



DGZfP-Fachausschuss Ultraschallprüfung

Unterausschuss Luftgekoppelte Ultraschallprüfung (ACUT)

Richtlinie ACUT

Leitfaden zur Durchführung von luftgekoppelter Ultraschallprüfung

Januar 2025



WER IST DIE DGZfP?

Als technisch-wissenschaftlicher Verein verfolgt die DGZfP das Ziel der Erforschung, Anwendung und Verbreitung der zerstörungsfreien Prüfverfahren. Zu ihren rund 1.600 Mitgliedern gehören große Konzerne und mittelständische Unternehmen, die Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) einsetzen, ebenso Forschungseinrichtungen, Universitäten und Behörden, aber auch einzelne Personen, die sich mit der ZfP beschäftigen.

Die DGZfP organisiert die Kommunikation und den Erfahrungsaustausch zwischen Forschungs- und Entwicklungsinstituten und ZfP-Anwendern, Geräteherstellern und Dienstleistern und informiert über neueste ZfP-Entwicklungen in der Gerätetechnik und den ZfP-Anwendungen.

Zur Lösung spezieller technischer Probleme hat die DGZfP Fachausschüsse eingerichtet. Der praxisnahe Erfahrungsaustausch und die kostenfreie fachliche Weiterbildung finden in regionalen Arbeitskreisen statt.

Die DGZfP veranstaltet regelmäßig Konferenzen und Seminare. Höhepunkt ist die jährliche Jahrestagung mit über 500 Teilnehmenden. Die DGZfP ist Mitglied des EFNDT und ICNDT, der europäischen und der weltweiten Dachorganisation der nationalen ZfP-Gesellschaften.

Weitere Arbeitsgebiete sind die Qualifizierung und Zertifizierung von Prüfpersonal in der Zerstörungsfreien Prüfung. Das Angebot umfasst Schulungen und Qualifizierungsprüfungen nach DIN EN ISO 9712, in allen Produktsektoren, in zehn ZfP-Verfahren und drei Qualifizierungsstufen sowie behördlich anerkannte Ausbildungen im Strahlenschutz entsprechend den Fachkunde-Richtlinien Technik.

Mit Veröffentlichung der europäischen Norm DIN EN 473 im Jahre 1993, ersetzt durch die DIN EN ISO 9712 im Jahr 2013, wurde eine unabhängige DGZfP-Personal-Zertifizierungsstelle (DPZ) eingerichtet.

Die DPZ ist von der Zentralstelle der Länder für Sicherheitstechnik (ZLS) als anerkannte unabhängige Prüfstelle nach der europäischen Richtlinie 2014/68/EU (Druckgeräterichtlinie „DGR“) anerkannt und für den nicht geregelten Bereich von der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS) als Zertifizierungsstelle für Personal der Zerstörungsfreien Prüfung akkreditiert. Weiterhin garantieren Verträge mit vielen Ländern Europas und Ländern in Übersee, sowie die Mitgliedschaft im Multilateral Recognition Agreement des EFNDT, dem DGZfP-Zertifikat internationale Anerkennung.

Der Inhalt von DGZfP-Richtlinien und -Merkblättern ist ein von Experten formulierter Stand der Technik, dessen Anwendung empfohlen wird.

Besuchen Sie uns:



Herausgeber:



Max-Planck-Str. 6, 12489 Berlin
Tel.: +49 30 67807-0 | E-Mail: mail@dgzfp.de

ISBN 978-3-947971-45-9

© DGZfP e.V. 01/2025. Alle Rechte vorbehalten, insbesondere das Recht auf Vervielfältigung und Verbreitung sowie Übersetzung auch in elektronischen Systemen bedarf der schriftlichen Genehmigung der DGZfP e.V.

WEITERE DGZfP-RICHTLINIEN UND MERKBLÄTTER:

(Stand: 01/2025)

A 01	Richtlinie über die Qualifizierung von Prüfwerkern der Zerstörungsfreien Prüfung	DP 03	Merkblatt zur Charakterisierung von Prüfgas-Nachweis-systemen für Dichtheitsprüfungen
A 05	Richtlinie für Ausbildungsstätten – Mindestanforderungen an Ausstattung und Organisation	DP 04	Arten von Gasprüflecks und ihre Verwendung bei Dichtheitsprüfverfahren
AT Kom.	Kompendium Schallemissionsprüfung – Grundlagen, Verfahren und praktische Anwendung	DP 05	Messunsicherheit und Messmittelfähigkeit bei der Dichtheitsprüfung
B 02	Zerstörungsfreien Betondeckungsmessung und Bewehrungsart an Stahl- und Spannbetonbauteilen	EM 06	Merkblatt über Betrachtungsplätze für die fluoreszierende Prüfung mit dem Magnetpulver- und Eindringverfahren – Ausrüstung und Schutzmaßnahmen bei Arbeiten mit UV-Strahlung
B 03	Elektrochemische Potentialmessungen zur Detektion von Bewehrungsstahlkorrosion	HB PA	Handbuch für die Materialprüfung mit Ultraschall Phased Array
B 04	Ultraschallverfahren zur zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen	ISB 02	Zustand der Eisenbahnfahrzeuge – Verfahren zur Bestätigung der Kompetenz einer ZfP-Prüfstelle nach DIN 27201-7 durch eine dritte Seite
B 05	Merkblatt über das aktive Thermographieverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen	ISB 03	Zustand der Eisenbahnfahrzeuge – Validierung und Überwachung von mechanisierten bzw. automatisierten Prüfanlagen in ZfP-Prüfstellen
B 06	Merkblatt über die Sichtprüfung und Endoskopie als optische Verfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen	MC 01	Richtlinie für Kriterien zur Auswahl von Härteprüfverfahren mit mobilen Geräten
B 09	Dauerüberwachung von Ingenieurbauwerken	MR 01	Metrologische Rückführbarkeit von Hilfsgeräten für die Eindring- und Magnetpulverprüfung
B 10	Merkblatt über das Radarverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen	MTHz 01	Mikrowellenprüfung: Grundlagen und Anwendungen
B 11	Merkblatt über die Anwendung des Impakt-Echo-Verfahrens zur Zerstörungsfreien Prüfung von Betonbauteilen	OV 01	Merkblatt über Optische Verfahren – Auswahl und Erstprüfung von optischen Sichtprüfgeräten; Überprüfung von optischen Sichtprüfgeräten durch den Anwender
B 12	Korrosionsmonitoring bei Stahl- und Spannbetonbauwerken	SE 02	Verifizierung von Schallemissionssensoren und ihrer Ankopplung im Labor
B 14	Quantifizierung von Chlorid in Beton mit der laserinduzierten Plasmaspektroskopie (LIBS)	SE 05	Detektion von Spanndrahtbrüchen mit Schallemissionsanalyse
Bruch-ortung	Positionspapier – Magnetische Verfahren zur Spannstahlbruchortung	SHM 01	Strukturprüfung mit geführten Wellen als Sonderform des Ultraschalls
B-LF 01	Leitfaden zur Erstellung von Prüfanweisungen für die Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen (ZfP Bau)	US 06	Akustische Resonanzverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung
D 01	Messung der optischen Dichte in Durchstrahlungsaufnahmen	US 07	Richtlinie zur Festlegung des Prüfrasters bei der automatisierten Ultraschallprüfung großer Schmiedestücke
D 02	Dunkelkammerverarbeitung von Industrie-Röntgenfilmen	US 08	Charakterisierung und Verifizierung der luftgekoppelten Ultraschallprüfköpfe
D 03	Schweißnahtvermessung bei Zerstörungsfreier Prüfung und Filmkennzeichnung bei Durchstrahlungsprüfungen	US 08 E	Characterization and verification of air-coupled ultrasonic probes
D 04	Ermittlung der Prüfbereichsabmessung für die Durchstrahlungsprüfung von Gussstücken	ZfP 01	Richtlinie Zerstörungsfreie Prüfung entsprechend ASME Boiler and Pressure Vessel Code
D 05	Vergleichs-Durchstrahlungsbilder für Gussstücke aus Gusseisen mit Lamellen- und Kugelgraphit	ZfP 4.0 – 01	DICONDE in der ZfP
D 06	Anforderungen und Rahmenbedingungen für den Einsatz der Röntgencomputertomographie in der Industrie	ZfP 4.0 – 02	Künstliche Intelligenz für die zerstörungsfreie Prüfung
DP 01	Richtlinie über die Auswahl eines geeigneten Prüfgases für die Dichtheitsprüfung nach DIN EN 13185		
DP 02	Richtlinie zur Umrechnung der mit Prüfgasen gemessenen Leckgeraten in andere Medien		

Informationen unter: www.dgzfp.de

INHALTSVERZEICHNIS

1	Vorwort	5
2	Besonderheiten der luftgekoppelten Ultraschallprüfung	5
2.1	Typische Anwendungen	5
2.2	Durchschallung als typischer Aufbau	6
2.3	Anforderungen an das Equipment	7
3	Das Prüfsystem	8
3.1	Piezokomposit-Wandler	8
3.2	Neuartige Wandler-Technologien	8
3.2.1	Ferroelektret-Wandler	8
3.2.2	Thermoakustische Sender	8
3.2.3	Optisches Mikrofon	9
3.3	Ultraschallgerät	9
4	Durchführung einer Prüfung	10
4.1	Durchschallung	10
4.2	Geführte Wellen	10
4.3	Schrägdurchschallung	10
4.4	Einstellung des Prüfsystems für Durchschallung	10
4.4.1	Einstellung der Prüfköpfe und des Manipulators	11
4.4.2	Einstellung des Prüfgeräts	11
4.5	Optimierung der Auflösung und der Signalhöhe	12
5	Auswertung	13
5.1	A- bis F-Bilder	13
5.2	Bewertung der Signalqualität	15
5.3	Größenbewertung	16
5.4	Anwendungen von Methoden des maschinellen Lernens	16
6	Musterbeispiel einer Durchschallungsprüfung	18
7	Anwendungsbeispiele	21
8	Literatur	25
9	Autoren/-Firmenverzeichnis	27
10	Bildquellennachweis	28

1 Vorwort

Die Anwendungsgebiete der luftgekoppelten Ultraschallprüfung (ACUT) können sehr vielfältig sein und weichen häufig stark von den Einsatzgebieten der klassischen Ultraschallprüfung ab. Vielmehr ist die ACUT eine eigenständige Methode, welche sich häufig eher als alternative Methode für Aufgabenstellungen die auch mittels Durchstrahlungsprüfung oder Thermografie gelöst werden können. Obwohl die luftgekoppelte Ultraschallprüfung mittlerweile keine neue Technologie ist, bleibt sie im Vergleich zu anderen Verfahren der ZfP ein Randgebiet unter den Methoden. Dies kommt nicht zuletzt dadurch zustande, dass es an Normen, Fachbüchern und Ausbildungsmöglichkeiten für interessierte Prüfer und Prüfaufsichten mangelt. Dies schafft für viele Anwendungsgebiete eine Einstiegshürde, welche die häufigere Anwendung verhindert.

Aus diesen Gründen haben sich Experten aus Forschungseinrichtungen und aus der Industrie entschieden, einen Unterausschuss „Luftgekoppelte Ultraschallprüfung“ (ACUT) als Teil des Fachausschusses Ultraschallprüfung der DGZfP einzurichten und dort diese Themen zu bearbeiten. Es wurde beschlossen, einen Leitfaden zu erarbeiten, der interessierten Anwendern den Einstieg in ACUT erleichtert und eine Hilfestellung bei der Spezifikation und Umsetzung von solchen Prüfungen gibt. Das vorliegende Dokument ist das Ergebnis dieser Zusammenarbeit.

2 Besonderheiten der luftgekoppelten Ultraschallprüfung

Die luftgekoppelte Ultraschallprüfung (ACUT, air coupled ultrasonic testing) [1 – 4] zählt zu den zerstörungsfreien Prüfverfahren. Bei der Verwendung der Methode wird auf ein flüssiges Kontaktmedium zwischen den Ultraschallprüfköpfen und dem zu prüfenden Material verzichtet, sodass zwischen dem Werkstück und dem Ultraschallsender bzw. -empfänger ein Luftspalt vorliegt.

2.1 Typische Anwendungen

Da nicht jede Oberfläche die „Verunreinigung“ durch ein Koppelmedium wie Wasser verträgt, ist die Anwendung von luftgekoppeltem Ultraschall, insbesondere für diese Fälle, sehr interessant. Durch die Messanordnung werden einige Nachteile der Abhängigkeit von der guten Ankopplung beim Kontaktultraschall eliminiert. Zudem entfallen Vorlaufstrecken oder spezifische Prüfköpfe. Dadurch ist die Luftultraschallprüfung vor allem für die Automation von Ultraschallprüfungen geeignet. So lassen sich auch Hohlkörper und Rohre einfach und schnell untersuchen.

Zu den mit Luftankopplung meistgeprüften Materialien und Strukturen gehören Faserkunststoffverbunde [1, 5, 6], Kunststoffe, Holz [7, 8], Holzwerkstoffplatten, Bleche, Blechverbindungen, Sandwichstrukturen, härtere Schäume, Keramik, Beton [9], faserverstärkter Beton, Tapes [5], Folien, Papier, Klebverbindungen [10] usw. Eher ungeeignet oder nur schwer zu prüfen sind: stark akustisch dämpfende Materialien wie manche porige Strukturen, weichere Schäume, Kork, Gummi und Silikon; Strukturen mit vielen Lufteinschlüssen; Massivbauteile. Luftultraschall ist für die Prüfung von Verbundwerkstoffen in der Luft- und Raumfahrt bereits etabliert, aber findet immer öfter Anwendung in der Automobilindustrie, im Energiesektor, in der Schifffahrt, im Schienenverkehr und vielen anderen Industriezweigen.

Mit Hilfe der luftgekoppelten Ultraschallprüfung können Material- bzw. Lufteinschlüsse in Werkstücken detektiert werden, die eine deutliche Abweichung der akustischen Impedanz zum Grundwerkstoff aufweisen. Die erzielbare Fehlerauflösung hängt dabei von Bauteilgrößen, geforderten Prüfgeschwindigkeiten und Prüfsystemen (Messfrequenz, Prüfkopfdimensionen, Fokussierung, Abständen) ab. Beispielhafte Schäden sind: Delaminationen, Schlagschäden, fehlende Klebverbindung, Poren, Lufteinschlüsse und Materialinhomogenitäten.

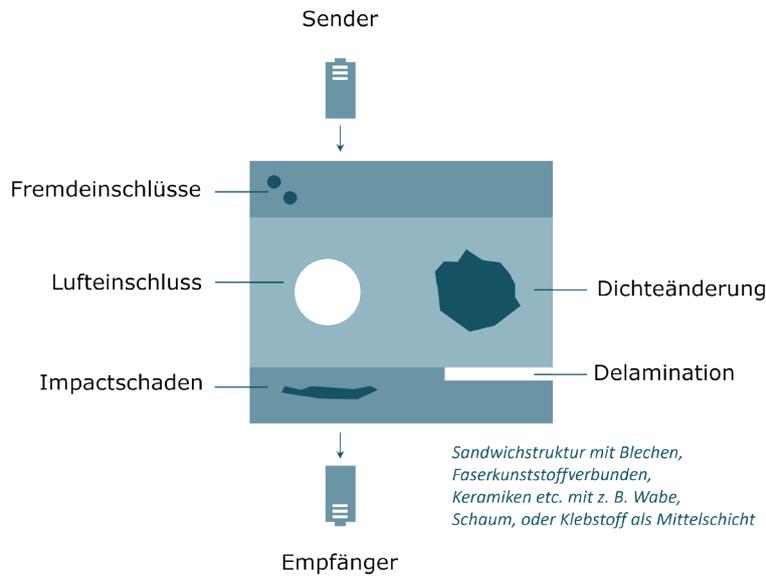


Abb. 1: Typische Anwendungsfälle für luftgekoppelte Ultraschallprüfung, nach [4].

2.2 Durchschallung als typischer Aufbau

Aus der Luftankopplung ergibt sich das Problem, dass die meiste Schallenergie wegen des hohen Impedanzunterschiedes zwischen Luft und Bauteil an der Grenzfläche Luft/Prüfobjekt sowie Prüfobjekt/Luft reflektiert wird. Aus diesem Grund wird nur eine geringe Schallleistung in das Bauteil eingebracht. Die Echos von innenliegenden Fehlern sind extrem klein und werden vom Rauschen überlagert. Durch die starke Oberflächenreflexion werden die Nutzsignale bei einer Prüfung mit einem einseitigen Zugang erheblich gestört. Dieses Problem wird vermieden, indem meistens die Durchschallungsanordnung verwendet wird. Dabei befindet sich ein plattenförmiger Prüfkörper zwischen dem Sender und Empfänger (Abbildung 2). Das aufgenommene akustische Signal spricht nur auf zusätzliche innere Grenzflächen oder Änderungen von akustischer Impedanz im Material an. Dabei trifft nur ein geringer Anteil der ausgesendeten Schallleistung auf den Empfänger, sodass Signalverluste von mindestens 30 dB üblich sind.

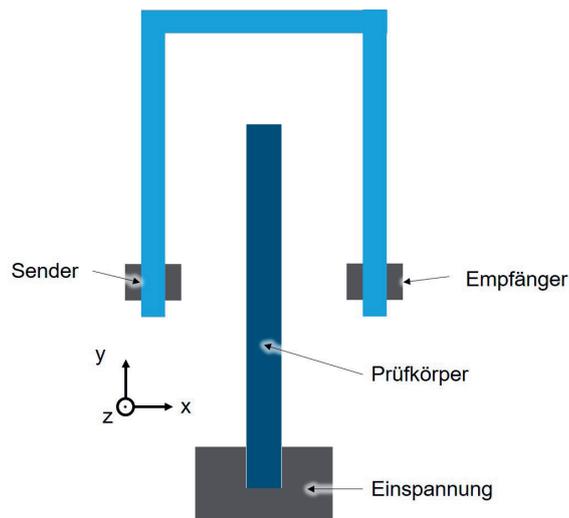


Abb. 2: Der beispielhafte Aufbau für eine luftgekoppelte Ultraschallprüfung mit einem x-y-Tisch.

2.3 Anforderungen an das Equipment

Für die luftgekoppelte Ultraschallprüfung werden spezielle Anforderungen an die Prüfköpfe für den Sender und Empfänger gestellt. Das resultiert zum einen aus dem großen Unterschied in der akustischen Impedanz zum Übertragungsmedium Luft, zum anderen aus der Notwendigkeit, sehr große Schalldrücke erzeugen zu müssen (Leistungsschallwandler). Ausführlicher wird das im Abschnitt 3 dargestellt.

Die Prüfköpfe unterscheiden sich von konventionellen Prüfköpfen weiterhin durch den Frequenzbereich, der üblicherweise zwischen 50 kHz und 1 MHz liegt. Die Bandbreite von Luftultraschallköpfen ist üblicherweise schmal und liegt meist unter 10 %. Es können mit Kompositprüfköpfen aber auch Bandbreiten bis zu 30 % erreicht werden.

Die Sendelektronik besteht aus einem Pulsgenerator und einem Verstärker. Das Sendesignal besteht üblicherweise aus einem Burst mit 4 – 8 Rechteckimpulsen. Die Sendespannung liegt im Bereich von 200 bis 400 V und ist meist unipolar. Es werden je nach Prüfkopf teilweise Pulsleistungen von über 1 kW benötigt. Die Sendelektronik muss entsprechend leistungsfähig sein, um keinen Spannungsabfall innerhalb des Bursts bzw. zwischen nachfolgenden Bursts zu erhalten.

Auf der Empfängerseite werden die sehr kleinen Signale meist direkt am oder auch im Prüfkopf vorverstärkt. Diese Vorverstärkung von bis zu 80 dB ermöglicht eine Übertragung der Signale auch über mehrere Meter Kabel zur Elektroneinheit.

Zur Empfangselektronik gehört auch ein A/D-Wandler mit anschließender Datenaufnahme/-speicherung. Eine Hardware- oder Software-Lösung zur Mittelung von Messdaten ist zu empfehlen.

3 Das Prüfsystem

3.1 Piezokomposit-Wandler

Die Luftultraschallsensorik auf Basis von Piezokompositen bedarf aufgrund von extremen Energieverlusten beim Übergang vom Sensor in das Umgebungsmedium Luft angepasster Fertigungsmethoden. Hierzu wird sowohl am Sensormaterial selbst als auch durch den Einsatz einer oder mehrerer Übergangsschicht(en) zwischen dem Sensormaterial und der Luft, der sogenannten Anpassschichten, dem Energieverlust entgegengewirkt. Aus diesem Grunde werden die Sensormaterialien für den Einsatz in Luftultraschallsensorik in der Regel als Piezokomposite wie z. B. dem 1-3 Komposit im Dice-and-Fill Verfahren hergestellt. Im genannten Fall besteht der Sensor aus vielen 1-dimensionalen Piezostäbchen, die in einer Polymermatrix eingebettet sind. Hierdurch wird die Dichte und damit die akustische Impedanz des Sensors deutlich abgesenkt und somit der Verlust beim Übergang des Ultraschalls vom Sensormaterial in die Luft deutlich verkleinert. Durch den zusätzlichen Einsatz von einer oder mehrerer Anpassschichten kann dieser Energieverlust nochmals verringert werden. Die Dicke des Sensormaterials bestimmt hierbei die Mittenfrequenz des Wandlers. Über eine sphärische Krümmung des Sensormaterials kann zusätzlich eine Fokussierung des Ultraschalls erreicht werden. Die typische Apertur eines luftgekoppelten Wandlers kann zwischen wenigen Millimetern und mehreren Zentimetern betragen. Für Prüfaufgaben unter atmosphärischen Bedingungen ist der Frequenzbereich von 50 kHz bis 1 MHz praktisch einsetzbar.

Neben Piezokompositen kommen jedoch auch Ultraschallwandler auf Basis von reinen Piezokeramiken zur Anwendung. Insbesondere ist das der Fall, wo im Bereich der niedrigen Frequenzen die Technologie der Piezokomposite an ihre Grenzen stößt und ein ungünstiges Verhältnis von Durchmesser zu Dicke erreicht wird. Im Gegensatz zu Piezokompositen, bei denen Radialschwingungen gezielt unterdrückt werden, ist es mit Vollkeramiken (Radialschwingern) möglich, diese gezielt auszunutzen. Die Arbeitsfrequenz ist dann vom Durchmesser der Keramik und nicht mehr von der Dicke abhängig. Dies kann für Anwendungen im Frequenzbereich von 50 kHz bis 300 kHz eine interessante Alternative darstellen.

Für die Charakterisierung von luftgekoppelten Wandlern wird die Anwendung der Richtlinie US 08 empfohlen [11].

3.2 Neuartige Wandler-Technologien

Auf der Suche nach effizienteren oder preiswerteren luftgekoppelten Wandlern wurden verschiedene andere Möglichkeiten der Luftultraschallerzeugung und -messung untersucht. Eine Forschungsrichtung verfolgt das Ziel der besseren Anpassung der spezifischen akustischen Impedanz, während andere mit akinetischer Umwandlung arbeiten, d. h. mit der Erzeugung oder Messung von Luftultraschall ohne bewegende Sensorteile.

3.2.1 Ferroelektret-Wandler

Gute akustische Impedanzanpassung mit gleichzeitig guten piezoelektrischen Eigenschaften bieten Ferroelektrete an. Ferroelektrete (auch Piezoelektrete genannt) sind geladene zelluläre Polymere [12 – 14], die typischerweise in der Form einer Folie mit einer stark anisotropen Zellenstruktur hergestellt werden, sodass sie in Dickenrichtung eine Elastizitätskonstante unter 1 MPa und dadurch eine sehr geringe akustische Impedanz aufweisen. Nach einer biaxialen Dehnung folgt die Polarisierung der Folie mittels Coronaentladung, die diesem Material seine piezoelektrischen Eigenschaften gibt. Zelluläres Polypropylen kann einfach gebogen und strukturiert werden, was die Herstellung in vielen denkbaren Formen ermöglicht. Bei einer Mittenfrequenz von ca. 250 kHz konnte ein Signal-Rausch-Abstand von mindestens 32 dB höher erreicht werden als mit allen marktüblichen Wandlern [15, 16]. Solche Wandler eröffnen neue Möglichkeiten für die Prüfung von Bauteilen mit höheren Signalverlusten, z. B. durch Dicke oder Schallabsorption, allerdings sind sie noch nicht auf dem Markt verfügbar.

3.2.2 Thermoakustische Sender

Thermoakustische Ultraschallquellen basieren auf der Transformation der elektrischen in die thermische und dann in die akustische Energie. Ohne schwingende Komponenten weisen sie extrem hohe Bandbreiten von über 100 % auf, wobei sie sich mittlerweile im erzeugten Schalldruck den marktüblichen Luftultraschall-Wandlern annähern [15, 17]. In der Kombination mit breitbandigen Empfängern ermöglichen sie Ultraschallprüfung in einem größeren Frequenzbereich und damit können sie mehr Informationen über das geprüfte Bauteil liefern.

Die Funktionsweise basiert auf der schlagartigen Durchströmung einer leitfähigen Schicht, welche auf einem Glassubstrat angebracht ist. Die elektrische Energie wird in Joulesche Wärme in der umgebenden Luft umgewandelt, was zu einer Expansion und dadurch einer akustischen Welle führt. Solche Wandler wurden bereits in der zerstörungsfreien Prüfung eingesetzt [18] und sind mittlerweile auf dem Markt verfügbar.

3.2.3 Optisches Mikrofon

Optische Mikrofone basieren auf einem laser-interferometrischen Detektionsprinzip. Im Gegensatz zu herkömmlichen Laser-Vibrometern messen optische Mikrofone die Änderung des durch die Ultraschallwelle modulierten Brechungsindex der Luft innerhalb eines kompakten Sensorkopfes.

Die akinetische Detektion ermöglicht eine sehr große Frequenzbandbreite im Vergleich zu konventionellen Ultraschallwandlern. Optische Mikrofone eignen sich besonders gut zur Kombination mit laserangeregtem Ultraschall. Laseranregung an sich, ist keine Luftankopplung im traditionellen Sinne, da die Schallerzeugung direkt im Bauteil erfolgt, ähnlich wie mit EMAT-Prüfköpfen (elektromagnetische akustische Wandler) in leitfähigen Materialien akustische Wellen erzeugt werden, ohne akustische Übertragung durch die Luft. Die Laseranregung ist aber auch kontaktfrei und komplementiert das optische Mikrofon aufgrund ihrer Eigenschaften, wie z. B. die Möglichkeit breitbandige Pulsformen zu realisieren. Die Methode kann mit einem einzigen Sensor in einem Frequenzbereich von 50 kHz – 4 MHz durchgehend arbeiten.

Eine zerstörungsfreie Prüfung kann in Durchschallung, Impuls-Echo oder Pitch-Catch Konfiguration erfolgen. Neben der Dämpfung des Ultraschalls im Bauteil können auch andere Bewertungsmodi verwendet werden, z. B. lokale Defektresonanzanalyse innerhalb eines großen Dimensionsspektrums durch Frequenzfilterung. Durch die Anwendung von laser-angeregtem Ultraschall können durch die hohe Fokussierbarkeit des Anregungslasers sowie des kleinen Messvolumens des Sensorkopfes typischerweise höhere Auflösungen verglichen zu herkömmlichen luftgekoppelten Prüfköpfen erreicht werden (bis zu wenige 100 μm).

Statt einem Laser kann auch ein thermoakustischer Sender zur Ultraschallerzeugung verwendet werden (siehe Kap. 3.2.2). Dieser Wandler bietet durch seine hohe Bandbreite eine gute Alternative zur Laseranregung, insbesondere für optisch transparente oder dünne Materialien.

Eine schematische Darstellung des Systems in Durchschallung ist in Abbildung 2 und eine Beispielmessung in Abbildung 16 zu sehen.

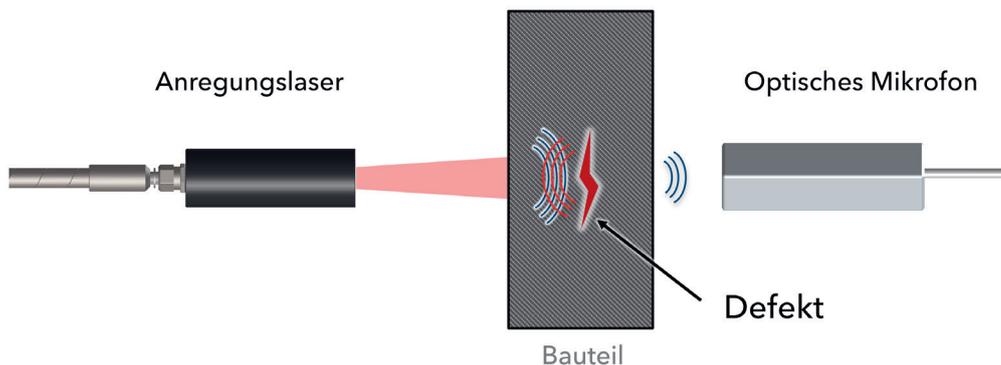


Abb. 3: Laser-Ultraschall-Inspektion mit luftgekoppelten optischen Mikrofonen in Durchschallung

3.3 Ultraschallgerät

Im Unterschied zu einem konventionellen Ultraschallgerät besitzt ein Luftultraschallsystem auf der Sendeseite einen programmierbaren Pulsgenerator und einen Leistungsverstärker. Der Pulsgenerator erzeugt üblicherweise einen Burst, der aus bis zu 10 einzelnen Rechteckimpulsen besteht. Die Pulsbreite und die Pulsfolgefrequenz können eingestellt werden. Der anschließende Verstärker muss so dimensioniert sein, dass die Anregungsspannung bei angeschlossenem Prüfkopf für jeden Burst und vor allem auch innerhalb des Bursts konstant ist.

Auf der Empfängerseite werden üblicherweise mehrstufige Verstärker verwendet. Diese müssen sehr rauscharm sein. Ein Vorverstärker befindet sich dabei meistens entweder direkt am Prüfkopf oder ist in diesen selbst integriert. Der Vorverstärker hat die Aufgabe das Signal so zu verstärken, dass es z. B. über das Schleppkettenkabel am Scanner oder Roboter bis zum Ultraschallgerät verlustfrei geleitet werden kann. Eine zweite Verstärkerstufe befindet sich dann meist im Ultraschallgerät selbst. Für Luftultraschallprüfungen sind Gesamtverstärkungen von mindestens 80 dB nötig, um den Signalverlust an den Grenzflächen Luft/Prüfling zu kompensieren.

Luftultraschallsysteme können mit Frequenzfiltern ausgestattet sein. Es werden hierbei analoge und digitale Filter unterschieden. Anzahl und Art der Filter sind dabei gerätespezifisch. Informationen und Anwendungshinweise sind der Gerätebeschreibung zu entnehmen.

4 Durchführung einer Prüfung

4.1 Durchschallung

Die Luftultraschallprüfung bietet verschiedenste Möglichkeiten zur Prüfdurchführung. Eine sehr häufig verwendete Möglichkeit ist die Prüfung in Durchschallung. Grundvoraussetzung für diesen Prüfmodus ist eine beidseitige Zugänglichkeit des Bauteils. In diesem Fall werden zwei Luftultraschallprüfköpfe benötigt, wobei ein Prüfkopf als Sender, ein weiterer als Empfänger dient. Ist dies gegeben, können innenliegende Bauteilfehler auf verschiedene Art und Weise dargestellt werden. Um eine möglichst realistische Abbildung von Fehlstellen bzgl. ihrer Größe und Lage zu realisieren, müssen beide Prüfköpfe auf einer Achse und senkrecht zur Bauteiloberfläche angeordnet werden. Für diesen Aufbau werden die Einstellungen des Prüfsystems und ihre Optimierung detailliert in den Kapiteln 4.3 und 4.4 beschrieben.

4.2 Geführte Wellen

Bei einer luftgekoppelten Ultraschallprüfung werden häufig geführte Wellen angeregt. Als geführte Wellen werden Wellen bezeichnet, die sich entlang einer Grenzfläche ausbreiten. Dabei kann es sich um eine Grenzschicht zwischen einem Feststoff und einem Gas bzw. einer Flüssigkeit handeln oder aber um die Grenzschicht zwischen zwei unterschiedlichen Feststoffen. Die einfachste Form geführter Wellen sind Lamb-Wellen [19]. Sie breiten sich in isotropen, homogenen Platten aus. In komplexeren Bauteilen, wie nicht-isotropen Leichtbaumaterialien, Sandwichstrukturen und dergleichen ist das Verhalten ähnlich, erfordert jedoch einen deutlich aufwendigeren mathematischen Zugang [20].

Geführte Wellen können sich großflächig in einem Bauteil ausbreiten, wobei sie mit Fehlstellen und Diskontinuitäten des Bauteils interagieren. Dabei existieren verschiedene Wellenmoden, deren Anzahl mit der Frequenz zunimmt. Das Verhalten einer Mode ist von den Eigenschaften des Bauteils sowie seiner Frequenz abhängig. Durch ihr Ausbreitungsverhalten sind diese Wellen prinzipiell zur Schadensdetektion oder Strukturüberwachung geeignet. Die Anregung und/oder Messung kann durch luftgekoppelten Ultraschall erfolgen [2, 21]. Dabei wird der Wandler zur Bauteiloberfläche geneigt, um selektiv eine bestimmte Mode anzuregen und die Signalamplitude zu erhöhen. Ein Zugang von beiden Seiten, wie bei der Durchschallungstechnik, ist nicht erforderlich.

Die Komplexität der Wellenausbreitung und ihre Interaktion mit unterschiedlichen Strukturen stellt jedoch eine große Herausforderung an eine geeignete Auswertung und Bewertung der Messergebnisse. Für die Auslegung von Sensornetzwerken und der Wahl geeigneter Auswertemethoden wurden deshalb unterschiedliche Verfahren entwickelt. So kann die Wellenausbreitung etwa mittels numerischer Modelle (FEM, NURBS usw.) simuliert werden [22]. Das Ausbreitungsverhalten im Bauteil kann z. B. mittels Laserinterferometrie, Shearographie oder luftgekoppelten Ultraschall [23] hochauflösend vermessen und anschließend ausgewertet werden. Wegen der Komplexität der Auswertung, wird luftgekoppelte Ultraschallprüfung mit geführten Wellen in der industriellen Praxis deutlich seltener verwendet als die Durchschallung.

4.3 Schrägdurchschallung

Um das Signal-Rausch-Verhältnis bei einer Durchschallungsprüfung zu erhöhen, können die Prüfköpfe unter einem definierten Winkel zur Oberfläche positioniert werden. Ziel ist dabei, eine Lamb-Wellenmode anzuregen, was zu einer Erhöhung der transmittierten Schallenergie führt. Ein weiterer Vorteil ist die Vermeidung von Reflexionen zwischen dem Prüfkopf (Sender oder Empfänger) und dem Prüfkörper. Diese Reflexionen erzeugen zusätzliche Signale, ähnlich wie Phantom-Echos bei der Kontakttechnik, die die Prüfung stören. Bei der Schrägdurchschallung können diese Reflexionen und die dazugehörigen Signale vermieden werden, was eine Erhöhung der Pulsfolgefrequenz ermöglicht. Allerdings ergeben sich in manchen Fällen auch Nachteile: Bei der Schrägdurchschallung können an den Defekten zusätzliche Verstärkungs- oder Abschwächungseffekte auftreten, was je nach Defektgeometrie und -lage zu einer deutlichen Verschlechterung bzw. Verbesserung des Kontrasts und der Erkennbarkeit von Anzeigen führen kann. Deswegen werden manchmal die Größe und die Lage von Defekten weniger genau abgebildet als bei einer Senkrechtdurchschallung, was zu einer Fehlinterpretation von Prüfergebnissen führen kann. Daher wird Schrägdurchschallung vor allem bei besonders dicken oder stark dämpfenden Werkstoffen eingesetzt, bei welchen das SNR bei einer senkrechten Durchschallung für eine zuverlässige Ergebnisinterpretation nicht mehr ausreichend ist.

4.4 Einstellung des Prüfsystems für Durchschallung

Die Luftultraschallprüfung ist üblicherweise ein scannendes bildgebendes Verfahren. Vor Beginn der Messung muss einerseits das Ultraschallsystem und andererseits das Scansystem eingerichtet bzw. parametrisiert werden. In diesem Kapitel wird die luftgekoppelte Durchschallung mit Senkrechtdurchschallung beschrieben.

4.4.1 Einstellung der Prüfköpfe und des Manipulators

Die Einrichtung einer ACUT-Prüfung beginnt immer mit der Auswahl des passenden Prüfkopfes für das Prüfobjekt. Die Prüfkopffrequenz und die Größe der Prüfkopfapertur haben einen maßgeblichen Einfluss auf die Durchschallbarkeit mit luftgekoppeltem Ultraschall. Bei niedriger Frequenz und großer Apertur können auch stark schallschwächende Materialien häufig gut geprüft werden. Dies geschieht jedoch auf Kosten der lateralen Auflösung, der Scan-Geschwindigkeit und der Zugänglichkeit.

Beim Ultraschallsystem ist darauf zu achten, dass die Prüfköpfe entsprechend ausgerichtet sind. Dabei sind verschiedene Prüfverfahren zu unterscheiden. In der Transmissionsmessung müssen die akustischen Achsen des Sende- und des Empfangsprüfkopfes zusammenfallen. Bereits kleine Schrägstellungen oder ein Versatz der akustischen Achsen zueinander, können deutliche Effekte auf die Qualität der Messergebnisse haben. Die einfachste Methode, um dies zu überprüfen, ist es, ein Luftschallsignal auf die Prüfköpfe zu geben und diese gegeneinander so lange auszurichten, bis das Signal maximal ist.

Der Abstand der Prüfköpfe richtet sich nach dem Fokusabstand der Prüfköpfe sowie der Probenstärke. Der Abstand der Prüfköpfe von der Probenoberfläche sollte bei der Prüfung immer gleich oder größer als der Fokusabstand sein. Bei unterschiedlichen Dicken der Probe ist somit die größte Dicke entscheidend. Bei planaren Prüfköpfen ist der Fokusabstand identisch mit der Nahfeldlänge und kann wie bei den Prüfköpfen für Kontakttechnik mit dieser Formel annähernd berechnet werden [24]:

$$N = \frac{f \cdot D^2}{4c}$$

N	Nahfeldlänge
f	Prüfkopffrequenz
D	Aperturdurchmesser/Schwingerdurchmesser
c	Schallgeschwindigkeit

Bei fokussierenden Prüfköpfen ist der Fokusabstand kleiner als bei einem planaren Prüfkopf mit den gleichen Parametern f und D ([24], Kap. 4.7), sodass diese Annäherungsformel nicht verwendet werden kann. Deswegen ist der Fokusabstand den Spezifikationen des Herstellers zu entnehmen. Sowohl bei planaren als auch bei fokussierenden Wandlern kann der Fokusabstand und die Fokusgröße von den Spezifikationen des Herstellers abweichen. Deswegen ist es empfehlenswert, die verwendeten Prüfköpfe nach der Richtlinie US 08 der DGZfP zu charakterisieren, um den Fokusabstand und andere Schallfeldparameter zu bestimmen [11].

Bei der Verwendung von Pitch-Catch-Anordnungen sind die Winkel und Abstände der Prüfköpfe in Bezug auf die Probenoberfläche einzustellen und zu überprüfen.

Die Auflösung des Manipulators richtet sich nach der Größe von gesuchten Defekten. Eine höhere Auflösung ergibt bessere Bilder, aber erfordert längere Prüfzeiten, sodass immer ein Kompromiss gesucht wird.

4.4.2 Einstellung des Prüfgeräts

Nachdem die Prüfköpfe zueinander ausgerichtet sind, müssen die Sendeparameter eingestellt werden. Diese Parameter sind: Sendespannung, Frequenz oder Pulslänge, Burstzahl und Pulsfolgefrequenz. Diese Parameter sind bis auf die Pulsfolgefrequenz dem Datenblatt des Prüfkopfes zu entnehmen.

Die Sendespannung gibt an mit wie viel Volt die Rechtecksignale erzeugt werden. In den meisten Fällen ist es beim Luftultraschall sinnvoll so viel Sendespannung zu verwenden wie möglich, um das bestmögliche Signal-Rausch-Verhältnis zu erzeugen. Die einzige Einschränkung sind die Prüfköpfe, da diese nicht „verbrannt“ werden dürfen.

Die Sendefrequenz wird über die Pulslänge der Rechtecksignale eingestellt und sollte zu den Prüfköpfen und dem Prüfobjekt passen.

Die Burstzahl gibt an, aus wie vielen Rechteckimpulsen ein Sendeimpuls besteht. Hier ist es wichtig, das richtige Mittelmaß zwischen der Länge des Ultraschallsignals und der gewünschten Amplitude zu finden. Eine kleine Burstzahl verkürzt das Signal und führt häufig zu einer höheren Bandbreite des Pulses, es sind jedoch meist mehrere Rechtecke nötig, um den Prüfkopf zum Schwingen zu bringen und die gewünschte Signalamplitude zu erzeugen. Eine zu hohe Burstzahl führt hingegen häufig zu einem gesättigten und sehr schmalbandigen Signal. Die Länge des Ultraschallbursts reduziert zudem die laterale Auflösung. Meist wird deshalb bei der Auswertung mit Software-Blenden gearbeitet, welche nur die ersten Wellenzüge des Signals einfangen und für die Bilderzeugung nutzen.

Die Pulsfolgefrequenz (oder Burstfrequenz oder Pulswiederholrate) ist so groß zu wählen, dass alle Sekundärechos (Nachläufer) des vorangegangenen Pulses abgeklungen sind. Dieses Abklingen ist am besten an einer typischen Stelle auf dem Prüfling

vor dem Scannen zu überprüfen. Die Pulsfolgefrequenz ergibt sich in manchen Geräten aus der Scangeschwindigkeit und dem Punktabstand im Scanraster.

An solch einer typischen Stelle kann auch die Empfangsverstärkung vorab eingestellt werden, wenn sie noch unbekannt ist. Falls es während der Messung zu Übersteuerung der gemessenen Spannung im Prüfbereich kommt, muss die Empfangsverstärkung verringert und die Messung wiederholt werden.

Sind im Ultraschallsystem analoge oder digitale Filter vorhanden, müssen diese passend zur verwendeten Prüffrequenz ausgewählt werden.

Am Scansystem ist der Scanbereich und das Scanraster zu parametrisieren. Die Scangeschwindigkeit darf maximal so groß sein wie das Produkt aus Punktabstand im Scanraster und Puls wiederholrate.

Üblicherweise ist am Messsystem ein Zeitbereich für die Aufnahme des A-Bildes einzustellen. Dieser muss so gewählt werden, dass an jeder Stelle des Prüflings der empfangene Burst komplett im Messfenster liegt. Nachläufer oder Sekundärechos können außerhalb liegen. Als Anhaltspunkt für das Ende des Zeitbereichs kann das Luftsignal ohne Probe genommen werden. Für den Beginn des Zeitbereichs empfiehlt es sich die Laufzeit an der dicksten Stelle des Prüflings vor Beginn des Scans zu überprüfen. Üblicherweise ist die Schallgeschwindigkeit in der Probe größer als in Luft, sodass das Messsignal früher ankommt als bei einer Leermessung in Luft. Ausnahmen können aber zum Beispiel sehr poröse Proben sein, wo das transmittierte Signal später als das Luftsignal am Empfänger detektiert wird.

Teilweise wird bei der Messung auch das empfangene Ultraschallsignal selbst als Auslöser der Messung verwendet. Wenn dafür ein Schwellwert angegeben werden muss, ist zu beachten, dass dieser auch an jeder Stelle des Prüflings – vor allem in stark dämpfenden Bereichen – überschritten wird. Nachteil dieses Verfahrens ist jedoch, dass an Fehlstellen wie Delaminationen das Signal so klein wird, dass keine Messung ausgelöst wird und damit kein Messpunkt vorhanden ist.

Die Speicherung der A-Bilder, auch als Rohdaten oder Hochfrequenzdaten bezeichnet, ist zu empfehlen, da somit im Post-Processing noch weiterführende Auswertungen möglich sind.

Die meisten Luftultraschallgeräte ermöglichen Mittelungen von mehrfach aufgenommenen Signalen. Dieses Verfahren wird angewendet, um stochastisches Rauschen zu reduzieren und dadurch den Signal-Rausch-Abstand zu erhöhen, aber hat den Nachteil, dass es die Prüfzeit deutlich erhöht.

4.5 Optimierung der Auflösung und der Signalhöhe

Wenn eine hohe laterale Auflösung gewünscht ist, weil z. B. zwei Fehler aufgelöst werden müssen, die sehr nah beieinander liegen, muss das Schallfeld möglichst schmal sein. Dies erreicht man durch den Einsatz von fokussierten Luftultraschallwandlern. Die Breite des Schallfelds und damit die Auflösung korreliert hierbei mit der Frequenz, dem Durchmesser und dem Fokusabstand. Mit steigender Frequenz nimmt die Schallfeldbreite ab, wodurch die Auflösung größer wird. Grob kann gesagt werden, dass bei der Luftultraschallprüfung und dem Einsatz von fokussierten Prüfköpfen, die Auflösung etwa der zweifachen Wellenlänge in der Luft entspricht.

Die Auflösung ist jedoch nicht nur von der Schallfeldbreite, sondern indirekt auch von der Signalamplitude abhängig. Mit zunehmender Frequenz nimmt die Dämpfung zu, sodass sehr dicke Bauteile bzw. stark dämpfende Bauteile ggf. nicht mehr geprüft werden können, weil das transmittierte Ultraschallsignal zu schwach wird. Mit steigender Bauteildicke werden daher Prüfköpfe mit eher niedrigeren Frequenzen eingesetzt, wodurch aber die laterale Auflösung abnimmt.

Die Auflösung und Eindringtiefe des Ultraschalls verhalten sich also gegensätzlich. Deswegen muss für jede Anwendung ein optimaler Kompromiss gefunden werden. Beispielsweise werden bei der Luftultraschallprüfung von Kunststoff- oder Komposit-Platten üblicherweise Frequenzen im Bereich von 200 – 500 kHz eingesetzt. Hierbei ergibt sich für fokussierte Prüfköpfe eine Auflösung von etwa 1,5 mm (500 kHz) – 4 mm (200 kHz).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass fokussierte Luftultraschallwandler besonders gut für die Luftultraschallmessung geeignet sind, da sie aufgrund der starken Fokussierung große Schalldrücke und damit neben einer sehr guten Auflösung auch stärkere Signale bei der Detektion von kleineren Einschlüssen liefern, was günstig für die Prüfung von stärker dämpfenden Materialien ist.

5 Auswertung

5.1 A- bis F-Bilder

Die Darstellung und Auswertung einer ACUT-Messung kann auf unterschiedliche Arten erfolgen, die hier vorgestellt werden, wobei die Auswertemethoden sowohl für Reflexions- als auch für Transmissionsmessungen anwendbar sind.

Die der Messung stets zugrundeliegenden Rohdaten sind die gemessenen Schallamplituden über der Zeit, die üblicherweise als Spannungssignal ausgegeben werden und positive und negative Werte um 0 V annehmen. Dieses Signal wird HF-Signal oder HF-Bild oder HF-A-Bild genannt. Bei Messungen in der Kontakttechnik wird dieses Signal gleichgerichtet und meist geglättet. Dieses gleichgerichtete und eventuell geglättete Signal wird dann als A-Bild oder A-Scan gekennzeichnet. Bei Luftultraschall ist es nicht üblich, die Signale gleichzurichten, sodass HF-Signale auch A-Bilder oder A-Scans genannt werden (Abbildung 4). Bei einer luftgekoppelten Durchschallung werden Signale bei einem vorhandenen Lufteinschluss im Bauteil in der Regel kleiner, was für die Detektion von Fehlstellen verwendet wird. Weiterhin kann aus einem Amplitudenabfall die Dämpfung berechnet werden. Zur Weiterverarbeitung kann das Signal z. B. mit Filtern (z. B. Hoch- oder Tiefpass) manipuliert werden.

Das B-Bild setzt sich aus mehreren A-Bildern zusammen, die auf einer Linie auf dem Prüfling aufgenommen wurden (Abbildung 4). Typischerweise wird die Laufzeit auf der y-Achse (mit von oben nach unten ansteigenden Werten), die Position auf der Linie auf dem Prüfling auf der x-Achse und der Amplitudenwert an der jeweiligen Stelle farbcodiert aufgetragen. Es entsteht ein zweidimensionales Bild, das einem Schnitt durch die Probe entspricht. Durch die schnittbildartige Darstellung lassen sich insbesondere der Verlauf von Grenzflächen sowie die Lage und Größe von Fehlstellen gut erkennen.

Neben dem Linienscan zur Erzeugung eines B-Bildes kann ein flächiger Prüfling auch rasterförmig abgetastet werden, wobei wiederum an jedem Rasterpunkt ein A-Bild aufgenommen wird. Für die zweidimensionale Darstellung wird jedem Pixel ein Wert zugeordnet, der sich aus dem A-Bild ergibt. Dieser Wert kann auf verschiedene Weise berechnet werden:

- C-Bild:
Amplitudenwert an einer bestimmten Zeitposition oder maximaler Amplitudenwert innerhalb eines Zeitintervalls (Abbildung 4 und Abbildung 5).
- D-Bild:
Zeitwert des ersten Nulldurchgangs oder des ersten Maximums in einem gewählten Zeitintervall.
- F-Bild:
„Feature“-Bild, das sich aus der Messung abgeleiteter Größen entlang der Prüffläche abbildet. Mögliche Beispiele sind das Frequenzmaximum in einem gewählten Zeitintervall, das sich aus dem Maximum der Fourier-Transformierten des Rohsignals ergibt (Abbildung 6), die Differenz von Amplitudenwerten oder das SNR-Bild.

Flächenscans eignen sich besonders zur Bestimmung der Lage und Ausdehnung von Fehlern wie Lufteinschlüssen, Dichteänderungen oder Fremdmaterialien im Prüfling. Bei der Darstellung ist auf die Wahl des Farbcodes zu achten. Unterschiedliche Farbkodierungen können den Prüfkörper und besonders detektierte Defekte und Fehlstellen unterschiedlich stark hervorheben. Eine Möglichkeit der neutralen und sehr vergleichbaren Darstellung ist die Darstellung in Graustufen, die aber auf Grund der geringen Kontraste für das Auge selten gewählt wird. Mehrfarbige Kodierungen haben den Vorteil, dass sie Defekte sehr gut vom Hintergrund abheben können, bringen aber ebenfalls Nachteile mit. So ist die Farbwahrnehmung von Mensch zu Mensch unterschiedlich und machen Menschen können einzelne Farben nicht gut unterscheiden (z. B. Rot-Grün-Sehschwäche). Außerdem ist die Wahrnehmung damit nicht mehr linear.

Im Gegensatz zu Messungen in Kontakttechnik sind die oben aufgeführten Bezeichnungen der Auswertung einer Luftultraschallprüfung nicht immer eindeutig und können sich zwischen Anwendern unterscheiden. Daher ist es von hoher Wichtigkeit, sich bei der Auswertung und dem Vergleich von Luftultraschallprüfungen über die gewählten Auswertungen und Bezeichnungen zu verständigen und diese abzugleichen.

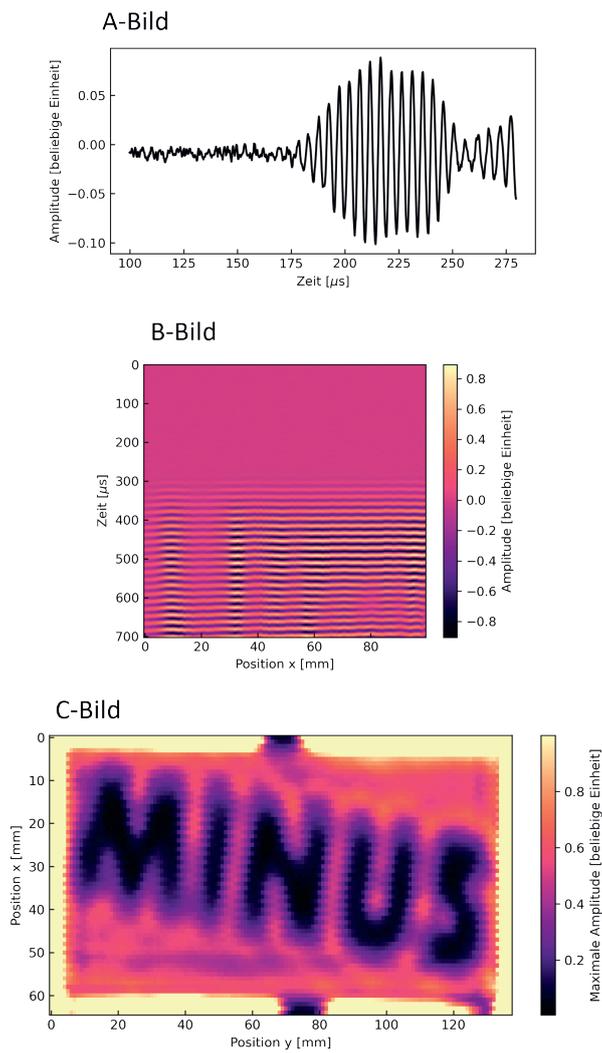


Abb. 4: Der Weg von den Rohdaten zum A-Bild, B-Bild und C-Bild. Gemessen wurde eine additiv hergestellte Kunststoffplatte mit Hohlräumen in Form des Wortes "Minus".

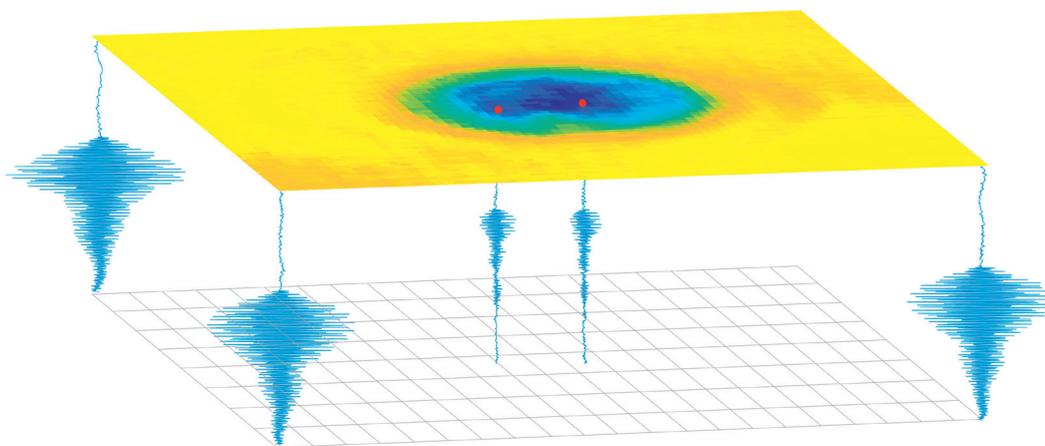


Abb. 5: Darstellung eines Luftultraschall-Datensatzes mit A- und C-Bildern [25]. Bei einer Materialänderung kommt es zu einer Schwächung des Signals, was im C-Bild farblich dargestellt wird.

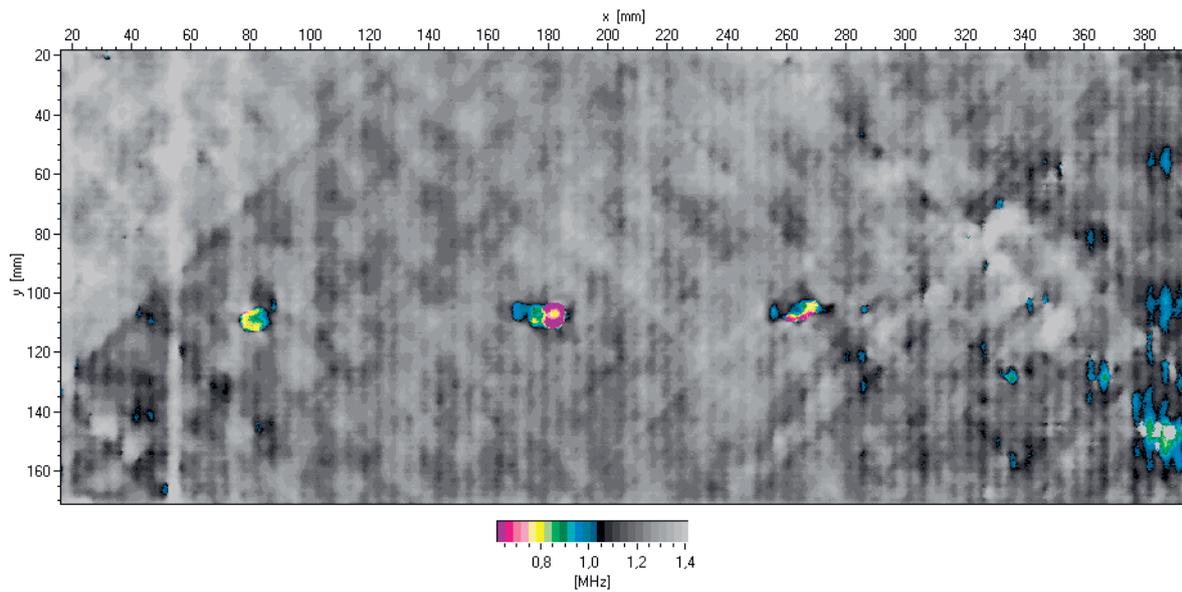


Abb. 6: Ein beispielhaftes F-Bild einer CFK-Platte mit der Darstellung der Mittenfrequenz über die Scanfläche.

5.2 Bewertung der Signalqualität

Um die Qualität der gewonnenen Messergebnisse zu quantifizieren kann das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR, signal-to-noise ratio) der gewonnenen A-Scans ausgewertet werden. Hierbei wird das Verhältnis zwischen der effektiven Signalamplitude $A_{eff,Signal}$ zum Grundrauschen des Signals $A_{eff,Rauschen}$ mit

$$SNR \text{ (in dB)} = 20 \lg \left(\frac{A_{eff,Signal}}{A_{eff,Rauschen}} \right)$$

gebildet (Abbildung 7). Häufig wird hierzu ein Schwellwert von 6 dB definiert, ab welchem eine zuverlässige Auswertung des gemessenen Signals möglich ist. Da der SNR bereits bei der Einstellung der Messkonfiguration einfach und schnell bestimmt werden kann, wird er sehr häufig herangezogen.

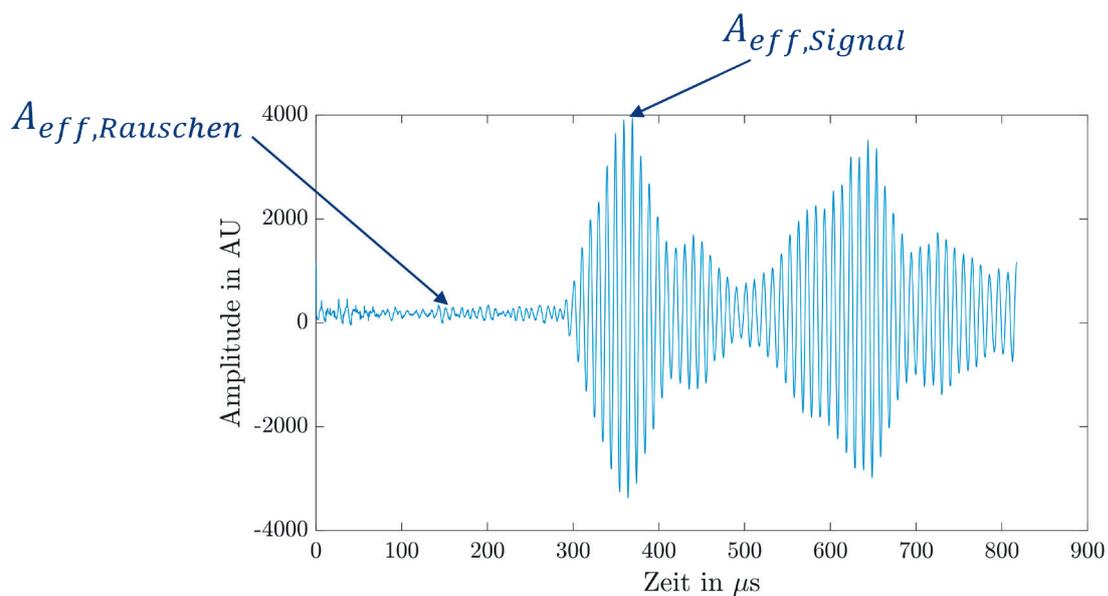


Abb. 7: Ein beispielhaftes A-Bild und die für die Bestimmung des Signal-Rausch-Abstands notwendigen Charakteristiken.

Die Ergebnisinterpretation wird in der Regel nicht anhand der A-Scans, sondern anhand der C- bzw. F-Scans durchgeführt. Hier verliert der SNR zunehmend seine Aussagekraft, da zur zuverlässigen Defektdetektion in erster Linie der Kontrast zwischen defekt- und defektfreiem Bereich ausschlaggebend ist. Hierzu kann das Kontrast-Rausch-Verhältnis (CNR, contrast-to-noise ratio) aus der Defektamplitude A_{Defekt} , der Amplitude des defektfreien Referenzbereichs A_{Referenz} sowie der Standardabweichung der Amplitude dieses defektfreien Referenzbereichs σ_0 berechnet werden (Abbildung 8):

$$CNR = \frac{|A_{\text{Defekt}} - A_{\text{Referenz}}|}{\sigma_0}$$

Da das CNR erst nach einer durchgeführten Messung ausgewertet werden kann, wird es deutlich seltener herangezogen als das SNR.

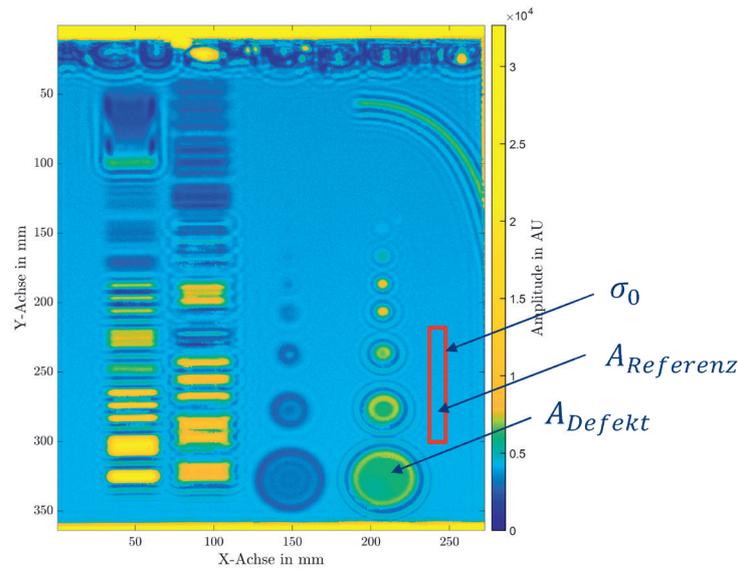


Abb. 8: Ein beispielhaftes C-Bild und die für die Bestimmung des Kontrast-Rausch-Verhältnisses notwendigen Charakteristiken.

5.3 Größenbewertung

Für die Größenbewertung der Anzeigen bei der luftgekoppelten Ultraschallprüfung gibt es keine allgemein gültigen Normen, sondern sie erfolgt über industriespezifische Regeln. Ähnlich wie bei der Anwendung von Kontakttechnik kann die Größe einer Anzeige mit Hilfe des 6-dB-Abfalls ermittelt werden. Ein Beispiel aus der Luftfahrt ist in der Airbus-Norm AITM6-4018 „Air-coupled ultrasonic testing“ zu finden. Bei mancher Prüfung ist der Amplitudenabfall geringer als 6 dB, aber die Anzeigen trotzdem erkennbar. Dann können Vergleichsmessungen mit einem Referenzprüfkörper die Grundlage für die Auswertung geben. Andere Möglichkeiten sind beispielsweise ein Vergleich mit einem Schlibbild, oder mit einem Referenzverfahren wie Computertomographie.

5.4 Anwendungen von Methoden des maschinellen Lernens

Die herkömmliche Auswertung im Luftultraschallmessungen wird im Kapitel 5.1 beschrieben.

Um die Einschränkung auf einzelne vordefinierte Merkmale (z. B. Amplitude) zu vermeiden oder die Merkmalsextraktion zu automatisieren, bietet sich der Einsatz von Methoden des maschinellen Lernens an. Diese lassen sich grundsätzlich in überwachte und unüberwachte Verfahren unterteilen, wobei die unüberwachten Verfahren auch als Clustering bezeichnet werden. Bei den überwachten Verfahren ist es erforderlich, jedem Datapunkt ein Label zuzuweisen, anhand dessen der Algorithmus trainiert wird. In bisherigen Studien im Bereich des Luftultraschalls kommen häufig überwachte Lernverfahren zum Einsatz. Dabei wurden sowohl konventionelle Methoden wie Entscheidungsbäume und Support Vector Machines, die auf zuvor extrahierten Merkmalen basieren [7], als auch neuronale Netze [25 – 27] verwendet. Die neuronalen Netze können einerseits auf den C-Scans (CNNs) und andererseits auf den A-Scans trainiert werden. Falls sie auf den A-Scans (z. B. LSTMs) trainiert werden, kann mit ihrem Ergebnis ein C-Scan rekonstruiert werden. Die Modelle, die auf C-Scans trainiert werden können, helfen die Defektform genauer zu bestimmen, während die A-Scan- bzw. Zeitreihenmodelle den Merkmalsextraktionsprozess automatisieren.

Die Algorithmen für das maschinelle Lernen sind kommerziell, aber auch über frei verfügbare Software, zugänglich. Verbreitet sind für die freie Programmiersprache Python die Bibliothek Scikit-learn für maschinelles Lernen (<https://scikit-learn.org/stable/>), das für künstliche Neuronale Netzwerke eingesetzte Framework TensorFlow (<https://www.tensorflow.org/>) sowie OpenCV mit Schwerpunkt Bildanalyse (Computer Vision), das auch für C und C++ angeboten wird. Die genannten Bibliotheken sind online umfassend dokumentiert, was zahlreiche Anwendungsbeispiele einschließt.

6 Musterbeispiel einer Durchschallungsprüfung

In diesem Kapitel beschreiben wir den Verlauf einer typischen luftgekoppelten Ultraschallprüfung in Durchschallung mit dem Einsatz von marktüblichen Geräten. Als Beispiel soll die unten gezeigte ACUT-Prüfplatte dienen, Abbildung 9. Der Aufbau der Prüfung muss gewährleisten, dass alle zu untersuchende Bereiche von den Prüfköpfen erreicht werden können.

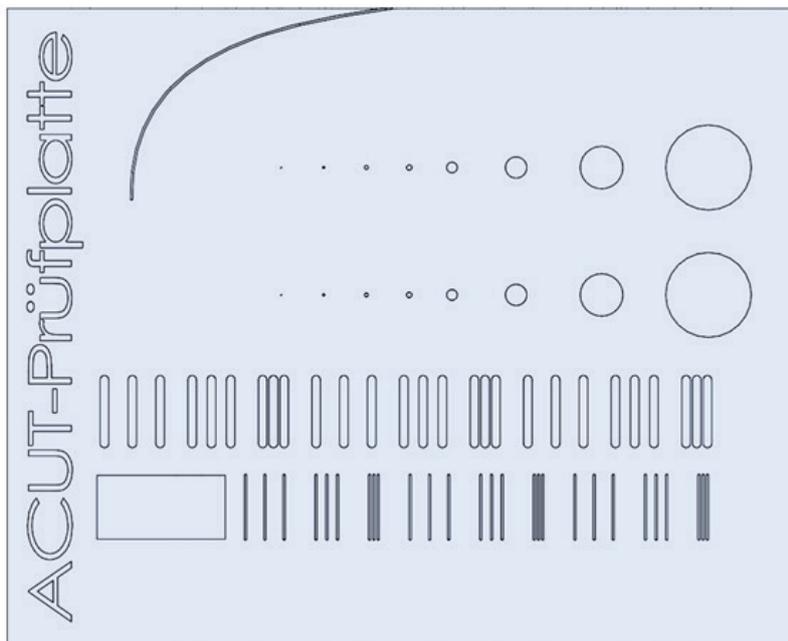


Abb. 9: Testplatte aus gegossenem PMMA mit eingefrästen Formen, 400 x 300 mm, Materialstärke 5 mm.

Hierfür eignet sich z. B. ein x-y Tisch. Der Aufbau muss gewährleisten, dass die Prüfköpfe koaxial zueinander und die Schallrichtung senkrecht zur Bauteiloberfläche ausgerichtet sind. Prinzipiell kann die Bewegung vom Bauteil, von den Schallwandlern, oder kombiniert von Bauteil und Schallwandler, durchgeführt werden. Werden beim Scan die Prüfköpfe bewegt, wird dies häufig über eine Gabelkonstruktion gelöst (Abbildung 2). Bei großen Bauteilen führt dies durch die begrenzte Steifigkeit der Gabel zu Problemen. Ein Schwingen des Bauteils bzw. der Prüfköpfe während des Scanvorgangs muss möglichst vermieden werden.

Der Prüfkopf wird nach der Prüfaufgabe ausgewählt. Grundsätzlich gilt: Hohe Frequenzen erzeugen eine bessere Ortsauflösung, werden im Bauteil aber stärker gedämpft, sodass ggf. nicht genug Energie zur Durchschallung erzeugt wird (siehe Kapitel 4.5). Niedrige Frequenzen bieten eine schlechtere Ortsauflösung, sind aber für die Prüfung von dicken bzw. stark dämpfenden Materialien notwendig. In unserer Beispielprüfung ist der Testkörper eine 5 mm dicke Platte aus PMMA (Abbildung 9). Für die Prüfung dieser Platte könnten sich Prüfköpfe mit Mittenfrequenzen im Bereich zwischen 200 und 500 kHz eignen, sodass wir uns für ein Prüfkopfpaar mit 200 kHz entscheiden.

Im nächsten Schritt wird eine Durchschallungsstrecke ohne den Prüfkörper aufgebaut, um die Prüfköpfe auszurichten. Der Abstand zwischen den Prüfköpfen soll dabei der Summe von zwei Fokusabständen und der Dicke des Prüfkörpers gleich sein (Abbildung 10). Dieser Abstand wird später bei der Prüfung beibehalten, wenn der Prüfkörper zwischen die Wandler positioniert wird, sodass sich die Oberflächen des Prüfkörpers in den jeweiligen Fokuspunkten von zwei Prüfköpfen befinden, was zur optimalen Auflösung der Messung führt (beschrieben in Kapitel 4.4.1).

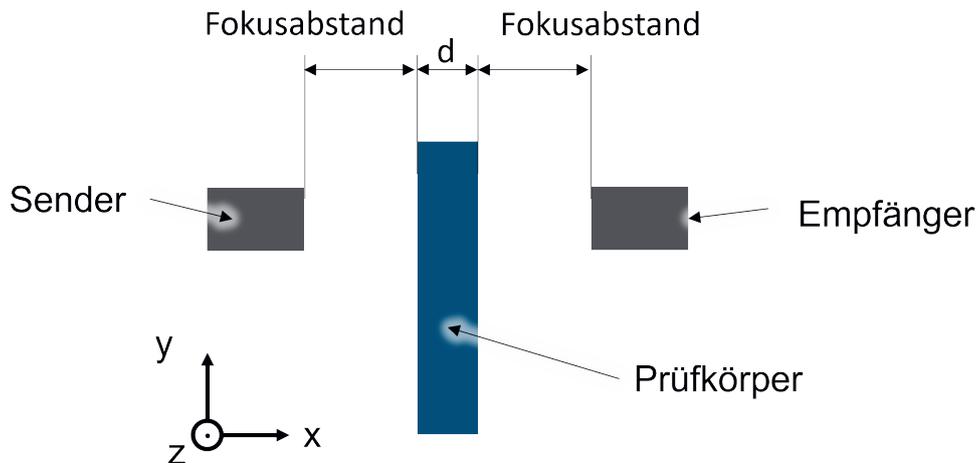


Abb. 10: Typische Positionierung der Wandler bei der Durchschallung eines Testkörpers.



Abb. 11: Positionierung der Wandler bei der Durchschallung eines Testkörpers. Die Halterung mit Goniometern ermöglicht die Ausrichtung der Wandler.

Die Prüfköpfe werden so ausgerichtet, dass sich ihre akustischen Achsen überlappen. Die Feinjustierung der Wandler zueinander kann mithilfe der Goniometer bewerkstelligt werden. Sie sollten so ausgerichtet sein, dass das Signal bei der Durchschallung einer Luftstrecke maximiert wird. Meist muss dafür die Empfangsverstärkung und/oder die Anregungsspannung verkleinert werden, um eine Übersteuerung zu vermeiden. Zudem sollten Sie parallel zur Flächennormalen stehen, sprich lotrecht zur Oberfläche des Messobjektes. Bei diesen Justierungen empfiehlt es sich, alle Filter auszuschalten.

Anschließend wird der Prüfkörper zwischen die Schallwandler geschoben. Das Signal reduziert sich nun, weshalb die Verstärkung erhöht wird, bis ein Signal wieder erkennbar ist. Spätestens jetzt muss die Impulslänge eingestellt werden. In der Theorie sollte diese die Hälfte der Schallwandlerfrequenz betragen, in der Praxis erfolgt eine Anpassung so, dass das Signal maximiert wird. Anschließend wird die Anzahl der Impulse für die Burst-Anregung eingestellt. Beginnend bei eins, können diese erhöht werden, bis keine nennenswerte Amplitudenerhöhung mehr stattfindet. Durch eine Mittelung des Signals kann eine Verbesserung des SNR bei gleichzeitiger Erhöhung der Messzeit vorgenommen werden. Auch Band-, Tief- und Hochpassfilter führen zu einer Verbesserung des SNR und müssen so gewählt werden, dass die Frequenz des Schallwandlers nicht gefiltert wird.

Als letzter Schritt muss die Verstärkung erneut angepasst werden. Die Verstärkung sollte so gewählt werden, dass bei maximaler Schallschwächung im Bauteil die Signalamplitude 80 % des Messbereichs beträgt. Die Verstärkung kann entweder an einem defektfreien Referenzprüfkörper oder an einem defektfreien Bereich des Bauteils eingestellt werden. Bei unbekannter Fehlerlage müssen mehrere Punkte am Bauteil angefahren werden, um den Bereich der maximalen Abschwächung zu ermitteln. Als letzter Schritt muss der zu scannende Bereich eingestellt werden und anschließend kann der C-Scan gestartet werden. Wenn über die Kanten des Bauteils gefahren wird, ist damit zu rechnen, dass die Amplitude in die Sättigung läuft. Aus diesem Grund ist die Prüfung am Plattenrand nicht möglich, es sei denn dieser Randbereich wird abgeschirmt (Abbildung 15).

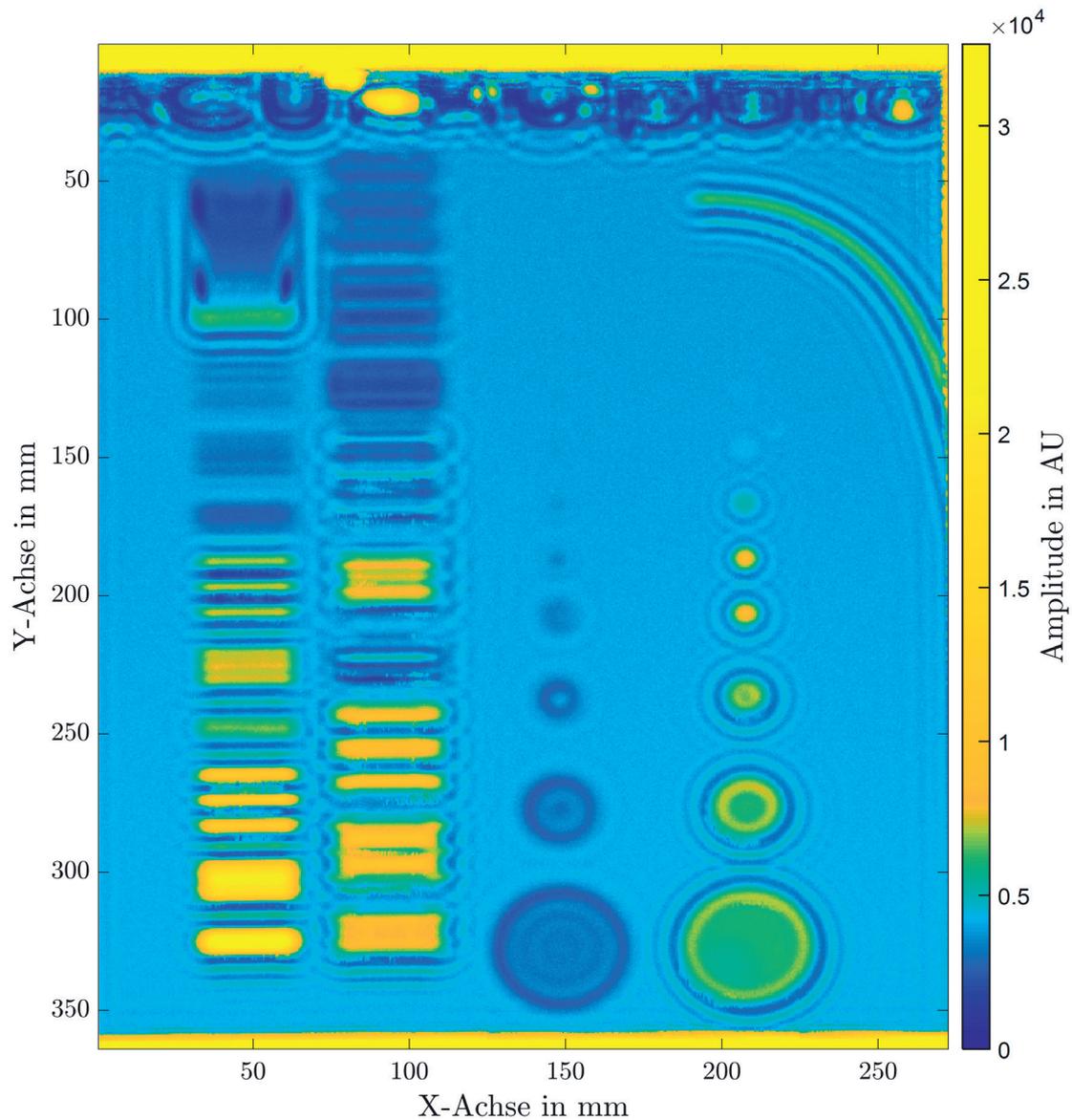


Abb. 12: Ergebnis einer Luftultraschallmessung mit 200 kHz Prüfköpfen an der ACUT-Platte

7 Anwendungsbeispiele

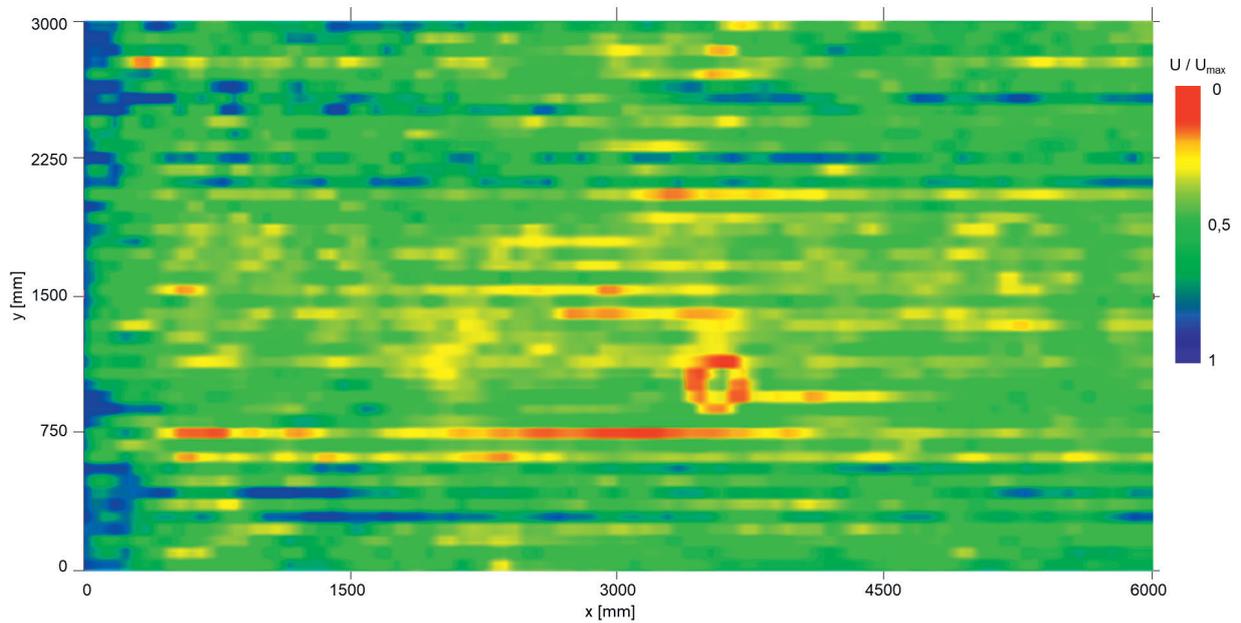


Abb. 13: Qualitätskontrolle einer 6 m x 3 m x 22 mm Spanplatte mit 60 Kanälen im Durchlauf bei 2 m/s Produktionsgeschwindigkeit und Mittelfrequenz der Wandler 50 kHz. Der rote Kreis zeigt eine Delamination, die durch Verformungen im Pressblech hervorgerufen wurde.

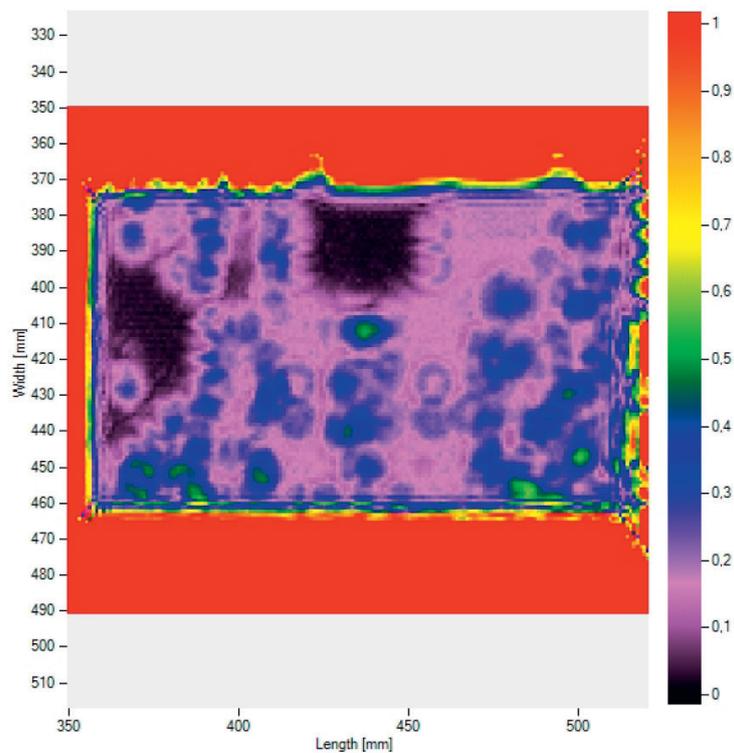


Abb. 14: Leiterplatte mit Delaminationen (schwarz) nach einem Reflow-Prozess. Messung mit 200 kHz-Prüfköpfen (Apertur 11 mm) in Durchschallung, Scanraster 1 x 1 mm²

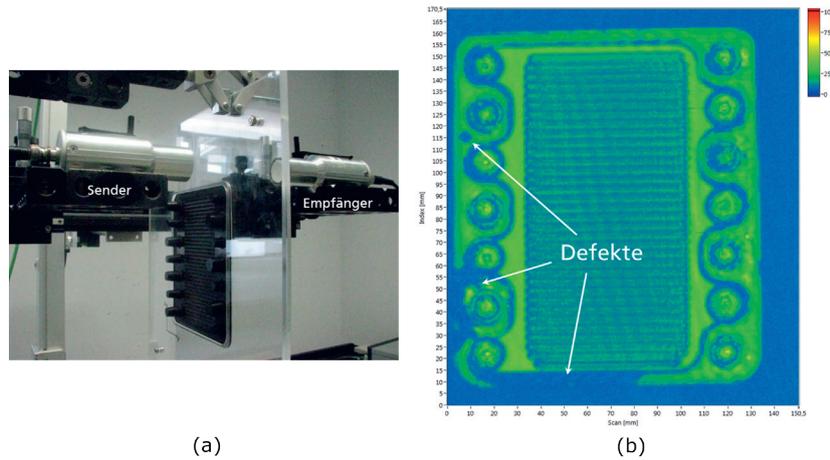


Abb. 15: Prüfung der Zellfügung von Hochtemperaturbrennstoffzellen. Scanbereich 150 x 170 mm mit fokussierten Luftultraschallprüfköpfen. Die Prüffrequenz war 550 kHz, Fokusabstand 50 mm, Schwingerdurchmesser 23 mm. Die Luftultraschallprüfköpfe und -geräte (LUPUS) sind Eigenbau des Fraunhofer IZFP. Der Randbereich des Brennstoffzelle wurde abgeschirmt, um die Sättigung des Signals zu vermeiden.

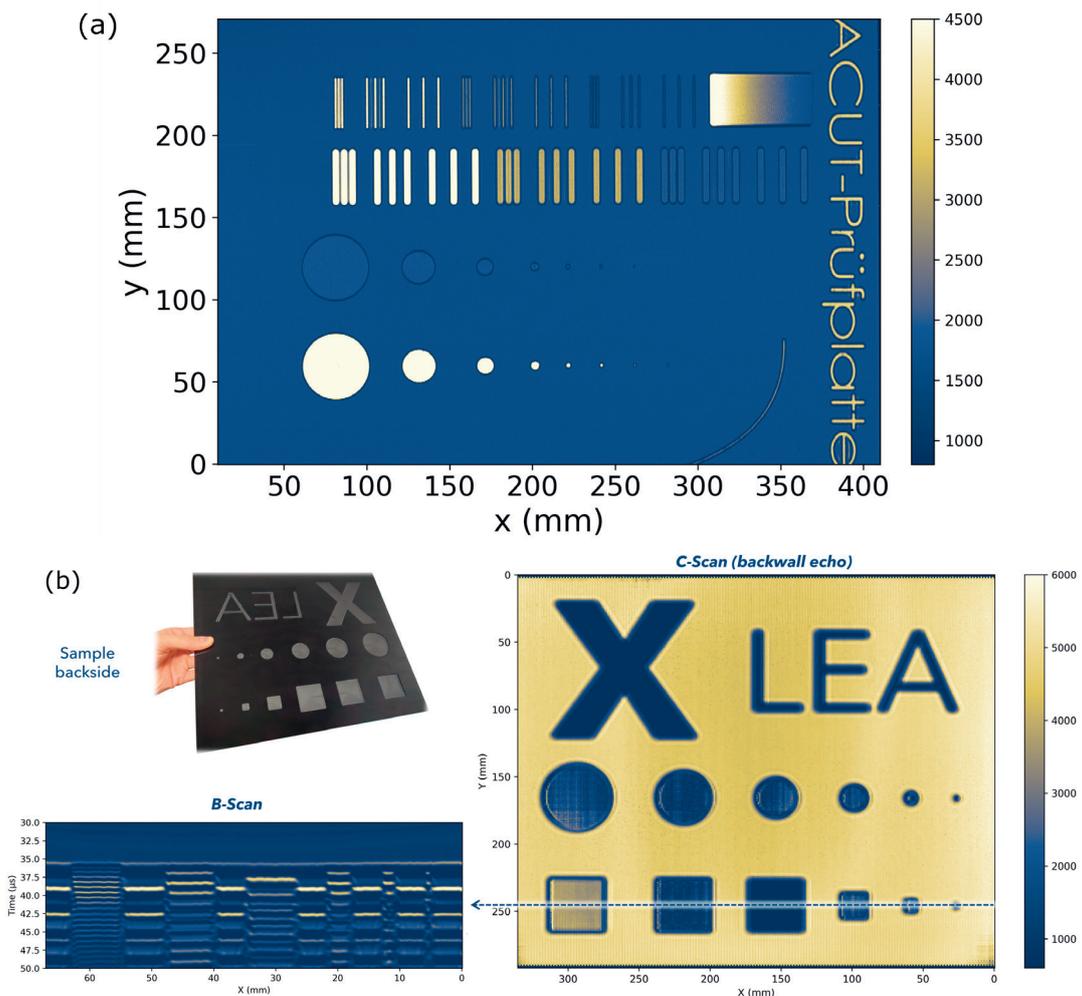


Abb. 16: (a) ACUT-Prüfplatte beschrieben im Kapitel 6, geprüft mit Laser-Anregung und optischem Mikrofon in Transmission. (b) Sackloch-Referenzplatte geprüft mit Laser-Anregung und optischem Mikrofon in einseitigem Prüfsetup.

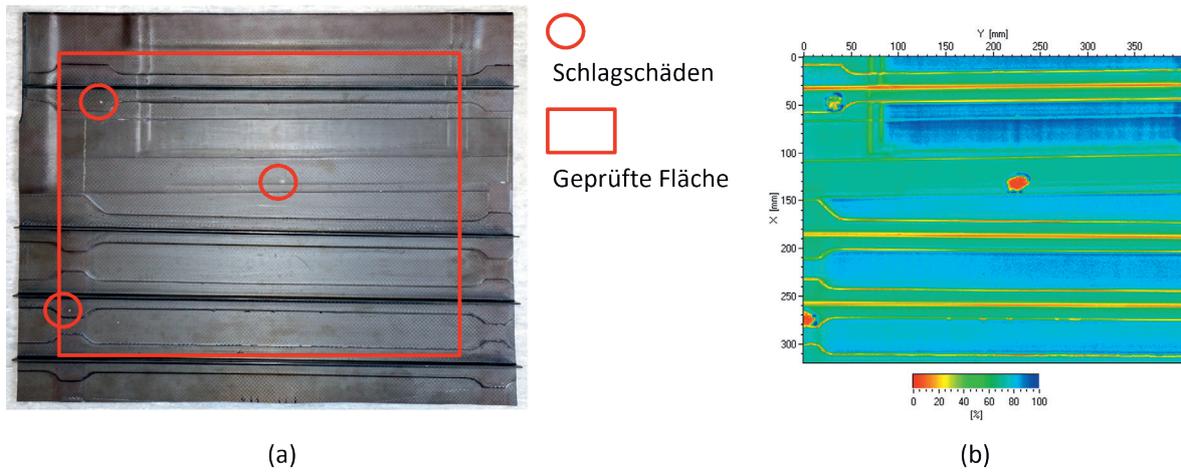


Abb. 17: Luftgekoppelte Prüfung einer 2 bis 4 mm dicken CFK-Platte mit Stringern.

(a) In die Platte wurden drei Schlagschäden eingebracht.

(b) C-Scan als Ergebnis einer Prüfung mit Ferroelektret-Prüfköpfen mit Mittenfrequenz 250 kHz, Apertur 19 mm und sphärischer Fokussierung [6].

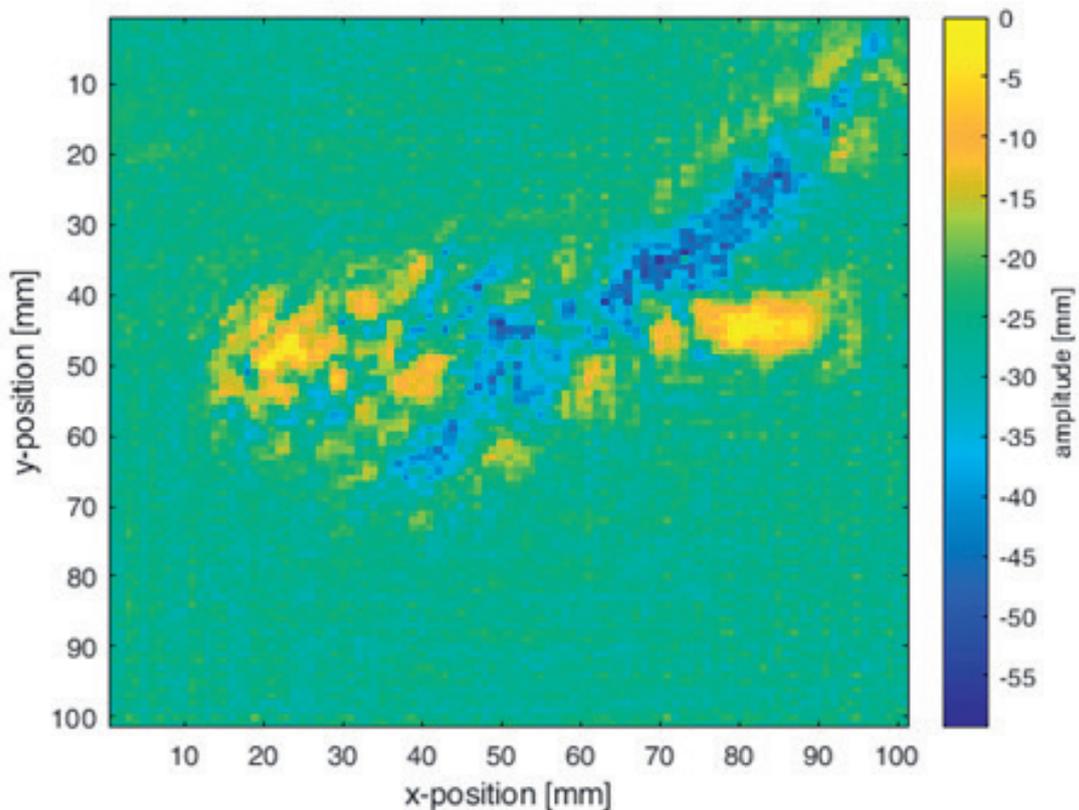


Abb. 18: Luftgekoppelte Prüfung einer 3 mm dicken CFK-Platte mit einem Impact Schaden. Die Platte wurde mit dem CF 400 US-Geber und dem optischen Mikrophon Eta450 Ultra der Fa. XARION vermessen.

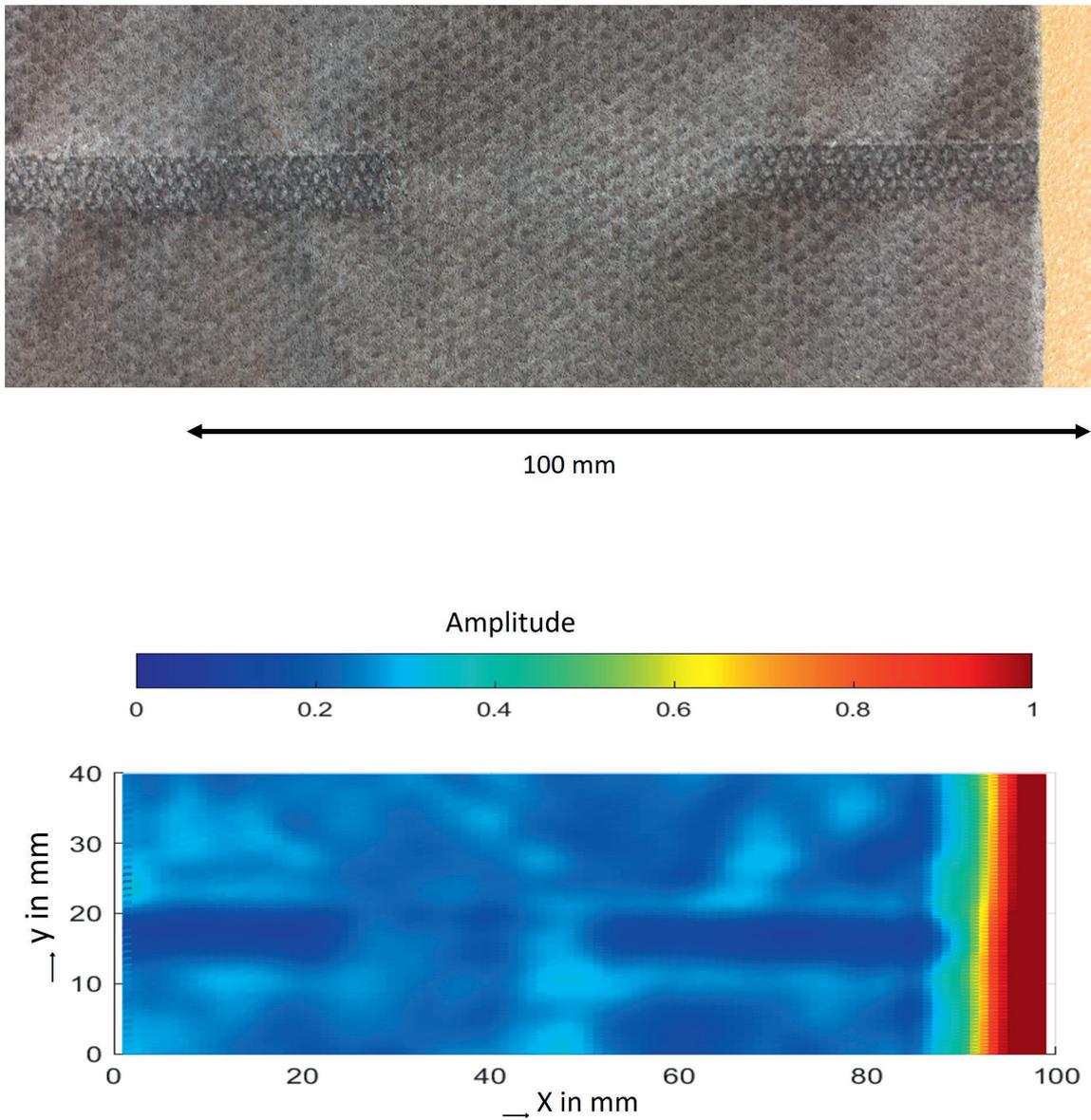


Abb. 19: (a) Ausschnitt einer Ultraschallschweißnaht bei 4-lagigem Vliesstoff für FFP2-Masken, (b) C-Scan in der Vliesnaht bei Durchschallung mit ACUT-Prüfköpfen ($f=200$ kHz) [28].

8 Literatur

- [1] R. Stößel, "Air-coupled ultrasound inspection as a new non-destructive testing tool for quality assurance " Dissertation, Universität Stuttgart, 2003.
- [2] D. Döring, "Luftgekoppelter Ultraschall und geführte Wellen für die Anwendung in der Zerstörungsfreien Werkstoffprüfung," Dissertation, Universität Stuttgart, 2011.
- [3] W. Essig et al., "Air-coupled Ultrasound – Emerging NDT Method," ZfP-Zeitung, 173, pp. 32-43, 2021.
- [4] P. Holstein, G. Schober, and T. Gautzsch. T. I. Steinbeis-Transferzentrum. (2020). Materialprüfung mit Luftultraschall. Verfügbar: https://www.sonotec.de/fileadmin/user_upload/business_units/3-nondestructive-testing/expertise/white-paper-steinbeis-luftultraschall.pdf
- [5] W. Essig, "Ganzheitliche Betrachtung zur zerstörungsfreien Prüfung von thermoplastischen CFK-Tapes mittels Luftultraschall," Dissertation, Universität Stuttgart, 2018.
- [6] M. Gaal, J. Bartusch, E. Dohse, F. Schadow, and E. Köppe, "Focusing of ferroelectret air-coupled ultrasound transducers," in Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation QNDE, Baltimore, MD, USA, 2015, 1706, 080001, doi: 10.1063/1.4940533.
- [7] M. Tiitta, V. Tiitta, M. Gaal, J. Heikkinen, R. Lappalainen, and L. Tomppo, "Air-coupled ultrasound detection of natural defects in wood using ferroelectret and piezoelectric sensors," Wood Science and Technology, 54 (4), 1051-1064, 2020, doi: 10.1007/s00226-020-01189-y.
- [8] K. J. Vössing, M. Gaal, and E. Niederleithinger, "Air-coupled ferroelectret ultrasonic transducers for nondestructive testing of wood-based materials," Wood Science and Technology, 52 (6), 1527-1538, 2018, doi: 10.1007/s00226-018-1052-8.
- [9] S. Maack, "Untersuchungen zum Schallfeld niederfrequenter Ultraschallprüfköpfe für die Anwendung im Bauwesen " Dissertation, Technische Universität Berlin, 2012.
- [10] M. Gaal, J. Bartusch, E. Dohse, M. Kreuzbruck, and J. Amos, "Air-coupled ultrasonic testing of metal adhesively bonded joints using cellular polypropylene transducers," in Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation QNDE, 2013, 1581 (33), 471-478, doi: 10.1063/1.4864857.
- [11] M. Gaal et al., "Guideline US 08 Characterization and verification of air-coupled ultrasonic probes," Ed: DGZfP, 2022.
- [12] G. M. Sessler and J. Hillenbrand, "Electromechanical response of cellular electret films," Applied Physics Letters, 75 (21), 3405-3407, 1999, doi: 10.1063/1.125308.
- [13] M. Paajanen, J. Leikkala, and K. Kirjavainen, "ElectroMechanical Film (EMFi) - a new multipurpose electret material," Sensors and Actuators, A: Physical, 84 (1), 95-102, 2000, doi: 10.1016/S0924-4247(99)00269-1.
- [14] S. Bauer, R. Gerhard-Multhaupt, and G. M. Sessler, "Ferroelectrets: Soft Electroactive Foams for Transducers," Physics Today 57 (2), 37-43, 2004, doi: 10.1063/1.1688068.
- [15] M. Gaal and D. Kotschate, "New technologies for air-coupled ultrasonic transducers," in 12th European Conference for Nondestructive Testing, Gothenburg, 2018. Verfügbar: <https://www.ecndt2018.com>.
- [16] M. Gaal, R. Caldeira, J. Bartusch, and M. Kupnik, "Air-Coupled Ultrasonic Ferroelectret Receiver with Additional Bias Voltage," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 66 (10), 1600-1605, 2019.
- [17] M. Daschewski, "Thermophony in real gases. Theory and Applications," Dissertation, Universität Potsdam, 2016. Verfügbar: urn:nbn:de:kobv:517-opus4-98866
- [18] M. Daschewski, M. Kreuzbruck, J. Prager, E. Dohse, M. Gaal, and A. Harrer, "Resonanzfreie Messung und Anregung von Ultraschall," Technisches Messen, 82 (3), 156-166, 2015, doi: 10.1515/teme-2014-0020.
- [19] H. Lamb, "On Waves in an Elastic Plate," Proceedings of the Royal Society of London Series A, 93, 114-128, 1917.
- [20] L. Wang and S. I. Rokhlin, "Stable reformulation of transfer matrix method for wave propagation in layered anisotropic media," Ultrasonics, 39, 413-424, 2001.
- [21] A. Huber, "Numerical modeling of guided waves in anisotropic composites with application to air-coupled ultrasonic inspection," Dissertation, Universität Augsburg, 2020.
- [22] A. Szewieczek, "Simulativ-experimentelle Auslegungsmethodik für Sensornetzwerke einer strukturintegrierten Zustandsüberwachung," Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2016.
- [23] W. Hillger and A. Szewieczek, "Propagation and Interactions with Defects of Guided Waves in a Composite Tail Boom Structure," in International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, 2009.

- [24] J. Krautkrämer and H. Krautkrämer, *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*, 5. Auflage Ed. Springer-Verlag Heidelberg, 1986.
- [25] S. Schmid, F. Dürrmeier, and C. U. Grosse, "Spatial and Temporal Deep Learning in Air-Coupled Ultrasonic Testing for Enabling NDE 4.0," *Journal of Nondestructive Evaluation*, 42 (3), 2023, doi: 10.1007/s10921-023-00993-3.
- [26] Y. Duan et al., "Automatic Air-Coupled Ultrasound Detection of Impact Damages in Fiber-Reinforced Composites Based on One-Dimension Deep Learning Models," *Journal of Nondestructive Evaluation*, 42 (3), 2023, doi: 10.1007/s10921-023-00988-0.
- [27] M. D. Jedrusiak and F. Weichert, "A Deep Learning Approach for Denoising Air-Coupled Ultrasonic Responds Data," *International Journal of Artificial Intelligence & Applications*, 11 (4), 15-28, 2020, doi: 10.5121/ijaia.2020.11402.
- [28] T. Herzog, S. Mohtashamipoor, and M. Reinhold, "Untersuchungen an geschweißten Vliesnähten mittels luftgekoppeltem Ultraschall," in *DGZfP-Jahrestagung*, Osnabrück, 06.-08. Mai 2024.

9 Autoren-/Firmenverzeichnis

Nizamettin Dengiz	Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren, Saarbrücken
Martin Fuchs	SONOTEC GmbH, Halle/Saale
Mate Gaal (Editor)	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Fachbereich 8.4, Berlin
Tobias Gautzsch	Actemium Cegelec Mitte GmbH, Nürnberg
Dr. Thomas Herzog	Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS, Dresden
Mike Kornely	Universität Stuttgart - Institut für Kunststofftechnik, Stuttgart
Linus Littner	Universität Stuttgart - Institut für Kunststofftechnik, Stuttgart
Dr.-Ing. Torben Marhenke	Fagus-GreCon Greten GmbH & Co. KG, Alfeld
M.Sc. Simon Schmid	Technische Universität, München
Dipl.-Ing. (FH) Ryan Sommerhuber	Xarion Laser Acoustics GmbH, Wien (Österreich)
Dr. rer. nat. Ralf Steinhausen	Forschungszentrum Ultraschall gGmbH, Halle
Dr.-Ing. Artur Szewieczek	Hilliger NDT GmbH, Braunschweig
Luis Wachter	SKZ - KFE gGmbH, Würzburg
Dr.-Ing. Thomas Waschkies	Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren, Abt. Komponenten- und Bauteilprüfung, Saarbrücken
Stefan Wunderl	XARION Laser Acoustics GmbH, Wien (Österreich)

10 Bildquellennachweis

Bildnr.	Bildtitel	Autor-/in	DGZfP-VNB-Nr.
1	Typische Anwendungsfälle für luftgekoppelte Ultraschallprüfung, nach [4].	SONOTEC GmbH, Halle	VNB 321 vom 09.01.2025
2	Der beispielhafte Aufbau für eine luftgekoppelte Ultraschallprüfung mit einem x-y-Tisch.	Institut für Kunststofftechnik, Stuttgart	VNB 315 vom 20.12.2024
3	Laser-Ultraschall Inspektion mit luftgekoppelten optischen Mikrofonen in Durchschallung	XARION Laser Acoustics GmbH, Sommerhuber, Ryan, Wien	VNB 322 vom 08.01.2025
4	Der Weg von den Rohdaten zum A-Bild, B-Bild und C-Bild. Gemessen wurde eine additiv hergestellte Kunststoffplatte mit Hohlräumen in Form des Wortes "Minus".	SKZ - KFE gGmbH, Würzburg	VNB 320 vom 07.01.2025
5	Darstellung eines Luftultraschall-Datensatzes mit A- und C-Bildern [25]. Bei einer Materialänderung kommt es zu einer Schwächung des Signals, was im C-Bild farblich dargestellt wird.	Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung (TUM), Simon Schmid	VNB 319 vom 21.12.2024
6	Ein beispielhaftes F-Bild einer CFK-Platte mit der Darstellung der Mittenfrequenz über die Scanfläche.	Hillger NDT GmbH, Braunschweig	VNB 318 vom 20.12.2024
7	Ein beispielhaftes A-Bild und die für die Bestimmung des Signal-Rausch-Abstands notwendigen Charakteristiken.	Linus Littner, Stuttgart	VNB 325 vom 20.01.2025
8	Ein beispielhaftes C-Bild und die für die Bestimmung des Kontrast-Rausch-Verhältnisses notwendigen Charakteristiken.	Linus Littner, Stuttgart	VNB 325 vom 20.01.2025
9	Testplatte aus gegossenem PMMA mit eingefrästen Formen, 400 x 300 mm, Materialstärke 5 mm.	Linus Littner, Stuttgart	VNB 325 vom 20.01.2025
10	Typische Positionierung der Wandler bei der Durchschallung eines Testkörpers.	Institut für Kunststofftechnik, Stuttgart	VNB 315 vom 20.12.2024
11	Positionierung der Wandler bei der Durchschallung eines Testkörpers. Die Halterung mit Goniometern ermöglicht die Ausrichtung der Wandler.	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin	VNB 313 vom 20.12.2024
12	Ergebnis einer Luftultraschallmessung mit 200 kHz Prüfköpfen an der ACUT-Platte	Linus Littner, Stuttgart	VNB 325 vom 20.01.2025
13	Qualitätskontrolle einer 6 m x 3 m x 22 mm Spanplatte mit 60 Kanälen im Durchlauf bei 2 m/s Produktionsgeschwindigkeit und Mittenfrequenz der Wandler 50 kHz. Der rote Kreis zeigt eine Delamination, die durch Verformungen im Pressblech hervorgerufen wurde.	Fagus-GreCon Greten GmbH & Co. KG, Alfeld	VNB 316 vom 20.12.2024
14	Leiterplatte mit Delaminationen (schwarz) nach einem Reflow-Prozess. Messung mit 200 kHz-Prüfköpfen (Apertur 11 mm) in Durchschallung, Scanraster 1 x 1 mm ²	Forschungszentrum Ultraschall, Halle	VNB 323 vom 14.01.2025
15	Prüfung der Zellfügung von Hochtemperaturbrennstoffzellen. Scanbereich 150 x 170 mm mit fokussierten Luftultraschallprüfköpfen. Die Prüffrequenz war 550 kHz, Fokusabstand 50 mm, Schwingerdurchmesser 23 mm. Die Luftultraschallprüfköpfe und -geräte (LUPUS) sind Eigenbau des Fraunhofer IZFP. Der Randbereich des Brennstoffzelle wurde abgeschirmt, um die Sättigung des Signals zu vermeiden.	Fraunhofer IZFP, Saarbrücken	VNB 317 vom 20.12.2024
16	(a) ACUT-Prüfplatte beschrieben im Kapitel 6, geprüft mit Laser-Anregung und optischem Mikrofon in Transmission. (b) Sackloch-Referenzplatte geprüft mit Laser-Anregung und optischem Mikrofon in einseitigem Prüfsetup.	XARION Laser Acoustics GmbH, Sommerhuber, Ryan, Wien	VNB 322 vom 08.01.2025
17	Luftgekoppelte Prüfung einer 2 bis 4 mm dicken CFK-Platte mit Stringern. (a) In die Platte wurden drei Schlagschäden eingebracht. (b) C-Scan als Ergebnis einer Prüfung mit Ferroelektret-Prüfköpfen mit Mittenfrequenz 250 kHz, Apertur 19 mm und sphärischer Fokussierung [6].	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin	VNB 314 vom 20.12.2024
18	Luftgekoppelte Prüfung einer 3 mm dicken CFK-Platte mit einem Impakt Schaden. Die Platte wurde mit dem CF 400 US-Geber und dem optischen Mikrofon Eta450 Ultra der Fa. XARION vermessen.	XARION Laser Acoustics GmbH, Sommerhuber, Ryan, Wien	VNB 322 vom 08.01.2025
19	(a) Ausschnitt einer Ultraschallschweißnaht bei 4-lagigem Vliesstoff für FFP2-Masken, (b) C-Scan in der Vliesnaht bei Durchschallung mit ACUT-Prüfköpfen (f=200 kHz) [28].	Fraunhofer IKTS; Thomas Herzog; Dresden	VNB 324 vom 15.01.2025