargestellt. Der Schalldruck des FOK-linear weist einen maximalen Wert von 167 dB, FOK-exponentiell von 162 dB und FOK-parabolisch von 153 dB, auf. Der maximale Unterschied aller Trichter von 14 dB bleibt annähernd konstant bis zu einem Abstand von 6 mm, an diesem Punkt besitzt FOK-parabolisch ein lokales Maximum und erreicht hierbei den Wert des FOK-exponentiell, welcher in diesem Bereich, wie auch FOK-linear, ein lokales Minimum besitzt. Die Ausbildung eines solchen Verlaufs lässt auf das Vorhandensein von konstruktiven und destruktiven Interferenzen schließen, wie sie auch in der Einschwingertechnik im Nahfeld [36] zu beobachten sind. Ab diesem Punkt vergrößert sich der maximale Unterschied der Schalldrücke bis zu einem Wert von 27 dB bei 13 mm Abstand. Nach 20 mm Abstand erreichen die Schalldrücke wieder einen maximalen Unterschied von 11 dB, der dem des Ausgangszustandes ähnelt. Prinzipiell sind alle Verläufe des Schalldrucks ähnlich, wobei der Verlauf des FOK-parabolisch seine lokalen Maxima und Minima stets früher ausbildet. Der Schalldruck des FOK-linear bleibt allerdings stets der Höchste.

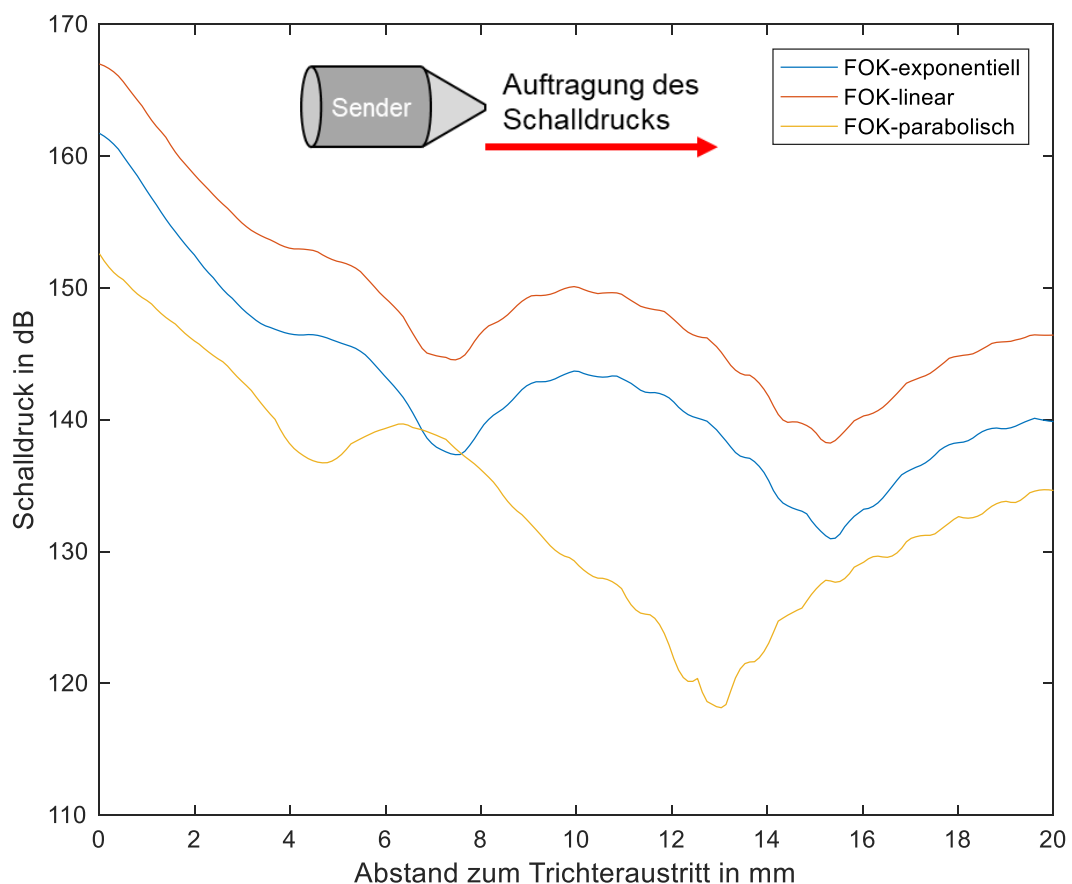


Bild 4.13: Verlauf des Schalldrucks in Abhängigkeit vom Abstand zum Trichteraustritt für FOK-linear, FOK-parabolisch und FOK-exponentiell

Der Verlauf des Schalldrucks in radialer Richtung vom Mittelpunkt des Empfängers aus gesehen ist in Bild 4.14 dargestellt. Bei allen drei Fokussierungstrichtern ist eine Abnahme des Signals, vom Mittelpunkt aus betrachtet, zu beobachten. Während FOK-linear und FOK-exponentiell mit einem Schalldruck von 124 dB, beziehungsweise 123 dB starten und sich auf 121 dB beziehungsweise 114 dB verringern, beobachtet man bei FOK-parabolisch einen annähernd gleichen Schalldruck von circa 102 dB. Lediglich ab einem Abstand von 7 mm steigt der Schalldruck leicht an. Dieser annähernd konstante Verlauf kann mit der Form des Trichters begründet werden. Durch die starke Vergrößerung des Durchmessers nach Durchtreten der Öffnung (vgl. Bild 4.11, rechts) kann sich der Schall bereits nach kurzer Zeit im kompletten Volumen gleichmäßig ausbreiten.

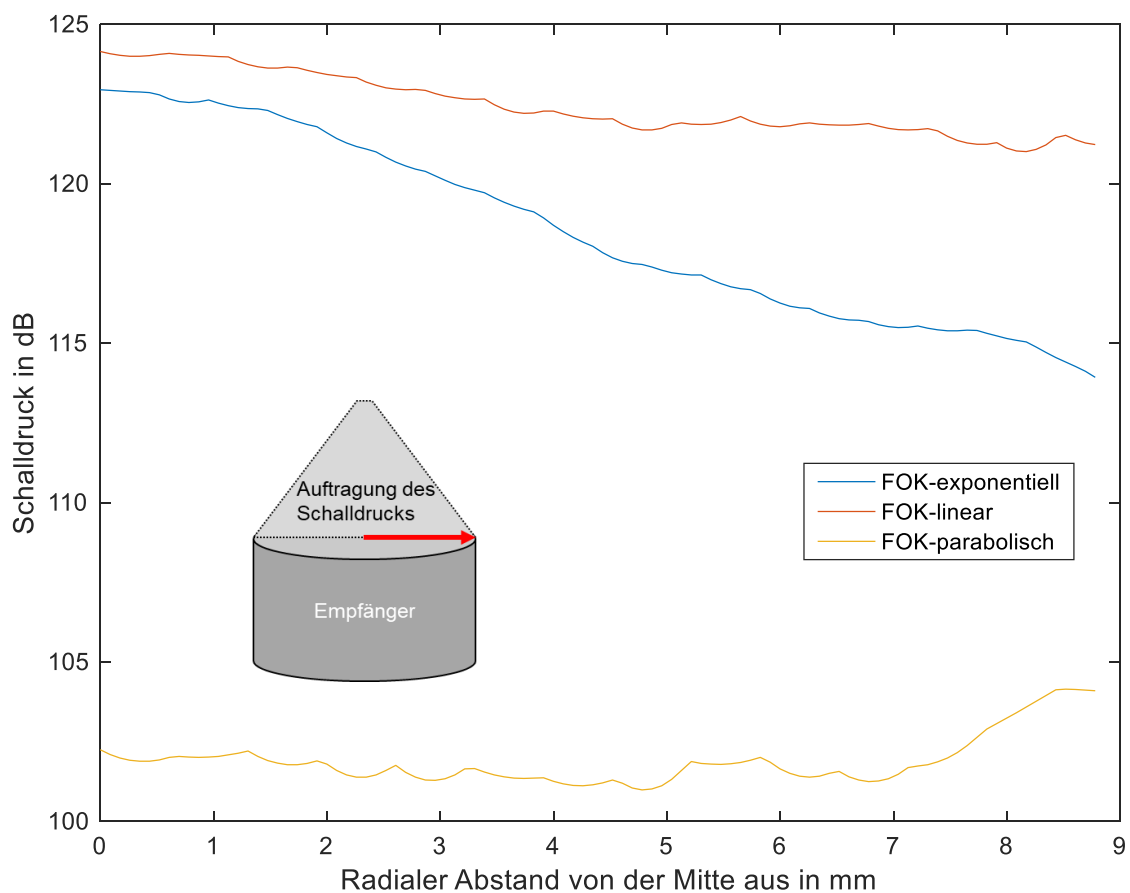


Bild 4.14: Verlauf des radialen Schalldrucks am Empfänger in Abhängigkeit vom Abstand zum Mittelpunkt für FOK-linear, FOK-parabolisch und FOK-exponentiell

Die gezeigten Simulationsergebnisse zeigen einen klaren Trend zu den Fokussierungstrichtern FOK-linear und FOK-exponentiell, wobei die lineare Version stets geringfügig höhere Schalldrücke erzielte.

### 4.2.3 Ergebnisse der Schallfeldvermessung und der Auflösung

Die Ergebnisse der Schallfeldvermessung sind in Bild 4.15 für den in Anhang A, Bild 7.2 dargestellten Prüfkopf, einmal ohne und anschließend mit den in Tabelle 3.3 aufgelisteten Fokussierungstrichtern, gezeigt. Bei allen dargestellten Bildern des Schallfelds wurde dieselbe Skalierung verwendet.

Entgegen den Angaben im Datenblatt des Prüfkopfs gibt die Schallfeldvermessung keine Punktfokussierung wieder. Die im Datenblatt angegebene Fokuslänge von 38 mm kann bei Nutzung der Trichter nicht untersucht werden, da diese Länge 1 mm nach Austritt aus dem Trichter wäre und mit der ACU-Vibrometry eine Darstellung des Schallfelds erst nach circa 2 mm möglich ist. Für Vergleichszwecke werden die Signale nach 40 mm ausgewertet (vertikale Linien in Bild 4.15). Es ergibt sich ein Durchmesser der Fokusfläche von 7 mm ohne Fokussierung. Mit dem Fokussierungstrichter FOK-linear ergibt sich ein Durchmesser der Fokusfläche von 3,5 mm, bei FOK-parabolisch einer von 5 mm und bei FOK-exponentiell einer von 2,5 mm. Es stellt sich eine Signalabschwächung gegenüber des Prüfkopfs ohne Fokussierungstrichter von -15 dB (FOK-linear), -12 dB (FOK-parabolisch) und -19 dB (FOK-exponentiell) ein. Aufgrund einer angenommen punktsymmetrischen Ausbildung des Schallfelds wurden die Prüfköpfe nur einseitig vermessen. Trotz eines Bohrungsdurchmessers von 2,6 mm und somit dem 1,5-fachen der Wellenlänge können in Bild 4.15, bis auf FOK-exponentiell, Nebenkeulen erkannt werden. Diese deuten auf Beugungseffekte hin. Durch eine spätere beidseitige erzwungene Fokussierung der Prüfköpfe sind diese Nebenkeulen für die Messung irrelevant. Bei anderen Bauteilgeometrien oder Prüfkopfanordnungen, können sie jedoch ungewollte Reflexionen und somit Störungen der Messung hervorrufen. Allein die Werte der Signalabschwächung deuten darauf hin, dass mit FOK-parabolisch die geringsten, und mit FOK-exponentiell die größten Verluste zu erwarten sind. Die bestmögliche Auflösung wird bei FOK-exponentiell erwartet, da dieser Trichter den geringsten Signaldurchmesser besitzt und gleichzeitig keine Nebenkeulen zu beobachten sind.

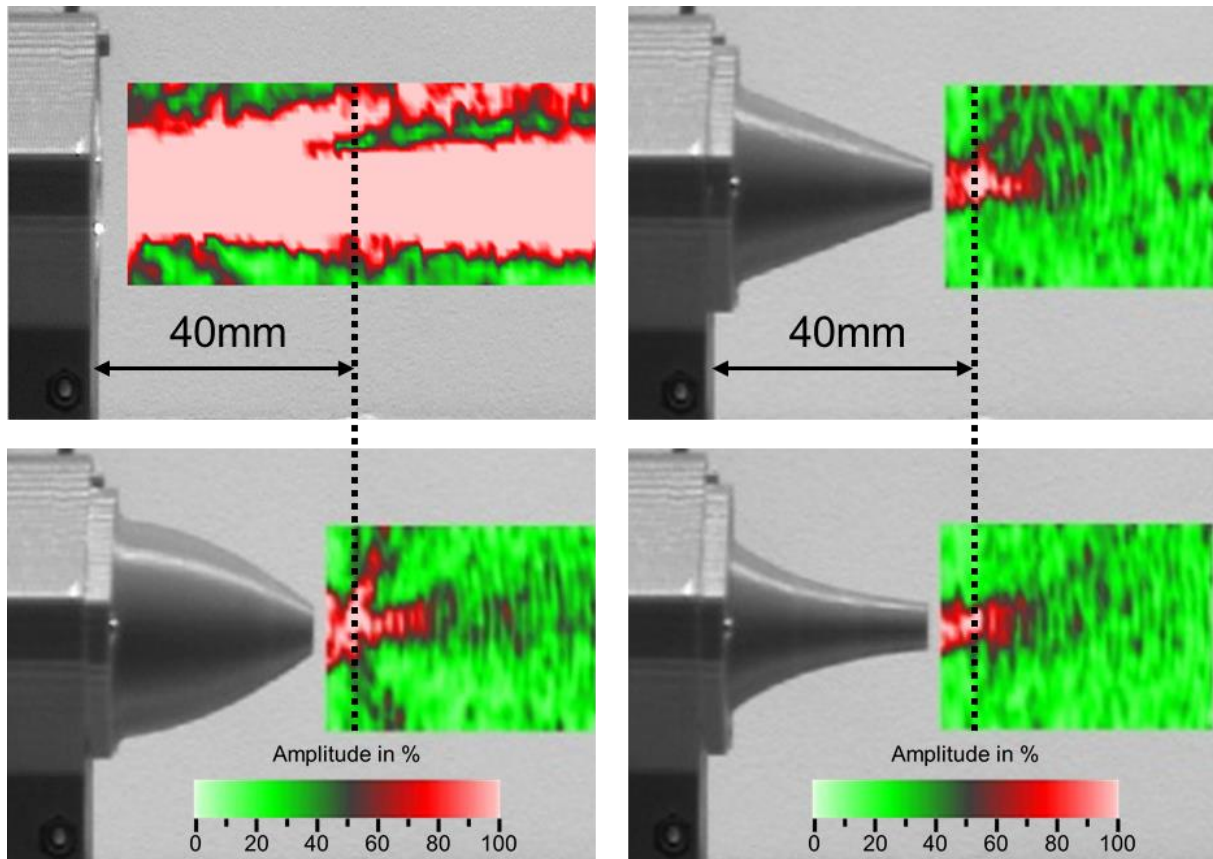


Bild 4.15: Schallfeldvermessung mit der ACU-Vibrometry-Methode ohne Fokussierung (o. l.), FOK-linear (o. r.), FOK-parabolisch (u. l.) und FOK-exponentiell (u. r.)

Für eine quantitative Untersuchung der Fokussierungsqualität der gefertigten Fokussierungstrichter wurden diese zunächst bezüglich ihrer A-Bilder an Luft (vgl. Kapitel 3.3.4) untersucht. Die Ergebnisse sind in Bild 4.16 dargestellt. Für Vergleichszwecke wurden alle Skalierungen konstant gehalten. Gegenüber dem A-Bild ohne Fokussierung können bei den mit Trichter aufgenommenen A-Bildern Signalverluste beobachtet werden. Eine Auswertung über jeweils 200 A-Bilder ergab eine Signaländerung gegenüber der Messung ohne Fokussierung von  $-14,3$  dB bei FOK-linear,  $-29,0$  dB bei FOK-parabolisch und  $-15,2$  dB bei FOK-exponentiell. Die Streuung der Amplitudenwerte liegt bei circa  $0,06$  %.

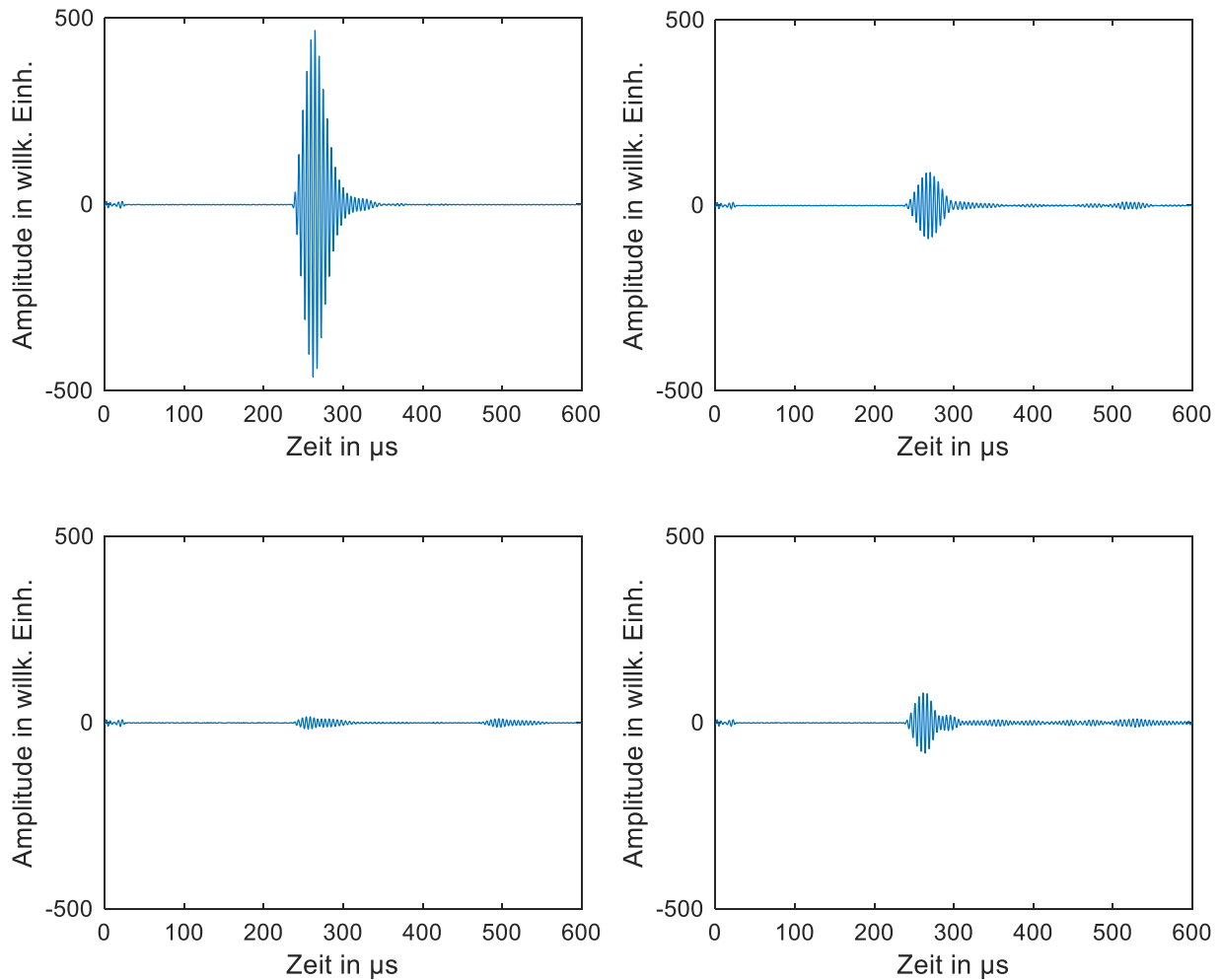


Bild 4.16: Vergleichende A-Bilder an Luft ohne Fokussierung (o. l.), FOK-linear (o. r.), FOK-parabolisch (u. l.) und FOK-exponentiell (u. r.)

Für die Betrachtung von Nebenreflexionen werden die in Bild 4.16 gezeigten A-Bilder neu skaliert, dies ist in Bild 4.17 gezeigt. Bei allen A-Bildern mit Fokussierungstrichtern können, im Gegensatz zur Messung ohne Fokussierung, weitere Maxima detektiert werden. Diese werden bei allen Trichtern nach der zweifachen Zeit gegenüber dem ersten Puls empfangen, was bedeutet, dass dies auf eine Mehrfachreflexion zwischen dem Sender und dem Empfänger zurückzuführen ist. Zusätzlich dazu, kann bei FOK-linear und FOK-exponentiell starkes Rauschen zwischen den beiden bereits erwähnten Maxima beobachtet werden, was auf die Oberflächenrauigkeiten in den Trichtern zurückzuführen ist.

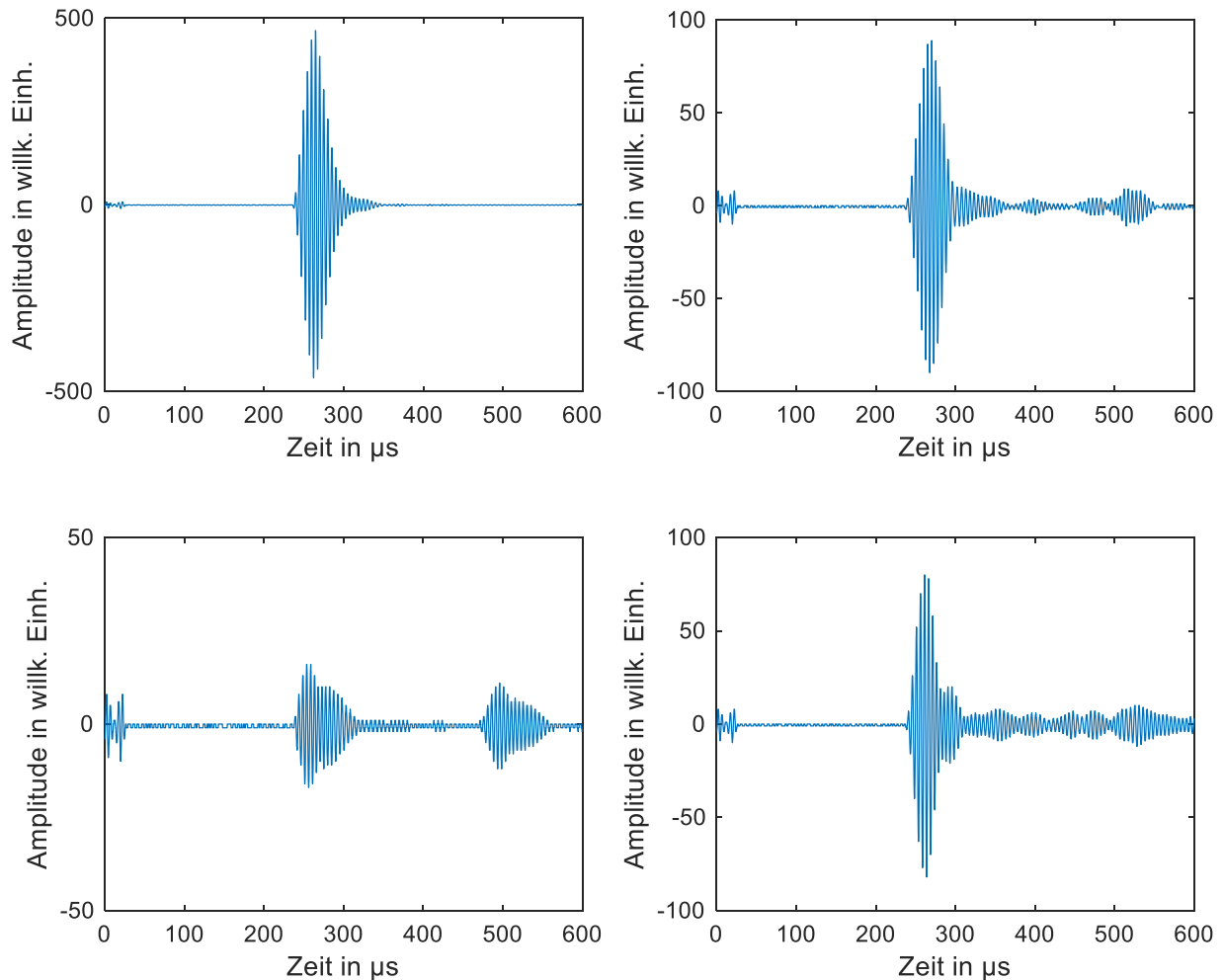


Bild 4.17: Vergleichende A-Bilder an Luft ohne Fokussierung (o. l.), FOK-linear (o. r.), FOK-parabolisch (u. l.) und FOK-exponentiell (u. r.), neu skaliert

Anhand dieser Ergebnisse lässt sich bereits sagen, dass eine Fokussierung über den Trichter FOK-parabolisch aufgrund der starken Abschwächung des Schalls im Vergleich zu den beiden anderen Fokussierungstrichtern nicht sinnvoll erscheint. Aus diesem Grund wurden FOK-linear und FOK-exponentiell weiter miteinander verglichen, indem einfache A-Bilder an exakt derselben Stelle eines Tapes aufgenommen wurden. Diese Ergebnisse sind in Bild 4.18 gegenübergestellt. Wie auch bei den Messungen an Luft, wurden die Mittelwerte der maximalen Amplituden ausgewertet. Es stellte sich heraus, dass das Signal bei FOK-exponentiell um 1,5 dB stärker ist als bei FOK-linear. Die Streuung der Amplitudenwerte liegt bei circa 1 %. Auffällig ist bei beiden Fokussierungen ein zweiter empfangener Puls mit geringerer Amplitude, direkt hinter dem Hauptpuls. Der Ursprung dieses Pulses kann durch die Reflexion des Ultraschalls zwischen Prüfkopf und Tape begründet werden.

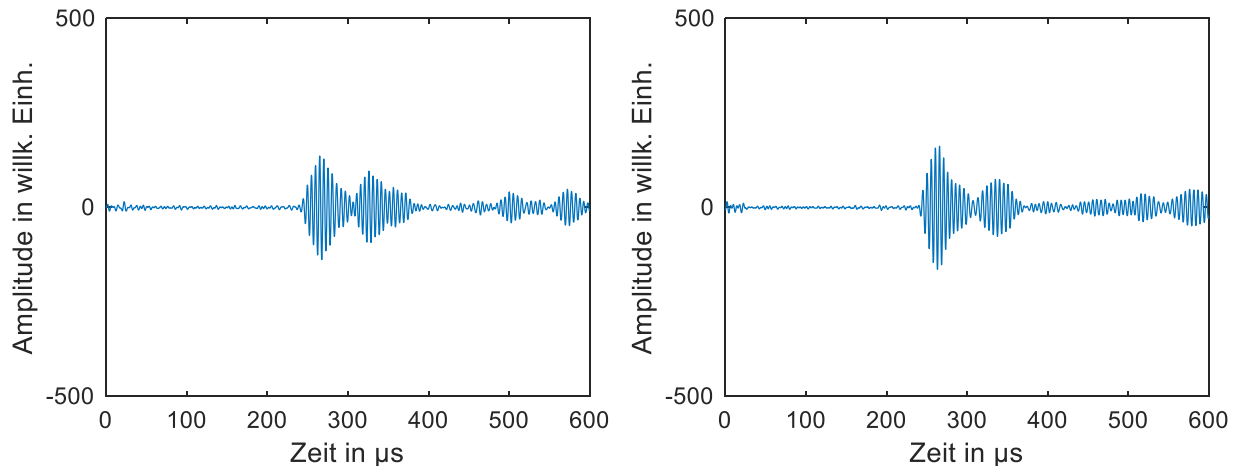


Bild 4.18: Vergleichende A-Bilder mit Tape mit FOK-linear (links) und FOK-exponentiell (rechts)

Auffällig ist, dass die Signalstärke bei FOK-linear, im Vergleich zu FOK-exponentiell, an Luft zwar um 0,9 dB größer, mit Tape jedoch um 1,5 dB geringer ist. Zwar ist dieser Unterschied gering, eine Untersuchung der unterschiedlichen Verstärkungsmethoden soll dennoch diesen Effekt zumindest ansatzweise erklären.

Bei den in dieser Arbeit durchgeführten Messungen wurde stets ein externer Verstärker vom Typ Panametrics® 5660C mit 40 dB Verstärkung mit einer Bandbreite (-3 dB) von 500 Hz bis 2 MHz sowie ein digitaler, interner Verstärker (DASEL® Airscope TT) verwendet. Bei den Messungen an Luft wurde bisher kein externer Verstärker verwendet, da ansonsten durch die Signale ohne Fokussierung der Empfänger übersteuern würde. Um den Einfluss des externen Verstärkers zu untersuchen sind in Bild 4.19 die A-Bilder an Luft lediglich mit externer Verstärkung für FOK-linear und FOK-exponentiell gezeigt. Die Signalunterschiede beschränken sich in diesem Fall auf 0,1 dB, die Pulsbreite nimmt allerdings bei FOK-exponentiell um circa 50  $\mu\text{s}$  zu.

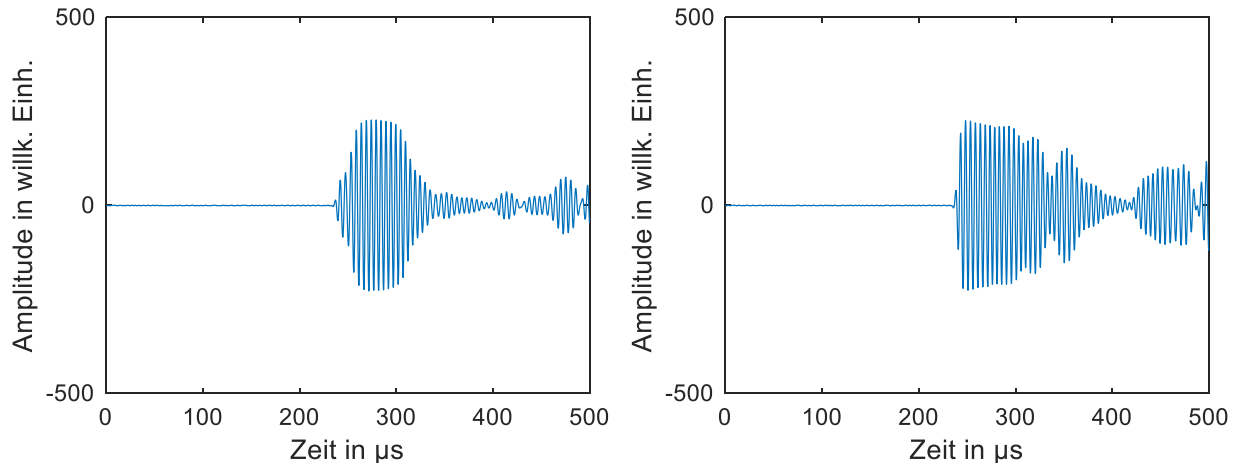


Bild 4.19: Vergleichende A-Bilder an Luft ohne interne Verstärkung mit FOK-linear (Links) und FOK-exponentiell (rechts)

Es scheint, als hätte der externe Verstärker einen Einfluss auf die Signalauswirkung, der abhängig von der Art des Fokussierungstrichters ist. Diese Vermutung kann bei Betrachtung von Bild 4.20 weiter bestätigt werden. Hier sind die A-Bilder von FOK-linear und FOK-exponentiell an Luft und am Tape ohne eine externe Verstärkung gezeigt. Hierbei wurde die interne Verstärkung auf 40 dB gestellt, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Die Auswertung der maximalen Amplitude ergibt eine Abweichung an Luft von 0,3 dB und am Tape von 0,2 dB, wobei in beiden Fällen die Amplitude von FOK-linear einen höheren Wert besitzt. Diese Beobachtungen zeigen, dass die oben aufgetretenen Unterschiede bezüglich der maximalen Signalamplitude am Tape und an Luft vermutlich auf den externen Verstärker zurückzuführen sind. Die genauen Ursachen dieses Phänomens könnten in einer erhöhten Anstiegszeit des externen Verstärkers zu finden sein, diese Information ist allerdings nicht im Datenblatt aufgeführt.



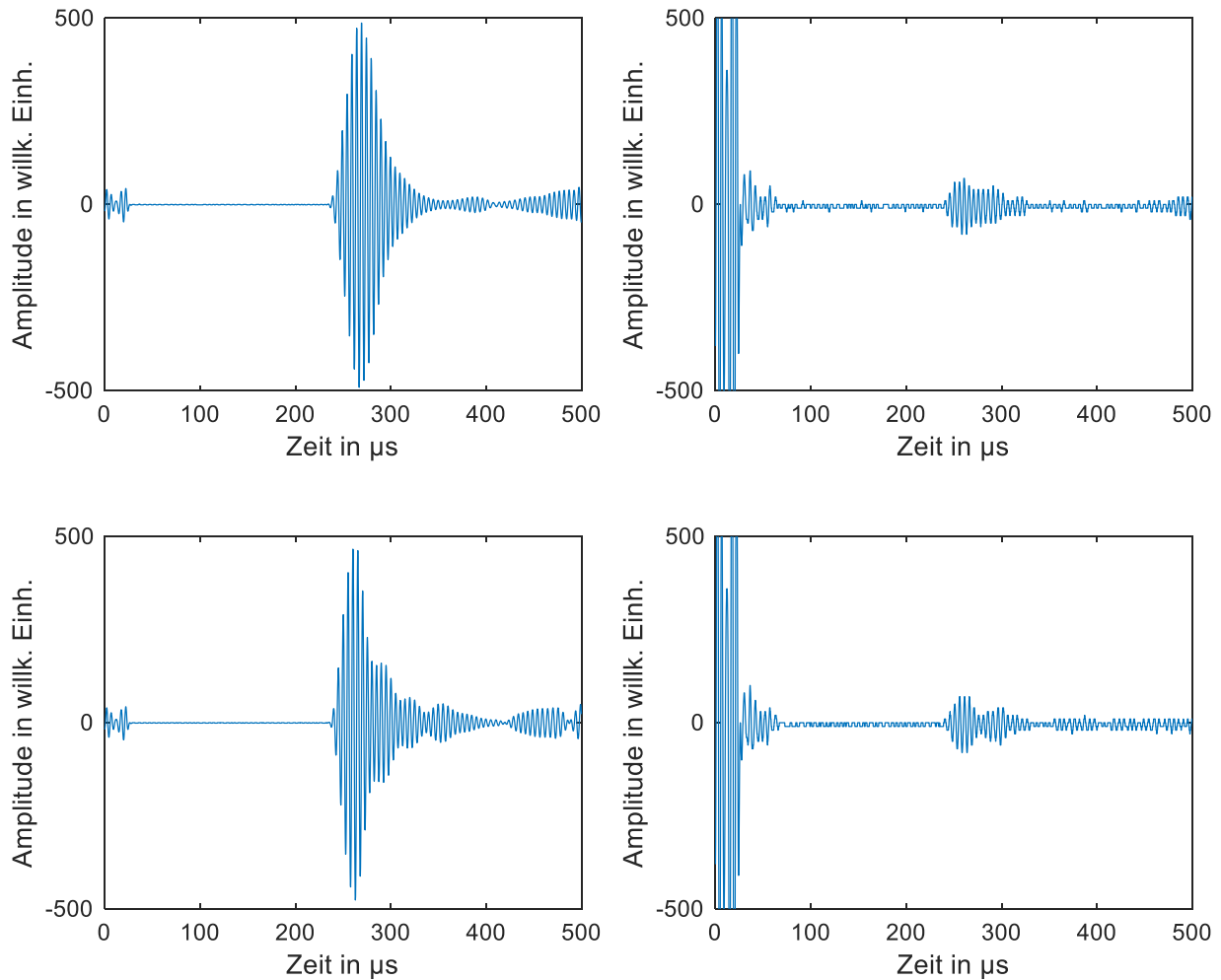


Bild 4.20: Vergleichende A-Bilder ohne externe Verstärkung mit FOK-linear an Luft (o. l.), FOK-linear am Tape (o. r.), FOK-experimentell an Luft (u. l.) und FOK-exponentiell am Tape (u. r.)

Für eine quantitative Messung der Verbesserung der Auflösung wurden C-Scans an dem in Bild 3.9 gezeigten Aluminium-Lochblech durchgeführt. Bei jeder Messung wurde die interne Verstärkung erneut eingestellt, damit für alle Messungen eine vergleichbare Signalamplitude existiert. Für die Messung ohne Fokussierung ist der C-Scan in Bild 4.21 dargestellt. Die Bereiche mit geringen Amplituden rechts und links des Blechs wurden durch das Klebeband verursacht, das zur Befestigung des Blechs auf dem Tape verwendet wurde. Auf den ersten Blick konnte das Loch mit 2,3 mm nicht gefunden werden. Über eine Darstellung der maximalen Amplituden entlang einer Linie (siehe Bild 4.24), kann dies dennoch dargestellt werden.

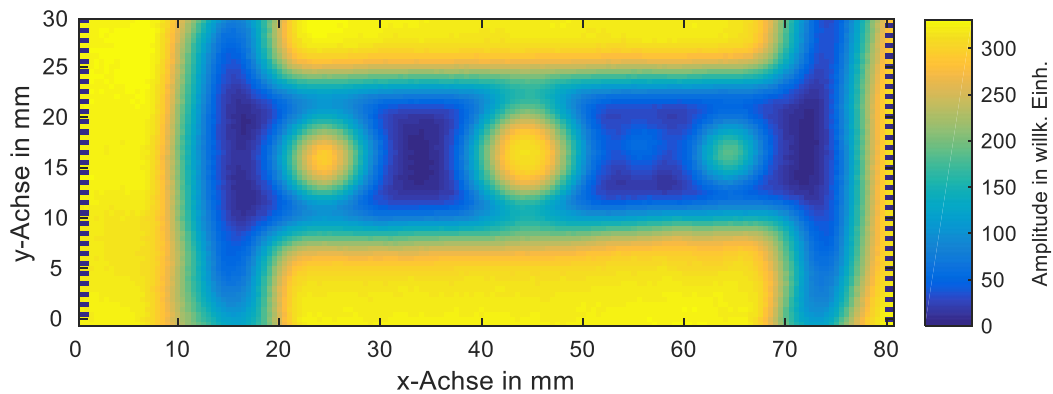


Bild 4.21: C-Scan der Auflösungs-messung an einem Aluminium-Lochblech ohne Fokussierung

In Bild 4.22 ist der C-Scan der Auflösungs-messung am Alu-Lochblech mit FOK-linear dargestellt. In dieser Messung kann das kleinste Loch sehr deutlich dargestellt werden. Ebenfalls fallen Interferenzeffekte am Rand des Blechs auf. Diese resultieren in einem Streifenmuster sowie in Bereichen mit sehr hoher Amplitude. Die Interferenzeffekte tauchen aufgrund der erhöhten Auflösung auf, da sich nun an den Flanken des Blechs die Wellen mehrfach reflektieren und überlagern. Ob dies einen Einfluss auf die Auflösung hat, wird im Weiteren untersucht.

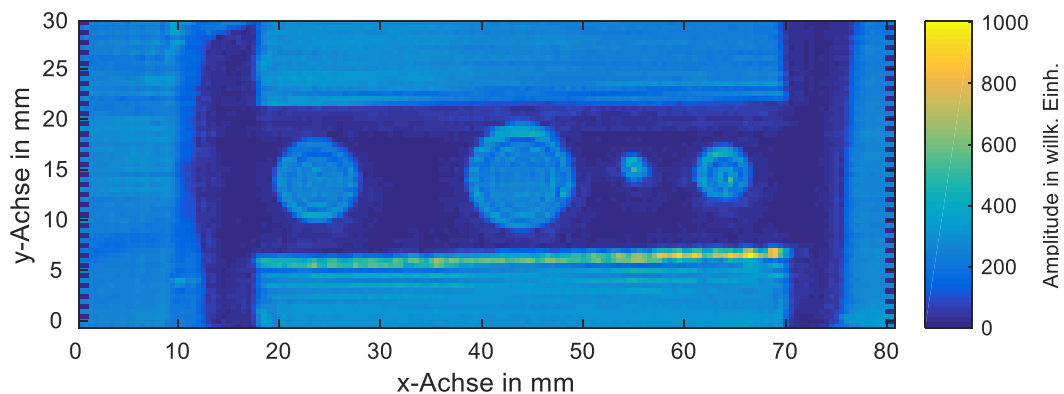


Bild 4.22: C-Scan der Auflösungs-messung an einem Aluminium-Lochblech mit Fokussierung FOK-linear

Der C-Scan von FOK-parabolisch an dem Alu-Lochblech ist in Bild 4.23 dargestellt. Zwar können - wie bei FOK-linear - alle Löcher dargestellt werden, die Interferenzeffekte sind hierbei allerdings so groß, dass sie in dieser Darstellung eine quantitative Auswertung erschweren.

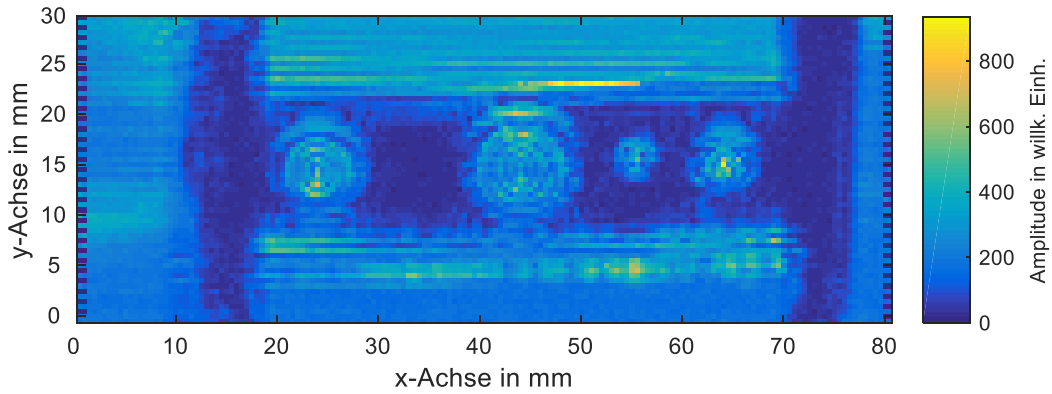


Bild 4.23: C-Scan der Auflösungs-messung an einem Aluminium-Lochblech mit Fokussierung FOK-parabolisch

Als letzter C-Scan in dieser Messreihe ist der des FOK-exponentiell in Bild 4.24 dargestellt. Bereits in dieser Darstellung lässt sich das kleinste Loch sehr gut darstellen. Auch ist das Auftreten von Interferenzeffekten bei dieser Fokussierung am geringsten.

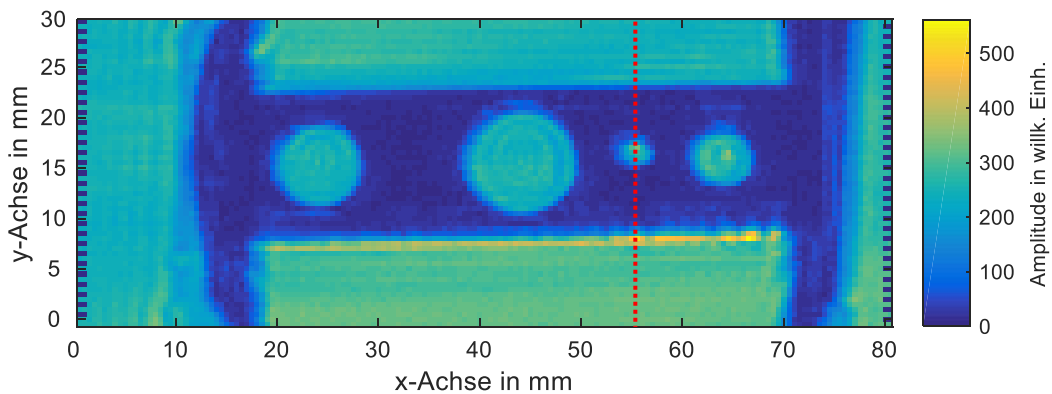


Bild 4.24: C-Scan der Auflösungs-messung an einem Aluminium-Lochblech mit Fokussierung FOK-exponentiell

Für eine quantitative Auswertung der Lochdurchmesser wird über die Breite des Lochblechs die maximale Amplitude entlang einer Linie auf Höhe des kleinsten Lochs (siehe rote Markierung in Bild 4.24) aufgetragen, dies ist in Bild 4.25 dargestellt.

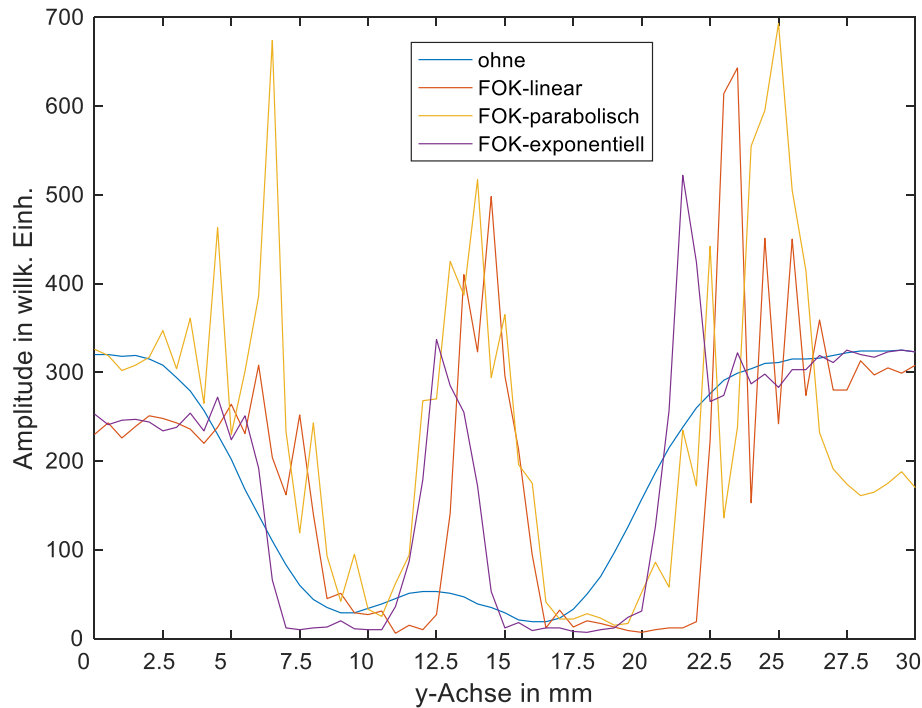


Bild 4.25: Linienscan der C-Scans aus Bild 4.21 bis Bild 4.24. Es sind jeweils die maximalen Amplituden entlang der Breite des Lochblechs auf Höhe der kleinsten Bohrung gezeigt

Die jeweiligen Durchmesser der kleinsten Bohrung werden über die halbe Breite des Amplitudenanstiegs in Bild 4.25 berechnet. Die so bestimmten Werte sind in Tabelle 4.1 gezeigt.

Tabelle 4.1: Gemessene Durchmesser der kleinsten Bohrung

	ohne	FOK-parabolisch	FOK- linear	FOK-exp
<b>Durchmesser in mm</b>	4,8	4,3	2,8	2,3
<b>Abweichung zu 2,3 mm</b>	109 %	87 %	22 %	0 %

Bei der Darstellung des Linienscans ohne Fokussierung (blau in Bild 4.25), kann auf Höhe der kleinsten Bohrung ein Ansatz einer erhöhten Amplitude festgestellt werden. Allerdings ist dieser Übergang fließend, während bei allen anderen Messungen ein klarer Amplitudenanstieg beziehungsweise Amplitudenabfall zu erkennen ist.

Die präsentierten Untersuchungen zeigen, dass eine Verbesserung der örtlichen Auflösung bei Luftultraschallmessungen möglich ist. Es konnte experimentell herausgefunden werden, dass eine Fokussierung mit einer linearen oder exponentiellen Funktion sowohl die größte Signalamplitude (-15,2 dB und -14,3 dB) als auch die beste Auflösung mit der geringsten Abweichung (+22 % und  $\pm 0$  %), von einem mit einem digitalen Messschieber gemessenen Lochdurchmesser von 2,3 mm besitzt. Hierbei scheint die FOK-exponentiell die bessere Auflösung zu besitzen,

wohingegen FOK-linear die höhere Signalamplitude in Luft besitzt. Ein Vergleich mit den in Bild 4.13 gezeigten Simulationen über den Verlauf des Schalldrucks nach Austritt aus dem Trichter zeigt, dass der Trend mit den experimentellen Werten übereinstimmt, jedoch nicht mit der Vermessung des Schallfelds. Beim Vergleich der experimentellen Auflösung mit den Messungen aus dem Schallfeld zeigt sich eine gute qualitative Korrelation der Schalldurchmesser mit den ermittelten Auflösungen.

### **4.3 Entwicklung einer qualitativen Analysemethode**

Insgesamt wurden, wie in 3.4.1 beschrieben, 16 Proben der unterschiedlich imprägnierten Tapes mit dem in Bild 3.1 gezeigten Prüfstand untersucht. Zu Beginn sollte allerdings erwähnt werden, dass es sich hierbei um die Entwicklung dieser Methode handelt, da ein als vollständig i. O. definiertes Tape, hergestellt mit den gleichen Parametern und Bedingungen, nicht zur Verfügung stand. Die folgenden Ergebnisse zeigen also Wertungen, bezogen auf ein nicht ideales Tape. Unterschiede in den ausgewerteten Kategorien zeigen dennoch die prinzipielle Leistungsfähigkeit der entwickelten Methode.

#### **4.3.1 Ergebnisse der Versuchsreihen**

Es wurden zwei komplette Messdurchläufe, Versuchsreihe 1 (V1) und Versuchsreihe 2 (V2) durchgeführt, deren Ergebnisse im Folgenden miteinander verglichen werden. Es wurden die Tapes Te1 bis Te4 in den Kategorien „Wertungspunkte“, „Standardabweichung“, „maximale Amplitude“, „minimale Amplitude“ und „Mittelwert der Amplituden“ verglichen.

Als Kalibriertape wurde willkürlich Tape Te1 gewählt. Hierzu wurden alle durchgeführten Messungen dieses Tapes für die Erstellung der Kalibrierkurven verwendet. Mithilfe dieser Kalibrierung wurden die jeweils anderen Tapes bewertet. Die Wertungstabelle ist in Anhang C dargestellt. Bei der Auswertung wurden jeweils 22 Abschnitte mit einer Breite von 5 mm pro Tape ausgewertet; es konnten somit maximal 22 Wertungspunkte erreicht werden.

Um die Übersicht über die Messungen zu behalten, wurden die Ergebnisse der Versuchsreihen nicht in der Darstellung nach Bild 3.15 dargestellt, sondern in Diagrammen, die mehrere Tapeabschnitte oder Tapes beinhalten. Die Skalierung der Diagramme wurde stets so gewählt, dass die Tapes leicht untereinander verglichen werden können. Sämtliche Ergebnisse beider Versuchsreihen sind zudem tabellarisch in Anhang C dargestellt.

## Tape Te1

Sämtliche Messungen des Tapes Te1 wurden für die Erstellung der Kalibrierkurven verwendet, demnach sollte dieses Tapes die höchste Wertung erhalten, jedoch können die einzelnen Tapeabschnitte von den gemittelten Kalibrierwerten abweichen. Zur Veranschaulichung sind in Bild 4.26 die Wertungspunkte aller Tapeabschnitte des Tapes Te1 für beide Versuchsreihen dargestellt.

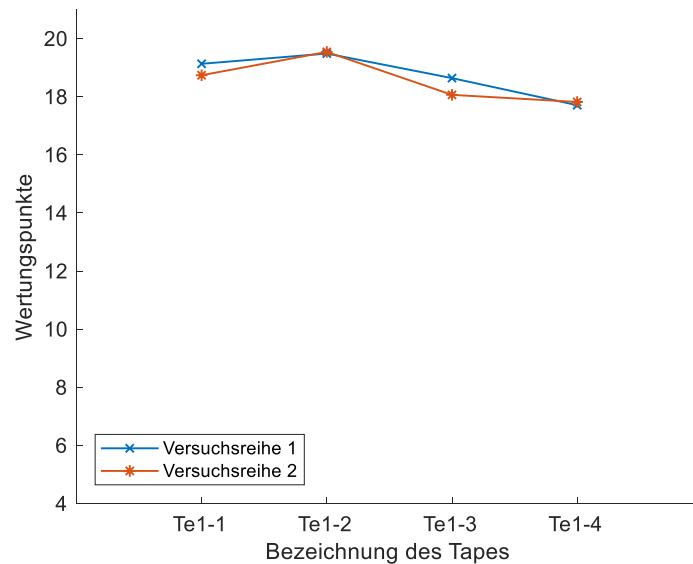


Bild 4.26: Wertungspunkte aller Abschnitte des Tapes Te1 über beide Versuchsreihen

Es wurden maximal 19,5 Punkte mit dem zweiten Tapeabschnitt und minimal 17,8 Punkte mit dem vierten Tapeabschnitt erreicht. Die Schwankungen zwischen den beiden Versuchsreihen fallen mit maximal 0,6 Punkten gering aus.

## Tape Te2

Die Wertungspunkte über beide Versuchsreihen für alle Tapeabschnitte des Tapes Te2 sind in Bild 4.27 dargestellt.

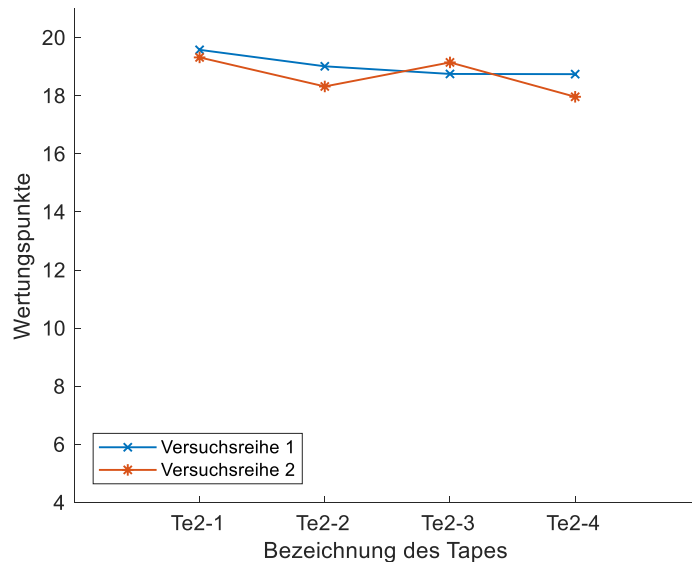


Bild 4.27: Wertungspunkte aller Abschnitte des Tapes Te2 über beide Versuchsreihen

Bei diesen Tapeabschnitten konnten Punkte von 18 bis 19,6 erreicht werden. Die maximale Abweichung wurde mit 0,7 Punkten beim zweiten und beim vierten Tapeabschnitt beobachtet.

### Tape Te3

Die Ergebnisse der Wertungspunkte für das Tape Te3 sind in Bild 4.28 über beide Versuchsreihen dargestellt.

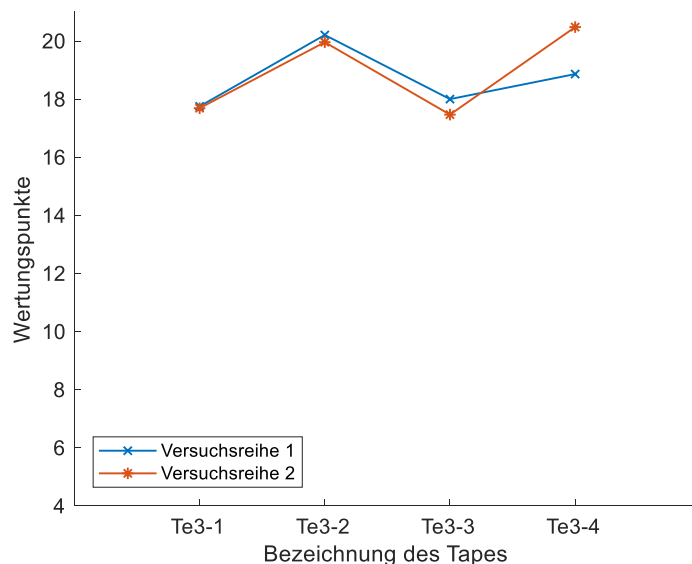


Bild 4.28: Wertungspunkte aller Abschnitte des Tapes Te3 über beide Versuchsreihen

Die erreichten Punkte reichen von 17,5 beim dritten Tapeabschnitt bis hin zu 20,5 beim vierten Tapeabschnitt. Ebenfalls wurde bei diesem Abschnitt eine maximale Differenz der beiden Versuchsreihen von 1,6 Punkten detektiert. Gründe für diese große Differenz werden im nächsten Kapitel diskutiert.

## Tape Te4

In Bild 4.29 sind die Wertungspunkte über beide Versuchsreihen aller Tapeabschnitte von Tape Te4 gezeigt.

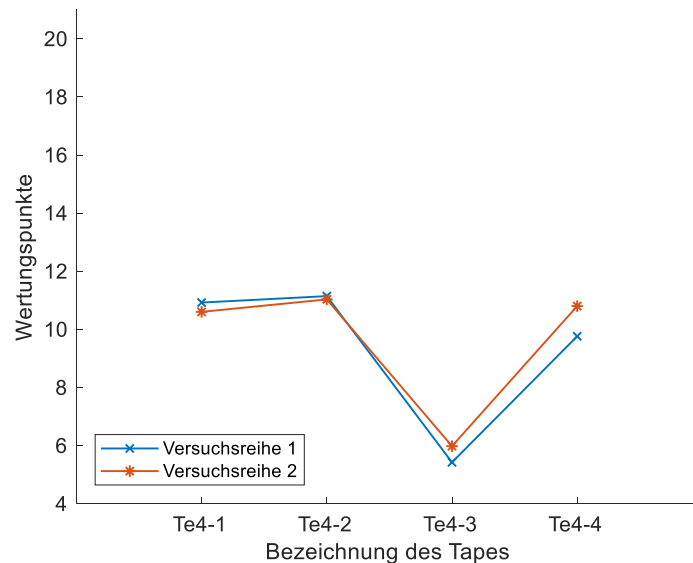


Bild 4.29: Wertungspunkte aller Abschnitte des Tapes Te4 über beide Versuchsreihen

Zwischen den Tapeabschnitten konnten Punkte von 5,4 (dritter Abschnitt) bis 11,1 (zweiter Abschnitt) erreicht werden. Die maximale Schwankung innerhalb eines Tapeabschnitts konnte mit 1,0 beim vierten Abschnitt ermittelt werden.

### 4.3.2 Diskussion der Ergebnisse der qualitativen Messreihen

Aufgrund der im vorherigen Kapitel dargestellten Ergebnissen konnte zwischen den Tapes Te1, Te2, und Te3 bezüglich der maximalen und minimalen Wertungspunkte keine genaue Aussage getroffen werden, ob diese einen Unterschied in der Qualität aufweisen. Einzig das Tape Te4 konnte in dieser Darstellung als qualitativ schlecht definiert werden. Für eine übersichtlichere Darstellung der Ergebnisse wurden die Wertungspunkte aller Tapeabschnitte in einem Diagramm dargestellt, siehe Bild 4.30. Hierbei wurden die Ergebnisse beider Versuchsreihen gemittelt dargestellt, die Standardabweichung ist mit Fehlerbalken angegeben.



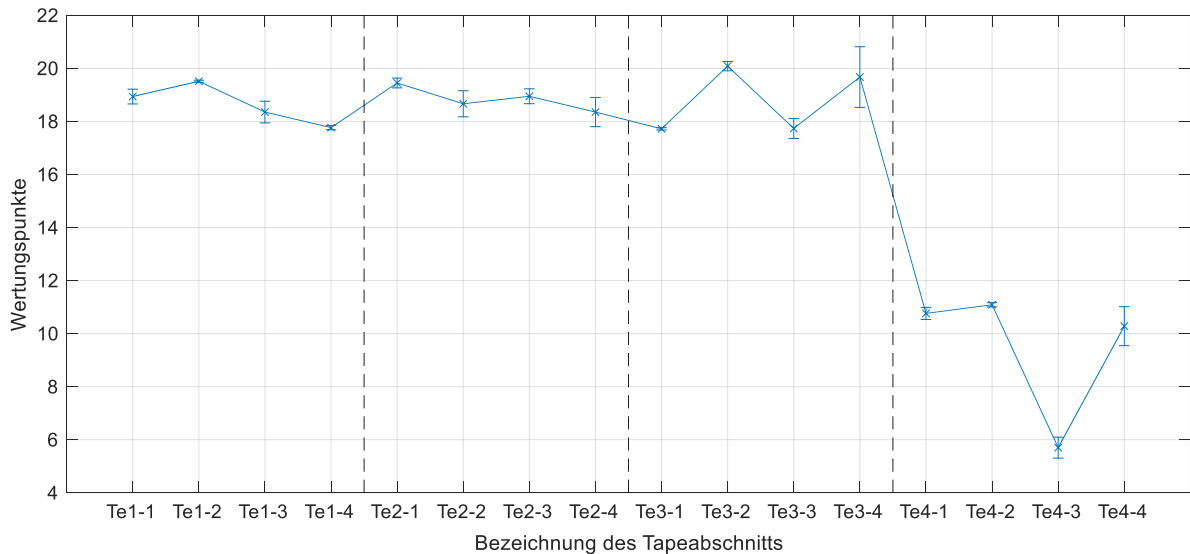


Bild 4.30: Wertungspunkte aller Abschnitte aller Tapes, gemittelt über beide Versuchsreihen

Hier zeigt sich ebenfalls, dass die Tapes Te1 bis Te3 in der Wertung kaum zu unterscheiden sind. Bis auf den Tapeabschnitt Te3-4 sind die Abweichungen innerhalb der beiden Versuchsreihen gering.

Prinzipiell können die Unterschiede in den Wertungspunkten in den einzelnen Kategorien wiedergefunden werden. Hierzu werden im Folgenden die einzelnen Bewertungskategorien näher diskutiert.

### Maximale Amplitude

Eine erhöhte maximale Amplitude innerhalb eines Abschnitts kann darauf hinweisen, dass das Tape an dieser Stelle entweder eine geringere Dicke hat, oder es sich um eine Lücke im Tape handelt. Betrachtet man den in Bild 4.31 dargestellten Verlauf der maximalen Amplituden über beide Versuchsreihen und Tapes hinweg, so fallen die Tapes Te3-4 und das gesamte Tape Te4 durch eine erhöhte Streuung der Werte auf. Auch das Tape Te2-2 fällt durch einen sehr niedrigen Wert über beide Messreihen hinweg auf, dies kann auf ein sehr gleichmäßiges Tape hinweisen, die Standardabweichung (s.u.) sollte in diesem Tape demnach geringer sein, als bei den anderen Tapes.

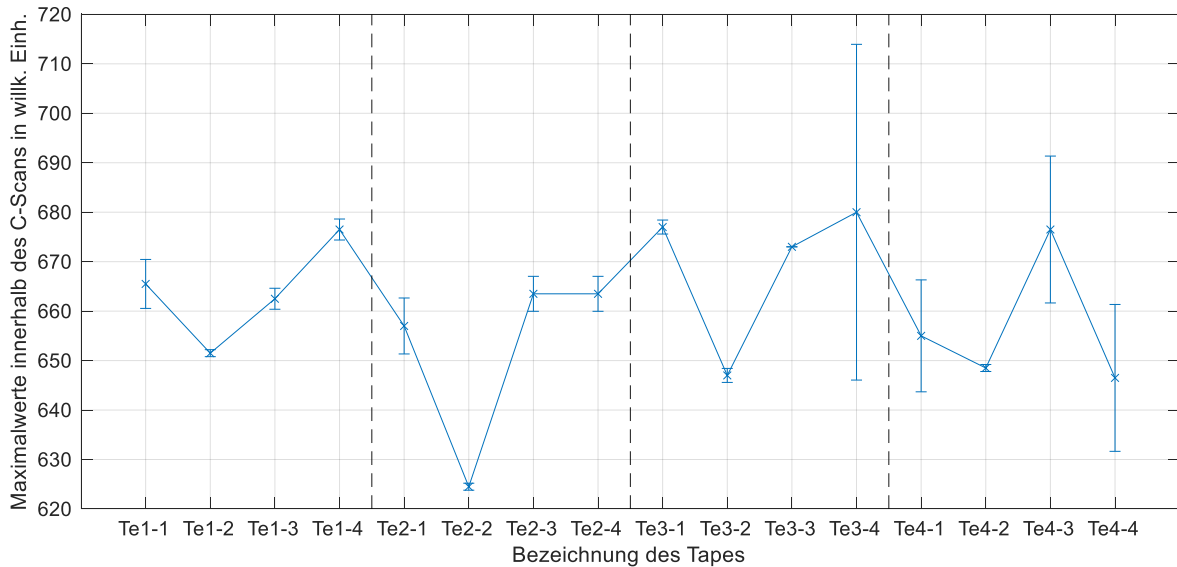


Bild 4.31: Gemittelte Maximalwerte aller Tapes

Die Schwankung der maximalen Amplitude bei Te3-4 kann durch die Darstellung des C-Scans aus V1 dieses Tapeabschnitts (Bild 4.32) erklärt werden. Es zeigt sich in dieser Messung bei  $y = 25$  mm ein deutlicher Signalfehler (rote Markierung) anhand der scharfen Kanten des Signals. Dieser Fehler täuscht eine lokal stark erhöhte Amplitude vor, was ebenfalls die Schwankung in den Wertungspunkten erklärt.

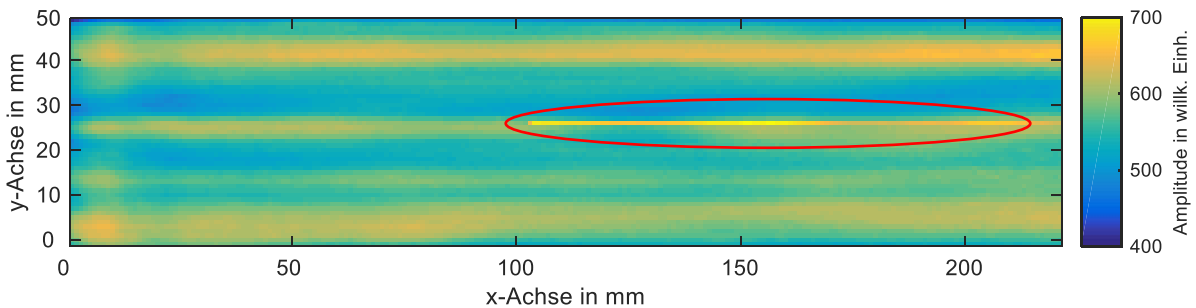


Bild 4.32: C-Scan des Tapes Te3-4 aus Versuchsreihe 1

Eine Erklärung der Schwankungen des Te4 kann bei Betrachtung einer Fotografie des Tapes gefunden werden, hierzu ist beispielhaft der Abschnitt Te4-4 in Bild 4.33 gezeigt. Fotografien aller Tapes befinden sind im Anhang C.

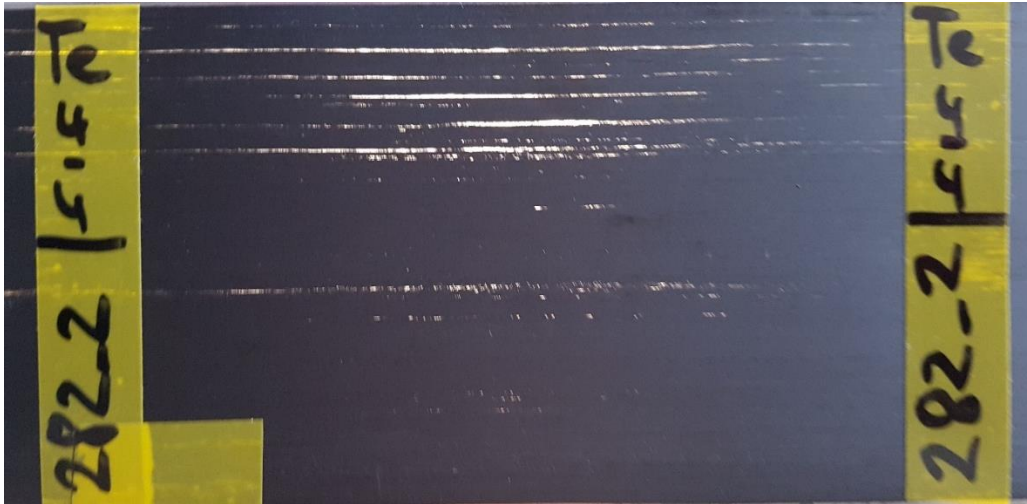


Bild 4.33: Fotografie des Tapes Te4-4 mit Hintergrundbeleuchtung

Es sind sehr deutlich starke Risse anhand des durchscheinenden Lichts zu erkennen. Im Vergleich zu den anderen Tapes, die ebenfalls gewisse Risse aufweisen, sind diese allerdings in ihrer Breite und Anzahl größer. Die Unterschiede in den beiden Versuchsreihen können hierbei durch eine unterschiedlich starke Einspannung erklärt werden. Die Tapes wurden händisch in den in Bild 3.1 bereits gezeigten Prüfstand eingespannt und eine etwaige Welligkeit wurde durch ein Spannen des Tapes entfernt. Durch dieses Spannen kann es sein, dass sich gewisse Risse im Tape schließen oder sich die Flanken überlagern und somit die Schwankungen in der maximalen Amplitude hervorrufen. Dieser beobachtete Effekt kann im Laborbetrieb nicht überwacht oder wiederholgenau eingestellt werden, sollte aber bei einem kontinuierlichen Prozess nicht auftreten.

Die Ergebnisse der maximalen Amplitude zeigen, dass die Analyseverfahren für die automatische Qualifizierung mehrerer Versuchsreihen verwendet werden kann.

### **Minimale Amplitude**

Eine lokal minimal detektierte Amplitude innerhalb eines Abschnitts kann auf verschiedene Umstände hinweisen. Zum einen ist sie ein Hinweis für Stellen, die eine lokal erhöhte Dämpfung bei gleichbleibender Tapedicke aufweisen, zum anderen kann sie ein Hinweis auf eine lokal dickere Stelle sein. Eine Aufstellung der minimalen Amplituden aller Tapes ist in Bild 4.34 für beide Versuchsreihen gezeigt.

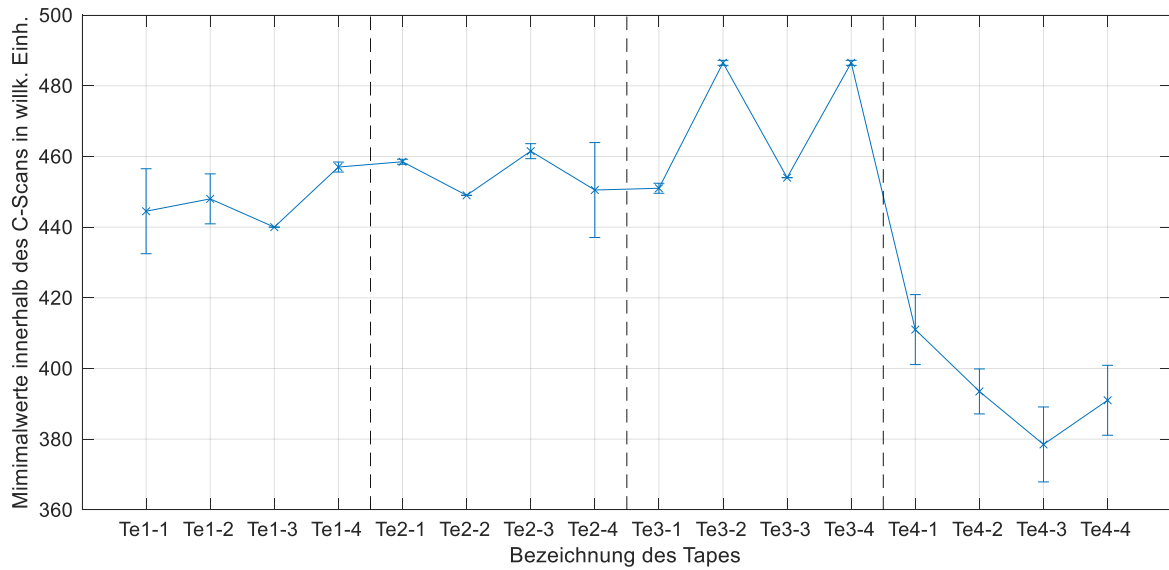


Bild 4.34: Gemittelte Minimalwerte aller Tapes

Während sich die minimalen Amplituden der Tapes Te1, Te2 und bei zwei Abschnitten des Tapes Te3 auf einem Niveau befinden, gibt es bei den Abschnitten Te3-2 und Te3-4 in beiden Versuchsreihen einen starken Ausreißer hin zu höheren Amplitudenwerten. Das gesamte Tape Te4 hingegen weist eine wesentlich niedrigere, minimale Amplitude auf. Diese Beobachtungen könnten auf leichte Variationen in der Tapedicke zurückzuführen sein. Wie die Auswertung in Bild 4.35 allerdings zeigt, sind alle Tapedicken sehr gleichmäßig und es gibt keine Ausreißer.

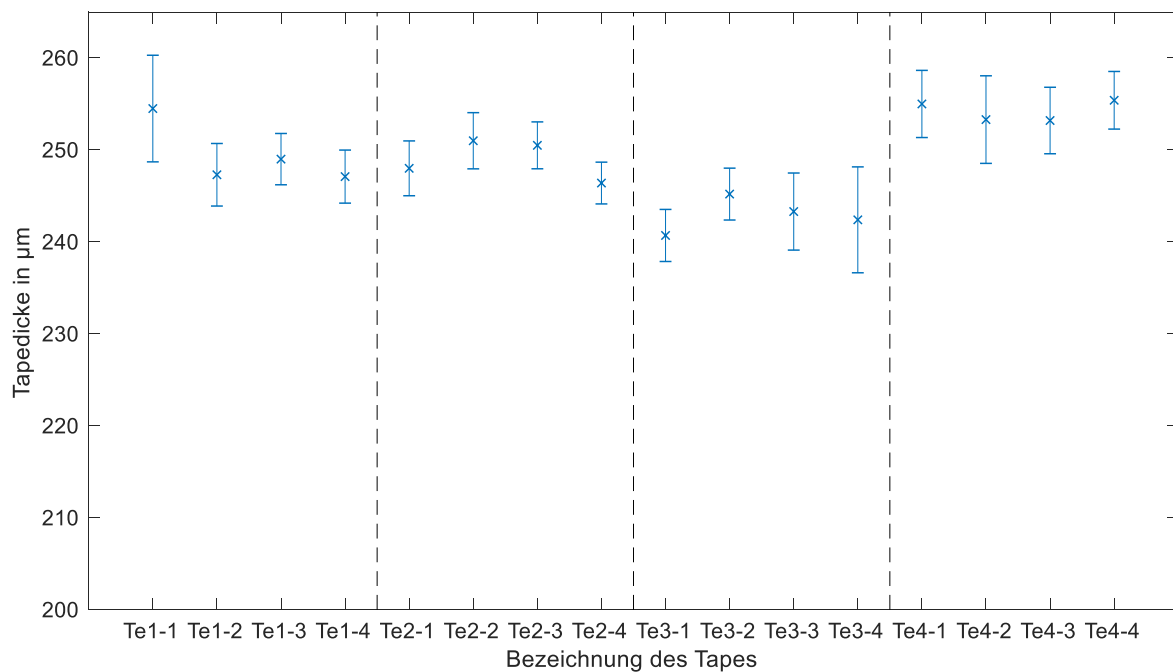


Bild 4.35: Gemessene Tapedicken

Wie bereits erwähnt, könnte eine geringere minimale Amplitude durch eine lokal stärker dämpfende Stelle im Tape hervorgerufen werden. Plausibler ist jedoch, dass sich, ähnlich wie bei der maximalen Amplitude, manche Risse beim Spannen wieder schließen oder sich sogar leicht überlappen. Durch eine solche Überlappung entstehen lokal dickere Tapes, die eine geringere Amplitude hervorrufen. Treten diese Überlappungen nicht auf, so reicht die minimale Amplitude bis zu den Werten des Mittelwerts heran, demnach sollte bei diesen Tapeabschnitten (Te3-2 und Te3-4) die Standardabweichung (s.u.) geringer sein.

### Mittelwert aller Amplituden

Der in einem Abschnitt ermittelte Mittelwert der Amplituden kann, wie auch die minimale Amplitude, auf die Dicke der Tapes sowie auf veränderte Dämpfungseigenschaften (u. a. E-Modul) hinweisen. Auch kann der Mittelwert darauf hinweisen, wie viel von den bereits erwähnten Überlappungen existieren. In Bild 4.36 sind die über beide Versuchsreihen gemittelten Mittelwerte aller Tapes dargestellt.

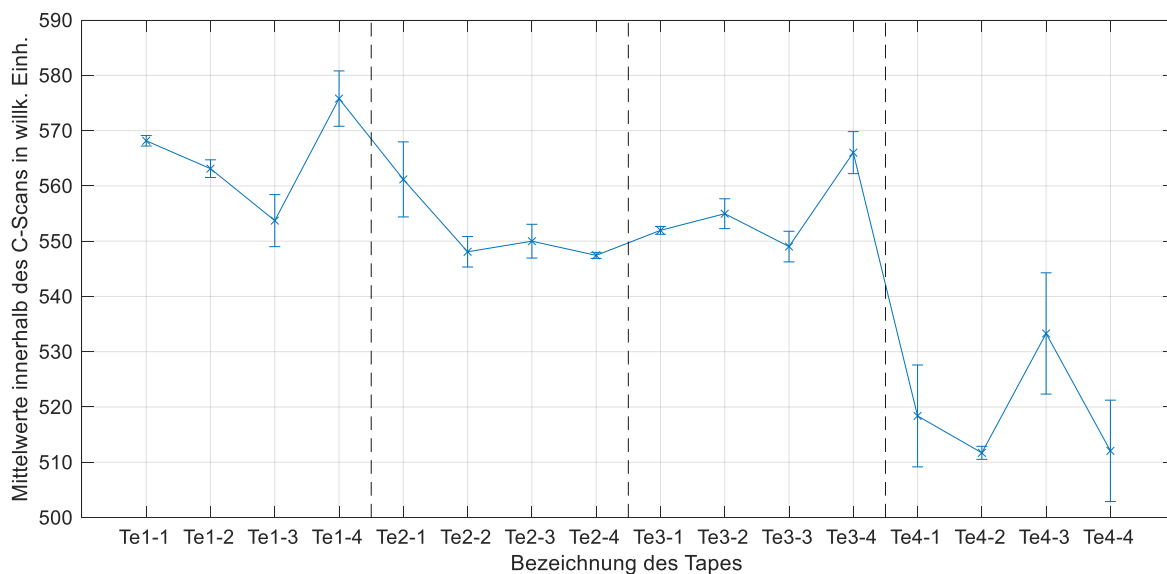


Bild 4.36: Gemittelte Mittelwerte aller Tapes

Ausreißer können bei den Tapes Te1-3, Te1-4, Te3-4 und dem gesamten Tape 4 beobachtet werden. Bei Te3-4 und Te4 kann dies, wie bereits erwähnt, auf fehlende oder übermäßige Überlappungen zurückzuführen sein. Die Peaks bei Te1-3 und Te1-4 können durch eine leicht erhöhte Streuung der Werte vernachlässigt werden.

### Standardabweichung der Amplituden

Für die Gleichmäßigkeit der Tapes ist sicherlich die Standardabweichung ein essentieller Wert. Sie gibt an, wie hoch die jeweiligen Amplituden innerhalb eines C-Scans streuen und ist somit ein Maß dafür, ob ein Tape über die gesamte Länge und

Breite ähnliche Werte liefert, was wiederum ein Maß für die Imprägniergüte darstellt. In Bild 4.37 ist die Standardabweichung aller Tapes über beide Versuchsreihen gemittelt dargestellt.

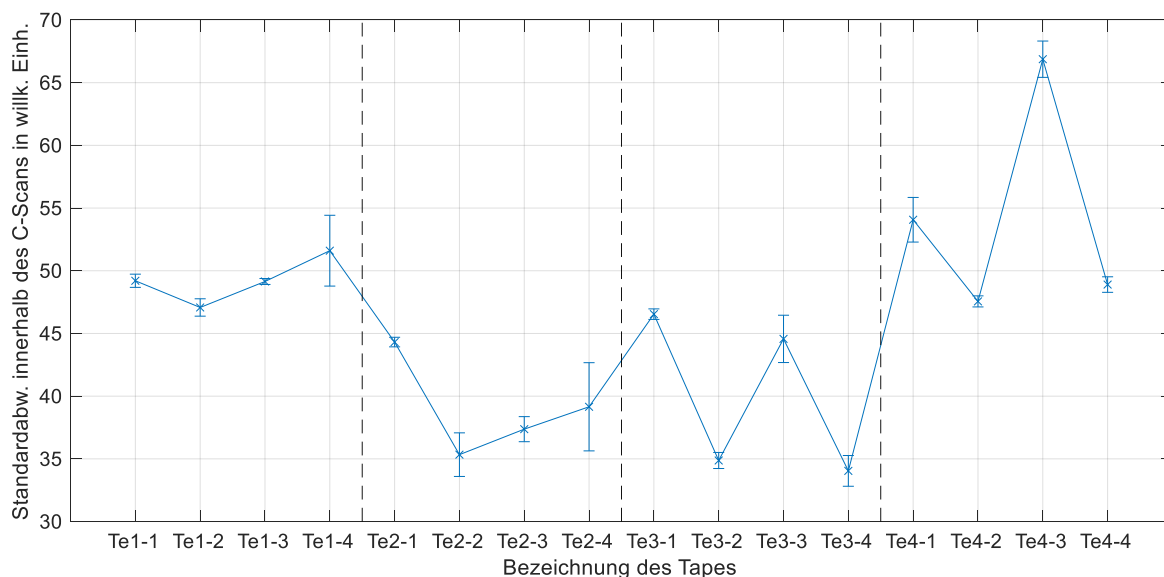


Bild 4.37: Gemittelte Standardabweichungen aller Tapes

Die kleinste Standardabweichung kann generell bei Tape Te2, Te3-2 und Te3-4 beobachtet werden. Die größte Standardabweichung weist Te4-3, auf. Wie oben bereits erwähnt, können die niedrigen Werte von Te2-2 durch geringe Risse und Te3-2 sowie Te3-4 durch nicht überlappende Risse begründet werden. Der maximal erreichte Wert der Standardabweichung des Tapes Te4-3 kann auf die große Anzahl an Rissen zurückgeführt werden.

Allein aus der Betrachtung der Standardabweichung würde das Tape Te2 als das Tape mit der besten Qualität definiert werden. Da dies aber nicht das einzige Kriterium für ein insgesamt fehlerfreies Tape ist, kann man mit der in dieser Arbeit entwickelten Analyseverfahren Tapes nach den bereits gezeigten Bewertungskriterien automatisiert auswerten und bewerten.

#### 4.4 Untersuchung mittels einer Probability of Detection Analyse

Für die Erstellung der POD-Analyse wurden die in Tabelle 3.8 aufgelisteten Tapes mit dem in Bild 3.1 und Bild 3.2 dargestellten Prüfständen geprüft.

Für die Auswertungen wurden die jeweiligen C-Scans mit dem eingebrachten Fehlermuster überlagert, siehe rote Linien in Bild 4.38.

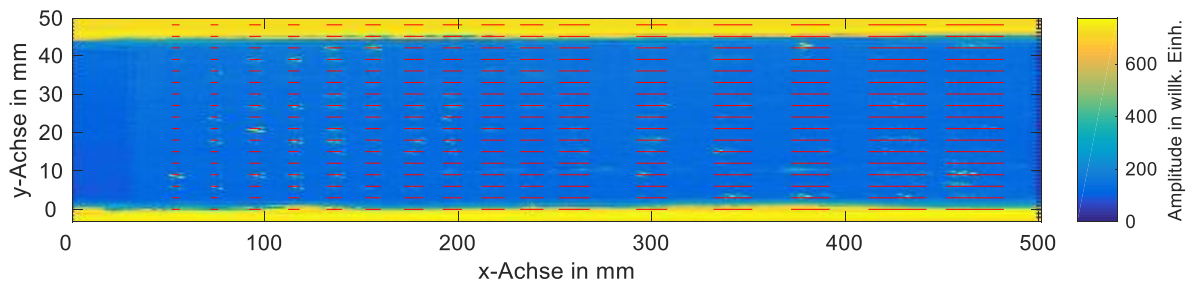


Bild 4.38: Darstellung aller Schnittmuster auf einem beispielhaften C-Scan des Prüfkörpers POD-a

Nach der Positionierung des Fehlermusters wurden die Fehlerstellen in einem GUI automatisch ausgewertet. Hierzu wurden unterschiedliche Methoden zur Fehlererkennung angewendet. Fehler im Randbereich des Tapes oder in Bereichen mit ungewollten Fehlern wurden bei der Berechnung ausgeschlossen. Die Randgebiete wurden automatisch erkannt. Andere Inhomogenitäten müssen manuell ausgeschlossen werden. Mit den unterschiedlichen Fehlererfassungsarten (vgl. 3.5.3) wurden die in der GUI markierten Fehlerstellen ausgewertet.

#### 4.4.1 Ergebnisse des Schnittmusters 1

Für die nachfolgenden POD-Diagramme wurden die Prüfkörper POD-a sowie POD-m untersucht und bezüglich dem Signal-zu-Rausch Verhältnis (SNR) und der Fehlersummen (SUM) ausgewertet.

##### Automatische Fehlereinbringung (POD-a)

In Bild 4.39 ist ein C-Scan des Prüfkörpers POD-a (Schnittmuster 1) dargestellt, die detektierten Schnitte bei einem Schwellwert von 10 dB sind rot markiert. Hier zeigt sich bereits, dass kleine sowie große Risslängen annähernd gleichermaßen detektiert werden können.

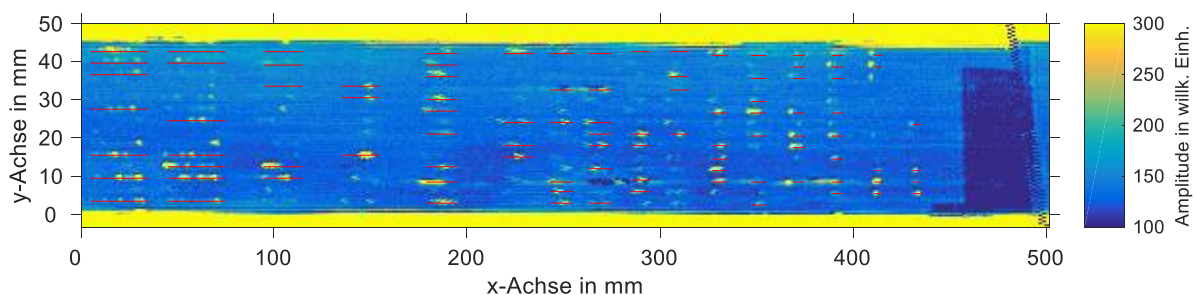


Bild 4.39: C-Scan des Prüfkörpers POD-a mit markierten Fehlerstellen größer 10 dB

Die zu Bild 4.39 berechnete Regressionskurve in Bild 4.40 wurde mittels der Verteilungsfunktion der Normalverteilung berechnet. Durch die niedrige

Fehlererkennungsrate unabhängig der Fehlergröße liefert das hier angewandte Regressionsmodell eine schlechte Regression;  $RMSE=17,3$ .

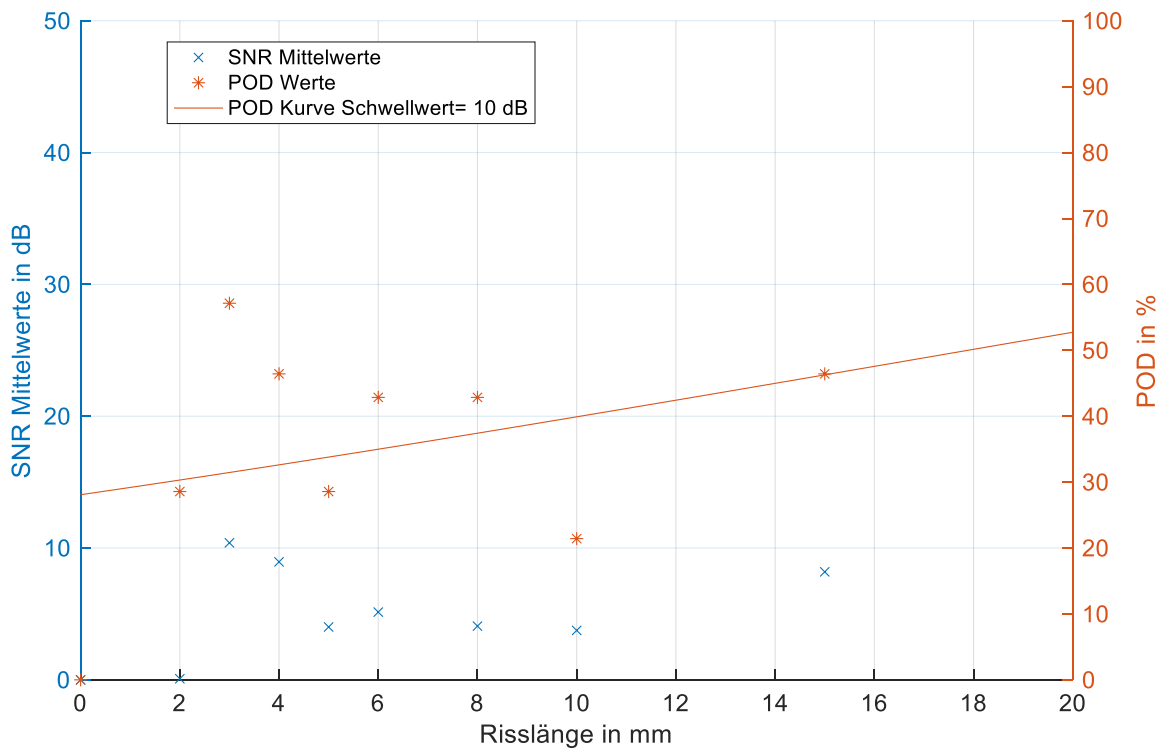


Bild 4.40: POD-Diagramm des Prüfkörpers POD-a mit einem Schwellwert von 10 dB

Durch die Fehlererfassung mittels Summenbildung werden kleine Fehler seltener detektiert. Ein zu den Messungen passender Schwellwert liefert hierbei ansteigende POD-Werte über die Risslänge. Die so erfassten POD-Werte überstrecken sich über einen größeren Auffindungsbereich. Ein C-Scan des Prüfkörpers POD-a mit markierten Fehlerstellen einer Fehlersumme größer 200 ist in Bild 4.41 dargestellt.

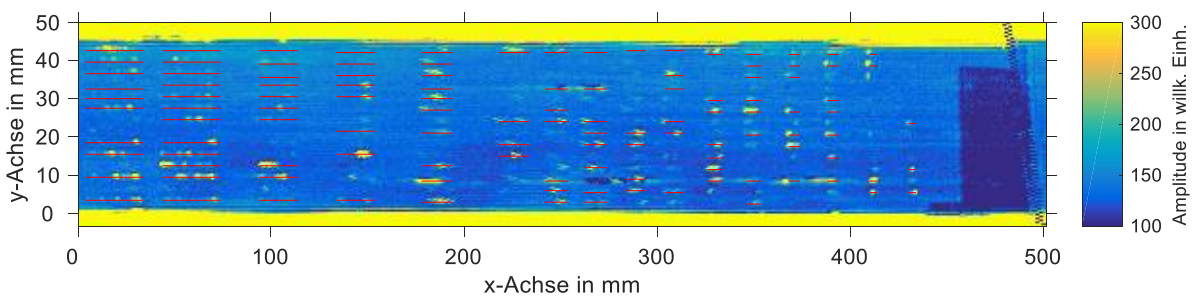


Bild 4.41: C-Scan des Prüfkörpers POD-a mit markierten Fehlerstellen größer SUM 200

In Bild 4.42 ist das POD-Diagramm zu Bild 4.41 mit einem nahezu linearen Anstieg der mittleren Fehlersummen über der eingebrachten Risslänge dargestellt. Verglichen mit der Auswertung nach dem SNR nimmt die Güte der Regression zu;  $RMSE=12,3$ .



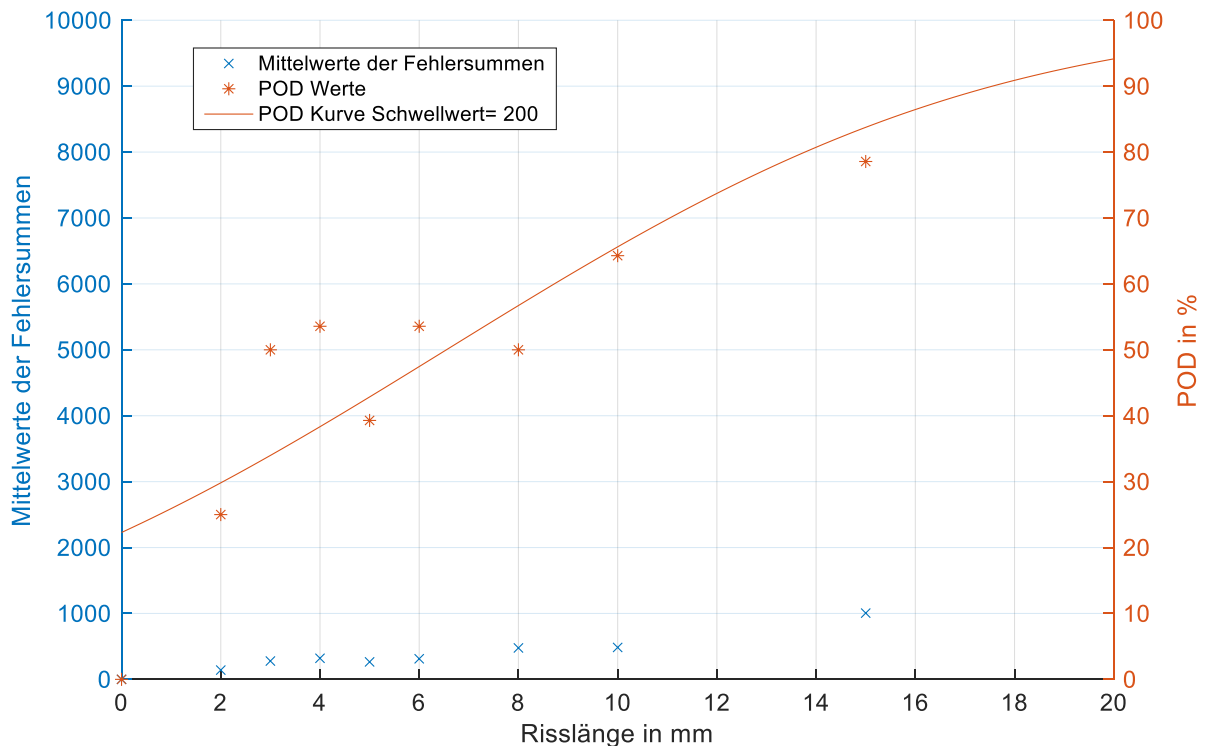


Bild 4.42: POD-Diagramm des Prüfkörpers POD-a mit einem Schwellwert von SUM 200

### Manuelle Fehlereinbringung (POD-m)

Bei der manuellen Fehlereinbringung wurden sehr hohe Signalamplituden erkannt. Dies liefert eine sehr hohe Fehlererkennung, siehe C-Scan in Bild 4.43 mit detektierten Schnitten bei einem Schwellwert von 20 dB. Obwohl nahezu alle Fehler optisch in dem Tape erkannt werden, liefert ein großer Schwellwert, bei der Summenbildung eine nicht sichere Erkennung im kleinen Risslängenbereich. Ab einer Risslänge von 5 mm wird bei dem vorliegenden Schwellwert jeder Fehler sicher erkannt.

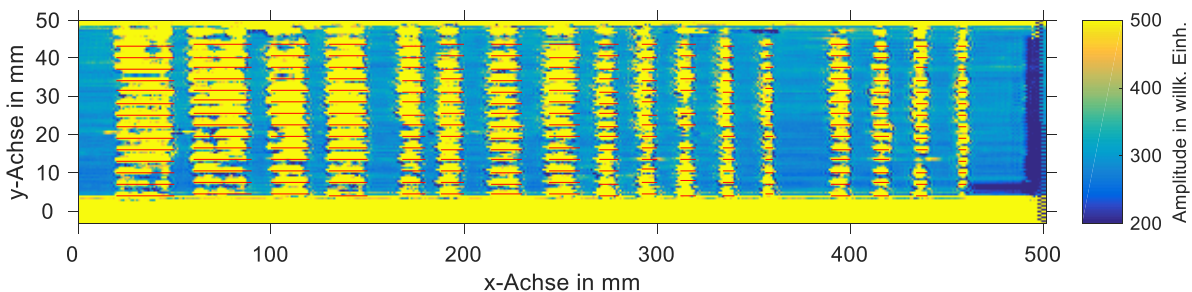


Bild 4.43: C-Scan des Prüfkörpers POD-m mit markierten Fehlerstellen größer 20 dB

So sind die POD-Werte in Bild 4.44 bis zu einer Risslänge von 5 mm nicht bei einer sicheren Erkennung. Die Regressionskurve nach der Verteilungsfunktion der Normalverteilung deckt diese Messungen sehr gut ab; RMSE=4,1.

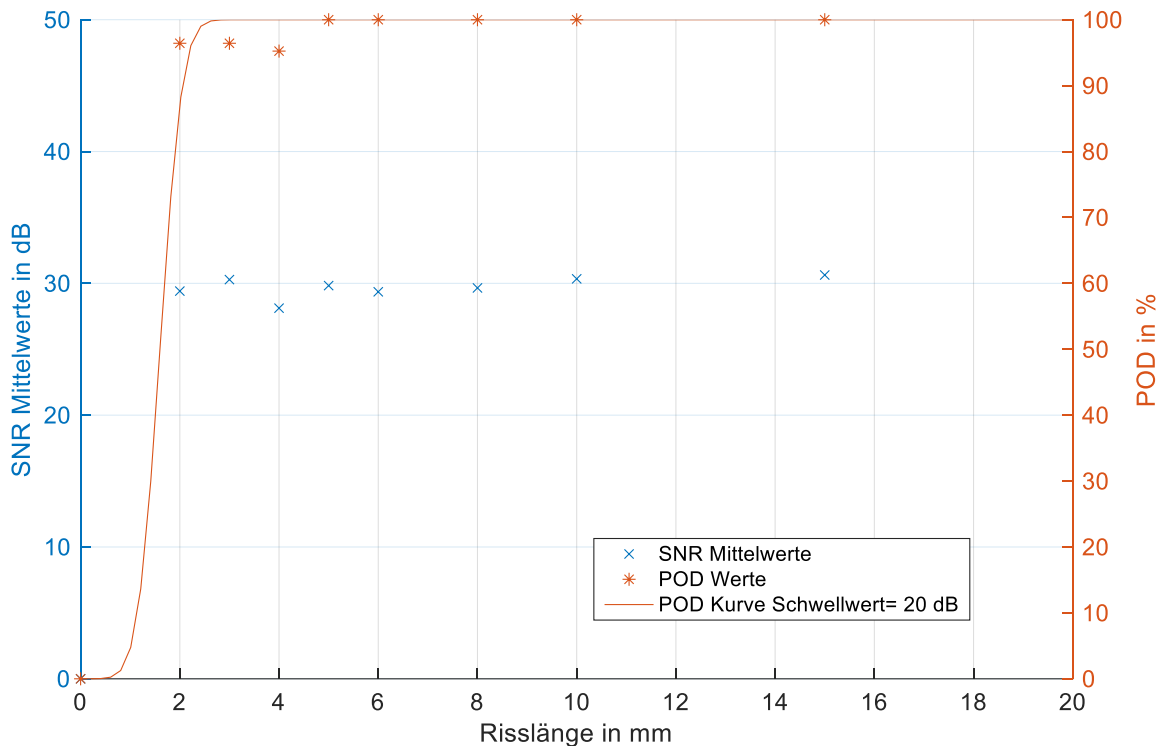


Bild 4.44: POD-Diagramm des Prüfkörpers POD-m mit einem Schwellwert von 20 dB

In Bild 4.45 ist der C-Scan des Prüfkörpers POD-m dargestellt. Die markierten Fehler besitzen eine Fehlersumme größer 3000. Wie auch bei der Auswertung mit dem SNR ergibt diese Grenze der Fehlersumme eine 100 % Detektion ab einer Risslänge von 5 mm.

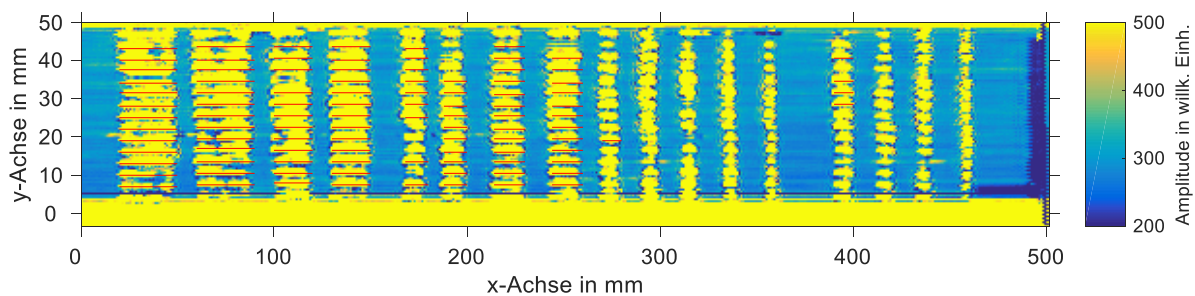


Bild 4.45: C-Scan des Prüfkörpers POD-m mit markierten Fehlerstellen größer SUM 3000

Das zu Bild 4.45 gehörende POD-Diagramm ist in Bild 4.46 dargestellt. Wie oben bereits erwähnt, besitzen alle Risse eine sehr hohe mittlere Fehlersumme, was sich in einer erhöhten Steigung der POD-Kurve auswirkt;  $RMSE=3,6$

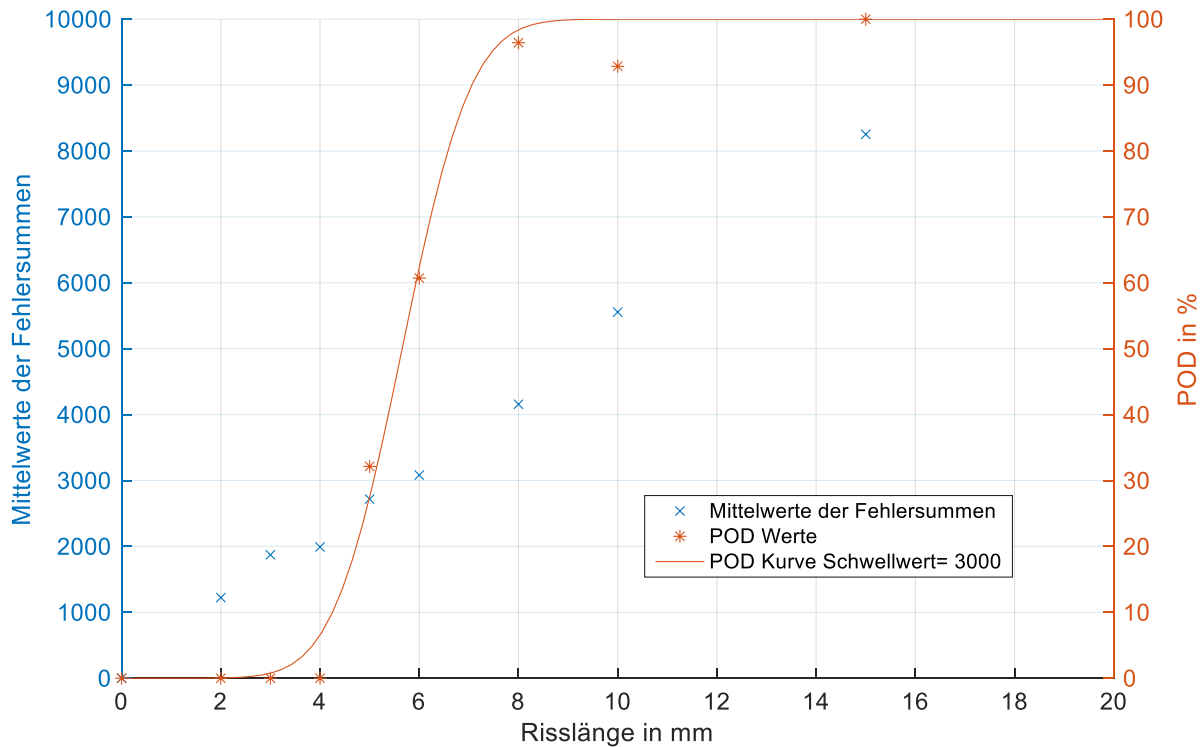


Bild 4.46: POD-Diagramm des Prüfkörpers POD-m mit einem Schwellwert von SUM 3000

Durch die großen Unterschiede zwischen der manuellen und automatisierten Fehlereinbringung, wird die Breite der Risse als sehr kritischer Parameter angesehen. Obwohl bei beiden Fehlereinbringungen die Fehler mit einer dünnen und scharfen Klinge eingebracht wurden, ergaben sich hier unterschiedlich breite Risse. Aus diesem Grund werden im folgenden Abschnitt die Schnittbreiten mittels einer POD-Analyse untersucht.

#### 4.4.2 Ergebnisse des Schnittmusters 2

Im Folgenden werden beispielhaft die C-Scans des Prüfkörpers POD-a-b1 gezeigt. Sämtliche C-Scans dieser Messreihe sind in Anhang D dargestellt. In Bild 4.47 ist der C-Scan des Prüfkörpers POD-a-b1 mit detektierten Defekten größer 30 dB gezeigt. Sehr deutlich ist ein schneller Anstieg der detektierten Fehler zu sehen, ebenso wie die Auffälligkeit, dass in der letzten Schnittreihe ein Fehler nicht erkannt wurde.

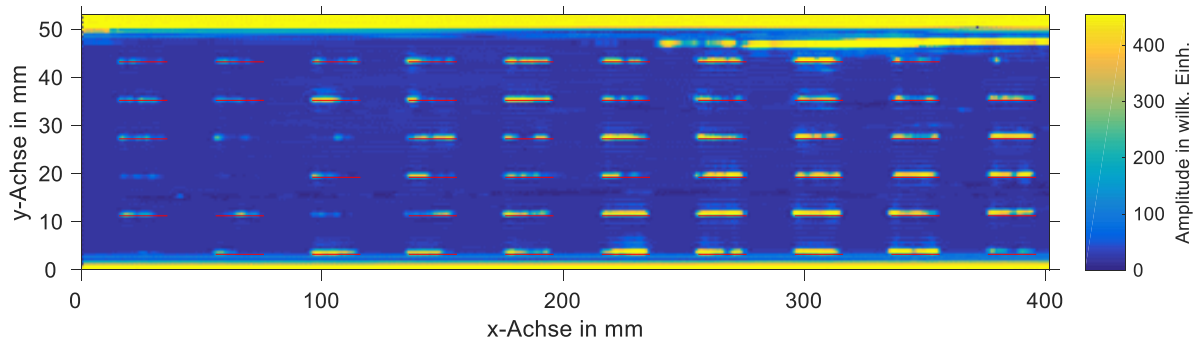


Bild 4.47: C-Scan des Prüfkörpers POD-a-b1 mit markierten Fehlerstellen größer 30 dB

Hierdurch wird auch die in Bild 4.48 gezeigte POD-Kurve beeinflusst, zu sehen an den mittleren SNR-Werten. Ein Schwellwert von 30 dB erlaubt es, Defekte ab einer Schnittbreite von drei Schnitten mit 100 % zu detektieren; RMSE=0,36.

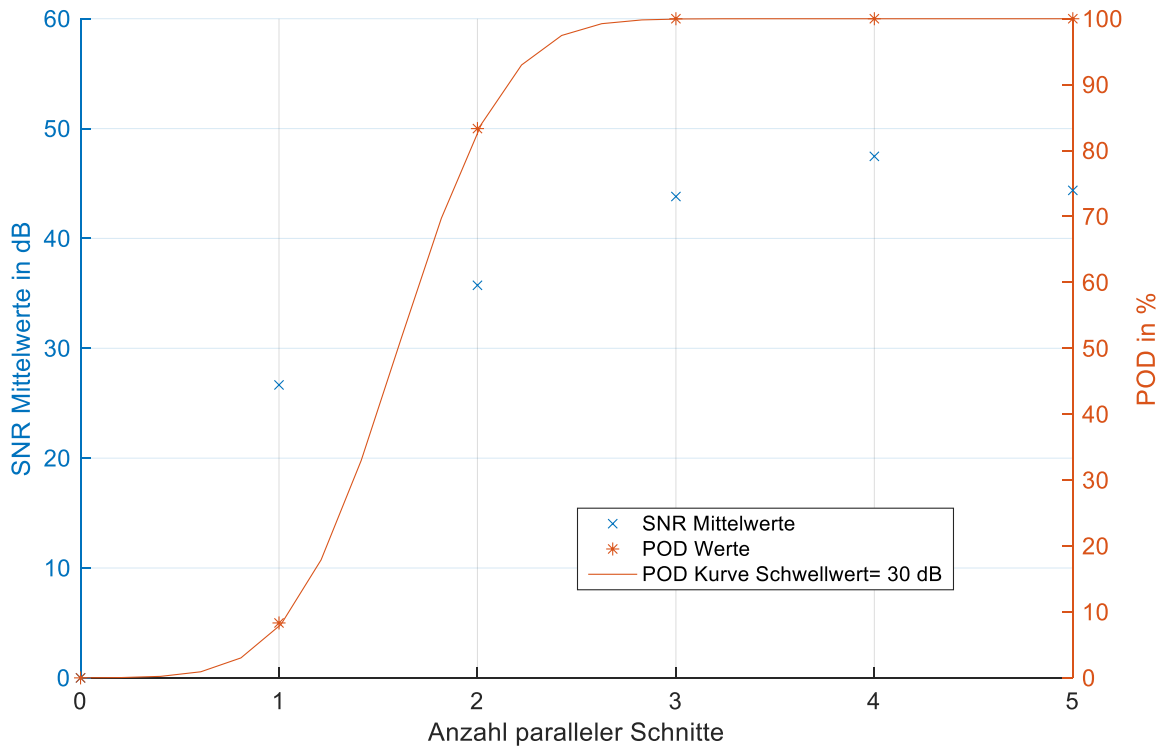


Bild 4.48: POD-Diagramm aller Prüfkörpers POD-a-b mit einem Schwellwert von 30 dB

Der in Bild 4.49 gezeigte C-Scan zeigt ebenfalls den Prüfkörper POD-a-b1 mit markierten Fehlern mit Fehlersummen größer 2300. In dieser Darstellung fällt die Abgrenzung der Erkennbarkeit kleiner Fehler sehr deutlich aus.

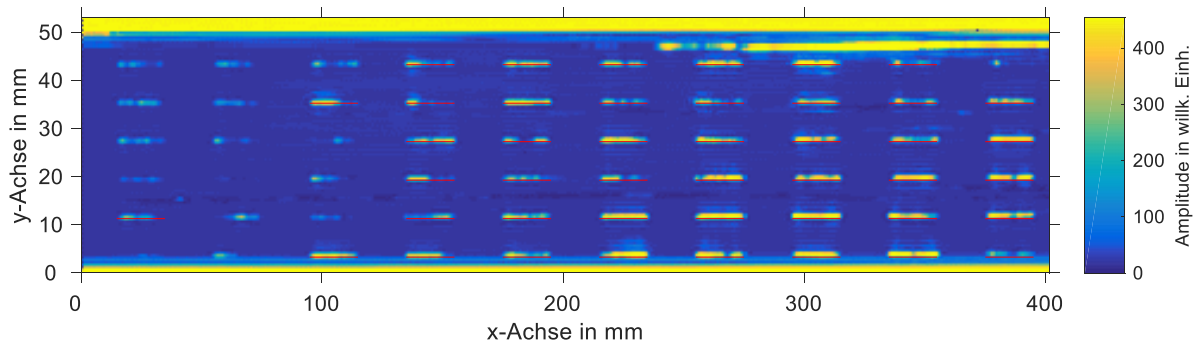


Bild 4.49: C-Scan des Prüfkörpers POD-a-b1 mit markierten Fehlerstellen größer SUM 2300

Das zugehörige POD-Diagramm ist in Bild 4.50 dargestellt. Hier können ebenfalls Defekte mit einer Schnittbreite von drei Schnitten zu 100 % detektiert werden; RMSE=0,37

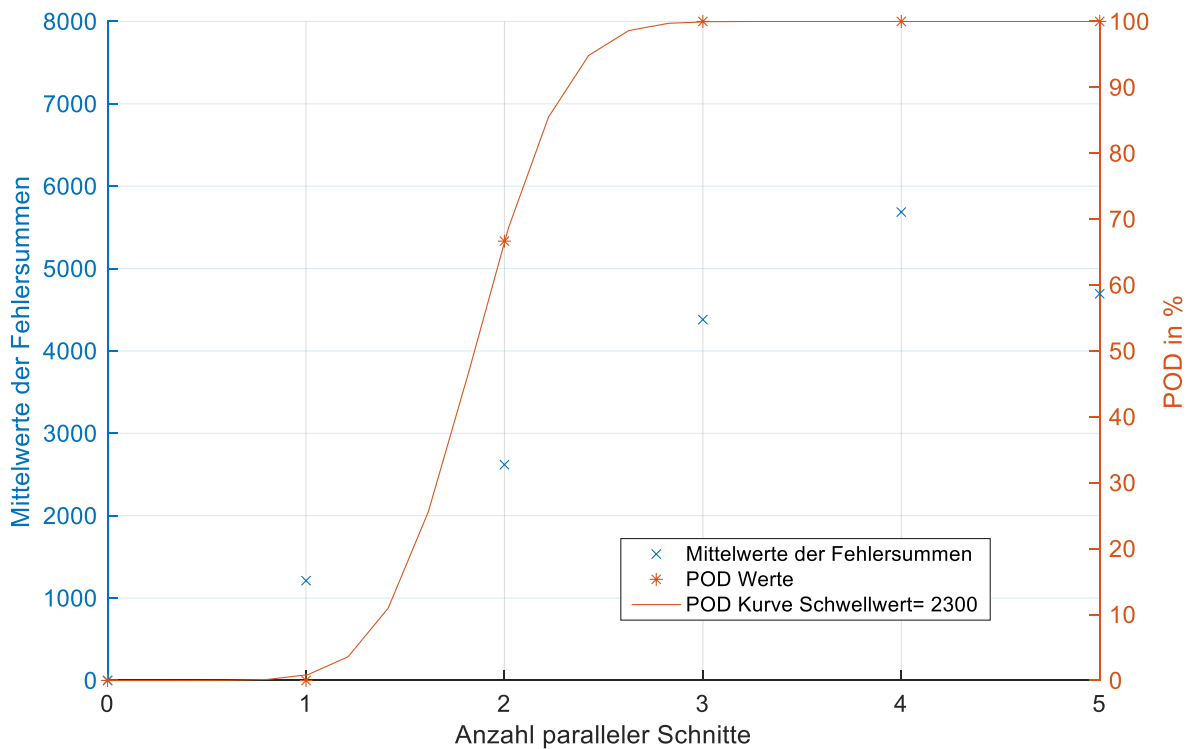


Bild 4.50: POD-Diagramm aller Prüfkörper POD-a-b mit einem Schwellwert von SUM 2300

#### 4.4.3 Diskussion der POD Messungen

Für eine gute POD Auswertung sollen Fehlereigenschaften zwischen einer sicheren Erkennung und einer unmöglichen Erkennung untersucht werden. Speziell in den Bereichen mit geringer Fehlerauffindungswahrscheinlichkeit sowie mit einer hohen Fehlerauffindungswahrscheinlichkeit sollten viele Fehlergrößen untersucht werden. Über alle vorliegenden Fehlergrößen konnten hohe, aber auch niedrige

Fehlerauffindungswahrscheinlichkeiten vorgefunden werden. Bei der Auswertung des Schnittmusters 1 mittels durchschnittlichem SNR werden Risslängen unabhängig ihrer Größe detektiert. Bei der Summenbildung kann die Erkennung über die Fehlergröße durch Anpassen des Schwellwerts variiert werden.

Durch die manuelle Fehlereinbringung stellt das POD-Diagramm, berechnet mit mittlerem SNR (siehe Bild 4.44) eine hohe Fehlererkennung dar. So wird schon bei dem kleinsten untersuchten Fehler, 2 mm, eine nahezu sichere Fehlererkennung erreicht. Bei der automatisierten Fehlereinbringung befindet sich die größte Fehlerauffindungswahrscheinlichkeit nach Auswertung mittels SNR an der Fehlergröße 15 mm und liegt bei etwa 60 %. Die manuell eingebrachten Fehler werden hingegen unabhängig ihrer Fehlergröße nahezu vollständig erkannt. Wie bereits angedeutet, werden diese Unterschiede in der Art der Fehlereinbringung vermutet. Bei der manuellen Fehlereinbringung dringt das Messer tiefer in das Tape ein. Auch kann der Riss, durch eine Querbewegung der Klinge, bei der Einbringung unbeabsichtigt weiter geöffnet werden. Beides wirkt sich auf die Rissbreite aus. Obwohl auch über die Risslänge eine Fehlererkennung erzielt werden kann, wird vermutet, dass sich die Rissbreite, beziehungsweise die kleinere Dimension eines Fehlers stärker auf die Fehlererkennung auswirkt als die größere Dimension. Der entscheidende Parameter zur Fehlererkennung scheint somit nicht wie vermutet die Risslänge, sondern die Rissbreite.

Aus diesem Grund wurden die Prüfkörper mit dem Schnittmuster 2 untersucht. Sowohl bei der Auswertung nach dem SNR in Bild 4.48 als auch bei der Auswertung nach der Fehlersumme in Bild 4.50 konnte festgestellt werden, dass ab einer Schnittbreite von drei Schnitten eine 100 % Detektion möglich ist. Allen Prüfkörpern ist allerdings gemeinsam, dass in der letzten Reihe mit den breitesten Rissen (fünf Schnitte) der SNR und die Fehlersumme abnehmen. Ursachen für dieses Phänomen können in der Einspannung der Tapes gefunden werden. In die in Bild 3.1 gezeigte Befestigung wird das Tape beidseitig eingelegt und gespannt. Dadurch, dass die breitesten Schnitte sich in der Nähe einer solchen Einspannung befinden und diese Schnitte das Tape schwächen, kommt es zu einem leichten Wellenmuster. Hierdurch werden die Schnittflanken wieder aneinandergedrückt, sodass sie für den Luftultraschall als eine intakte Stelle wirken. Im Mittel besitzen die Fehler mit einer Rissbreite von fünf Schnitten dasselbe SNR und dieselbe Fehlersumme wie die Fehler mit einer Schnittbreite von drei Schnitten.

#### 4.5 Definition der Scanmethodik für einen kontinuierlichen Tapevorschub

Nachdem in Kapitel 3.6 die theoretische Berechnung für den Versatz durchgeführt wurde, wird in diesem Kapitel eine flächige Messung an einem präparierten Tape und eine mathematische Rückrechnung beschrieben.

Der gescannte Tapeabschnitt ist in Bild 4.51 dargestellt, ein manuell eingebrachter Riss ist weiß markiert. Der Abschnitt wurde mit luftgekoppeltem Ultraschall in senkrechter Durchschallung untersucht und als C-Scan ausgewertet. Die Einstellungen für den Tapevorschub und die Scangeschwindigkeit wurden so gewählt, dass sich ein Versatz von 8 mm parallel zur Faserrichtung einstellt, wenn die Prüfköpfe einmal hin- und einmal zurückgefahren sind. Die Scanauflösung wurde auf einen halben Millimeter quer zur Faserrichtung festgelegt.

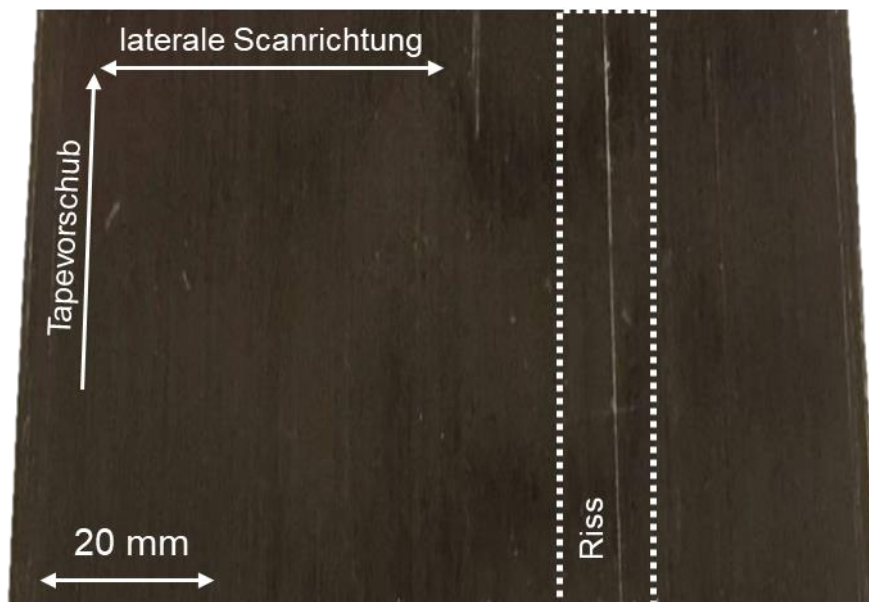


Bild 4.51: Untersucher Tapeabschnitt mit manuell eingebrachtem Riss

Der C-Scan dieses Tapeabschnitts, standardmäßig ausgewertet, ist in Bild 4.52 dargestellt. In diesem C-Scan lässt sich sehr deutlich der Riss auf der rechten Seite des Tapes erkennen. Dennoch kann in dieser Darstellung keine Aussage über die genaue Position auf dem Tape gemacht werden.

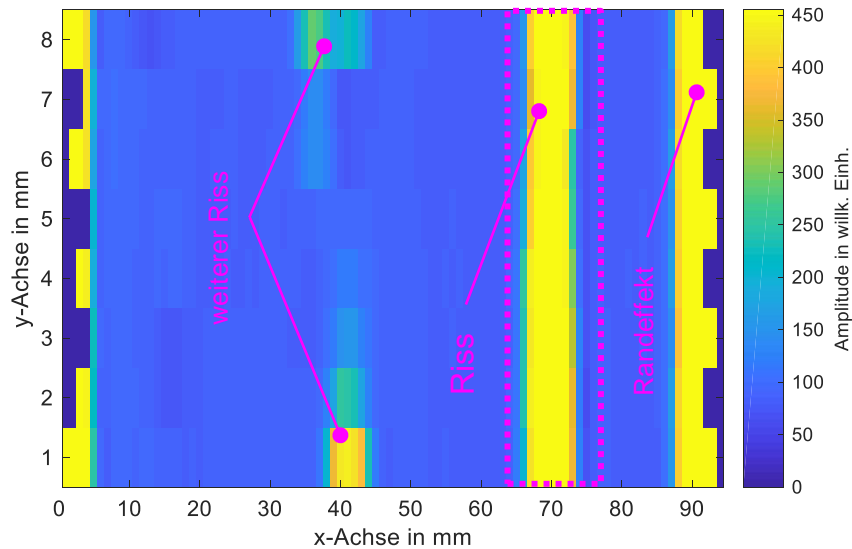


Bild 4.52: C-Scan des untersuchten Tapes, ausgewertet mit der Standardmethode

Um diese Problematik zu lösen, wurde ein Programm in Matlab® verfasst, das diesen Umstand berücksichtigt. Die bestehende Matrix wurde mithilfe des erweiterten Programms, der Scanmethodik der Prüfköpfe gleichend, in ein Zickzackmuster umgeschrieben. Der durch das erweiterte Skript entstehende C-Scan ist in Bild 4.53 gezeigt. Um die Verfahwege der Prüfköpfe zu veranschaulichen, wurde hierbei zunächst die Geometrie der verwendeten Prüfköpfe außer Acht gelassen, diese sind aber schematisch an zwei Positionen eingezeichnet, einmal am Rand ohne Überlappung und einmal in der Mitte mit Überlappung.

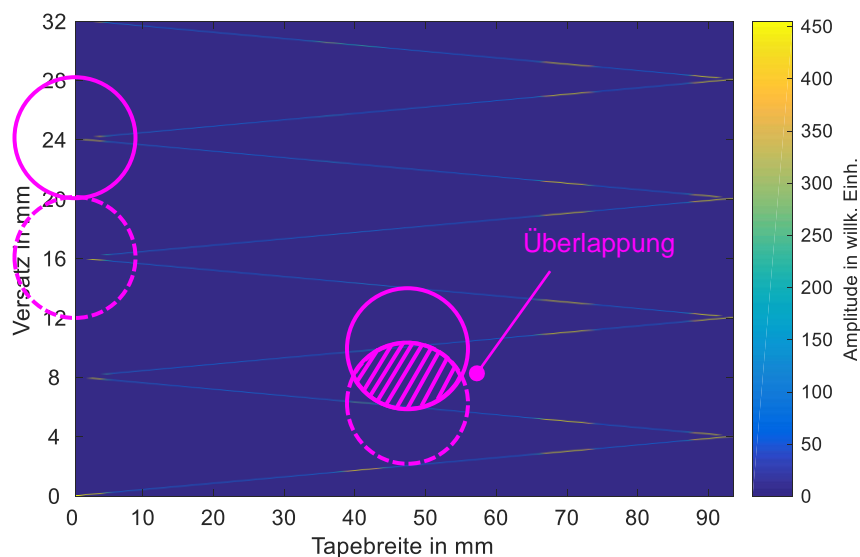


Bild 4.53: C-Scan des untersuchten Tapes, dargestellt mit abstrahiertem Zickzackmuster, die Prüfkopfpositionen zu unterschiedlichen Zeiten sind schematisch eingezeichnet



Wie bereits erwähnt sind die Verfahrenswege der Ultraschallprüfköpfe im Zickzackmuster zu erkennen. Allerdings wird durch dieses Bild der Eindruck vermittelt, dass einige Bereiche des Tapes bei der Prüfung nicht abgedeckt wurden. Die bei dieser Prüfung verwendeten Prüfköpfe hatten einen Durchmesser des aktiven Elements von 8 mm, was in diesem Fall genau dem Versatz parallel zur Faserorientierung entspricht. Durch eine weitere Anpassung des Skripts wurde die Breite der Prüfköpfe berücksichtigt. Der die Geometrie der Prüfköpfe berücksichtigende C-Scan ist in Bild 4.54 dargestellt.

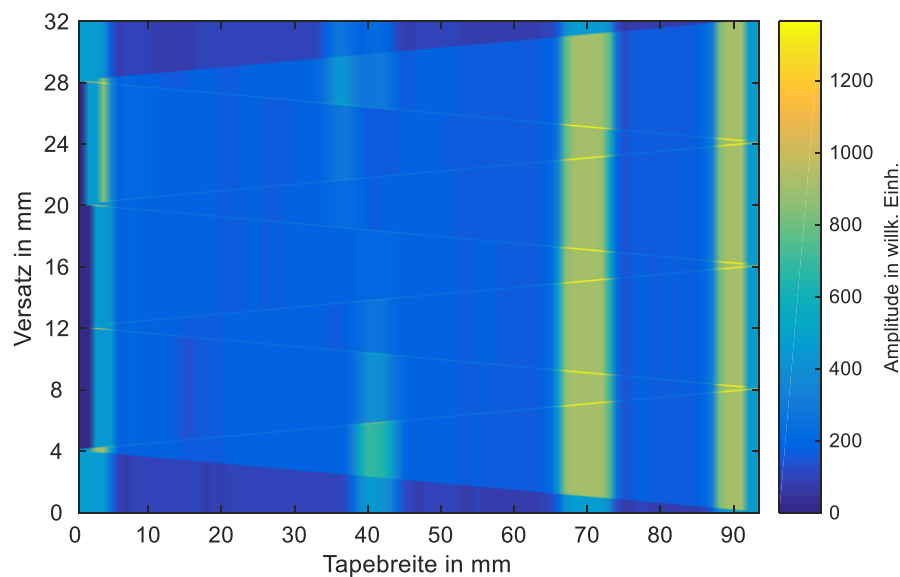


Bild 4.54: C-Scan des untersuchten Tapes, das abstrahierte Zickzackmuster wurde um die Breite der aktiven Fläche der Prüfköpfe erweitert

Der Vergleich von Bild 4.54 mit Bild 4.52 zeigt, dass in diesem speziellen Fall das gesamte Tape zu 100 % untersucht und alle Defekte detektiert wurden. Hieraus kann die Empfehlung gegeben werden, dass der Tapevorschub so eingestellt werden sollte, dass der Versatz der Ultraschallbahnen maximal der Breite des aktiven Elements der Prüfköpfe entsprechen sollte.

## 5 Fazit und Ausblick

### **Einfluss der Tape-Temperatur**

Ziel der ersten Hypothese war es, den Einfluss der Tape-Temperatur auf das Luftultraschallsignal darzustellen und auf die mechanischen Eigenschaften des Tapes zurückzuführen. Die prinzipielle Einsatzfähigkeit der Luftultraschallprüfköpfe konnte zunächst bestätigt werden, da diese zu keinem Zeitpunkt der vom Hersteller angegebenen maximalen Verwendungstemperatur von 65 °C ausgesetzt waren. Daher können die Prüfköpfe an jeglicher Position der Pultrusionsanlage angebracht werden, ohne eine Schädigung dieser zu riskieren. Zum Zwecke der Untersuchung des Temperatureinflusses, wurden diverse Prüfanordnungen der Luftultraschallprüfung an Tapes mit Temperaturen bis zu 120 °C untersucht. Dabei ergab sich, dass eine senkrechte und eine schräge Durchschallung einen mit steigender Tape-Temperatur annähernd linearen Abfall des Signals aufzeigten. Dieses Verhalten konnte auf die Erhöhung der Schallgeschwindigkeit in Luft bei gleichzeitiger Verringerung der Schallgeschwindigkeit im Tape begründet werden, da hierdurch der Reflexionsfaktor an der Luft/Tape Grenzfläche ansteigt. Untersuchungen mit einer geführten Welle ergaben einen exponentiellen Abfall des Signals mit steigender Tape-Temperatur aufgrund der Abnahme des E-Moduls im Tape. Hieraus kann eine Empfehlung gegeben werden, die Luftultraschallprüfung bei maximal 40 °C durchzuführen, insofern eine direkte Durchschallung verwendet wird. Bei einer Untersuchung mit geführten Wellen sollte aufgrund der starken Schwankungen des Signals bei erhöhten Tape-Temperaturen die Prüfung bei Raumtemperatur stattfinden.

Das Verständnis des Einflusses der Temperatur auf das Luftultraschallsignal ist prinzipiell gezeigt und auf die Ursachen zurückgeführt. Die Untersuchung wurde für das Zweistoffsystem Kohlenstofffaser und Polyamidmatrix durchgeführt. Weitere Werkstoffkombinationen, wie zum Beispiel der Einsatz von Glasfasern oder Aramidfasern in Kombination mit weiteren thermoplastischen Matrixmaterialien können mithilfe der in dieser Arbeit gezeigten Methode ebenfalls untersucht werden.

### **Fokussierung des Luftultraschalls**

Für die Bestätigung der zweiten Hypothese wurden Fokussierungstrichter mit einer linearen, einer parabolischen und einer exponentiellen Form gefertigt und untersucht. Simulationen nach der Finite-Elemente-Methode ergaben, dass bei der linearen Form die größte Schalldruckamplitude nach Austritt aus dem Trichter vorherrschen sollte, auch wenn die Unterschiede bei weiterer Entfernung sehr gering werden. Die Simulation auf der Empfängerseite zeigte den Trend, dass die lineare und exponentielle Trichterform eine um 20 dB höhere Schalldruckamplitude gegenüber

der parabolischen Form besitzen. Die Ergebnisse konnten mit der Vermessung des Schallfelds teilweise bestätigt werden. Diese zeigten die erfolgreiche Verringerung des Schallfelddurchmessers bei allen drei Trichterformen, wobei mit exponentiellen Form der geringste Durchmesser erreicht werden konnte. Zwar konnte im Bereich des Schalldrucks mit der parabolischen Form der größte Wert erreicht werden, allerdings konnten hier auch starke Nebenkeulen beobachtet werden. Es gilt zu beachten, dass bei der Schallfeldvermessung die Aufnahme des Signals durch den Empfänger nicht berücksichtigt ist. Die experimentell durchgeführten Messungen konnten ebenfalls die vorangegangenen Ergebnisse sowohl in Bezug auf die Schallschwächung als auch in Bezug auf das örtliche Auflösungsvermögen bestätigen. Es wird vermutet, dass ein Teil der gegenüber der unfokussierten Messung geringeren Energie an der Trichterwand in Wärme umgewandelt wird. Ebenso wird auch ein Teil der Energie als Nebenkeulen beim Austritt aus dem Trichter umgewandelt. Betrachtet man die Fokussierung, kann zusammenfassend gesagt werden, dass die exponentielle Form die beste Ortsauflösung erreicht, die lineare Form jedoch eine etwas geringere Schallschwächung erfährt. Es wird somit der Einsatz der linearen und der exponentiellen Form empfohlen.

Als Ausblick kann in diesem Fall gegeben werden, die lineare und exponentielle Form weiter zu untersuchen, sowohl in Bezug auf die exakte Form als auch auf die innere Struktur. Auch sollte untersucht werden, ob der Einsatz von zwei unterschiedlichen Trichterformen für Sender und Empfänger eine Verbesserung des SNR hervorruft. Die in dieser Arbeit hergestellten Trichter besaßen aufgrund des Herstellungsverfahrens Rillen auf der Innenseite, was eine Streuung begünstigt. Die Frage ist, ob sich bei Abwesenheit dieser Rillen das Signal erhöhen lässt oder ob sich durch weitere Interferenzen kein isoliertes Wellenpaket mehr erzeugen lässt.

### **Qualitative Analyseverfahren**

Mit der dritten Hypothese sollte gezeigt werden, dass mit einer automatisierten Analyse minimale Unterschiede in der Imprägnierung dargestellt werden können. Hierzu wurden diverse Programme zum automatisierten Auslesen von Messdaten geschrieben. Die Bewertung zwischen vier Tapes mit unterschiedlichen Imprägnierungsgraden wurde hierbei mit der Vergabe von Wertungspunkten erreicht. Es wurden die Kategorien maximale und minimale Amplitude im Messbereich, der Mittelwert aller Amplitudenwerte sowie die Standardabweichung herangezogen. Die Vergabe der Wertungspunkte und eine optische Darstellung mit „rot-grün“ Signalisierung erfolgte automatisch. Zwar konnte gezeigt werden, dass diverse Unterschiede in den Tapes vorkommen, allerdings musste stets auf ein Tape kalibriert werden. Dies bedeutet, dass ein i. O. Tape bestimmt werden muss, was nur durch zerstörende Methoden absolut erreicht werden kann. Aufgrund dieser

Tatsache kann die dritte Hypothese nur teilweise bestätigt werden. Jedoch können mit dieser Methode feine Unterschiede in der Tapequalität detektiert werden. Auch können unterschiedliche Einflüsse auf das Signal differenziert und je nach Punktevergabe gewichtet werden. Dies bedeutet, dass eine Pultrusionsanlage anhand dieser automatisierten Auswertung auf eine vorherig definierte Tapequalität eingestellt werden kann.

Für eine online Auswertung sollte in weiterführenden Entwicklungen diese Auswertemethode auf einen kontinuierlichen Tapevorschub erweitert werden. Somit könnte noch schneller auf Änderungen in der Qualität der Tapes, wie sie zum Beispiel auftauchen können, wenn eine neue Charge Kohlenstofffasern oder Kunststoffgranulat verwendet wird, reagiert werden.

### **Probability of Detection Analyse**

Obwohl die Evaluierung des Systems mittels einer POD-Analyse keine zentrale Hypothese dieser Arbeit darstellt, ist sie dennoch für die wirkungsvolle Einsatzfähigkeit des Luftultraschallsystems enorm wichtig. Um dies zu erreichen, wurden diverse Tapes mit Schnitten versehen, die sich zum einen in der Länge und zum anderen in der Breite (Anzahl paralleler Schnitte) unterschieden. Das Ergebnis der POD-Analysen zeigte, dass mit diesem Verfahren nicht nur die Detektionswahrscheinlichkeit von Defekten bestimmt werden kann, es eignen sich zudem für unterschiedliche Defektarten unterschiedliche Auswertemethoden für die Erstellung der POD-Werte. Diese waren die Bestimmung der Summe der Amplitudenwerte bei schmalen Rissen unterschiedlicher Länge und das SNR bei Rissen unterschiedlicher Breite.

Sollte dieses System in einer realen Produktionsumgebung eingesetzt werden, wird empfohlen, für jede Defektart die es zu detektieren gilt, eine separate POD-Analyse durchzuführen. In dieser Arbeit war eine ROC-Auswertung nicht möglich, da hierfür die Richtig-Positiv-Rate mit der Falsch-Positiv-Rate verglichen werden müsste. Eine Falsch-Positiv-Rate ist allerdings nicht vorhanden, da an jeder detektierten Stelle auch ein Fehler war.

### **Scanmethodik bei kontinuierlichem Tapevorschub**

Für die Prüfung an einer Pultrusionsanlage mit kontinuierlichem Tapevorschub wurde beispielhaft eine Berechnung durchgeführt, wieviel Versatz sich bei der Prüfung mit Luftultraschall ergibt, sollte das Prüfkopfpaar mit einer Achse quer über das Tape gefahren werden. Das Ergebnis der Berechnung ist abhängig vom Tapevorschub, der Tapebreite, der Beschleunigung und Geschwindigkeit der Lineareinheit und dem

Durchmesser der Prüfköpfe. Abhängig von diesen Faktoren können Flächenabdeckungen bis zu 100 % erreicht werden.

Diese Berechnungen sollten für jeden einzelnen Fall in der Produktion erneut durchgeführt werden. Je nach Anforderungen des Herstellers müssen so Einsparungen am Tapevorschub oder der Flächenabdeckung in Kauf genommen werden. Für den Einsatz an unterschiedlichen Pultrusionsanlagen ist zudem eine Prüfanlage erforderlich, die sich schnell und einfach in der Höhe und der Einstellung der Prüfköpfe einstellen lässt. Eine mögliche Konstruktion einer solchen Anlage ist in Anhang E dargestellt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die in dieser Arbeit entwickelte und verwendete Prüfeinrichtung zur (quasi)kontinuierlichen Überwachung des Herstellungsprozesses von CFK-Tapes erfolgreich demonstriert werden konnte. Dem Einsatz in einer Industrieumgebung sind hierbei wichtige Grundlagen gelegt worden, sodass nun der Übergang von einer Forschungsumgebung in die eigentliche Entwicklung erfolgen kann.

Ferner eröffnet diese Prüfeinrichtung weitere Möglichkeiten in der zerstörungsfreien Prüfung an kontinuierlich hergestellten Werkstoffen oder Bauteilen. So können beliebige Extrusionsprofile, unabhängig vom Werkstoff, mit Luftultraschall untersucht werden. Bei der Herstellung von Rohren können zum Beispiel geführte Wellen erzeugt werden, die sich anschließend in Umfangsrichtung ausbreiten und wieder detektiert werden können, eingeschlossene Defekte können somit über eine abgeschwächte Welle detektiert werden. Auch in der Herstellung von plattenartigen Bauteilen könnte eine Modifikation dieser Prüfeinrichtung einen Einsatz finden. Es ist ebenfalls denkbar, dass eine Verfahrenskombination mit den Prüfmethoden der zerstörungsfreien Prüfung, wie zum Beispiel die Thermografie oder die Wirbelstromprüfung mit der in dieser Arbeit vorgestellten Prüfeinrichtung kombiniert werden kann. Somit kann zum einen das jeweils passende Verfahren für den Werkstoff ausgewählt werden, zum anderen können durch eine Korrelation der Messdaten weitere Informationen bezüglich der Werkstoffeigenschaften extrahiert werden, die mit einem einzelnen Verfahren nicht bestimmbar sind.

## 6 Literaturverzeichnis

1. SOLODOV, I.Y., R. STOESSEL and G. BUSSE. Material characterization and NDE using focused slanted transmission mode of air-coupled ultrasound. In: *Research in Nondestructive Evaluation*, 2004, **15**(2), 65–85.
2. CASTAINGS, M. and B. HOSTEN. Lamb and SH waves generated and detected by air-coupled ultrasonic transducers in composite material plates. In: *Ndt & E International*, 2001, **34**(4), 249–258.
3. CASTAINGS, M. and P. CAWLEY. The generation, propagation, and detection of Lamb waves in plates using air-coupled ultrasonic transducers. In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1996, **100**(5), 3070–3077.
4. WITTEN, E. *Composites-Marktbericht 2017. Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen*.
5. BONTEN, C. *Kunststofftechnik. Einführung und Grundlagen*. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2014. ISBN 3446440933.
6. H. SCHÜRMAN. *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. 2., bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. ISBN 978-3-540-72189-5.
7. MINKE, G. *Lehmbau-Handbuch. Der Baustoff Lehm und seine Anwendung*. 4., überarb. und erg. Aufl. Staufen bei Freiburg: Ökobuch-Verl., 1999. ISBN 9783922964568.
8. LANG, K. *Zur Erweiterung des Spektrums von Faser-Kunststoff-Verbunden mit thermoplastischer Matrix-Einsatz unidirektional faserverstärkter Halbzeuge in hoch belasteten Strukturbauteilen des Automobil-und Flugzeugbaus*: Shaker, 2012. ISBN 3844015027.
9. COVESTRO. *Endlosfaserverstärkte thermoplastische Verbundwerkstoffe* [Zugriff am: 22. März 2018]. <https://www.plastics.covestro.com/Innovation/Fiber-Reinforced-Thermoplastic-Composites.aspx>
10. H. LENGSELD, F. WOLFF-FABRIS, J. KRÄMER, J. LACALLE, V. ALTSTÄDT, Hg. *Faserverbundwerkstoffe. Prepregs und ihre Verarbeitung*. München: Carl Hanser Verlag, 2015. ISBN 978-3-446-44080-7.
11. M. NEITZEL, P. MITSCHANG, U. BREUER, Hg. *Handbuch Verbundwerkstoffe. Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2014. ISBN 978-3-446-43697-8.
12. FRANK, E., L.M. STEUDLE, D. INGILDEEV, J.M. SPÖRL and M.R. BUCHMEISER. Carbonfasern. Präkursor-Systeme, Verarbeitung, Struktur und Eigenschaften. In: *Angewandte Chemie*, 2014, **126**(21), 5364–5403. Doi:10.1002/ange.201306129
13. G. ABTS. *Kunststoff-Wissen für Einsteiger*. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2016. ISBN 978-3-446-45104-9.

14. BECHTOLD, G. *Pultrusion von geflochtenen und axial verstärkten Thermoplast-Halbzeugen und deren zerstörungsfreie Porengehaltsbestimmung*: IVW, 2000. ISBN 3934930034.
15. BATES, P.J. Melt impregnation of glass roving in a thermoplastic pultrusion compounding process, 1995.
16. EMONTS, M. und H. JANSSEN. *Neue Technologien der Faserverbundtechnik. Potenzielle zukünftige Anwendungen für hochdynamische Vorschubsysteme*. Aachen, 2011.
17. MTORRES. *Torresfiberlayup* [Zugriff am: 22. März 2018]. <http://www.mtorres.es/en/aeronautics/products/carbon-fiber/torreslayup>
18. MACHERAUCH, E. und H.-W. ZOCH. *Praktikum in Werkstoffkunde. 95 ausführliche Versuche aus wichtigen Gebieten der Werkstofftechnik*. 12., überarb u. erw. Aufl. 2014. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. ISBN 978-3-658-05037-5.
19. Europäische Vereinigung der Hersteller von Luft- und Raumfahrtgerät ACEMA. DIN EN 2564 (1998-08-00), *Kohlenstofffaser-Lamine - Bestimmung der Faser-, Harz- und Porenanteile*.
20. MEINKE, H., F.-W. GUNDLACH, K. LANGE und K.-H. LÖCHERER. *Taschenbuch der Hochfrequenztechnik*. Vierte, völlig neubearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1986. ISBN 978-3-642-96895-2.
21. MARC KREUTZBRUCK. *Zerstörungsfreie Prüfung. Vorlesungsskript*. Stuttgart, 2018.
22. SHULL, P.J. *Nondestructive evaluation: theory, techniques, and applications*: CRC press, 2016. ISBN 0203911067.
23. PELZL, J. and B.K. BEIN. Festkörperuntersuchungen mit thermischen Wellen. In: *Physik Journal*, 1990, **46**(1), 12–17. Doi:10.1002/phbl.19900460111
24. KRAUTKRÄMER, J. und H. KRAUTKRÄMER. *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*. Berlin: Springer-Verlag, 2013. ISBN 3662134268.
25. KROHN, N. and G. BUSSE. Nichtlineare Vibrometrie zur Schadenscharakterisierung. In: *DGZfP Jahrestagung. Berlin: DGZfP Berichtsband*, 2001.
26. J. C. HALPIN and J.L. KARDOS. The Halpin-Tsai equations. A review. In: *Polymer Engineering and Science*, 1976, **16**(5), 344–352. Doi:10.1002/pen.760160512
27. DÖRING, D. *Luftgekoppelter Ultraschall und geführte Wellen für die Anwendung in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung*: Universität Stuttgart, 2011.
28. SLAUGHTER, W.S. *Linearized theory of elasticity*: Birkhauser, 2013. ISBN 1461200938.

29. IBACH, H. und H. LÜTH. *Festkörperphysik. Einführung in die Grundlagen*. Berlin: Springer-Verlag, 2009. ISBN 3540857958.
30. KINO, G.S. *Acoustic waves. Devices, imaging, and analog signal processing*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1987. Prentice-Hall signal processing series. ISBN 0130030473.
31. FEDOROV, F.I. *Theory of elastic waves in crystals*: Springer Science & Business Media, 1968. ISBN 1475712758.
32. NAYFEH, A.H. *Wave propagation in layered anisotropic media. With application to composites*. Amsterdam: Elsevier, 1995. ISBN 0080543731.
33. VIKTOROV, I.A. *Rayleigh and Lamb Waves. Physical Theory and Applications: Translated from Russian*: Plenum press, 1967.
34. VIKTOROV, A. *Rayleigh and Lamb Waves. Physical Theory and Applications*: Springer Verlag, 2014. ISBN 1489956832.
35. ROGERS, W.P. Elastic property measurement using Rayleigh-Lamb waves. In: *Research in Nondestructive Evaluation*, 1995, **6**(4), 185–208. Doi:10.1007/BF01606381
36. DEUTSCH, V., M. PLATTE und M. VOGT. *Ultraschallprüfung. Grundlagen und industrielle Anwendungen*. Berlin: Springer-Verlag, 2013. ISBN 3642591388.
37. EICHLER, H.-J. *Optik. Wellen-und Teilchenoptik*: Walter de Gruyter, 2004. 3. ISBN 3110198045.
38. SOLODOV, I., D. DÖRING and G. BUSSE. Air-coupled Lamb and Rayleigh waves for remote NDE of defects and material elastic properties. In: *J. Mech. Eng. Sci*, 2010, **56**, 557–564.
39. DÖRING, J., J. BARTUSCH, M. GAAL, M. KREUTZBRUCK, A. ERHARD and V. BOVTUN. Ferroelektret-Prüfköpfe für die zerstörungsfreie Prüfung mit Luftultraschall. In: *Materials Testing*, 2013, **55**(2), 96–102. Doi:10.3139/120.110418
40. DÖRING, J., V. BOVTUN, J. BARTUSCH, A. ERHARD, M. KREUTZBRUCK and Y. YAKYMENKO. Nonlinear electromechanical response of the ferroelectret ultrasonic transducers. In: *Applied Physics A*, 2010, **100**(2), 479–485. Doi:10.1007/s00339-010-5752-7
41. DÖRING, J., V. BOVTUN, M. GAAL, J. BARTUSCH, A. ERHARD, M. KREUTZBRUCK and Y. YAKYMENKO. Piezoelectric and electrostrictive effects in ferroelectret ultrasonic transducers. In: *Journal of Applied Physics*, 2012, **112**(8), 84505. Doi:10.1063/1.4759052
42. GORI, F., G. GUATTARI and C. PADOVANI. Bessel-Gauss beams. In: *Optics Communications*, 1987, **64**(6), 491–495. Doi:10.1016/0030-4018(87)90276-8



43. LU, J.Y. and J.F. GREENLEAF. Ultrasonic nondiffracting transducer for medical imaging. In: *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 1990, **37**(5), 438–447. Doi:10.1109/58.105250
44. EIRAS, J.A., E. MORENO, H. CALAS, A. AULET, C.A. NEGREIRA, L. LEIJA and G. GONZALEZ. Vibration modes in ultrasonic bessel transducer. In: *2003: IEEE Ultrasonics Symposium*, 1314–1317.
45. EALO, J.L., J.J. CAMACHO and C. FRITSCH. Airborne ultrasonic phased arrays using ferroelectrets. A new fabrication approach. In: *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 2009, **56**(4), 848–858. Doi:10.1109/TUFFC.2009.1108
46. SONG, J. and D.E. CHIMENTI. Design, fabrication and characterization of a spherically focused capacitive air-coupled ultrasonic transducer. In: *Int. J. Appl. Sci. Eng*, 2006, **4**(1), 1–19.
47. KARPELSON, A., Hg. *Piezotransducers with acoustic lenses forming narrow weakly diverging ultrasonic beams*: Citeseer, 2006.
48. TARNOCZY, T. Sound focussing lenses and waveguides. In: *Ultrasonics*, 1965, **3**(3), 115–127. Doi:10.1016/S0041-624X(65)80002-6
49. HOSTEN, B. Parabolic Mirror and Air-Coupled Transducer for Multimodal Plate Wave Detection. In: *AIP Conference Proceedings*: AIP, 2003, 1243–1250.
50. DAI, X., J. ZHU, Y.-T. TSAI and M.R. HABERMAN. Use of parabolic reflector to amplify in-air signals generated during impact-echo testing. In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2011, **130**(4), EL167-72. Doi:10.1121/1.3632106
51. GAN, T.-H., D.A. HUTCHINS, D.R. BILLSON and D.W. SCHINDEL. High-resolution, air-coupled ultrasonic imaging of thin materials. In: *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 2003, **50**(11), 1516–1524. Doi:10.1109/TUFFC.2003.1251135
52. HADIMIOGLU, B., E.G. RAWSON, R. LUJAN, M. LIM, J.C. ZESCH, B.T. KHURI-YAKUB und C.F. QUATE, Hg. *High-efficiency Fresnel acoustic lenses*: INSTITUTE OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERS INC, 1993. 1. ISBN 1051-0117.
53. HUGHES, W.J. und CRAIG, JR. *The Focusing Properties of an Acoustic Thin Lens and Zone Plate*, 1996.
54. SCHINDEL, D.W., A.G. BASHFORD and D.A. HUTCHINS. Focussing of ultrasonic waves in air using a micromachined Fresnel zone-plate. In: *Ultrasonics*, 1997, **35**(4), 275–285. Doi:10.1016/S0041-624X(97)00011-5
55. SCHINDEL, D.W., A.G. BASHFORD and D.A. HUTCHINS. Chromatic aberration of an air-coupled ultrasonic Fresnel zone-plate. In: *IEEE transactions*

- on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 1999, **46**(1), 242–246. Doi:10.1109/58.741541
56. SLEVA, M.Z., W.D. HUNT and R.D. BRIGGS. Focusing performance of epoxy- and air-backed polyvinylidene fluoride Fresnel zone plates. In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1994, **96**(3), 1627–1633. Doi:10.1121/1.410242
  57. GÓMEZ, Á.-A., TOMÁS E., J. CAMACHO and C. FRITSCH. Passive focusing techniques for piezoelectric air-coupled ultrasonic transducers. In: *Ultrasonics*, 2016, **67**, 85–93. Doi:10.1016/j.ultras.2016.01.001
  58. RIEKHER, R. Fernrohre und ihre Meister. In: *Fernrohre und ihre Meister., by Riekher, R. Verlag Technik, Berlin (Germany), 1990, 443 p., ISBN 3-341-00791-1, Price DM 56.00., 1990.*
  59. KELLY, S.P., R. FARLOW and G. HAYWARD. Applications of through-air ultrasound for rapid NDE scanning in the aerospace industry. In: *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 1996, **43**(4), 581–591. Doi:10.1109/58.503780
  60. PETERS, J. Non-Contact Inspection of Composites Using Air-Coupled Ultrasound. In: *AIP Conference Proceedings: AIP*, 2003, 973–980.
  61. VLADIŠAUSKAS, A., R. RAIŠUTIS and E. ŽUKAUSKAS. Air-coupled ultrasonic transducers with collimators. In: *Ultragarsas*, 2006, **64**(1), 24–28.
  62. EPPLE, S. Tape Temperatur bei der Pultrusion. persönliche Mitteilung, 2018.
  63. DAO, P.B. and W.J. STASZEWSKI. Cointegration approach for temperature effect compensation in Lamb-wave-based damage detection. In: *Smart Materials and Structures Vol.22*, 2013, (9). Doi:10.1088/0964-1726/22/9/095002
  64. MARZANI, A. and S. SALAMONE. Numerical prediction and experimental verification of temperature effect on plate waves generated and received by piezoceramic sensors. In: *Mechanical Systems and Signal Processing 30*, 2012, 204–217. Doi:10.1016/j.ymssp.2011.11.003
  65. LEE, H.-J. and D.A. SARAVANOS. The Effect of Temperature Dependent Material Properties on the Response of Piezoelectric Composite Materials. In: *Journal of Intelligent Material Systems and Structures Vol.9*, 1998, 503–508. Doi:10.1177/1045389X9800900702
  66. DI LANZA SCALEA, F. and S. SALAMONE. Temperature effects in ultrasonic Lamb wave structural health monitoring systems. In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2008, **124**(1), 161–174. Doi:10.1121/1.2932071
  67. LEE, B.C., G. MANSON and W.J. STASZEWSKI. Environmental Effects on Lamb Wave Responses from Piezoceramic Sensors. In: *Materials Science Forum*, 2003, **440-441**, 195–202. Doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.440-441.195

68. CHAMBERS, J., B. WARDLE and S. KESSLER. Durability Assessment of Lamb Wave-Based Structural Health Monitoring Nodes. In: [Reston, VA]: [American Institute of Aeronautics and Astronautics], 2006. ISBN 978-1-62410-040-6.
69. RAGHAVAN, A. and C.E.S. CESNIK. Studies on effects of elevated temperature for guided-wave structural health monitoring. In: M. TOMIZUKA, C.-B. YUN und V. GIURGIUTIU, Hg. *The 14th International Symposium on: Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*: SPIE, 2007.
70. SCHUBERT, K. *Beitrag zur Strukturzustandsüberwachung von faserverstärkten Kunststoffen mit Lamb-Wellen unter veränderlichen Umgebungsbedingungen*: Logos Verlag Berlin GmbH, 2013. ISBN 3832535292.
71. JAKEVIČIUS, L. and A. DEMČENKO. Ultrasound attenuation dependence on air temperature in closed chambers. In: *Ultragarsas*, 2003, **63**(1), 18–22.
72. SCHUBERT, K.J., B. TIM und A.S. HERRMANN. Untersuchung des Ausbreitungsverhaltens von Lamb-Wellen in viskoelastischen Faser-verbundwerkstoffen, 2011. <http://jt2011.dgzfp.de/Portals/jt2011/BB/mo3a3.pdf>
73. CROXFORD, A.J., J. MOLL, P.D. WILCOX and J.E. MICHAELS. Efficient temperature compensation strategies for guided wave structural health monitoring. In: *Ultrasonics Vol.50*, 2010, 517–528. Doi:10.1016/j.ultras.2009.11.002
74. CROXFORD, A.J., P.D. WILCOX, G. KONSTANTINIDIS and B.W. DRINKWATER. Strategies for overcoming the effect of temperature on guided wave structural health monitoring. In: *Health Monitoring of Structural and Biological Systems Vol. 6532*, 2007. Doi:10.1117/12.719435
75. KONSTANTINIDIS, G., B.W. DRINKWATER and P.D. WILCOX. The temperature stability of guided wave structural health monitoring systems. In: *Smart Materials and Structures Vol.15*, 2006, 967. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/15/4/010/meta>
76. LU, Y. and J.E. MICHAELS. A methodology for structural health monitoring with diffuse ultrasonic waves in the presence of temperature variations. In: *Ultrasonics Vol.43*, 2005, 717–731. Doi:10.1016/j.ultras.2005.05.001
77. CLARKE, T., F. SIMONETTI and P. CAWLEY. Guided wave health monitoring of complex structures by sparse array systems. Influence of temperature changes on performance. In: *Journal of Sound and Vibration*, 2010, **329**(12), 2306–2322. Doi:10.1016/j.jsv.2009.01.052
78. CLARKE, T. Guided wave health monitoring of complex structures. In: *Imperial Collage London*, 2009.

79. DEPARTMENT OF DEFENSE HANDBOOK. *Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment*, 2009. 7.
80. HEINHOLD, J. und K.-W. GAEDE. *Ingenieur-Statistik*: Oldenbourg, 1968.
81. GEORGIU, G.A. PoD curves, their derivation, applications and limitations. In: *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2007, **49**(7), 409–414. Doi:10.1784/insi.2007.49.7.409
82. BERENS, A.P. NDE reliability data analysis. In: *ASM Handbook*, 1989, **17**, 689–701.
83. CHAI, T. and R.R. DRAXLER. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE). In: *Geoscientific Model Development Discussions*, 2014, **7**(1), 1525–1534. Doi:10.5194/gmdd-7-1525-2014
84. LOHNINGER, H. Grundlagen der Statistik. In: *Virtual Institute of Applied Science. Von statistic for you. abgerufen*, 2007.
85. SKOLNIK, M. Introduction to radar systems. In: *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2001, **16**(10), 19.
86. RITTMANN, J. *Probability of Detection (POD) für die Luftultraschall Tapeprüfung*. Masterarbeit. Universität Stuttgart. Institut für Kunststofftechnik. Stuttgart, 2017.
87. SEIDEL, M. *Auswahl des optimalen Prüfkopfdesigns für die Luftultraschallprüfung an CFK-Tapes*. Bachelorarbeit. Universität Stuttgart. Institut für Kunststofftechnik. Stuttgart, 2017.
88. TRIF, C. *Aufbau und Evaluierung einer Infraroterwärmung für thermoplastische Tapes*. Studienarbeit. Universität Stuttgart. Institut für Kunststofftechnik. Stuttgart, 2018.
89. SCHIEBOLD, K. *Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung - Ultraschallprüfung*. Berlin: Springer Vieweg, 2015. ISBN 3-662-44699-5.
90. BERGMANN, L. *Der Ultraschall und seine Anwendung in Wissenschaft und Technik*: S. Hirzel, 1957.
91. MESCHEDE, D. und H. VOGEL. *Gerthsen Physik*. 24., überarb. Aufl. Berlin: Springer, 2010. Springer-Lehrbuch. ISBN 978-3-642-12893-6.
92. GRELLMANN, W. und S. SEIDLER. *Kunststoffprüfung*: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2015. ISBN 3446443908.
93. KOŠKIN, N.I., M.G. ŠIRKEVIČ, W. STOLZ und S. IVANOV, Hg. *Elementare Physik. Definitionen, Gesetze, Tabellen*. Moskau: Verl. Mir, 1987. ISBN 3055004671.
94. KUTTRUFF, H. *Akustik. Eine Einführung*. Stuttgart u.a.: Hirzel, 2004. ISBN 3-7776-1244-8.
95. ŠUTILOV, V.A. *Physik des Ultraschalls. Grundlagen*. Vienna: Springer Vienna, 1984. ISBN 9783709187517.

96. KIRCHHOFF, S. *Evaluierung eines Fokussierungstrichters für Luftultraschallprüfköpfe*. Bachelorarbeit. Universität Stuttgart. Institut für Kunststofftechnik. Stuttgart, 2018.
97. FABB-IT UG. *Technische Datenblätter* [Zugriff am: 22. März 2018]. <https://www.fabb-it.de/files/datenblaetter/abs.pdf>
98. ULTIMAKER B.V. *Technical and safety data sheets* [Zugriff am: 22. März 2018]. <https://ultimaker.com/download/67617/TDS%20ABS%20v3.011-ger-DE.pdf>
99. IGLISCH B. *Entwicklung eines Fokussierungstrichters für Luftultraschallprüfköpfe*. Masterarbeit. Universität Stuttgart. Institut für Kunststofftechnik. Stuttgart, 2018.
100. DÖRING, D., I. SOLODOV and G. BUSSE. Air-Coupled Vibrometry. Making Linear and Nonlinear Sound in Air Visible. In: SPRINGER, Hg. *Acoustical imaging*. Dordrecht, 2011. ISBN 9400738021.
101. SOLODOV, I., D. DÖRING and G. BUSSE. Air-coupled laser vibrometry: analysis and applications. In: *Applied Optics*, 2009, **48**(7), C33. Doi:10.1364/AO.48.000C33
102. MEILER, S., P. FEY, W. ESSIG, M. KREUTZBRUCK, M. DRAŠKOVIĆ and P. MIDDENDORF. Non-destructive Testing of CFR-Tapes with Thermoplastic Matrix using Air-coupled Ultrasound. In: *ANTEC*, 2016, 448–456.
103. ESSIG, W., P. FEY, S. MEILER and M. KREUTZBRUCK. Non-contact inline monitoring of thermoplastic CFRP tape quality using air-coupled ultrasound. In: *QNDE*: AIP Publishing, 2017.
104. N. HENZE. *Stochastik für Einsteiger. Eine Einführung in die faszinierende Welt des Zufalls*. 11. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2017. ISBN 978-3-658-14739-6.
105. T. BENESCH. *Schlüsselkonzepte zur Statistik. die wichtigsten Methoden, Verteilungen, Tests anschaulich erklärt*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. ISBN 978-3-8274-2772-4.
106. ERHARDT, A. *Einführung in die Digitale Bildverarbeitung. Grundlagen, Systeme und Anwendungen*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2008. ISBN 9783519004783.
107. ITEM INDUSTRIETECHNIK. *Lineareinheiten mit Zahnriemenantrieb* [Zugriff am: 22. März 2018]. <https://product.item24.de/produkte/produktkatalog/products/>
108. RAPP, M. *Ansätze zur Simulation von geführten Wellen in CFK Tapes*. Bachelorarbeit. Universität Stuttgart. Institut für Kunststofftechnik. Stuttgart, 2017.

109. SCHRÖCK, D. *Entwicklung einer Scanmethodik für die Luftultraschall-Einkanalprüfung an CFK Tapes*. Bachelorarbeit. Universität Stuttgart. Institut für Kunststofftechnik. Stuttgart, 2017.
110. HÖLZ, M. *Untersuchung des Einflusses der Tape-Temperatur bei der Luftultraschallprüfung*. Studienarbeit. Universität Stuttgart. Institut für Kunststofftechnik. Stuttgart, 2017.
111. SCHIF, F. *Entwicklung einer Methodik zur Bestimmung des Faservolumengehalts von thermoplastischen Tapes anhand von Luftultraschall*. Masterarbeit. Universität Stuttgart. Institut für Kunststofftechnik. Stuttgart, 2017.
112. BOTT, D. *Konstruktion und Fertigung eines mobilen Prüfstands für die zerstörungsfreie Prüfung von CFK-Tapes*. Studienarbeit. Universität Stuttgart. Institut für Kunststofftechnik. Stuttgart, 2018.
113. EHLERS, T. *Simulation geführter Wellen in Tapes mit COMSOL*. Studienarbeit. Universität Stuttgart. Institut für Kunststofftechnik. Stuttgart, 2018.
114. THE ULTRAN GROUP. *NON-Contact Ultrasound (NCU). Phenomenally High Efficient Transducers - 50 kHz to >5.0 MHz*.
115. DOMININGHAUS, H., P. ELSNER, P. EYERER und T. HIRTH, Hg. *Kunststoffe. Eigenschaften und Anwendungen*. 8., neu bearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer, 2012. VDI-Buch. ISBN 9783642161728.
116. LAROSE, E. and S. HALL. Monitoring stress related velocity variation in concrete with a  $2 \times 10^{-5}$  relative resolution using diffuse ultrasound. In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2009, **125**(4), 1853–1856. Doi:10.1121/1.3079771

## 7 Anhang

### Anhang A Datenblätter der verwendeten Prüfköpfe

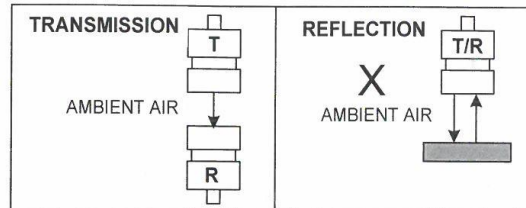


**The Ultrasonics Group**  
2380 Commercial Blvd., State College, PA 16801 USA  
**Tel** +1.814.861.2001 **Fax** +1.814.861.2045  
**web** www.ultrasonics.com



**Model:** NCG200-D13-P38 **Serial #:** 380357 **Customer/PO:** IKT L- 8447  
**Active area:** 12.5 mm diameter **Nominal Frequency:** 200 kHz **Cable:** RG 174/U, 2m

#### TEST METHOD:



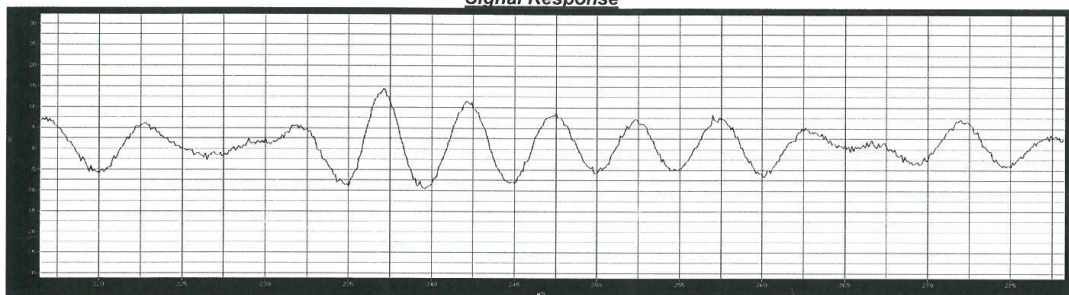
**Test Material:** ~38 mm ambient air **Reference Signal:** Flat Reflector

#### INSTRUMENTS & SETTINGS

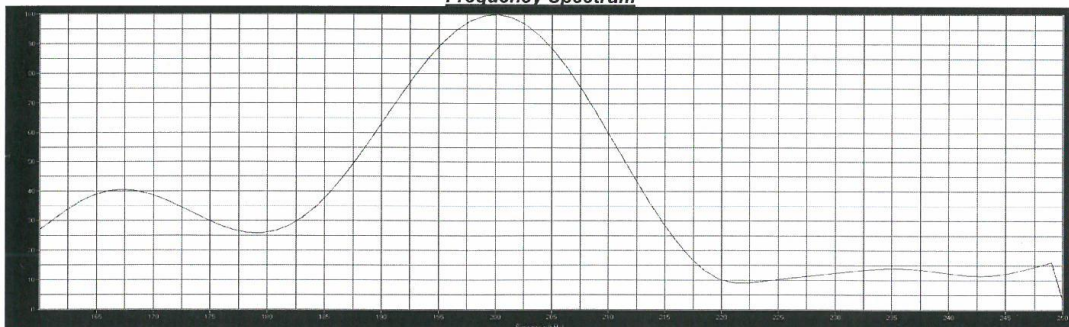
**Pulser/Receiver:** Ultrasonics U710 Ultrasonic Analysis System

**Energy:** 375V tone burst **Cycles:** 1 **Frequency:** 200 kHz **Gain:** 0dB **Damping:** None **HPF:** 40 kHz **LPF:** 10000 kHz

#### Signal Response



#### Frequency Spectrum



#### OBSERVATIONS & RESULTS\*

Peak Frequency: 200 kHz	Bandwidth Center Frequency: 200 kHz	Bandwidth at -6dB: 24 kHz
Sensitivity: high	Focal Length in AIR: ~38mm	Other:

**\*SPECIAL REMARKS:** Tested using Ultrasonics U710 system for optimal results. As the U710 system utilizes tone burst excitation, bandwidth results are likely to be lower than usual.

**ANALYST:** MDW

**DATE:** August 7, 2015

The data presented in this report was obtained by laboratory analysis of this transducer under the conditions set forth herein. This data is believed to be true and scientific in character and meets or exceeds the ASTM E1065 standard. Ultrasonics Laboratories, Inc. assumes no responsibility, explicit or implicit, if the reported results are found to vary under different sets of test conditions and procedures.

Bild 7.1: Luftultraschallprüfkopf 1, als Empfänger verwendet





**The Ultrasonics Group**  
 2380 Commercial Blvd., State College, PA 16801 USA  
**Tel** +1.814.861.2001 **Fax** +1.814.861.2045  
**web** www.ultrasonics.com



**Model:** NCG200-D13-P38

**Serial #:** 380358

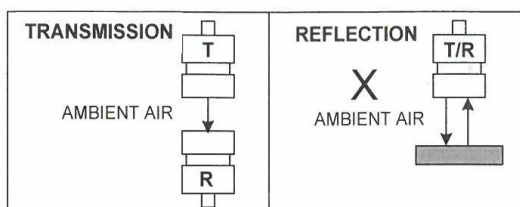
**Customer/PO:** IKT L- 8447

**Active area:** 12.5 mm diameter

**Nominal Frequency:** 200 kHz

**Cable:** RG 174/U, 2m

**TEST METHOD:**



**Test Material:** ~38 mm ambient air

**Reference Signal:** Flat Reflector

**INSTRUMENTS & SETTINGS**

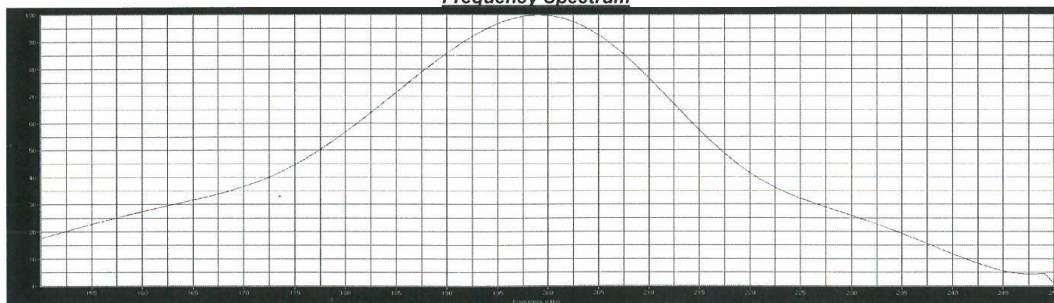
**Pulsar/Receiver:** Ultrasonics U710 Ultrasonic Analysis System

**Energy:** 375V tone burst **Cycles:** 1 **Frequency:** 200 kHz **Gain:** 0dB **Damping:** None **HPF:** 40 kHz **LPF:** 10000 kHz

**Signal Response**



**Frequency Spectrum**



**OBSERVATIONS & RESULTS\***

Peak Frequency: 199 kHz

Bandwidth Center Frequency: 197 kHz

Bandwidth at -6dB: 40 kHz

Sensitivity: high

Focal Length in AIR: ~38mm

Other:

**\*SPECIAL REMARKS:** Tested using Ultrasonics U710 system for optimal results. As the U710 system utilizes tone burst excitation, bandwidth results are likely to be lower than usual.

**ANALYST:** MDW

**DATE:** August 7, 2015

The data presented in this report was obtained by laboratory analysis of this transducer under the conditions set forth herein. This data is believed to be true and scientific in character and meets or exceeds the ASTM E1065 standard. Ultrasonics Laboratories, Inc. assumes no responsibility, explicit or implicit, if the reported results are found to vary under different sets of test conditions and procedures.

Bild 7.2: Luftultraschallprüfkopf 2, als Sender verwendet



## Anhang B Auswertung der Coda

Im inneren Bereich der in Kapitel 3.4.1 beschriebenen Tapes zeichnen sich die A-Bilder durch ein ähnliches Abschwingverhalten, der sogenannten Coda [116] aus. Zur Darstellung der Einhüllenden dieser Coda wurde ein weiteres Skript mit MATLAB® erstellt. Das Skript berechnet die Kontur der Coda, indem es die Maxima eines A-Bilds miteinander verbindet. Zeichnet man die Konturen aller A-Bilder in ein Diagramm, ergeben sich bereits deutliche Unterschiede zwischen einem Bereich ohne Randeffekt und einem Bereich mit Randeffekt, wie in Bild 7.3 zu sehen ist.

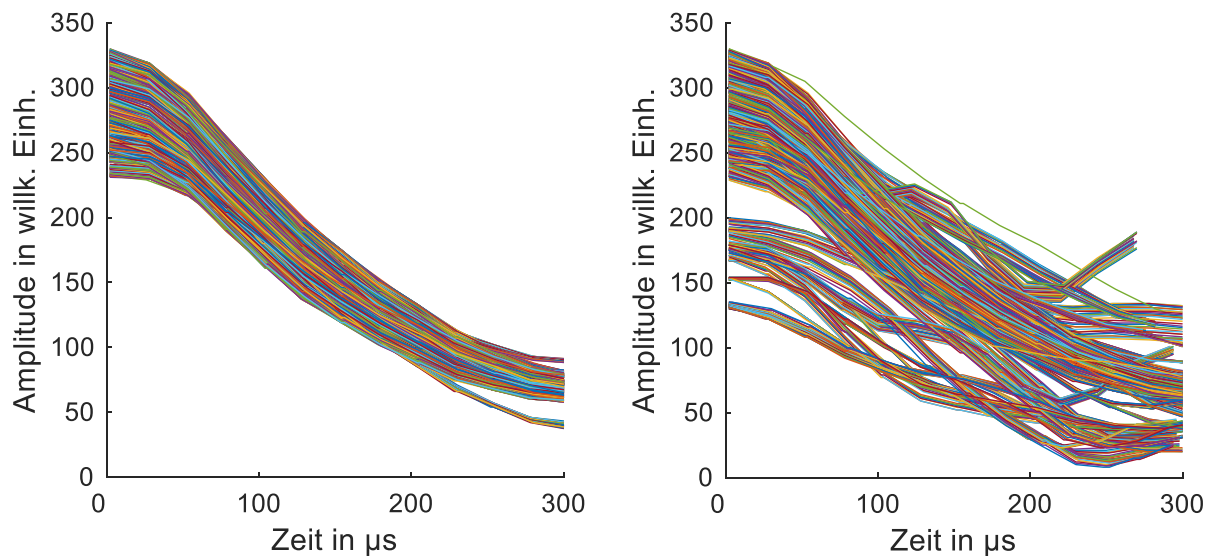


Bild 7.3: Vergleich der Konturen der Coda, gute Auswahl des Messbereichs (links) und Bereich mit Randeffekten (rechts)

Diese Auswertung ist aufgrund der numerischen Näherung der vielen Funktionen sehr rechenintensiv und benötigt je nach Größe des Datensatzes mehrere Minuten. Sie wird daher vorrangig nur bei der Kontrolle des Einstellprozesses eingesetzt, da sie sich sehr gut eignet, um die Qualität der Messung und des ausgewählten Messbereichs einzuschätzen.

## Anhang C Entwicklung einer qualitativen Analysemethode

### a) Daten der Wertungsdatei

Tabelle 7.1: Inhalt der Datei Wertung.mat

Wertung.mat	schlecht	akzeptabel	gut	s. gut	gut	akzeptabel	schlecht
Std-abw.	67	61	55				
Mittelwert	537	546	556	565	574	584	593
Max. Amplitude				643	657	670	684
Min. Amplitude	415	433	452	471			

### b) Ergebnisse der Versuchsreihe 1

Tabelle 7.2: Ergebnisse der Tapeabschnitte Te1 und Te2 aus Versuchsreihe 1

V1	Te1-1	Te1-2	Te1-3	Te1-4	Te2-1	Te2-2	Te2-3	Te2-4
Standardabw.	49	47	49	54	44	34	37	37
Maximalwert	662	652	664	678	661	624	661	661
Minimalwert	453	443	440	456	459	449	460	460
Mittelwert	569	562	557	572	566	550	548	548
Wertungspunkte	19	20	19	18	20	19	19	19

Tabelle 7.3: Ergebnisse der Tapeabschnitte Te3 und Te4 aus Versuchsreihe 1

V1	Te3-1	Te3-2	Te3-3	Te3-4	Te4-1	Te4-2	Te4-3	Te4-4
Standardabw.	47	35	46	35	55	47	66	49
Maximalwert	676	648	673	704	663	648	666	636
Minimalwert	450	486	454	487	418	398	371	384
Mittelwert	552	557	551	569	525	513	526	506
Wertungspunkte	18	20	18	19	11	11	5	10

### c) Ergebnisse der Versuchsreihe 2

Tabelle 7.4: Ergebnisse der Tapeabschnitte Te1 und Te2 aus Versuchsreihe 2

V2	Te1-1	Te1-2	Te1-3	Te1-4	Te2-1	Te2-2	Te2-3	Te2-4
Standardabw.	50	48	49	50	45	37	38	42
Maximalwert	669	651	661	675	653	625	666	666
Minimalwert	436	453	440	458	458	449	463	441
Mittelwert	568	564	550	579	556	546	552	547
Wertungspunkte	19	20	18	18	19	18	19	18

Tabelle 7.5: Ergebnisse der Tapeabschnitte Te3 und Te4 aus Versuchsreihe 2

V2	Te3-1	Te3-2	Te3-3	Te3-4	Te4-1	Te4-2	Te4-3	Te4-4
Standardabw.	46	34	43	33	53	48	68	49
Maximalwert	678	646	673	656	647	649	687	657
Minimalwert	452	487	454	486	404	389	386	398
Mittelwert	553	553	547	563	512	511	541	519
Wertungspunkte	18	20	18	21	11	11	6	11

d) Fotografien der verwendeten Tapes

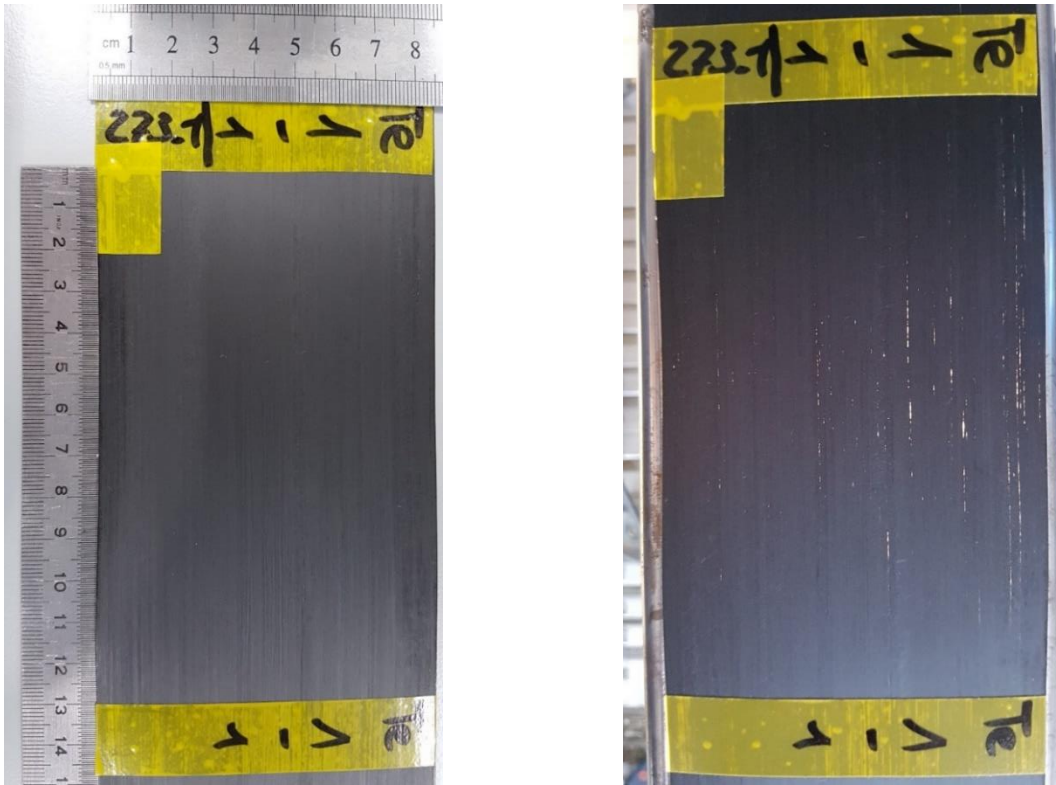


Bild 7.4: Fotografie des Tapes Te1-1. Links: ohne, rechts: mit Hintergrundbeleuchtung

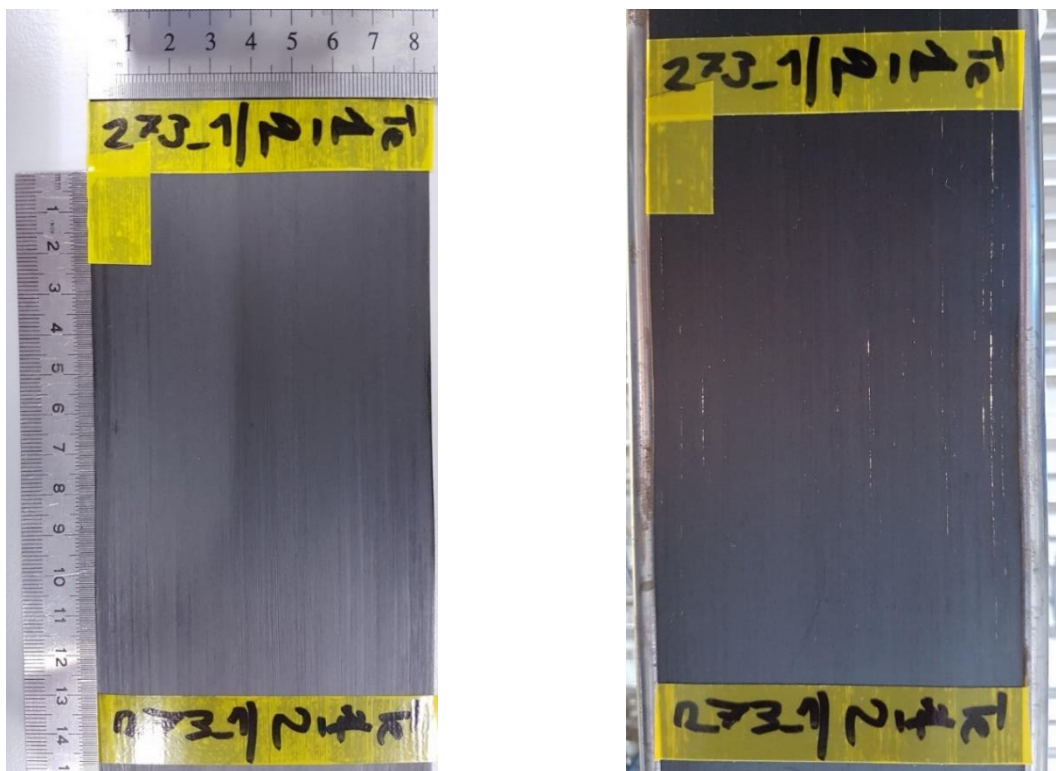


Bild 7.5: Fotografie des Tapes Te1-2. Links: ohne, rechts: mit Hintergrundbeleuchtung

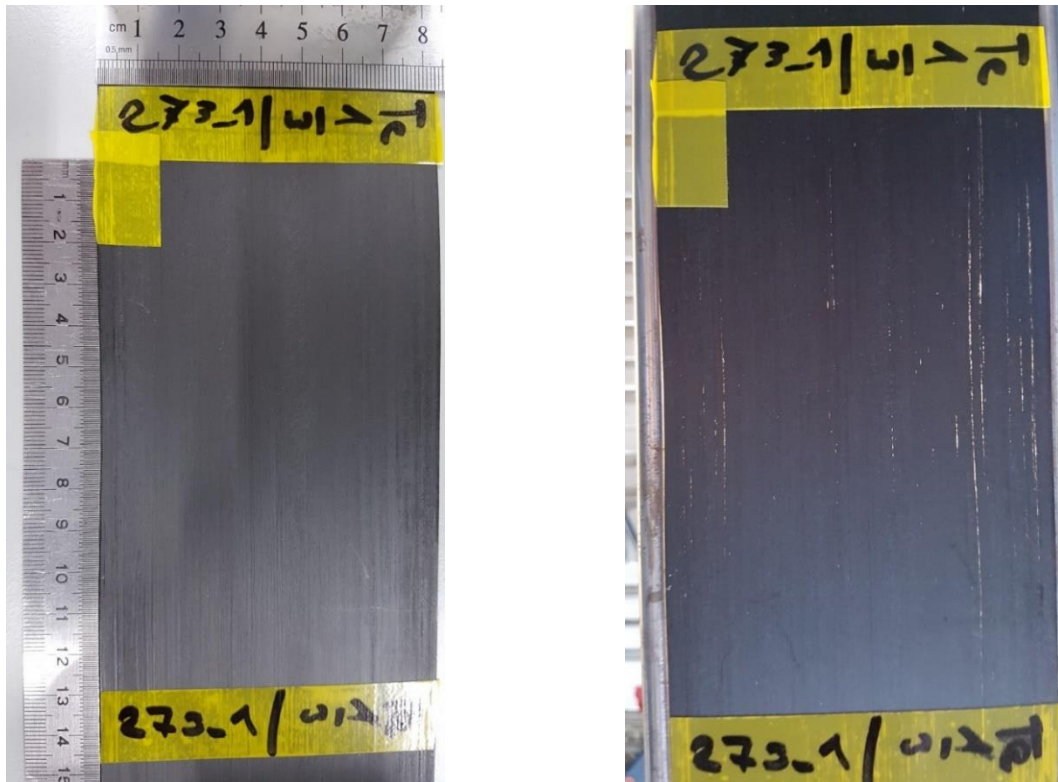


Bild 7.6: Fotografie des Tapes Te1-3. Links: ohne, rechts: mit Hintergrundbeleuchtung

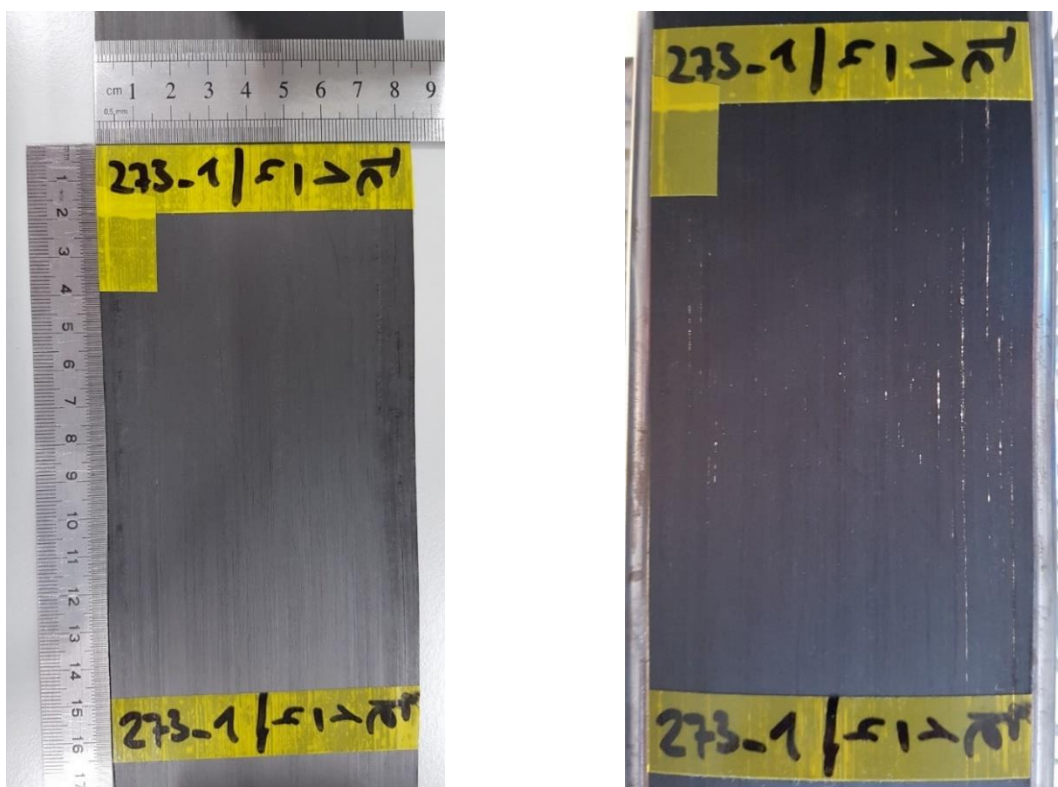


Bild 7.7: Fotografie des Tapes Te1-4. Links: ohne, rechts: mit Hintergrundbeleuchtung



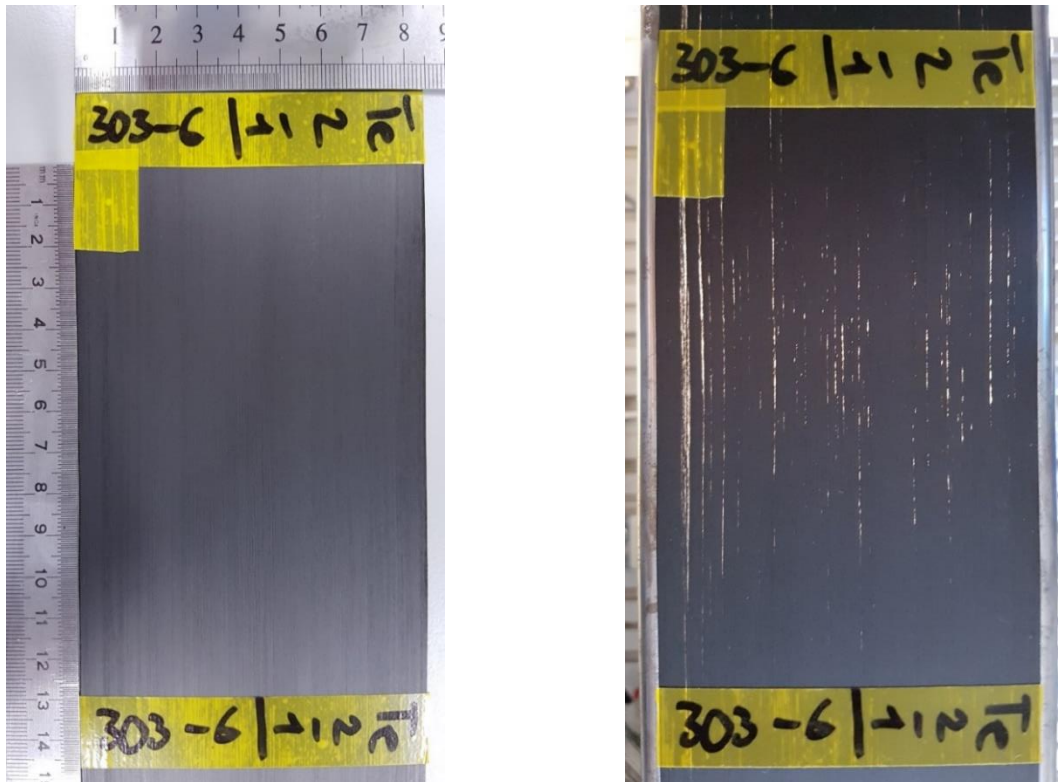


Bild 7.8: Fotografie des Tapes Te2-1. Links: ohne, rechts: mit Hintergrundbeleuchtung

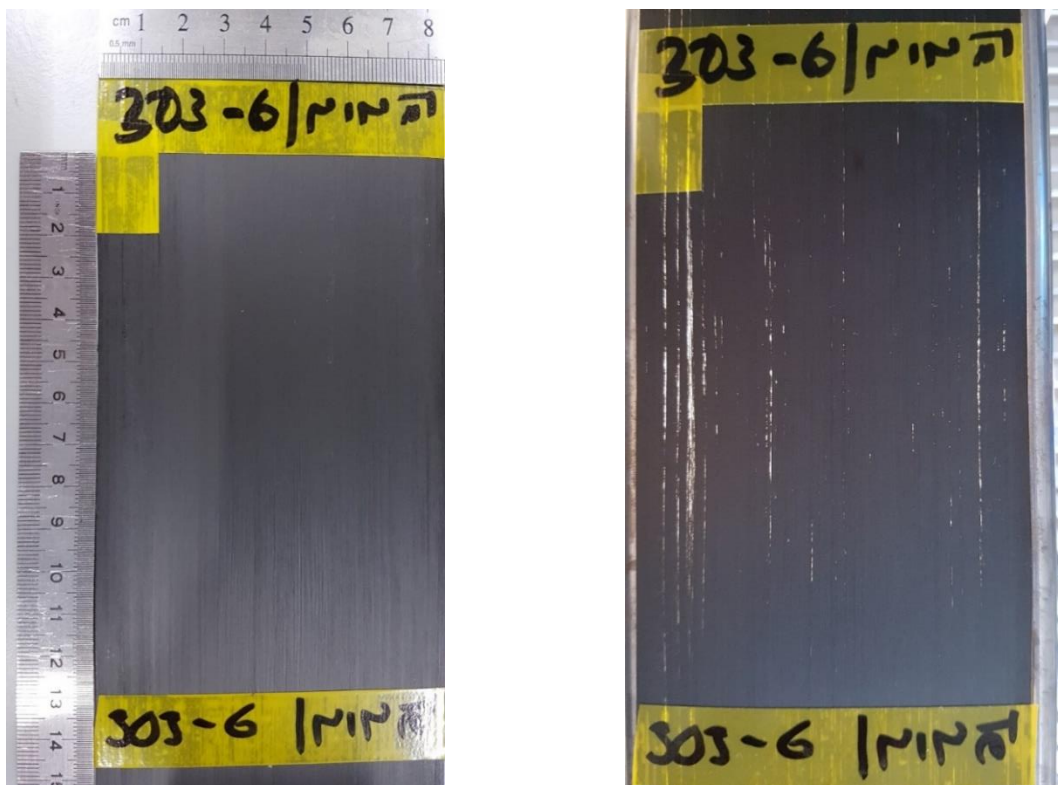


Bild 7.9: Fotografie des Tapes Te2-2. Links: ohne, rechts: mit Hintergrundbeleuchtung

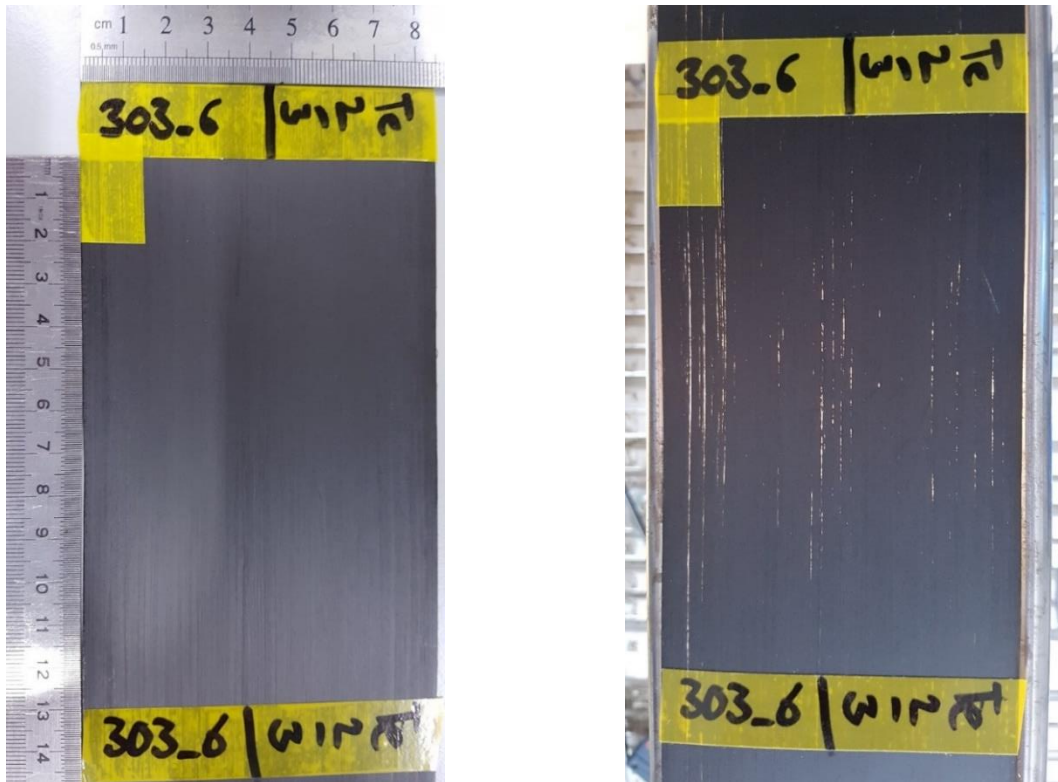


Bild 7.10: Fotografie des Tapes Te2-3. Links: ohne, rechts: mit Hintergrundbeleuchtung

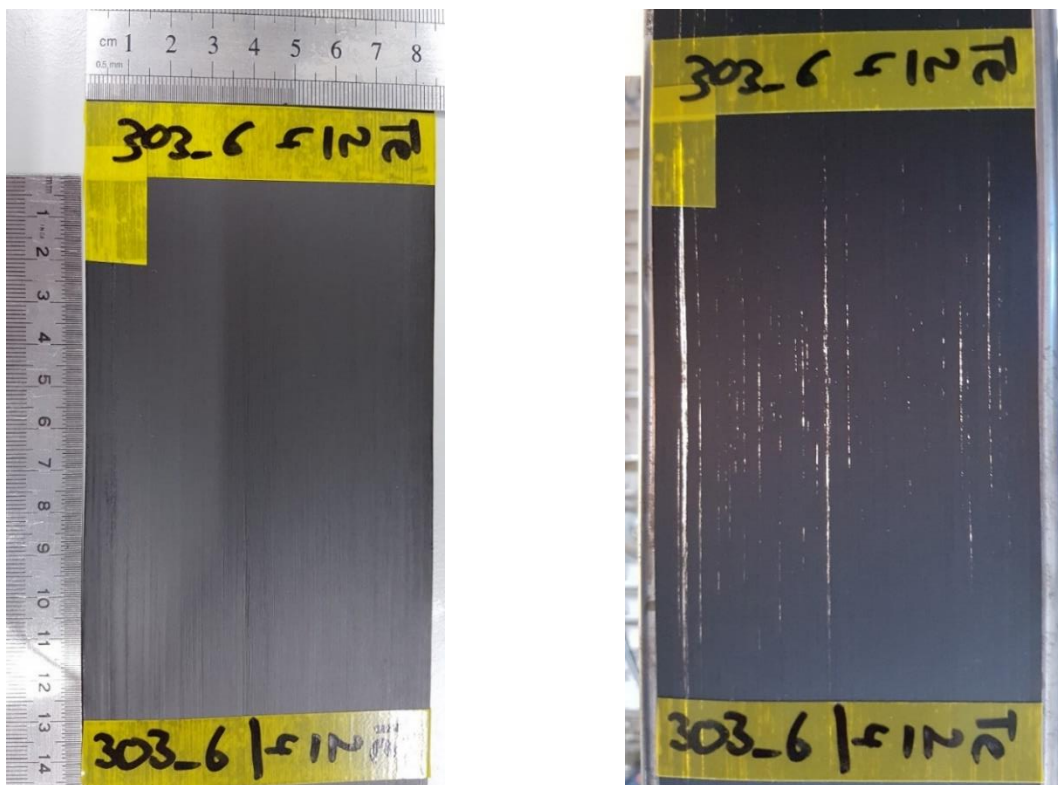


Bild 7.11: Fotografie des Tapes Te2-4. Links: ohne, rechts: mit Hintergrundbeleuchtung

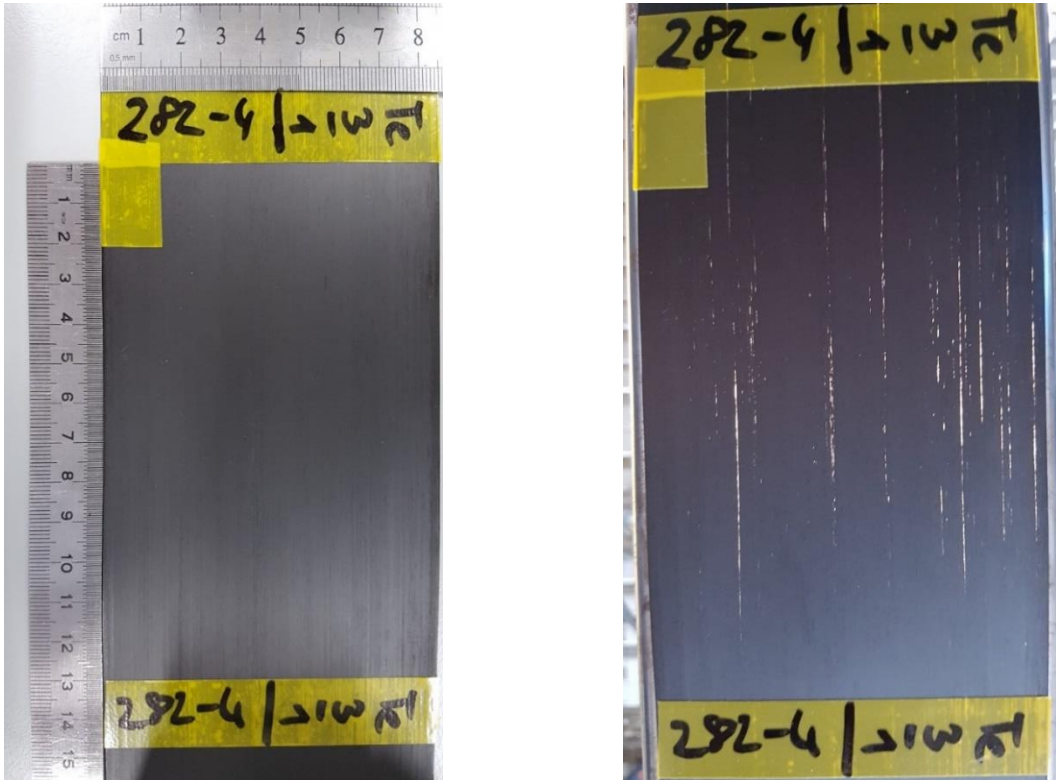


Bild 7.12: Fotografie des Tapes Te3-1. Links: ohne, rechts: mit Hintergrundbeleuchtung

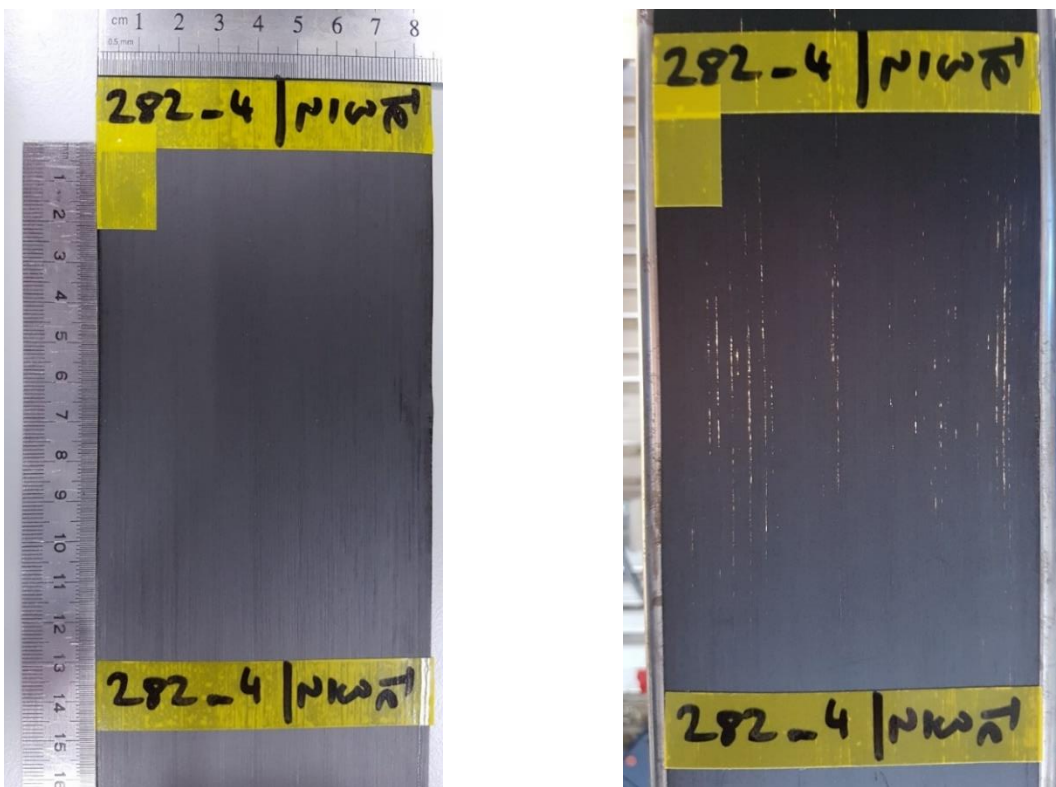


Bild 7.13: Fotografie des Tapes Te3-2. Links: ohne, rechts: mit Hintergrundbeleuchtung



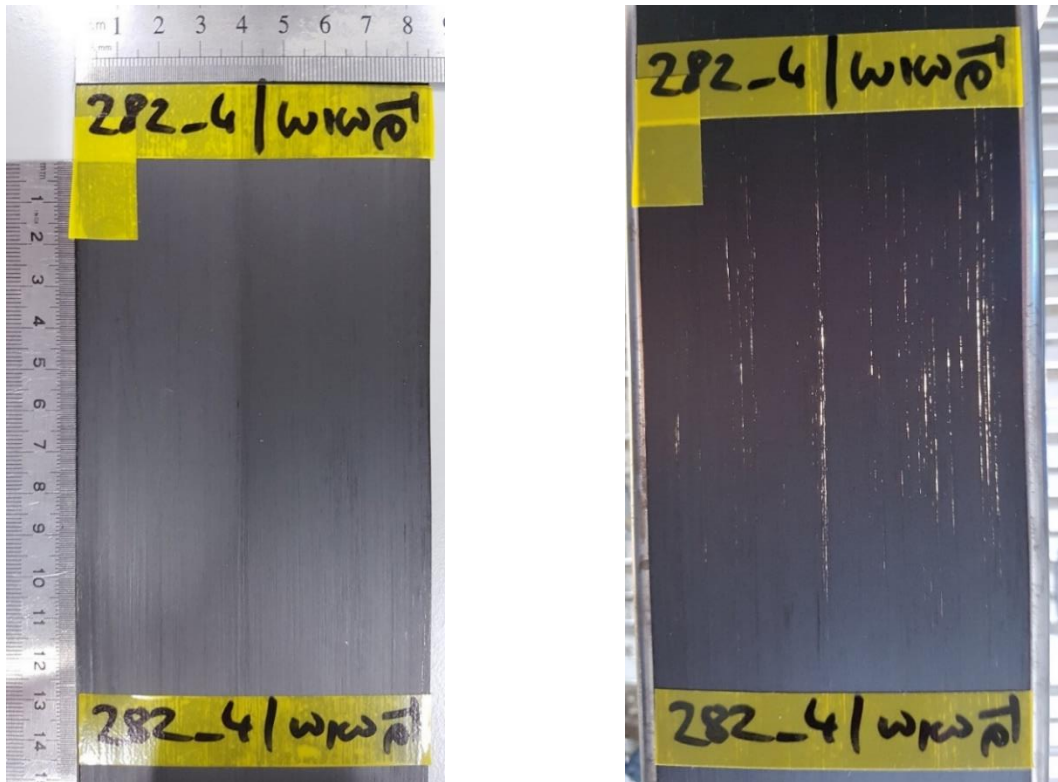


Bild 7.14: Fotografie des Tapes Te3-3. Links: ohne, rechts: mit Hintergrundbeleuchtung

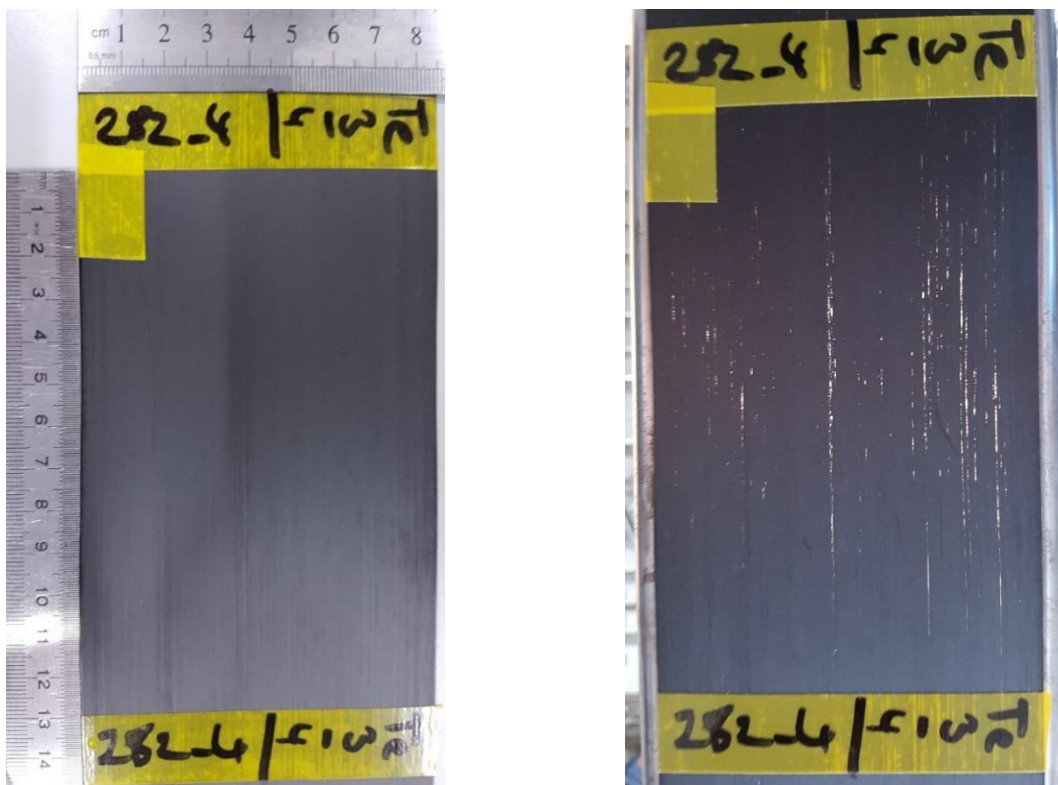


Bild 7.15: Fotografie des Tapes Te3-4. Links: ohne, rechts: mit Hintergrundbeleuchtung

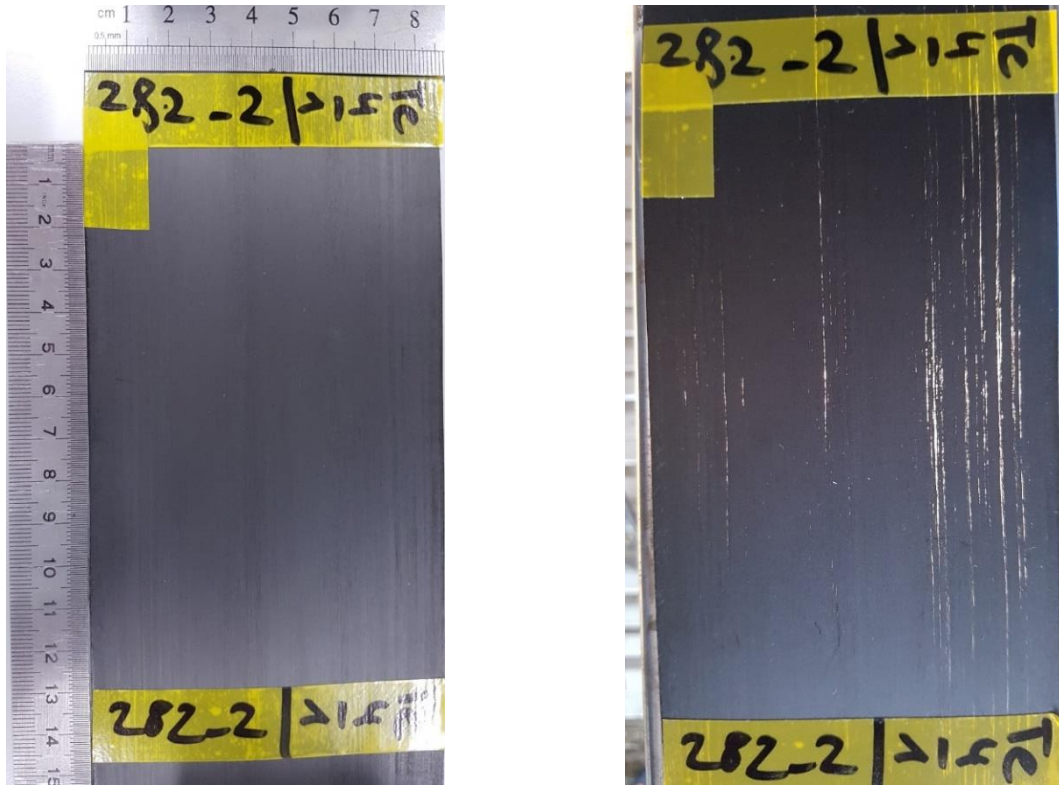


Bild 7.16: Fotografie des Tapes Te4-1. Links: ohne, rechts: mit Hintergrundbeleuchtung

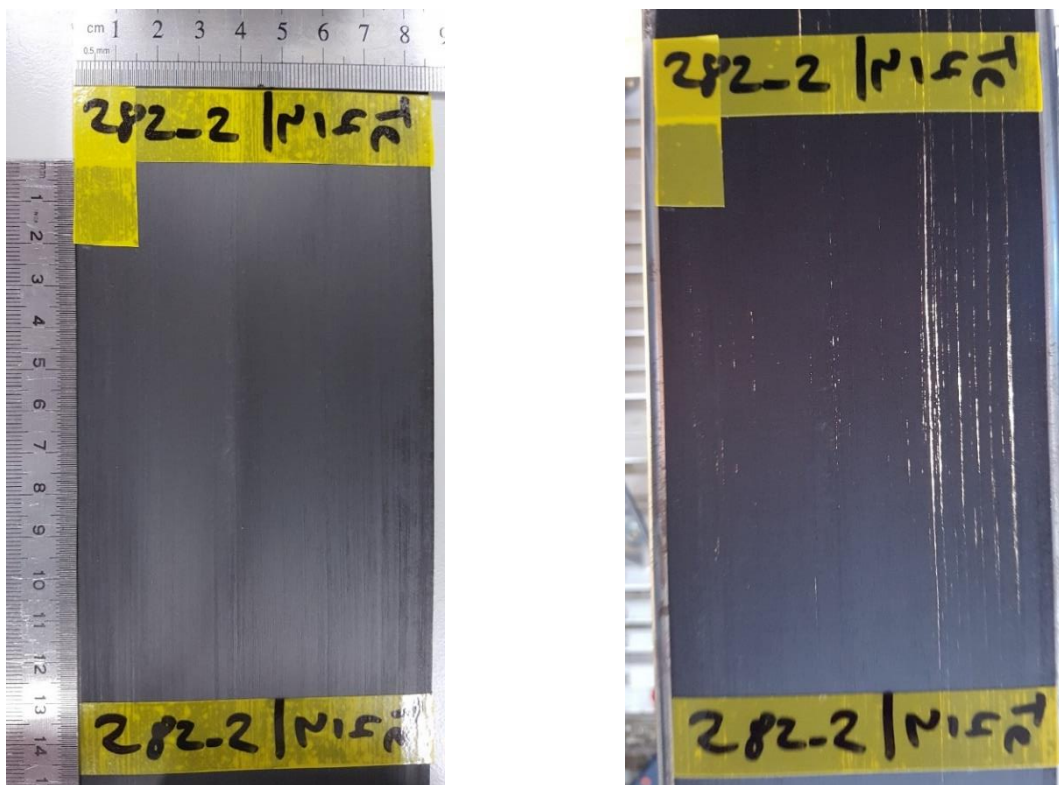


Bild 7.17: Fotografie des Tapes Te4-2. Links: ohne, rechts: mit Hintergrundbeleuchtung

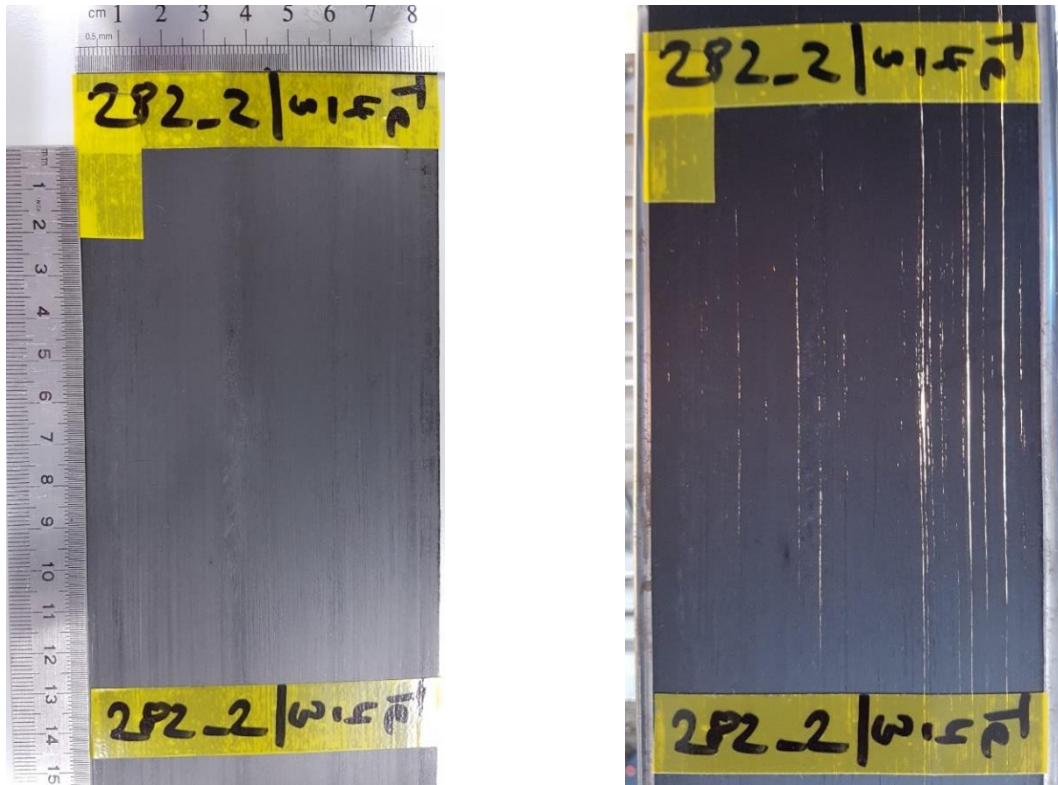


Bild 7.18: Fotografie des Tapes Te4-3. Links: ohne, rechts: mit Hintergrundbeleuchtung

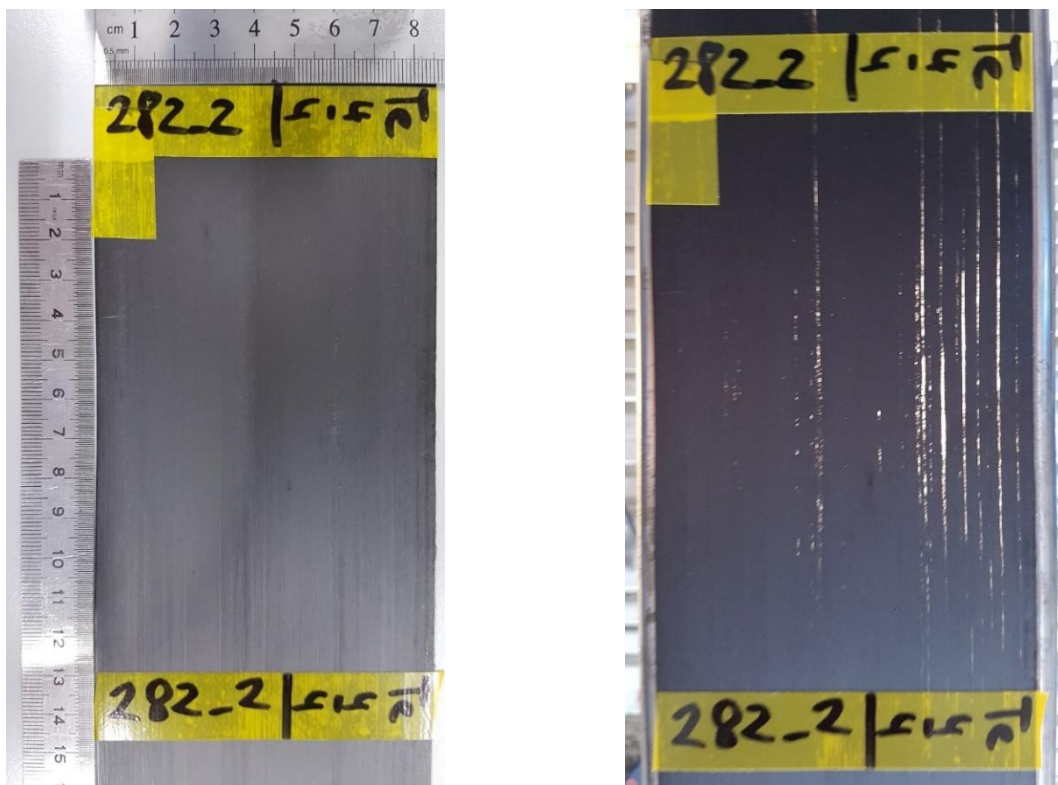


Bild 7.19: Fotografie des Tapes Te4-4. Links: ohne, rechts: mit Hintergrundbeleuchtung



## Anhang D POD-Analyse

### C-Scans der Prüfkörper POD-a-b2 bis POD-a-b6

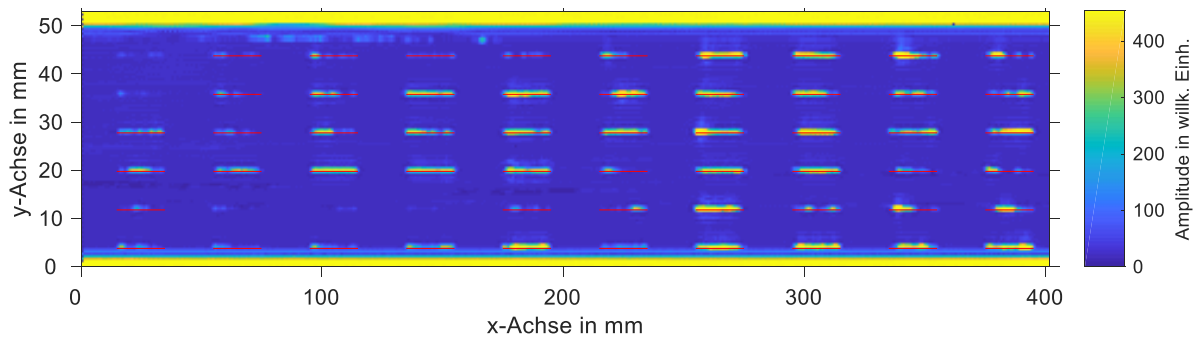


Bild 7.20: C-Scan des Prüfkörpers POD-a-b2 mit markierten Fehlerstellen größer 30 dB

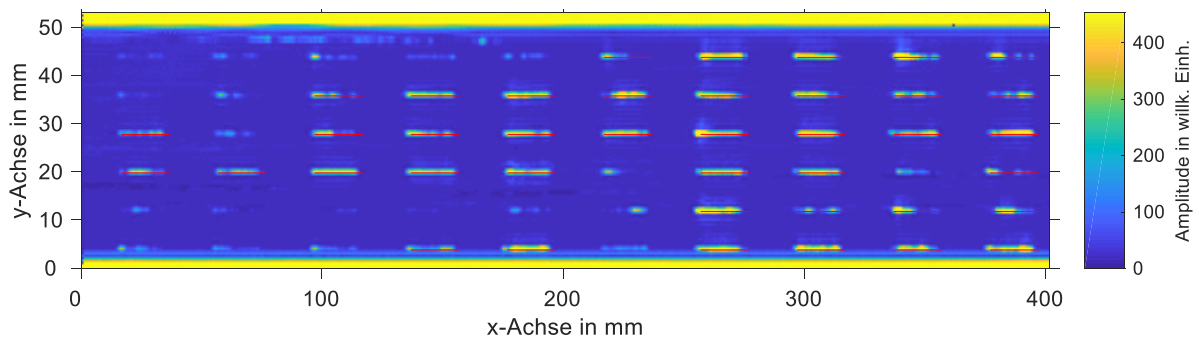


Bild 7.21: C-Scan des Prüfkörpers POD-a-b2 mit markierten Fehlerstellen größer SUM 2300

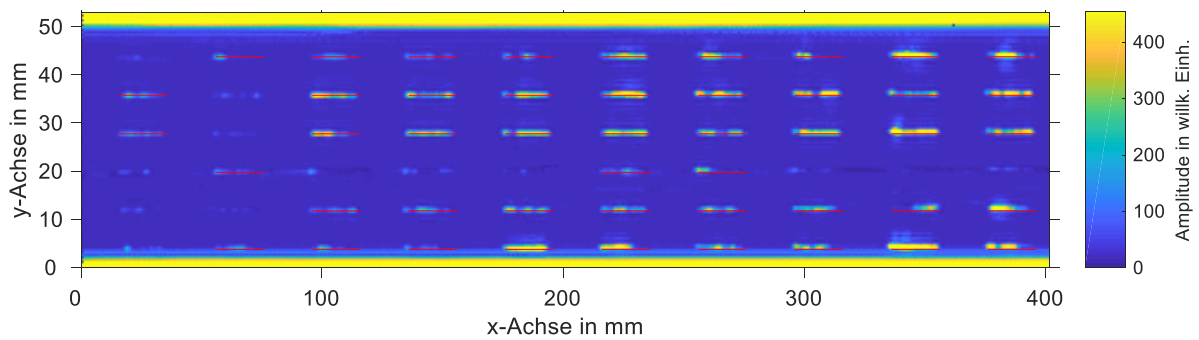


Bild 7.22: C-Scan des Prüfkörpers POD-a-b3 mit markierten Fehlerstellen größer 30 dB

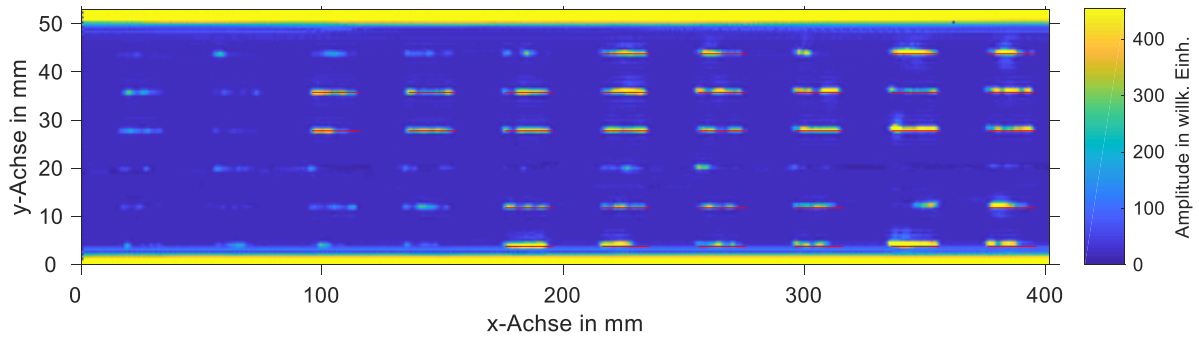


Bild 7.23: C-Scan des Prüfkörpers POD-a-b3 mit markierten Fehlerstellen größer SUM 2300

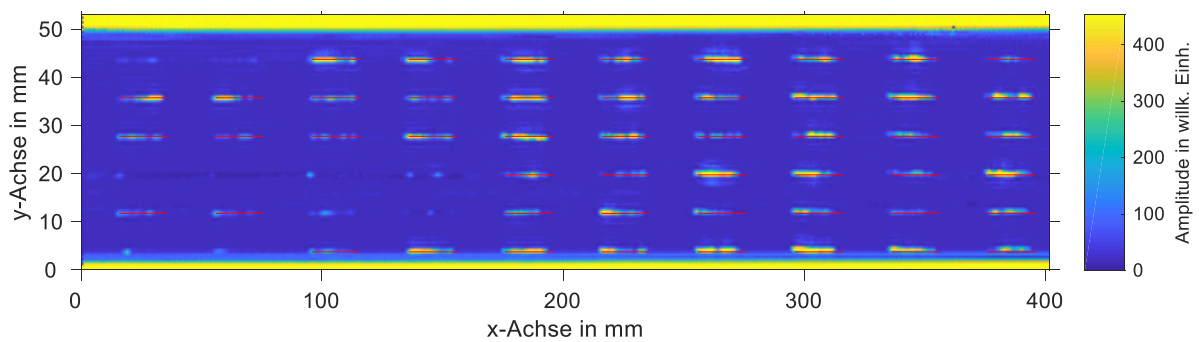


Bild 7.24: C-Scan des Prüfkörpers POD-a-b4 mit markierten Fehlerstellen größer 30 dB

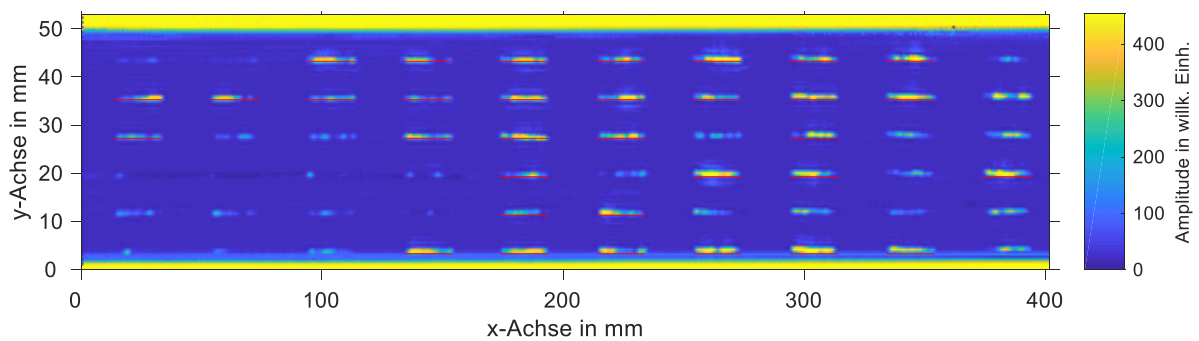


Bild 7.25: C-Scan des Prüfkörpers POD-a-b4 mit markierten Fehlerstellen größer SUM 2300

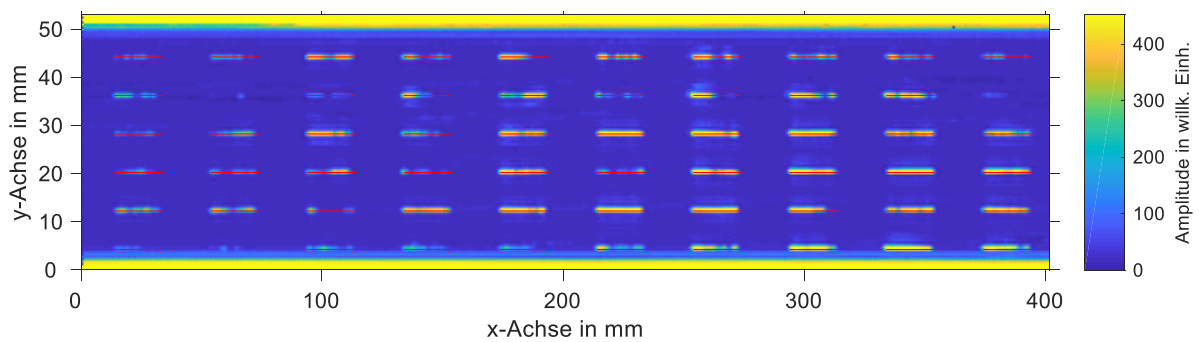


Bild 7.26: C-Scan des Prüfkörpers POD-a-b5 mit markierten Fehlerstellen größer 30 dB

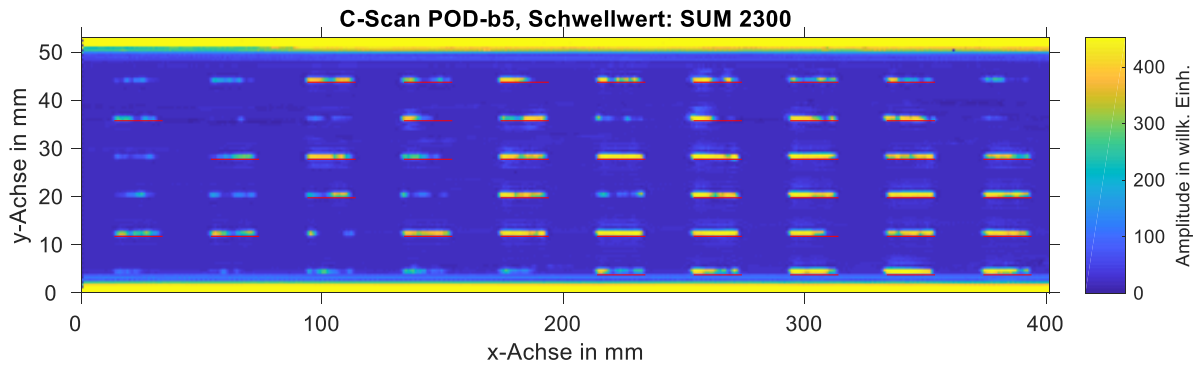


Bild 7.27: C-Scan des Prüfkörpers POD-a-b5 mit markierten Fehlerstellen größer SUM 2300

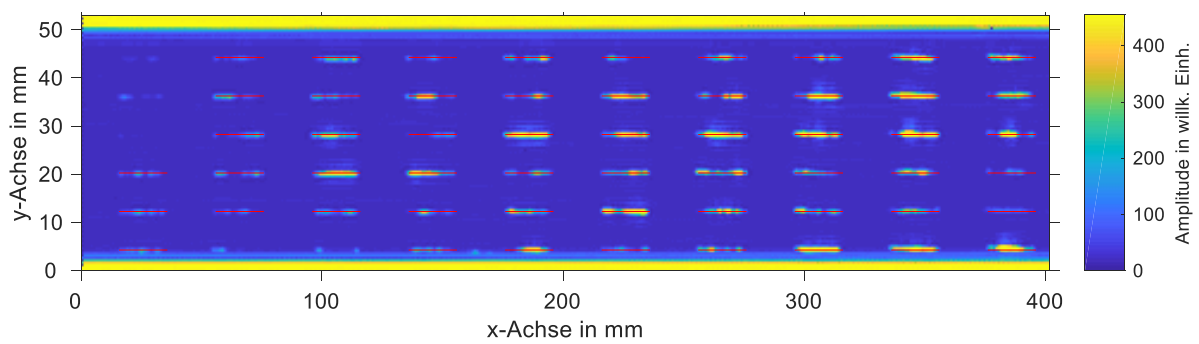


Bild 7.28: C-Scan des Prüfkörpers POD-a-b6 mit markierten Fehlerstellen größer 30 dB

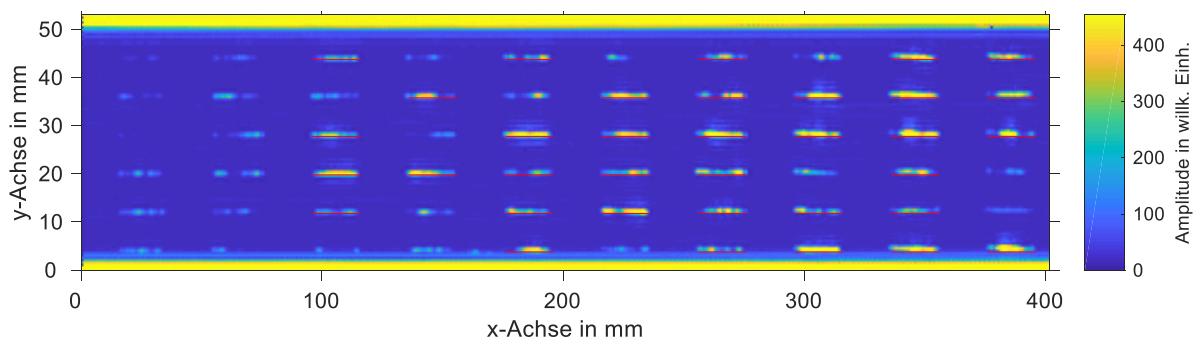


Bild 7.29: C-Scan des Prüfkörpers POD-a-b6 mit markierten Fehlerstellen größer SUM 2300

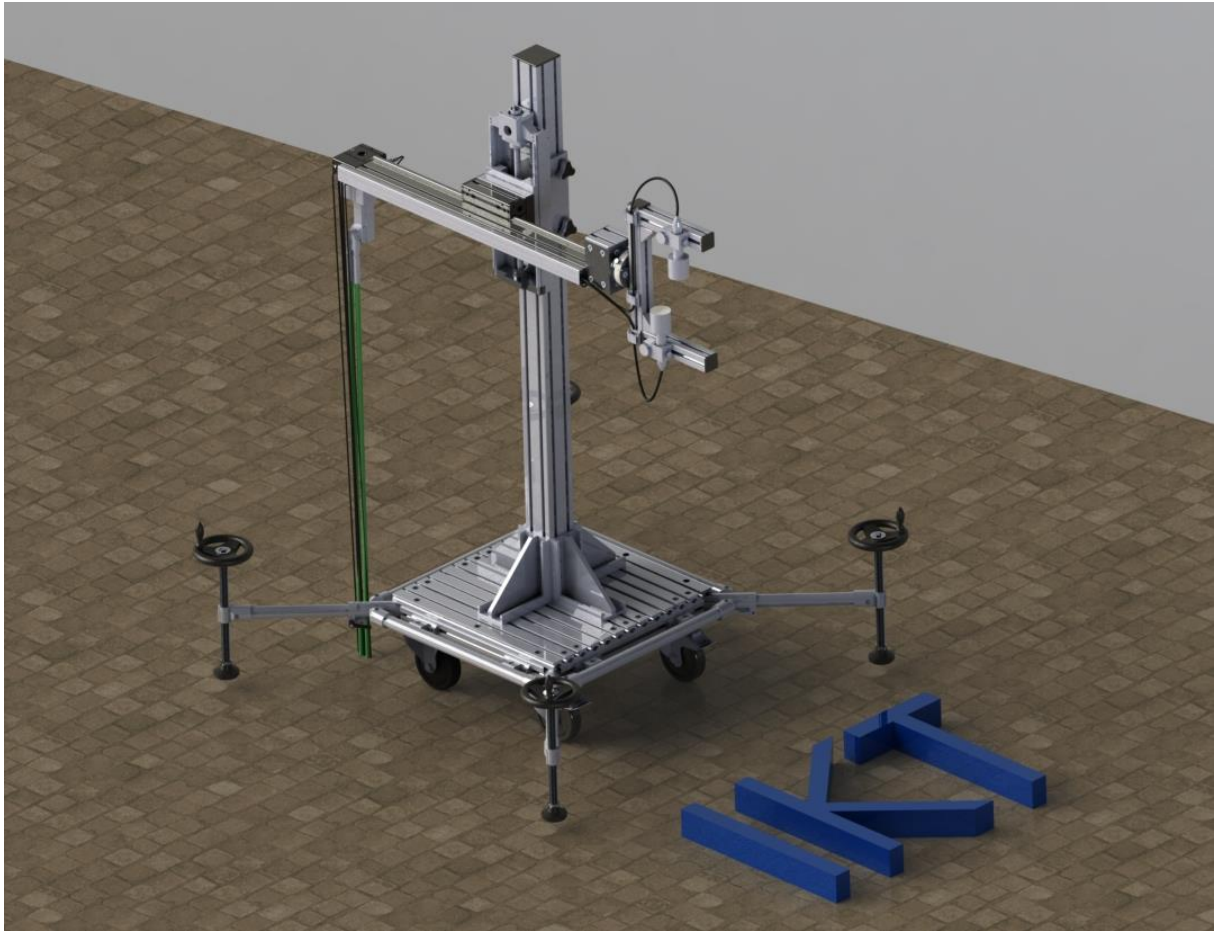
**Anhang E Konstruktionsentwurf einer Prüfanlage**

Bild 7.30: Rendering der Konstruktion eines Prüfstands für beliebige Pultrusionsanlagen

## Lebenslauf

### Persönliche Angaben

---

Name Dr.-Ing. Wolfgang Essig  
Geburtsdatum 28. März 1987 in Stuttgart  
Nationalität deutsch  
Familienstand Verheiratet, ein Kind



### Beruflicher Werdegang

---

Seit 02/2019 **Stellvertretende Institutsleitung (Oberingenieur), Institut für Kunststofftechnik**  
Institutsverwaltung, Institutsfinanzen, übergreifendes Projektmanagement und Personalangelegenheiten

11/2018 **Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing. (1,0 magna cum laude)**  
Titel: Ganzheitliche Betrachtung zur zerstörungsfreien Prüfung von thermoplastischen CFK-Tapes mittels Luftultraschall

Seit 12/2017 **Abteilungsleiter Produktentwicklung, Institut für Kunststofftechnik**  
Fachliche Leitung von zehn wissenschaftlichen und technischen Mitarbeiter\*innen, Finanzplanung

11/2016 bis 01/2019 **Qualitätsmanager für akkreditiertes Prüflabor, Institut für Kunststofftechnik**  
Interne Audits, Reakkreditierung (DIN EN ISO/IEC 17025), Korrektur- und Vorbeugemaßnahmen

Seit 03/2013 **Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Kunststofftechnik**  
Fachgebiet: Ultraschallprüfung, Qualitätssicherung

10/2007 bis 12/2012 **Studium Werkstoffwissenschaften (Dipl.-Ing.), Universität Stuttgart**  
Vertiefung: zerstörungsfreie Werkstoffprüfung

07/2006 bis 10/2007 **Wehrdienstleistender, Deutsche Bundeswehr**  
Logistik-/ Lagerarbeiten innerhalb und außerhalb der Kaserne

06/2006 **Abitur**  
Königin-Katharina-Stift, Stuttgart



**Mitgliedschaften / Gremienarbeit**

---

seit 07/2017

**Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung**

Leiter des Arbeitskreises Stuttgart

seit 03/2010

**Evangelischer Reisedienst (ERD) Stuttgart**

Freizeitleiter von Jugend- und Erwachsenenfreizeiten

**Sprachen**

---

Deutsch

Muttersprache

Englisch

verhandlungssicher

**EDV**

---

Microsoft Office

sehr gut

Matlab

gut

Solidworks

gut

**Zertifikate und Fortbildungen**

---

2019

Gesprächstraining für Führungskräfte

2018/19

Führungskompetenz erwerben und erweitern

2017

DIN/DAkS-Praxistag zur Revision der ISO/IEC 17025

2016

Qualitätssicherung im analytischen Labor

2015

Selbstmanagement und Arbeitsorganisation

2014

Grundlagenseminar Verhandlungsführung

**Sonstige Qualifikationen**

---

Führerschein

A, BE, C1E, CE, MSLT, Flurförderfahrzeuge

05/2011

Ausbildung zum Freizeitleiter beim ERD

**Freizeitaktivitäten**

---

Sport (Jogging, Snowboarden, Tennis, Rudern), Werkstattarbeit (Metallbearbeitung, Holzbearbeitung, Automobil, Motorrad), Technik, Naturwissenschaft, Essen