

Technische Universität Dresden

**Bestimmung und Verbesserung der
Fehlerauffindwahrscheinlichkeit bei der Ultraschallprüfung von
Triebwerksbauteilen**

Johanna Farnhammer (geb. Menges)

der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität
Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktoringenieurs

(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Czarske

Gutachter: Prof. Dr.-Ing.habil. Norbert Meyendorf

Prof. Dr.-Ing. Christoph Leyens

Tag der Einreichung: 04.05.2015

Prof. Dr.-Ing.habil Gerhard Mook

Tag der Verteidigung: 29.06.2016

Abstract

Aircraft engines are subjected to high requirements on security. If they fail, a lot of human lives are threatened. The materials in aircraft engines have to persist high stresses at high temperatures, which is a challenge to material science. With defects in material fatigue will occur very fast, which usually leads to breaking of the rotating engine part. Therefore all engine parts have to be inspected nondestructively during all processing steps to detect material defects like pores, cracks, inclusions, segregations, etc. Nondestructive inspection methods which are used are for example Ultrasonic Testing, Fluorescence Penetrant Testing, X-Ray Testing and other. The safety of an aircraft engine depends highly on the reliability of the inspection method. But as the inspection methods use technical processes to make defects, which are invisible to the human eye, observable, is it hard to define the reliability. The inspections methods usually only give information about the smallest defect, which could be detected. No information exists on the biggest defect which was missed. Although this one is the most important for the reliability of the system. So there is a need for a defined process to determine the reliability of an inspection system. This need is met by the POD process. POD is the probability of detection and the process to determine it is described in this work. A huge amount of artificially built defects is needed for it, they are produced in so called reference blocks. The defects have to represent flaws that occur in real parts. The reference blocks are inspected by different inspectors, at different locations, at different times. Hence a big data-set of inspection results is obtained, which will be evaluated statistically to result in a POD.

This thesis describes developments to improve the POD for ultrasonic testing of aircraft engine parts. Two aspects are considered. First an improvement of the process to determine a POD. Second an improvement of the result of the POD, which is a nominal value of the smallest defect, which can be detected reliably (90% probability with a 95% certainty). By the necessity to built a huge amount of reference blocks with artificial defects the cost of a POD are enormous. Technically a new POD-study should be done for each new inspection configuration (different sensors, different equipment, etc.). But due to the high costs, usually everybody takes existing POD-curves for other configurations, instead of executing a new POD-study. In this work two methods are described, which can reduce the costs for the POD. The first method is the result of a big European project, which investigated the use of simulation tools for the determination of POD. One experiment is shown for which inspections and simulations were done. The results of the POD are similar but cannot be compared completely, because the used simulation tools are not able to represent all inspection uncertainties exactly. Further work is already done here and promises good results. The second method to improve the process is to use glass with laser engravings as a reflector for ultrasound waves. Basic research on the applicability of this reference blocks is done in this work. It is shown, that the laser engravings can be used as reflectors, with the limitation that the received signal is weaker than in a metal reference block. It is demonstrated that the limitation is no problem, because in glass the sound moves with almost no scattering, so the gain can be increased easily. Furthermore the developed gain difference is constant over different sizes for one reflector geometry.

The second aspect of this work is the improvement of the POD result, hence enhancement of the inspection technique to detect smaller defects. It is shown that the phased array ultrasound technique brings an improvement of the POD compared to conventional ultrasound inspection. A comparison between the two techniques is executed which shows advantages of the phased array technique regarding the handling of surface damages and tilted flaw direction. A new application of

the phased array technique to modulate the sound field is introduced. There a matrix array is used to built non-diverging, self-healing sound fields. With this technique a more flexible inspection is possible at which it can be switched between two modes, “fast / large material depth” and “sensitive / small section”. By using the “fast / large material depth” mode an economical inspection is possible, which has as well a low POD defect size due to the possibility to switch to the “sensitive / small section” mode when an indication can be seen in the ultrasonic results.

This work makes a contribution to maintain the high standard in reliability of aircraft engines, even with increasing air traffic.

Vorwort und Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit bei der MTU Aero Engines AG im Rahmen von mehreren Entwicklungsprojekten, u.a. der Joint Technology Collaboration Initiative mit Pratt & Whitney zur Untersuchung der Einsetzbarkeit von der Phased Array Technik bei Triebwerkbauteilen und dem EU-Projekt Picasso, in dem untersucht wurde, ob Simulationsprogramme zur POD-Bestimmung eingesetzt werden können. Ich bedanke mich für die Möglichkeit die Ergebnisse zum Schreiben dieser Dissertation verwenden zu können, vor allem bei Herrn Dr. H.-U. Baron, in dessen Team es mir ermöglicht wurde an diesen Entwicklungen zu arbeiten.

Ein besonderes Dankeschön geht an Herrn Dr. J. Bamberg, ohne den diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Er hat sein großes Fachwissen bereitwillig mit mir geteilt und immer ein offenes Ohr gehabt. Seine Fähigkeit alles in einen größeren Zusammenhang einzubetten hat mir sehr beim Aufbau dieser Arbeit geholfen.

Mein Dank gilt auch im großen Maße Herrn Prof. N. Meyendorf, der diese Arbeit wissenschaftlich betreut hat und mir mit Rat und Tat zur Seite stand. Seine Anregungen waren eine große Hilfe.

Herrn Prof. Mook und Herrn Prof. Leyens möchte ich dafür danken, dass sie ein Gutachten für meine Arbeit geschrieben haben. Ihre Anmerkungen zur Verbesserung der Arbeit waren sehr hilfreich.

Dr. habil. B. Köhler danke ich dafür, dass er mir viele wertvolle Anmerkungen zum Abschluss meiner Arbeit gegeben hat. Auch möchte ich hier die durch ihn, M. Barth und Dr. F. Schubert ermöglichte gute Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IKTS-MD hervorheben.

Bei den Entwicklungsarbeiten haben mich einige Praktikanten und Diplomanten unterstützt. Ihnen möchte ich auch sehr herzlich danken für die tolle Zusammenarbeit und ihre Unterstützung. Namentlich erwähnen möchte ich Alexander Holz, Christine Schlaipfer, Maximilian Schweter und Isabel Schlegl.

Das größte Dankeschön geht an meine Familie und meinen Lebensgefährten Manuel, ohne ihre Unterstützung hätte ich nicht die Möglichkeit gehabt an dieser Arbeit zu schreiben. Sie haben mir bereitwillig Zeit zum Schreiben dieser Arbeit verschafft.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	ix
Verzeichnis der Abkürzungen und Begriffe.....	xiii
Liste der verwendeten Begriffe:.....	xiv
1 Einleitung.....	1
1.1 Ziel der Arbeit.....	2
1.2 Hintergrund.....	3
1.3 Komponenten eines Flugzeugtriebwerks.....	4
1.4 Relevante Bauteile.....	5
1.5 Werkstoffe im Triebwerksbau und ihre grundlegende Verarbeitung.....	6
1.5.1 Nickelsuperlegierungen.....	6
1.5.2 Typische Materialfehler bei Nickelsuperlegierungen.....	7
1.5.3 Titanlegierungen.....	9
1.5.4 Materialfehler in Titanlegierungen.....	12
1.6 Zerstörungsfreie Prüftechniken im Triebwerksbau.....	13
2 Grundlagen der Ultraschallprüfung.....	17
2.1 Schallfeldtheorie.....	17
2.2 Ultraschall Prüfverfahren.....	20
2.3 Phased Array Ultraschall.....	24
3 Konzepte der Ultraschallprüfung im Triebwerksbau.....	31
3.1 Kalibrierung.....	31
3.2 Multizone Technik.....	31
3.2.1 Prüfung von Billets mit Multizone.....	32
3.2.2 Prüfung von Schmiedescheiben mit Multizone.....	33
3.3 Phased Array Prüfung.....	35
3.3.1 Phased Array Prüfung von Billets.....	35
3.3.2 Phased Array Prüfung von Schmiedescheiben.....	37
4 Ultraschall Simulation.....	39
4.1 Stand der Technik.....	39
4.2 CIVA.....	40
4.3 Hybrides EFIT.....	42
5 Grundlagen der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit (POD).....	44
5.1 Begriffe.....	44
5.2 Methoden zur Bestimmung der POD.....	45
5.2.1 Hit/Miss Methode.....	45

5.2.2 â über a Methode.....	47
5.2.3 Effektive Reflektivität.....	48
5.2.4 Abgrenzung â über a oder effektive Reflektivität.....	51
5.3 POD für die Lebensdauerberechnung.....	52
5.4 Referenzkörper.....	53
6 Simulationsbasierte POD.....	54
6.1 Vorgehen.....	54
6.2 Anpassungen in den Simulations-Programmen.....	55
6.3 Validierungsfall Multizonenprüfung von Titan-Billets.....	56
6.4 Derzeitiger Stand.....	61
7 Eine neue Variante der Herstellung von synthetischen Fehlstellen für die POD Ermittlung.....	62
7.1 Aufbau und Eigenschaften der Glasquader und Lasergravuren.....	62
7.2 Ermittlung der besten Laserparameter.....	65
7.3 Vergleich zwischen kreisscheibenförmigen Lasergravuren und Flachbodenbohrungen.....	67
7.4 Vergleich von Lasergravuren mit Einschlüssen in Titan.....	69
7.4.1 Vergleich von Lasergravuren mit realen Materialfehlern in einfachen, quaderförmigen Referenzkörpern.....	69
7.4.2 Vergleich von Lasergravuren mit realen Materialfehlern in Billetgeometrie.....	70
7.5 Ergebnis.....	72
8 Verbesserung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit.....	75
8.1 Vergleich Multizone und Phased Array.....	75
8.1.1 Versuchsaufbau.....	75
8.1.2 Schallfelddurchmesser.....	76
8.1.3 Oberflächennahe Auflösung.....	77
8.1.4 Empfindlichkeit.....	77
8.1.5 Signal-Rausch-Abstand.....	78
8.1.6 Oberflächendeformationen.....	79
8.1.7 Ergebnis.....	84
8.2 Phased Array Technik für Prüfung von Schmiedescheiben.....	85
8.2.1 Prüfkopf-Design.....	85
8.2.2 Versuche.....	88
8.2.3 Verbesserung der POD durch Winkelschwenk.....	89
8.2.4 Ergebnis.....	90
8.3 Einsatz der Phased Array Technik zur Schallfeldmodulation.....	91
8.3.1 Nicht divergierendes Schallfeld.....	91
8.3.2 Erzeugung des nicht divergierenden Schallfeldes mit einem Matrixarray.....	92

8.3.3 Bestimmung der Steigung der Verzögerungszeiten.....	93
8.3.4 Vergleich zwischen konischer und pyramidenförmiger Verzögerungszeiten-verteilung...	96
8.3.5 Auswirkungen der Aperturgröße.....	97
8.3.6 Auswirkung der Vergrößerung der Wasservorlaufstrecke.....	98
8.3.7 Auswirkung von Frequenzänderung.....	101
8.3.8 Simulation des Fehlerechos.....	101
8.3.9 Ansteuerung des Phased Array Prüfkopfes.....	102
8.3.10 Experimente.....	103
8.3.11 Ergebnis.....	105
9 Zusammenfassung und Ausblick.....	107
Literaturverzeichnis.....	xv
Anhang – Ansteuerung des Matrixarrays für die Erzeugung eines Besselstrahls.....	xxii

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Erste Stufe des Verdichters, der beim Unfall von Sioux City aufgrund eines Hardalpha Einschlusses zerbarst, Bild aus [Ntsp90].....	1
Abbildung 2: Komponenten eines Zweistromtriebwerks, Bild zur Verfügung gestellt von der MTU Aero Engines AG...4	4
Abbildung 3: Fertigungsprozess und Ultraschallprüfungen.....	5
Abbildung 4: Herstellung einer Blisk durch Ausfräsen der Schaufeln, Bild zur Verfügung gestellt von der MTU Aero Engines AG.....	6
Abbildung 5: Aufnahmen von White Spots in IN 718.....	8
Abbildung 6: (a) Struktur des α - und β -Titans, (b) Zustandsdiagramme für Titan, alpha-stabilisiertes Titan und beta-stabilisiertes Titan (Bilder entnommen aus [Pete02]).....	9
Abbildung 7: (a) Lamellares Gefüge in Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo, (b) Fertigungsroute für Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo, Bilder aus [Lütj07].....	11
Abbildung 8: Schliffbild eines Hardalpha Einschlusses, Bilder aus [Bras05].....	12
Abbildung 9: Übersicht über die im Triebwerksbau eingesetzten zerstörungsfreien Prüfverfahren (schematisch dargestellt an einem beliebigen Triebwerksbauteil).....	14
Abbildung 10: Schematische Darstellung des Schallfeldes von einem kreisrunden Schwinger und dem gleichen Schwinger mit einer Linse zur Fokussierung.....	18
Abbildung 11: Schematische Darstellung der Entstehung der Interferenzen im Nahfeldbereich, Zeichnung angelehnt an Darstellungen in [Lerc09].....	19
Abbildung 12: Aufbau eines fokussierten Prüfkopfs, Darstellung des Schnittes durch den zylinderförmigen Prüfkopf, Foto des Prüfkopfs zur Verfügung gestellt von Karl Deutsch GmbH.....	20
Abbildung 13: Tauchttechnikanlage, Bauteil wird auf Drehteller platziert, Prüfkopf kann in fünf Achsen bewegt werden. Bild zur Verfügung gestellt von Vogt Ultrasonic GmbH.....	21
Abbildung 14: Darstellung des reflektierten Ultraschall im A-Bild.....	22
Abbildung 15: Entstehung des C-Bildes.....	23
Abbildung 16: Ansteuerung der Arrays mit Zeitverzögerungen. Die resultierenden Schallfelder laufen unter einem Winkel ins Bauteil oder sind fokussiert.....	25
Abbildung 17: Darstellung von den unterschiedlichen Anwendungsmöglichkeiten der Phased Array Prüftechnik.....	26
Abbildung 18: Dynamic Depth Focussing, Zeichnung angelehnt an Darstellung in [Olym04].....	27
Abbildung 19: Schematische Darstellung der Phased Array Prüfkopf-Geometrien.....	28
Abbildung 20: (a) Beispiel für eine Einteilung in Zonen, (b) Schematische Darstellung der Schallfelder von drei unterschiedlich fokussierten Prüfköpfen.....	32
Abbildung 21: Schematische Darstellung des Prüfungsaufbaus für die Multizonenprüfung von Billets.....	33
Abbildung 22: (a) Ein Beispiel für Fließlinien an einer aus einem Billet geschmiedeten Scheibe, (b) Angepasste Prüfbahnen an die Fließlinien im Material.....	34
Abbildung 23: Phased Array Prüfkopf.....	36
Abbildung 24: (a) Kalibrierfläche für die Verzögerungszeiten, (b) Programm zum Elemente ausrichten.....	37
Abbildung 25: (a) Typische POD-Kurve mit a90/95, (b) ROC-Kurve mit Beispielen, (Zeichnungen angelehnt an Darstellungen in [Burk02]).....	45

Abbildung 26: (a) über a Diagramm, (b) Dichtefunktion, (Zeichnungen angelehnt an Darstellungen in [Müll06]).....	48
Abbildung 27: EFBH über Bauteiltiefe Diagramm mit eingezeichneten Re-Kurven und daraus resultierende POD-Kurve (Zeichnungen angelehnt an Darstellungen in [Stur86]).....	50
Abbildung 28: Einschlüsse in dem Billetabschnitt.....	56
Abbildung 29: Darstellung der Variation der Dämpfung über den gesamten Billetumfang, (a) Maximal zurückreflektiertes Signal des Rückwandechos, (b) C-Bild des Rückwandechos.....	57
Abbildung 30: Gefügerauschen im Billet.....	58
Abbildung 31: (a) Ergebnisse der EFIT Simulation, (b) Vergleich der EFIT Simulation mit den experimentellen Ergebnissen für Wolframcarbideinschlüsse, Bilder aus [Schub12].....	58
Abbildung 32: über a Daten aus CIVA Simulation.....	59
Abbildung 33: über a Daten aus Experimenten, Diagramm erstellt in der Software mh1823.....	60
Abbildung 34: (a) POD für Simulation mit CIVA, (b) POD für Experimente, Diagramme erstellt in der Software mh1823.....	60
Abbildung 35: Schematische Darstellung des Herstellprozesses einer Lasergravur in einem Glasquader.....	63
Abbildung 36: Detaillierte Darstellung der Laserrisse in Glas (a) Mikroskopische Aufnahmen, (b) Schematische Darstellung eines Risses (Zeichnungen sind angelehnt an Darstellungen in [Szel09]), (c) Schematische Darstellung des Riss-Clusters.....	64
Abbildung 37: Aufbau eines Referenzkörpers aus Glas mit kreisscheibenförmigen Reflektoren, (a) gesamter Referenzkörper, (b) Großaufnahme der gelaserten Kreisscheiben.....	65
Abbildung 38: Reflektivität der unterschiedlichen Laserparameter für eine Kreisscheibe mit einem Durchmesser von 0,8mm.....	66
Abbildung 39: Reflektivität für unterschiedliche Laserparameter - Untersuchungsreihe 2. Die Beschreibung der Testkörper ist in Tabelle 5 zu finden.....	67
Abbildung 40: Glastestkörper mit Flachbodenbohrungen präpariert.....	67
Abbildung 41: Ergebnis des Vergleichs von Flachbodenbohrungen und gelaserten Kreisscheibenreflektoren, gilt nur für die Prüffrequenz 20MHz.....	68
Abbildung 42: Vergleich der Reflektivität zwischen gefüllten und hohlen Lasergravuren.....	69
Abbildung 43: Vergleich der Reflektivität von Lasergravur, Wolframcarbide- und Quarzeinschlüssen.....	70
Abbildung 44: Zylinderförmiger Glastestkörper mit Lasergravuren in Zylinder- und Kugelform.....	71
Abbildung 45: (a) Vergleich zwischen gelaserten Kugeln in Glas und kugelförmigen Einschlüssen in Metall, (b) Vergleich zwischen gelaserten Zylindern in Glas und zylinderförmigen Einschlüssen in Metall.....	71
Abbildung 46: Übersicht der Ergebnisse bei der Untersuchung der Einsetzbarkeit von Glasreferenzkörpern.....	72
Abbildung 47: Versuchsaufbau für die Phased Array Prüfung von Billets.....	75
Abbildung 48: Empfindlichkeit von Phased Array und Multizonentechnik.....	78
Abbildung 49: Signal-Rausch-Abstand für die Phased Array und die Multizonentechnik.....	79
Abbildung 50: Simulation des Effektes von Oberflächendeformationen. (a) Vergleich der Schallfelder, (b) Vergleich der Schalldrücke.....	80
Abbildung 51: (a) Winkelschwenk mit Phased Array, (b) Mögliche Oberflächenanomalitäten.....	81
Abbildung 52: Ergebnis der Versuche zur Unrundheit.....	82
Abbildung 53: C-Bild des Testkörpers mit Abflachungen.....	83

Abbildung 54: Auswirkung von Dellen in der Oberfläche eines Billets.....	84
Abbildung 55: Messwerte aus der Pulsvolumen- und Rauschlevel-Untersuchung, extrapolierter Graph und Werte für SNR = 2.....	87
Abbildung 56: C-Bild der Prüfung von quaderförmigen Testkörpern mit dem Matrixarray. Die detektierten Anzeigen sind von Flachbodenbohrungen mit einem Durchmesser von 1,2mm (unten) und 0,8mm (oben). Sie liegen in Schalltiefen von 10mm - 30mm.....	89
Abbildung 57: Abfall der Amplitude wenn der Reflektor nicht senkrecht getroffen wird.....	90
Abbildung 58: Verzögerungszeiten für Besselstrahl und zum Vergleich Verzögerungszeiten für einen fokussierten Schallstrahl mit Fokuspunkt in 70mm Bauteiltiefe.....	93
Abbildung 59: (a) Graphische Darstellung der einzelnen Steigungen der Verzögerungszeiten, (b) Schallfelder des Matrixarrays mit unterschiedlichen Ansteuerungen.....	94
Abbildung 60: (a) Schalldruckabfall in dB für drei verschiedene Besselstrahlen, einen Schallstrahl der auf 70mm Bauteiltiefe fokussiert ist und den Schallstrahl des Matrixarrays ohne Verzögerungszeiten, (b) Schallbündelbreite für die oben genannten Schallfelder, (c) Neben-Hauptkeulen-Verhältnis für die oben genannten Schallfelder.....	95
Abbildung 61: (a) Elemente und Verzögerungszeiten des Matrixarray für konische Geometrie, (b) Vergleich des Schallfeldes mit Ansteuerung über pyramidenförmiger und konischer Geometrie, (c) Schalldruckverlauf.....	97
Abbildung 62: Schallfelder für einen Besselstrahl mit einer Steigung der Verzögerungszeiten von 0,008µs/mm für verschiedene Aperturgrößen.....	98
Abbildung 63: (a) Schalldruckabfall in dB für vier verschiedene Aperturgrößen, (b) Schallbündelbreite für die oben genannten Schallfelder, (c) Neben-Hauptkeulen-Verhältnis für die oben genannten Schallfelder.....	99
Abbildung 64: Schallfelder für unterschiedliche Wasservorlaufstrecken (Abstand Prüfkopf zu Bauteil).....	99
Abbildung 65: (a) Schalldruckabfall für unterschiedliche Wasservorlaufstrecken, (b) Schallbündelbreite für unterschiedliche Wasservorlaufstrecken, (c) Nebenkeulen-Hauptkeulen-Verhältnis für unterschiedliche Wasservorlaufstrecken.....	100
Abbildung 66: A-Bild und B-Bild für die Fehlerechos dreier Flachbodenbohrungen für (a) einen Besselstrahl und (b) einen fokussierten Schallstrahl.....	102
Abbildung 67: Gemessenes Schallfeld für Besselstrahl und fokussierten Schallstrahl (a) in Wasser und (b) in einem Testkörper aus Nickel.....	104
Abbildung 68: Ergebnis des Experiments: Flachbodenbohrungen in verschiedenen Tiefen werden angeschallt und die Amplitudenhöhe wird dokumentiert.....	105
Abbildung 69: Inhalte dieser Arbeit.....	107

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beschreibung der Multizone Prüfköpfe.....	57
Tabelle 2: Lasereigenschaften für die Herstellung der Referenzkörper.....	62
Tabelle 3: Eigenschaften des verwendeten Quarzglases.....	63
Tabelle 4: Variation der Parameter für die Herstellung der kreisscheibenförmigen Lasergravuren.....	65
Tabelle 5: Verschiedene Laserparameter - Untersuchungsreihe 2.....	66
Tabelle 6: Vergleich der Schallbündelgröße.....	76
Tabelle 7: Vergleich der oberflächennahen Auflösung.....	77
Tabelle 8: Amplitudenabfall bei unterschiedlichen Abflachungstiefen.....	83
Tabelle 9: Schallbündelbreite, Pulsvolumen und Signal-Rausch-Abstand für die drei verwendeten Prüfköpfe.....	86
Tabelle 10: Nahfeldlänge für einen quaderförmigen und einen runden Schwinger und die sich daraus ergebende minimale Größe des Schwingers.....	88
Tabelle 11: Eigenschaften der beschriebenen Arrays.....	88
Tabelle 12: Material-Eigenschaften für die Simulation.....	93

Verzeichnis der Abkürzungen und Begriffe

Liste der Abkürzungen:

Abkürzung	Bezeichnung	Beschreibung
a	Größe des Fehlers	
â	Höhe der Signalamplitude	
BEM	Finite Boundary Element Method / Randelementmethode	Numerisches Verfahren zur Lösung von Randwertproblemen bei partiellen Differentialgleichungen.
BSH	Bildschirmhöhe	Angezeigte Höhe der reflektierten Amplitude auf dem Ultraschallgerät, wird normalerweise in % angegeben.
c	Schallgeschwindigkeit	
CHM	Cold Hearth Melting	Schmelzprozess für Metalle
DAC	Distance Amplitude Correction	Da die Amplitude eines Reflektors in größerer Bauteiltiefe abnimmt, kann sie durch die DAC Funktion in unterschiedlichen Tiefen angepasst verstärkt werden. Dies ist eine Funktion mancher Ultraschallgeräte.
FAA	Federal Aviation Association	Bundesluftfahrtbehörde der USA
FEM	Finite Elemente Methode	Numerisches Verfahren zur Lösung von partiellen Differentialgleichungen
FBH	Flat Bottom Hole	Amerikanische Bezeichnung für Flachbodenbohrungen. Eine Flachbodenbohrung hat ein abgefrästes Bohrungsende und wird als Standard-Reflektor bei der Ultraschallprüfung verwendet
HID	High Interstitial Defects	Zwischengitterdefekte, auch genannt: Hard alpha, Type I Defects
HDI	High Density Inclusion	Einschlüsse hoher Dichte
P	Pitch	Abstand von Anfang eines Elements zum Anfang des nächsten Elements
PFA	Probability of False Alarm / Wahrscheinlichkeit von Falschem Alarm	Durch Experimente aufgestellte Wahrscheinlichkeitskurve, die angibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Prüfsystem einen falschen Alarm ausgibt.
P(FP)	Probability False Positive, Wahrscheinlichkeit einer falschen Anzeige	Die Wahrscheinlichkeit, dass das Prüfsystem eine Anzeige ausgibt, obwohl kein Materialdefekt vorhanden ist.
POD	Probability of Detection /	Durch Experimente aufgestellte

	Fehlerauffindwahrscheinlichkeit	Wahrscheinlichkeitskurve, die angibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine Fehlstelle detektiert werden kann.
P(TP)	Probability True Positive, Wahrscheinlichkeit einer korrekten Anzeige	Die Wahrscheinlichkeit, dass das Prüfsystem eine Anzeige an der Stelle eines Materialdefekts ausgibt.
ROC	Receiver Operating Characteristic	Kurve, die angibt, wie zuverlässig ein Prüfsystem arbeitet.
SNR	Signal-Rausch-Abstand	Verhältnis von Signalhöhe zu Rauschen, gibt an, ob das Signal gut vom Rauschen getrennt werden kann.
VAR	Vacuum Arc Melting	Schmelzprozess für Metalle
VIM	Vacuum Induction Melting	Schmelzprozess für Metalle
WVS	Wasservorlaufstrecke	Abstand von Prüfkopf zur Bauteiloberfläche.
λ	Wellenlänge	

Liste der verwendeten Begriffe:

Begriff	Bedeutung und Erklärung
A-Bild	Eine Darstellungsmöglichkeit von Ergebnissen der Ultraschallprüfung. Die Amplitude des reflektierten Signals wird in einem Diagramm gegen die Laufzeit des Signals dargestellt.
Bauteiltiefe	Abstand von der Bauteiloberfläche. Es wird immer die Bauteiloberfläche betrachtet, die geprüft wird.
B-Bild	Eine graphische Möglichkeit zur Darstellung der Ergebnisse von der Ultraschallprüfung in Falschfarben. Aus dem Bild können Informationen über Amplitudenhöhe, Laufzeit des Signals und Lage des Reflektors in einer Richtung gelesen werden.
Blisk	Abkürzung für „Bladed Disk“. Es handelt sich dabei um eine Verdichter- oder Turbinenscheibe des Triebwerks, bei der die Schaufeln nicht durch eine lösbare Verbindung angebracht sind, sondern formschlüssig verbunden sind.
C-Bild	Eine graphische Möglichkeit zur Darstellung der Ergebnisse von der Ultraschallprüfung in Falschfarben. Aus dem Bild können Informationen Amplitudenhöhe des Signals und Lage des Reflektors in zwei Richtung gelesen werden.
Fan	Erster Teil des Verdichters eines Flugzeugtriebwerks. Dies sind die Rotoren, die beim Betrachten des Triebwerks von außen zu sehen sind.
Fehlerauffindwahrscheinlichkeit	Durch Experimente aufgestellte Wahrscheinlichkeitskurve, die

	angibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine Fehlstelle detektiert werden kann.
Impuls-Echo Methode	Eine Methode der Ultraschallprüfung bei der ein Signal ausgesendet wird und seine Reflexion ausgewertet wird. Die Laufzeit des Signals (Zeit vom Aussenden bis zum Messen der Reflexion) und die Amplitudenhöhe des reflektierten Signals werden ausgewertet.
Multizone Prüfung	Prüftechnik des Ultraschalls. Dabei werden fokussierte Prüfköpfe verwendet. Im Fokusbereich des Schallfeldes ist eine sehr empfindliche Prüfung möglich. Die zu prüfende Bauteiltiefe wird in Zonen unterteilt und ein fokussierter Prüfkopf ausgewählt, der in der Zone seinen Fokusbereich hat. Damit ist eine empfindlichere Prüfung als mit konventionellem Ultraschall über große Bauteiltiefen möglich.
Phased Array	Prüftechnik des Ultraschalls. Der Sender ist in mehrere Elemente unterteilt, die zeitlich verzögert angesteuert werden können. Die Wellen der einzelnen Elemente überlagern sich zu einem Wellenfeld, das durch die zeitliche Verzögerung verändert werden kann.
Pulsvolumen	Das Pulsvolumen berechnet sich aus dem Durchmesser des Schallfeldes und der Länge des Impulses.
Schadenstoleranz / Damage Tolerance	Konstruktionsphilosophie in der Flugzeug Branche, bei der davon ausgegangen wird, dass jedes Bauteil fehlerbehaftet ist. Durch zerstörungsfreie Prüfverfahren wird bei der Produktion sichergestellt, dass diese Materialdefekte eine bestimmte Größe nicht überschreiten.
Zerstörungsfreie Prüfverfahren	Prüfverfahren, die einen Werkstoff nach Defekten untersuchen, ohne ihn dabei zu zerstören.

1 Einleitung

Alle Bauteile eines Flugzeugs, insbesondere die Triebwerke, unterliegen hohen Anforderungen an die Sicherheit, da ihr Ausfall zu schwerwiegenden Unfällen führen kann, die eine große Anzahl an Menschenleben gefährden. Im Triebwerk sind Materialien verbaut, die hohe Temperaturen und großen Belastungen durch die hohe Drehzahl der Bauteile aushalten müssen. Bei Defekten im Material kann es schnell zu Ermüdung und damit einhergehendem Zerbersten des Bauteils kommen. Die Sicherheit der Triebwerksbauteile wird durch Kontrolle der Fertigungsprozesse und zerstörungsfreien Prüftechniken, wie zum Beispiel der Ultraschallprüfung, gewährleistet.

Dabei gibt es keine statistisch abgesicherte Aussage über die Fähigkeit der zerstörungsfreien Prüftechniken zur Detektion von Fehlstellen. Falls die Prüfverfahren nicht empfindlich genug sind, kann auch das schwerwiegende Folgen nach sich ziehen, wie bei dem Ausfall eines Triebwerks in Sioux City 1989.

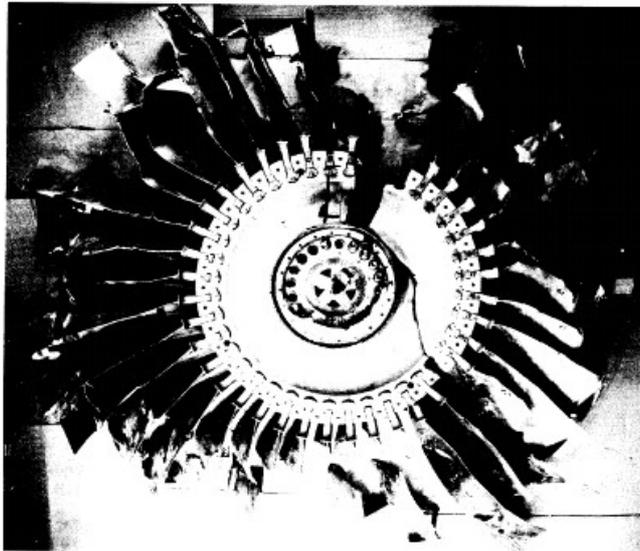


Abbildung 1: Erste Stufe des Verdichters, der beim Unfall von Sioux City aufgrund eines Hardalpha-Einschlusses zerbarst, Bild aus [Ntsp90]

Der Unfall ereignete sich auf dem Flug von Denver nach Philadelphia mit einem Flugzeug des Typs McDonnell Douglas DC-10. Während des Fluges zerbarst der erste Teil des Verdichters, der auch Fan genannt wird, des am Heck befestigten Triebwerks. Die zerbrochenen Teile durchschlugen drei Hydrauliksysteme, die zum Steuern des Flugzeugs verwendet werden, wodurch die komplette Steuerung des Flugzeuges ausfiel. Der Besatzung gelang es die Maschine durch die Triebwerke zu steuern, aber bei der Notlandung zerschellte sie. Glücklicherweise konnten mehr als die Hälfte der

Passagiere das Flugzeug lebend verlassen [Ntsp90].

Es stellte sich heraus, dass ein Materialdefekt im Titan, der schon beim Schmelzen des Materials auftrat, dafür sorgte, dass das rotierende Bauteil riss [Ntsp90]. Dieser Defekt hätte bei der Ultraschallprüfung am Rohmaterial oder am geschmiedeten Material detektiert werden müssen. Jedoch war die Prüftechnik damals nicht empfindlich genug, um diesen Fehler, der trotz seiner Größe mit Schall kaum zu sehen ist, zu detektieren. Die Prüftechnik wurde aufgrund des damaligen Unfalls soweit verbessert, dass mit der heutigen Technik diese Art von Defekten oberhalb einer kritischen Größe detektiert werden können. Durch eine geeignete statistische Zuverlässigkeits-Untersuchung des Prüfsystems hätte auffallen können, dass das System nicht in der Lage ist diese Art von Fehlern zu detektieren.

1.1 Ziel der Arbeit

Diese Arbeit befasst sich mit der Fähigkeit des Ultraschallprüfverfahrens, Materialdefekte zu detektieren. Wenn über die Zerstörungsfreie Prüftechnik gesprochen wird, sind immer zwei Diskussionspunkte von höchster Bedeutung: (1) Welcher kleinste Fehler kann mit der Prüfmethode gefunden werden und (2) wie zuverlässig ist die Fehlerdetektion des Systems. Beide Punkte können von der Fehlernachweiswahrscheinlichkeit oder POD (Probability of Detection), welche die Zuverlässigkeit eines Systems zur Fehlerdetektion beschreibt, abgedeckt werden.

Ziel der Arbeit ist zum Einen die Verbesserung des Verfahrens zur Bestimmung einer POD und zum Anderen die Verbesserung des Ergebnisses der POD.

Zunächst werden die Grundlagen, die in der Literatur zu finden sind, beschrieben. In diesem Kapitel eine kurze Einführung in den Triebwerkbau, die Werkstoffe und die für diese Arbeit relevanten Bauteile. Außerdem wird kurz auf zerstörungsfreie Prüfverfahren eingegangen. In Kapitel 2 werden die Grundlagen der Ultraschallprüfung beschrieben, gefolgt von den speziellen Konzepten der Ultraschallprüfung im Triebwerkbau (Kapitel 3). Die Grundlagen für die Simulation des Ultraschallprüfverfahrens sind in Kapitel 4 beschrieben.

In Kapitel 5 sind die Grundlagen der POD, also der Fehlernachweiswahrscheinlichkeit, beschrieben und wie sie speziell für die Ultraschallprüfung bestimmt werden kann. Mit der simulationsbasierten POD-Bestimmung gibt es eine Möglichkeit die POD schneller und kostengünstiger zu erstellen. Sie ist in Kapitel 6 beschrieben.

In den darauffolgenden Kapiteln werden die von der Autorin bearbeiteten Themen beschrieben.

Die Erstellung einer POD durch Experimente birgt ein großes Risiko in der Herstellung der dafür benötigten Referenzkörper und kann aufgrund von Fertigungsbedingungen nur für sehr vereinfachte Fehlergeometrien erstellt werden. In Kapitel 7 wird ein Verfahren vorgestellt, mit dem die Herstellung von fehlerbehafteten Bauteilen, die für die POD Analyse notwendig ist, erleichtert werden kann. Dazu wurde untersucht, ob Lasergravuren in Glas mit realen Materialdefekten verglichen werden können.

Das Ergebnis einer POD Bestimmung ist eine Fehlergröße, die mit diesem Prüfsystem sicher detektiert werden kann. Diese Fehlergröße wird als Grundlage dafür verwendet,

strukturmechanische Berechnungen aufzustellen, das heißt Bauteildicken und Zyklenzahlen für ein Bauteil des Triebwerks festzulegen. Je kleiner die in der POD bestimmte Fehlergröße ist, desto dünner kann ein Bauteil werden oder desto länger kann die Laufzeit pro Zyklus gewählt werden. Ein dünneres Bauteil verspricht eine Gewichtersparnis, was zu einem geringeren Kraftstoffverbrauch im Flugzeug führt.

Die Lebensdauer, Festigkeit und innere Struktur der Bauteile bei Belastung wird von der Strukturmechanik berechnet. Durch sie wird die Einsatzdauer und Bauteildicke bestimmt. Ihr Wunsch ist also ein sehr kleiner Wert für die durch die POD Studie bestimmte Fehlergröße. Man spricht dabei auch von einer Verbesserung der POD, sozusagen eine Verbesserung des Ergebnisses der POD.

Der zweite Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Herausforderung: Wie kann ein Prüfsystem weiterentwickelt werden, damit das Ergebnis der POD Analyse eine kleinere Fehlergröße ist. Hier werden in Kapitel 8 drei Verfahren vorgestellt. Anhand von Versuchen wird gezeigt, ob und wie sie zur Verbesserung der POD beitragen können.

In Kapitel 8.1 wird untersucht, ob die Phased Array Technik gegenüber der Multizonen Technik eine Verbesserung der POD bewirken kann. In Kapitel 8.2 wird der Weg zum Entwickeln einer Phased Array Technik mit der die POD verbessert werden kann beschrieben. Ein neuer Einsatzbereich der Phased Array Technik, zur Schallfeldmodulation, wird in Kapitel 8.3 beschrieben. Modulation beschreibt in der Nachrichtentechnik die Veränderung einer Welle durch Überlagerung um Informationen zu übertragen. Hier wird der Begriff verwendet um anzudeuten, dass das Schallfeld durch Überlagerung von mehreren Wellen verändert wird. Durch nicht-divergierende Schallfelder, die ohne großen Kostenaufwand mit einem Array erzeugt werden können, kann die Prüfung sensitiver werden und dadurch die Wahrscheinlichkeit einen Fehler zu detektieren (POD) verbessert werden.

1.2 Hintergrund

Es gibt in der Flugzeugbranche zwei verschiedene Vorgehensweisen um die strukturelle Qualität von Flugzeugen und ihren Funktionsteilen, wie den Triebwerken, sicherzustellen. Zunächst wurden Flugzeuge nach dem Prinzip „Fail-Safe-Designs“ konstruiert. Dabei wird aus statischen Erkenntnissen eine Lebensdauer für die einzelnen Elemente bestimmt. Nach Ablauf ihrer Lebensdauer, werden die Bauteile ausgewechselt. Dabei wurde die Tatsache ignoriert, dass Bauteile auch schon direkt nach der Herstellung fehlerbehaftet sein können. Dies führte zu einigen, teils schwerwiegenden Ausfällen von Flugzeugen, so dass in den 70iger Jahren die schadenstolerante Konstruktionsphilosophie (*Schadenstoleranz / Damage Tolerance*) eingeführt wurde [Gall84].

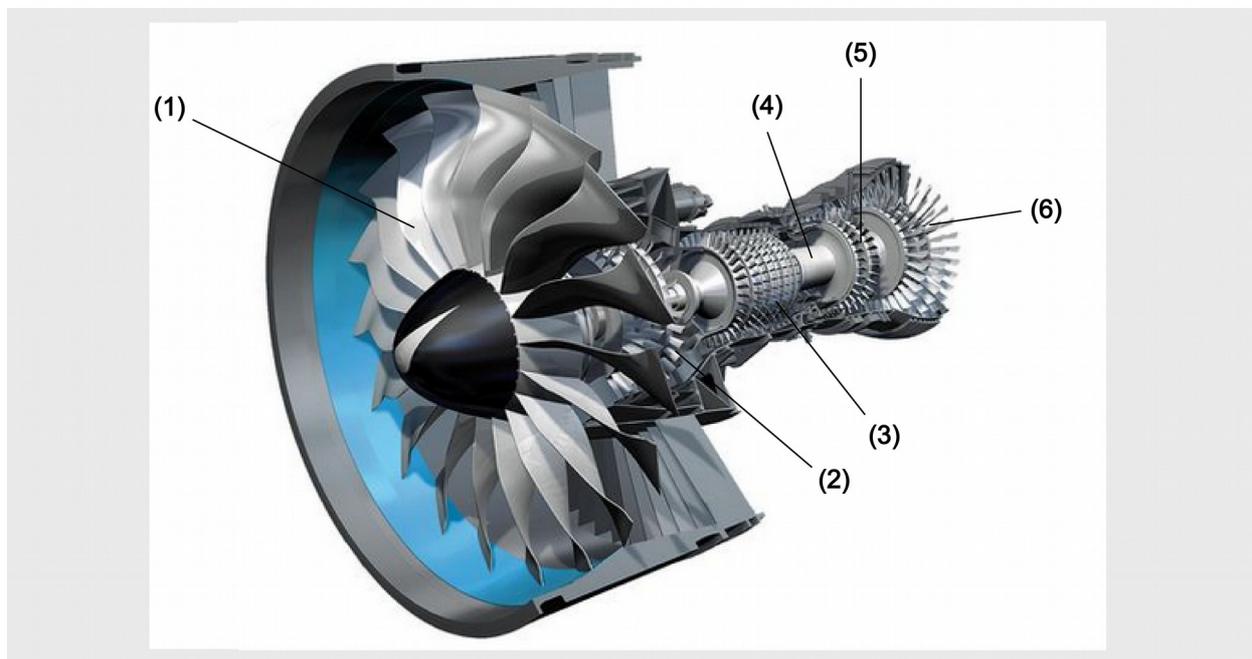
Bei der Schadenstoleranz wird davon ausgegangen, dass in allen sicherheitskritischen Bereichen Materialdefekte vorhanden sind. Die Konstruktion der Bauteile ist so ausgelegt, dass Defekte unterhalb einer bestimmten Größe keine Auswirkung auf die Funktion des Bauteils hat. Durch zerstörungsfreie Prüftechnik wird gewährleistet, dass Defekte und Fehlstellen über einer kritischen Größe bei der Fertigung oder während der Überprüfung der Bauteile nach den Service-Intervallen detektiert werden [Gall84]. Zunächst war dieses Konstruktionsprinzip unverbindlich, doch nach

dem Unfall in Sioux City 1989 wurde es von der Federal Aviation Association (FAA), die Bundesluftfahrtbehörde der USA, vorgeschrieben [Faa01].

Mit der verpflichtenden Einführung der Schadenstoleranz gingen auch weitere Änderungen einher. Dieses Auslegungsprinzip braucht statistisch abgesicherte Daten über die Fähigkeit der Prüfverfahren einen Fehler zu detektieren. Dafür wurde eine statistische Auswertung der Fehlerdetektion eingeführt, die Fehlerauffindwahrscheinlichkeit POD. Die POD wurde ein obligatorischer Eingabeparameter für die Risikoanalyse. In den früheren Jahren wurden zur Berechnung der Lebensdauer standardisierte POD-Kurven verwendet. Diese Kurven sind in [Faa01] dokumentiert. Doch da es mit den frühen Berechnungsmethoden der POD einige Probleme gab, wurden diese Kurven überarbeitet [Thom08]. Mit den neuen Untersuchungen und Methoden ist auch das Bewusstsein dafür gestiegen, dass für jede neue Prüfkonfiguration eine eigene POD-Studie vorgenommen werden muss. Es reicht also nicht mehr aus, POD Kurven aus der Literatur zu verwenden, sondern sie müssen für jede Anwendung neu berechnet werden. Dies wirft einige Probleme, wie den hohen Kosten- und Zeitaufwand, auf. Vor allem bei der Ultraschallprüftechnik, entstehen dadurch sehr große Herausforderungen, die in Kapitel 5 diskutiert werden.

1.3 Komponenten eines Flugzeugtriebwerks

In diesem Kapitel wird kurz auf die Komponenten des Flugzeugtriebwerks (am Beispiel eines Zweistromtriebwerks) eingegangen.



Zweistromtriebwerk PW1000G mit seinen Komponenten: (1) Fan / Niederdruckverdichter, (2) Mitteldruckverdichter, (3) Hochdruckverdichter, (4) Brennkammer, (5) Hochdruckturbine, (6) Niederdruckturbine

Abbildung 2: Komponenten eines Zweistromtriebwerks, Bild zur Verfügung gestellt von der MTU Aero Engines AG

In Abbildung 2 ist das Zweistromtriebwerk PW1000G zu sehen. Durch den Fan wird Luft in das Triebwerk angesaugt. Sie teilt sich danach in zwei Ströme auf, den Nebenstrom, der am Triebwerk vorbei geleitet wird und den Luftstrom, der durch das Triebwerk läuft. Dieser wird von Mittel- und Niederdruckverdichter komprimiert. In der Brennkammer wird die verdichtete Luft mit Kerosin vermischt und entzündet. Das dadurch ausgedehnte Gas strömt durch die beiden Turbinenstufen (Hoch- und Niederdruckturbinen) nach außen und treibt diese an [Bräu09].

Die Hauptkomponenten des Triebwerks bestehen aus Scheiben, an denen Verdichter- und Turbinenschaufeln befestigt sind, bzw. aus denen Schaufeln durch Fräsen herausgearbeitet werden. Es gibt Laufscheiben, die während dem Betrieb rotieren und Leitscheiben, die fest bleiben und dafür sorgen, dass die Luftströme richtig geleitet werden. Diese Scheiben sind über Wellen miteinander verbunden.

1.4 Relevante Bauteile

In diesem Kapitel werden die für diese Arbeit relevanten Bauteile beschrieben. Der prinzipielle Ablauf der Fertigung von Schmiedescheiben ist in Abbildung 3 zu sehen. In dieser Arbeit wird die Ultraschallprüfung von Billets und Schmiedescheiben betrachtet.

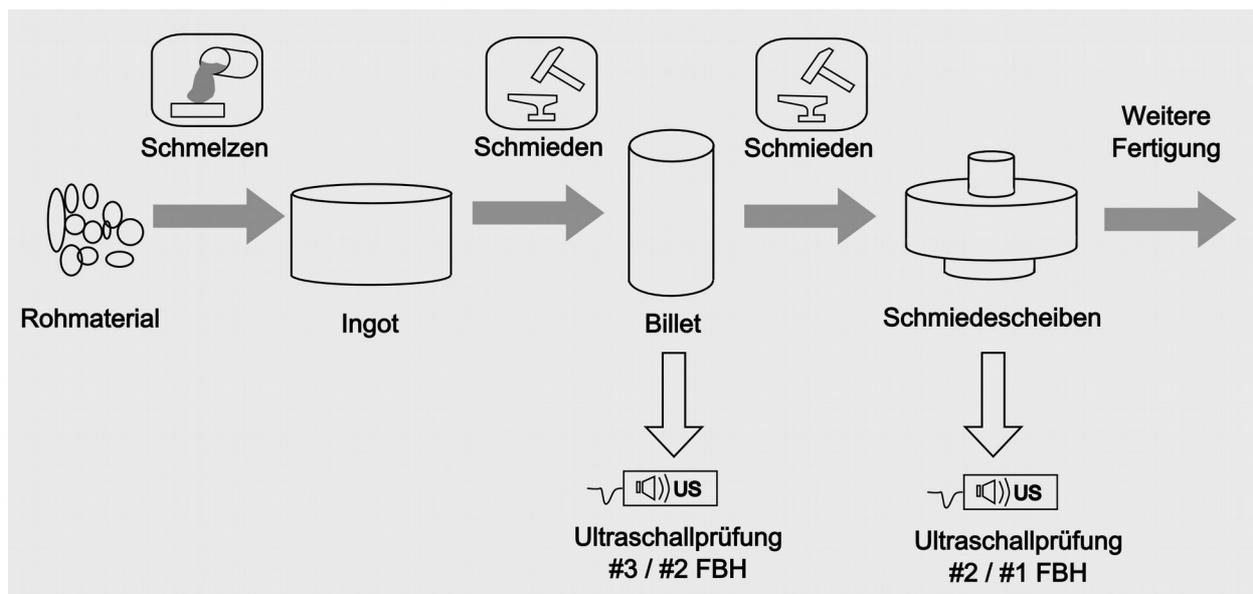


Abbildung 3: Fertigungsprozess und Ultraschallprüfungen

Das Rohmaterial wird geschmolzen und zu einem Ingot geformt. Aus diesem wird ein zylindrischer Strang geschmiedet, der Billet genannt wird. Da die Materialkosten für Triebwerkmaterial sehr hoch sind und das Bauteil mit jedem zusätzlichen Produktionsschritt immer teurer wird, wird das Billet mit Ultraschall geprüft, um das Material mit Defekten gleich aussortieren zu können. Das Material, das bei der Ultraschallprüfung für gut befunden wurde, wird in kleine Stücke gesägt, welche wiederum geschmiedet werden [Niet95]. Dabei wird die Form an die rotierenden Triebwerksscheiben angepasst.

Da bei diesem Schmiedeprozess das Gefüge des Materials feiner wird, kann dieses Bauteil mit einer

höheren Empfindlichkeit mit Ultraschall geprüft werden. Dabei können auch die Fehler, die beim Schmieden auftreten, gefunden werden.

Die so geprüften Scheiben werden durch Fräsen und Drehen weiterbearbeitet. Bei Blisks (Bladed Disk) werden die Schaufeln aus der geschmiedeten Scheibe gefräst. Ansonsten werden die fertig produzierten Schaufeln durch lineares Reibschweißen an die Scheibe angebracht. In Abbildung 4 ist die Herstellung einer Blisk dargestellt.

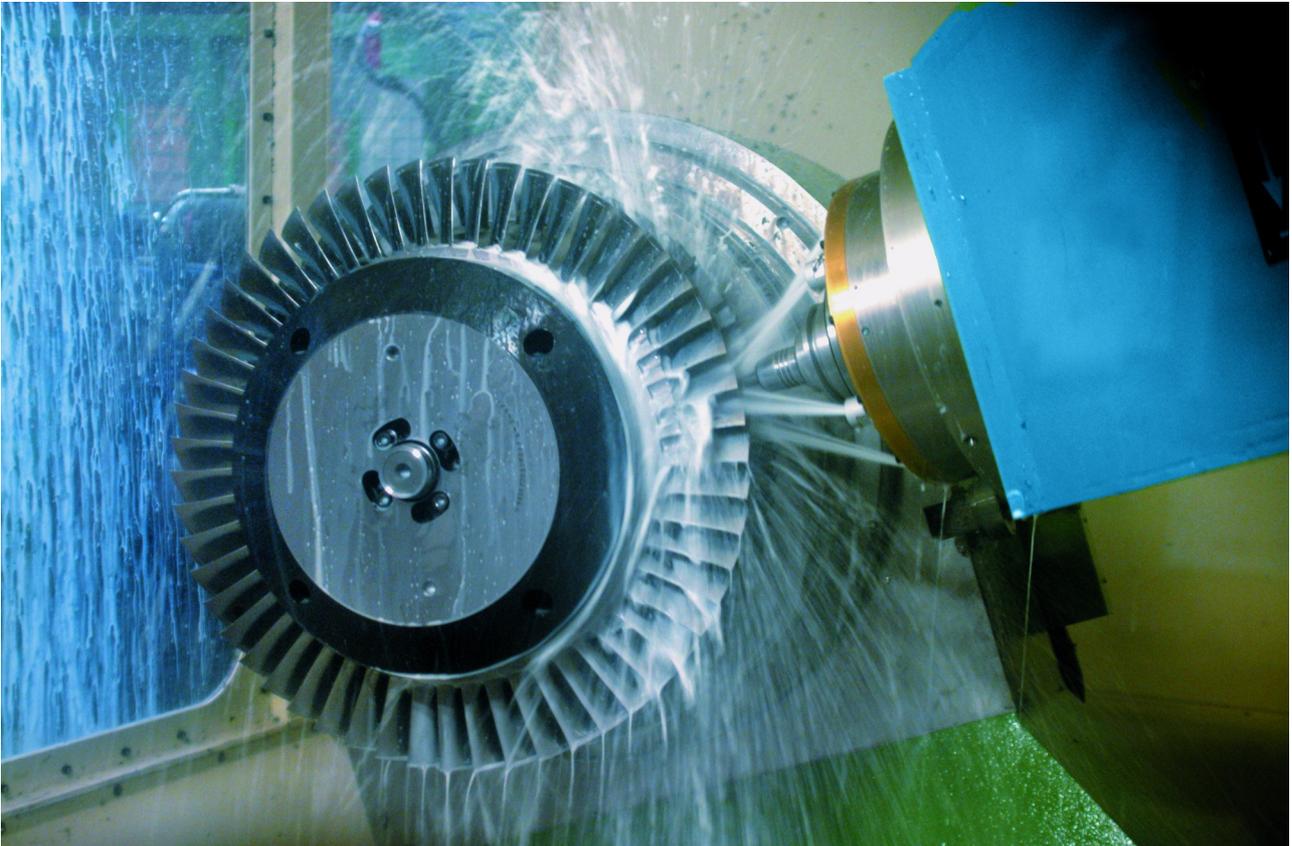


Abbildung 4: Herstellung einer Blisk durch Ausfräsen der Schaufeln, Bild zur Verfügung gestellt von der MTU Aero Engines AG

1.5 Werkstoffe im Triebwerksbau und ihre grundlegende Verarbeitung

Im Triebwerksbau werden Nickelsuperlegierungen und Titanlegierungen verwendet [Smar02].

1.5.1 Nickelsuperlegierungen

Da der Einsatz von Nickelsuperlegierungen bei hohen Temperaturen möglich ist [Essl04], werden sie vor allem im Hochtemperaturbereich, wie zum Beispiel in der Turbine und den Hochdruckverdichtern, des Flugzeugtriebwerks verwendet [Poll06]. Nickel hat ein kubisch-flächenzentriertes Gitter, wodurch es für höhere Temperaturen als kubisch-raumzentrierte Metalle (wie z.B. Eisen) eingesetzt werden kann [Hilb12]. Der Grund dafür ist, dass durch die engere Packung der Atome ihre Beweglichkeit bei thermischer Aktivierung eingeschränkt ist. Somit wird das Kriechen bei hohen Temperaturen behindert und das Material hat auch dann noch eine gute

Festigkeit.

Die am häufigsten verwendete Legierung ist IN 718. Für Scheiben, Ringe und Gehäuse wird sie als Knetlegierung verwendet und durch Schmieden, Fräsen, Schleifen und Räumen in ihre Form gebracht. Lauf- und Leitschaufeln werden gegossen und geschmiedet. Es werden auch weitere Legierungen eingesetzt, deren maximaler Temperaturbereich höher ist, z.B. Waspaloy, gatorized Waspaloy oder Udimet 720 LI [Essl04]. Bei der Beschaffung entstehen hohe Kosten, da die Anforderungen an das Vormaterial sehr hoch sind.

Nickelsuperlegierungen bestehen aus Nickel und Chrom, welches die Oxidation der Oberfläche verhindert. Aluminium, Titan und Niob werden hinzugefügt um die Festigkeit durch den Übergang zur γ' Phasen zu gewährleisten. γ -Nickel geht durch Zugabe dieser Elemente in eine weitere Phase über, die γ' genannt wird und aus Ni_3Al besteht. Bei IN 718 wird Eisen hinzugefügt. Durch Cobalt, Molybdän, Wolfram, Tantal wird die Festigkeit bei hohen Temperaturen erhöht. Bor und Zirkonium erhöhen die Kriechfestigkeit [Whit81].

Der Herstellungsprozess für Nickelsuperlegierungen beginnt bei der Schmelze mit der VIM (*Vacuum Induction Melting*) Methode. Die Weiterverarbeitung unterteilt sich in zwei Routen: (1) erneutes Aufschmelzen gefolgt von Schmieden und (2) Produktion von Pulver, das später in die gewünschte Form gepresst wird. Bei der Schmiederoute wird das Ingot (siehe Abbildung 3) mindestens noch einmal mit der VAR (*Vacuum Arc Melting*) Methode aufgeschmolzen um Seigerungen und Lunker, die beim VIM Schmelzen entstehen können, zu eliminieren [Poll06].

1.5.2 Typische Materialfehler bei Nickelsuperlegierungen

In diesem Kapitel sollen die typischen Materialdefekte, die bei Nickelsuperlegierungen auftreten, beschrieben werden. Da der Fokus dieser Arbeit auf der Ultraschallprüfung liegt, sind vor allem die Defekte im Volumen, die beim Schmelzen der Legierungselementen auftreten, von Bedeutung. Andere Materialfehler, die bei der Bearbeitung der Bauteile vorkommen, werden bevorzugt mit anderen Prüfverfahren geprüft (mit Ausnahme von Schweißnähten, die aber für diese Arbeit ignoriert werden).

Mikrostrukturelle Veränderungen, welche die Materialeigenschaften beeinflussen, entstehen schon bei der Schmelze. An diesen Stellen können Risse beim Ermüdungsbruch starten [Avyl98]. Bei Flugzeugtriebwerken sind Ermüdungsbrüche die häufigste Schadensart.

Typische Materialfehler in Nickelsuperlegierungen sind: [Hold80]

- Porosität
- Rissbildung beim Erstarren
- Seigerungen
- Grobkörnige Regionen
- Auslagerung von grobem Carbid
- Einschlüsse, z.B. von Oxiden und spröden Nitriden bzw. Carbonitriden

Luft einschließen in der Schmelze führen zu Porosität. Meistens treten sie in Clustern auf. Beim Erstarren der Nickelsuperlegierung können durch die Schrumpfung des Materials Risse entstehen.

Seigerungen sind Entmischungen der Legierungselemente. Zwei Seigerungsarten, die besonders bei der Nickelsuperlegierung IN 718 auftreten, werden als *Freckels* und *White Spots* bezeichnet.

Freckels sind lokale Bereiche, die mit einem Element, dessen Funktion die Festigkeitserhöhung ist, angereichert sind [Avyl98]. *White Spots* sind Regionen, in denen einige Legierungselemente kaum gelöst sind. Sie erscheinen auf Ätzbildern als weißer Punkt, woher ihre Bezeichnung kommt. Sie lassen sich in drei Klassen unterteilen: diskrete, dendritische und erstarrte *White Spots*. Die ersten beiden sind in hochbelasteten Bauteilen kritisch [Jack94].



Abbildung 5: Aufnahmen von *White Spots* in IN 718

Grobkörnige Regionen in einem feinkörnigen Gefüge entstehen beim Schmieden oder anderen Wärmeprozessen. Die Prozessparameter sind normalerweise darauf ausgelegt, dass sich die gesamte Gefügestruktur des Materials umwandelt. Falls die Prozessparametern schwanken, können grobkörnigere Regionen im Material bleiben [Hold80]. Unterschiedliche Materialparameter können durch Festigkeitsunterschiede zu Rissen führen.

Obwohl Carbide an den Korngrenzen gewollt sind, weil sie das Kornwachstum hemmen und wenn sie einzeln vorkommen Kriechen bei hohen Temperaturen verhindern können, sind sie, wenn ihre Anzahl zu groß wird unerwünscht, da sie dann Ausgangspunkt für Ermüdungsrissen sein können. Diese Art von Defekten nennt man Auslagerung von Carbid [Poll06].

Einschlüsse treten beim Wiederaufschmelzen mit der VAR Methode auf. Sie können durch Werkzeugrückstände oder Verunreinigungen der Werkzeuge kommen. Oxide und Nitride können schon beim VIM Schmelzen entstehen und bleiben beim VAR Schmelzen bestehen. Wolfram von den Elektroden kann einen Einschluss hoher Dichte ausbilden [Poll06].

1.5.3 Titanlegierungen

Titanlegierungen werden verwendet, weil der Widerstand gegen Oxidierung und das Verhältnis zwischen Festigkeit und Gewicht außerordentlich gut sind. Durch den Einsatz von Titanbauteilen in Flugzeugtriebwerken kann über 40% Gewicht eingespart werden im Vergleich zu Stahl und Nickelsuperlegierungen [Dunc81]. Die Legierungen können bis 550°C eingesetzt werden und daraus ergibt sich ein Einsatz im Bereich der Niederdruck-Verdichterstufen. Titan zeichnet sich durch eine sehr hohe Festigkeit aus [Smar02].

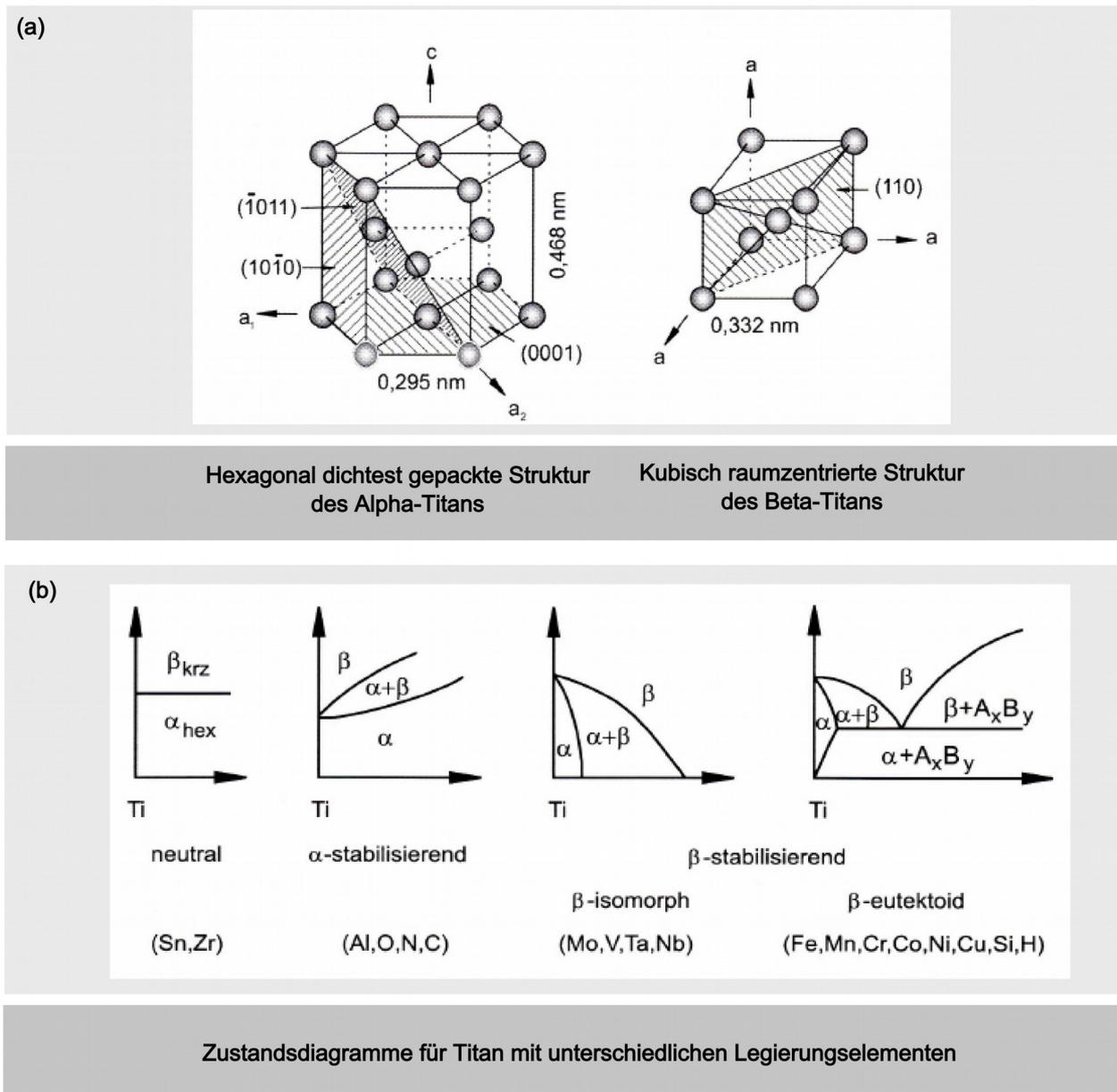


Abbildung 6: (a) Struktur des α - und β -Titans, (b) Zustandsdiagramme für Titan, α -stabilisiertes Titan und β -stabilisiertes Titan (Bilder entnommen aus [Pete02])

Die im Moment am meisten verwendete Legierung ist Ti-6Al-4V. Eine seltenere Legierung ist Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo. Sie kann bei einer höheren Temperatur eingesetzt werden [Smar02].

An der Oberfläche bilden die Titanlegierungen schon bei Raumtemperatur eine sehr dünne, stark schützende Schicht aus Titandioxid. Dies geschieht so schnell, dass das Material sehr unempfindlich gegen Korrosion ist. Allerdings ist Titan bei hohen Temperaturen sehr reaktiv und nimmt Sauerstoff auf, was die Herstellung und Bearbeitung der Legierung erschwert, so dass fast alle Bearbeitungsschritte unter Vakuum durchgeführt werden müssen [Dunc81].

Pures Titan kommt in zwei Formen vor, α -Ti mit einer hexagonalen dichtesten Packung (bis 882°C) und β -Ti mit einer flächenzentrierten kubischen Packung (von 882°C bis 1668°C = Schmelzpunkt des Titans). Die Struktur des Gitters ist in Abbildung 6 (a) zu sehen. Legierungselemente werden dem Titan hinzugefügt, um die Übergangstemperatur zwischen α und β anzupassen. Es gibt Elemente, welche die Temperatur des Übergangs von α nach β erhöhen, diese werden α -Stabilisierer genannt. Aluminium, Sauerstoff, Stickstoff und Kohlenstoff sind gute α -Stabilisierer, wobei im Triebwerksbau vor allem Aluminium verwendet wird, wegen seiner geringen Dichte und seiner guten Lösbarkeit in beiden Phasen. β -Stabilisierer sind Molybdän, Vanadium, Niob, Chrom und Eisen. Sie hemmen die Umwandlung von α nach β und sorgen so dafür, dass auch unterhalb der β -Temperatur β -Phasen im Bauteil vorhanden sind [Lütj07]. In Abbildung 6 (b) sind die Zustandsdiagramme für die unterschiedlichen Legierungstypen zu sehen.

Die Legierung Ti-6Al-4V ist eine α - β Legierung. Sie ist α - und β -stabilisiert, beide Phasen kommen im Material vor [Dunc81]. Die Titanlegierung Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo ist eine β -Legierung [Lütj07]. β -Titan ist schlecht prüfbar, da es ein großes gefügebedingtes Signalrauschen bei der Ultraschallprüfung erzeugt, vor allem Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo.

Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo besteht aus lamellarem β -Gefüge, das durchsetzt ist von dünnen α -Plättchen, warum die Legierung in mancher Literatur auch als α - β -Legierung bezeichnet wird [Dunc81]. Für diese Arbeit wird aber weiterhin die Bezeichnung β -Legierung verwendet, so wie in [Lütj07] dargestellt. Die α -Phasen siedeln sich vor allem an den Korngrenzen des β -Gefüges an und bilden somit α -Schichten aus. Diese Schichten verfestigen das Material, so dass das Material höheren Belastungen standhält [Lütj07]. Das Gefüge ist in Abbildung 7 (a) zu sehen. Die lamellaren β -Körner sind eingerahmt von α -Schichten.

Das Diffusionsglühen und Schmieden findet komplett im β -Temperaturbereich statt, wobei sich das lamellare β -Gefüge ausbildet. Dadurch, dass es nach dem Schmieden keinen Rekristallisationsprozess gibt, bleibt die β -Kornstruktur deformiert. Beim Abkühlen und Aushärten im α + β -Temperaturbereich lagern sich die α -Phasen an den deformierten Korngrenzen an [Lütj07]. Dadurch wird die Bildung von durchgehenden α -Phasen-Platten verhindert, was unerwünscht wäre, weil es die Rissbildung unterstützt. Durch die deformierten Korngrenzen sind die Ausscheidungen nicht durchgängig.

Der Titanschwamm, das sehr poröse Rohtitan, wird aus Rutil und Ilmenit gewonnen. Dieser ist aufgrund seiner, durch die Schwamm-Form, sehr großen Oberflächen und der hohen Reaktivität von Titan in normaler Umgebung schnell entzündlich, so dass die Schmelze unter Vakuum oder Schutzgas stattfinden muss. Im Gegensatz zu anderen Metallen, bei denen Materialfehler durch das Schmelzen eliminiert werden, ist Titan während der Schmelze sehr anfällig dafür, Materialfehler auszubilden. Aus diesem Grund wird ein sehr großer Aufwand betrieben, um diese Fehler während

der Schmelze auszuschließen (die typischen Materialfehler in den verwendeten Werkstoffen werden in Kapitel 1.5.4 vorgestellt). Es werden zwei Verfahren zum Schmelzen verwendet, VAR (*Vacuum Arc Melting*) und CHM (*Cold Hearth Melting*). Beim CHM wird ein mit Wasser gekühlter Behälter benutzt um das geschmolzene Material, das durch Lichtbogen oder Plasmastrahl zur Schmelze gebracht wird, aufzufangen. Am Rand des gekühlten Gefäßes entsteht eine abgekühlte Titanschicht, so dass es zu keiner Verunreinigung von außen kommen kann. Dieses Verfahren hat einige Vorteile gegenüber VAR, so dass es immer öfter verwendet wird. Nach der Schmelze werden noch Wärmebehandlungen im Temperaturbereich über dem β -Transus durchgeführt. [Lütj07]

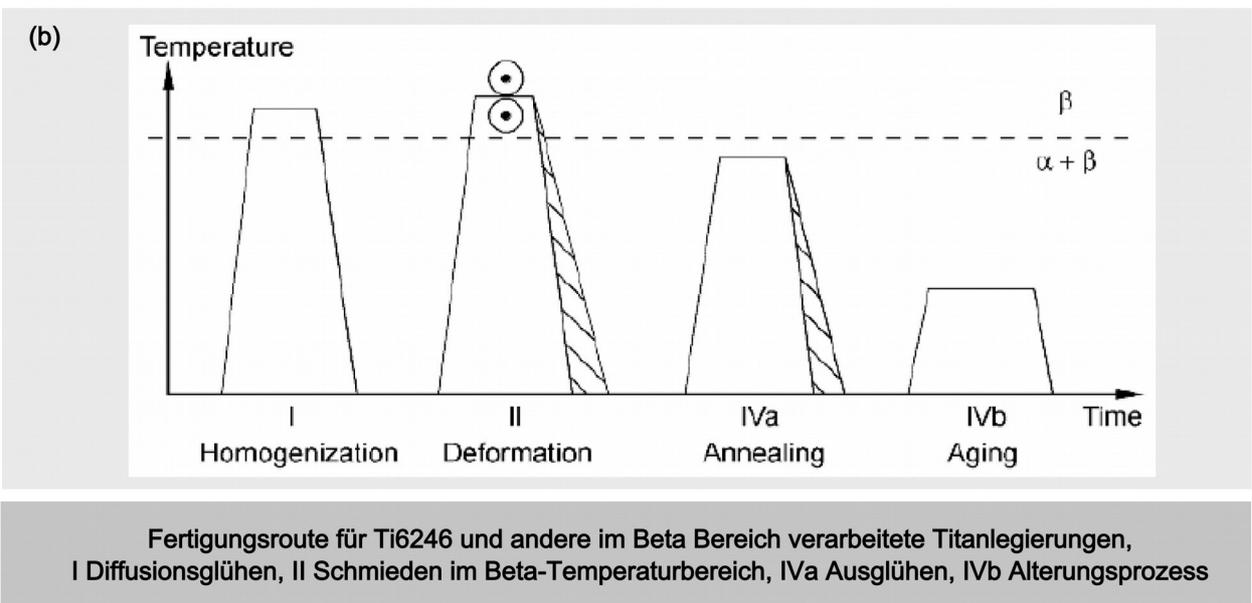
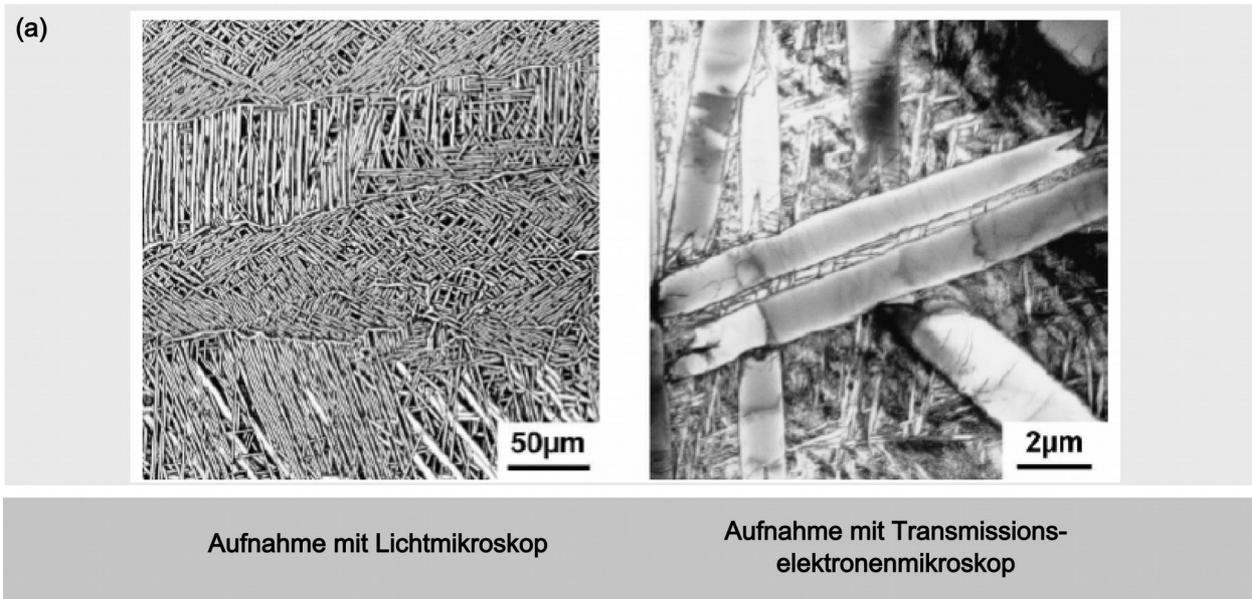


Abbildung 7: (a) Lamellares Gefüge in Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo, (b) Fertigungsroute für Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo, Bilder aus [Lütj07]

Die Titanlegierungen werden in den weiteren Bearbeitungsschritten geschmiedet. Dieser Prozess ist

sehr wichtig, da auch hier noch eine Umwandlung der α - und β -Phasen erreicht werden. [Turn81]

1.5.4 Materialfehler in Titanlegierungen

Das Schmelzen von Titan ist sehr aufwendig und wenn einer der definierten Parameter abweicht, kann es zu Materialfehlern im Titan kommen. Die typischen Materialfehler sind laut [Lütj07]:

- Poren und Lunker
- HID (*High Interstitial Defects*) / Hard Alpha / Type I Defects
- HDI (*High Density Inclusions*) / Einschlüsse hoher Dichte
- Type II Defects / α -stabilisierte Regionen
- β -stabilisierte Regionen / β -Flecks

Lunker entstehen beim Schrumpfen des Materials während der Abkühlung, Poren durch gelöstes Gas in der Schmelze. Hardalpha Einschlüsse (siehe Abbildung 8) entstehen durch Stickstoff oder Sauerstoff Verunreinigungen des Titans. Da Titan sehr reaktionsfreudig ist, nimmt es Stickstoff oder Sauerstoff bei der Herstellung leicht auf und bildet an diesen Stellen Bereiche mit erheblich höherem Härtegrad. Durch die Härteunterschiede mit dem umgebenden Material treten Risse auf, die beim Betrieb des Triebwerks immer weiter wachsen, bis es zum Bruch kommt [Marg02-2].

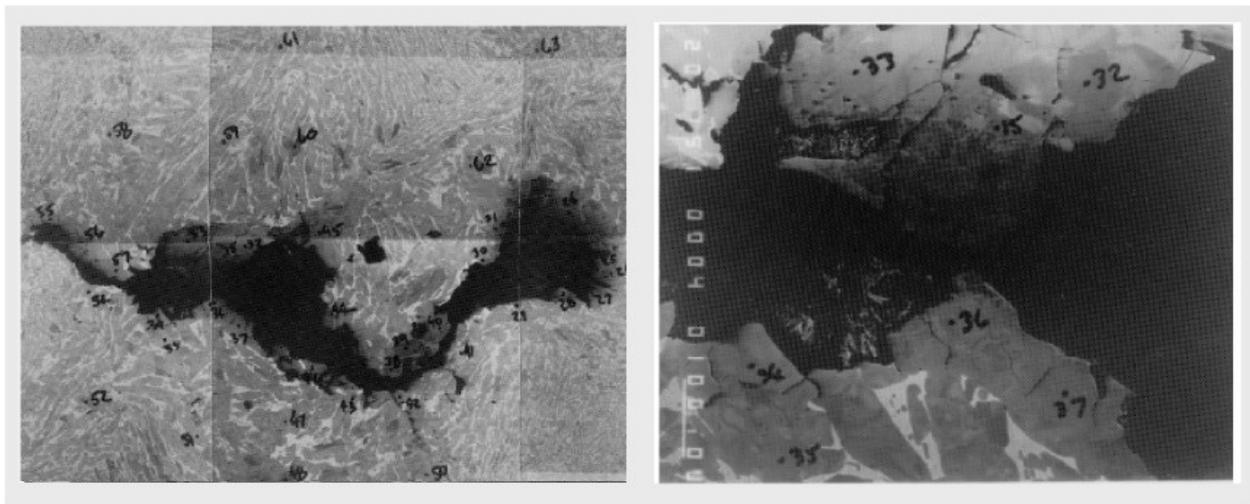


Abbildung 8: Schliffbild eines Hardalpha Einschlusses, Bilder aus [Bras05]

Einschlüsse hoher Dichte entstehen, wenn Wolfram von den verwendeten Elektroden oder von Werkzeugabrieb in die Schmelze kommt. Type II Fehler sind aluminiumangereicherte Regionen. Sie tauchen vor allem am Ende des Ingots auf, im sogenannten Schrumpfkopf. Sie reagieren nicht auf Wärmebehandlungen und bleiben deshalb weniger fest. Sie können zur früheren Ermüdungsrissbildung führen. Type II Fehler können dadurch eliminiert werden, dass das obere Ende des Ingots abgeschnitten wird [Lütj07]. β -stabilisierte Regionen entstehen, wenn sich eine große Menge an β -stabilisierten Elementen in einem lokalen Bereich ansiedeln. β -Flecks können

mit Freckels bei Nickelbasislegierungen verglichen werden [Mitt06].

1.6 Zerstörungsfreie Prüftechniken im Triebwerksbau

Zerstörungsfreie Prüftechniken werden in vielen Bereichen eingesetzt: Qualitätskontrolle in der Fertigung, periodische Überprüfungen der Bauteile, Überwachung von Zustandsänderungen und in der Forschung und Entwicklung von neuen Materialien [Mey04]. Die Voraussetzung bei zerstörungsfreien Prüftechniken ist, dass die Bauteile durch das Prüfverfahren nicht verändert werden und danach weiterhin verwendet werden können. Nur durch Einhaltung dieser Voraussetzung ist eine 100% Prüfung aller Bauteile möglich, wie es im Triebwerksbau vorgeschrieben ist.

Geeignete Prüfverfahren werden nach allen größeren Bearbeitungsschritten eingesetzt, damit die dabei entstandenen Fehlstellen oder durch die Bearbeitung detektierbar gewordenen Materialdefekte direkt gefunden werden können. Fehlerhafte Bauteile können gleich aussortiert werden und die Kosten durch weitere Bearbeitungsschritte entfallen. Noch wichtiger allerdings ist, dass die Fehlstellen nicht bei der weiteren Bearbeitung verdeckt werden und nicht mehr zu detektieren sind.

In [Neuh13] sind die im Triebwerksbau verwendeten zerstörungsfreien Prüfverfahren beschrieben:

- Sichtprüfung
- Farbeindringprüfung
- Magnetpulverprüfung
- Wirbelstromprüfung
- Thermografieprüfung
- Bauteilmetallografie
- Röntgenprüfung, inklusive Computer Tomografie
- Ultraschallprüfung

Der Einsatz der Prüfverfahren ist schematisch in Abbildung 9 dargestellt. Im Folgenden werden die einzelnen Prüfverfahren und ihr Einsatz kurz erklärt.

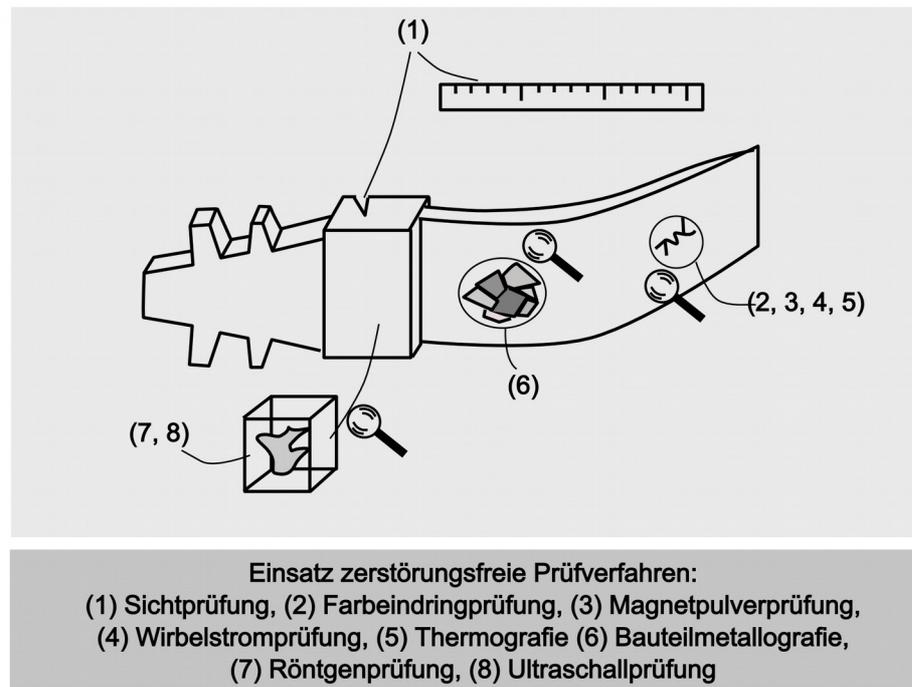


Abbildung 9: Übersicht über die im Triebwerksbau eingesetzten zerstörungsfreien Prüfverfahren (schematisch dargestellt an einem beliebigen Triebwerksbauteil)

Die Sichtprüfung ist gleichzeitig das einfachste und am häufigsten verwendete Prüfverfahren. Mit nur wenigen Hilfsmitteln (Beleuchtung, Mikroskop, Boroskop, Messinstrumente, etc.) wird der äußere Zustand des Bauteils untersucht. Dazu gehört: Sauberkeit des Bauteils, Maßeinhaltung, große Kerben oder Dellen im Bauteil, Qualität der Oberflächenbeschichtung, etc. [Raj07].

Die Farbeindringprüfung wird verwendet um Risse, die mit der Oberfläche verbunden sind, zu detektieren. Das Bauteil wird mit einer Flüssigkeit benetzt, die eine sehr geringe Oberflächenspannung hat. Durch die Kapillarkwirkung wird die Flüssigkeit in Risse an der Oberfläche gezogen und verbleibt dort nach dem Entfernen der Flüssigkeit. Eine zweite Flüssigkeit, der sogenannte Entwickler, wird aufgebracht, der die Überreste der ersten Flüssigkeit sichtbar macht, indem er die Flüssigkeit aus den Rissen zieht [Iddi02].

Mit der Magnetpulverprüfung können Risse an der Oberfläche oder in Oberflächennähe detektiert werden. Allerdings nur bei ferromagnetischen Werkstoffen. Da diese in den neueren Triebwerken immer seltener werden, schwindet die Einsetzbarkeit des Prüfverfahrens. Das Bauteil oder Teile davon werden in ein Magnetfeld gebracht. Risse stören das Magnetfeld und es entsteht ein Streufluss, der an der Oberfläche des Bauteils austritt. Auf der Oberfläche werden frei bewegliche ferromagnetische Teilchen in Pulverform oder aufgeschlämmt in einer Flüssigkeit aufgebracht. Diese ordnen sich entlang der Magnetfeldlinien des Streufeldes an und kennzeichnen den Riss. Es können nur Risse detektiert werden, die rechtwinklig zum Magnetfeld ausgerichtet ist, darum muss das Magnetfeld von verschiedenen Richtungen eingebracht werden [Lind02].

Die häufigsten Einsatzbereiche der Wirbelstromprüfung im Triebwerksbau sind die Detektion von Rissen in Oberflächennähe und das Entdecken von Dickeänderungen bei Beschichtungen.

Außerdem kann das Verfahren eingesetzt werden, um verschiedene Metalle voneinander zu unterscheiden (Verwechslungsprüfung) und zur Überprüfung der enthaltenen Legierungselemente. Alle Änderungen im Werkstoff, die eine Leitfähigkeitsänderung hervorrufen, können detektiert werden.

In einer Spule werden Magnetfelder erzeugt, die zeitlich veränderbar sind. Sobald diese Spulen über einem Bauteil platziert werden, werden in dem Bauteil Wirbelströme induziert. Die Wirbelströme erzeugen wiederum ein Magnetfeld, das dem Erregermagnetfeld entgegengesetzt ist und mit ihm interferiert. Mit einer Messspule kann die Impedanz gemessen und in ein elektronisches Signal verwandelt werden. Wenn in dem Bereich des Bauteils, in dem die Wirbelströme fließen, ein Materialdefekt auftritt, so wird die Bahn der Wirbelströme gestört und somit das von ihnen erzeugte Magnetfeld modifiziert [Shul02].

Bei der Thermografie wird das infrarote Spektrum der elektromagnetischen Wellen verwendet. Für das menschliche Auge ist die Infrarotstrahlung nicht sichtbar, kann aber durch spezielle IR-Kameras dargestellt werden. Es werden zwei Verfahren unterschieden, aktive und passive Thermografie. Bei der passiven wird die natürliche Wärmeverteilung in einem Bauteil gemessen. Bei der aktiven Thermografie wird durch externe Energieeinbringung Wärme in das Bauteil eingebracht und die Veränderung des Temperaturprofils wird ausgewertet. An einem homogenen Werkstoff baut sich die Temperatur konstant ab, aber falls Deformationen vorhanden sind, hemmen diese die Abkühlung und können so durch die IR-Kamera sichtbar gemacht werden [Raj07].

Defekte auf Kornenebene können mit der Bauteilmetallografie sichtbar gemacht werden. Die Oberfläche des Bauteils wird geschliffen, poliert und geätzt, um die Kornstruktur sichtbar zu machen. Es gibt verschiedene Ätzverfahren, bei denen entweder die Korngrenzen oder die Kornflächen sichtbar gemacht werden [Barg12-2]. Die so präparierten Flächen werden unter einem Mikroskop betrachtet. Damit können Mikrorisse, Seigerungen, Versprödungen, u.ä. gefunden werden [Raj07].

Mit der Röntgenprüfung können Defekte im Materialvolumen detektiert werden, wenn sie eine räumliche Ausdehnung und eine vom Bauteilwerkstoff unterschiedliche Dichte und Schwächungskoeffizient haben. Röntgenstrahlen sind elektromagnetische Strahlen mit sehr geringer Wellenlänge. Durch die geringe Wellenlänge können sie die meisten Festkörper gut durchdringen, allerdings werden sie dabei im Material geschwächt. Diese Eigenschaft wird bei der Röntgenprüfung ausgenutzt. Bei einem homogenen Bauteil ist die Schwächung der Röntgenstrahlung konstant. Falls im Material Bereiche mit vom restlichen Werkstoff unterschiedlicher Dichte und Schwächungskoeffizient existieren, zum Beispiel durch Einschlüsse von Fremdmaterialien oder Lufteinschlüssen, ist die Schwächung der Strahlung an diesen Stellen verändert. Die das Bauteil durchdrungene Strahlung schwärzt entweder einen extra dafür hergestellten Film oder einen röntgensensitiven Monitor. Die Stellen an denen die Strahlung stärker oder weniger geschwächt wurde, können als Helligkeitsunterschiede wahrgenommen werden [Mart02].

Die Röntgenprüfung kann nur bei relativ dünnwandigen Bauteilen mit einer hohen Fehlerempfindlichkeit durchgeführt werden, da mit Dicke des durchstrahlten Materials die Größe

der detektierbaren Defekte sinkt.

Bei der Röntgen Computer Tomografie wird ein Bauteil aus unterschiedlichen Richtungen durchstrahlt und die Ergebnismatrix so umgerechnet, dass eine dreidimensionale Darstellung des Bauteils angezeigt werden kann. Materialdefekte werden sehr genau wiedergegeben.

Auch bei der Ultraschallprüfung können Fehlstellen im Volumen des Bauteils gefunden werden. Schall durchdringt das Bauteil und wird an Grenzflächen zwischen Bereichen mit unterschiedlichen Materialeigenschaften reflektiert. Die reflektierten Signale werden aufgezeichnet und ausgewertet. Da die Ultraschallprüftechnik Gegenstand dieser Arbeit ist, wird sie ausführlich in Kapitel 2 beschrieben.

Bei den in Kapitel 1.4 beschriebenen Bauteilen werden Fehlstellen im Materialvolumen gesucht, so dass nur die Röntgen- und Ultraschallprüfung dafür in Frage kommen. Da die Bauteile sehr dickwandig sind, kann die Röntgenprüfung ausgeschlossen werden und nur noch die Ultraschallprüfung kommt in Frage.

2 Grundlagen der Ultraschallprüfung

2.1 Schallfeldtheorie

Schallwellen sind mechanische Schwingungen, die sich in elastischen Materialien ausbreiten. Sehr kurze Wellen mit einer Frequenz oberhalb von 20kHz werden Ultraschallwellen genannt. In unendlichen, homogenen Festkörpern, gibt es zwei Ausbreitungsarten von Schallwellen. Longitudinalwellen breiten sich in Schwingungsrichtung aus und Transversalwellen breiten sich senkrecht zur Schwingungsrichtung aus [Krau86]. Als Schallfeldgrößen werden der Schalldruck p , die Schalldichte ρ und die Schallgeschwindigkeit c bezeichnet. Der Schalldruck p ist die Druckschwankung in der Welle im Vergleich zum Ruhedruck im Material [Lerc09].

Die Schallgeschwindigkeit in homogenen, isotropen Festkörpern hängt von den elastischen Parametern und der Dichte des Materials ab. Sie kann aus dem Elastizitätsmodul E , der Dichte ρ und der Poissonzahl (Querdehnzahl) μ berechnet werden. Sie berechnet sich für die Longitudinalwelle und die Transversalwelle wie in Gleichung 1.1 und 1.2 dargestellt.

$$c_{long} = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)}}(1-2\mu) \quad [\text{Krau86}] \quad (1.1)$$

$$c_{trans} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\mu)}} \quad [\text{Krau86}] \quad (1.2)$$

Bei der Verwendung von Ultraschall für die zerstörungsfreie Prüftechnik in Impuls-Echo-Technik (siehe Kapitel 2.2) werden nur kurze Impulse ausgesendet, um eine Überlagerung der Wellen im Empfänger zu verhindern. Der kurze Impuls kann beschrieben werden als Faltung eines Sinussignals mit einer meist gaußförmigen Einhüllenden [Howa-96].

Wenn man das Feld eines Schwingers betrachtet, kann dieses aufgezeichnet werden, indem der Abstand zwischen einem Reflektor und dem Schwinger vergrößert wird und die Reflexionen aufgezeichnet werden. Ein Beispiel für ein resultierendes Schallfeld ist in Abbildung 10 gezeigt.

Das Schallfeld direkt nach dem Schwinger weist viele Überlagerungen auf. Es gibt sehr viele Maxima und Minima des Schalldrucks. Dieses Interferenzfeld wird Nahfeld genannt und lässt sich aus dem Verhältnis von Schwingerdurchmesser D und Wellenlänge λ bestimmen [Shul02-2]. Im Nahfeld ist durch die Interferenzen keine Ultraschallprüfung möglich. Die Nahfeldlänge lässt sich mit der Gleichung 1.3 bestimmen.

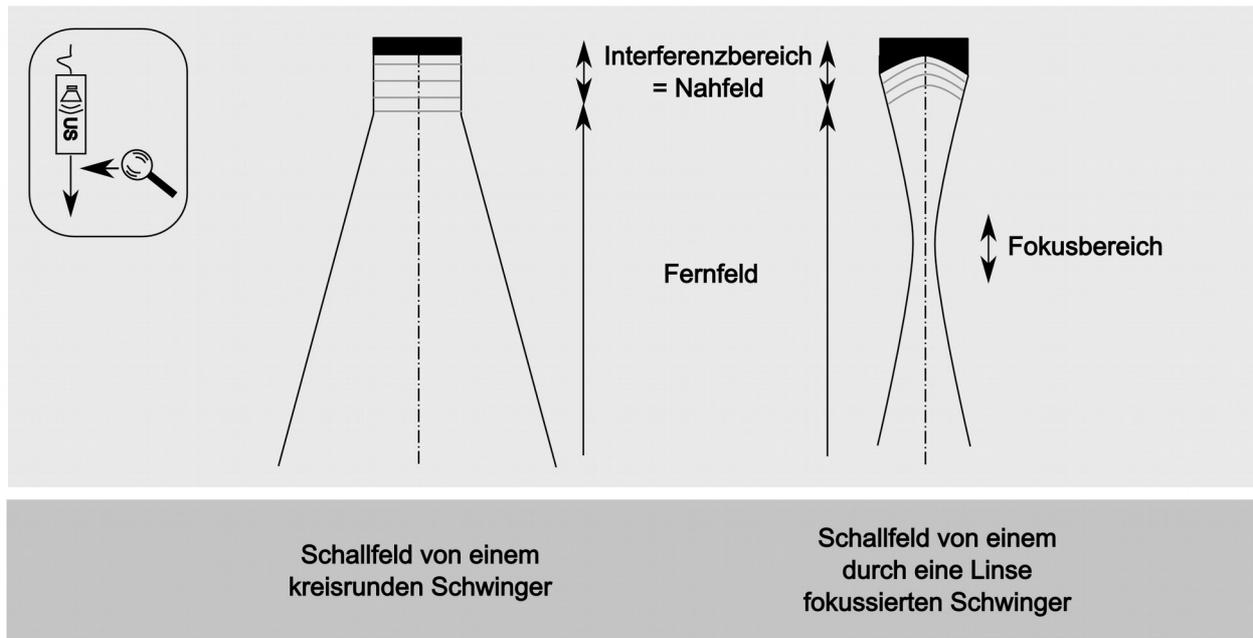


Abbildung 10: Schematische Darstellung des Schallfeldes von einem kreisrunden Schwinger und dem gleichen Schwinger mit einer Linse zur Fokussierung

$$N = \frac{D^2}{(4\lambda)} \quad [\text{Shul02-2}] \quad (1.3)$$

Die Erklärung für diese Überlagerungen kann das Huygens'sche Prinzip liefern. Es besagt, dass jeder Punkt in einem Wellenfeld, die Überlagerung mehrerer elementarer Kugelwellen ist, welche wieder der Ausgangspunkt einer weiteren Kugelwelle ist [Lerc09]. Daraus ergibt sich, dass ein kreisrunder Schwinger keinen Schatten erzeugt, da an seinen Rändern auch Kugelwellen erzeugt werden, die in alle Richtungen ausstrahlen. Wenn der Abstand vom Schwinger kleiner als die Nahfeldlänge ist, treffen die elementaren Kugelwellen mit unterschiedlicher Phase und Amplitude aufeinander, da sie im Verhältnis zur Wellenlänge weit voneinander entfernt sind, wodurch es zu destruktiven und konstruktiven Interferenzen kommt [Schl78]. Dies ist schematisch in Abbildung 11 dargestellt.

Dem Nahfeld schließt sich das Fernfeld an. In diesem Bereich wird das Schallfeld mit größer werdendem Abstand zur Quelle breiter und der Schalldruck nimmt ab. Diese Divergenz lässt sich nach Gleichung (1.4) berechnen.

$$\sin \gamma = k \frac{\lambda}{D} \quad [\text{Krau86}] \quad (1.4)$$

Durch Beugung in einer Linse lässt sich Schall fokussieren. Durch die Linse wird das Schallfeld eingeschnürt, bis es seine minimale Schallbündelbreite und damit auch den höchsten Schalldruck erreicht, danach divergiert das Schallfeld wieder [Schl78].

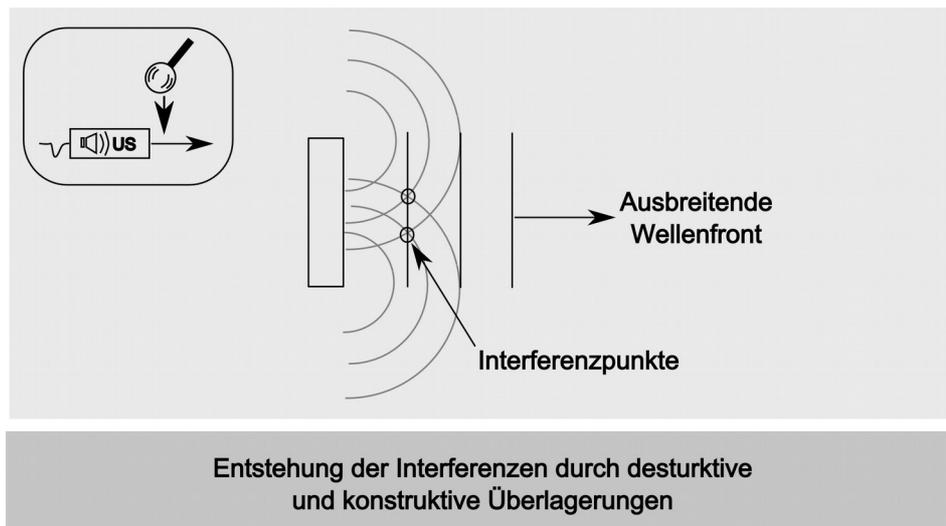


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Entstehung der Interferenzen im Nahfeldbereich, Zeichnung angelehnt an Darstellungen in [Lerc09]

Wenn die Ultraschallwellen von einem Material in ein anderes übergehen, kommt es zu verschiedenen Phänomenen. Teile des Schalls werden reflektiert, andere Teile gehen in das neue Material über. Der Grad für die Aufteilung ergibt sich aus der Schallimpedanz der Materialien. Je größer der Unterschied in den Impedanzen, desto höher der reflektierte Anteil. Die Schallimpedanz berechnet sich aus Schallgeschwindigkeit c und Dichte ρ [Krau86].

$$Z = \rho \cdot c \quad (1.5)$$

Falls der Schall schräg auf eine Grenzfläche zweier Materialien mit unterschiedlicher Schallimpedanz trifft, kommt es zur Brechung und somit zu einer Richtungsänderung der einfallenden Schallwelle. Der Winkel, unter dem die gebrochene Schallwelle in der zweiten Materie weiterläuft, hängt vom Einfallswinkel und dem Verhältnis der Schallgeschwindigkeiten ab. Die Gesetzmäßigkeit ist nach dem Mathematiker Willebrord van Roijen Snell benannt und heißt Snelliussches Brechungsgesetz:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2} \quad (1.6)$$

In Festkörpern teilt sich die gebrochene Schallwelle auf in eine Longitudinalwelle und eine Transversalwelle. Allerdings ist der Schalldruck der Transversalwelle bis zum ersten kritischen Winkel (keine Longitudinalwelle mehr im Bauteil vorhanden) so gering ist, dass sie vernachlässigt werden kann.

Die Schallwellen verlieren beim Durchlaufen des Bauteils an Schalldruck. Es gibt drei Gründe dafür, die Divergenz des Schallbündels, Reibungsverluste und Streuung. Verluste durch innere Reibung der mechanischen Schwingung führen dazu, dass die Schallwelle beim Durchlaufen von Materialien gedämpft wird. Dadurch verliert sie mit einem längeren Schalllaufweg immer weiter an Energie. Streuung tritt an Grenzflächen mit einer sehr rauen Oberfläche auf, dabei wird das Signal

in unterschiedlichste Richtungen gestreut.

2.2 Ultraschall Prüfverfahren in Impuls-Echo-Technik

Da Schall die meisten Materialien durchdringt, kann er sehr gut zur Materialprüfung verwendet werden. Dazu werden Wandler benötigt, die den Schall aussenden und empfangen können. Außerdem wird eine Technik verwendet, die die von den Wandlern erzeugten elektrischen Signale, auswertet und eine Darstellung der Ergebnisse liefert.

Die Wandler bestehen aus piezoelektrischen Elementen, die elektrisch angesteuert werden. Sie wandeln elektrische Signale in Schall um und andersherum. Die Sensorik ist in Prüfköpfen untergebracht, die durch gezielte Dämpfung dafür sorgen, dass sich der Schall nur in eine Richtung ausbreiten kann. Der schematische Aufbau eines Prüfkopfes ist in Abbildung 12 zu sehen.

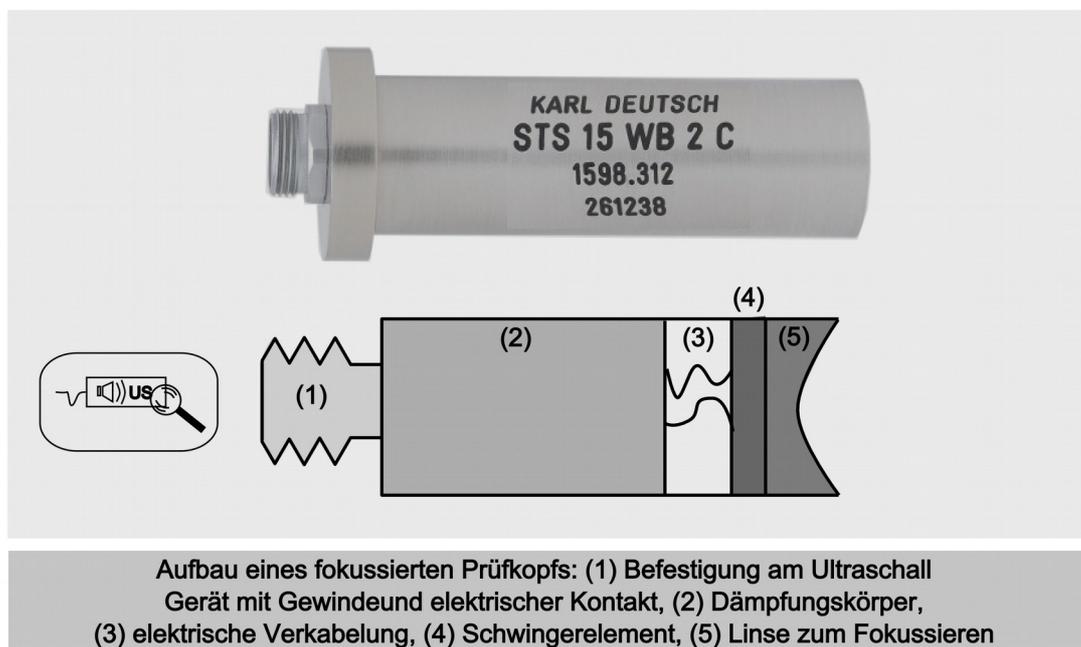


Abbildung 12: Aufbau eines fokussierten Prüfkopfes, Darstellung des Schnittes durch den zylinderförmigen Prüfkopf, Foto des Prüfkopfes zur Verfügung gestellt von Karl Deutsch GmbH

Fokussierte Prüfköpfe haben entweder eine Linse aus Plexiglas oder einen gekrümmten Schwinger und erzeugen damit ein sich zum Fokuspunkt verengendes Schallfeld. Ein Prüfkopf kann nur innerhalb seiner Nahfeldlänge fokussiert werden [Niet95]. Die Fokuslänge des Prüfkopfes kann also nie die natürliche Nahfeldlänge eines Planschwingers überschreiten.

Für fokussierte Prüfköpfe kann eine F-Nummer angegeben werden. Sie gibt das Verhältnis zwischen Länge des Fokusbereiches, in der Optik Schärfentiefe genannt, und Durchmesser des Schallbündels im Fokusbereich an (F/D) [Kell05-2]. Ein Prüfkopf mit $F/D = 10$ wird dann als F/10 Prüfkopf bezeichnet.

Das Modul, das die elektrischen Signale auswertet und zur Anzeige bringt, wird als Prüfgerät bezeichnet.

Ultraschallwellen werden über eine Flüssigkeit in das Material eingekoppelt. Da der Schallwellenwiderstand in Luft klein ist, geht beim Schallaustritt aus dem Metall viel Energie verloren. Der Schallwellenwiderstand von Wasser ist deutlich größer, als der von Luft ($Z_{\text{Wasser}} \approx 3 \cdot 10^3 \cdot Z_{\text{Luft}}$) [Krau86]. Aus diesem Grund ist der Verlust der Schallenergie bei der Verwendung von Wasser als Koppelmedium deutlich geringer.

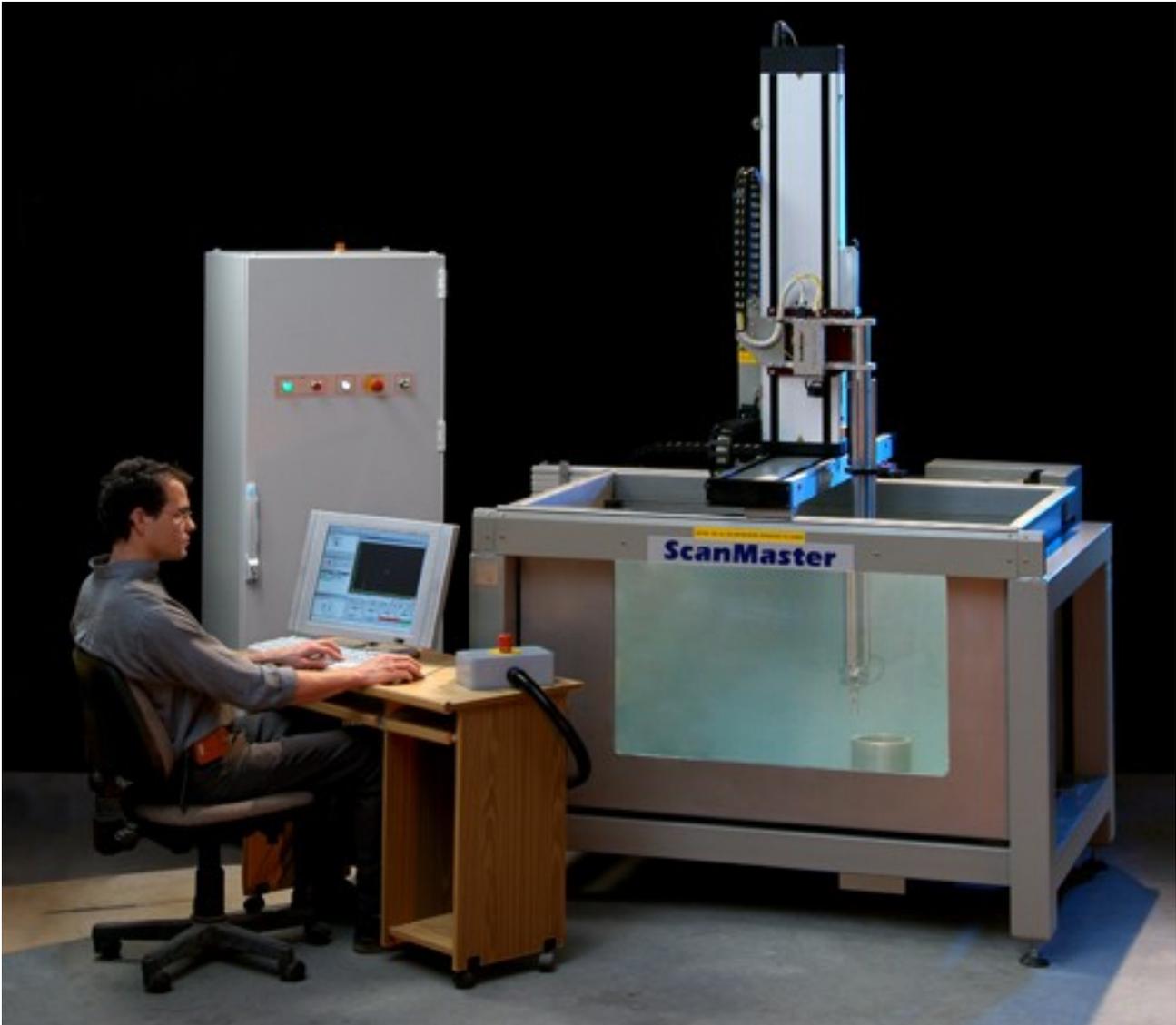


Abbildung 13: Tauchtechnikanlage, Bauteil wird auf Drehteller platziert, Prüfkopf kann in fünf Achsen bewegt werden. Bild zur Verfügung gestellt von Vogt Ultrasonic GmbH

Bei der Kontakttechnik findet diese Ankopplung über ein Gel auf Wasserbasis, das zwischen Prüfkopf und Bauteil aufgetragen wird statt. Im Triebwerksbau wird meist in Tauchtechnik (siehe Abbildung 13) geprüft, das heißt, dass Bauteil und Prüfkopf sich in einem Wasserbecken befinden. Dadurch schwankt die Ankopplung nicht und es kann empfindlicher geprüft werden. Der Abstand von Prüfkopf zum Bauteil wird Wasservorlaufstrecke genannt. Der Prüfkopf wird im Wasserbecken mechanisch bewegt, normalerweise in mehreren Achsen. Dadurch kann der Prüfkopf definiert über das Bauteil bewegt werden und die aufgezeichneten Daten einer bestimmten Position auf dem

Bauteil zugeordnet werden. Weitere Ankopplungsmethoden wie Squirter- oder Bublertechnik werden hier nicht weiter beschrieben.

Es gibt mehrere Verfahren zur Prüfung mit Ultraschall. Für Bauteile des Triebwerkbaus ist die Impuls-Echo Methode die wichtigste und wird hier beschrieben. Nach dem Senden des Schalls wird der Prüfkopf im Empfangsmodus betrieben. Die ausgesendete Schallwelle wird an Grenzflächen zwischen verschiedenen Materialien reflektiert. Es wird die Höhe des reflektierten Signals und seine Laufzeit gemessen. Aus der Laufzeit und der bekannten Schallgeschwindigkeit in dem durchlaufenen Material kann zurückverfolgt werden, in welchem Abstand zum Sensor sich der Reflektor befindet [Krau86].

Es werden A-Bilder aufgezeichnet, bei denen die Amplitudenhöhe der reflektierten Signale gegen die Schalllaufzeit aufgetragen werden. Im A-Bild ist die Gesamtzahl der reflektierten Amplituden zu sehen. Bei einer Laufzeit von 0µs wird das Sendeecho angezeigt, dieses kommt beim Übergang vom Prüfkopf zum Wasser zustande, das nächste Echo, wird als Eintrittsecho bezeichnet und wird beim Übergang vom Wasser zum Bauteil reflektiert. Eine weitere Reflexion tritt beim Austritt des Schalls aus dem Bauteil auf. Dieses Echo wird Rückwandecho genannt. Der Bereich zwischen Eintrittsecho und Rückwandecho markiert den Prüfbereich. Ein Beispiel für ein A-Bild ist in Abbildung 14 zu sehen. Es ist anzumerken, dass der Abstand zwischen Sendeecho und Eintrittsecho in Realität wesentlich größer ist, da die Schallgeschwindigkeit in Wasser sehr viel geringer ist als in dem Metall.

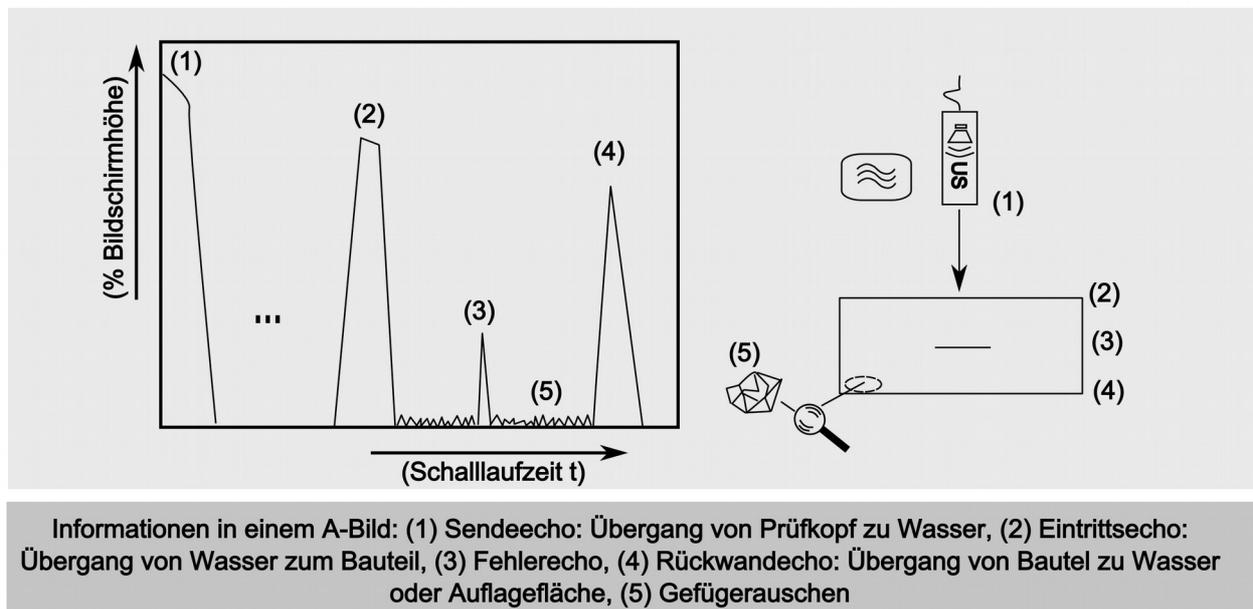


Abbildung 14: Darstellung der vom Ultraschallwandler empfangenen Signale im A-Bild

Während der Schall sich im Bauteil ausbreitet, interagiert er auch mit der Gefügestruktur des Materials, wodurch es zu kleinen Reflexionen kommt. Diese sind im A-Bild im gesamten Prüfbereich zu sehen und werden Gefügerauschen genannt.

Das Sende- und Eintrittsecho sind im Regelfall im Verhältnis zu den anderen Echos so hoch, dass

der Verstärker in der Sättigung arbeitet. Daher werden sie sehr breit im A-Bild dargestellt. Der Bereich, der vom Eintrittsecho überdeckt wird, wird bei der Tauchtechnik als Tote Zone bezeichnet und schränkt das oberflächennahe Auflösungsvermögen ein. Aus diesem Grund wird jedes zu prüfende Bauteil mit einem Aufmaß versehen, das nach der Prüfung abgearbeitet wird.

Um eine Anzeige auswerten zu können, muss sie sich signifikant vom Rauschen unterscheiden. Um diesen Unterschied definieren zu können, wurde der Begriff Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) eingeführt. Aus dem mittleren und maximalen Rauschen wird das Signal-Rausch-Verhältnis nach Gleichung (2.1) bestimmt. Für eine gute Prüfbarkeit muss das Signal-Rauschverhältnis größer als 2,5 sein [Hass05]. Die Amplitudenhöhe der Signale wird im Normalfall in Prozent angegeben. Sie wird als Bildschirmhöhe bezeichnet und kann als Höhe des Signals im A-Bild abgelesen werden.

$$SNR = \frac{\text{Maximale Ersatzfehleramplitude} - \text{Mittleres Rauschlevel}}{\text{Maximales Rauschlevel} - \text{Mittleres Rauschlevel}} \quad [\text{Howa96}] \quad (2.1)$$

Die A-Bilder können digital gespeichert werden. Da der Prüfkopf elektronisch über das Bauteil bewegt wird, können sie sogar einer Position auf dem Bauteil zugeordnet werden. Eine gängige Anzeigeart ist das C-Bild. Dies ist ein Bild, in dem die Amplitudeninformation farbcodiert dargestellt wird. Diese Farbcodierung wird auch als Darstellung in Falschfarben bezeichnet.

Um ein C-Bild zu erstellen, wird im A-Bild ein Prüfbereich definiert. Sobald die Amplitude in diesem Bereich einen definierten Schwellwert überschreitet, wird sie aufgezeichnet und farbig dargestellt. So ergibt sich für jede Prüfkopfposition ein Pixel in einem Bild. Die Pixelbreite wird über die Inkrementschrittweite der Prüfkopfbewegung definiert (siehe Abbildung 15).

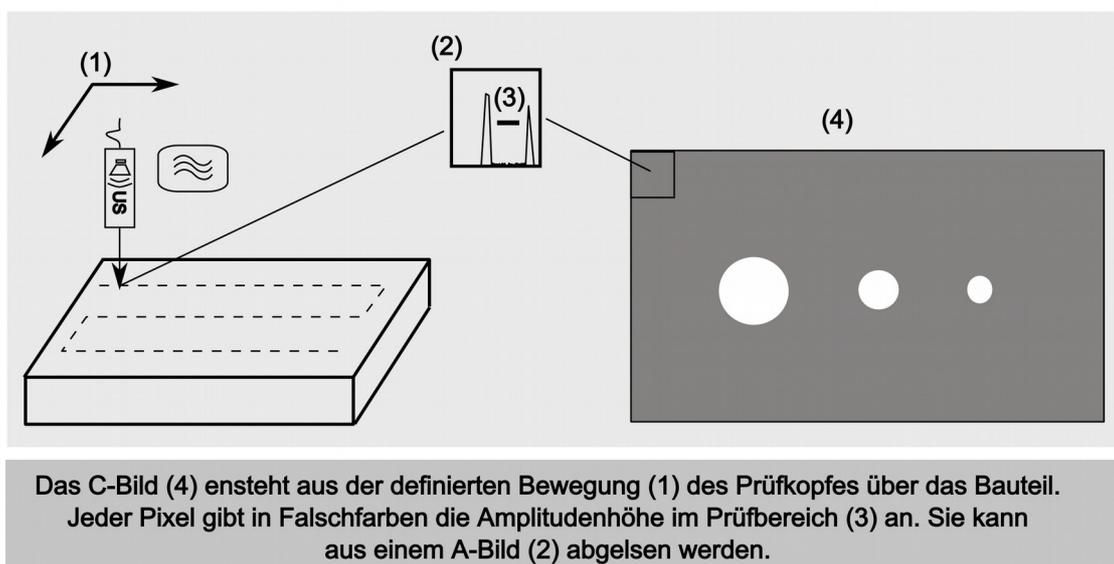


Abbildung 15: Entstehung des C-Bildes

Für die Kalibrierung und Überprüfung der Ultraschallsysteme werden Flachbodenbohrungen (FBH vom Englischen Flat Bottom Hole) als Reflektor verwendet. Dies sind Bohrungen, die am Ende flach abgefräst werden, so dass sie eine zur Schalleintrittsfläche parallele, ebene, kreisrunde Fläche entsteht. Sie können durch Fräsen und Drahterodieren hergestellt werden. Wobei beachtet werden

muss, dass bei der Drahterosion der Draht gedreht werden muss, um plausible Ergebnisse zu erhalten [Brac11].

Bei Flachbodenbohrungen mit einem Durchmesser kleiner als 0,8mm wird dies allerdings problematisch, da es häufig zu einem Bruch des Werkzeugs kommt, vor allem bei dem schwer zu bearbeitenden Titan-Material. Im Triebwerksbau werden typischerweise Flachbodenbohrungen von 0,4mm, 0,8mm und 1,2mm verwendet. Für zukünftige Triebwerksauslegungen können aber auch noch kleinere Flachbodenbohrungen gefordert werden. Dies birgt neue Herausforderungen in der Fertigung der Bohrungen.

Bohrungen können auch als Querbohrung verwendet werden, dann werden sie von der Seite angeschallt. Allerdings sind diese Bohrungen sehr lang ausgedehnt, da die Bohrungen von der Bauteiloberfläche eingebracht werden. Natürlich vorkommende, länglich ausgedehnte Materialdefekte haben eine weit geringe Länge.

Zwei wichtige Bewertungskriterien einer Ultraschallprüfung sind die Prüfeempfindlichkeit und die Auflösung [Meng13]. Als Prüfeempfindlichkeit wird die Fähigkeit des Systems einen Ersatzfehler einer bestimmten Größe detektieren zu können bezeichnet, auch hier werden Flachbodenbohrungen als Ersatzfehler verwendet. Die Prüfeempfindlichkeit eines Ultraschallsystems wird als kleinster detektierbarer Flachbodendurchmesser angegeben.

Die Auflösung ist die Fähigkeit zwei nahe beieinanderliegenden Reflektoren getrennt von einander darzustellen. Am relevantesten ist die oberflächennahe Auflösung. Dabei geht es darum einen Reflektor, der nahe der Bauteiloberfläche liegt, darzustellen, ohne dass er von dem Echo, das der Übergang von Wasser zum Bauteil erzeugt (Eintrittsecho), überdeckt wird.

2.3 Phased Array Ultraschall

Wie bei den Phased Array Antennen in der Hochfrequenztechnik gibt es auch beim Ultraschall eine Phased Array Technik. Dabei kann die Ausbreitungsrichtung der Schallwellen moduliert werden. Der Vorteil dabei ist ihre Flexibilität mit der die Prüfungsqualität und -geschwindigkeit verbessert werden kann [Drin06].

Die Phased Array Technik basiert auf dem Prinzip der konstruktiven und destruktiven Interferenz. Im Gegensatz zur konventionellen Prüftechnik, bei der ein Schwingerelement angeregt wird und eine Schallwelle erzeugt, werden bei der Phased Array Technik mehrere Schwinger zeitlich verzögert angeregt. Die von den einzelnen Schwingern erzeugten Wellen interferieren miteinander und bilden eine gemeinsame Wellenfront. Diese Wellenfront kann so moduliert werden, dass sie sich unter einem Winkel von der Erzeugungsquelle entfernt oder sich zu einem Fokuspunkt verjüngt [Rdte04].

Bei konventioneller Technik breitet sich der Schall immer senkrecht zur Prüfkopffläche aus. Nur über das Hilfsmittel der Brechung, wenn der Schall schräg auf eine Grenzfläche trifft, kann eine Welle, die unter einem Winkel ins Bauteil einfällt, erzeugt werden [Krau86]. Falls der Schall beim konventionellen Ultraschall fokussiert werden soll, muss eine Linse verwendet werden, die dabei entstehende Phasendifferenz wird beim Phased Array elektronisch erzeugt, sozusagen eine

elektronische Linse [Meye00].

In Abbildung 16 sind zwei Ansteuerungsmöglichkeiten für Arrays gezeigt. Im ersten Bild ist die Zeitverzögerung linear. Von den im Verhältnis zur Wellenlänge kleinen Elementen werden annähernd Kugelwellen ausgesendet, da sie laut dem Huygens'schen Prinzip wie eine Punktquelle zu sehen sind (siehe Kapitel 2.1). Die Kugelwellen überlagern sich zu einer gemeinsamen Wellenfront, die sich unter einem Winkel in dem Bauteil ausbreitet. Im zweiten Bild ist die Ansteuerung für eine Fokussierung zu sehen. Die Kugelwellen überlagern sich zu einer sich verjüngenden Wellenfront.

Für jedes Element lässt sich die Verzögerungszeit der Aktivierung und die Verstärkung regeln. Jedes Element wird als eine Funktion der Zeit angesteuert. Die Verzögerungszeiten für alle Elemente werden *Delay Laws* genannt und die Verstärkungen *Amplitude Law*. Zusammengenommen werden sie als *Focal Laws* bezeichnet [Lama99].

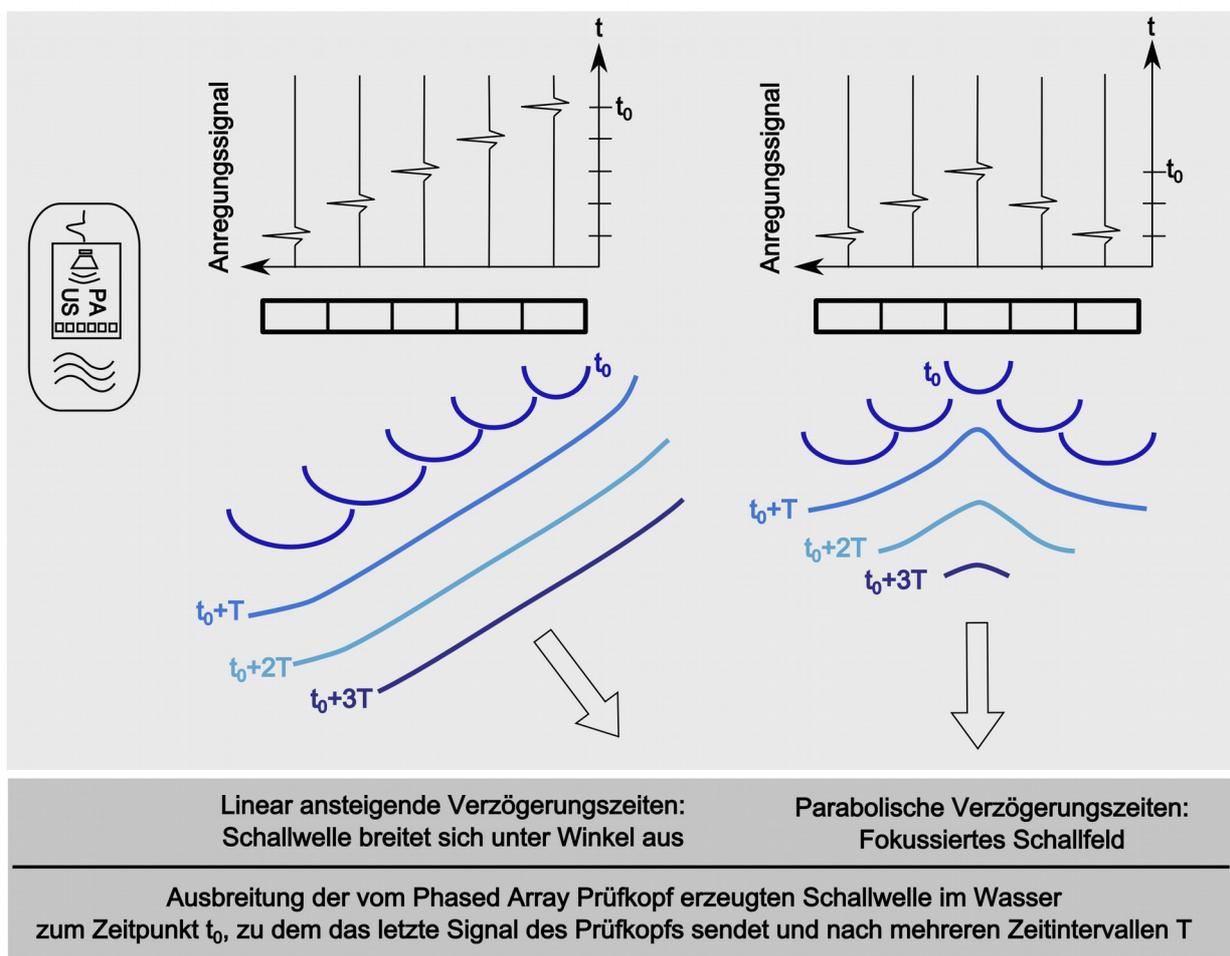


Abbildung 16: Ansteuerung der Arrays mit Zeitverzögerungen. Die resultierenden Schallfelder laufen unter einem Winkel ins Bauteil oder sind fokussiert.

Es gibt drei verschiedene Möglichkeiten einen Phased Array Prüfkopf anzusteuern (siehe Abbildung 17), die in [Pogu02] beschrieben sind.

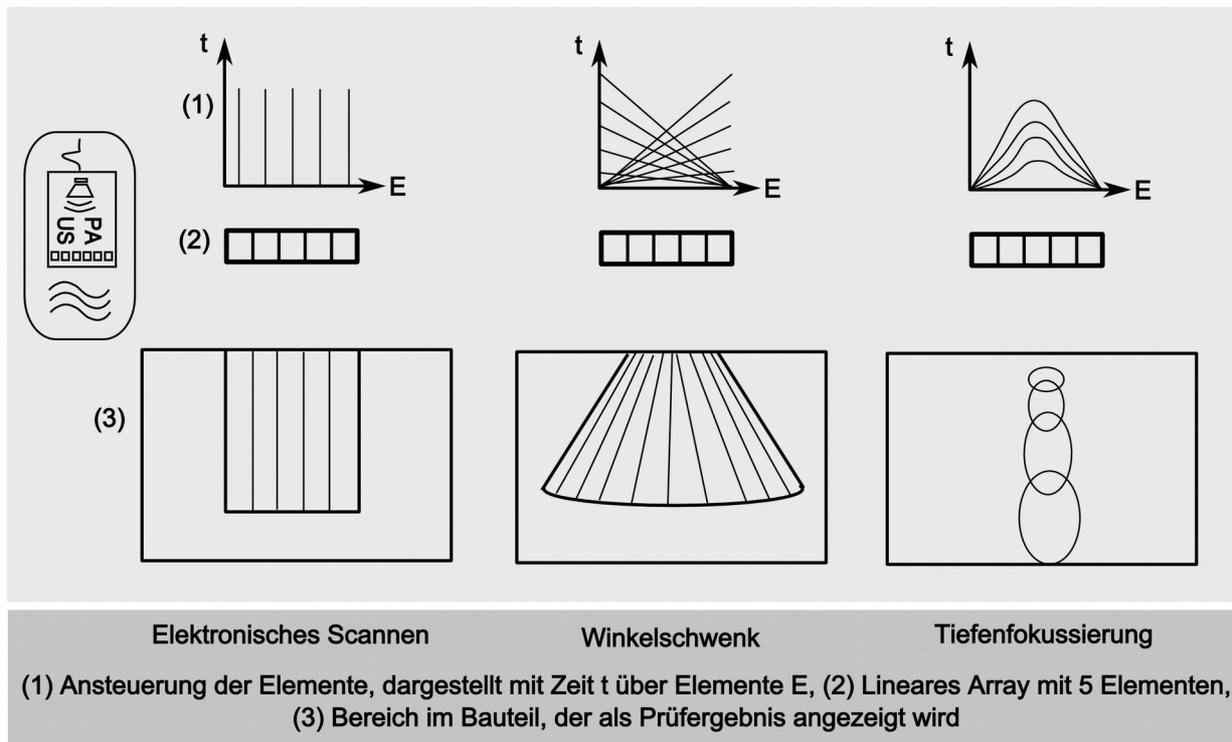


Abbildung 17: Darstellung von den unterschiedlichen Anwendungsmöglichkeiten der Phased Array Prüftechnik

Phased Array Ansteuerungsmöglichkeiten:

- Elektronisches Scannen

Beim elektronischen Scannen wird das mechanische Scannen simuliert. Beim mechanischen Scannen wird der Prüfkopf über das Bauteil bewegt, beim elektronischen Scannen bleibt der Phased Array Prüfkopf an einer Stelle und das Schallfeld wird durch elektronische Ansteuerung bewegt. Zunächst sendet die erste Gruppe an Elemente, dann die nächste, bis alle Elemente angesteuert wurden. Damit kann eine große Fläche auf einem Bauteil auf einmal geprüft werden. Dies wird auch für die Prüfung von Rohren von innen und außen verwendet. Dazu werden die Elemente des Prüfkopfes auf einem Ring platziert, entweder auf der Außenseite für die Prüfung eines Rohres von Innen oder auf der Innenseite für die Prüfung von Außen.

- Winkelschwenk

Die Elemente werden zeitlich verzögert angesteuert, so dass der Schall unter einem Winkel vom Prüfkopf ausgesendet wird. Der Schall wird nacheinander unter verschiedenen Winkeln ausgesendet, so dass das Ergebnis einen Sektor eines Winkelbogens darstellt.

- Tiefenfokussierung

Mit dieser Technik kann der Schall fokussiert werden. Es wird die Verwendung einer Linse beim konventionellen Ultraschall nachgeahmt. Es ist möglich nacheinander in verschiedene Tiefenzonen zu fokussieren, wodurch kein Wechsel von Prüfköpfen oder Variation der Wasservorlaufstrecke, um verschiedene Fokustiefen zu realisieren, notwendig ist.

Eine Besonderheit unter der Tiefenfokussierung ist das *Dynamic Depth Focussing*. Dabei ist es möglich mit einer ausgesendeten Schallwelle in Echtzeit verschiedene Tiefen zu fokussieren und nicht wie bei der normalen Tiefenfokussierung die unterschiedlichen Fokustiefen nacheinander anzusteuern [Lupi00]. Dadurch ist es möglich die Prüfungsgeschwindigkeit zu erhöhen.

Focal Laws sind im Normalfall für den Sende- und den Empfangsmodus die gleichen. Bei der *Dynamic Depth Focusing* Technik, wird ein *Focal Law* für das Senden verwendet und mehrere für den Empfang. Der ausgesendete Schall wird unfokussiert oder auf einen sehr tiefen Bereich fokussiert ausgesendet. Die beim Empfangen verwendeten *Focal Laws* fokussieren in unterschiedliche Tiefen. [Lama99]

Das resultierende Schallfeld kann als eine Faltung der angewendeten *Focal Laws* im Sendemodus (Anregungsfunktion) und der angewendeten *Focal Laws* im Empfangsmodus (Empfangsfunktion) angesehen werden. Schematisch dargestellt ist die Funktionsweise des Dynamic Depth Focussing in Abbildung 18.

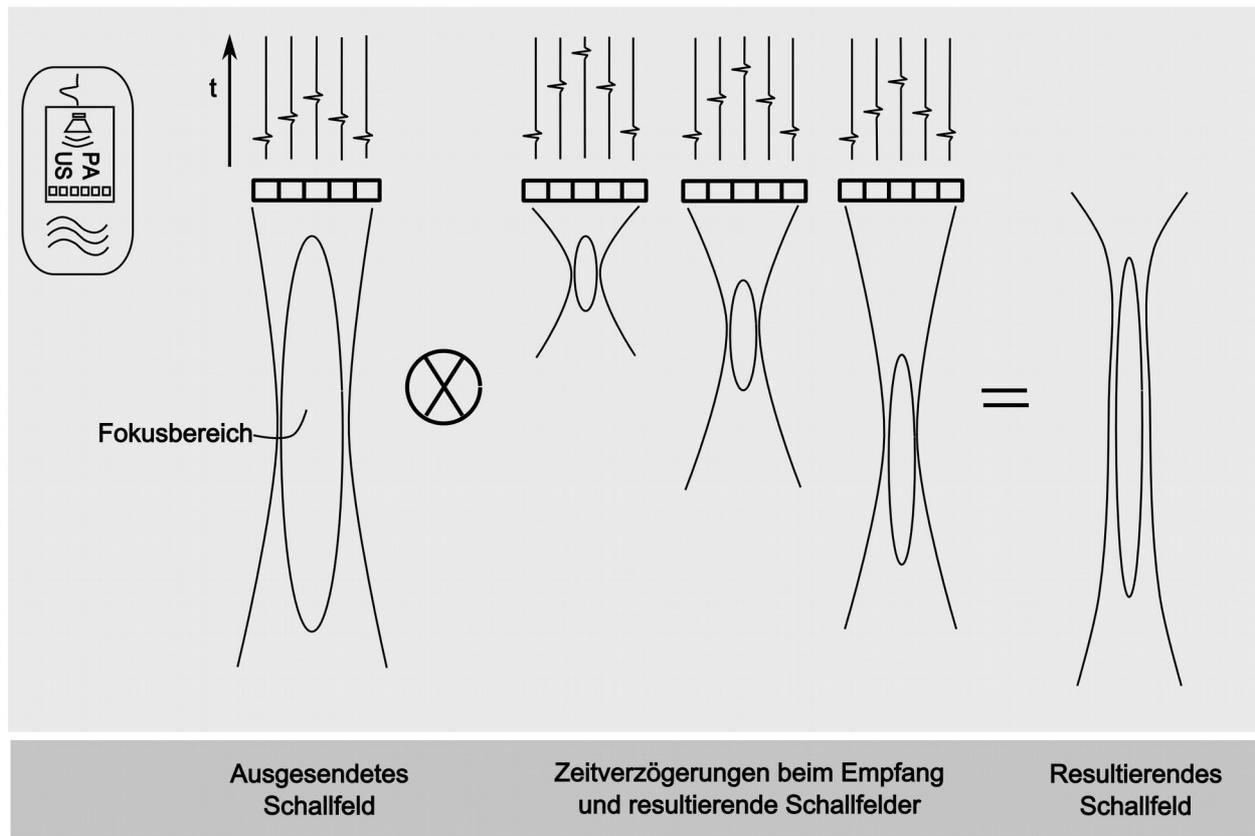


Abbildung 18: *Dynamic Depth Focussing*, Zeichnung angelehnt an Darstellung in [Olym04]

Die verschiedenen Array Geometrien lassen sich in vier Felder gliedern: eindimensionale Arrays (1-D), zweidimensionale Arrays (2-D), Ringarrays und 1,5D Arrays (siehe Abbildung 19). Bei 1-D Arrays sind die länglichen, schmalen Elemente auf einer Linie arrangiert. Sie ermöglichen eine zweidimensionale Bildgebung (Länge x Tiefe). Die Elemente von 2-D Arrays sind auf einer zweidimensionalen Ebene aufgebaut, dadurch ist eine dreidimensionale Bildgebung möglich (Länge x Breite x Tiefe). An manchen Stellen werden sie auch als 3-D Arrays bezeichnet. Sie zeichnen sich durch eine hohe Flexibilität aus. Neben Winkelschwenk in zwei Richtungen und Fokussierung in zwei Dimensionen, können sie auch verwendet werden um rotierende Winkelschwenks durchzuführen und somit einen großen Bereich auf einmal zu prüfen [Reve12, Kita10].

Als 1,5-D Arrays werden Arrays bezeichnet, deren Ausdehnung in die zweite Richtung reduziert ist. Ein Beispiel wäre ein Linienarray mit zwei bis drei parallelen Elementreihen. Die primäre Bildgebung ist entlang dieser Achse, allerdings ist ein Winkelschwenk oder Fokussierung im sehr geringen Maße in der orthogonalen Richtung möglich [Bart96].

Die Arrays können durch Linsen oder Verformung der Oberfläche vorkonfokussiert produziert werden oder mit einer flexiblen Oberfläche, so dass sie sich unebenen Bauteilen anpassen können [Olym04].

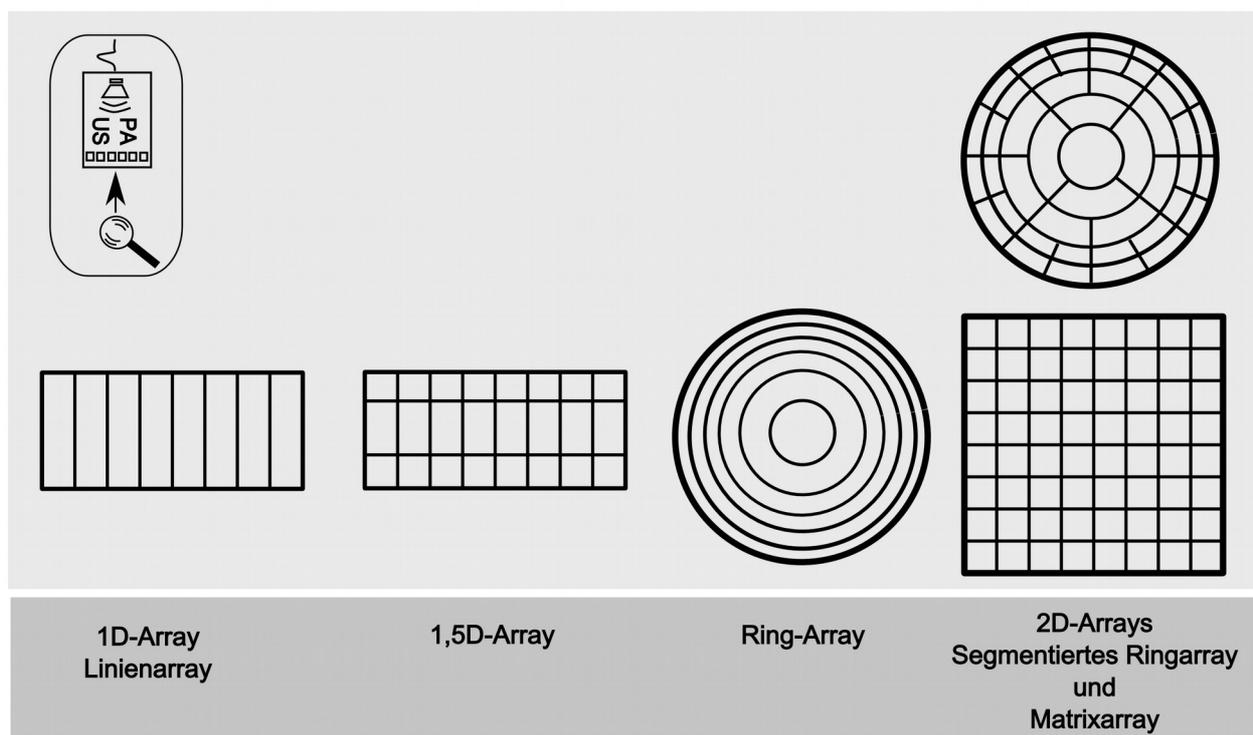


Abbildung 19: Schematische Darstellung der Phased Array Prüfkopf-Geometrien

In [Mart03] ist beschrieben, dass bei den 2-D Array Geometrien auch eine reduzierte Anzahl an Elementen ausreicht, um dieselbe Bildgebung wie bei der Verwendung des vollen Arrays zu erreichen. Die effektive Apertur bleibt gleich, auch wenn weniger Elemente verwendet werden.

Die Phased Array Prüfköpfe werden gewöhnlich aus *Piezocomposites* hergestellt, das heißt sie bestehen aus einer Polymermatrix, in die sehr kleine, piezokeramische Stäbe eingesetzt sind. Sie haben einen großen Vorteil für die Verwendung in Tauchtechnik, da sie eine geringere akustische Impedanz als konventionelle Piezokeramiken haben und somit besser für die Verwendung in Wasser, dessen Impedanz deutlich geringer als bei Festkörpern ist, verwendet werden. Die Anordnung der *Piezocomposites* erfolgt nach 1-3 Struktur [Drin06]. Weitere Information über *Piezocomposites* und den Aufbau nach 1-3 Struktur ist in [Hayw90] gegeben.

Beim Entwurf von Phased Array Prüfköpfen muss auf einige Besonderheiten geachtet werden. In der Literatur werden verschiedene Anforderungen an einen Prüfkopf genannt.

Design-Regeln für Phased Array Prüfköpfe

1. Alle Elemente müssen annähernd die gleiche Fläche haben, da die Amplitudenhöhe und Frequenz von der schwingenden Fläche abhängt. [Marg07]
2. Breite eines Piezoelements: $\lambda/2 < b < \lambda$, wobei λ die Wellenlänge ist. Für den Abstand von Beginn eines Elements zum Beginn des nächsten Elements, den Pitch, gilt: $p < \lambda/2$

Falls diese Design-Regeln nicht eingehalten werden, kommt es zu großen Nebenkeulen der einzelnen Elemente, die dann mit dem eigentlichen Signal interferieren. [Olym04]

3. Der Gangunterschied am gewünschten Fokuspunkt darf von keinem örtlichen Punkt auf einem Element um mehr als $\lambda/3$ abweichen, damit keine störenden Interferenzen auftreten. [Marg07]
4. Die Nahfeldlänge der gesamten Apertur muss mindestens so groß sein, wie die gewünschte Fokuslänge, da die elektronische Fokussierung nur dann am besten funktioniert, wenn sie kleiner als die natürliche Fokuslänge (= Nahfeldlänge) der gesamten Apertur ist. Falls die elektronisch erzeugte Fokuslänge größer ist als der Nahfeldbereich treten Abbildungsfehler auf. [Lupi01]
5. Der Prüfkopf muss den Kriterien des eingesetzten Phased Array Gerätes entsprechen. Für diese Arbeit wurde das Gerät Fokus LT 64/128 von Olympus verwendet. Für dieses Gerät können 64 Kanäle mit unterschiedlichen Zeitverzögerungen verwendet werden. Jeder Zeitverzögerung können zwei Elemente zugewiesen werden, da das Gerät über eine Multiplex-Funktion verfügt. Somit können 128 Elemente angesteuert werden.
6. Je mehr Elemente verwendet werden, desto besser wird das Schallfeld, da die Annäherung an die exakte Phase durch mehr Diskretisierungsschritte abgebildet werden kann. [Marg07]
7. Um das Materialrauschen durch das Gefüge in das Design mit zu berücksichtigen, kann das maximale Pulsvolumen des zu entwickelnden Prüfkopfes bestimmt werden, indem man das Pulsvolumen und das damit entstehende Rauschlevel am Material für unterschiedliche konventionelle Prüfköpfe ermittelt und diese Werte extrapoliert [Howa96]. Das Pulsvolumen berechnet sich aus dem Durchmesser des Schallfeldes und der Länge des Impulses.

8. Die Frequenz wird ausgewählt nach der Größe des Reflektors, der detektiert werden soll. [Meye00]
9. Falls die Winkelschwenkfunktion gewünscht ist, muss die Elementgröße so gewählt werden, dass für den gewünschten Winkel die Amplitude eines jeden Elements um nicht mehr als 6dB abfällt. Je kleiner die Elemente, desto größer der mögliche Winkel. [Meye00, Olym04]

3 Konzepte der Ultraschallprüfung im Triebwerksbau

In diesem Kapitel werden Konzepte der Ultraschallprüfung für Bauteile in Billet- und Scheibengeometrie vorgestellt. Es werden die typischen Ultraschallprüfungen beschrieben, so wie sie derzeit durchgeführt werden. Dies dient als Grundlage für die weiteren Kapitel, die auf das hier beschriebene Wissen aufbauen.

3.1 Kalibrierung

Für alle Prüfungen mit Ultraschall ist im Triebwerksbau eine Kalibrierung vorgeschrieben. Für die Kalibrierung werden Referenzreflektoren benötigt. Im Normalfall werden hierfür Flachbodenbohrungen mit einem definierten Durchmesser in unterschiedlichen Tiefen verwendet. Die Bauteile, in denen die Referenzreflektoren eingebracht sind, heißen Referenzkörper.

Die Kalibrierung der Ultraschallprüfung von Triebwerksbauteilen ist in [Meng13] ausführlich beschrieben und wird hier kurz dargestellt. Für jede Prüfung ist ein Prüfbereich definiert, der Bereich im Bauteil, der mit Ultraschall überprüft werden soll. Im Normalfall sind zwei Bauteiltiefen (Abstand von der Oberfläche des Bauteils) angegeben die den Prüfbereich eingrenzen. Es müssen mehrere Flachbodenbohrungen in unterschiedlichen Tiefen im Prüfbereich vorhanden sein. Mindestens am Beginn des Prüfbereichs, am Ende und in der Mitte. Für die Kalibrierung wird dasselbe Prüfsystem wie bei der Prüfung verwendet (gleicher Prüfkopf, gleiche Kabel, gleiche Einschallrichtung, etc.).

Die Flachbodenbohrungen werden angeschallt und die Verstärkung des Prüfgerätes so eingestellt, dass die Amplitudenhöhe des reflektierten Signals 80% der Bildschirmhöhe des Anzeigeelements erreicht. Da der Schalldruck geringer wird, je tiefer der Reflektor im Bauteil liegt, muss die Verstärkung für unterschiedliche Tiefe angepasst werden. Dazu wird eine Funktion verwendet, die die Amplitude in unterschiedlichen Tiefen korrigieren kann, sie heißt Distance Amplitude Correction (DAC) [Mata72].

Die so eingestellte Verstärkung wird für die gesamte Prüfung verwendet. Sobald ein reflektierte Amplitude größer als 80% Bildschirmhöhe ist, ist die Reflektivität der Fehlstelle größer als die für die Kalibrierung verwendete Flachbodenbohrung. Die Kalibrierung ist die Grundlage für die Bewertung der Ultraschallprüfung. Sie definiert die Empfindlichkeit der Prüfung. Alle Anzeigen, die größer sind als die kalibrierte Fehlergröße, werden sofort als kritisch bewertet.

3.2 Multizonentechnik

Bei der Multizonentechnik ist das Bauteil in verschiedene Zonen unterteilt. Für jede dieser Zonen

wird ein fokussierter Prüfkopf verwendet. Diese sind so definiert, dass ihre Fokusbereiche in unterschiedlichen Bauteiltiefen sind, die sich überlappen. So kann ein großer Tiefenbereich mit hoher Empfindlichkeit geprüft werden [Niet95].

Der Begriff Multizonentechnik entstand bei der Entwicklung einer Ultraschallprüfung von Billets, die eine hohe Fehlerempfindlichkeit hat. Mittlerweile wird der Begriff für alle Prüfungen mit mehreren fokussierten Prüfköpfen eingesetzt.

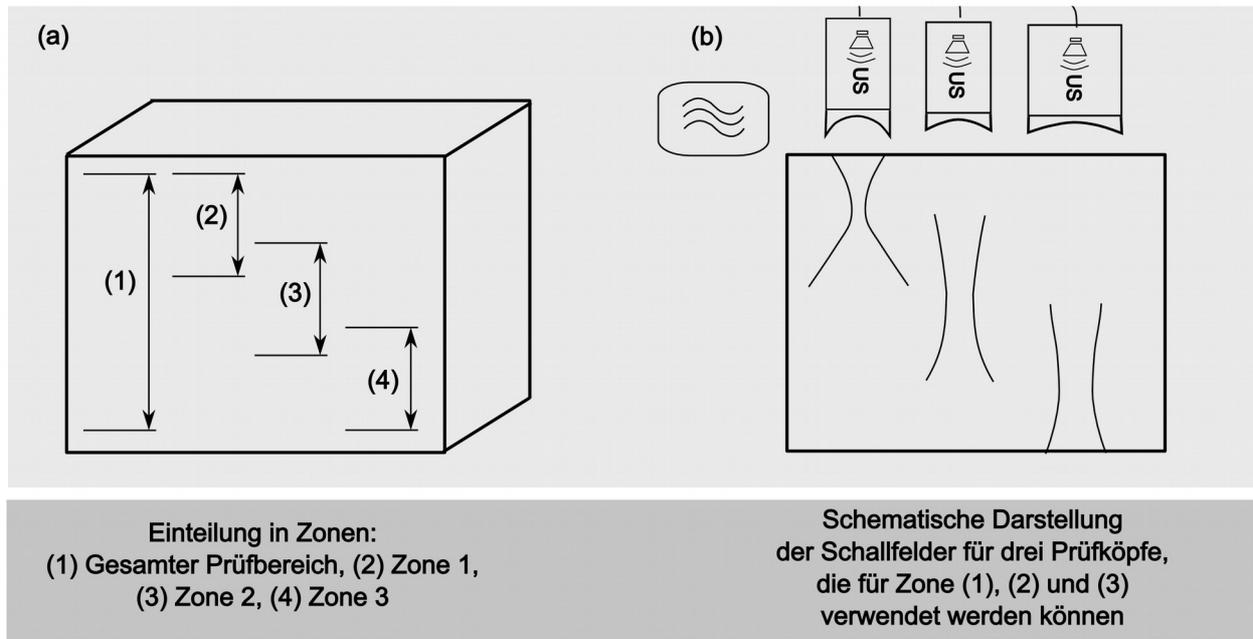


Abbildung 20: (a) Beispiel für eine Einteilung in Zonen, (b) Schematische Darstellung der Schallfelder von drei unterschiedlich fokussierten Prüfköpfen

In Abbildung 20 (a) ist ein Beispiel für die Einteilung der Zonen gegeben. Das gesamte Bauteil soll geprüft werden. Für die Multizonenprüfung wird es in drei Zonen unterteilt. In Abbildung 20 (b) ist schematisch angedeutet, welche Schallfelder die fokussierten Prüfköpfe im Bauteil erzeugen und dass diese jeweils im Bereich einer Zone einen schmalen Durchmesser und somit eine hohe Prüfempfindlichkeit haben.

3.2.1 Multizonenprüfung von Billets

Das Billet wird, wie weiter oben erwähnt, aus einem Ingot, dem Guss-Rohteil, durch Schmieden zu einem Stangenmaterial geformt. An der Billetgeometrie wird die erste Ultraschallprüfung der Fertigungsreihe durchgeführt, um zu verhindern, dass beim Gießen entstandene Materialdefekte in dem Material weiterverarbeitet werden.

Das Gefüge im Billetmaterial ist sehr grobkörnig, da noch sehr wenige Verformungsschritte daran vorgenommen wurden. Das gegossene Werkstück wird lediglich durch zwei Hammerschläge in runde Form gebracht. Dadurch sind die großen Körner in Längsrichtung des Billets orientiert [Howa96-2]. Dies ist eine große Herausforderung für die Ultraschallprüfung, da der Schall an großen Körnern stärker gestreut wird als an kleinen. Eine weitere Herausforderung ist die

Einschallung über die Mantelfläche eines Zylinders und dabei ein schmales Schallbündel über den gesamten Tiefenbereich zu erzeugen.

Für die Multizonenprüfung an Billets wurden spezielle, fokussierte Prüfköpfe entwickelt. Um der gekrümmten Einschallfläche Rechnung zu tragen, ist der Prüfkopf bi-zylindrisch fokussiert. In Wasser existieren dadurch zwei getrennte Fokuspunkte. In dem zylindrischen Metall überlagern sie sich zu einem [Marg02]. Aus diesem Grund müssen die Prüfköpfe mit der vorgeschriebenen Wasservorlaufstrecke verwendet und können nur für einen Billetdurchmesser benutzt werden. Die Entwicklung der Prüfköpfe wird in [Kell05] beschrieben. Die Fokussierung der Prüfköpfe ist sehr gut, dennoch bleibt das Schallfeld im Fokusbereich elliptisch, wodurch die Prüfempfindlichkeit verringert wird [Lupi00].

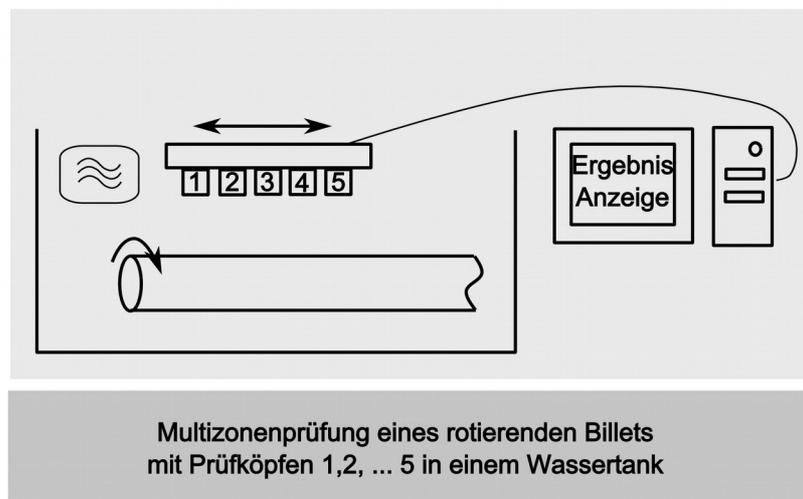


Abbildung 21: Schematische Darstellung des Prüfungsaufbaus für die Multizonenprüfung von Billets

Der Prüfaufbau für die Billetprüfung ist schematisch in Abbildung 21 gezeigt. Das Billet wird rotierend geprüft und in mehrere Prüfzonen unterteilt, für die ein einzelner Prüfkopf verwendet wird, dessen Fokussierung für diesen Prüfbereich optimiert ist. Für 10 - 12 Zoll Billets sind zum Beispiel sieben Prüfzonen mit sieben verschiedenen Prüfköpfen notwendig. Die Prüfköpfe sind nacheinander in einer Vorrichtung platziert. Diese wird über das rotierende Billet gefahren und gleichzeitig alle Signale der einzelnen Prüfköpfe aufgenommen. Dazu wird ein mehrkanaliges Ultraschallgerät verwendet. Somit kann das gesamte Billet in einem Durchlauf abgetastet werden. Die Signale der Prüfköpfe werden in C-Bildern dargestellt und eine Signal-Rausch-Abstand Untersuchung wird durchgeführt [Gilm96].

3.2.2 Multizonenprüfung von Schmiedescheiben

Die Prüfung der geschmiedeten Scheiben ist komplexer als die Prüfung der Billets. Dies liegt zum einen an der Geometrie der Scheiben, die Stufen und Nuten haben können. Zum anderen liegt es an der Orientierung der Materialdefekte im Bauteil.

Die Scheiben werden beim Schmieden in Formen gepresst. Dabei fließt die Knetlegierung in die

vorgegebene Form. Falls Materialdefekte im Bauteil vorhanden sind, werden diese durch den Druck entlang der Fließrichtung des Metalls gestreckt und orientiert.

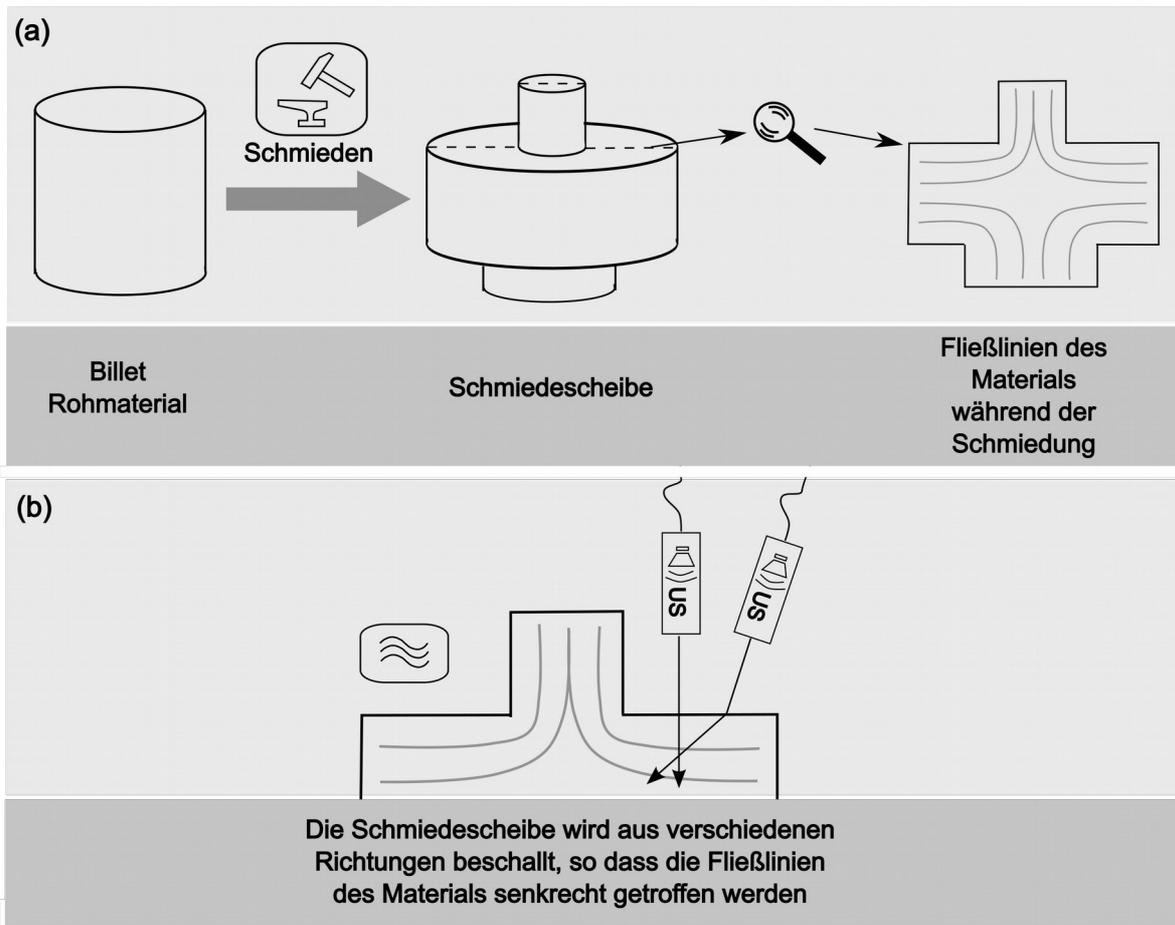


Abbildung 22: (a) Ein Beispiel für Fließlinien an einer aus einem Billet geschmiedeten Scheibe, (b) Angepasste Prüfbahnen an die Fließlinien im Material

Da bei der Impuls-Echo-Technik länglich ausgedehnte Reflektoren möglichst senkrecht getroffen werden müssen, muss die Prüftechnik auf die Orientierung der Fehler angepasst werden.

Die Fließrichtung des Materials lässt sich vor dem Schmieden simulieren und kann durch Fließlinien dargestellt werden (siehe Abbildung 22 (a)). Bei der Simulation des Schmiedeprozesses werden Finite Elemente oder Finite Volumen Methoden verwendet. Es wird ein Raster auf das Bauteil gelegt, an dem nach der Simulation die Verformung abgelesen werden kann [Buij08].

Durch die Fließlinien kann der Winkel bestimmt werden, unter dem Materialdefekte detektiert werden können. Die Prüfköpfe werden dann zur Prüfung so geneigt, dass der Schall unter dem entsprechenden Winkel auf die Fließlinien trifft. Da es nicht möglich ist, jede Fließlinie durchgehend mit 90° zu treffen, müssen Annäherungen getroffen werden (siehe Abbildung 22 (b)). Dies führt dazu, dass ein Prüfbereich unter verschiedenen Winkeln abgetastet wird. Diese werden auch als Prüfbahnen bezeichnet. Da die Prüfung mit Multizonentechnik stattfindet, muss jede Prüfbahn mit mehreren Prüfköpfen abgefahren werden, die in den unterschiedlichen Zonen

fokussiert sind.

Für die Schmiedescheibenprüfung gibt es keine speziell entwickelten Prüfköpfe. Es werden einfache, fokussierte Prüfköpfe verwendet. Um die Fokustiefe im Bauteil zu variieren kann die Wasservorlaufstrecke verändert werden. Die entsprechende Wasservorlaufstrecke kann mit Gleichung (3.1) berechnet werden.

$$WVS = FL - \frac{c_2}{c_1} \times FT \quad [\text{Meng13}] \quad (3.1)$$

mit WVS = Wasservorlaufstrecke (Abstand von Prüfkopf zur Bauteiloberfläche im Wasserbecken), FL = Fokuslänge, FT = Fokustiefe im Bauteil, c = Schallgeschwindigkeit

Die Bauteile werden in Tauchtechnik geprüft. Die Scheiben werden auf einem Drehteller in einem Wasserbecken platziert. An einem beweglichen Aufbau wird der Prüfkopf befestigt. Dieser kann in vier Dimensionen über das Bauteil bewegt werden (Bewegung in x-y-Richtung, Schwenken des Prüfkopfs in zwei Richtungen).

3.3 Phased Array Prüfung

Durch ihre große Flexibilität kann die Phased Array Technik bei den Bauteilen der Triebwerkshersteller Vorteile bringen. In [Meng10] werden Potentiale der Phased Array Technik für den Triebwerkshersteller MTU Aero Engines AG genannt. Die Technik kann für Billets und Schmiedescheiben verwendet werden. Die Arrays werden für die Fokussierung benutzt und sollen einen Vorteil in Prüfgeschwindigkeit und damit Prüfkosten bringen. Durch ihre Flexibilität und die Fähigkeit zum Winkelschwenk kann die Technik die POD verbessern, da durch sie Abweichungen von den theoretischen Prüfbedingungen, so wie Materialfehler unter einer anderen Ausdehnung und Probleme mit der Oberflächengüte des Bauteils (siehe Kapitel 8.1.6), ausgeglichen werden können.

In anderen Feldern des Flugzeugbaus wird die Phased Array Technik schon serienmäßig eingesetzt. Bei genieteten Aluminiumblechen wird die Technik bei der Detektion von Rissen in den Nietnähten verwendet [Hick09]. Risse in der Umgebung der Nietlöcher können nur detektiert werden, wenn sie sich in geeigneter Richtung ausbreiten. Durch die Verwendung von Arrays in Kontakttechnik können auch Risse detektiert werden, die in ungünstigere Richtungen laufen. Zur Detektion von Korrosion in der Struktur des Flugzeugs wird in der Instandhaltung die Phased Array Technik mit angepassten Prüfköpfen verwendet [Rau06]. Weitere Beispiele sind in der Literatur zu finden.

3.3.1 Phased Array Prüfung von Billets

Bei dem Phased Array Ansatz zur Biletprüfung soll die Unterteilung in Prüfzonen entfallen und die gesamte Prüfung mit einem Prüfkopf durchgeführt werden. Es wird ein Prüfkopf verwendet, der in der gesamten Bauteiltiefe fokussieren kann. Durch die elektronische Ansteuerung kann der Fokuspunkt so erzeugt werden, dass die geometrischen Probleme der Einschallung von der Mantelfläche eines Zylinders eliminiert werden und ein perfekt runder Fokuspunkt in allen Tiefen erreicht wird [Lupi00].

Die Phased Array Technik mit dem hier beschriebenen Prüfkopf verspricht eine Verbesserung der

POD, da ein rundes Schallbündel im gesamten Tiefenbereich gegeben ist, das kleiner als das elliptische Schallbündel der Multizonenprüfung ist. Abgesehen von der Form, ist davon auszugehen, dass das Schallbündel auch durch die Größe des Arrays kleiner wird. Bei größerer Prüfkopf-Apertur und gleicher Frequenz ist die Schallbündelbreite im Fokuspunkt deutlich kleiner. Bei konventionellen, fokussierten Prüfköpfen ist es nicht möglich, diese in beliebiger Größe herzustellen. Bei Phased Array Prüfköpfen ist es durch die Segmentierung in Einzelelemente möglich die Apertur weitaus größer zu bauen [Lupi03].

Die Geometrie, Größe des Prüfkopfes und die Einteilung der Elemente, wurde durch dreidimensionales Ray-Tracing ermittelt. Dabei wird zu Grunde gelegt, dass an jeder Stelle im Billet ein runder Fokus erreicht werden soll. Die einfallenden Strahlen an diesen Punkten werden zum Prüfkopf zurück verfolgt und die Parameter dieses so gewählt, dass diese Fokussierung überall erreicht werden kann. Der Prüfkopf muss eine elliptische Form haben, um der Krümmung der zylindrischen Oberfläche entgegen zu wirken [Lupi00].

Um den runden Fokuspunkt in allen Prüftiefen erreichen zu können, müsste eigentlich eine Oberfläche verwendet werden, die dem Fermat¹ Prinzip gehorcht (im folgenden Fermat Oberfläche genannt). Dies hätte zur Folge, dass eine technisch nicht mehr realisierbare Anzahl an Elementen verwendet werden müsste. Darum wurde die Oberfläche so optimiert, dass ein guter Kompromiss zwischen Fermat-naher Fokussierung und wenigen Elementen erreicht wird [Lupi05].

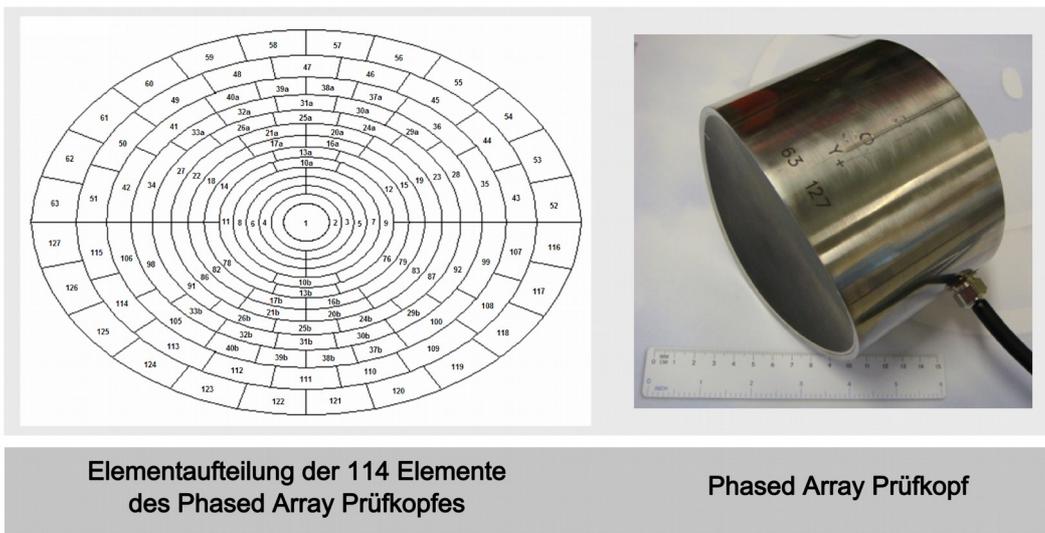


Abbildung 23: Phased Array Prüfkopf

Der Prüfkopf, der für die Untersuchungen, die in dieser Arbeit beschrieben sind (siehe Kapitel 8.1) gefertigt wurde, ist nach den oben erwähnten Prinzipien entwickelt. Er hat eine Frequenz von 5MHz und 114 Elemente, wobei das innerste ein komplettes Kreiselement ist und die anderen Elemente ringförmig darum angeordnet sind. Die innersten Ringe sind komplett durchgängige Elemente. Je weiter die Ringe von dem Mittelelement entfernt sind, desto öfter werden sie segmentiert (gleiche Fläche, **Designregel 1**). Einige der Elemente sind elektronisch verbunden, da sie durch den

¹ Das Fermat Prinzip besagt, dass der Schall immer den Weg zwischen zwei Punkten wählt, bei dem er die kürzeste Laufzeit zurücklegen muss.

symmetrischen Aufbau des Prüfkopfes die gleichen Zeitverzögerungen haben. Insgesamt muss der Prüfkopf mit 98 verschiedenen Zeitverzögerungen angesteuert werden. Der Prüfkopf und die Elementaufteilung sind in Abbildung 23 zu sehen.

Die Verzögerungszeiten müssen für jeden Prüfkopf neu berechnet werden, um geometrische Abweichungen der einzelnen Elemente von der idealen Form auszugleichen. Die Abweichungen werden aus den Schalllaufwegen zu einer Kalibrierfläche bestimmt und zu den Verzögerungszeiten, die zur Fokussierung verwendet werden addiert. Somit sind mögliche Fertigungsschwankungen abgefangen [Lupi03]. Eine Kalibrierfläche wird verwendet, die an die ideale Oberfläche des Prüfkopfes angepasst ist. Der Prüfkopf wird davor platziert und die Abweichungen im Schalllaufweg gemessen (siehe Abbildung 24 (a)).

Am Prüfgerät kann eine Konfiguration erstellt werden, bei dem ausgewählte Elemente des Prüfkopfes untereinander angezeigt werden. Der Prüfkopf ist erst dann ausgerichtet, wenn alle Elemente in einer Linie liegen.

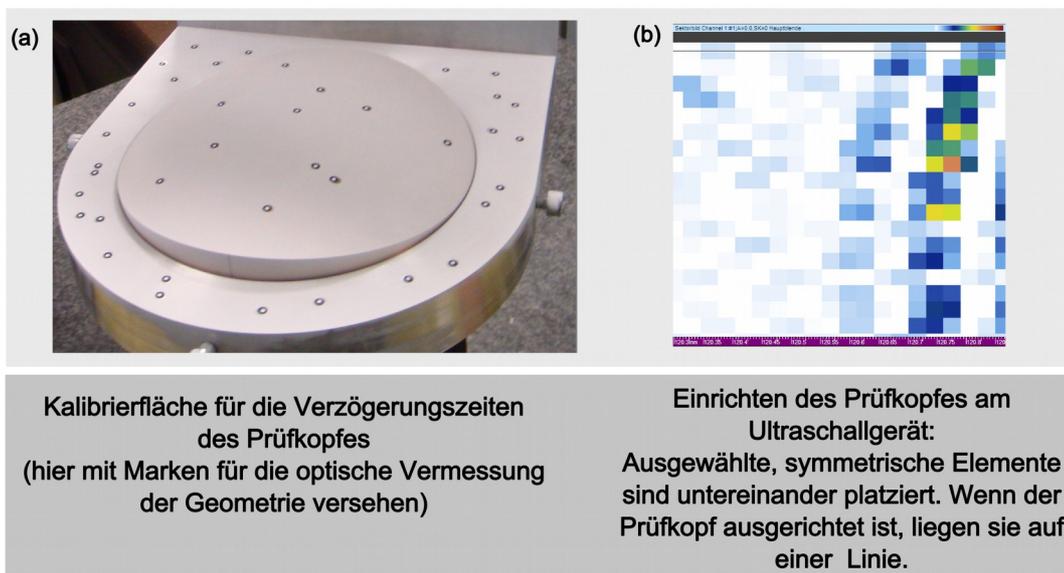


Abbildung 24: (a) Kalibrierfläche für die Verzögerungszeiten, (b) B-Bild zur Ausrichtung der Elemente an einer Oberfläche

Um eine Prüfung der kompletten Billettiefe mit einem Prüfkopf und einer ausgesendeten Schallwelle zu gewährleisten, wird Dynamic Depth Focussing verwendet [Lupi00] (siehe Kapitel 2.3). Die Verzögerungszeiten sind so berechnet, dass die Schallwelle mit einer sehr tiefen Fokussierung ausgesendet wird und bei den Verzögerungszeiten für den Empfang wird feiner fokussiert. Die Prüfung läuft nach der Ausrichtung des Prüfkopfes ab wie bei der Multizonenprüfung. Es wird ein C-Bild erzeugt, das ausgewertet werden muss.

3.3.2 Phased Array Prüfung von Schmiedescheiben

Bei der Prüfung von Schmiedescheiben ist die Entwicklung eines allgemein verwendbaren Prüfkopfes und Phased Array Prüftechnik schwer, da sie unterschiedliche Prüftiefen, unterschiedliche Geometrien und verschiedene Anforderungen an die Empfindlichkeit haben. Für

ein Beispiel einer Schmiedescheibe ist die Entwicklung eines Prüfkopfes in Kapitel 8.2 beschrieben.

4 Ultraschall Simulation

Mit Ultraschall-Simulationen kann das bei der Prüfung entstehende Schallfeld schon vor den Feldversuchen abgeschätzt werden. Sie sind sehr realistisch und ein wertvolles Hilfsmittel beim Entwurf von neuen Prüfaufbauten und der Entwicklung von neuen Prüftechniken.

In diesem Kapitel wird zunächst vorgestellt, welche Arten von Ultraschall-Simulationen es gibt und zwei Simulations-Programme werden näher beschrieben. Anschließend wird auf simulationsbasierte POD-Ermittlung eingegangen.

4.1 Stand der Technik

Es werden viele verschiedene Techniken zur Simulation von Ultraschallwellen verwendet. Vier Hauptkategorien können unterschieden werden: Analytische Methoden, Ray-Tracing, semi-analytische Methoden und voll numerische Methoden. Zu den numerischen Methoden gehören Finite Elemente Methode, Randelement-Methode, Elastodynamische Integral Methode [Gust11, Mark06].

Analytische Methoden

In einfachen Fällen gibt es eine analytische Lösung der Wellengleichung. Ein Beispiel für einen einfachen Fall ist eine Welle in einem isotropen, homogenen Körper im Halb- und Vollraum.

Finite Elemente Methode (FEM)

Durch Zerlegen in kleinere Teilbereiche können kontinuierliche Prozesse vereinfacht dargestellt werden. Es werden u.a. linear-elastische Bewegungen berechnet. Für jedes Element wird über das Matrizenverschiebungsverfahren, die Verschiebung aufgrund von äußeren Lasten berechnet [Rieg12].

Randelementmethode (Finite Boundary Element Methods BEM)

Diese Methode ist eine Unterklasse der Method of Moments (MoM) [Mark06]. Die zu lösenden Unbekannten sind nur auf den Grenzflächen zu finden. Die Lösung für die im Inneren der Grenzflächen liegenden Bereiche wird in einem *post-processing* Prozess berechnet. Dadurch reduziert sich der Rechenaufwand gegenüber den FEM-Methoden [Ashr04].

Elastodynamic Finite Integral Methode (EFIT)

Finite Integral Methoden werden verwendet um die Maxwell-Gleichungen in der Elektrotechnik zu diskretisieren. Dieselbe Methode kann verwendet werden, um die elastodynamischen Wellen numerisch darzustellen. Dazu wird das Volumen- und Oberflächen-Integral für alle kubischen

Diskretisierungsintervalle untersucht und ein versetztes Raster wird verwendet [Fell95].

Ray-Tracing Methoden

Ray-Tracing ist ein Begriff aus der Entwicklung von Linsen. Um die Linsen zu entwerfen, wurde auf Papier der Weg, den die Lichtstrahlen gehen, aufgezeichnet, ausgehend von der Lichtquelle, durch die Linsen und darüber hinaus. Es wird auch in der Computergrafik für die Darstellung von realistischen, gerenderten Bildern verwendet, dabei wird auf Basis einer dreidimensionalen Welt ein realistisches zweidimensionales Bild geschaffen [Hain89].

Für die Ultraschallwellen wurde das Ray-Tracing zur Pencil Methode weiterentwickelt. Die sich von der Punktquelle konisch entfernenden Strahlen werden dabei Pencils genannt [Geng03]. Der Schallweg wird dabei verfolgt. Ausführlich wird auf den Einsatz von der Pencil Methode in Kapitel 4.2 eingegangen.

Semi-analytische Methoden

Zu den semi-analytischen Methoden zählt u.a. die Point-Source-Synthesis. Dabei werden im Gegensatz zu den numerischen Verfahren einige Informationen, wie z.B. Oberflächenwellenabspaltungen oder mehrfache Streuung vernachlässigt. Daher sind sie nicht so genau, wie die numerischen Verfahren, haben aber einen großen Vorteil durch geringere Rechenzeit [Schu07]. Für die gängigen Simulationsberechnungen werden die verschiedenen Simulations-Philosophien kombiniert, um den besten Kompromiss aus kurzer Rechenzeit und genauer Modellierung zu erhalten [Schu07].

4.2 CIVA

Das kommerziell erhältliche Simulationsprogramm CIVA¹ ist ein gutes Beispiel für das hybride Modell. Es vereinigt semi-analytische Methoden, Ray-Tracing und für sehr kleine Bereiche numerische Methoden. Dadurch ist eine rechenzeitsparende Simulation möglich. Allerdings ist das Programm in Genauigkeit der Berechnungen den rein numerischen oder analytischen Verfahren unterlegen.

CIVA ist aus zwei Modulen aufgebaut. Das erste simuliert die Ausbreitung des Schallfelds in den Materialien, das zweite simuliert die Prüfung eines Werkstücks, dabei wird die Fehlerantwort auf einen modellierten Materialfehler angezeigt [Calm00].

Pencil Methode

Eine grundlegende Annahme für die Pencil Methode ist, dass eine Kugelwelle, als ebene Welle angesehen werden kann, wenn der Abstand von der Quelle einige Wellenlängen beträgt. Das Fermat'sche Prinzip wird angewendet, bei dem davon ausgegangen wird, dass der Schall den Weg nimmt, bei dem er die kürzeste Laufzeit hat. Brechungen beim Übergang zwischen zwei Materialien werden mit dem Gesetz von Snellius berechnet. Als Pencil werden Strahlen, die sich konisch von einer Punktquelle ausbreiten, bezeichnet. Der Scheitelpunkt des Konus liegt bei der

¹ Die Software wird vom französischen Forschungsinstitut CEA LIST (<http://www-list.cea.fr/>) entwickelt und von der Firma Extende weltweit vertrieben (<http://www.extende.com>). Es sind Simulationen für Ultraschall, Wirbelstrom und Röntgen möglich.

Punktquelle. Es gibt einen axialen Schallstrahl, der auch als Pfad stationärer Phase beschrieben wird, und einen Schallstrahl, der entlang der Einhüllenden des Konus läuft. Der Pencil an einem Ort wird als Vektor \vec{v} mit vier Elementen, dx, dy, dsx, dsy dargestellt [Geng03]. Der Vektor ist in Gleichung 4.1 zu sehen.

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} dx \\ dy \\ dsx \\ dsy \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

dx und dy sind der Abstand des Schallstrahls auf der Einhüllenden vom axialen Schallstrahl. dsx und dsy geben die Richtung des Schallstrahls auf der Einhüllenden an, diese beiden Werte werden auch als *Slowness Vektor* bezeichnet.

Um die Ausbreitung des Pencils von einem Ort P zu einem anderen Ort P', an dem der Pencil zu einem späteren Zeitpunkt ist, zu beschreiben, wird eine 4x4 Matrix L verwendet, wobei die Elemente der Matrix als 2x2 Untermatrix anzusehen sind. Dies ist in Gleichung 4.2 dargestellt.

$$\vec{v}' = \underline{L} \cdot \vec{v} = \begin{bmatrix} \underline{A} & \underline{B} \\ \underline{C} & \underline{D} \end{bmatrix} \cdot \vec{v} \quad [\text{Geng03}]. \quad (4.2)$$

In der Matrix L sind Informationen über das Material gespeichert.

Für homogenes, isotropes Material, das für diese Arbeit angenommen wird, ist die Matrix wie in Gleichung 4.3 aufgebaut.

$$\underline{L} = \begin{bmatrix} \underline{1} & r \underline{1} \\ \underline{0} & \underline{1} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

wobei $\underline{1}$ eine 2x2 Einheitsmatrix und $\underline{0}$ eine 2x2 Nullmatrix ist. r ist der Abstand zwischen den Punkten P und P'. s ist die *Slowness* in diesem Material.

Für anisotrope und inhomogene Materialien wird die Matrix komplexer. Dies kann in [Geng03] nachgelesen werden.

Numerische Modelle

Das semi-analytische Modell, das in CIVA verwendet wird um die Schallfelder zu berechnen basiert auf dem Rayleigh Integral für die abgestrahlte Welle [Leym06]. Die Interaktion mit Fehlern im Bauteil wird mit numerischen Methoden berechnet, da sie in der Regel nicht semi-analytisch dargestellt werden kann. Die Gleichungen, die dazu numerisch dargestellt werden, sind die Kirchhoffschen Gleichungen für elastodynamische Wellenausbreitung [Calm00].

Durch die Kirchhoffschen Integralgleichungen können allgemeine Lösungen der Wellengleichung direkt ermittelt werden. In Gleichung 4.4 ist sie in skalarer Form dargestellt.

$$p(Q) = \frac{1}{4\pi} \int_S \left(\frac{e^{-jkr}}{r} \frac{\partial p}{\partial n} - p \frac{\partial}{\partial n} \frac{e^{-jkr}}{r} \right) dS \quad [\text{Lerc09}] \quad (4.4)$$

p(Q) ist der Schalldruck an einem beliebigen Punkt Q im Integrationsgebiet, das von der Oberfläche

S eingeschlossen wird. $\frac{\partial}{\partial n}$ ist die Ableitung in Normalenrichtung auf der Oberfläche S und ist proportional zur Schallgeschwindigkeit in Normrichtung. r ist der Abstand zwischen dem Punkt Q und dem Flächenelement dS. Das Element $\frac{1}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r}$ beschreibt eine Kugelwelle 0. Ordnung. Der Schalldruck p(Q) für einen beliebigen Punkt Q kann berechnet werden, wenn der Schalldruck p und die Schallgeschwindigkeit auf der umschließenden Fläche bekannt sind. Da beide abhängig voneinander sind, reicht einer dieser Werte, aus dem der andere berechnet werden kann. [Lerc09]

Das Rayleigh-Integral, das die Grundlage für das semi-analytische Modell darstellt, ist das Kirchhoffsche Integral am Ort des Schwingers für den Sonderfall, dass der Schwinger eine unendliche, harte Wand darstellt. In diesem Fall wird die Bewegung in Normalenrichtung gleich 0 und der zweite Teil des Kirchhoffschen Integrals fällt weg. Die sich somit ergebende Gleichung ist in Gleichung 4.5 dargestellt.

$$p(Q) = \frac{1}{4\pi} \int_S \frac{e^{-jkr}}{r} \frac{\partial p}{\partial n} dS \quad [\text{Heut14}] \quad (4.5)$$

Die Abstrahlung vom Prüfkopf wird numerisch mit dem Rayleigh-Integral beschrieben. Die aussendende Oberfläche des Prüfkopfes ist diskretisiert in einzelne Punktquellen. Das entstehende Schallfeld wird aus der Überlagerung der einzelnen Punktquellen-Schallwellen erzeugt. Die Schallwellen der Punktquellen werden mit der Greenschen Funktion beschrieben, welche im weiteren Verlauf der Simulation über die Pencil Methode angenähert wird [Geng03].

Die Greensche Funktion ist in [Lerc09] beschrieben und wird zur Herleitung des Kirchhoffschen Integrals verwendet.

Für sehr kleine Materialfehler, im Vergleich zur Wellenlänge, ist das Kirchhoff'sche Modell ungenau, daher wird für kugelförmige Strahler in diesen Bereich die SOV (Separation of Variables) Methode, auch Ying & Truell Modell genannt, verwendet [Domi12, Ying56].

4.3 Hybrides EFIT

Mit dem hybriden EFIT wurde die Methode in Hinblick auf Rechenzeitverringerung und Speicherplatzverringerung weiterentwickelt. Damit kann EFIT auch auf normalen Standard-Rechnern praktikabel verwendet werden. Die numerische EFIT-Methode wird gemeinsam mit der transienten Punktquellensynthese und Ray-Tracing verwendet. Das ausgesendete und rückgestreute Feld wird numerisch mit 3D-EFIT berechnet, die restliche Ausbreitung wird semi-analytisch betrachtet [Schu12]. Im Folgenden wird der Aufbau des hybriden EFIT wie in [Schu12] vorgestellt beschrieben.

Die ausgesendete Schallwelle wird entweder mit CEFIT [Schu01] für achsensymmetrische Schwinger oder mit EFIT-PSS [Schu10] berechnet. Aus dem berechneten Schallfeld werden Poynting-Vektoren extrahiert, die die Eingangsparameter für das Ray-Tracing darstellen. Materialübergänge werden nach dem Gesetz von Snellius berechnet. Die geometrische Schwächung wird aus der Aufweitung des Schallbündels berechnet. Die frequenzabhängige Schallschwächung aufgrund des Gefüges und im Wasser wird entweder analytisch berechnet oder empirisch bestimmt.

Um die Reflexion am Fehler zu berechnen, wird wieder auf die gesamte Wellenphysik zurückgegriffen und numerisch mit EFIT berechnet. Wenn die Fehlergeometrien dem in der Literatur definierten Geometrien entsprechen, können analytische Methoden zum Einsatz kommen. Falls eine numerische Lösung benötigt wird, wird die diskretisierte Zone sehr schmal um den Reflektor gelegt. Auch hier braucht das zurückreflektierte Schallfeld nur einmal für einen Streuer berechnet werden und kann danach weiterverwendet werden. Die Ausbreitung dieser Schallwelle zurück zum Prüfkopf wird wieder mit Ray-Tracing bestimmt. [Schu12, Rail12]

5 Grundlagen der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit (POD)

Bei zerstörungsfreien Prüfverfahren ist es eine große Herausforderung, die Leistungsfähigkeit zur Fehlerdetektion des Prüfsystems zu bestimmen. Es kann zwar im Normalfall angegeben werden, welche Fehler gefunden werden, aber der wesentlich interessantere Faktor ist, welche Fehler nicht gefunden werden. Der kleinste gefundene Fehler ist wesentlich geringer in seiner Bedeutung, als der größte, nicht gefundene Fehler [Rumm10]. Dieser allerdings ist im praktischen Anwendungsfall nicht zu bestimmen, da niemand sicher weiß, welche Fehler im Bauteil vorhanden sind. Durch die POD wird eine statistische Aussage über die Wahrscheinlichkeit, dass ein Fehler aufgefunden wird getroffen. Die Hintergründe dazu werden in diesem Kapitel diskutiert.

Idealerweise könnte man für ein Prüfverfahren eine Fehlergröße angeben, die immer detektiert wird (Detektion von Fehlern $> a_1$), in der Realität allerdings kann allerdings nur eine statistische Aussage getroffen werden. Es kann nur eine Wahrscheinlichkeit angegeben werden, mit der ein Fehler einer bestimmten Größe gefunden wird [Scha09].

Diese Wahrscheinlichkeit hängt von verschiedenen Faktoren ab: (1) Aufbau und Implementierung der Prüfung, (2) Leistung des Prüfers bei der Durchführung und Auswertung der Prüfung (human factor), (3) Reflektivität des Fehlers [Thom08].

5.1 Begriffe

Die Wahrscheinlichkeit einen Fehler zu detektieren, wird als POD (*Probability of Detection*) bezeichnet. Sie wird als Funktion der Fehlergröße angegeben und kann durch Experimente bestimmt werden. Dazu wird das betrachtete Prüfverfahren auf viele Testkörper mit Materialfehlern in definierten Größen angewendet. Dadurch erhält man einen großen Datensatz an Prüfergebnissen. Diese werden mit statistischen Methoden ausgewertet und es wird die Funktion $POD(a)$ in Abhängigkeit von der Fehlergröße a bestimmt [Bere89]. Ein Beispiel für eine POD-Kurve ist in Abbildung 25 (a) zu sehen.

In dem POD-Diagramm kann man ablesen, welche Fehlergröße mit welcher Wahrscheinlichkeit detektiert wird. Eine sehr wichtige Fehlergröße wird $a_{90/95}$ genannt. Sie ist die Fehlergröße, die mit einer Wahrscheinlichkeit von 90% bei einem Vertrauensniveau von 95% detektiert wird. Ab diesem Wert spricht man von einer zuverlässigen Prüfung [Schn04, Spie12]. Die Fehlergröße $a_{90/95}$ ist in dem POD Diagramm in Abbildung 25 (a) eingezeichnet.

Des Weiteren kann die Wahrscheinlichkeit für einen Falschalarm PFA (*Probability of False Alarm*) und daraus die *Receiver Operating Characteristic* ROC berechnet werden. Bei der ROC wird die Fehlerauffindwahrscheinlichkeit gegen die Wahrscheinlichkeit der Falschalarme aufgetragen. Sie

gibt eine Aussage über die Zuverlässigkeit des Prüfsystems [Fücs05]. Ein Beispiel für die Receiver Operating Characteristic ist in Abbildung 25 (b) gegeben. Je näher die ROC-Kurve an der Diagonalen des Diagramms ist, desto schlechter ist die Prüftechnik. Anstatt POD wird oft auch $P(TP)$, also die Wahrscheinlichkeit, dass ein echter Fehler gefunden wird (*True Positive*), verwendet und anstatt PFA auch $P(FP)$, die Wahrscheinlichkeit dass eine Anzeige gefunden wird, obwohl kein Materialdefekt vorhanden ist (*False Positive*).

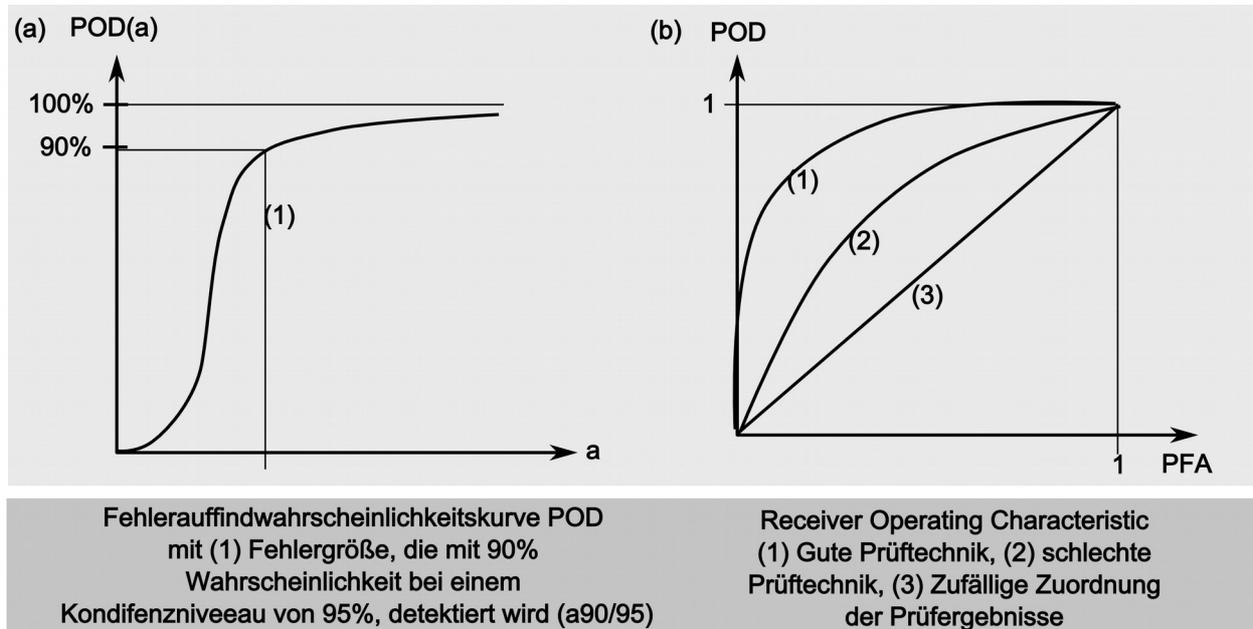


Abbildung 25: (a) Typische POD-Kurve mit $a_{90/95}$, (b) ROC-Kurve mit Beispielen, (Zeichnungen angelehnt an Darstellungen in [Burk02])

5.2 Methoden zur Bestimmung der POD

Bei den Methoden zur Bestimmung der POD kann man zwischen zwei grundlegenden Vorgehensweisen unterscheiden. Erstens, der binären Auswertung der Messergebnisse, bei der das Messergebnis nur zwei Werte „gut“ oder „schlecht“ annehmen kann. Diese Methode wird Hit/Miss Methode genannt. Zweitens, der Auswertung der Signalantworten des Prüfsystems. Dies gilt nur für Prüfverfahren, deren Prüfergebnisse als Signale vorliegen, wie Röntgen, Wirbelstrom und Ultraschall.

Für Ultraschall werden vor allem Methoden, die die Signalantworten auswerten, verwendet. In [Gene14] allerdings ist beschrieben, dass Hit/Miss-Auswertungen statistisch sicherer sind und auch in ihnen die Informationen der Signalantworten enthalten sind. Aus diesem Grund wird auch kurz auf die Hit/Miss-Methode eingegangen, obwohl der Fokus dieser Arbeit bei der zweiten Gruppe liegt.

5.2.1 Hit/Miss Methode

Bei der Hit/Miss Methode werden die Prüfergebnisse ausgewertet danach, ob ein Materialdefekt gefunden wurde (Hit) oder übersehen wurde (Miss).

Die Prüfergebnisse werden in vier Gruppen eingeteilt [Gene14]:

- True Positive = Hit
Eine Anzeige des Prüfsystems an der Stelle eines echten Materialdefektes.
- False Positive
Anzeige des Prüfsystems an einer Stelle, an der kein echter Materialdefekt vorhanden ist. Diese Anzeige kann z.B. von der Geometrie des Bauteils, falsches Ablesen der Anzeige, Prüfumgebung, etc. kommen. Wenn sie nicht zugeordnet werden kann, wird ein Bauteil aussortiert, das eigentlich als „gut“ bewertet werden sollte.
- False Negative = Miss
Keine Anzeige des Prüfsystems, obwohl ein Materialdefekt vorhanden ist. Der Materialdefekt wird dabei übersehen.
- True Negative
Keine Anzeige des Prüfsystems bei einem defektfreien Material.

Die Wahrscheinlichkeiten, dass ein Prüfergebnis einer der Gruppen angehört, kann als 2 x 2 Matrix angegeben werden, dies ist dann eine Variation der ROC-Kurve [Gene14].

Um mit Hit/Miss Daten eine POD zu generieren braucht man eine sehr große Menge an unterschiedlichen Prüfergebnissen für eine Fehlergröße [Bere89]. Dies kann erreicht werden, indem derselbe Referenzkörper an unterschiedlichen Prüfeinrichtungen von unterschiedlichen Prüfern geprüft wird und es mehrere Referenzkörper mit unterschiedlichen Defekten, die aber die gleiche Größe haben, gibt.

Für jede dieser Fehlergrößen gibt es eine definierte Anzahl an Prüfungen und die Anzahl der positiven Prüfungen (bei denen der Materialfehler detektiert wurde). Aus diesen beiden Zahlen kann die Wahrscheinlichkeit nach Gleichung 5.1 berechnet werden. Die Wahrscheinlichkeit ist die Anzahl der positiven Prüfungen des Fehlers mit der Größe a (n_{positiv}) durch die Anzahl der Prüfungen des Fehlers mit der Größe a ($n_{\text{Prüfungen}}$).

$$POD(a) = \frac{n_{\text{positiv}}(a)}{n_{\text{Prüfung}}(a)} \quad (5.1)$$

Dies ist das Vorgehen mit der Binomialverteilung [Gene14].

Wenn alle Wahrscheinlichkeitswerte für die unterschiedlichen Fehlergrößen in ein Diagramm eingezeichnet werden, bekommt man die typische POD-Kurve.

Eine Variation der Hit/Miss Methode ist die 29/29 Methode. Sie ist in [Schn09] und [Gene11] ausführlich beschrieben.

Wenn 29 verschiedene Fehler der gleichen Fehlergröße mit der Prüfung detektiert werden und kein einziger übersehen wurde, kann diese Fehlergröße als a90/95 definiert werden, also Fehlergröße, die mit einer Wahrscheinlichkeit von 90% bei einem Vertrauensniveau von 95% detektiert werden

können.

5.2.2 \hat{a} über a Methode

Die \hat{a} über a Methode kann bei allen Prüfverfahren mit kontinuierlichen Signalen eingesetzt werden. Im Gegensatz zu binären Signalen, die die Bauteile nur nach „gut“ oder „schlecht“ bewerten, ist das Ergebnis hier eine Signalamplitude, die als \hat{a} abgekürzt wird. Erst die Auswertung dieser Signalamplituden entscheidet über die Bewertung des Bauteils in „fehlerfrei“ und „fehlerbehaftet“. Diese Signale haben einen höheren Informationsgehalt, wodurch durch Verwenden einer Methode, die dies berücksichtigt, die Anzahl der Referenzfehler für die POD-Berechnung verringert werden kann [Schn04]. Beispiele für Prüfverfahren mit kontinuierlichen Signalen sind Ultraschallprüfung, Wirbelstromprüfung und digitales Röntgen.

Die \hat{a} über a Methode wurde von Berens [Bere84] beschrieben und wird deshalb auch oft Berens Methode genannt.

Für jeden Materialdefekt wird die Signalamplitude \hat{a} und die Defektgröße a bestimmt.

Die Signalamplitude \hat{a} wird über der Fehlergröße a in einem logarithmischen Diagramm aufgetragen. Ein lineares Verhältnis wird für den natürlichen Logarithmus angenommen und die Regressionsgerade in das Datenset gefittet (siehe Abbildung 26 (a)).

Die Regressionsgerade lässt sich wie in Gleichung 5.2 beschreiben.

$$\ln(\hat{a}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(a) \quad [\text{Bere89}] \quad (5.2)$$

wobei β_0 und β_1 die Parameter der Regressionsgerade sind. Sie können mit der Maximum-Likelihood Methode bestimmt werden.

Wenn in das Datenset von Messdaten sehr große Materialdefekte miteinbezogen werden, weichen die Messdaten für die großen Werte stark von der Regressionsgerade ab. Deshalb wurde in [Thom08] vorgeschlagen für solche Datensets abknickende Regressionsgeraden zu verwenden.

Typischerweise wird ein Konfidenzniveau von 95% verwendet, was bedeutet, dass die Residuen zu 95% im spezifizierten Konfidenzintervall liegen. Die Konfidenzintervalle tragen der statistischen Unsicherheit bei einer Auswertung von Messergebnissen Rechnung. Es gibt verschiedene Methoden die Konfidenzintervalle aus den Messdaten mit der Maximum-Likelihood Methode zu bestimmen. Beispielhaft sei hier eine in [Chen88] beschriebene Methode zur Bestimmung der unteren Konfidenzgrenze genannt.

Die Verteilung der Residuen einer jeden Defektgröße ist mit der Dichtefunktion $g(\hat{a})$ beschrieben. Im Normalfall wird sie durch eine Gauß'sche Normalverteilung beschrieben.

Nur Signale, die eine bestimmte Amplitudenhöhe überschreiten werden, ausgewertet. Diese Schwelle wird oft auch als Rauschlevel bezeichnet. Die Signale, die darunter liegen, können nicht vom Gefügerauschen unterschieden werden und haben daher keinen Informationsgehalt. Dieser Schwellwert ist die untere Grenze um die POD aus der Dichtefunktion $g(\hat{a})$ zu berechnen.

Theoretisch gibt es keinen oberen Grenzwert, der den Bereich der positiven Anzeigen eingrenzt.

Jede Anzeige über dem Schwellwert, egal, wie hoch sie ist, wird als positive Anzeige gewertet. Technisch gibt es allerdings einen Grenzwert, das Sättigungslevel, über dem der Verstärker in Sättigung operiert.

Die POD lässt sich aus der Dichtefunktion $g(\hat{a})$ nach Gleichung 5.3 berechnen.

$$POD(a) = \int_{\hat{a}_{Schwellwert}}^{\infty} g(\hat{a}) d\hat{a} \quad (5.3)$$

Anschaulich ist die Wahrscheinlichkeitsdichte in Abbildung 26 (b) dargestellt. Die dunkel eingefärbte Fläche unter der Dichtefunktion ist die berechnete Fehlerauffindwahrscheinlichkeit für die entsprechende Fehlergröße. Die POD wird als Wahrscheinlichkeitsfunktion in einem neuen Diagramm aufgetragen. Sie kann beschrieben werden als die Wahrscheinlichkeit, dass eine Signalamplitude über dem Schwellwert liegt (siehe Gleichung 5.4).

$$POD(a) = P(\hat{a} > \hat{a}_{Schwellwert}) \quad (5.4)$$

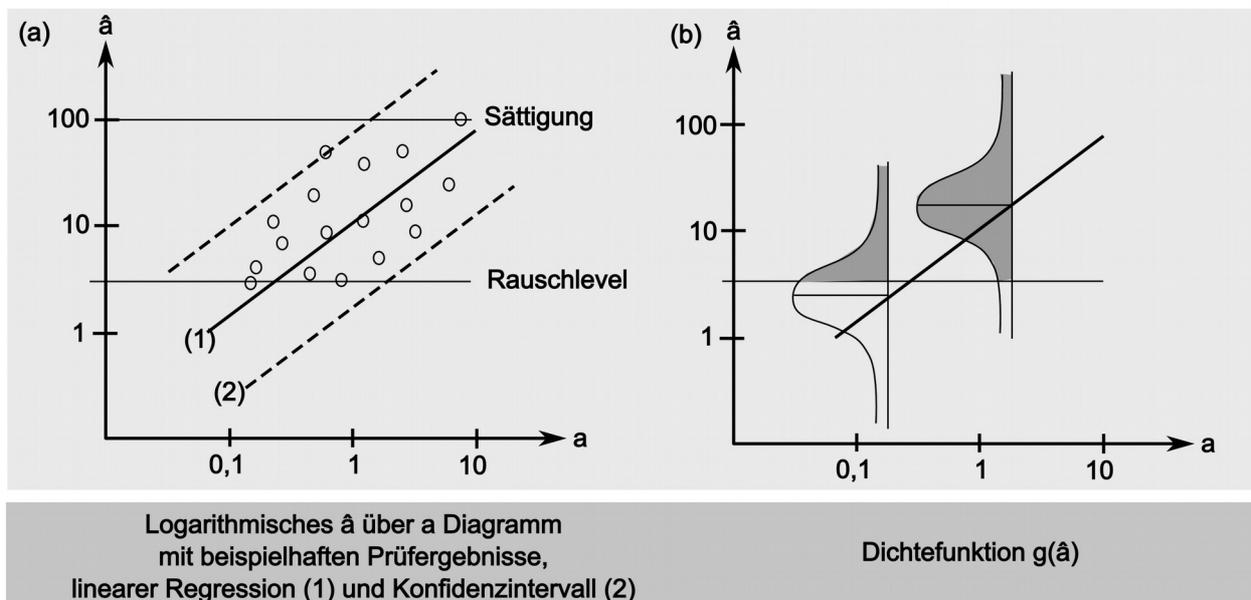


Abbildung 26: (a) \hat{a} über a Diagramm, (b) Dichtefunktion, (Zeichnungen angelehnt an Darstellungen in [Müll06])

Für diese Methode wird eine große Anzahl an unterschiedlichen Materialdefekten benötigt. Ein Minimum von 40 Defekten wird vorgeschrieben [Dodh09].

Im Normalfall werden dafür künstlich hergestellte Fehler in Referenzkörpern verwendet, deren Größe im Bereich und kleiner des Detektionslimits liegen.

5.2.3 Effektive Reflektivität

Die Methode der effektiven Reflektivität ist eine Methode, die für die Ultraschallprüfung entwickelt wurde [Stur86]. Sie ist an die Art der Prüfergebnisse und ihre Auswertung angepasst. Bei dieser

Methode werden reale Fehlstellen, die in der normalen Prüfumgebung detektiert werden, verwendet. Es wird also die wirkliche Prüfung in der Produktion widergespiegelt und nicht wie in der \hat{a} über a Methode die reale Prüfung nachgebildet.

Da normalerweise Flachbodenbohrungen als Standard-Reflektor in der Ultraschallprüfung verwendet werden, werden die Signale der detektierten Fehlstellen in diese Größe umgerechnet.

Aus der gemessenen Amplitudenhöhe wird die entsprechende Flachbodenbohrungsgröße (*Equivalent FBH Size*, EFBH) bestimmt. Diese Größe gibt den Durchmesser einer Flachbodenbohrung an, die die gleiche Amplitudenhöhe des reflektierten Signals hervorrufen würde. Dafür müssen zuvor Messungen an einem Referenzkörper mit definierten Flachbodenbohrungen durchgeführt werden. Dies geschieht im Normalfall bei der Kalibrierung. Die Berechnung, nach der diese Umrechnung in EFBH durchgeführt werden kann, ist in Gleichung 5.5 gegeben.

$$EFBH = \frac{S}{S_c} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \quad [\text{Thom08}] \quad (5.5)$$

Wobei S die Amplitudenhöhe des Fehlersignals, S_c die Amplitudenhöhe des kalibrierten Signals und d der Durchmesser der zur Kalibrierung verwendeten Flachbodenbohrung ist.

Die Bestimmung einer EFBH hat den großen Vorteil, dass damit Daten aus verschiedenen Experimenten und Prüfaufbauten verglichen werden können. Dadurch kann das Datenset vergrößert werden, weil die Ergebnisse verschiedener Experimente kombiniert werden können.

Es können auch Signale aus verschiedenen Prüftiefen oder in verschiedenen Empfindlichkeitsbereichen miteinander kombiniert werden [Burk96]. Das ist vor allem deshalb von Vorteil, weil Materialdefekte, die für die POD-Bestimmung bei der Ultraschallprüfung verwendet werden können, sehr schwer herzustellen sind und in den im Triebwerksbau verwendeten Materialien sehr selten auftreten.

Die effektive Reflektivität wird bestimmt aus dem Verhältnis der entsprechenden Flachbodenbohrungsgröße (EFBH) und der metallurgischen Fläche des Defektes (siehe Gleichung 5.6).

$$R_e = EFBH / \text{Fehlerfläche} \quad (5.6)$$

Je besser eine Fehlstelle reflektiert, desto mehr nähert sich ihre Reflektivität der einer Flachbodenbohrung an, die einen perfekten Reflektor darstellt. Da die Fläche eines realen Defektes immer größer sein wird, als die des perfekten Reflektors, kann der R_e -Wert nie größer als 1 werden. Bei geringer Reflektivität eines Fehlers ist der R_e -Wert sehr klein (läuft gegen 0) und je besser die Reflektivität ist, desto mehr nähert sich der Wert der 1 an.

Die errechnete EFBH für die realen Materialdefekte wird in einem Diagramm über der Bauteiltiefe aufgetragen. Im selben Diagramm wird die kleinste Flachbodenbohrung in allen Tiefen aufgetragen. Die daraus entstehende Kurve begrenzt den Bereich der detektierbaren Defekte. Nur Defekte mit einer EFBH größer als die Kurve der Flachbodenbohrungen können detektiert werden.

Wenn die errechneten EFBH der realen Materialdefekte ebenfalls zu einer Kurve verbunden werden, wird angenommen, dass alle Materialdefekte mit einer errechneten EFBH oberhalb dieser Kurve, sicherlich detektiert werden können.

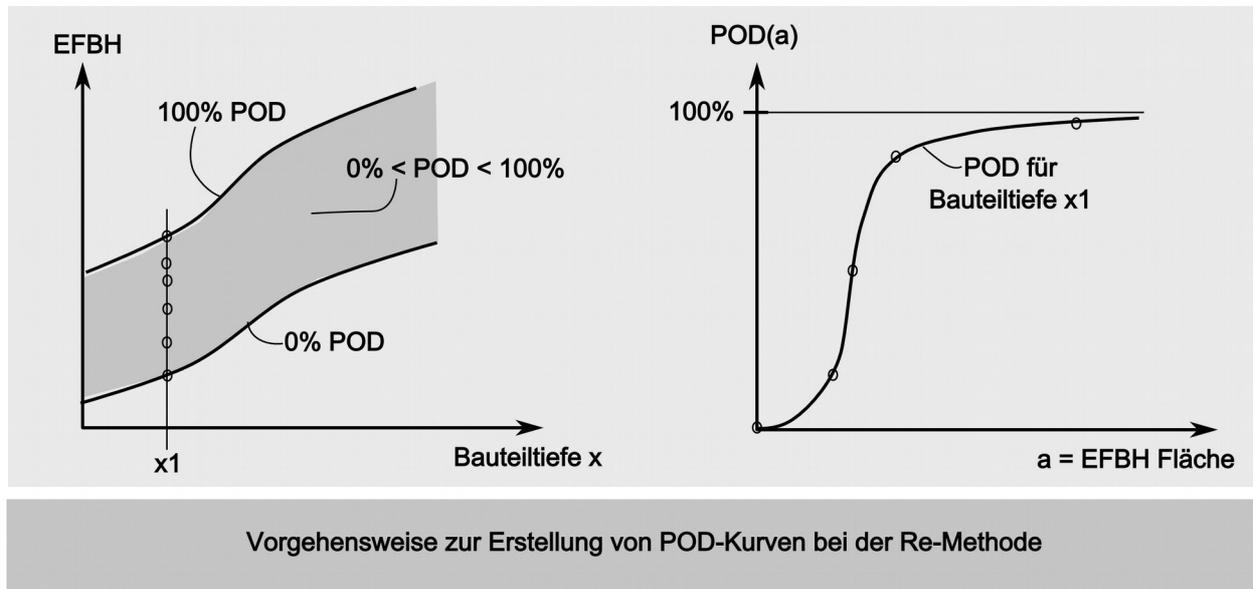


Abbildung 27: EFBH über Bauteiltiefe Diagramm mit eingezeichneten Re-Kurven und daraus resultierende POD-Kurve (Zeichnungen angelehnt an Darstellungen in [Stur86])

Also begrenzen diese beiden Kurven den Bereich, in dem die Detektion der Defekte mit einer Wahrscheinlichkeit (in diesem Fall POD) angegeben werden muss. Dabei wird der Kurve der realen Defekte eine Fehlerdetektion von 100% zugeschrieben (100% POD) und bei der Kurve der kleinsten Flachbodenbohrung eine Detektion ausgeschlossen (0% POD). Eine Kurve, die genau den Mittelwert der beiden Extremwerte bildet, wäre dann eine POD von 50%, usw. [Stur86].

Für jede Bauteiltiefe kann dadurch eine POD-Kurve bestimmt werden. Dazu werden die Wahrscheinlichkeitswerte über der Fläche der entsprechenden Flachbodenbohrung aufgetragen.

Wenn genügend Prüfergebnisse vorhanden sind, dass eine Verteilung der effektiven Reflektivität R_e bestimmt werden kann, kann die Fehlergröße a_{90} , die mit 90% Wahrscheinlichkeit (POD = 90%) detektiert wird, folgendermaßen bestimmt werden:

Es wird eine Normalverteilung von R_e zu Grunde gelegt, für die der Mittelwert μ und die Standardabweichung σ bestimmt werden kann [Burk96]. Es können verschiedene Konfidenzintervalle zu Grunde gelegt werden.

Die kleinste detektierbare Flachbodenbohrungsgröße a_{kleinste} wird bestimmt und daraus mit Hilfe der Parameter der R_e -Verteilung die Fehlergröße a_{90} mit Gleichung 5.7 bestimmt. Wobei die Fehlergrößen als Fläche angegeben werden.

$$a_{90} = \frac{a_{\text{kleinste}}}{\mu - 1,282 \cdot \sigma} \quad [\text{Burk96}] \quad (5.7)$$

Mit der Methode, so wie sie oben beschrieben wurde, wären allerdings kleine Fehlstellen, die nahe der Detektionsgrenze sind, nicht ausreichend betrachtet, da nur in der Realität vorkommende Fehlstellen ausgewertet werden. Um dies auszugleichen, kann die Maximum Likelihood Methode verwendet und so modifiziert werden, dass sie diese Verzerrung ausgleicht. Außerdem wird die Normalverteilung ersetzt durch die Extremwertverteilung [Burk96]. Diese Methode wird dann modifizierte effektive Reflektivität genannt.

Die verwendete Regressionsgerade, die das Verhältnis des natürlichen Logarithmus der EFBH und des natürlichen Logarithmus der Fehlergröße beschreibt, hat dabei immer eine Steigung von 1. Sie ist in Gleichung 5.8 gegeben. Wobei ϵ der Skalierungsparameter und μ der Lageparameter der Extremwertverteilung ist. Sie werden mit der Maximum Likelihood Methode berechnet

$$\ln(EFBH) = \ln(a) + \epsilon + \mu \quad [\text{Burk96}] \quad (5.8)$$

Die Bestimmung der POD ist bei der modifizierten effektiven Reflektivität ähnlich der \hat{a} über a Methode, nur dass die Dichtefunktion keine Normalverteilung, sondern eine Extremwertverteilung ist.

5.2.4 Abgrenzung \hat{a} über a oder effektive Reflektivität

In den vorherigen beiden Kapiteln wurden zwei Methoden vorgestellt, die für die Ultraschallprüfung verwendet werden können. In diesem Kapitel soll diskutiert werden, wann welche Methode verwendet werden kann.

Wenn man Gleichung (5.2) und Gleichung (5.8) vergleicht, sieht man, dass der einzige Unterschied zwischen \hat{a} und a Methode die Steigung der Geraden ist. Bei der effektiven Reflektivität ist sie immer 1, bei der \hat{a} über a Methode kann sie davon abweichen. Da somit bei der effektiven Reflektivität nur zwei anstatt drei Parameter bestimmt werden müssen, reichen kleinere Datensets zur Analyse [Thom08].

Die \hat{a} über a Methode kann für alle Prüfverfahren mit kontinuierlichen Signalen verwendet werden, die effektive Reflektivität nur mit Ultraschall.

Für eine geringe Anzahl an Fehlergrößen, gibt die \hat{a} über a Methode schlechte oder gar keine Resultate. Für sie muss eine große Menge an synthetisch hergestellten Materialdefekten vorhanden sein. Für die Auswertung von realen Fehlern, die in wirklichen Prüfbedingungen gefunden wurden, ist die effektive Reflektivität klar im Vorteil, da sie mit kleineren Datenmengen auskommt. Allerdings ist bei Datenmengen, die groß genug sind, die \hat{a} über a Methode der modifizierten effektiven Reflektivitätsmethode überlegen [Burk96].

Kurz zusammengefasst, ist die effektive Reflektivität für reale Materialdefekte geeignet, die \hat{a} über a Methode für synthetische Fehlstellen [Burk02].

Die effektive Reflektivität ist allerdings nur geeignet für Fehlstellen, die kleiner als der Schallbündeldurchmesser sind, da sonst die R_e größer als 1 werden würde. Dies kann zu Problemen bei der Verwendung von Multizonen-Prüfverfahren mit sehr kleinem Schallfelddurchmesser im Prüfbereich führen [Thom08].

5.3 POD für die Lebensdauerberechnung

Wie schon weiter oben erwähnt, ist POD eine der Voraussetzungen für die Lebensdauerberechnung mit Schadenstoleranz (*Damage Tolerance*). Es wird davon ausgegangen, dass jedes eingesetzte Material fehlerbehaftet ist. Diese Defekte können die integrale Struktur der Bauteile im Betrieb beeinträchtigen.

Bei der Berechnung der Einsatzintervalle und der Materialdicken, werden diese Defekte mit einbezogen. Die Materialdicken werden so gewählt, dass ein Riss einer definierten Größe keinen Schaden am Bauteil verursacht und die Intervalle werden so gewählt, dass das Risswachstum, wenn es eine kritische Größe überschreitet, detektiert werden kann.

Dafür wird eine maximale Fehlergröße, abhängig von der Fehlerart, definiert. Um sicherzustellen, dass kein Defekt diese Größe überschreitet werden zerstörungsfreie Prüftechniken eingesetzt. 100% der sicherheitskritischen Bauteile werden mit mindestens einer, im Normalfall aber mit verschiedensten zerstörungsfreien Prüftechniken geprüft [Faa01].

Für die Auslegung mit der Schadenstoleranz Methode muss eine Risikoanalyse gemacht werden. Diese liefert eine Aussage über die Ausfallwahrscheinlichkeit einer Komponente während eines definierten Zyklus.

In [Faa01] sind die Daten für die Risikoanalyse beschrieben:

- Komponentenvolumen und -beanspruchung
- Materialeigenschaften
- Rissausbreitung
- Verteilung der Anomalitäten (Materialdefekte)
- Lebensdauerberechnungen
- POD
- Instandhaltungsintervalle

Die POD ist einer der Eingabeparameter für die Risikoanalyse. Aber auch bei der Verteilung der Anomalitäten spielt die POD eine große Rolle, da sie eine Aussage darüber trifft, wie gut diese Anomalitäten detektiert werden können.

Die Materialdefekte werden in einem Diagramm angegeben als Anzahl der vorgekommenen Defekte über ihrer Größe. Diese Kurven werden auch *Exceedence Curves* (also Überschreitungskurven) genannt und stellen eine der grundlegenden Hilfsmittel der Strukturmechanik dar. Da nur die Materialdefekte dokumentiert werden, die mit den derzeitigen zerstörungsfreien Prüfmethoden detektierbar sind, hängen diese Diagramme indirekt mit der POD zusammen, also damit, welche minimale Fehlergröße detektiert werden kann.

5.4 Referenzkörper

Sturges, et. al. benennen fünf Anforderungen für die POD-Analyse: (1) Definierte Fehlstellen, (2) Definierte Inspektionsbedingungen, (3) Möglichkeit zur Herstellung von Fehlstellen, (4) Verfügbarkeit der Technologie um die Fehlstellen genau zu begutachten, (5) Bekanntheit aller relevanten Eigenschaften der Fehlstellen. [Stur86]

Synthetische Fehlstellen für die Ultraschallprüfung, im besonderen für die Bauteile des Triebwerkbaus, herzustellen ist eine große Herausforderung:

- Die Fehlstellen müssen sich im Materialvolumen befinden¹
- Die Einschallflächen müssen ohne Veränderung bestehen bleiben
- Wenn Einschlüsse synthetisch hergestellt werden, muss ihre Verbindung mit dem zu prüfenden Material sichergestellt sein, da ansonsten das Prüfergebnis verfälscht wird.
- Die Materialien im Triebwerkbau sind hochtechnologische, präzise hergestellte Legierungen, die sehr teuer in der Beschaffung sind.

Aus diesem Grund gibt es nicht viele Möglichkeiten synthetische Reflektoren für die Ultraschallprüfung herzustellen. In diesem Kapitel sind die gängigen Methoden zur Herstellung synthetischer Reflektoren beschrieben.

Im bisherigen Text wurden nur Bohrungen als Reflektoren vorgestellt. Das Problem dabei ist, dass sie von der Bauteiloberfläche aus eingebracht werden. Sie können nur aus einer Richtung angeschallt werden, da es ansonsten zu Reflexionen von dem Bohrungsgang oder der Kante zwischen Bohrungsanfang und Bauteiloberfläche kommt. Die Tiefe, in die sie maximal eingebracht werden können, ist fertigungsbedingt beschränkt. Außerdem ist ihre Reflexionsfläche weit von der von in der Realität vorkommenden Materialdefekten entfernt.

Eine Möglichkeit, Einschlüsse in das Materialvolumen einzubringen, ist, dass das Bauteil zersägt wird und in die Schnittkanten Einschlüsse eingesetzt werden. Nach dem erneuten Zusammensetzen des Bauteils werden die Einzelteile durch Punktschweißnähte fixiert und durch heiß-isostatisches Pressen (hippen) formschlüssig verbunden. [Gig195]

Die Herausforderung dabei ist, das Material mit den richtigen Eigenschaften und Geometrien für die Einschlüsse zu bekommen. Eine weitere ist, den HIP-Prozess so einzustellen, dass alle Poren und Lufteinschlüsse aus dem Bauteil verschwinden, die Fremdkörper-Einschlüsse gut eingebunden und nicht zerstört werden. Des Weiteren besteht die Gefahr, dass das mit Einschlüssen bestückte Material mit den Bestandteilen des Einschlusses reagiert und somit die Einschallbedingungen verändert sind.

Risse können auch mit einem Verfahren, das in [Kemp12] beschrieben ist, hergestellt werden. Dabei werden die Bauteile wiederholt mit einem definierten Prozess aufgeheizt und abgekühlt, so dass sich thermische Ermüdungsrisse bilden. Da sich diese Risse aber vor allem an der Oberfläche oder in Oberflächennähe befinden, sind sie eher als Referenzfehler für andere Prüfverfahren geeignet.

¹ Risse an der Oberfläche, wie sie bei anderen Prüfverfahren verwendet werden, reichen nicht aus.

6 Simulationsbasierte POD

Durch die immer besser werdenden Simulationsprogramme gewinnt der Einsatz von Simulationen zur Berechnung der POD an Bedeutung. Die Überlegung dabei ist, dass anstelle von teuren und langwierigen, experimentellen, zerstörungsfreien Prüfungen Simulationen verwendet werden, um den Datensatz an Prüfwerten zu bekommen, aus dem die Statistik berechnet wird.

Man spricht von simulationsbasierter POD oder Modell Assisted POD, abgekürzt MAPOD.

Der Vorteil von simulationsbasierter POD-Bestimmung liegt in den geringeren Kosten und Zeitaufwand für die Ermittlung der POD-Kurve. Für eine experimentelle POD-Studie müssen viele Referenzfehler in Referenzkörpern, deren Herstellung sehr kostenintensiv sind, erstellt werden. Eine Prüfung muss an verschiedenen Prüforten und von verschiedenen Prüfern durchgeführt werden. Für den simulationsbasierten Ansatz wird nur das Material für die Bestimmung des Materialrauschens und anderer Materialparameter als Eingangswerte für die Simulation benötigt. Eine geringe Anzahl an Referenzfehlern reichen aus, um die Simulation auf die Fehlerdetektion in Realität einzustellen [Schu13, Male12].

Es gibt zwei große Forschungsprojekte, die sich mit der Umsetzung simulationsbasierter POD-Ermittlung beschäftigen. Das EU-Projekt PICASSO (Improved reliability inspection of aeronautic structures by simulation-supported POD), das 2014 beendet wurde und in dem 14 Europäische Triebwerkshersteller, ihre Zulieferer und wissenschaftliche Institute mitwirken [Male12] und die MAPOD (Model-Assisted POD) Arbeitsgruppe in den USA.

6.1 Vorgehen

Um zu überprüfen, ob die simulationsbasierte POD mit einer experimentellen POD gleichzusetzen ist, müssen beide durchgeführt und verglichen werden.

Im PICASSO Projekt wurden dafür sehr viele Validierungsfälle definiert. Sie sind für verschiedene Prüfverfahren und Anwendungen definiert: Die Röntgenprüfung an Turbinenschaufeln [Baro13], die automatische Wirbelstromprüfung von Ermüdungsrissen in Ti-6Al-V4 Oberflächen [Rose12] und die Ultraschall Multizonenprüfung von Aluminiumeinschlüssen in Titan Billets [Rail12].

Der Validierungsfall, bei dem Einschlüsse großer und geringer Dichte in Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo Billets untersucht werden, wurde unter der Mitarbeit der Autorin durchgeführt und ist weiter unten beschrieben (siehe Kapitel 6.3).

6.2 Anpassungen in den Simulations-Programmen

Für die simulationsbasierte POD für das Ultraschall Prüfverfahren werden die in Kapitel 4 vorgestellten Simulationsprogramme CIVA und EFIT-H verwendet. Es mussten besondere Funktionen implementiert werden, um die Programme für die Erstellung einer POD verwenden zu können.

Die Simulation liefert im Normalfall das Ergebnis einer Prüfung unter perfekten Bedingungen – perfekte Ankopplung des Prüfkopfes an das Bauteil und keine Verluste und Streuung durchs Gefüge [Schu11]. Eine Materialprüfung in der Realität weicht von Prüfer zu Prüfer und von Prüfort zu Prüfort, aber auch von einem Zeitpunkt zum nächsten, geringfügig voneinander ab. Um dies in der Simulation abzubilden, werden Unsicherheitsparameter verwendet [Schu13]. In ihnen sind die Prüfeigenschaften definiert, die von einer Prüfung zur nächsten geringfügig abweichen können und die in der Simulation normalerweise nicht einbezogen werden.

Aufgrund dieser Abweichungen in Experimenten kommt es zur Variation der Ergebnisse, die im \hat{a} über a-Diagramm zu sehen ist. In einer Simulation ohne Unsicherheitsparameter gäbe es keine Abweichungen und somit könnte keine \hat{a} über a-Analyse durchgeführt werden.

Der wichtigste Unsicherheitsparameter für die Ultraschallprüfung ist das Rauschen aufgrund des Materialgefüges.

Es gibt zwei Ansätze ein Rauschmodell in der Simulation zu implementieren. Der erste berechnet die ideale Simulation und addiert zum Ergebnis ein modelliertes Rauschen. Im zweiten Ansatz wird die reale Mikrostruktur des Gefüges, das zu dem Materialrauschen in den Ultraschallanzeigen führt, in die Simulation integriert. Dazu werden Partikelhaufwerke oder Voronoi-Modelle verwendet, denen für jedes Korn statistisch schwankende Materialkenngrößen zugeordnet werden können, wodurch es am Übergang zur Dämpfung und Streuung kommt [Schub11].

In CIVA ist eine Erweiterung implementiert, die die metallurgische Struktur des Metalls einlesen kann. Es kann die Art der Kornstruktur, die Korngröße, die Form der Körner, die Größe von Kolonien und die Häufigkeit dieser eingegeben werden. Die elastischen Parameter des Materials können eingetragen werden, bei Titan die Parameter der α - und β -Phasen. Außerdem wird die Dämpfung, auch die frequenzabhängige, definiert. Das Vorgehen bei CIVA um das Materialrauschen nachzubilden läuft über einen Vergleich mit realen Messwerten an dem entsprechenden Material. Es wird ein Bereich ohne Reflektoren abgescannt und als C- oder B-Bild dargestellt. In CIVA wird eine Simulation erstellt, nachdem die oben beschriebenen Parameter eingetragen wurden. Sowohl Simulation, als auch Experimente müssen auf die gleiche Reflektorgröße kalibriert sein, damit sie verglichen werden können. Iterativ werden die Parameter der Simulation so lange verändert, bis das Ergebnis der Simulation den Experimenten entspricht [Duco12]. Die restlichen Unsicherheitsparameter belaufen sich auf Schwankungen, die bei Prüfungen auftreten können, so wie im Abstand vom Prüfkopf zum Bauteil, in der Lage des Prüfkopfes zum Bauteil, in der Ankopplung, wenn keine Tauchtechnik verwendet wird, und ähnlichem. Sie hängen stark von der Anwendung und dem Aufbau der Prüfung ab.

In CIVA wird dafür die *Uncertainty Propagation Method* verwendet. In diesem CIVA Tool werden

einige der Eingabeparameter für die Simulation als veränderbare Variablen definiert. Der Algorithmus variiert sie zufällig. Damit können die Abweichungen von den idealen Prüfbedingungen simuliert werden. Für alle Variablen wird die Simulation durchgeführt, so dass daraus ein \hat{a} über a – Diagramm mit vielen Einträgen entsteht, aus dem die POD berechnet werden kann. [Domi12, Reve13]

6.3 Validierungsfall Multizonenprüfung von Titan-Billets

Der Validierungsfall, der in dieser Arbeit genauer vorgestellt werden soll, ist die automatisierte Multizonenprüfung von Titan-Billets mit Einschlüssen hoher und geringer Dichte. Einschlüsse hoher Dichte sind aus Wolframcarbid mit einer Dichte von $15,62 \text{ g/cm}^3$ und die Einschlüsse geringer Dichte sind aus Quarzglas mit einer Dichte von $2,6 \text{ g/cm}^3$. Die Einschlüsse aus Quarzglas sind vergleichbar mit Poren die mit Luft gefüllt sind. Quarzeinschlüsse wurden verwendet, weil Luftporen mit der beschriebenen Herstellroute nicht produzierbar sind. Die verwendete Titanlegierung hat eine Dichte von $4,65 \text{ g/cm}^3$, die Schallgeschwindigkeit für die Longitudinalwelle beträgt 6122 m/s und für die Transversalwelle 3180 m/s . Es werden zwei Einschlussgeometrien, Kugeln und Zylinder, in unterschiedlichen Größen (Kugel- und Zylinderdurchmesser: $0,4\text{mm}$, $0,8\text{mm}$, $1,2\text{mm}$, Zylinderlänge: dreimal Durchmesser) mit einem Verfahren, das in Kapitel 5.4 beschrieben ist, in das Titan-Billetmaterial eingebracht.

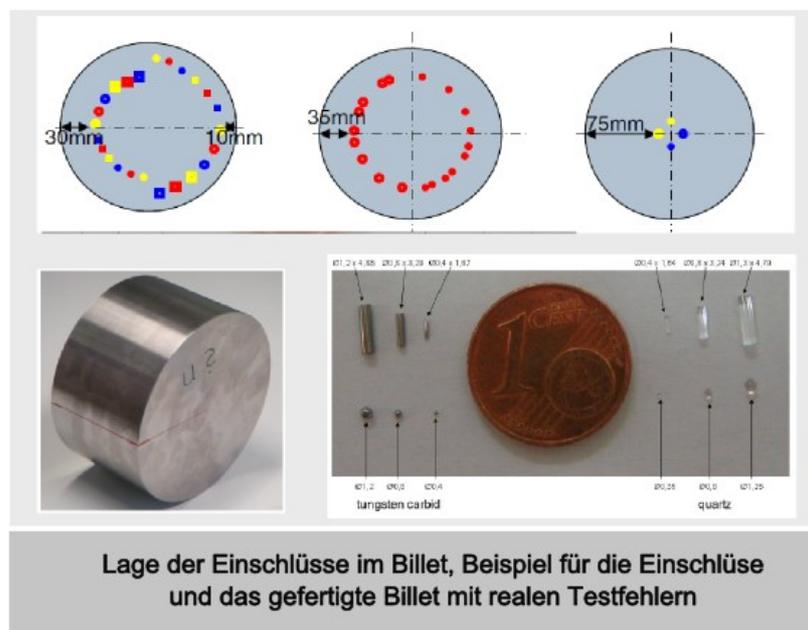


Abbildung 28: Einschlüsse in dem Billetabschnitt

Für die Multizonenprüfung werden vier verschiedene Prüfköpfe mit Frequenzen zwischen 5 und 10 MHz benutzt. Für jeden Prüfkopf ist eine eigene Wasservorlaufstrecke definiert. In Tabelle 1 sind die Prüfköpfe näher aufgeführt. Für die Fermat-Fokussierung wird mit Ray-Tracing die Oberfläche vom Fokuspunkt ausgehend zurückgerechnet. Die Multizonenprüfung wurde an unterschiedlichen Prüferten und von unterschiedlichen Prüfern durchgeführt.

Prüfkopf	Schwingerdurchmesser	Frequenz	Fokussierung
1	9,5 mm	10 MHz	Linse, Radius 101,4mm
2	38 mm	5 MHz	Fermat
3	44 mm	5 MHz	Fermat
4	50mm	5 MHz	Fermat

Tabelle 1: Beschreibung der Multizonen-Prüfköpfe

Das Billetmaterial weist einige Herausforderungen auf, die die Simulationen bewältigen müssen. Zunächst ist die Dämpfung im Material nicht für den gesamten Umfang konstant, sie weicht in den Regionen, in denen das Billet durch Hammerschläge geformt wurde, stark von den anderen Regionen ab. Die Dämpfung wird gemessen, indem das reflektierte Signal von der Rückwand der Mantelfläche aufgezeichnet wird. In Abbildung 29 ist das Ergebnis dieser Messung zu sehen, in (a) ist der Abfall des Rückwandechos in dB über die gesamte Umlaufläche des Billets gegeben. In (b) ist das C-Bild des Rückwandechos zu sehen. Die Amplitude des Rückwandechos schwankt um 16dB über den gesamten Umlauf des Billets. Dies ist durch die Fertigung eines Billets erklärbar. Ein Billet wird mit vier Hammerschlägen geformt, an den Stellen der größten Umformung ist die Dämpfung kleiner als an den anderen. Dieser Wert ist erheblich und schränkt die Prüfbarkeit des Billets stark ein.

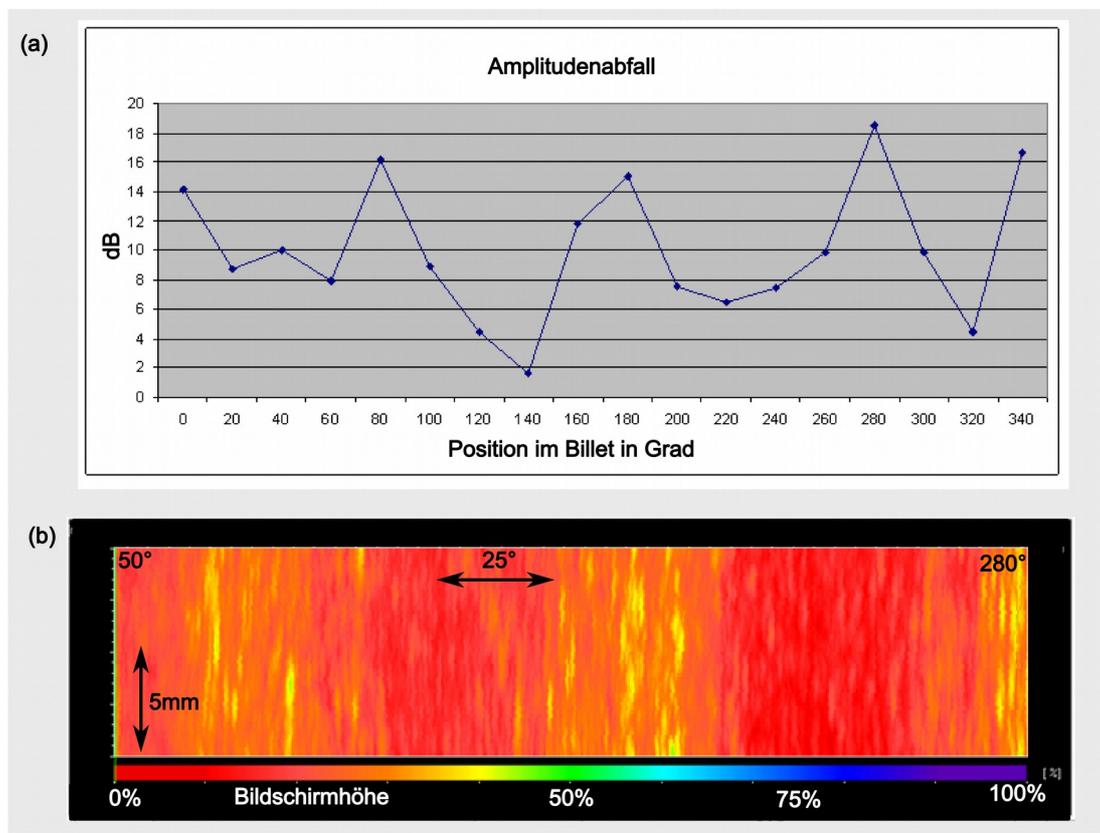


Abbildung 29: Darstellung der Variation der Dämpfung über den gesamten Billetumfang, (a) Maximal zurückreflektiertes Signal des Rückwandechos, (b) C-Bild des Rückwandechos

Die andere Herausforderung ist, das relativ hohe Gefügerauschen abzubilden. Dazu werden C-Bilder des Materialrauschens erstellt, aus denen in der Simulation ein Gefügerauschen nachgebildet werden kann. Zwei dieser Bilder sind in Abbildung 30 zu sehen. Es ist zu erkennen, dass bei den gegebenen Einstellungen das Gefügerauschen um 12 dB schwankt. Erkennbar ist dies im C-Bild über die Farbcodierung, die im unteren Teil des C-Bilds dargestellt ist.

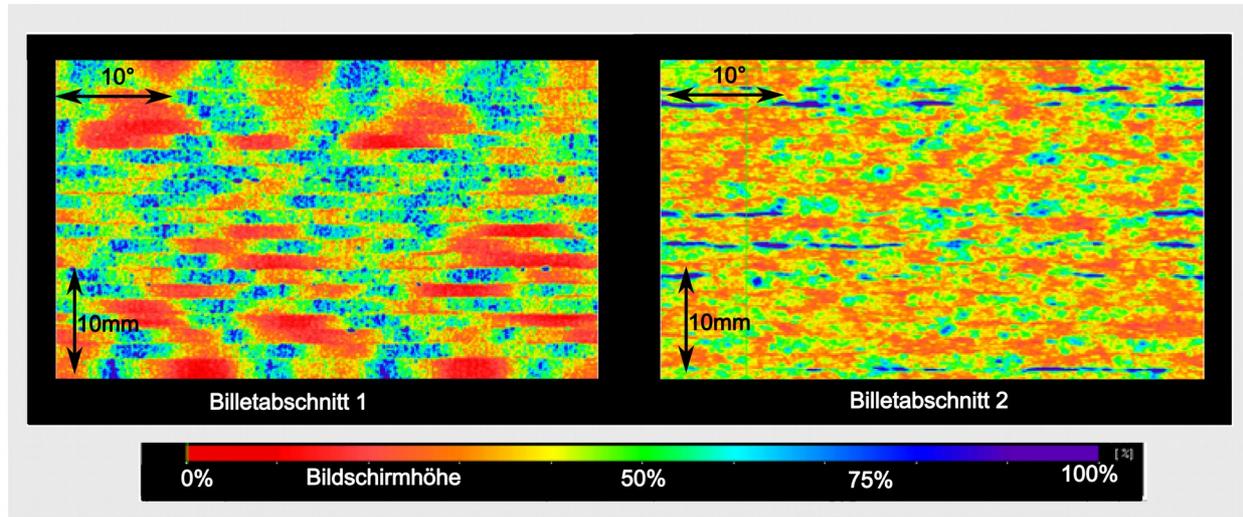


Abbildung 30: Gefügerauschen im Billet

Derzeitig sind die Simulationsprogramme nicht in der Lage solche Schwankungen abzubilden. Aus diesem Grund mussten sie für die Berechnungen der POD ignoriert werden, was das Gesamtergebnis der POD stark beeinflusst und die dargestellten Ergebnisse der simulationsbasierten POD im großen Maße von der POD abweicht, die experimentell erstellt wurde.

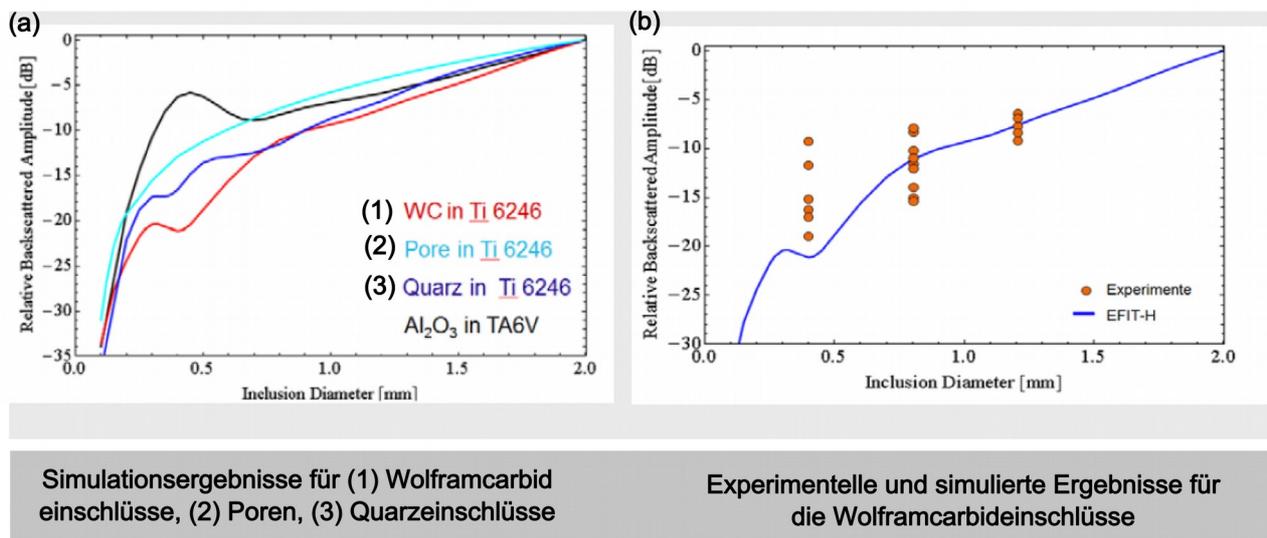


Abbildung 31: (a) Ergebnisse der EFIT Simulation, (b) Vergleich der EFIT Simulation mit den experimentellen Ergebnissen für Wolframcarbideinschlüsse, Bilder aus [Schub12]

In Abbildung 31 sind die Ergebnisse der Simulation mit EFIT und die experimentellen Werte für die

Wolframcarbideinschlüsse gegeben. Die Streuung der experimentellen Daten ist sehr groß, was an dem grobkörnigen Gefüge im Billet liegt, das sehr viel Gefügerauschen produziert und somit die Prüfbarkeit einschränkt.

Es ist zu erkennen, dass für die Einschlüsse mit der kleinsten Fehlergröße (\varnothing 0,4mm) die experimentellen Prüfergebnisse stark von den Simulierten abweichen. Ein Grund hierfür könnte sein, dass beim Diffusionsbonden Delaminationen entstanden sind, die eine größere Differenz der Schallimpedanzen besitzen, als die Einschlüsse im Vergleich zum umgebenden Material und somit eine höhere Reflektivität aufweisen [Schub12].

Trotz der hier aufgeführten Probleme der Simulationsprogramme und der verwendeten Referenzkörper wurde in CIVA eine POD erstellt.

Das Materialgefüge wird bestimmt, indem die Ultraschallergebnisse eines defektfreien Bereichs mit den simulierten Rauschbildern verglichen wird. Iterativ werden die Eingabeparameter in CIVA verändert, bis die simulierten und experimentellen Bilder übereinstimmen.

Folgende Unsicherheiten, die die Abweichungen in der praktischen Durchführung der Prüfung an unterschiedlichen Prüferten und von unterschiedlichen Prüfern abbilden sollen, wurden für die POD-Ermittlung definiert:

- Variation der Wasservorlaufstrecke um ± 2 mm
- Verdrehen des Prüfkopfes um $\pm 0,5^\circ$ in zwei Richtungen
- Versatz des Prüfkopfes zur Mitte des Billets um $\pm 1,5$ mm

Die mit CIVA berechneten \hat{a} über a Daten für die Zone 2 der Multizonenprüfung ist in Abbildung 32 zu sehen. Die Abweichung der Daten entsteht aus den oben beschriebenen Unsicherheitsparameter.

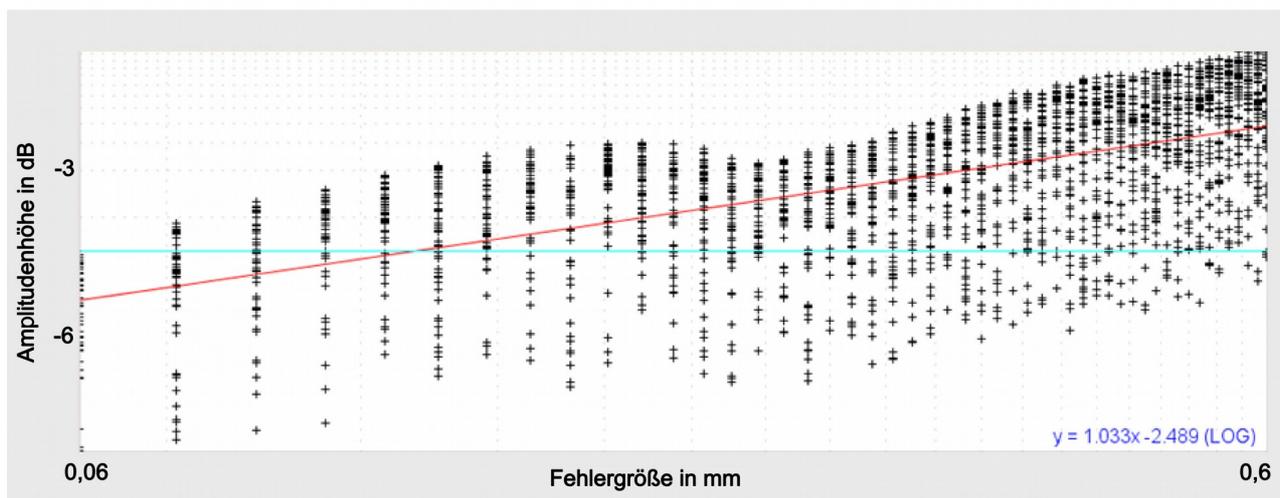


Abbildung 32: \hat{a} über a Daten aus CIVA Simulation

Für die experimentelle Untersuchung wurden zwei Prüferte und mehrere Prüfer verwendet. Die

daraus entstanden \hat{a} über a Werte sind in Abbildung 33 zu sehen.

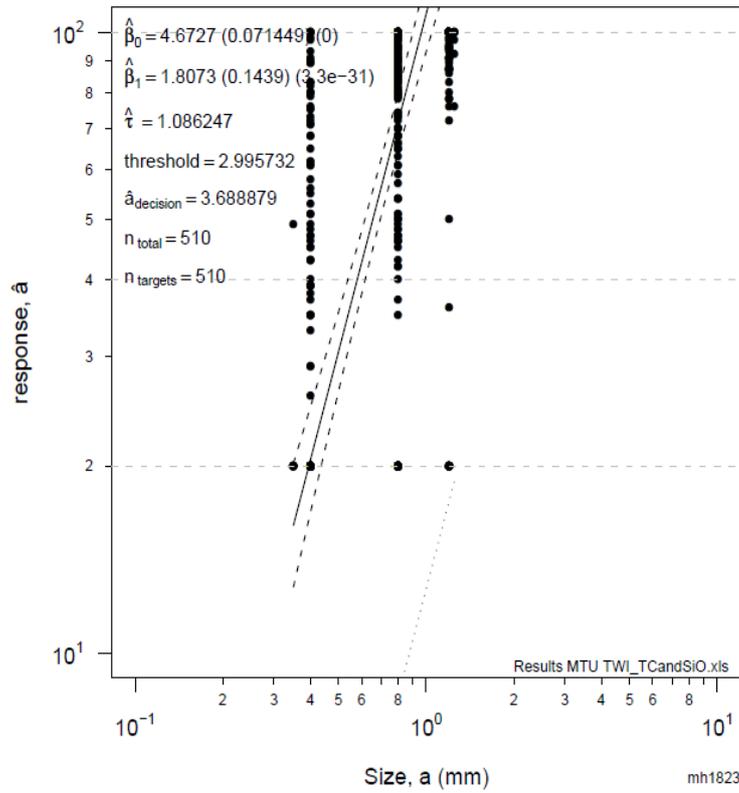


Abbildung 33: \hat{a} über a Daten aus Experimenten, Diagramm erstellt in der Software mh1823

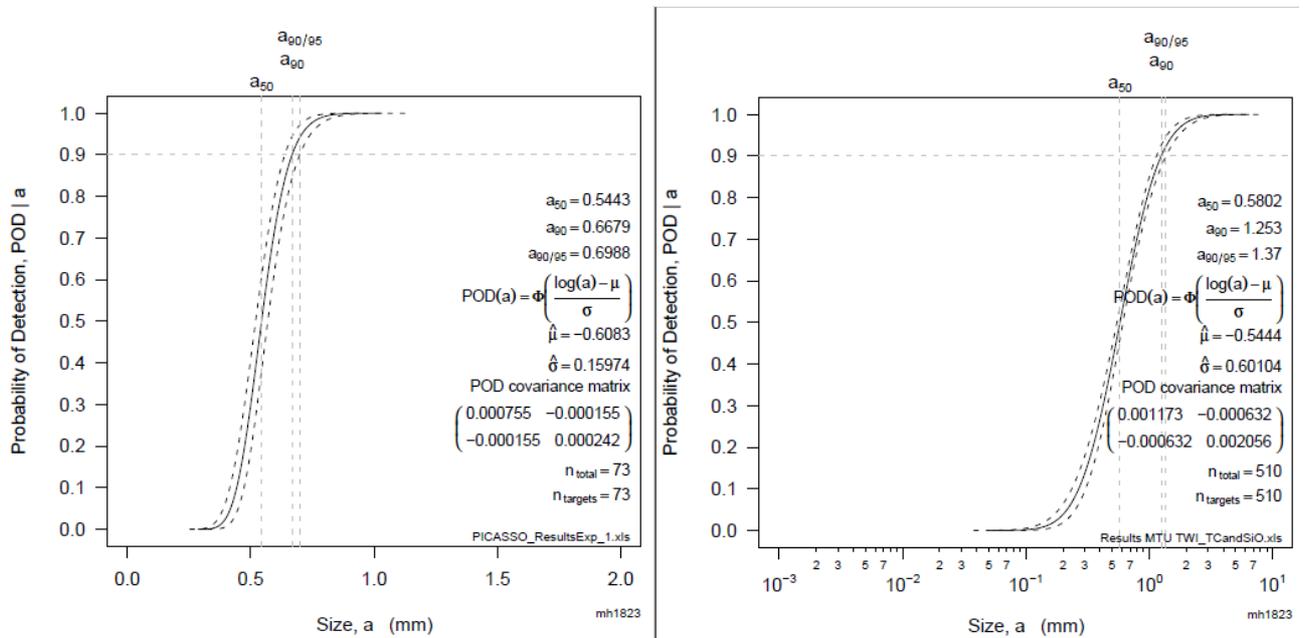


Abbildung 34: (a) POD für Simulation mit CIVA, (b) POD für Experimente, Diagramme erstellt in der Software mh1823

Für die experimentellen und die CIVA Daten wurde die POD berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 34 zu sehen.

Für die experimentellen Untersuchungen ergibt sich Fehlergröße $a_{90/95} = 1,37$ und für die simulierten Daten $a_{90/95} = 0,699$. Die relativ große Abweichung entsteht dadurch, dass die Variation der Dämpfung über den Umfang und das inhomogene Materialrauschen ignoriert wurden. Sobald eine Möglichkeit diese Herausforderungen in den Simulationsprogrammen abzubilden gefunden ist, ist diese Methode vielversprechend.

6.4 Derzeitiger Stand

Für die hier erwähnten Validierungsfälle war eine Aussage über die Einsetzbarkeit der simulationsbasierten POD noch nicht möglich. Dazu müssen die Simulations-Tools weiter entwickelt werden. Es stellen sich große Herausforderungen in der realistischen Nachbildung des Rauschens und dem Umgang mit nicht konstanten Materialparametern dar.

Es ist erkennbar, dass die simulationsbasierte POD-Ermittlung ein Weg sein wird, der immer mehr an Bedeutung gewinnt, allerdings muss noch weitere Entwicklungsarbeit geleistet werden, vor allem was schwankende Materialparameter betrifft. Jedoch für einfachere Prüfaufgaben, als die hier dargestellte, kann die simulationsbasierte POD-Ermittlung bereits heute gut verwendet werden. Es müssen allerdings noch einige Überlegungen bezüglich der Validierung des Simulations-Tools gemacht werden. So ist davon auszugehen, dass für jede Simulation eine Validierung der Simulationsergebnissen mit experimentellen Ergebnissen vorzunehmen ist. Die große Herausforderung ist dabei, Referenzkörper für die Validierung herzustellen. Eine Möglichkeit dafür ist im folgenden Kapitel dargestellt.

Unabhängig von der Anerkennung von simulationsbasierten POD-Ermittlungen können diese verwendet werden, um das Verständnis für die Prüftechnik dieser Anwendung zu stärken.

7 Eine neue Variante der Herstellung von synthetischen Fehlstellen für die POD Ermittlung

In Kapitel 5.4 ist erörtert worden, dass die Herstellung von synthetischen Fehlstellen für die Ultraschallprüfung eine große Herausforderung ist.

Eine neue Variante zur Herstellung von synthetischen Fehlern, ist Lasergravuren in Glasquadern¹ einzubringen.

In diesem Kapitel wird erörtert, ob die Glasquader mit Lasergravuren als Reflektoren für die Ultraschallprüfung verwendet werden können.

7.1 Aufbau und Eigenschaften der Glasquader und Lasergravuren

Das Vorgehen zur Herstellung von Lasergravuren in Glas ist in [Nava03] beschrieben. Der Laser wird in das Glas fokussiert und an der Stelle des Fokuspunktes wird das Glas soweit erhitzt, dass es durch den thermischen Schock reißt und Mikrorisse bildet. Nach dem Erzeugen des Mikrorisses an einer definierten Stelle, wird der Laser versetzt um erneut einen Mikroriss im Glas zu erzeugen. Aus den einzelnen Mikrorissen ergibt sich ein ganzes Cluster von Rissen, die ein Bild erzeugen. Der Laser wird über einen Computer gesteuert, in dem die Lage der Risse vom Anwender eingegeben wird. In Abbildung 35 ist der Herstellprozess schematisch dargestellt.

Die genauen Laserparameter für die Herstellung der Mikrorisse sind in Tabelle 2 beschrieben. Sie weichen von den in der Literatur beschriebenen ab, weil sie für die Herstellung von Referenzfehlern angepasst wurden, so dass die Mikrorisse kleiner sind und dichter beieinanderliegen können. Andere, variable Laserparameter werden empirisch bestimmt (siehe Kapitel 7.2)

Lasertyp	UV-Laser (1kHz)
Wellenlänge	355 nm
Anregungsstrom	30 - 69A

Tabelle 2: Lasereigenschaften für die Herstellung der Referenzkörper

Da die Schallgeschwindigkeit von Quarzglas ähnlich zu den im Triebwerksbau verwendeten Materialien, insbesondere Nickelsuperlegierungen ist ($c_{\text{Quarz}} = 5,59 \cdot 10^3 \text{ m/s}$, $c_{\text{Nickel}} = 5,63 \cdot 10^3 \text{ m/s}$), kann davon ausgegangen werden, dass sich der Schall ähnlich ausbreitet [Bamb04].

¹ Diese Lasergravuren werden normalerweise verwendet um Souvenirs oder Werbegeschenke herzustellen, bei denen dreidimensionale Bilder und Formen in Glas abgebildet sind.

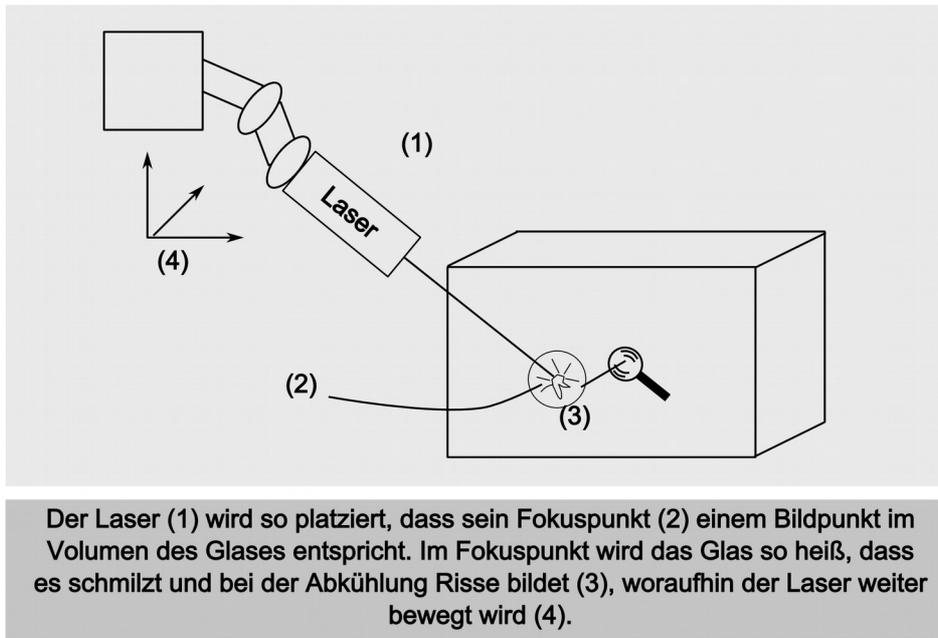


Abbildung 35: Schematische Darstellung des Herstellprozesses einer Lasergravur in einem Glasquader

Für diese Arbeit soll ein Vergleich mit Titanlegierungen vorgenommen werden, da für diese Referenzkörper mit synthetisch hergestellten Einschlüssen zum Vergleich vorhanden sind. Daher wurde ein Quarzglas ausgewählt, das eine höhere Schallgeschwindigkeit hat ($c = 5,9 \cdot 10^3$ m/s). Dies ist näher an der Schallgeschwindigkeit von Titan, die in den verwendeten Legierungen bei ungefähr $c = 6,0 \cdot 10^3$ m/s liegt. Die Eigenschaften des verwendeten Quarzglases sind in Tabelle 3 beschrieben.

Bezeichnung	Optisches Glas, K9
Dichte	2,53 g/cm ³
Schallgeschwindigkeit	5,9 10^3 m/s

Tabelle 3: Eigenschaften des verwendeten Quarzglases

Um den Aufbau der Lasergravuren zu erkennen, wurden Aufnahmen mit einem optischen Mikroskop gemacht. Dazu wurde die Lasergravur von der Seite betrachtet und ein $\lambda/4$ Polarisationsfilter verwendet. Es wurde in unterschiedlichen Tiefen fokussiert (Panfokus), um alle Details aufzunehmen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 36 (a) zu sehen.

In [Szel09] sind die Mikrorisse genauer beschrieben. Sie haben in einer Richtung eine flächige Ausdehnung, in der anderen eine längliche und eine verzweigte Ausdehnung in der dritten Richtung. Dies ist schematisch in Abbildung 36 (b) dargestellt.

In Abbildung 36 (c) ist der Aufbau des Clusters aus Laserrissen zu sehen. Die längliche Ausdehnung der Risse geht direkt über in das neue Risscluster, so dass eine zusammenhängende Risslinie entsteht, auf der die Rissenden mit einer größeren lateralen Ausdehnung liegen. Es ist außerdem zu sehen, dass der nominelle Punktabstand über zwei der gelaserten Linien geht. Dies hat mit der Herstellung zu tun, zwischen der in einem ersten Durchgang gelaserten Linie, wird eine

weitere eingefügt, deren Riss-Enden um genau die Hälfte zum vorherigen Durchgang versetzt sind. So wurde aus ultraschalltechnischer Sicht die beste Reflexionfläche gebaut.

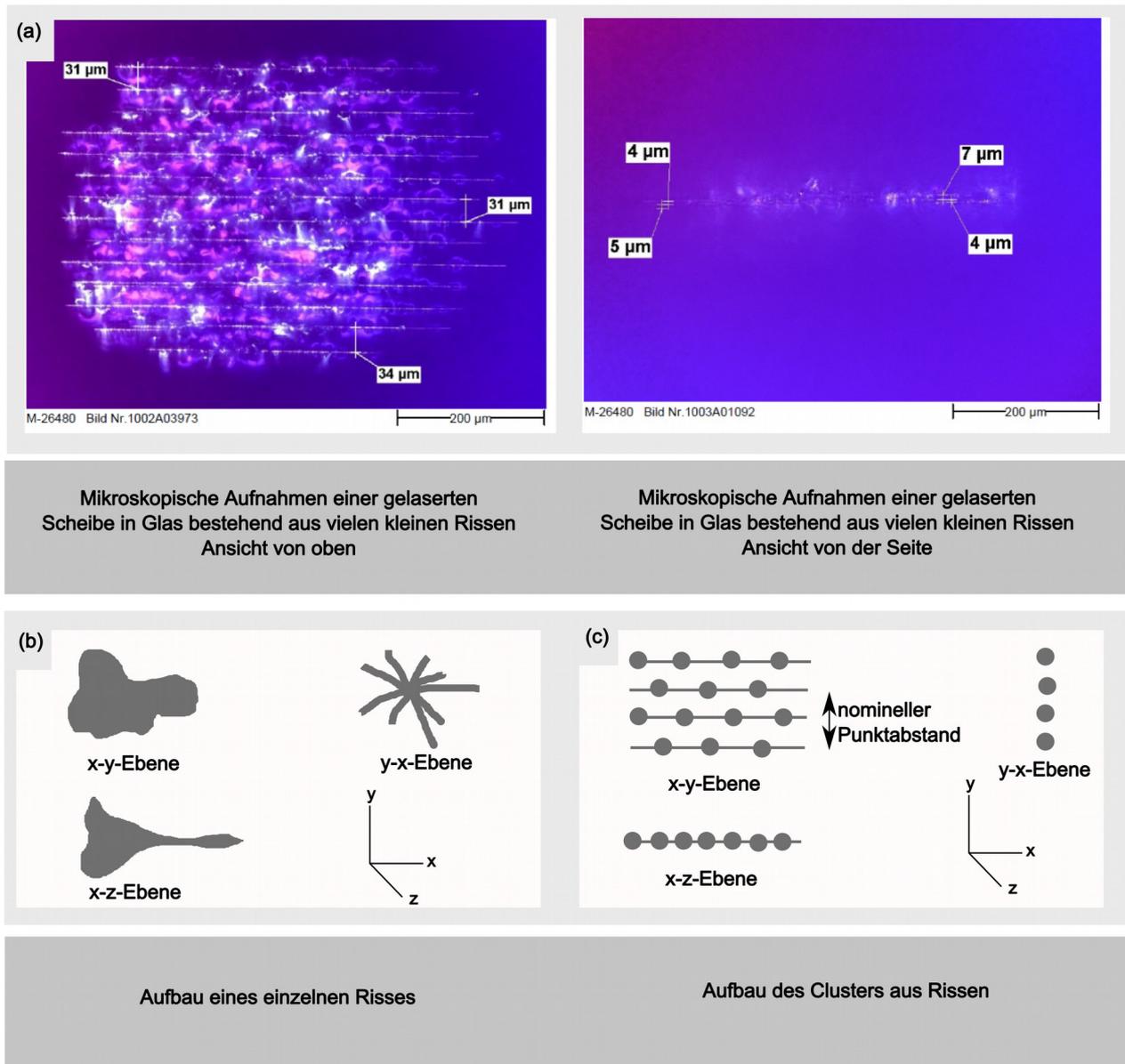


Abbildung 36: Detaillierte Darstellung der Laserrisse in Glas (a) Mikroskopische Aufnahmen, (b) Schematische Darstellung eines Risses (Zeichnungen sind angelehnt an Darstellungen in [Szel09]), (c) Schematische Darstellung des Riss-Clusters

Das prinzipielle Aussehen der Glastestkörper ist in Abbildung 37 zu sehen. Für die ersten Versuche wurden quaderförmige Referenzkörper hergestellt, in die kreisscheibenförmige Reflektoren gelasert wurden. In der Großaufnahme der Kreisscheiben kann man den Aufbau der Lasergravur erahnen. Man sieht die Struktur, die aus der Überlagerung vieler kleiner Risse entsteht.

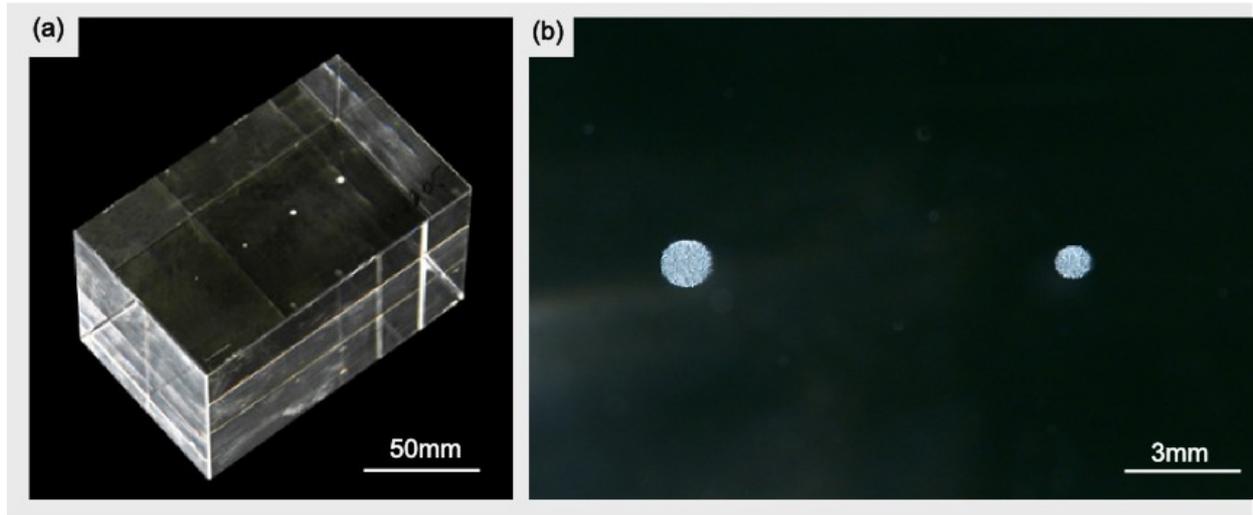


Abbildung 37: Aufbau eines Referenzkörpers aus Glas mit kreisscheibenförmigen Reflektoren, (a) gesamter Referenzkörper, (b) Großaufnahme der gelaserten Kreisscheiben

7.2 Ermittlung der optimalen Herstellparameter

Nachdem an einfachsten Reflektorgeometrien nachgewiesen wurde, dass die Mikrorisse den Ultraschall reflektieren und genügend Schallenergie zurückgeworfen wird, wird eine Versuchsreihe gestartet, um die besten Laserparameter zu ermitteln. Es werden Kreisscheiben in das Material eingebracht, da diese mit Flachbodenbohrungen verglichen werden können, die ein standardisierter Reflektor für die Ultraschallprüftechnik sind.

Die Kreisscheiben wurden mit unterschiedlichsten Punktabständen und Laserparametern graviert, um herauszufinden, welche Parameter die besten Resultate liefern. In der Tabelle 4 sind die unterschiedlichen Parameter dokumentiert.

Testkörper	Punktabstand	Anregungsstrom
1	0,06mm	40A
2	0,042mm	40A
3	0,035mm	40A
4	0,026mm	40A
5	0,02mm	40A
6	0,02mm	30A

Tabelle 4: Variation der Parameter für die Herstellung der kreisscheibenförmigen Lasergravuren

Die Kreisscheiben haben Durchmesser von 0,2mm, 0,4mm, 0,8mm und 1,2mm und sind in einer Tiefe von 10mm im Bauteil eingebracht, betrachtet von der Einschallrichtung aus.

Die Testkörper werden mit zwei Prüfköpfen mit unterschiedlicher Frequenz (15MHz, 20MHz) abgescannt und die Ergebnisse verglichen, um die besten Herstellungsparameter für die Lasergravuren herauszufinden.

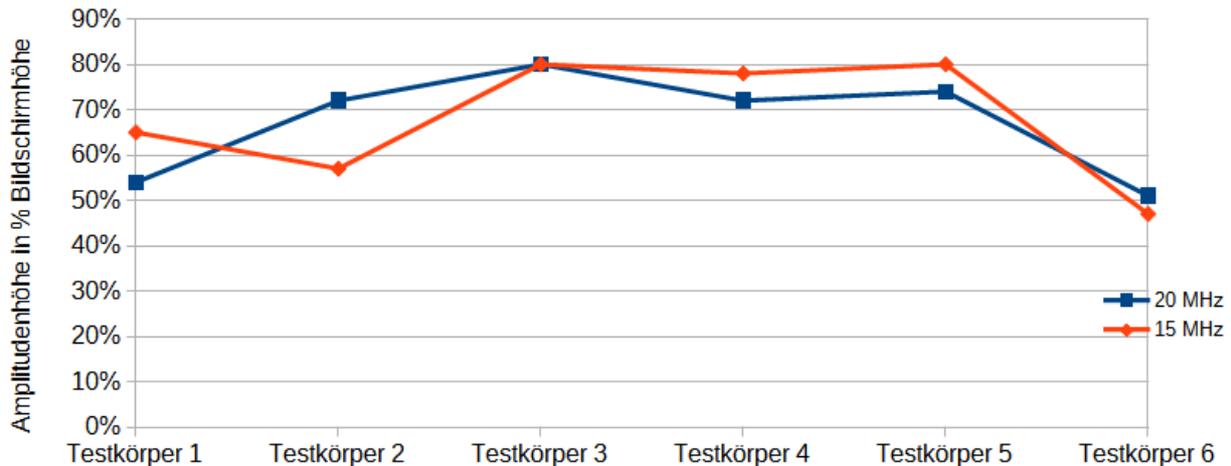


Abbildung 38: Reflektivität der unterschiedlichen Laserparameter für eine Kreisscheibe mit einem Durchmesser von 0,8mm

In Abbildung 38 sind die Ergebnisse des Vergleichs gegeben. Man sieht, dass die Reflektivität der Lasergravuren auch von der Frequenz abhängt. Der Grund dafür ist, dass es an den kleinen Rissen zur Streuung kommt, die von der Wellenlänge abhängt.

Bei 20MHz liefert die Lasergravur mit Punktabstand von 0,035mm bei einer Anregungsstromstärke von 40A (Testkörper 3) das beste Resultat, bei 15MHz ist das Ergebnis nicht so eindeutig. Dort liefert sowohl der Punktabstand von 0,35mm als auch von 0,2mm und 0,26mm ein gutes Ergebnis. Um die Parameter noch besser zu definieren wurde aufgrund dieser Erkenntnisse eine neue Testreihe entworfen (siehe Tabelle 5)

Punktabstand Stromstärke	0,2mm	0,26mm	0,35mm
41A	Testkörper 1 - 1	Testkörper 2 - 1	Testkörper 3 - 1
40A	Testkörper 1 - 2	Testkörper 2 - 2	Testkörper 3 - 2
39A	Testkörper 1 - 3	Testkörper 2 - 3	Testkörper 3 - 3
38A	Testkörper 1 - 4	Testkörper 2 - 4	Testkörper 3 - 4

Tabelle 5: Verschiedene Laserparameter - Untersuchungsreihe 2

Das Ergebnis dieser Untersuchungsreihe ist in Abbildung 39 zu sehen. Es wird deutlich, dass die besten Ergebnisse mit einem Punktabstand von 0,35mm und einer Anregungsstromstärke des Lasers von 38A oder 39A erreicht werden kann.

Die im weiteren Verlauf hergestellten Lasergravuren werden mit einem Punktabstand von 0,35mm und einer Stromstärke von 38A gelasert.

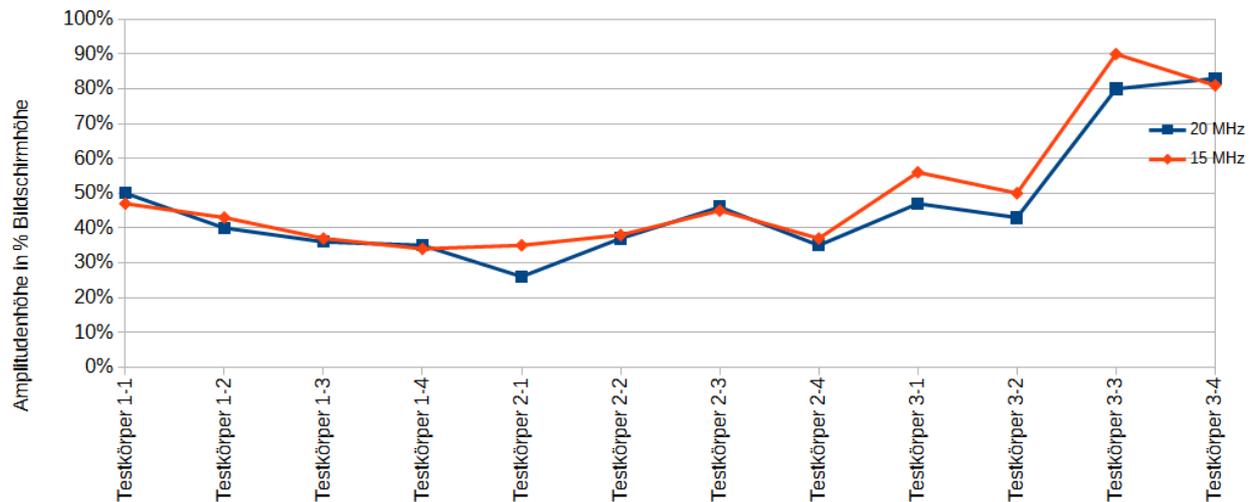


Abbildung 39: Reflektivität für unterschiedliche Laserparameter - Untersuchungsreihe 2. Die Beschreibung der Testkörper ist in Tabelle 5 zu finden.

7.3 Vergleich zwischen kreisscheibenförmigen Lasergravuren und Flachbodenbohrungen

Um sicherzustellen, dass Lasergravuren mit konventionellen Referenzkörpern verglichen werden können, muss eine quantitative Untersuchung durchgeführt werden. Zunächst werden die kreisscheibenförmigen Reflektoren mit Flachbodenbohrungen mit demselben Durchmesser verglichen. Dazu wurden in einen Glastestkörper Flachbodenbohrungen eingebracht (siehe Abbildung 40).

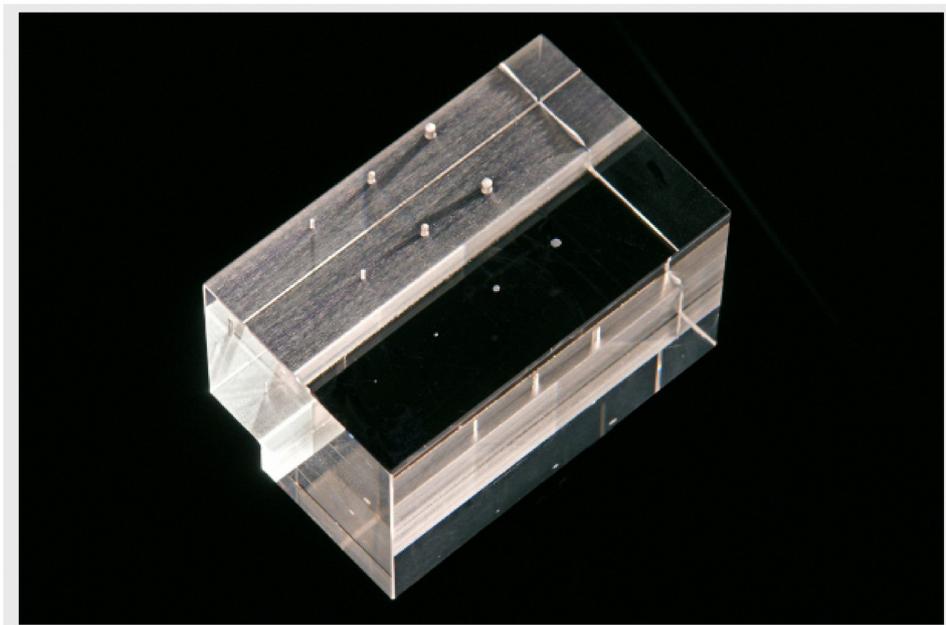


Abbildung 40: Glastestkörper mit Flachbodenbohrungen präpariert

Es konnten nur Flachbodenbohrungen mit einem Durchmesser von 1,2mm, 0,8mm und 0,4mm

produziert werden, weil es technisch nicht möglich war, eine Flachbodenbohrung mit einem Durchmesser von 0,2mm herzustellen. Daher wird der Vergleich nur für diese Durchmesser durchgeführt. Damit sowohl die Flachbodenbohrungen, als auch die gelaserten Kreisscheibenreflektoren in der selben Tiefe sind, bzw. denselben Schalllaufweg haben, musste eine Nut in den Glaskörper gesägt werden.

Der Testkörper wurde mit einem fokussierten 15MHz Prüfkopf abgescannt und die Reflektionen dokumentiert. Das Ergebnis ist in Abbildung 41 zu sehen.

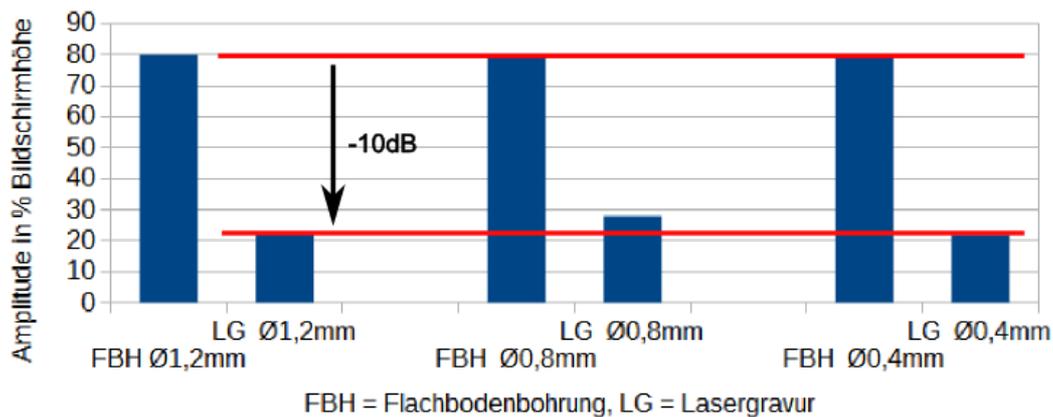


Abbildung 41: Ergebnis des Vergleichs von Flachbodenbohrungen und gelaserten Kreisscheibenreflektoren, gilt nur für die Prüffrequenz 20MHz

Es fällt auf, dass die Reflektivität von den Lasergravuren um 10dB gegenüber den Flachbodenbohrungen abfällt. Dies ist zu erklären, weil die Oberfläche der Lasergravuren eine große Rauheit aufweist an der der Schall gestreut wird. Da der Amplitudenabfall aber immer konstant ist, können die Glastestkörper unter Berücksichtigung dieses Faktors verwendet werden. Für den Vergleich zu Flachbodenbohrungen müssen immer 10dB zur Signalhöhe hinzuaddiert werden [Meng11].

Der Vergleich zwischen den gelaserten Kreisscheibenreflektoren und den Flachbodenbohrungen wurden nur für die Kreisscheiben durchgeführt, die nach der Untersuchung in Kapitel 7.2 die beste Reflektivität geboten haben. Durch die Untersuchung in Kapitel 7.2 können andere Herstelloptionen für die Lasergravuren ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund werden sie für den Vergleich nicht mehr herangezogen.

Der Vergleich wurde mit nur einer Prüffrequenz durchgeführt. In Kapitel 7.2 wurde ein Vergleich zwischen zwei Prüffrequenzen relativ hoher Frequenz (15MHz und 20MHz) durchgeführt. Die Ergebnisse der Reflektivität waren ähnlich. Der kleine Unterschied kann auf die unterschiedlichen Charakteristika der beiden Prüfköpfe zurückgeführt werden. Die hier bestimmte Verstärkungsdifferenz gilt nur für eine Prüffrequenz von 20MHz.

7.4 Vergleich von Lasergravuren mit Einschlüssen in Titan

Um die Lasergravuren mit Einschlüssen zu vergleichen, wird ein Referenzkörper aus Titan mit synthetisch hergestellten Fehlern verwendet. Dieser wurde produziert um eine POD für die Multizonenprüfung von Billets zu erstellen.

Die Einschlüsse haben kugel- und zylinderförmige Geometrie und Durchmesser von 0,4mm, 0,8mm und 1,2mm. Es wurden zwei Arten von Einschlüssen eingebracht, Einschlüsse hoher Dichte, die aus Wolframcarbide bestehen und Einschlüsse geringer Dichte, die aus Glas bestehen und Poren nachbilden.

Die Referenzkörper mit den Einschlüssen liegen in zwei Geometrien vor, zum einen in der Billetgeometrie, so wie er in Kapitel 6 vorgestellt wurde, zum anderen als quaderförmige Referenzkörper, an denen die Herstellung getestet wurde.

7.4.1 Vergleich von Lasergravuren mit realen Materialfehlern in einfachen, quaderförmigen Referenzkörpern

Zunächst wurde der Vergleich mit einfachen, quaderförmigen Referenzkörpern durchgeführt. Obwohl nur ein Vergleich zwischen kugel- und zylinderförmigen Testfehlern durchgeführt werden kann, werden in das Glas zu Versuchszwecken auch ellipsoidische Fehlergeometrien eingebracht, da die in Realität vorkommenden Materialdefekte eher eine ellipsoidische Ausdehnung haben.

Da es sich hier um im Volumen ausgedehnte Reflektoren handelt, kann die Geometrie gefüllt oder hohl gelasert werden. Bei der hohlen Geometrie ist nur die Oberfläche gelasert. Es wird eine Versuchsreihe gestartet, um zu testen, welche Geometrie sich besser eignet. Das Ergebnis ist in Abbildung 42 dargestellt.

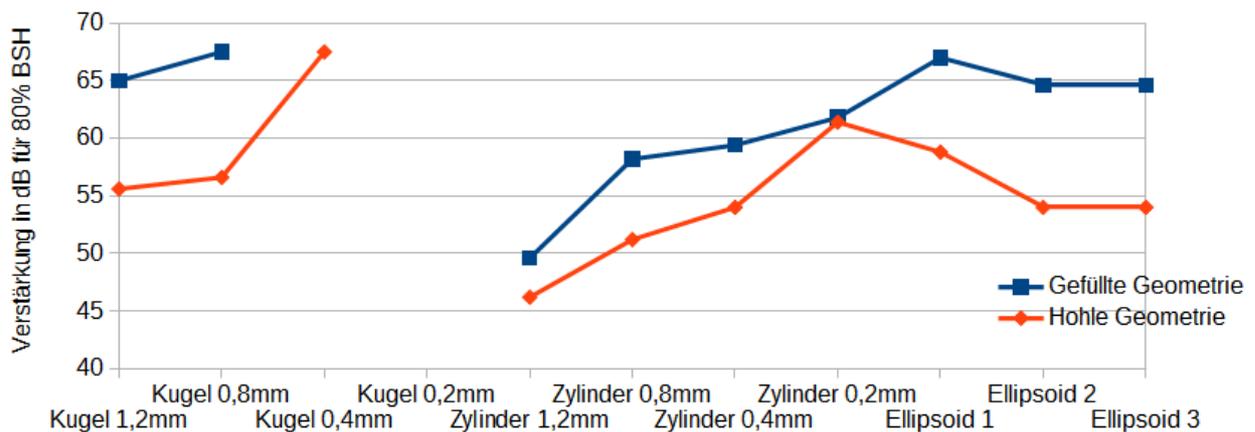


Abbildung 42: Vergleich der Reflektivität zwischen gefüllten und hohlen Lasergravuren

Im Diagramm wird die Verstärkung, die notwendig ist, um das Signal am Ultraschallgerät auf 80% Bildschirmhöhe einzustellen dargestellt. Je kleiner dieser Wert ist, desto besser ist die Reflektivität. Man kann deutlich erkennen, dass die hohlen Geometrien besser reflektieren. Das kann damit erklärt werden, dass bei den gefüllten Geometrien Interferenzen zwischen den einzelnen Rissen

auftreten. Die Kugeln mit 0,4 sind nur als hohle Geometrie überhaupt zu detektieren. Die Kugel mit einem Durchmesser von 0,2mm ist gar nicht zu detektieren. Der Grund dafür ist nicht die Fertigung der Lasergravuren, sondern, dass diese Fehlergröße weit unter dem Detektionslimit liegt.

In Abbildung 43 ist der Vergleich zwischen den Einschlüssen und den Lasergravuren für quaderförmige Referenzkörper zu sehen. Wie schon bei den kreisscheibenförmigen Reflektoren ist die Reflektivität der Lasergravuren bedeutend geringer als bei den Einschlüssen. Eine quantitative Aussage ist nicht möglich, da die Schalllaufwege fertigungsbedingt unterschiedlich sind. Dazu muss ein weiterer Vergleich an Testkörpern, bei denen die Schallwege übereinstimmen, vorgenommen werden. Trotzdem wird deutlich, dass der Unterschied in der Reflektivität, wie schon bei den Kreisscheibenreflektoren konstant ist, auch über die unterschiedlichen Geometrien hinweg.

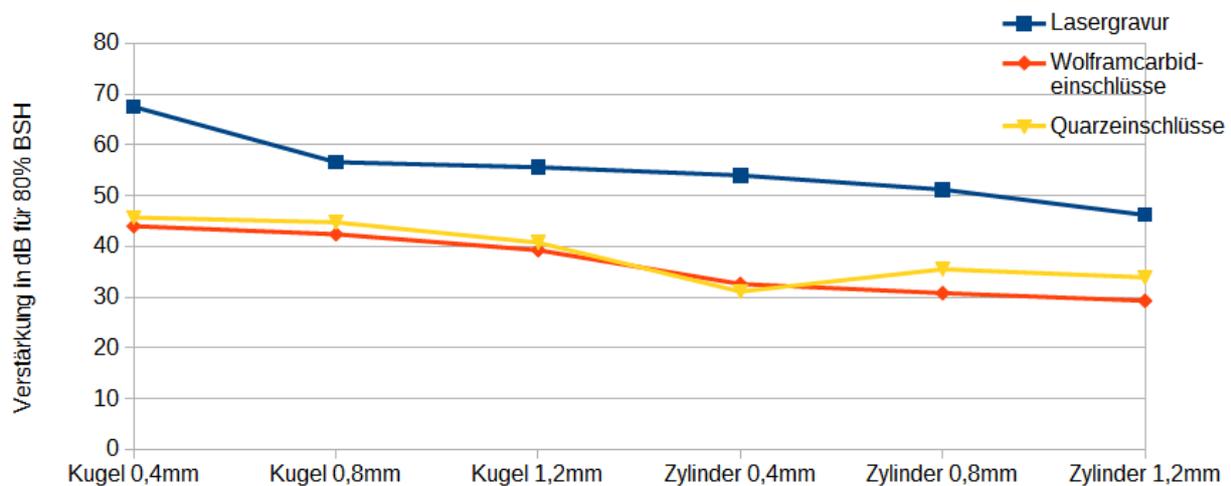


Abbildung 43: Vergleich der Reflektivität von Lasergravur, Wolframcarbid- und Quarzeinschlüssen

7.4.2 Vergleich von Lasergravuren mit realen Materialfehlern in Billetgeometrie

Aus den Versuchen für die simulationsbasierte POD ist ein Billet mit Einschlüssen hoher und geringer Dichte vorhanden, das sich gut für diesen Vergleich eignet. Zu Vergleichszwecken wird ein Glastestkörper in derselben Geometrie und mit denselben Reflektoren hergestellt. Er ist in Abbildung 44 zu sehen.

Beide Billets werden mit der Mutlizonen- und der Phased Array Technik (Prüfaufbau und -ablauf siehe Kapitel 3) abgescannt und die Ergebnisse verglichen.

Die Kugeln mit einem Durchmesser von 0,4mm konnten in Glas nur zu 35% Bildschirmhöhe (BSH) detektiert werden. Kugeleinschlüsse geringer Dichte mit 0,35mm Durchmesser konnten im Billet gar nicht detektiert werden, Einschlüsse hoher Dichte zu 33% BSH. Die Größe wurde bei der Auswahl der Testfehler absichtlich so gewählt, dass sie eigentlich nicht mehr detektiert werden kann. Da für die POD-Analyse für die die Ultraschall-Ergebnisse verwendet werden, auch Testfehler benötigt werden, die gerade nicht mehr detektiert werden können. Die Kugeleinschlüsse mit einem Durchmesser von 0,8mm konnten in Titan zu 88% BSH detektiert werden, in Glas zu 100% BSH, alle größeren Testfehler wurden zu 100% BSH detektiert. Für die Zylinder sieht die

Auswertung ähnlich aus.

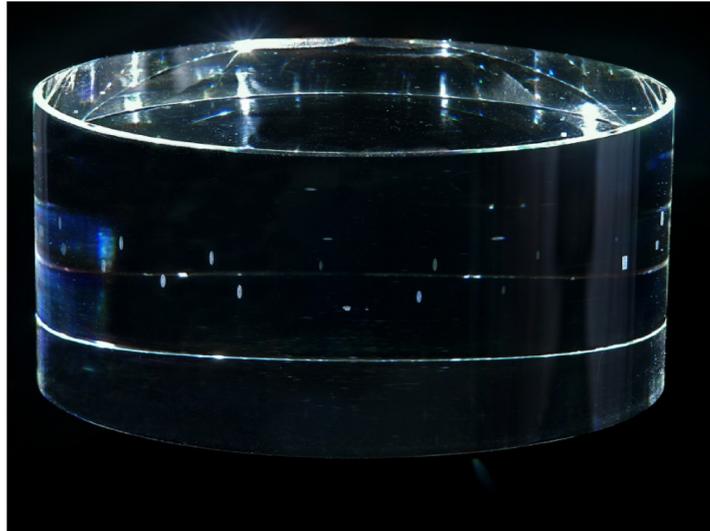


Abbildung 44: Zylinderförmiger Glastestkörper mit Lasergravuren in Zylinder- und Kugelform

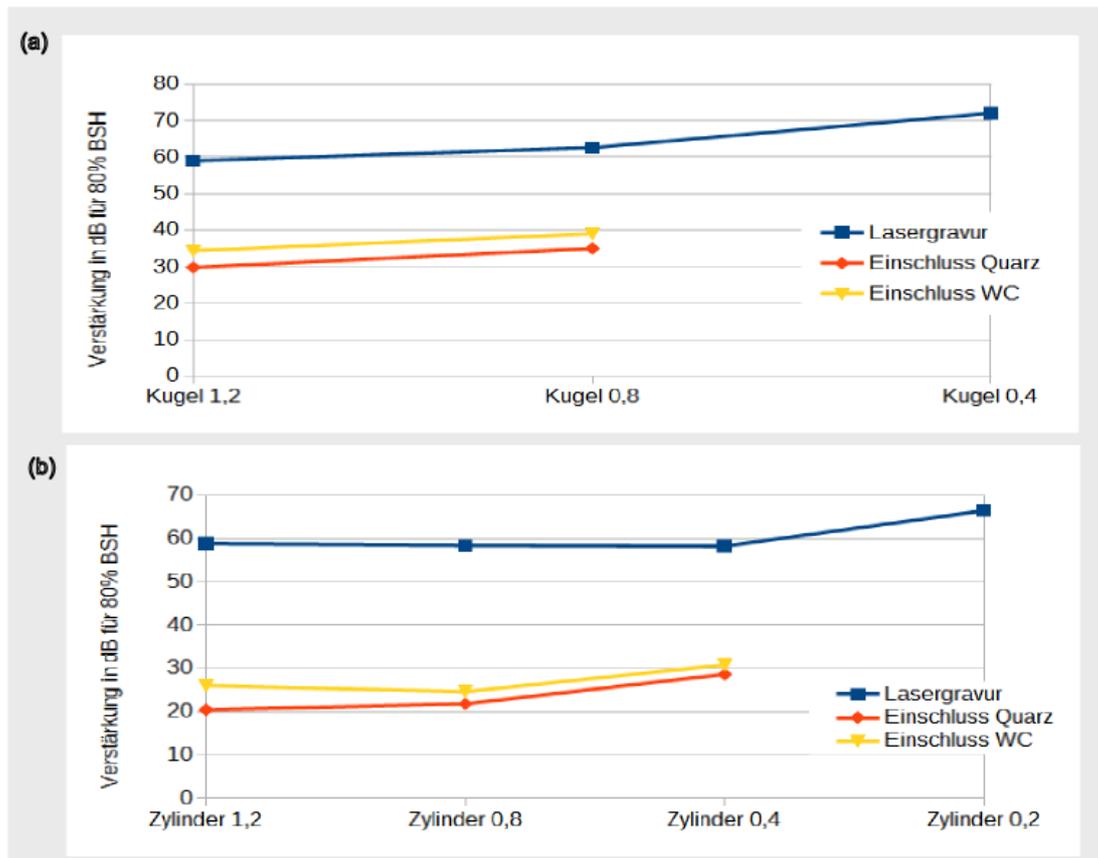


Abbildung 45: (a) Vergleich zwischen gelaserten Kugeln in Glas und kugelförmigen Einschlüssen in Metall, (b) Vergleich zwischen gelaserten Zylindern in Glas und zylinderförmigen Einschlüssen in Metall

Die quantitativen Ergebnisse sind in Abbildung 45 zu sehen. Auch hier lässt sich eine

Gesetzmäßigkeit finden. Die Verstärkungsdifferenz zwischen Einschlüssen geringer Dichte und Lasergravuren beträgt 25dB für alle Geometrien und Größen. Die Verstärkungsdifferenz zwischen Einschlüssen hoher Dichte und Lasergravuren beträgt 30dB für alle Geometrien und Größen. Da die Reflektivität der hier überprüften Geometrien auch eine Frequenzabhängigkeit besitzt, gilt die hier bestimmte Gesetzmäßigkeit nur für die verwendeten Prüffrequenzen.

7.5 Ergebnis

Aus den durchgeführten Experimenten geht hervor, dass sich die Lasergravuren in Glas dazu eignen Ultraschall zu reflektieren. Allerdings ist diese Reflexion mit einem Verlust des Schalldrucks im Vergleich zu Flachbodenbohrungen und Einschlüssen verbunden.

Dies liegt an der Struktur der Lasergravuren, die aus einer Vielzahl an Rissen besteht, an denen der Schall gestreut wird. Die Risse und der Rissabstand sind sehr viel kleiner als die Wellenlänge, so dass dieser Verlust für eine Reflektorgeometrie konstant ist. Sie kann als Verstärkungsdifferenz zu den Prüfergebnissen addiert werden.

Bei flachen Reflektoren, so wie Flachbodenbohrungen, beträgt diese Verstärkungsdifferenz 10dB, bei runden oder zylindrischen Reflektoren beträgt die Differenz 25dB im Vergleich zu Poren bzw. Einschlüsse geringer Dichte und 30dB im Vergleich zu Einschlüssen hoher Dichte. Man kann bei den flachen Reflektoren von 2-dimensionalen und bei den runden und zylindrischen von 3-dimensionalen Reflektoren sprechen. Eine Übersicht über die Ergebnisse ist in Abbildung 46 zu sehen.

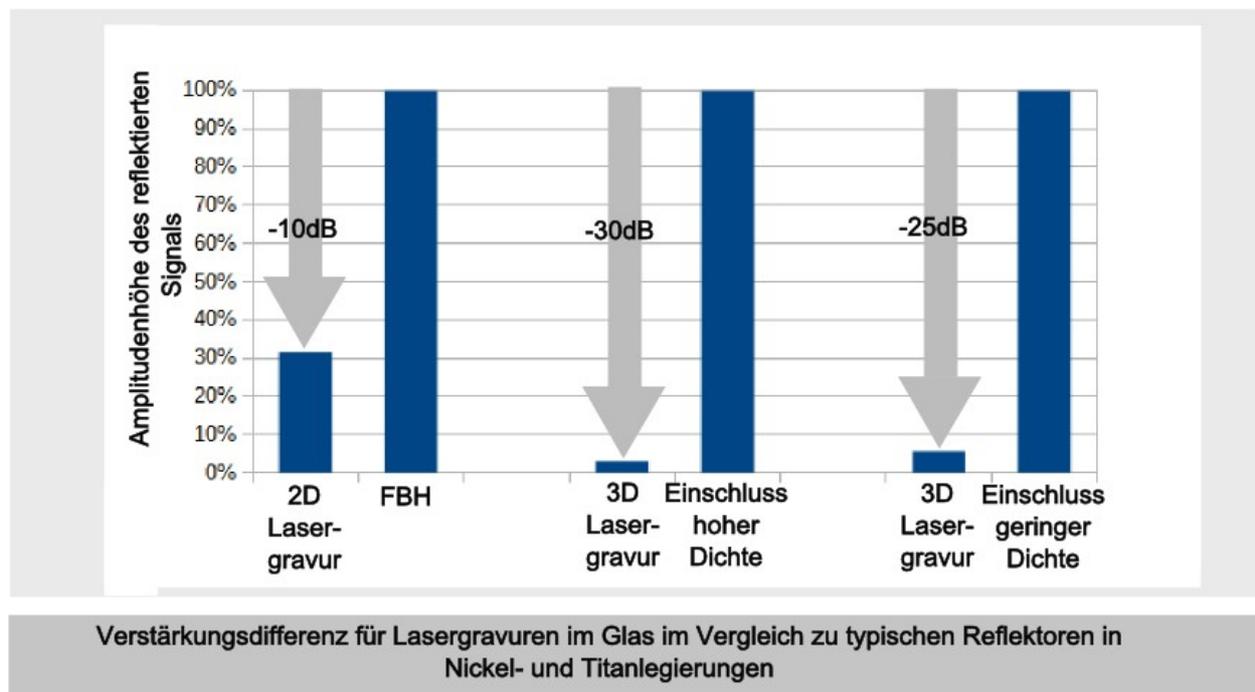


Abbildung 46: Übersicht der Ergebnisse bei der Untersuchung der Einsetzbarkeit von Glasreferenzkörpern

Die Untersuchungen hier wurden nur für eine Prüffrequenz durchgeführt. Da Reflektorgeometrien

wie Zylinder und Kugeln auch eine Frequenzabhängigkeit besitzen, können die Ergebnisse nicht auf andere Prüffrequenzen übertragen werden. Um eine allgemeingültige Gesetzmäßigkeit zu bestimmen müsste eine größere Untersuchung durchgeführt werden. Bis dahin wird empfohlen bei jedem Einsatz der Glastestkörper einen Vergleich zwischen konventionell hergestellten Reflektoren gleicher Geometrie durchzuführen und somit die Verstärkungsdifferenz für die verwendeten Lasergravuren zu bestimmen. Es wird weiterhin empfohlen, diesen Vergleich bei dem Einsatz von einem neuen Prüfkopf durchzuführen, da diese grundlegende Untersuchung keine Aussage über andere Prüfköpfe und andere Prüffrequenzen geben kann.

Die Referenzkörper aus Glas können in vielerlei Hinsicht verwendet werden. Vor allem der Einsatz für die POD ist von großer Bedeutung. Sie können verwendet werden, um eine POD nur mit in Glas nachgebauten realen Fehlern zu produzieren oder zur Validierung für die simulationsbasierte POD.

Um eine POD mit den Lasergravuren in Glas zu erstellen, müsste es möglich sein auch das Gefügerauschen im Glas nachzubilden. Da das Glas ein amorphes Material ist [Barg12], behindern den Schall keine Materialübergänge wie Korngrenzen. Das Gefüge auf atomarer Basis ist zu klein um eine Auswirkung auf den Schall zu haben. Somit gibt es für Schall keine Hindernisse, an denen er gestreut werden kann, und somit auch kein Gefügerauschen.

Um das Gefügerauschen dennoch in Glas nachzubilden, könnten kleine Risse eingebracht werden, wie in [Szel09] beschrieben, an denen das Ultraschallsignal gestreut wird. Der Abstand und die Größe der Risse kann variiert werden und somit an das Gefüge in den Titan- oder Nickelsuperlegierungen angepasst zu werden. Iterativ können diese Parameter solange angepasst werden, bis das somit erzeugte Rauschen mit dem Gefügerauschen korreliert. Dazu muss wie bei der simulationsbasierten POD eine Messung des Rauschens im Prüfbereich aufgenommen werden.

Mit dieser Methode, die das Gefügerauschen imitiert, kann eine gesamte POD-Studie mit Glastestkörpern durchgeführt werden. Das Vorgehen dabei ist:

(1) Materialrauschen im Prüfbereich bestimmen, (2) die Anzahl der Dichte und der Größe der Risse im Glastestkörper bestimmen, die benötigt werden, um dieses Rauschen nachzubilden, (3) Verstärkungsdifferenz für den Reflektortyp bestimmen, (4) unterschiedliche Reflektoren dieses Typs mit verschiedenen Größen und Lage in Glastestkörper einbringen¹, (5) Prüfung der Referenzkörper mit den synthetischen Fehlern von unterschiedlichen Prüfern und Prüfstellen, (6) Auswertung der Ergebnisse.

Da die Herstellung einfach, billig und schnell ist, kann eine Vielzahl an unterschiedlichen Defekten realisiert werden, so dass die Anzahl an verschiedenen Fehlstellen für die POD Bestimmung leicht erreicht werden kann.

In den vorherigen Kapiteln wurden zwei Geometrien für Glasreferenzkörper vorgestellt: quaderförmige und zylindrische. Mit diesen beiden Geometrien können alle gängigen Konturen für die Ultraschallprüfung der für diese Arbeit relevanten Bauteile dargestellt werden.

¹ Die Anzahl der Fehler wird über das verwendete POD Verfahren bestimmt. Im Normalfall würde hier die \hat{a} über a Methode zum Einsatz kommen, da es sich um synthetisch hergestellte Defekte handelt und somit würden mind. 40 Materialfehler benötigt.

Aber auch andere Geometrien der Referenzkörper wären möglich und jede erdenkliche Orientierung der Reflektoren kann ohne Probleme dargestellt werden. Somit könnte eine große Anzahl an realistischen POD-Proben hergestellt werden.

Auch neben der POD-Ermittlung gibt es Einsatzmöglichkeiten für die Referenzkörper aus Glas. Sie können verwendet werden, um zu untersuchen, wie sich der Schall an Reflektoren mit unterschiedlichen Geometrien verhält. Somit können neu entwickelte Prüftechniken nicht nur an den Standardreflektoren, wie Kugel- und Kreisscheibenreflektor, getestet werden, sondern an Reflektoren anderer Geometrie.

Die Herstellung von geeigneten Referenzkörpern für Neuentwicklungen von Prüftechnik stellt einen kritischen Punkt im Entwicklungsprozess dar, der ein Projekt lange verzögern kann. Wenn für die ersten Entwicklungsschritte Referenzkörper aus Glas verwendet werden und erst zu einem späteren Zeitpunkt an metallischen Referenzkörpern überprüft wird, ob das Ziel erreicht wurde, kann an Entwicklungszeit und -kosten gespart werden.

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit ist für Schulungszwecke oder Präsentationen. Da die Ultraschallprüftechnik normalerweise verborgene Fehler aufdeckt, ist es bei der Vorstellung von Prüfsystemen schwierig ungeübten Zuhörern zu vermitteln, was passiert. Mit Glasreferenzkörpern ist schneller offensichtlich, wo der Schall reflektiert wird.

8 Verbesserung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Frage, was gemacht werden kann, um die POD zu verbessern.

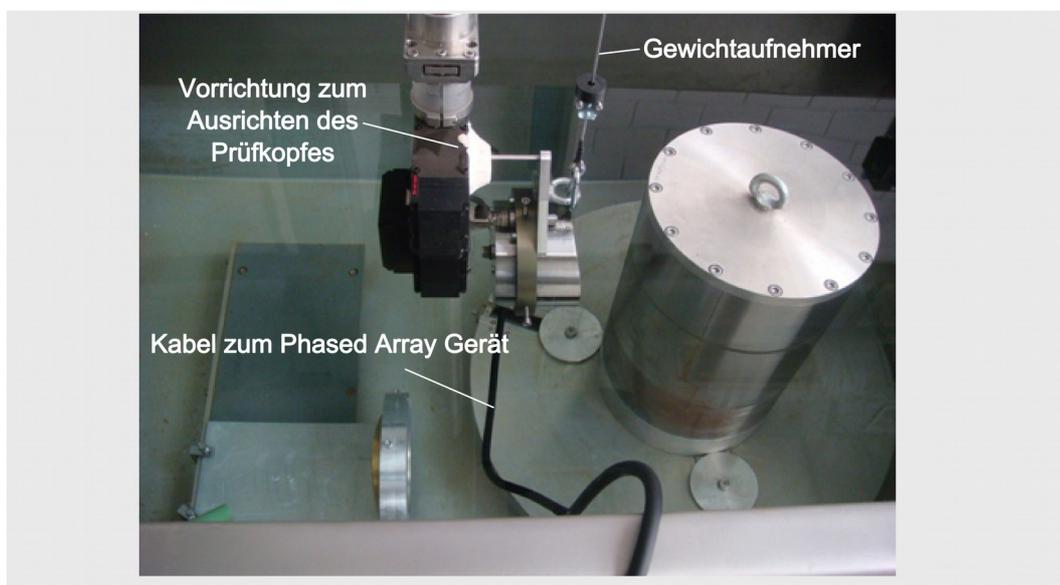
Es werden Simulationen und Versuche beschrieben mit denen die Prüftechnik weiterentwickelt werden kann.

8.1 Vergleich Multizonentechnik und Phased Array

Sowohl die Phased Array, als auch die Multizonentechnik werden eingesetzt um die POD zu verbessern. In diesem Kapitel soll untersucht werden, welche der Prüftechniken sich bei den hier betrachteten Bauteilen mehr zur Verbesserung der POD eignet. Dieser Vergleich wird anhand der Billetprüfung durchgeführt.

Der Vergleich wird für 10inch Billets durchgeführt. Als Reflektoren werden Flachbodenbohrungen mit einem Durchmesser von 0,8mm (#2 FBH) verwendet.

8.1.1 Versuchsaufbau



Aufbau zur Billetprüfung im Labor:
Billet steht auf Drehteller des Scanners, Prüfkopf ist mit Vorrichtung an Prüfkopfhalter des Scanners ausgerichtet und am Gewichtabnehmer befestigt.

Abbildung 47: Versuchsaufbau für die Phased Array Prüfung von Billets

Der Versuchsaufbau für die Phased Array Prüfung ist in Abbildung 47 gezeigt. Für die Multizonenprüfung wird derselbe Versuchsaufbau verwendet und die Multizonen-Prüfköpfe werden nacheinander in die Prüfkopfhalterung eingespannt. Um den Phased Array Prüfkopf auszurichten, wird der in Kapitel 3.3.1 beschriebene Vorgang verwendet. Auch die Multizonen-Prüfköpfe müssen an der Billetoberfläche ausgerichtet werden. Dazu wird der Multizonen-Prüfkopf solange in orthogonaler Richtung zur Billetausrückung verschoben, bis das Oberflächensignal maximal wird. Dies muss für jeden einzelnen Prüfkopf durchgeführt werden. Die Wasservorlaufstrecke wird für beide Techniken am Oberflächensignal eingestellt und überprüft.

8.1.2 Schallfelddurchmesser

Der Schallfelddurchmesser wird bestimmt und verglichen. Da die Flachbodenbohrungen wesentlich kleiner als der Schallfelddurchmesser ist, können diese dazu verwendet werden, da die Reflexionen an kleinen Defekten ein Abbild des Schallbündels zurückwerfen.

Es wird eine Flachbodenbohrung mit 0,8mm Durchmesser in 100mm Tiefe angeschallt und das reflektierte Signal in einem C-Bild dargestellt. In diesem wird das Schallbündel vermessen. Dazu werden die Punkte markiert, an denen die Amplitude des reflektierten Schalls um -6dB abgefallen ist (50% der Amplitudenhöhe). Der Abstand dieser Punkte voneinander gibt die Schallbündelbreite bei -6dB. Dies wird in zwei Richtungen durchgeführt. In Tabelle 6 ist das Ergebnis der Untersuchung zu sehen.

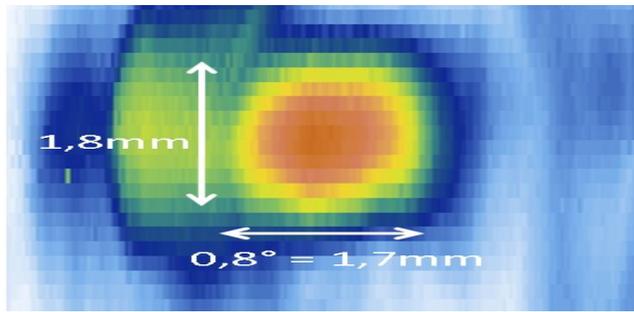
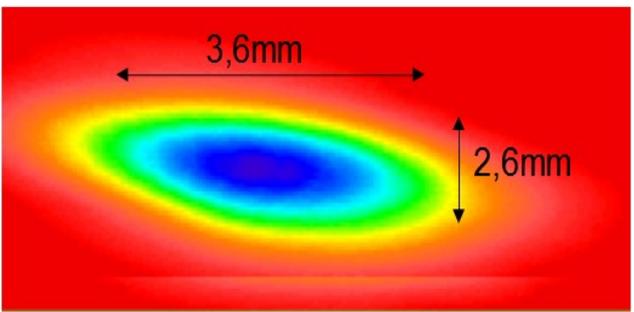
Phased Array Prüfung	Multizonenprüfung
	
Ausdehnung in Längsrichtung: 1,8mm Ausdehnung in Umfangsrichtung: 1,7mm	Ausdehnung in Längsrichtung: 2,6mm Ausdehnung in Umfangsrichtung: 3,6mm

Tabelle 6: Vergleich der Schallbündelgröße

In der Literatur ist beschrieben, dass der Schallbündeldurchmesser um #1 FBHs detektieren zu können bei ungefähr 50mil (1,27mm) liegen muss [Hass05]. In den Bildern in Tabelle 6 kann man erkennen, dass das Schallbündel der Multizonen-Prüfköpfe davon weit entfernt ist, das Schallbündel des Phased Array Prüfkopfes liegt annähernd in diesem Bereich. Daraus kann geschlossen werden, dass mit der Phased Array Technik eine empfindlichere Prüfung möglich ist.

8.1.3 Oberflächennahe Auflösung

Fehlstellen, die nahe der Oberfläche können leicht vom Eintrittsecho überdeckt sein. Daher muss dieser Bereich besonders betrachtet werden.

Da bei Phased Array das resultierende Schallfeld aus Interferenzen unterschiedlicher Schallwellen erzeugt wird, ist dabei ein breiteres Eintrittsecho zu erwarten.

Die oberflächennahen Flachbodenbohrungen im Testkörper liegen bei 4mm, 6mm, 8mm und 10mm. Sie werden mit beiden Techniken angeschallt. Es wird untersucht, ob sie von dem Eintrittsecho getrennt werden können. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 zu sehen.

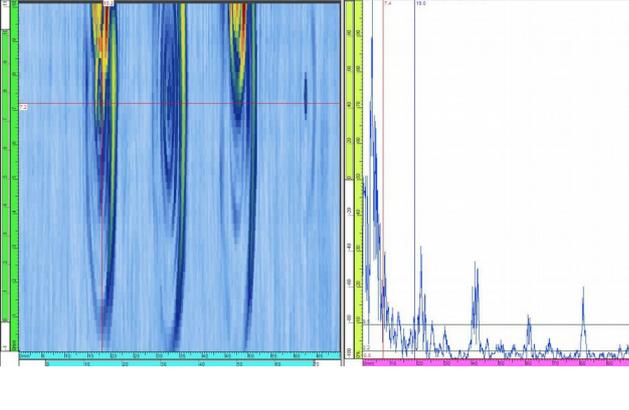
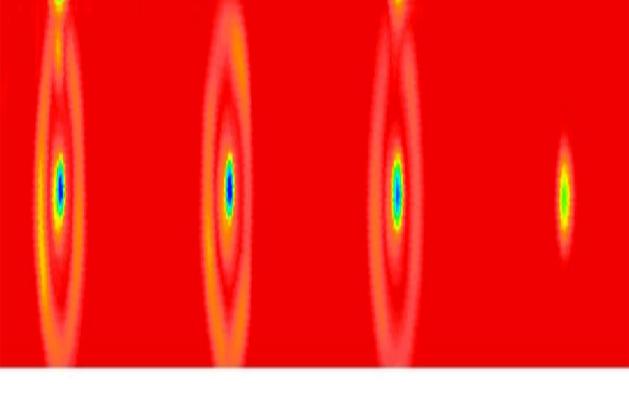
Phased Array Technik	Multizonentechnik
	
Flachbodenbohrung in 4mm Tiefe: ✓ Flachbodenbohrung in 6mm Tiefe: ✓	Flachbodenbohrung in 4mm Tiefe: ✓ Flachbodenbohrung in 6mm Tiefe: ✓

Tabelle 7: Vergleich der oberflächennahen Auflösung

Im C-Bild der Phased Array Prüfung sind neben den Echos der Flachbodenbohrungen noch weitere zu sehen. Dies liegt daran, dass das Billet durch die aufgerichtete Lage in der Labor-Ultraschallanlage nicht hundertprozentig gerade ausgerichtet werden konnte. In der normalen Billet-Inspektion werden die Billets liegend geprüft, dort kommt es nicht zu den Ausrichtungsproblemen. Im A-Bild jedoch können die Anzeigen der Flachbodenbohrungen von den anderen Anzeigen getrennt werden. Bei der Phased Array Technik ist das Eintrittsecho breiter als bei der Multizonenprüfung. Die oberflächennahste Flachbodenbohrung mit einem Schallweg von 4mm können allerdings beide Prüfverfahren detektieren.

8.1.4 Empfindlichkeit

Im nächsten Schritt wird überprüft, ob die Empfindlichkeit bei beiden Verfahren hoch genug ist, um 0,8mm Flachbodenbohrungen zu detektieren. Dazu werden Flachbodenbohrungen mit diesem Durchmesser, die in einer Tiefe zwischen 50mm und 140mm liegen, mit beiden Verfahren angeschallt und die Ergebnisse in einem Diagramm miteinander verglichen (siehe Abbildung 48).

Für diesen Vergleich wird die Verstärkung, die benötigt wird, um die Anzeige der Flachbodenbohrung auf 80% Bildschirmhöhe darzustellen, dokumentiert. Je größer die Verstärkung

ist, desto niedriger ist die Empfindlichkeit.

Die Verstärkung ist mit Phased Array bei den oberflächennäheren Bohrungen deutlich höher, als mit der Multizonenprüfung. Dies liegt daran, dass die Dynamic Depth Focussing Technik verwendet wird, bei der erst beim Empfang der Signale fokussiert wird. Dadurch wird zwar eine optische Fokussierung für die Anzeige erreicht, aber der Schalldruck wird dadurch nicht verstärkt und ist kleiner.

Es wurde ein weiteres Focal Law generiert, das ein Schallfeld mit festen Fokus in 50mm Bauteiltiefe erzeugt, um die Multizonenprüfköpfe und den Phased Array Prüfkopf direkt vergleichen zu können. Auch hier ist die Multizonentechnik überlegen. Der Grund dafür ist, dass die Multizonen-Prüfköpfe nur für eine Prüfzone entwickelt wurden und die Fokussierung darauf optimiert ist.

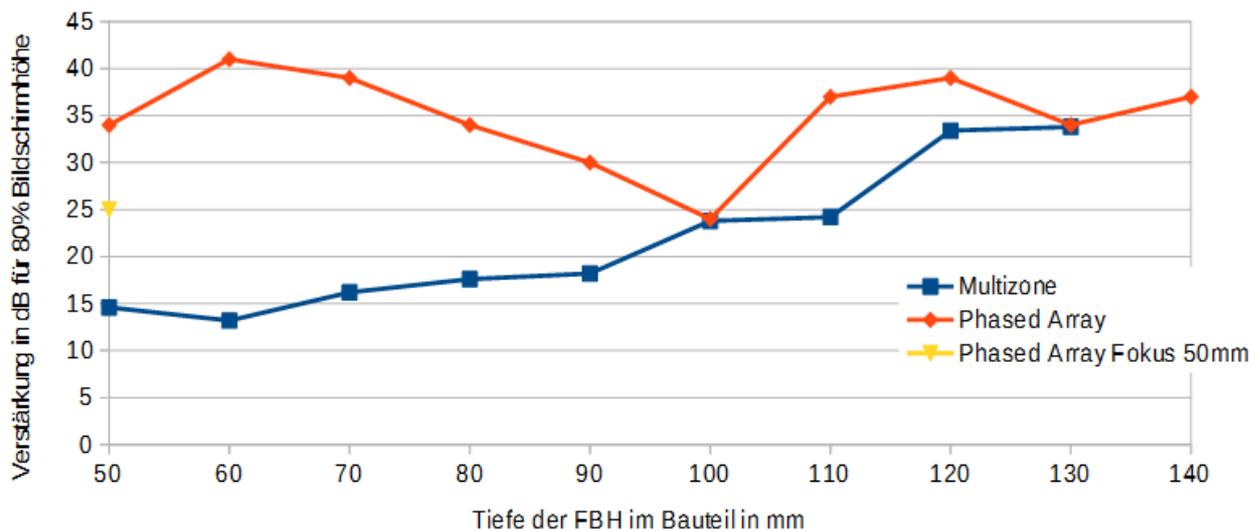


Abbildung 48: Empfindlichkeit von Phased Array und Multizonentechnik

In Abbildung 48 ist zu erkennen, dass mit der Phased Array Technik alle Flachbodenbohrungen detektiert werden können, mit der Multizonentechnik konnte die am tiefsten liegende Flachbodenbohrung nicht detektiert werden. Dies resultiert aus dem, im Vergleich zur Phased Array Technik, größeren Schallfeld (siehe Kapitel 8.1.2).

Für die Phased Array Technik kann eine Prüfeempfindlichkeit von 0,8mm Flachbodenbohrung für 10 inch Billets erreicht werden, für die Multizonentechnik bis zu einer Prüftiefe von 130mm.

8.1.5 Signal-Rausch-Abstand

Nicht nur die Fähigkeit die Flachbodenbohrung zu detektieren ist wichtig für den Vergleich, sondern auch der Signal-Rausch-Abstand, weil daraus erkannt werden kann, wie gut das Signal vom Gefügerauschen unterschieden werden kann.

Für jede Tiefe der Flachbodenbohrung wird Signal-Rausch-Abstand berechnet. Dafür wird in einem

Abschnitt des Billets ohne Reflektoren für jeden Prüfbereich das Gefügerauschen aufgenommen und die Werte für maximales und mittleres Rauschen bestimmt.

Aus dem mittleren und maximalen Rauschen wird das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) nach Gleichung (2.1) bestimmt.

Wie schon in Kapitel 2.2 beschrieben, muss das SNR größer als 2,5 sein. Dies ist für alle Prüftiefen der Fall und somit ist eine Prüfung auf eine Empfindlichkeit von 0,8mm Flachbodenbohrungen mit beiden Techniken möglich.

Die Werte für das Signal-Rausch-Verhältnis sind im Diagramm in Abbildung 49 zu sehen. Es ist um so besser, je höher der Wert ist.

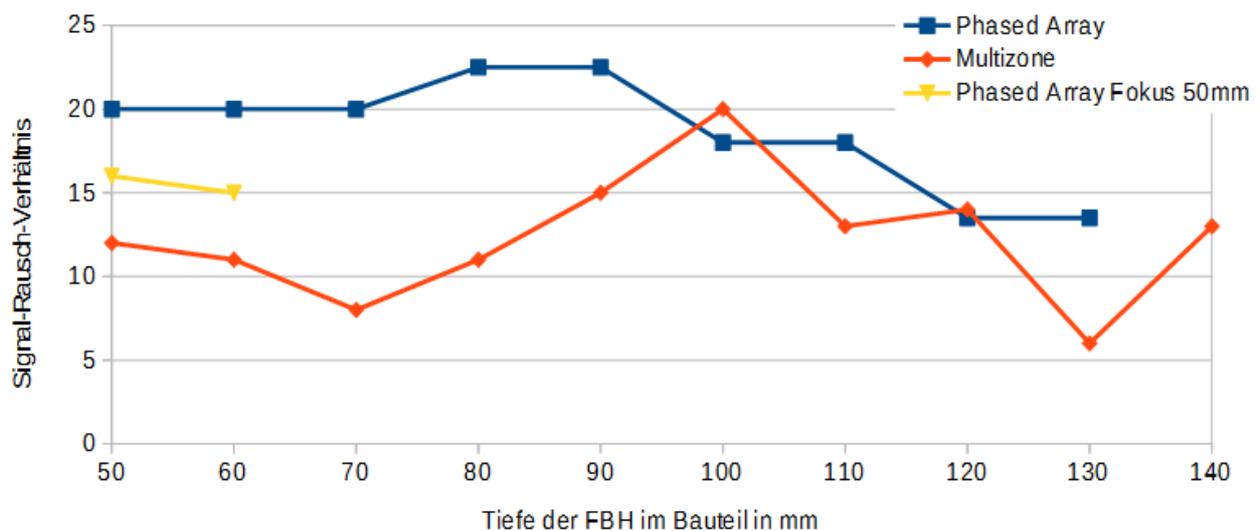


Abbildung 49: Signal-Rausch-Abstand für die Phased Array und die Multizonentechnik

Im Diagramm in Abbildung 49 wird deutlich, dass das Signal-Rausch-Verhältnis bei der Phased Array Technik besser ist als bei der Multizonentechnik. In einigen Bereichen ist das Signal-Rausch-Verhältnis sogar um weit mehr als 6dB besser als bei der Multizonenprüfung. Dies kann durch das schmalere Schallbündel bei der Phased Array Technik erklärt werden.

8.1.6 Oberflächendeformationen

Ein kritischer Punkt bei der Bestimmung der POD für die Ultraschallprüfung ist, wie das Prüfverfahren mit Oberflächendeformationen umgehen kann. Normalerweise ist eine flache, ebene Oberfläche für die Ultraschallprüfung notwendig und für die meisten Bauteile vorgeschrieben. Dennoch kann man nicht ausschließen, dass trotzdem ein Bauteil mit Beschädigungen der Oberfläche in der Prüfanlage landet.

Diese Beschädigungen können das Prüfergebnis stark verfälschen und dafür sorgen, dass Fehlstellen nicht detektiert werden oder das System eine Anzeige ausgibt an einer defektfreien Stelle.

Ein Prüfverfahren, das mit Oberflächendeformationen besser umgehen kann als andere, kann die POD verbessern.

Um zu verdeutlichen, welchen Effekt Deformationen auf der Oberfläche auf das Schallfeld haben, wurde diese Situation simuliert. Das simulierte Schallfeld einer ebenen, senkrecht zur Einschallrichtung liegenden Fläche und das Schallfeld an einer Oberfläche mit Beule sind in Abbildung 50 (a) zu sehen. Anhand des Schalldruckverlaufs in Abbildung 50 (b) ist erkennbar, dass die Beule wie eine Linse wirkt und eine Fokussierung des Schalles bewirkt. Problematisch dabei ist, dass der Schalldruck außerhalb des Fokuspunktes stark abnimmt und an diesen Stellen gegebenenfalls nicht mehr ausreicht um die notwendige Prüfempfindlichkeit zu gewährleisten.

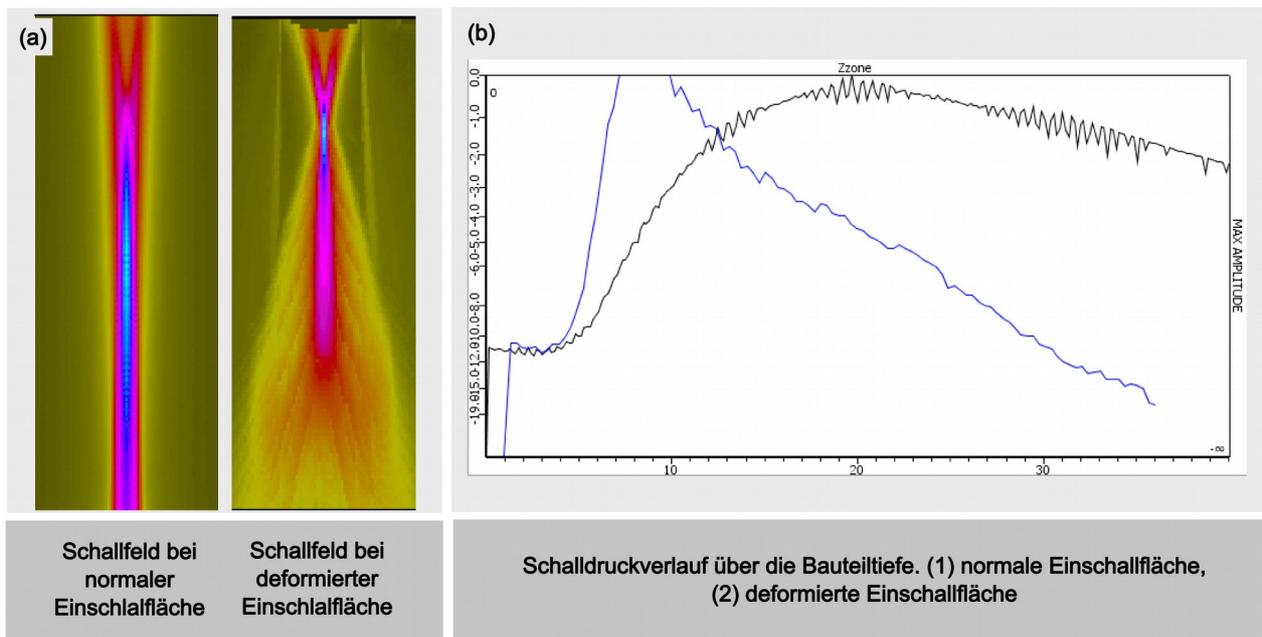


Abbildung 50: Simulation des Effektes von Oberflächendeformationen. (a) Vergleich der Schallfelder, (b) Vergleich der Schalldrücke

Mit 2-D Phased Array Köpfen kann eine Winkelschwenk Funktionalität eingebaut werden, wobei der Winkel um nur wenige Grad geschwenkt wird.

Es werden Focal Laws erstellt, die 13 verschiedene Winkel ansteuern. Der Winkel ist so gewählt, dass die einzelnen Schallwellen um 1,4mm im Mittelpunkt zueinander versetzt sind. Dieser Wert wurde so gewählt, dass sich die einzelnen Schallbündel um mindestens 25% überlappen. Der Winkelschwenk ist schematisch in Abbildung 51 (a) dargestellt.

Es wurden drei verschiedene Oberflächenanomalitäten, die bei Billets auftreten können, bestimmt (siehe Abbildung 51 (b)):

- Das Billet kann lokal unrund sein¹
- In der Zylinderfläche können Abflachungen auftreten, z.B. wenn das Billet aus großer Höhe auf den Boden fällt.

¹ Bei einem unrundern Billet ist der Querschnitt eher elliptisch als kreisrund.

- Dellen in der Oberfläche entstehen, wenn Werkzeuge oder andere Werkstücke in das Billet fahren oder falls Risse an der Bauteiloberfläche sind und diese durch Schleifen und Fräsen ausgeblendet werden.

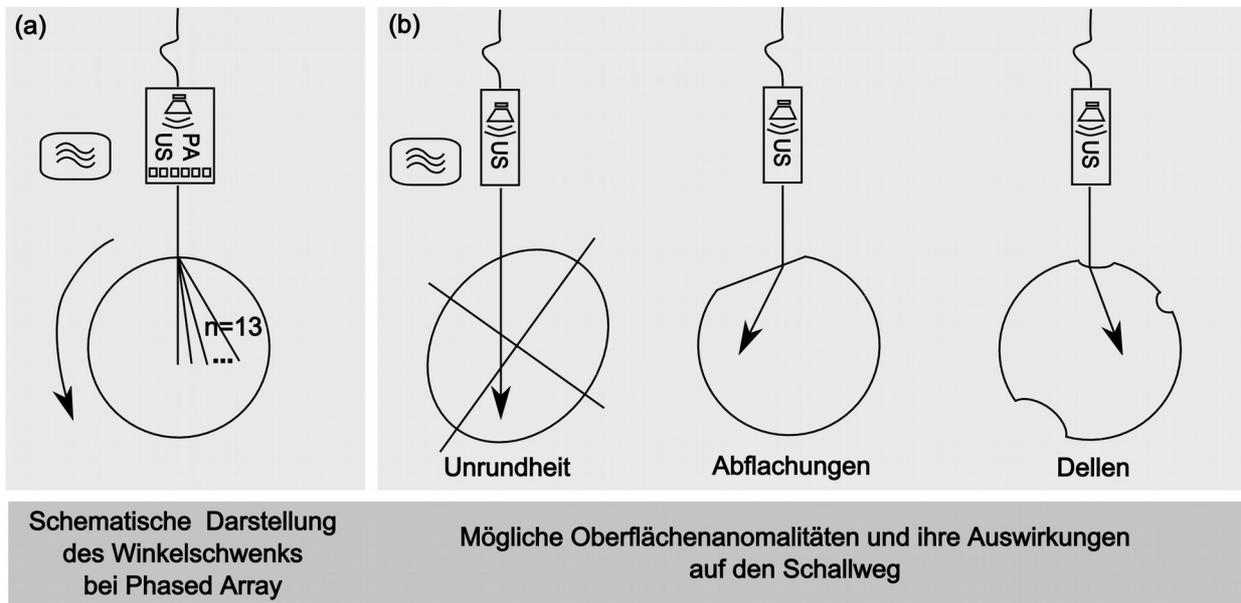


Abbildung 51: (a) Winkelschwenk mit Phased Array, (b) Mögliche Oberflächenanomalitäten

Um die Auswirkungen von Abflachungen und die Dellen zu überprüfen, wurden zwei kurze Billetabschnitte bearbeitet.

Um die Unrundheit zu simulieren, wird der Prüfkopf versetzt, so dass er das Billet nicht mehr senkrecht trifft, sondern unter einem Winkel. Bei einem unrundern Billet würde der Schall auch nicht mehr senkrecht auf das Billet treffen. Die Näherung, die bei dieser Annahme getroffen wird, reicht aus, um einen Vergleich der beiden Techniken anzustellen.

Alle der nachfolgenden Experimente werden für die Multizonen- und Phased Array Prüfung mit Winkelschwenk durchgeführt.

Unrundheit

Der Prüfkopf wird schrittweise von seiner optimalen Ausrichtung vor dem Billet entfernt. Es wird eine Flachbodenbohrung in einem 10inch Billet angeschallt und der Abfall der Amplitude für jeden Entfernungsschritt dokumentiert.

Eine Flachbodenbohrung in 50mm Bauteiltiefe wird angeschallt und die Amplitudenhöhe in % dokumentiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 52 zu sehen.

In der Grafik in Abbildung 52 sieht man, dass der Versatz des Prüfkopfes zur Billetmitte für die Multizonenprüfung einen starken Amplitudenabfall zur Folge hat. Durch den Winkelschwenk bei der Phased Array Technik wird der Reflektor angeschallt, obwohl der Prüfkopf zur Billetmitte versetzt ist. Der Amplitudenabfall bei der Phased Array Technik ist dadurch zu erklären, dass mit

einem größeren Winkel, der ausgesendete Schalldruck geringer wird.

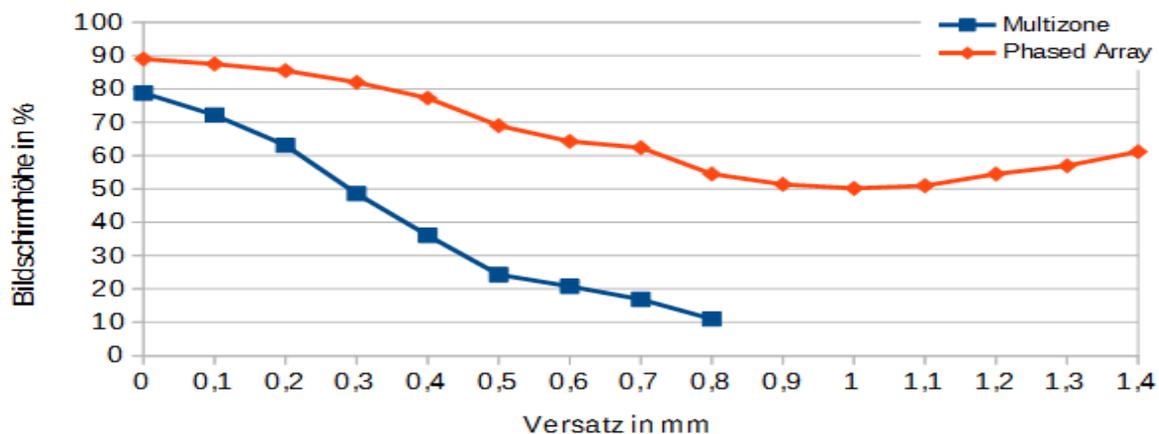


Abbildung 52: Ergebnis der Versuche zur Unrundheit

Ab 1mm Prüfkopfversatz nimmt bei der Phased Array Technik die reflektierte Amplitude wieder zu. Das liegt daran, dass die Flachbodenbohrung von der Seite angeschallt wird und dadurch, wie eine Querbohrung, besser reflektiert als eine Flachbodenbohrung.

Abflachung

In einen kurzen Billetabschnitt werden sieben Abflachungen gefräst. Die Tiefen der Abflachungen (gemessen von der Billetoberfläche) sind: 0,4mm, 0,3mm, 0,2mm, 0,1mm, 0,07mm, 0,05mm und 0,02mm

Das Billet mit den Abflachungen ist mit einer Durchbohrung in der Mitte des Billets versehen, welche als Reflektor dient.

Beim Übergang von der Zylinderfläche auf die abgeflachte Fläche, wird die Schallwelle den Mittelpunkt des Billets verfehlen. Fehlstellen, die direkt darunter liegen, werden deshalb nicht detektiert.

Die Frage, die mit diesen Untersuchungen geklärt werden kann, ist, wie groß eine Abflachung maximal sein darf, damit eine Fehlstelle in der Billetmitte detektiert werden kann. Der Amplitudenabfall wird dokumentiert.

Als Grenze für die Prüfbarkeit wird ein Amplitudenabfall von -6dB festgelegt.

In Abbildung 53 ist ein C-Bild von der Prüfung eines Billets mit Abflachung zu sehen. Im C-Bild wird die reflektierte Amplitude einer axialen Bohrung im Billet abgebildet. Der Amplitudenabfall auf der Abflachung ist deutlich erkennbar, diese tritt an den Stellen auf, an denen der Schall die Durchbohrung in der Billetmitte verfehlt. Es kommt zu einem Maximum der reflektierten Energie an der Stelle, an der der Schall direkt durch die gerade Fläche der Abflachung auf den Reflektor fällt. Um die Dynamik zu veranschaulichen wurde eine Scanlinie des C-Bildes als Projektion

dargestellt. Dabei wird die Amplitudenhöhe für jeden Scanpunkt farblich und als Höhe dargestellt.

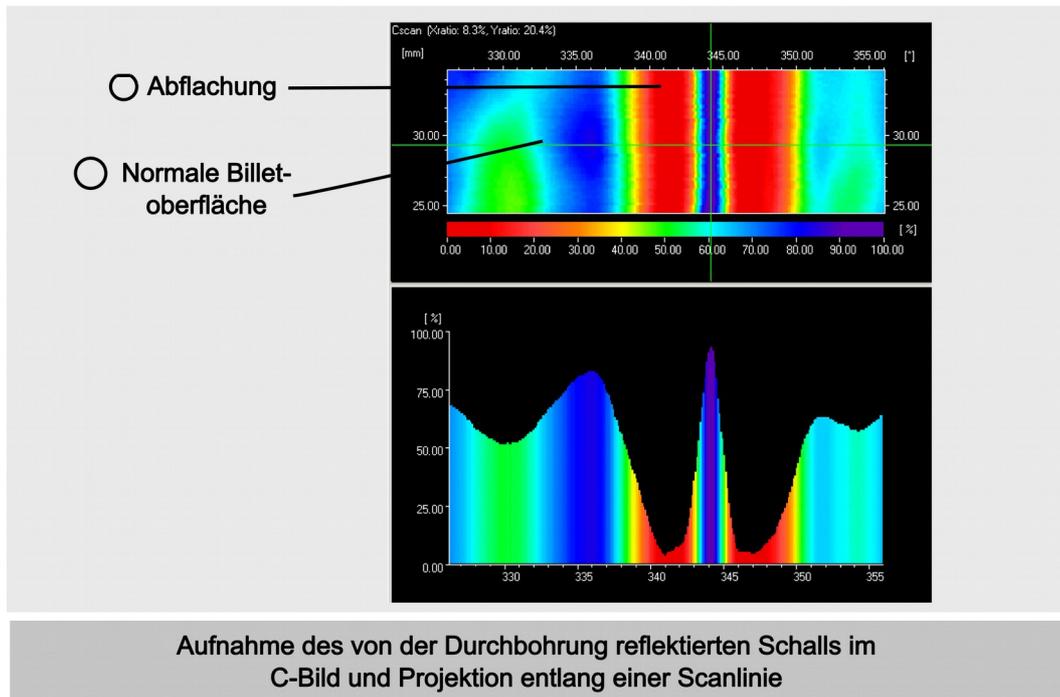


Abbildung 53: C-Bild des Testkörpers mit Abflachungen

In Tabelle 8 sind die Ergebnisse der Untersuchung zu sehen.

Abflachtungstiefe	Amplitudenabfall bei der Multizonenprüfung	Amplitudenabfall bei der Phased Array Prüfung
0,4mm	-28dB	-20dB
0,3mm	-28dB	-12dB
0,2mm	-24dB	-6dB
0,1mm	-12dB	-3dB
0,07mm	-11dB	Kein Effekt
0,05mm	-5,2dB	Kein Effekt
0,02mm	Kein Effekt	Kein Effekt

Tabelle 8: Amplitudenabfall bei unterschiedlichen Abflachtungstiefen

Die Grenze von maximal 6dB Amplitudenabfall wird mit der Multizonentechnik schon bei einer Abflachtungstiefe von 0,07mm erreicht. Bei der Phased Array Technik mit Winkelschwenk ist diese Grenze erst bei einer Abflachtungstiefe von 0,2mm erreicht.

Dellen

In einen anderen kurzen Billetstück wurden Dellen gefräst.

Die Durchmesser/Tiefe-Verhältnisse sind: 8mm/1mm, 24mm/3mm, 40mm/5mm, 56mm/7mm. In der Mitte des Testkörpers ist eine axiale Bohrung, die als Reflektor dient.

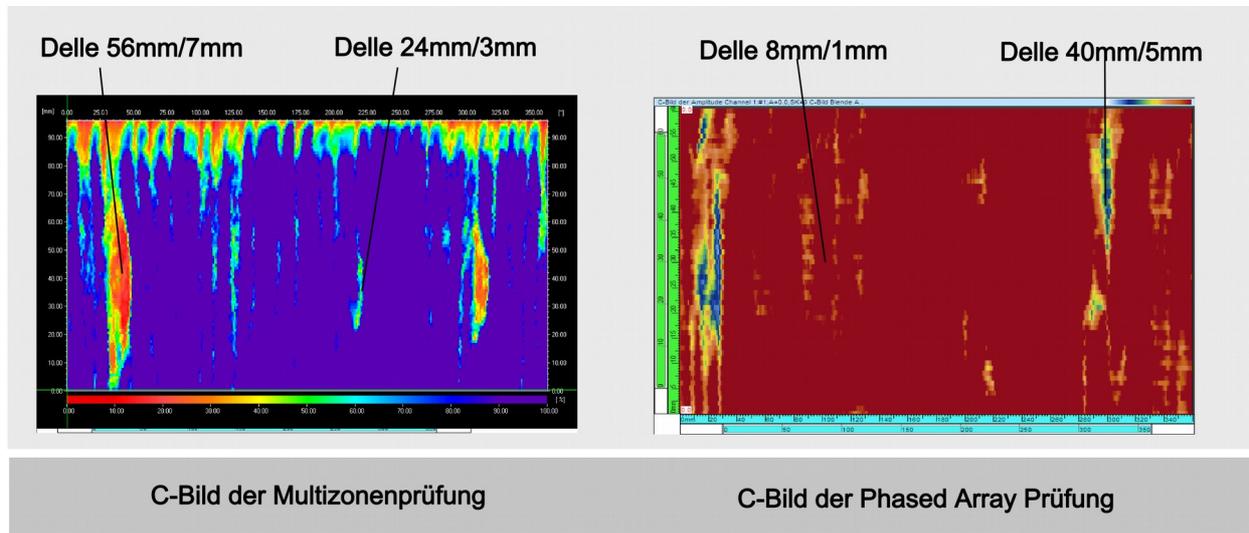


Abbildung 54: Auswirkung von Dellen in der Oberfläche eines Billets

Die Ergebnisse der Prüfung des Testkörpers sind für beide Techniken als C-Bild dargestellt (siehe Abbildung 54). Für beide Techniken war die Auswirkung der größeren Dellen so groß, dass für diese keine Fehler in der Billetmitte detektiert werden konnte. Bei den kleineren ist die Amplitude bei beiden Techniken lokal um 4dB abgefallen.

8.1.7 Ergebnis

Das gemessene Schallbündel der Phased Array Technik ist wesentlich kleiner als das der Multizonentechnik. Der Grund dafür ist, dass die Einschallung in eine Zylinderfläche ein elliptisches Schallbündelprofil ergibt. Dies wird bei der Phased Array Technik elektronisch ausgeglichen. Aus diesem Grund ist das Signal-Rausch-Verhältnis bei der Phased Array Prüfung wesentlich besser als bei der Multizonenprüfung. Allein dadurch kann die POD schon beträchtlich verbessert werden. Bei Empfindlichkeit und oberflächennaher Auflösung sind beide Prüfverfahren gleich gut.

Bei Deformationen an der Oberfläche hat die Phased Array Technik durch den Winkelschwenk einen großen Vorteil gegenüber der Multizonenprüfung. Bei einer Unrundheit des Billets kann der Prüfkopf gegen die Billetmitte um mehrere zehntel Millimeter weiter versetzt sein, ohne dass die reflektierte Amplitude um mehr als 6 dB abweicht. Auch Abflachungen im Billet können um mehrere zehntel Millimeter tiefer als bei der Multizonen Technik im Bauteil sein, bevor es eine Auswirkung auf das Phased Array Ergebnis hat. Bei Dellen ist die Fähigkeit zur Fehlerdetektion bei beiden Prüfverfahren gleich.

Der Vergleich hat ergeben, dass die Phased Array Technik einen Vorteil gegenüber der

Multizonentechnik hat. Durch die Phased Array Technik kann die POD verbessert werden.

8.2 Phased Array Technik für Prüfung von Schmiedescheiben

Im vorherigen Kapitel wurde gezeigt, dass durch die Phased Array Technik eine Verbesserung der POD möglich ist.

In diesem Kapitel ist die Entwicklung einer Phased Array Prüftechnik für Schmiedescheiben mit einer maximalen Prüftiefe von 150mm beschrieben. Das Material, aus dem diese Schmiedescheiben besteht, ist Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo und damit ein schwer zu prüfendes β -Titan. Die Empfindlichkeit mit der dieses Material geprüft werden soll ist 0,4mm Flachbodenbohrung (#1 FBH).

Die betrachteten Schmiedescheiben haben Bereiche großer plastischer Verformung, in denen die Körner des β -Gefüges so stark verformt sind, dass diese Bereiche nur sehr schwer zu prüfen sind. Dies führt zu Bereichen, in denen die geforderte POD nicht erreicht werden kann, warum einen Phased Array Technik entwickelt werden soll.

Der Vorteil von der Phased Array Technik für Schmiedescheiben ist, neben dem Zeitgewinn durch das Entfallen der Prüfkopfwechsel, dass gemeinsam mit der elektronischen Fokussierung ein kleiner Winkelschwenk gemacht werden kann. Dadurch könnten Fehler, die leicht abweichend von den Fließlinien orientiert sind, besser detektiert und damit die POD verbessert werden.

Um die Winkelschwenkfähigkeit umsetzen zu können, muss mindestens ein 2-D Array verwendet werden. Für die reine Fokussierung würde ein Ringarray ausreichen.

8.2.1 Prüfkopf-Design

Für diese Arbeit wurden zwei Arrays gefertigt, ein Ringarray, das nur zur Fokussierung verwendet werden kann, und ein volles 2-D Matrix Array, mit dem Fokussierung und Winkelschwenk möglich sind. Es werden die in Kapitel 2.3 vorgestellten Designregeln verwendet.

Um zu gewährleisten, dass die einzelnen Elemente ungefähr eine gleiche Fläche haben (**Designregel Nr. 1**), werden die Ringe beim Ringarray nach außen hin dünner.

Da das Materialrauschen beim Titanwerkstoff das wichtigste Kriterium darstellt, wird als erstes das maximale Pulsvolumen des Prüfkopfs ermittelt, wie in [Marg07] beschrieben (**Designregel Nr. 7**).

Mit drei konventionellen Prüfköpfen mit zwei unterschiedlichen Frequenzen wird zunächst das Pulsvolumen an einem Kugelreflektor, der im Tauchbecken platziert ist, bestimmt. In einem Testkörper aus dem Material, das später mit der hier entwickelten Prüftechnik untersucht werden soll, werden zwei Flachbodenbohrungen eingebracht. Eine mit 0,4mm Durchmesser (#1 FBH), die andere mit 0,2mm Durchmesser (#1/2 FBH). Die Verstärkung für die Messung des Rauschens wird an diesen Flachbodenbohrungen eingestellt, so dass die Amplitudenhöhe des reflektierten Signals auf 80% Bildschirmhöhe steht. Danach wird ein Bereich ohne Ersatzfehler abgescannt und das Rauschlevel bestimmt.

Der Bauteilbereich, in dem das Rauschen gemessen wird, ist ein Bereich in dem vor dieser Untersuchung festgestellt wurde, dass das Gefüge größeres Rauschen erzeugt als in anderen

Bereichen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Tabelle 9 aufgeführt.

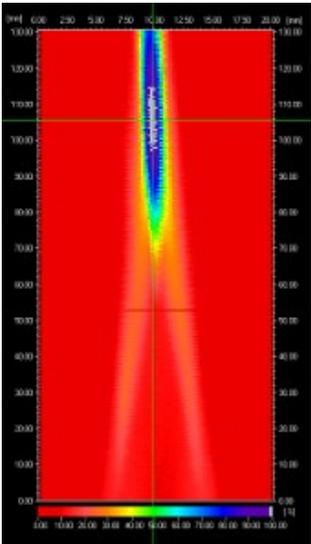
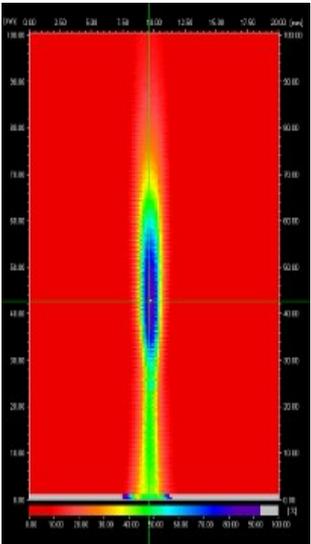
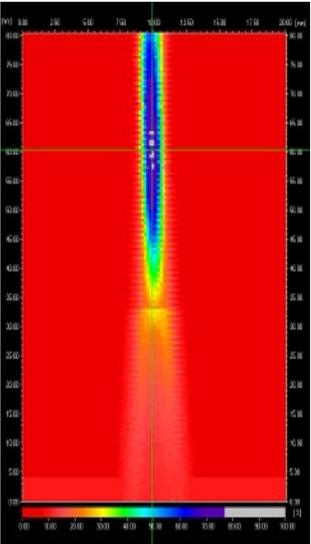
	Prüfkopf 1	Prüfkopf 2	Prüfkopf 3
Nominale Frequenz	15MHz	10MHz	10MHz
Nominale Fokusslänge in Wasser	160mm	100mm	140mm
Aufnahme des Schallfeldes an einem Kugelreflektor in Wasser			
Schallbündelbreite -6dB ermittelt aus Aufnahme	1,3mm	1,1mm	1,1mm
Pulsbreite bestimmt durch die Länge eines Pulses, der an einer Rückwand (gerade Fläche) reflektiert wird	0,31mm	0,24mm	0,36mm
Pulsvolumen $PV = \pi \times d^2 \times b$, wobei d: Schallbündeldurchmesser und b: Pulsbreite	0,41mm ³	0,21mm ³	0,37mm ³
SNR für #1 FBH	3,6	5,7	3
SNR für #1/2 FBH	0,14	1	0,34

Tabelle 9: Schallbündelbreite, Pulsvolumen und Signal-Rausch-Abstand für die drei verwendeten Prüfköpfe

In einem Diagramm wird das Pulsvolumen gegen 1/SNR aufgetragen, die Werte für die Prüfköpfe eingetragen und linear extrapoliert (siehe Abbildung 55).

Um eine gute Prüfbarkeit des Materials zu gewährleisten, muss das Signal-Rausch-Verhältnis

größer als 2,5 sein ($SNR > 2,5$). Das Pulsvolumen darf nur so groß sein, dass das Signal-Rausch-Verhältnis nicht kleiner als 2,5 wird. Für diesen kritischen Punkt kann das maximale Pulsvolumen aus dem Diagramm gelesen werden.

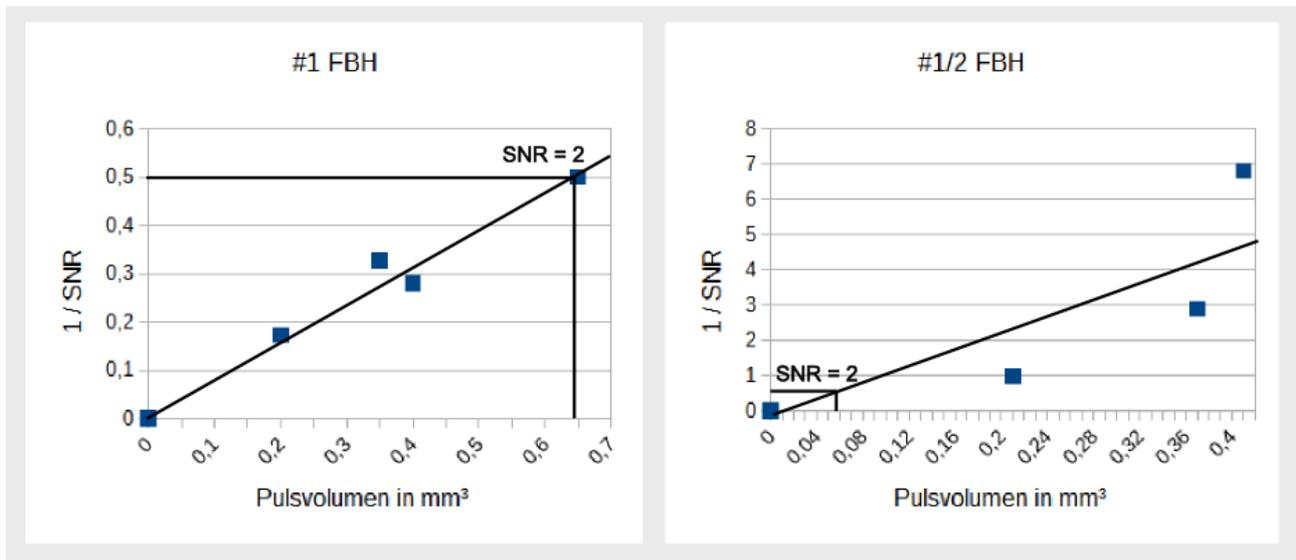


Abbildung 55: Messwerte aus der Pulsvolumen- und Rauschlevel-Untersuchung, extrapoliertes Graph und Werte für $SNR = 2$

Der kritische Punkt für #1 FBH ist bei einem Pulsvolumen von $0,64\text{mm}^3$, das heißt, das erzeugte Pulsvolumen muss kleiner als $0,64\text{mm}^3$ sein. Bei einer angenommenen Frequenz von 10MHz und einer daraus resultierenden Pulslänge von ungefähr $0,3\text{mm}$, müsste der Schallbündeldurchmesser kleiner als $1,6\text{mm}$ sein, dies ist ein Wert, der im Fokus des Prüfkopfes leicht erreicht werden kann.

Für #1/2 FBH liegt das kritische Pulsvolumen bei $0,006\text{mm}^3$. Dies ist ein Pulsvolumen, das bei den typischerweise verwendeten Frequenzen nicht erreichbar ist. Das bedeutet, dass dieser Bereich des Bauteils nicht mit der Ultraschall-Prüfmethode Impuls-Echo auf eine Empfindlichkeit von $0,2\text{mm}$ Flachbodenbohrung geprüft werden kann. Falls dieser Prüfbereich in Zukunft mit der erhöhten Empfindlichkeit geprüft werden soll, muss entweder das Material verändert, die plastische Verformung reduziert oder ein Wärmebehandlungsschritt eingeführt werden.

Nach **Designregel Nr. 4** wird die minimale Apertur über die Nahfeldlänge der gesamten Prüfkopffläche berechnet. Bei den typischen Bauteiltiefen für in dieser Arbeit betrachtete Schmiedescheiben wird die Fokuslänge in Wasser mit 600mm bestimmt bei einer Wasservorlaufstrecke von 75mm . Es wird mit einer Frequenz von 10MHz gerechnet, da dies eine typische Prüffrequenz in der Überprüfung von Schmiedescheiben im Triebwerksbau ist und von den Phased Array Herstellern noch realisiert werden kann.

Die Berechnungen sind in Tabelle 10 dargestellt.

	Quaderförmiger Schwinger	Runder Schwinger
Gleichung für Nahfeldlänge aus [Krau86]	$N = \frac{1,37 \times b^2}{4 \times \lambda}$	$N = \frac{D^2}{4 \times \lambda}$
Minimale Größe des Schwingers	16mm Kantenlänge	31mm Durchmesser

Tabelle 10: Nahfeldlänge für einen quaderförmigen und einen runden Schwinger und die sich daraus ergebende minimale Größe des Schwingers

Die Spezifikationen der entworfenen und gefertigten Prüfköpfe sind in Tabelle 11 zu finden.

	Ringarray	Matrixarray	
Frequenz	10MHz	10MHz	
Bandbreite -6dB	>55%	>55%	
Elemente	16	11x11	
Elementgröße	Die Elementgröße variiert von Ring zu Ring, damit Designregel 1 eingehalten wird. Beispielhaft sind die ersten drei Ringe angegeben		
	Nr.	Øinnen	Øaußen
	1	0	7mm
	2	7,2mm	10mm
	3	10,2mm	12,4mm
Pitch (Abstand von Beginn des Elements zum Beginn des nächsten Elements)	variiert von Element zu Element	2,1mm	
Inter-Element-Spacing (Abstand zwischen den Elementen)	0,1mm	0,1mm	
Apertur	Ø 30mm	23,1mm x 23,1mm	

Tabelle 11: Eigenschaften der beschriebenen Arrays

8.2.2 Versuche

Mit beiden Prüfköpfen werden Messungen an einfachen Testkörpern mit Flachbodenbohrungen gemacht. Diese quaderförmige Testkörper werden verwendet um die konventionellen Prüfköpfe zu überprüfen und die Prüfung zu kalibrieren. Um zu überprüfen ob die Qualität der Prüfung mit Phased Array mit der konventionellen Technik verglichen werden kann, werden die Ergebnisse dieser Prüfung gegenübergestellt.

Flachbodenbohrungen mit einem Durchmesser von 0,4mm konnten nur mit einem sehr schlechten

Signal-Rausch-Abstand mit diesen Prüfköpfen detektiert werden. Bei Flachbodenbohrungen mit einem Durchmesser von 0,8mm ist das Ergebnis hingegen sehr gut. In Abbildung 56 ist in einem C-Bild das Ergebnis einer Prüfung von 1,2mm und 0,8mm Flachbodenbohrungen in Prüftiefen zwischen 10mm und 30mm zu sehen.

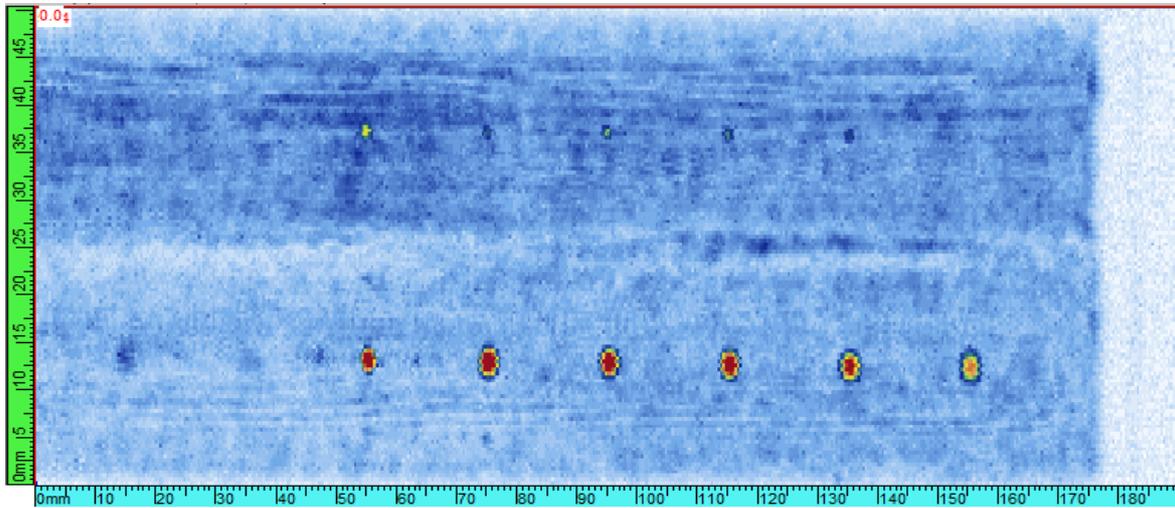


Abbildung 56: C-Bild der Prüfung von quaderförmigen Testkörpern mit dem Matrixarray. Die detektierten Anzeigen sind von Flachbodenbohrungen mit einem Durchmesser von 1,2mm (unten) und 0,8mm (oben). Sie liegen in Schalltiefen von 10mm - 30mm

8.2.3 Verbesserung der POD durch Winkelschwenk

Die Winkelschwenkfunktion des Matrixarrays hat hier einen Vorteil in den Übergangsbereichen der Schmiedefießlinien. Dort kann mit konventionellen Techniken nur in einem Winkel geprüft werden, falls die Materialdefekte nicht senkrecht zu diesen Winkel auftreten, sind sie schwer zu detektieren.

Um dies zu demonstrieren, wird eine Simulation mit CIVA durchgeführt. Eine Probe aus Nickelbasislegierung (Inconel, Schallgeschwindigkeit Longitudinal: 5825 m/s, Schallgeschwindigkeit Transversal: 3080m/s) wird als Modell in der Simulation zugrunde gelegt. Ein zylinderförmiger Einschluss aus Aluminium wird simuliert. Seine Mantelfläche ist senkrecht zur Schallrichtung ausgerichtet. Das vom Einschluss reflektierte Signal wird aufgezeichnet. Der Einschluss wird um jeweils 1° geneigt und die reflektierte Amplitudenhöhe wird dokumentiert. Der Schalllaufweg im Bauteil zum Reflektor ist 50mm von der Einschallfläche aus gesehen.

Ein konventioneller, fokussierter Prüfkopf und das Matrixarray werden verwendet. Der konventionelle Prüfkopf hat einen Schwingerdurchmesser von 20mm und einer Frequenz von 10MHz. Seine Fokussierung wird über eine Linse realisiert und diese hat einen Radius von 300mm. Mit einer Wasservorlaufstrecke von 75mm liegt der Fokuspunkt in Inconel in 50mm Tiefe, so dass der Reflektor im Fokuspunkt liegt.

Das Matrixarray wird durch die Verzögerungszeiten auch auf eine Bauteiltiefe von 50mm fokussiert. Es werden fünf Winkel nacheinander angesteuert von -5° bis 0°.

Das Ergebnis der Simulation ist in Abbildung 57 zu sehen.

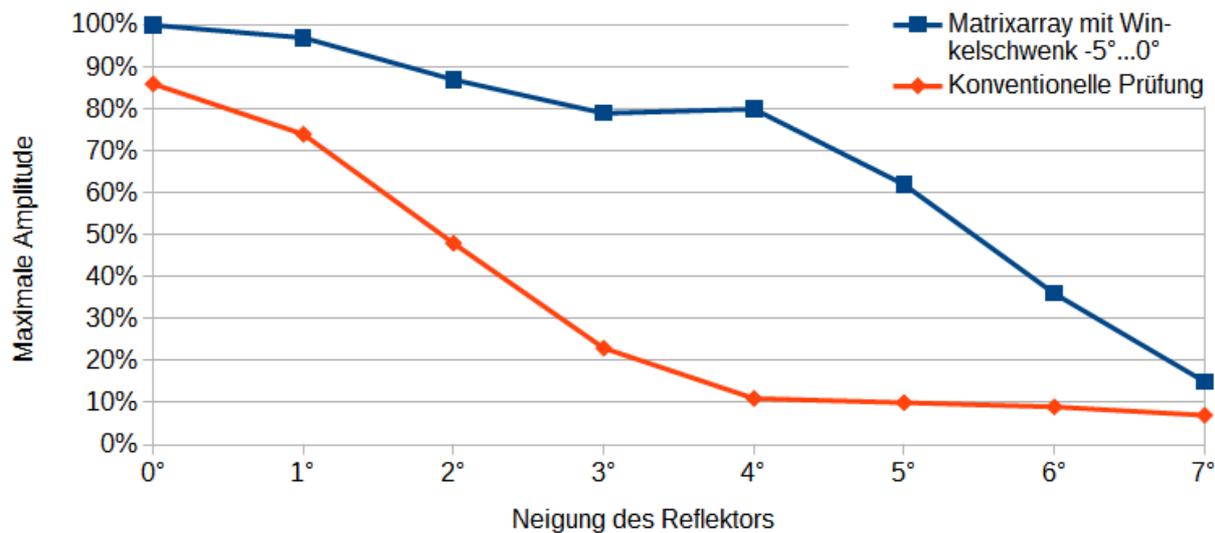


Abbildung 57: Abfall der Amplitude wenn der Reflektor nicht senkrecht getroffen wird

Der Vorteil der Phased Array Technik gegenüber der konventionellen Technik wird deutlich. Bei konventioneller Technik würde ein Materialdefekt, dessen Winkel im Verhältnis zur Einschallrichtung nur um 2° abweicht nicht mehr detektiert werden können. Bei einem Matrixarray mit Winkelschwenk und in diesem Beispiel relativ geringen Winkeln könnte der Defekt um mehr als 5° geneigt sein. Der Winkel vom Winkelschwenk könnte bei der Prüfung der Schmiedescheiben so angepasst werden, dass er dem Verlauf der Schmiedelinien am besten entspricht.

8.2.4 Ergebnis

Das Ergebnis der Versuche zeigt, dass die Prüfeempfindlichkeit von 0,4mm nicht erreicht werden kann. Die Prüfeempfindlichkeit von 0,8mm ist kein Problem.

Diese Technik kann daher nur bei Prüfobjekten bei denen eine Prüfeempfindlichkeit von 0,8mm vorgeschrieben ist eingesetzt werden.

In der Simulation ist allerdings deutlich geworden, dass für diese Prüfeempfindlichkeit die Phased Array Technik einen klaren Vorteil hat, da sie mit der Winkelschwenk Funktionalität in den Bereichen, in denen die Schmiedelinien nicht senkrecht getroffen werden, dennoch Fehler, die bis zu 5° von der Idealausrichtung abweichen, detektiert werden können.

Um die Empfindlichkeit auf 0,4mm Flachbodenbohrungsdurchmesser zu verbessern müssen weitere Entwicklungsschritte folgen.

Der Schallfelddurchmesser kann durch eine Vorfokussierung der Prüfköpfe verringert werden.

Des Weiteren könnte eine Verbesserung der Prüfung durch die Verwendung von neuen Phased Array Methoden erreicht werden.

So kann zum Beispiel das Signal-Rausch-Verhältnis durch die Synthetische Apertur Fokus Technik (SAFT) verbessert werden [Spie13]. Dabei wird der Fehler von verschiedenen Positionen angeschallt und anschließend wird das gesamte Prüfvolumen über Bildverarbeitung rekonstruiert. Es werden Prüfköpfe mit großem Divergenzwinkel verwendet, um möglichst viel Information zu erhalten.

Diese Technik kann auch mit einem Phased Array Prüfkopf umgesetzt werden. Dann wird die Technik als getaktete Gruppenstrahlertechnik oder Sampling Phased Array bezeichnet. Die getaktete Gruppenstrahlertechnik verwendet wie bei der SAFT-Methode verschiedene Einschallpositionen. Allerdings werden diese nicht durch die Bewegung des Prüfkopfes erhalten, sondern durch die unterschiedliche, laterale Position der Elemente auf dem Phased Array Prüfkopf. Dabei wird ein einzelnes Element angesteuert und alle bzw. einige der anderen Elemente empfangen (je nachdem wie viel Informationsgehalt benötigt wird). Da alle Elemente eine unterschiedliche Position auf dem Array haben, bekommen sie alle eine unterschiedliche Laufzeitinformation. Diese Informationen werden miteinander verrechnet. Die einzelnen Elemente auf dem Array sind so klein, dass sie einem Punktstrahler ähneln, so dass sich der Schall in alle Richtungen ausbreitet [Bula05]. Dabei gibt es verschiedene Auswertelgorithmen, die untersucht werden müssten [Holm05].

Sampling Phased Array kann auch noch durch angepasste Filter verbessert werden, um die Empfindlichkeit noch weiter zu erhöhen. In [Pinc11] wird zum Beispiel ein Filter zur Rauschunterdrückung vorgestellt.

8.3 Einsatz der Phased Array Technik zur Schallfeldmodulation

In den hier beschriebenen Simulationen und Versuchen soll überprüft werden, ob die Phased Array Technik zur Schallfeldmodulation eingesetzt werden kann und dadurch die POD verbessert werden kann.

Es wird überprüft, ob sogenannte Besselstrahlen, auch nicht-divergierendes Schallfeld genannt, mit einem Matrixarray erzeugt werden können.

Eine Ultraschallprüfung mit Besselstrahlen könnte die POD verbessern. Wenn der so gebildete Schallstrahl eine so geringe Divergenz aufweist, wie in der Optik, wäre es möglich auch in den stark streuenden Regionen größere Prüftiefen zu realisieren.

8.3.1 Nicht divergierendes Schallfeld

In der Optik werden Besselstrahlen in der Lichtscheiben-Mikroskopie für biologische Proben, wie Zellcluster, Embryos, Haut, Hirngewebe, u.ä. verwendet. Die Eindringtiefe des verwendeten Laserlichts ist beschränkt durch die Streuung des Lichts am Gewebe. Durch die Verwendung von Besselstrahlen kann die Eindringtiefe erheblich vergrößert werden, da sich diese durch eine sehr geringe Divergenz und eine Fähigkeit zur Selbstrekonstruktion auszeichnen. [Fahr11]

Die Besselstrahlen können entweder durch axial-konische Linsen (Axicons) oder durch räumliche Licht-Modulation gebildet werden [Fahr10].

Besselstrahlen lassen sich auch mit Ultraschall realisieren. Die Schallfelder haben dann einen langgestreckten Fokusbereich mit gleichem Schallfelddurchmesser unabhängig von der Tiefe. Dies gilt für einen relativ großen Bereich im Bauteil, allerdings ist dieser Bereich durch die maximale Tiefe, in die dieser Schall mit ausreichendem Schalldruck eindringen kann, beschränkt. Auch der Bereich direkt hinter dem Prüfkopf eignet sich nicht zur Prüfung, da es dort zu Interferenzen kommt, bis sich der kollimierte Schallstrahl aufgebaut hat. Der Vorteil von Besselstrahlen im Ultraschall ist, dass sie über einen großen Tiefenbereich fokussiert sind und Fehlstellen knapp unter der Oberfläche detektiert werden können, sowie Fehlstellen, die von anderen großen Reflektoren verdeckt sind [Silk84].

In der Literatur werden mehrere Verfahren vorgestellt, wie Besselstrahlen mit Ultraschall realisiert werden können. Das typischste Verfahren ist, dass Einzelschwinger-Prüfköpfe mit Axicon-Linsen (axial-konisch) oder logarithmischen Linsen aus Plexiglas erzeugt werden [Karp06, Katc10]. Karpelson und Lu/Greenleaf stellen ein elektronisches Verfahren zur Herstellung von Besselstrahlen vor. Dazu berechneten sie die Schalldruckverteilung auf der Oberfläche des Prüfkopfes um eine schwach divergierende Schallwelle mit geringen Nebenkeulen zu generieren. Diese Schalldruckverteilung wurde durch verschiedene ringförmige Schwinger und einer angepassten elektronischen Verschaltung bewerkstelligt [Karp02, Lu90]. Hsu / Margetan / Thompson stellen eine Lösung vor, bei der sie das Piezoelement so polarisieren, dass es die Schalldruckverteilung an der Oberfläche nachbildet und somit eine Schallwelle mit geringer Divergenz erzeugt [Hsu89].

8.3.2 Erzeugung des nicht divergierenden Schallfeldes mit einem Matrixarray

Dass Besselstrahlen mit Phased Array aufgebaut werden können, wird in [Karp02] erwähnt, allerdings wird dort Bezug genommen auf Lineare Arrays und das Konzept nur theoretisch angesprochen. In [Meng12] wurde dieser Ansatz erstmals mit einem Matrixarray umgesetzt, und damit der Besselstrahl in zwei Dimensionen gebildet und seine Eigenschaften durch praktische Tests verifiziert.

Die Erzeugung des Besselstrahls mit einem Phased Array Prüfkopf hat einen weiteren Vorteil, da die Prüfung flexibler gestaltet wird und ohne weitere Umstände zwischen verschiedenen Arten, Fokussierungen und Richtungen der Schallausbreitung umgeschaltet werden kann [Meng12].

Das in Kapitel 8.2 vorgestellten Matrixarray wird verwendet um die Besselstrahlen zu erzeugen.

In Abbildung 58 ist ein Beispiel für Verzögerungszeiten der einzelnen Elemente des Matrixarrays für einen Besselstrahl und ein fokussiertes Schallfeld dargestellt. Durch die Verzögerungszeiten wird versucht die Schalllaufzeit in einer konischen Linse nachzuempfinden. Da sie linear zur Mitte des Prüfkopfes ansteigen, werden sie durch eine Steigung beschrieben. Die Steigung wird berechnet aus dem Abstand des Elementmittelpunktes zum Beginn der Apertur und den Verzögerungszeiten. Sie lässt sich nach Gleichung (4.5) berechnen.

$$m = \frac{t[n]}{\frac{b}{2} + P \times n} \quad \text{für } n = \text{Elementnummer entlang Mittelachse} \quad (4.5)$$

mit m: Steigung, t[n]: Verzögerungszeit für Element n, b: Elementbreite, P: Pitch (Abstand von

Beginn eines Elements bis zum Beginn des nächsten Elements) $P = b + \text{Inter-Element-Spacing}$.

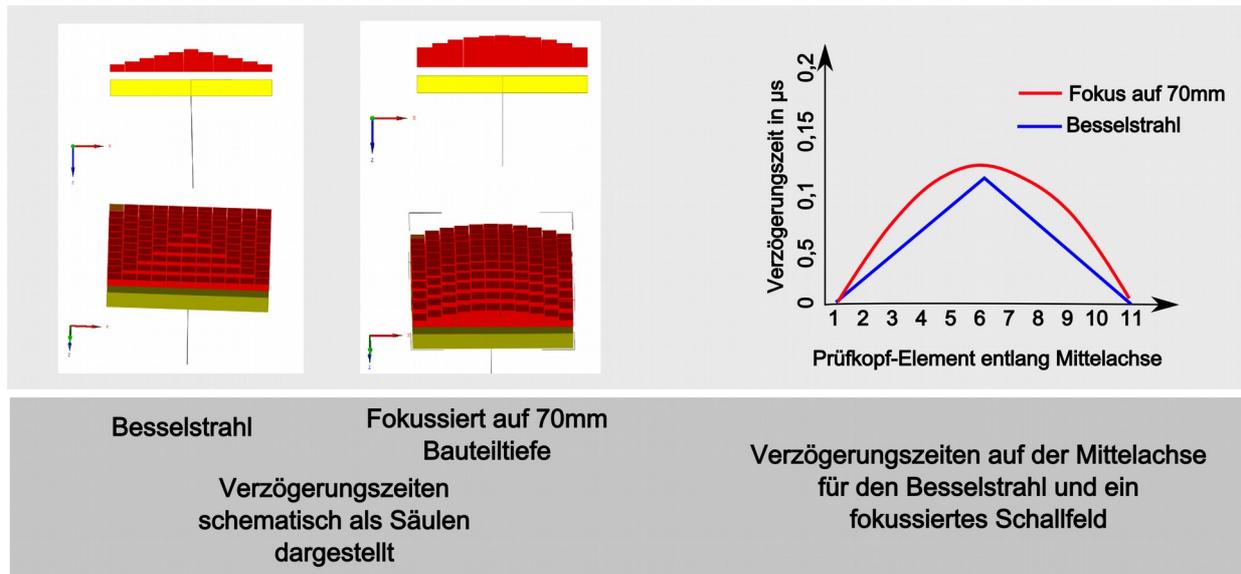


Abbildung 58: Verzögerungszeiten für Besselstrahl und zum Vergleich Verzögerungszeiten für einen fokussierten Schallstrahl mit Fokuspunkt in 70mm Bauteiltiefe

8.3.3 Bestimmung der Steigung der Verzögerungszeiten

Mit der Simulationssoftware CIVA werden Untersuchungen gemacht, um herauszufinden, welche Steigung der Verzögerungszeiten das beste Ergebnis liefert.

Es werden Schallfelder simuliert und verglichen.

Das Material, das in der Simulation modelliert wird, ist das Material, für das die Prüfung mit Besselstrahlen auch in der Realität eingesetzt werden soll und ist in Tabelle 12 beschrieben.

Werkstoff	Titan
Schallgeschwindigkeit Longitudinal	6100 m/s
Schallgeschwindigkeit Transversal	3120 m/s
Dichte	4,53 g/cm ³
Abmessungen	100mm x 100mm x 250mm (L x B x H)

Tabelle 12: Material-Eigenschaften für die Simulation

Der Prüfkopf wird in der Simulation mit einer Wasservorlaufstrecke von 50mm über dem Bauteil platziert und nach den Spezifikationen des Datenblattes modelliert.

Eine Übersicht über die verwendeten Verzögerungszeiten ist in Abbildung 59 (a) zu sehen.

Zu Vergleichszwecken wird das Schallfeld der Apertur ohne Verzögerungszeiten und mit Verzögerungszeiten, die eine Fokussierung des Schallfeldes in einer Bauteiltiefe von 70mm bewirken, simuliert.

In Abbildung 59 (b) sind die simulierten Schallfelder zu sehen. Bei diesen Prüfkopfparametern teilt sich der Schalldruck in einen Hauptschallstrahl und zwei sogenannte Nebenkeulen auf. Die Nebenkeulen sind lokale Anstiege des Schalldrucks außerhalb des an der Mittelachse des Prüfkopfes verlaufenden Schallstrahls.

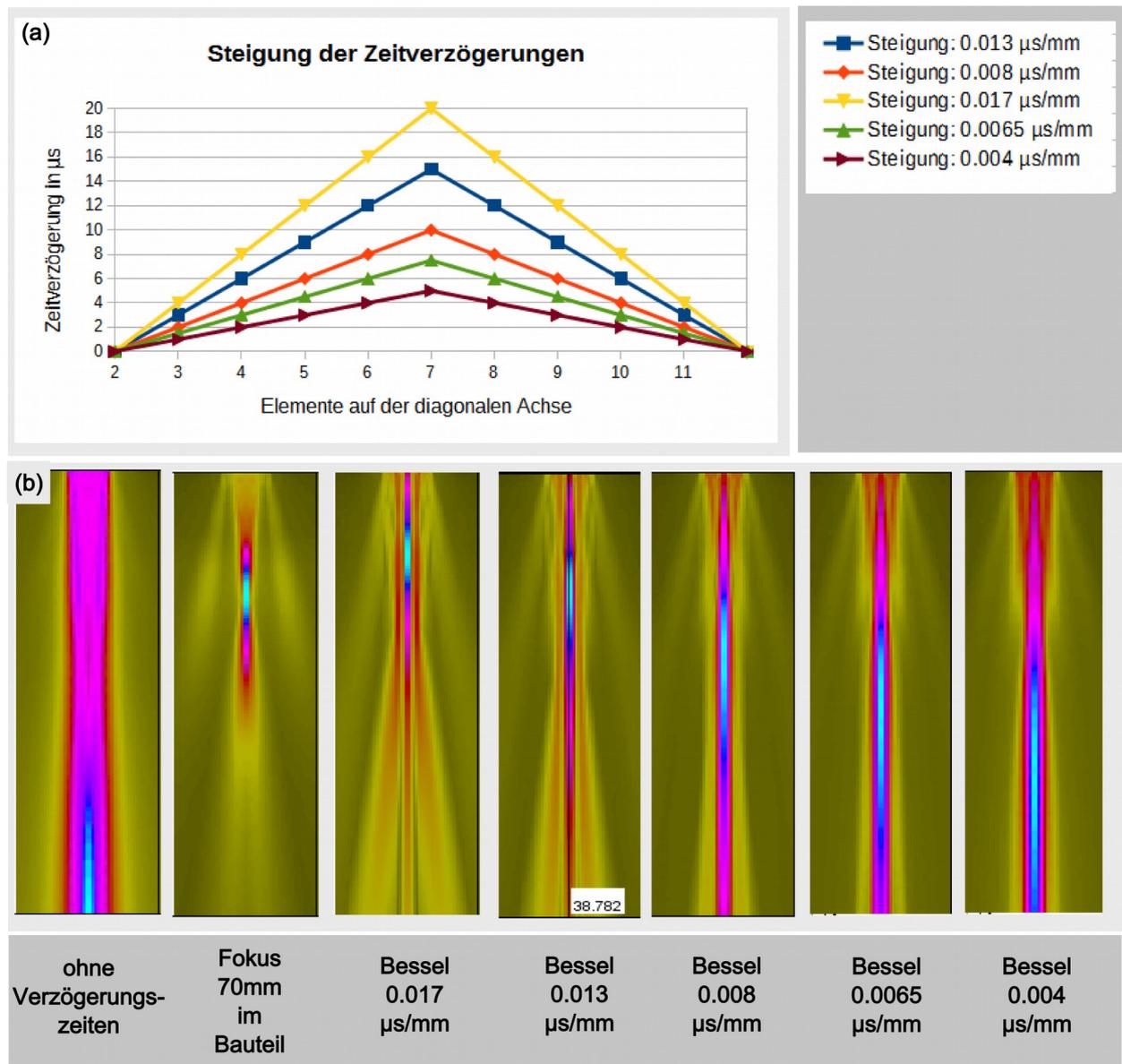


Abbildung 59: (a) Graphische Darstellung der einzelnen Steigungen der Verzögerungszeiten, (b) Schallfelder des Matrixarrays mit unterschiedlichen Ansteuerungen

Aus der Übersicht der Schallfelder geht hervor, dass mit höherer Steigung der Besselstrahl schmaler und gerichteter wird, aber der Einfluss der Nebenkeulen sichtbar ansteigt. Mit geringerer Steigung sind kaum mehr Nebenkeulen zu sehen, aber der Schallfelddurchmesser wird größer. Besselstrahlen tendieren dazu, große Nebenkeulen zu haben. Dies wird auch in [Holm10] beschrieben. Dort wird ein Neben-Hauptkeulen-Verhältnis eingeführt, das auch für die simulierten Besselstrahlen erstellt

wird, um zu vergleichen mit welcher Steigung, das beste Neben-Hauptkeulen-Verhältnis erreicht werden kann (siehe Abbildung 60 (c)). Des Weiteren wurden der Schalldruckabfall und die Schallbündelbreite graphisch verglichen (siehe Abbildung 60 (a) und (b)).

Für die Besselstrahlen mit einer Steigung von $0,008\mu\text{s}/\text{mm}$, $0,013\mu\text{s}/\text{mm}$ und $0,017\mu\text{s}/\text{mm}$ werden ausführlichere Untersuchungen durchgeführt. Die Besselstrahlen mit einer Steigung von $0,0065\mu\text{s}/\text{mm}$ und $0,004\mu\text{s}/\text{mm}$ wurden nur zur Verifizierung der These, dass die Nebenkeulen bei geringer Steigung entfallen, dafür aber der Schallbündeldurchmesser des Hauptstrahls breiter wird, simuliert. Sie sind in die ausführlichere Analyse nicht eingebunden.

Bei einer Steigung von $0,017\mu\text{s}/\text{mm}$ ist nicht nur das Neben-Hauptkeulen-Verhältnis sehr schlecht, auch ist die Tiefe in der das Schallbündel einen konstanten Schalldruck hat sehr gering. Dieser Schallstrahl ist für eine Prüfung nicht verwendbar.

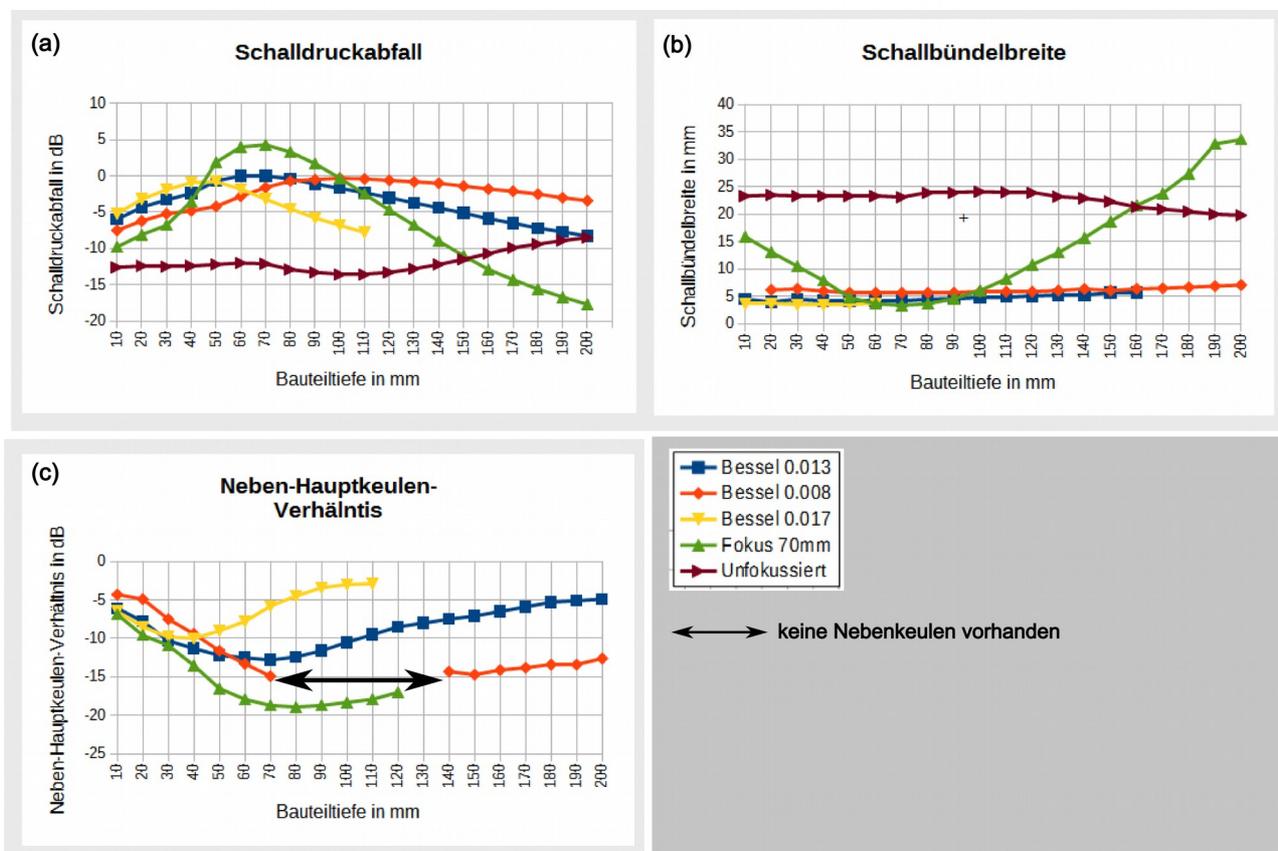


Abbildung 60: (a) Schalldruckabfall in dB für drei verschiedene Besselstrahlen, einen Schallstrahl der auf 70mm Bauteiltiefe fokussiert ist und den Schallstrahl des Matrixarrays ohne Verzögerungszeiten, (b) Schallbündelbreite für die oben genannten Schallfelder, (c) Neben-Hauptkeulen-Verhältnis für die oben genannten Schallfelder

Aus den Diagrammen in Abbildung 60 und den Bildern des Schallfeldes in Abbildung 59 geht hervor, dass der beste Besselstrahl gebildet werden kann, wenn die Verzögerungszeiten eine Steigung von $0,008\mu\text{s}/\text{mm}$ hat.

Der Schalldruck bei den Besselstrahlen ist relativ konstant über die komplette Materialtiefe und sie

ist nur um 4dB niedriger als im Fokuspunkt des fokussierten Schallstrahls. Verglichen mit dem unfokussierten Schallstrahl, dessen Schalldruck auch über die gesamte Bauteiltiefe relativ konstant ist, haben die Besselstrahlen im Schnitt 10dB mehr Schalldruck.

Das Nebenkeulenverhältnis wurde aus dem Verhältnis des maximalen Schalldruck der Haupt- und der Nebenkeule in der jeweiligen Bauteiltiefe berechnet. Für alle Schallfelder ist das Nebenkeulenverhältnis ab 30mm Bauteiltiefe unter -12dB und kann daher vernachlässigt werden. Bei einer Steigung der Verzögerungszeiten von $0,017\mu\text{s}/\text{mm}$ und darüber wird das Nebenkeulenverhältnis schnell wieder größer. Daher werden Steigungen über $0,013\mu\text{s}/\text{mm}$ für die folgenden Untersuchungen ignoriert. Die Schallbündelbreite ist für alle Besselstrahlen ungefähr gleich, wobei sie in geringem Maße kleiner wird mit höherer Steigung.

Im Diagramm der Schallbündelbreite (siehe Abbildung 60 (b)) kann man erkennen, dass der Schallstrahl über die gesamte Bauteiltiefe gleich dünn ist, wie beim fokussierten Schallstrahl im Fokusbereich. Man erkennt auch sehr deutlich die Divergenz des fokussierten Schallstrahls außerhalb des Fokusbereiches.

8.3.4 Vergleich zwischen konischer und pyramidenförmiger Verzögerungszeitenverteilung

Die in der Literatur beschriebenen Linsen zur Erzeugung von Besselstrahlen sind konisch aufgebaut.

Die Verteilung der Verzögerungszeiten für die ersten Versuche waren geometrisch betrachtet eher pyramidenförmig.

Um zu überprüfen, ob dies Auswirkung auf das Ergebnis hat, wurde an mehreren Beispielen der Unterschied zwischen konischer und pyramidenförmiger Geometrie untersucht. In dieser Arbeit ist nur ein Beispiel dazu aufgeführt (siehe Abbildung 61). Bei der konischen Geometrie werden 72 Elemente verwendet, die einen diskretisierten Kreis bilden. (siehe Abbildung 61 (a)).

In Abbildung 61 (c) ist der Schalldruckverlauf der beiden Ansteuerungen abgebildet. Es ist zu sehen, dass der Schalldruck bei der konischen Ansteuerung zwar prinzipiell höher ist, aber er fällt kurz nach dem Maximum wieder steil ab. Der Schalldruckverlauf mit der pyramidenförmigen Ansteuerung ist hingegen eher konstant, auch wenn er kleine örtliche Schwankungen aufweist. Dies ist der gleiche Fall für Simulationen mit anderen Einstellungen. Aus diesem Grund wird weiterhin eine pyramidenförmige Ansteuerung verwendet.

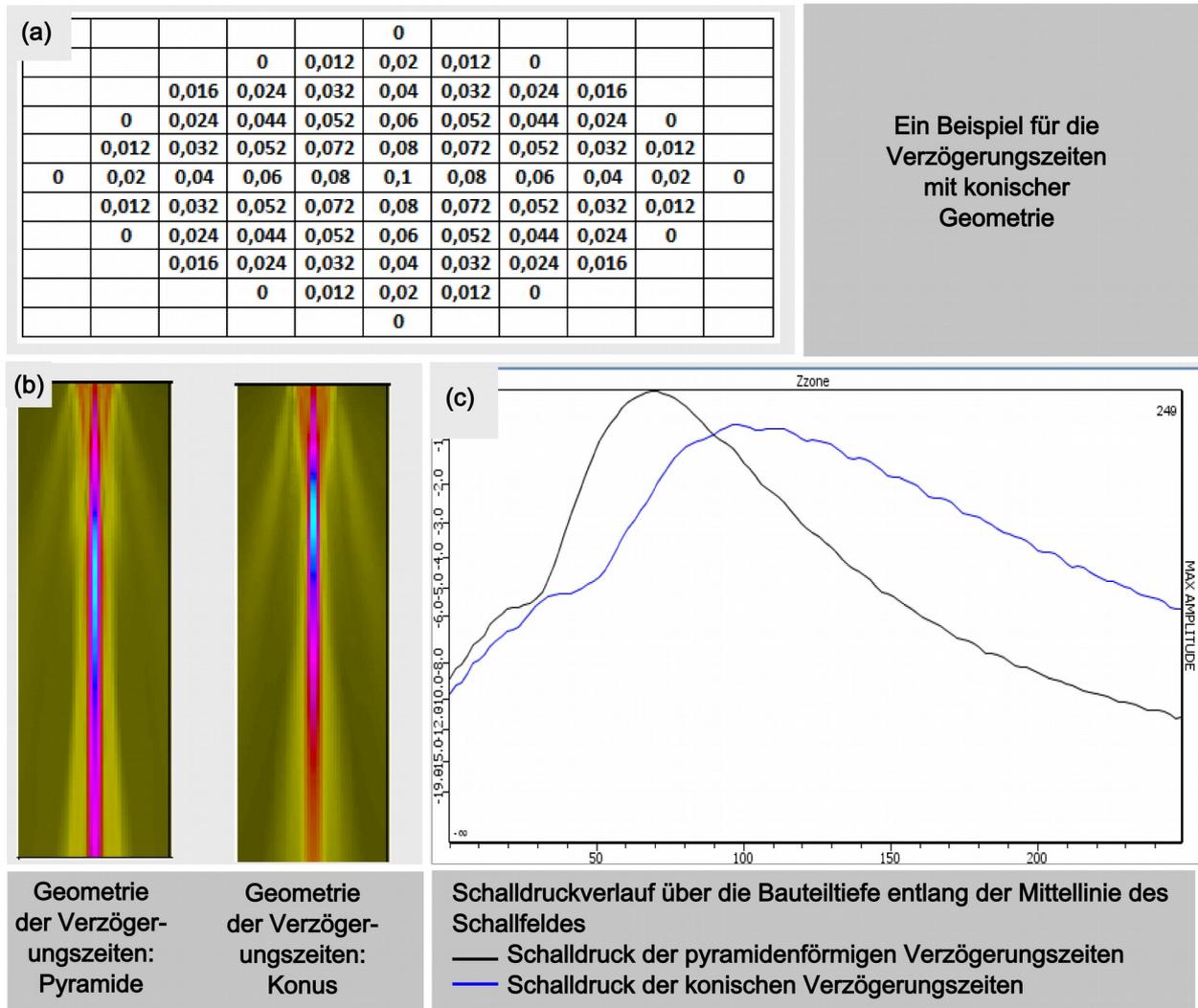


Abbildung 61: (a) Elemente und Verzögerungszeiten des Matrixarray für konische Geometrie, (b) Vergleich des Schallfeldes mit Ansteuerung über pyramidenförmiger und konischer Geometrie, (c) Schalldruckverlauf

8.3.5 Auswirkungen der Aperturgröße

Die nächste Simulationsreihe beschäftigt sich mit der Frage, welche Auswirkungen die Größe der Apertur hat. Dazu wird die Anzahl der Elemente bei gleichbleibender Steigung und gleichbleibender Elementgröße verringert. Die Elementgröße und der Pitch werden nicht verändert, da sie an der Grenze des zu diesen Zeitpunkt technisch möglichen sind und nichts simuliert werden soll, was in der Realität nicht nachgebildet werden kann.

Wie in Abbildung 62 zu sehen ist, wird die Länge des konstanten Schalldrucks im nicht-divergierenden Schallstrahl kürzer und die Nebenkeulen nehmen zu. Der Effekt mit den Nebenkeulen kann dadurch erklärt werden, dass die Elementgröße und der Pitch im Verhältnis zur Apertur sehr groß werden. Falls die Apertur so weit verkleinert werden sollte, müssten auch die Elementgröße und Pitch verkleinert werden, was aber wie oben erwähnt zur Zeit der Untersuchung für Matrixarrays technisch nicht möglich ist.

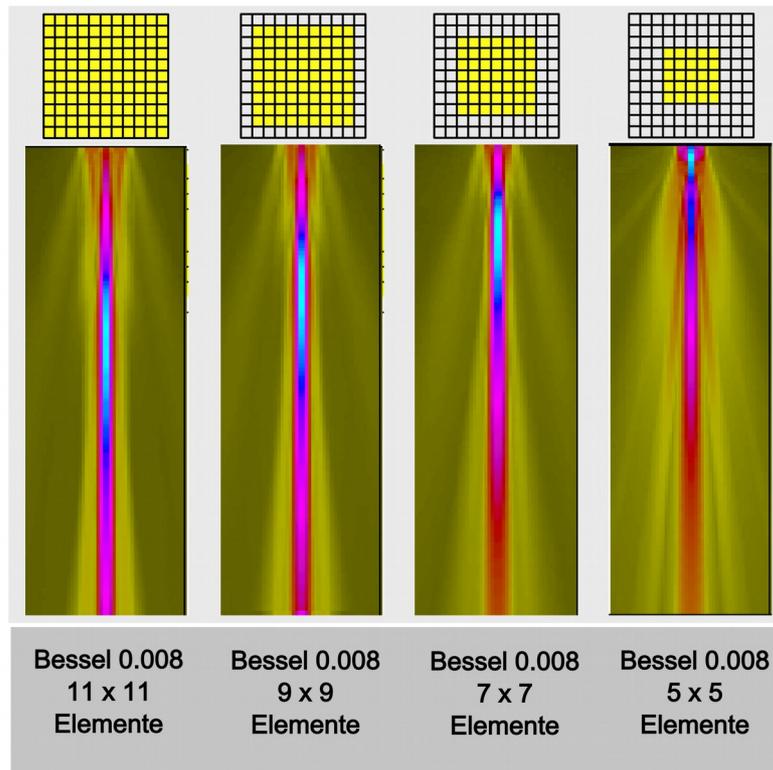


Abbildung 62: Schallfelder für einen Besselstrahl mit einer Steigung der Verzögerungszeiten von $0,008\mu\text{s}/\text{mm}$ für verschiedene Aperturgrößen

Diese Zusammenhänge kommen in der graphischen Darstellung der Ergebnisse noch deutlicher zum Vorschein (siehe Abbildung 63). In den Graphiken kann man erkennen, dass der Schalldruck mit kleinerer Apertur wesentlich geringer wird über die gesamte Tiefe des Besselstrahls, nicht nur außerhalb des Maximums. Es ist erkennbar, dass eine Apertur von nur 5×5 Elementen kaum noch verwendbar ist. Auch das Neben-Hauptkeulen-Verhältnis ist für eine 5×5 Elemente-Apertur sehr schlecht. Die besten Ergebnisse sind für 11×11 Elemente zu bekommen. Da allerdings die Ansteuerung des Prüfkopfes nur für 7×7 Elemente funktioniert aufgrund der Geräteeigenschaften, muss mit den Einschränkungen dieser Apertur im Vergleich zu 11×11 gelebt werden. In den Grafiken in Abbildung 63 ist erkennbar, dass die Schallbündelbreite nur in geringem Maße größer ist. Der Schalldruckabfall beträgt zwischen -2dB und -4dB , was noch akzeptabel ist. Auch das Neben-Hauptkeulen-Verhältnis ist tolerabel.

8.3.6 Auswirkung der Vergrößerung der Wasservorlaufstrecke

In einer weiteren Untersuchung wurde der Effekt der Vergrößerung der Wasservorlaufstrecke (Abstand Prüfkopf zu Bauteil) auf das Schallfeld simuliert. Es wird erwartet, dass bei einer größeren Wasservorlaufstrecke die Interferenzen, die bei den vorherigen Simulationen direkt unter der Bauteiloberfläche zu sehen sind, soweit verringert werden, dass eine oberflächennahe Prüfung möglich ist. Dies ist ab einer Wasservorlaufstrecke von 150mm möglich (siehe Abbildung 64).

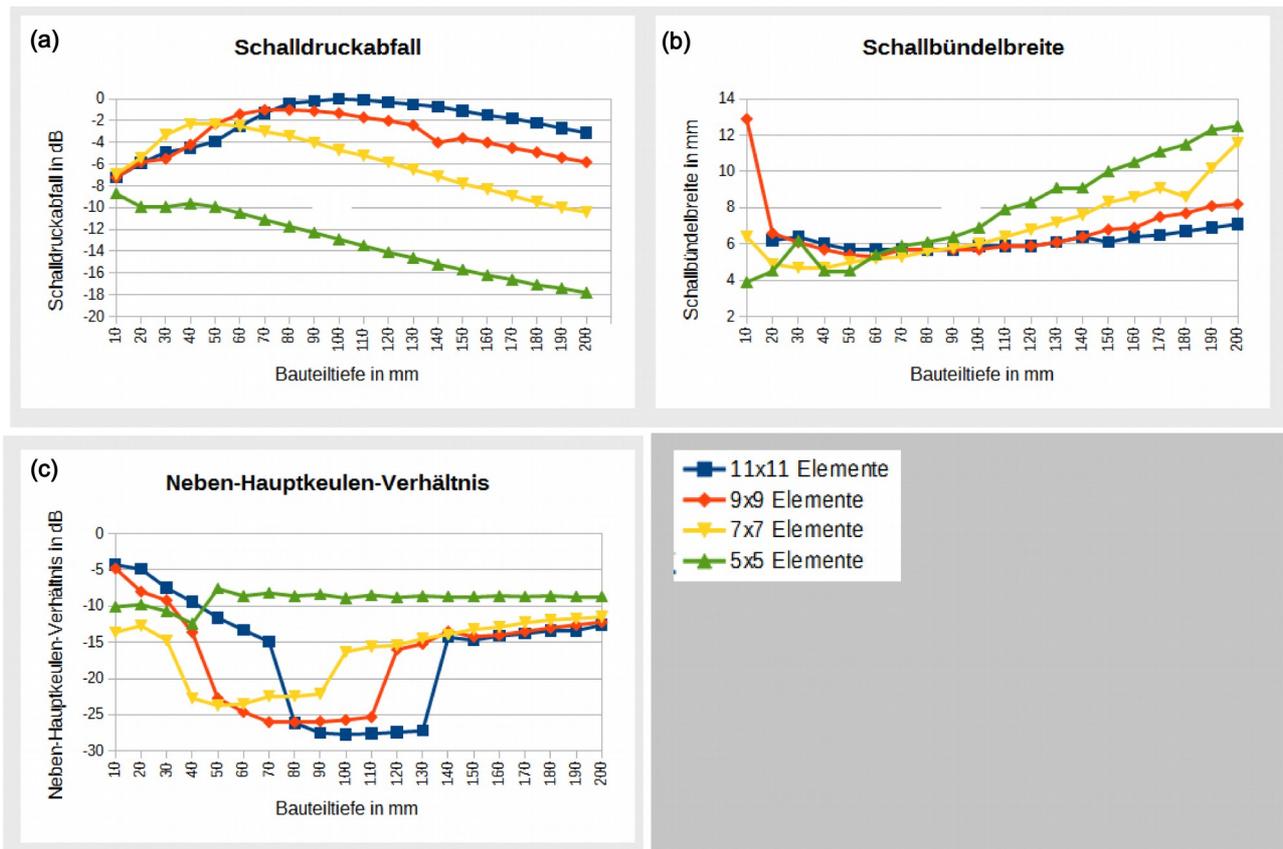


Abbildung 63: (a) Schalldruckabfall in dB für vier verschiedene Aperturgrößen, (b) Schallbündelbreite für die oben genannten Schallfelder, (c) Neben-Hauptkeulen-Verhältnis für die oben genannten Schallfelder

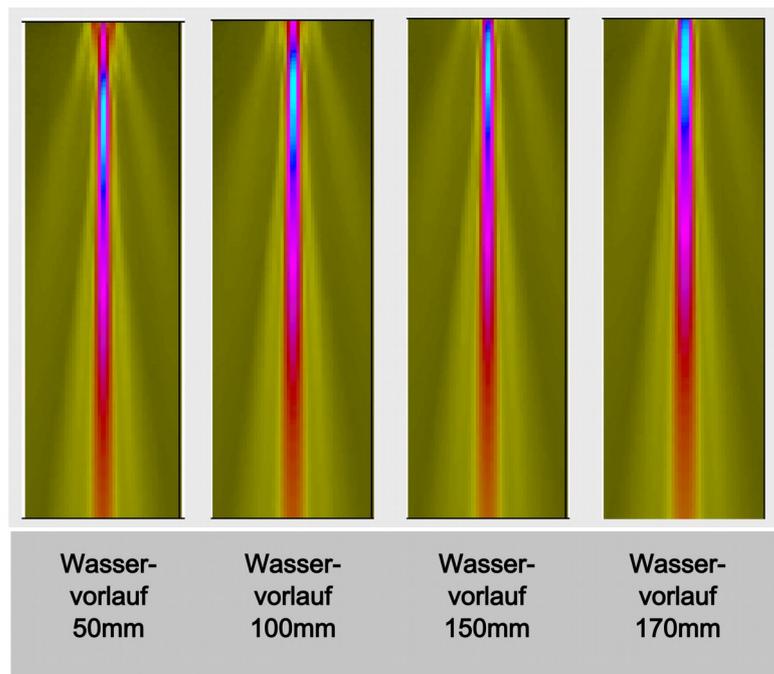


Abbildung 64: Schallfelder für unterschiedliche Wasservorlaufstrecken (Abstand Prüfkopf zu Bauteil)

Diese Untersuchung wird mit einer 7x7 Apertur durchgeführt, da dies der im Moment umsetzbaren Prüfung entspricht, wie oben ausführlich beschrieben. Die Steigung der Verzögerungszeiten wurde auf 0.008µs/mm gesetzt, da dies bei der ersten Untersuchung die besten Ergebnisse lieferte.

Aus den Bildern der Schallfelder geht nicht hervor, wie hoch der Schalldruck ist, weil die Software CIVA ihre Farbskala immer an dem max. Schalldruck in einem Bild orientiert. Da erwartet wird, dass auch der Schalldruck mit größerer Wasservorlaufstrecke geringer wird, was an der Schallschwächung im Wasser liegt, werden auch hier noch einmal die von der Simulationssoftware gelieferten Daten graphisch dargestellt (siehe Abbildung 65).

In Abbildung 65 wird deutlich, dass der Schalldruckabfall bei einer Wasservorlaufstrecke von 170mm im Vergleich zu 50mm schon 6dB beträgt. An der Schallbündelbreite und dem Nebenkeulen-Verhältnis sieht man deutlich, dass die Wasservorlaufstrecke von 50mm im Bereich bis zu einer Bauteiltiefe von 30mm nicht geeignet ist. Die größere Schallbündelbreite und der höhere Einfluss der Nebenkeulen kommen von Interferenzen, bevor sich der Besselstrahl geformt hat.

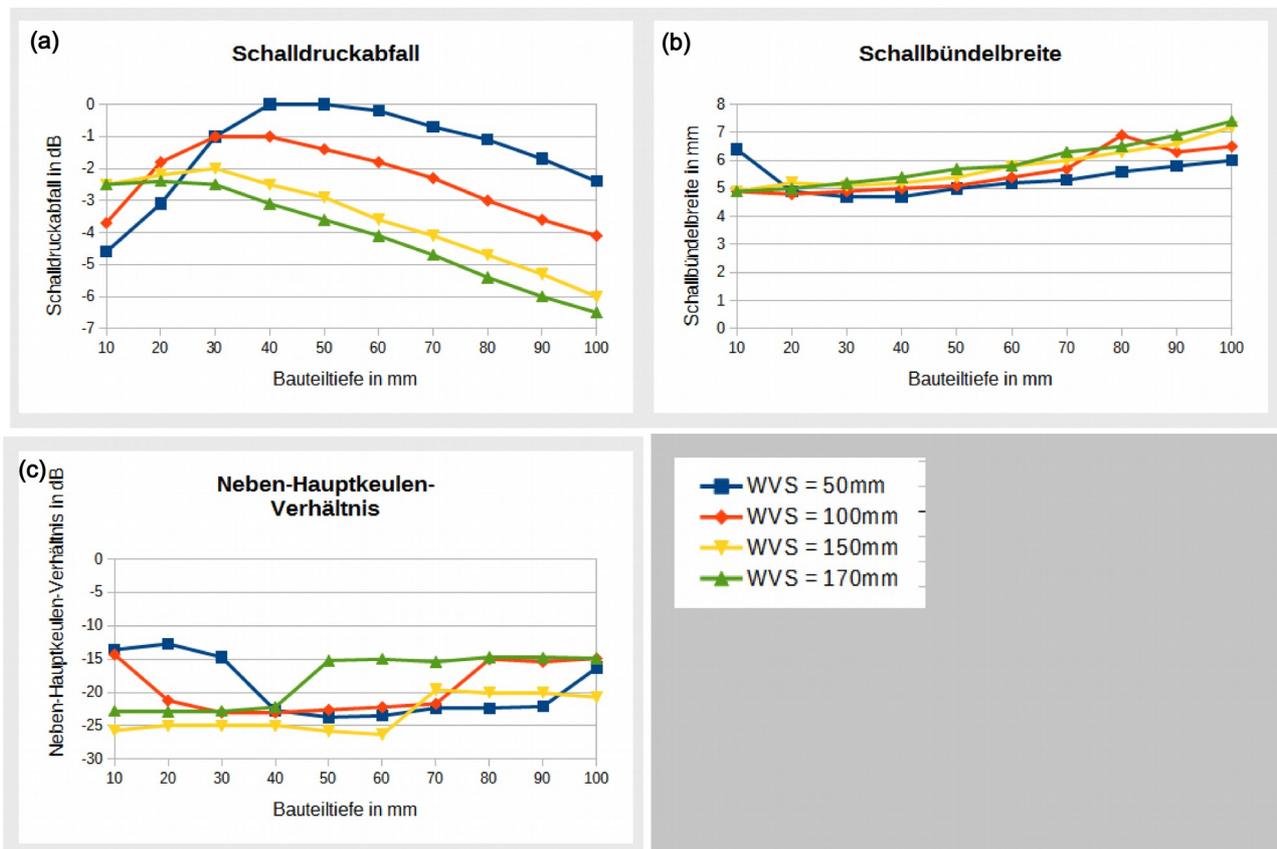


Abbildung 65: (a) Schalldruckabfall für unterschiedliche Wasservorlaufstrecken, (b) Schallbündelbreite für unterschiedliche Wasservorlaufstrecken, (c) Nebenkeulen-Hauptkeulen-Verhältnis für unterschiedliche Wasservorlaufstrecken

Wenn festgelegt wird, dass ein Besselstrahl verwendet werden kann, wenn das Nebenkeulen-Hauptkeulen-Verhältnis kleiner als -12dB ist, was sich in der Praxis als gängig erwiesen hat, sieht man, dass die Wasservorlaufstrecken von 100mm und 150mm für den Prüfbereich zwischen 10mm

und 30mm verwendet werden kann. Unter Berücksichtigung des Schalldrucks ergibt sich, dass das Ergebnis mit 150mm Wasserstrecke besser ist.

8.3.7 Auswirkung von Frequenzänderung

In weiteren Untersuchungen wurde getestet, was passiert, wenn die Frequenz verringert und vergrößert wird. Der Effekt, der dabei auftritt, bei kleineren Frequenzen treten keine Nebenkeulen mehr auf und bei höheren Frequenzen sehr große Nebenkeulen, ist vor allem darauf zurückzuführen, dass bei höheren Frequenzen die Elemente und der Elementabstand verringert werden müssten (siehe Designregeln für Phased Array Prüfköpfe im Kapitel 2.3). Da dies aber keine mögliche Option ist, wie weiter oben bereits erwähnt wurde, werden die Ergebnisse dieser Untersuchungen hier nicht aufgeführt.

8.3.8 Simulation des Fehlerechos

Für die Simulation der Fehlerechos, die der realen Prüfung nachempfunden sein soll, wurde die reale Gefügecharakteristik des Materials aufgenommen und in CIVA eingelesen.

Dazu wurde eine Ultraschallmessung des Gefüges vorgenommen. An einer Flachbodenbohrung in 70mm Bauteiltiefe wurde die Amplitude des Signals kalibriert und mit der somit ermittelten Verstärkung eine Aufnahme des Gefügerauschens in der Tiefe von 70mm erstellt.

Dies wurde in CIVA nachgebaut und iterativ die Gefügeparameter angepasst, bis das simulierte Gefügerauschen dem realen entspricht.

Es wurden drei Flachbodenbohrungen als Reflektoren für die Fehlerechos simuliert. Sie haben einen Durchmesser von 1mm und liegen in den Bauteiltiefen 70mm, 95mm und 120mm.

A-Bilder werden simuliert zum Einen vom Besselstrahl zum Anderen von einem fokussierten Schallstrahl mit einer Fokustiefe von 70mm. Des Weiteren wurden B-Bilder für den entsprechenden Schallstrahl simuliert. (siehe Abbildung 66)

Das Signal-Rausch-Verhältnis wurde für jedes Fehlerecho berechnet. Das SNR von dem Fehlerecho, der genau im Fokuspunkt des fokussierten Schallstrahls liegt ist um 3dB höher als das höchste Signal des Besselstrahls, was daran liegt, dass der Schalldruck des fokussierten Schallstrahls in der Schallfeldsimulation auch um ungefähr 4dB höher war als beim Besselstrahl (siehe Abbildung 60 (a)).

Im A-Bild ist deutlich zu sehen, dass die Fehlerechos beim Besselstrahl über die gesamte Prüftiefe ein auswertbares Resultat liefert. Beim fokussierten Schallstrahl ist nur das Fehlerecho im Fokuspunkt verwendbar.

Diese Simulationen bestätigen noch mehr die oben getätigte Aussage, dass in der Theorie mit Phased Array erzeugte Besselstrahlen zur Materialprüfung verwendet werden können. Über die praktische Umsetzung geben reale Experimente Aufschluss, die in Kapitel 8.3.9 beschrieben werden.

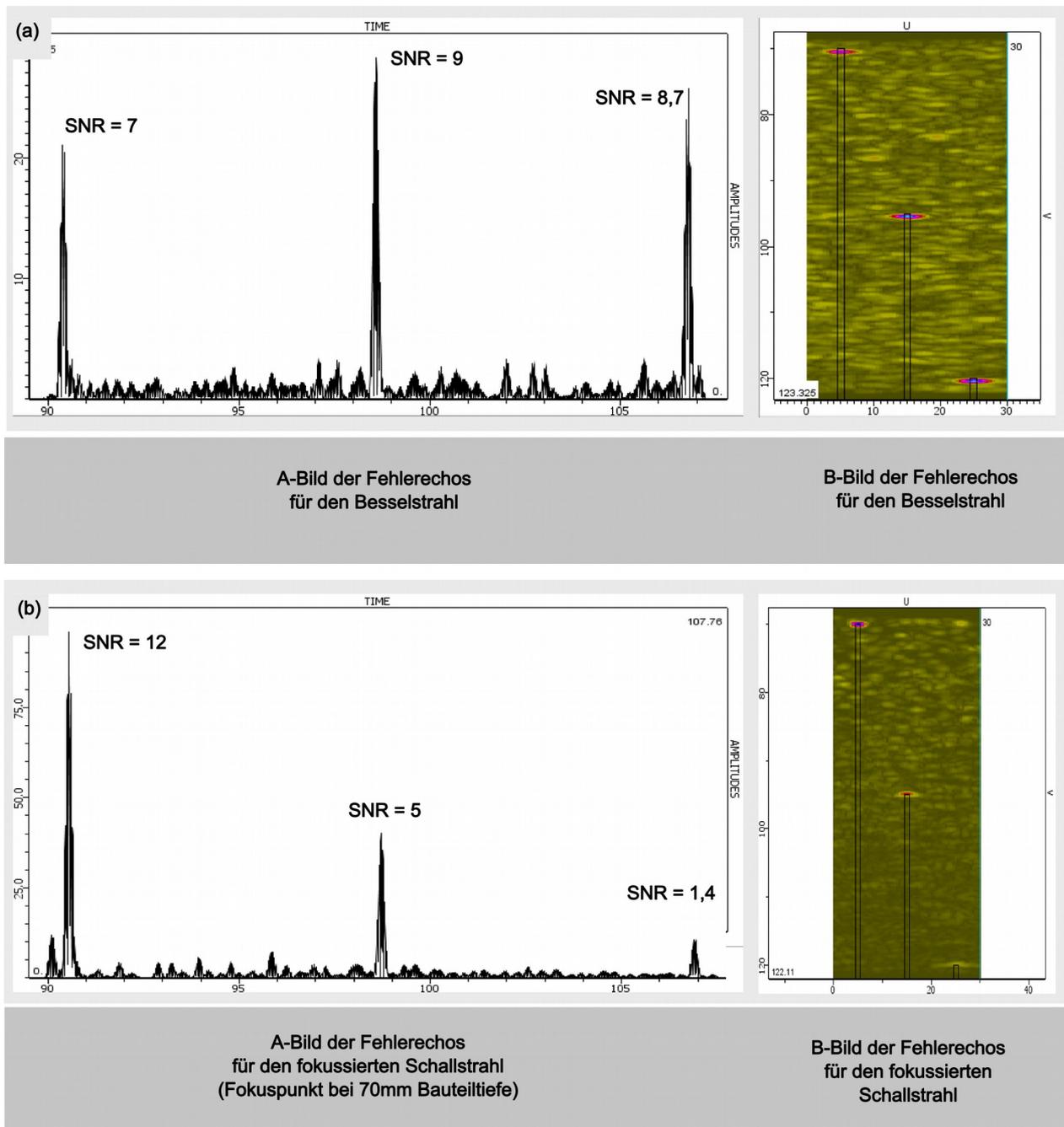


Abbildung 66: A-Bild und B-Bild für die Fehlerechos dreier Flachbodenbohrungen für (a) einen Besselstrahl und (b) einen fokussierten Schallstrahl

8.3.9 Ansteuerung des Phased Array Prüfkopfes

Die Prüfköpfe werden mit dem Phased Array Gerät Focus LT 64/128 von Olympus und der Software Tomoview von Olympus angesteuert.

In der Software ist zwar prinzipiell angelegt, dass die Verzögerungszeiten für Matrixarrays berechnen zu können, aber nur für die Fokussierung und den Winkelschwenk. Die Verzögerungszeiten, so wie sie für die Erzeugung von Besselstrahlen benötigt werden, müssen

selbst generiert werden.

Die Verzögerungszeiten und sonstige Parameter, die für die Ansteuerung der Prüfköpfe benutzt werden, sind in PAC-Files gespeichert. Dies sind .txt-Dateien und werden dann von der Software an das Focus LT weitergeleitet.

Es können mehrere Focal Laws nacheinander definiert werden, die dann auch nacheinander angesteuert werden. So wie beim Winkelscan mehrere Winkel, die nacheinander angesteuert werden. Für jedes Focal Law werden globale Parameter definiert, so wie Pulsbreite, Sender/Empfänger- oder Durchschallungs-Modus und Parameter, die für die Anzeige im Tomoview verwendet werden. Für jeden einzelnen Kanal (entspricht in den meisten Konfigurationen einem Element) werden Verstärkung, Spannung und Verzögerungszeiten für Senden und Empfang definiert. Alle benötigten Array-Elemente werden so in dem PAC-File aufgelistet.

Die benötigten Verzögerungszeiten werden mit CIVA berechnet und dann über eine einfache Matlab-Routine im PAC-Format ausgegeben.

Mit dieser Technik können Prüfköpfe mit bis zu 64 Elementen angesteuert werden. Es war nicht möglich herauszufinden, wie die Multiplextechnik von außerhalb der Software Tomoview angesteuert werden kann, da es von Olympus darüber keine Dokumentation für die vorhandene Software und Phased Array Gerät gibt. Nur bei einer offenen Version der Software kann direkt in den Quellcode eingegriffen werden und die Multiplex-Funktionalität verwendet werden. Diese kann aber aus Kostengründen nicht beschafft werden und so ist es für diese Arbeit nicht möglich mehr als 64 Elemente anzusteuern.

In Anhang ist ein Beispiel für die Ansteuerung eines Matrixarrays mit den Konfigurationen des Besselstrahls im PAC-Format dargestellt.

8.3.10 Experimente

Das Matrixarray wird über die im vorherigen Kapitel beschriebenen Daten angesteuert und in einem Tauchbecken platziert.

Wie in Kapitel 8.3.3 beschrieben werden 7x7 Elemente des Prüfkopfes verwendet. Die Verzögerungszeiten steigen zum mittleren Element mit einer Steigung von 0,008µs/mm an.

Zunächst wird das reale Schallfeld des Besselstrahls abgebildet. Dazu wird ein Kugelreflektor im Tauchbecken platziert und der Prüfkopf mit der entsprechenden Ansteuerung direkt vor ihm platziert. Mäanderförmig wird dieser vom Kugelreflektor entfernt und der reflektierte Schall wird aufgezeichnet (siehe Abbildung 67 (a)). Dieselbe Vorgehensweise wurde verwendet um das erzeugte Schallfeld in Nickel darzustellen. Dabei wurde ein Nickeltestkörper mit einer Flachbodenbohrung im Tauchbecken platziert und der Prüfkopf mäanderförmig davon entfernt (siehe Abbildung 67 (b)). Dabei ist zu beachten, dass nicht der Schallweg im Nickel verlängert wird, sondern nur die Wasservorlaufstrecke. Eine andere Möglichkeit für die Darstellung des Schallfeldes in Nickel ist nicht vorhanden, daher wird diese Annäherung verwendet um das Schallfeld darzustellen.

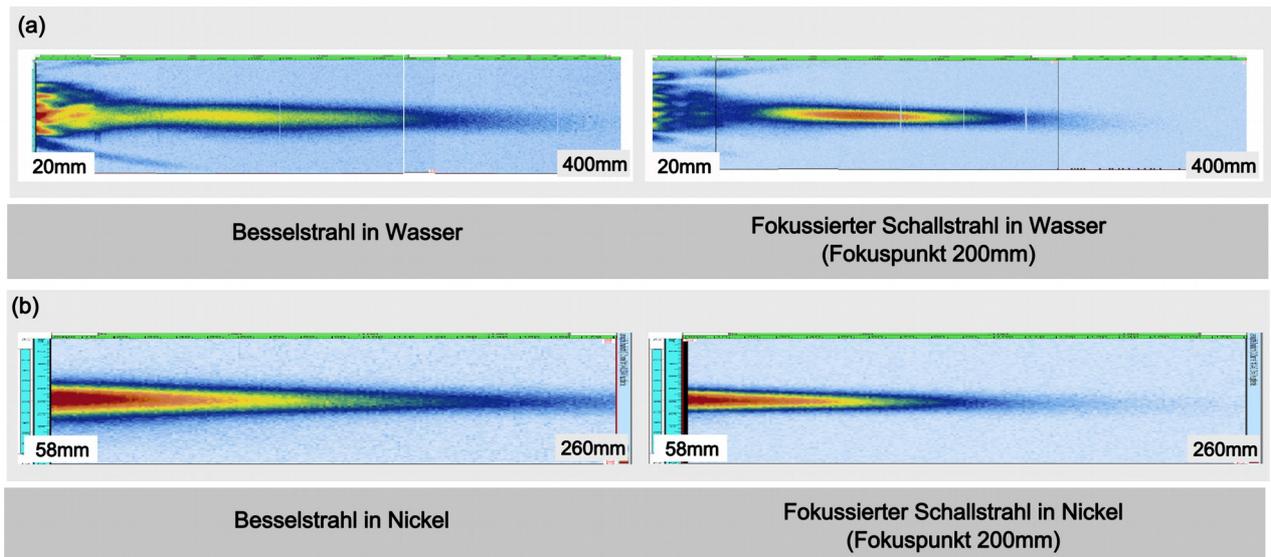


Abbildung 67: Gemessenes Schallfeld für Besselstrahl und fokussierten Schallstrahl (a) in Wasser und (b) in einem Testkörper aus Nickel

In beiden Abbildungen sieht man das der Bereich konstanten Schalldrucks beim Besselstrahl wesentlich länger ist als bei einem fokussierten Prüfkopf. Die Schallbündelbreite ist nur gering breiter als beim fokussierten Schallstrahl. In Abbildung 67 (a) sind die Interferenzen in der Nähe des Prüfkopfes zu sehen. Sowohl beim Besselstrahl, als auch beim fokussierten Schallstrahl ist der Bereich der Interferenzen ungefähr gleich lang.

Anhand der gemessenen Schallfelder, die ähnlich sind zu den simulierten, kann man den Rückschluss ziehen, dass die Detektion von Fehlstellen mit Besselstrahlen nicht nur theoretisch, sondern auch praktisch möglich ist.

Als nächstes wird untersucht, ob Flachbodenbohrungen mit dem Besselstrahl detektiert werden können. Dazu wird ein Testkörper mit Flachbodenbohrungen mit einem Durchmesser von 0,8mm (#2FBH) verwendet. Er ist aus einer Nickelsuperlegierung und wird durch Pulverlegieren hergestellt. Flachbodenbohrungen in 12,5mm, 38,1mm, 63,5mm und 102mm werden angeschallt. Es wird ein Besselstrahl mit den selben Parametern wie oben erzeugt und ein fokussierter Schallstrahl mit einem Fokuspunkt in 40mm Bauteiltiefe. Die Wasservorlaufstrecke wird aufgrund technischer Machbarkeit auf 75mm festgelegt.

In Abbildung 68 sieht man, dass die Amplitudenhöhe des Besselstrahls relativ konstant über die Tiefe von 100mm ist, im Gegensatz zum fokussierten Schallstrahl, dessen Amplituden rascher an Höhe verlieren.

Damit die Bildschirmhöhe der Amplitude im Maximum die gleiche Höhe erreicht, musste beim Besselstrahl mit einer um 6dB erhöhten Verstärkung gearbeitet werden. Dies war zu erwarten, da auch schon in den Simulationen der absolute Schalldruck im Fokusbereich des fokussierten Schallstrahls höher war als beim Besselstrahl.

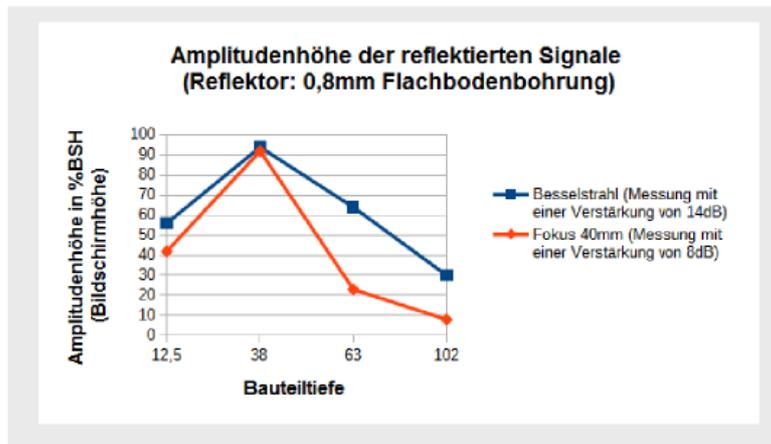


Abbildung 68: Ergebnis des Experiments: Flachbodenbohrungen in verschiedenen Tiefen werden angeschallt und die Amplitudenhöhe wird dokumentiert

Die Überprüfung, ob mit dieser Prüfmethode Flachbodenbohrungen mit einem Durchmesser von 0,2mm (#1/2FBH) gefunden werden können, kann nicht durchgeführt werden, da es bisher nicht gelungen ist in das schwer bearbeitbare Material so kleine Flachbodenbohrungen einzubringen.

An einer Stelle ist eine Bohrung gelungen und an dieser Stelle konnte die Flachbodenbohrung mit genügend Signal-Rausch-Abstand detektiert werden. Eine weiterführende Untersuchung mit Titanmaterial muss in einer anderen Arbeit durchgeführt werden.

8.3.11 Ergebnis

Aus den Simulationen und Experimenten geht hervor, dass eine Prüfung mit Besselstrahlen möglich ist. Allerdings muss man anmerken, dass der reflektierte Schalldruck geringer ist als bei einem fokussierten Schallstrahl. Es ist nicht bestreitbar, dass der fokussierte Schallstrahl im Fokusbereich eine sensitivere Prüfung gewährleistet. Allerdings kann mit dem Besselstrahl ein größerer Tiefenbereich geprüft werden.

Die Verzögerungszeiten müssen mit einer definierten Steigung ansteigen um ein gutes Resultat zu erreichen. Es ist von Vorteil, wenn die Geometrie der Verzögerungszeiten eher pyramidenförmig als konisch ist. Eine größere Apertur ist zwar von Vorteil, aber die hier gewählte Matrix mit 7x7 Elementen reichte aus, um an Experimenten zu zeigen, dass es möglich ist, diesen Strahl zu erzeugen.

Für weitere Anwendungen mit neu entworfenen Prüfköpfen könnte das Ergebnis verbessert werden, wenn entweder eine Verringerung der Frequenz oder eine Verkleinerung des Elementabstandes implementiert werden kann.

Da der Besselstrahl mit der Phased Array Technologie implementiert wird und damit die große Flexibilität dieser Technik zur Verfügung steht, wird ein Prüfverfahren vorgeschlagen, das die Vorteile des Besselstrahls und des fokussierten Schallstrahls verbindet. [Meng12]

Mit dem Besselstrahl wird das Bauteil in der gesamten Bauteiltiefe abgetastet, dies ist die Prüfmethode „schnell und tief“. Falls bei dieser Prüfung eine Anzeige auftaucht, die über einer

definierten Anzeighöhe liegt, kann der Prüfer auf den Prüfmodus „lokal mit hoher Auflösung“ umschalten und diese Anzeige mit höherer Sensitivität untersuchen. Erst dann wird bestimmt, ob diese Anzeige über der Abnahmegrenze liegt und somit das Bauteil aus der Fertigungslinie gezogen werden muss.

Eine andere Anwendungsmöglichkeit wäre, beim Senden einen Besselstrahl zu erzeugen und beim Empfang, wie beim Dynamic Depth Focusing, in unterschiedliche Tiefen zu fokussieren. Das Problem bei der in [Lama99] beschriebenen Technik ist, dass der ausgesendete unfokussierte Schallstrahl sehr breit ist und dadurch einen relativ geringen Schalldruck hat. Ein ausgesendeter Besselstrahl wäre auch über einen großen Tiefenbereich konstant in seiner Breite, allerdings ist er sehr viel schmaler, wodurch der Schalldruck ansteigt und die Interaktion mit dem Gefüge geringer wird.

Der empfindliche Bereich mit dem Besselstrahl ist so tief, dass er einige Zonen der Multizonenprüfung abdecken kann. Bei der Multizonenprüfung muss mit einer Überlappung der Zonen gearbeitet werden, allerdings ist es auch hier nicht auszuschließen, dass in dem Randbereich der Prüfzonen, dort, wo der Schallstrahl wieder divergiert, die Empfindlichkeit verringert ist. Mit einer Prüfung mit dem Besselstrahl können dadurch entstehende Fehler verhindert werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

In Abbildung 69 sind die Themen dieser Arbeit kurz zusammengefasst dargestellt.

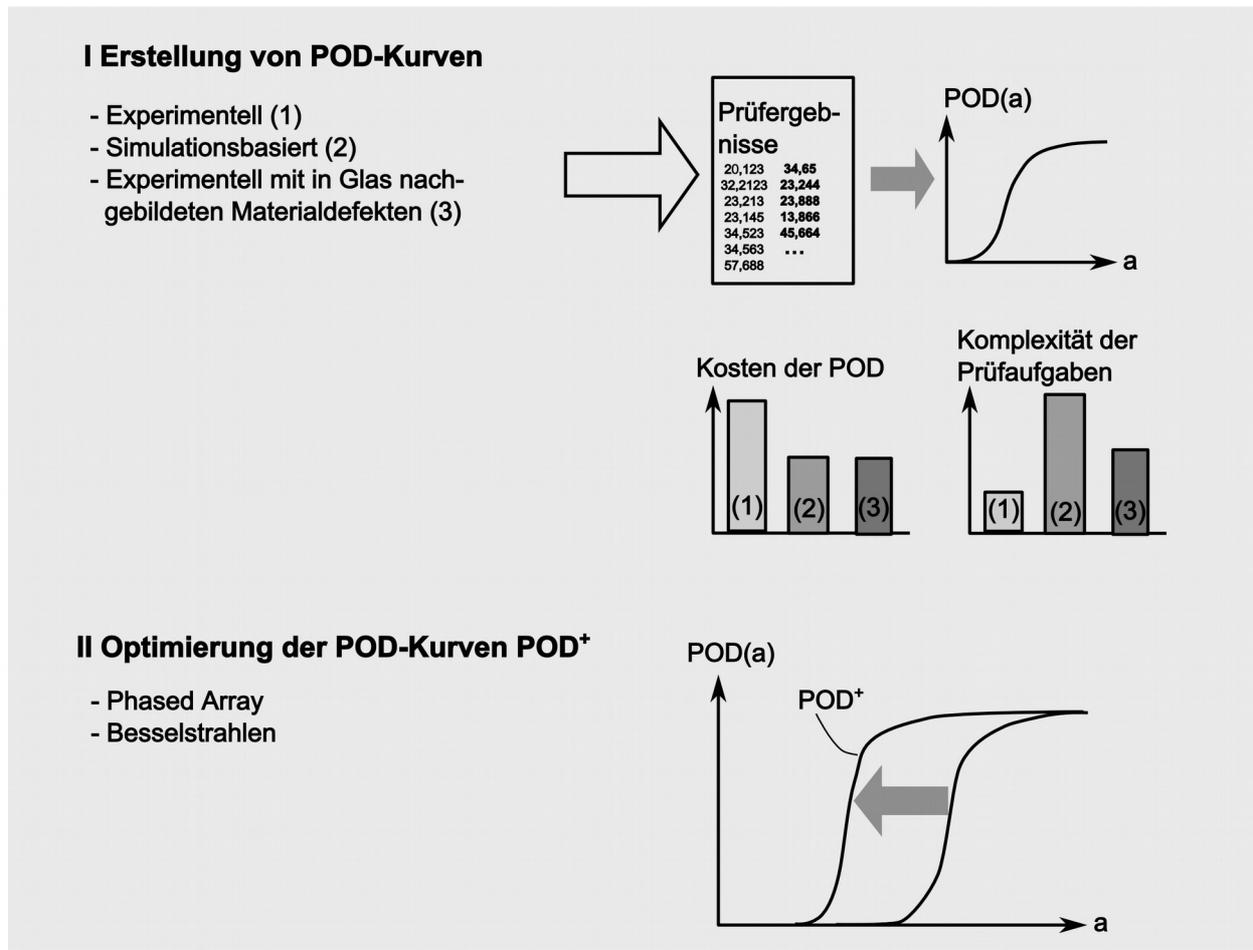


Abbildung 69: Inhalte dieser Arbeit

Es wurden mehrere Verfahren zur Bestimmung der POD speziell für das Ultraschallprüfverfahren vorgestellt.

Da diese Verfahren mit einem hohen Zeit-, sowie Kostenaufwand einhergehen, wurden zwei Verfahren vorgestellt, mit denen die Erzeugung von POD Kurven vereinfacht werden können: die simulationsbasierte POD und die experimentelle POD mit Referenzkörpern aus Glas, in denen Materialdefekte mit Lasergravuren nachgebildet werden können. Mit beiden Verfahren können die Kosten für die Erstellung einer POD verringert werden. Die damit umsetzbaren Prüfaufgaben sind

sehr viel komplexer als mit konventioneller, experimenteller Herangehensweise, was dazu führt, dass die dadurch ermittelte POD näher an der Realität ist.

Die simulationsbasierte POD verspricht schnellere und kostengünstigere Erstellung von POD-Kurven. Allerdings werden noch Weiterentwicklungen der Simulationstools notwendig sein, um diese dafür einzusetzen.

Es wurde eine Methode vorgestellt, Materialdefekte durch Lasergravur in Glas nachzubilden. Die Lasergravur erzeugt eine Vielzahl an kleinen Rissen in Glas, die so platziert werden, dass sie eine vorher definierte Geometrie nachbilden. Durch diese Technik können alle erdenklichen Formen erzeugt werden, die den Ultraschall reflektieren. Da die Reflexion der Lasergravur allerdings um eine konstante Verstärkungsdifferenz von bekannten Reflektoren in Titanlegierungen abweicht, muss dieser Betrag bei der Erstellung der Prüfergebnisse berücksichtigt werden.

Die Möglichkeit, Gefügerauschen in Glas durch kleine, über den ganzen Bereich verteilte Risse, herzustellen, wurde diskutiert. Dadurch wird die Einsetzbarkeit für die Bestimmung einer POD realistisch. Die so erzeugten Reflektoren müssen nur noch mit einer kleinen Anzahl an Materialdefekten verglichen werden, um die entsprechende Verstärkungsdifferenz zu bestimmen. Danach kann in Glas die für die POD Bestimmung benötigte Anzahl an Reflektoren schnell und kostengünstig produziert werden und an verschiedenen Orten von verschiedenen Prüfern geprüft werden, um einen Datensatz an Prüfwerten für die POD Analyse zu erhalten.

Es wurde diskutiert, dass es wichtig ist, Prüftechniken weiter zu entwickeln, damit die POD verbessert werden kann. Eine neuere Technik, die dazu verwendet werden kann, ist die Phased Array Technik.

Es wurde ein Vergleich zwischen Phased Array und Multizonenprüfung in Bezug auf Verbesserung der POD angestellt. Die Phased Array Technik ist dabei der Multizonenprüfung überlegen, da sie für das verwendete Prüfbeispiel Billet einen geringeren Schallfelddurchmesser hat. Der Vorteil, den die Technik durch den Winkelschwenk bei Oberflächendeformationen hat, ist auch auf andere Prüfbeispiele übertragbar.

Bei der Prüfung von Schmiedescheiben hat die Phased Array Technik auch noch den großen Vorteil, dass sie Fehler, die nicht senkrecht zur Einschallrichtung orientiert sind, durch den Winkelschwenk besser detektieren kann, als die konventionellen Techniken. Aus diesem Grund ist der Entwurf einer Phased Array Prüftechnik für Schmiedescheiben aus Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo beschrieben. Die dafür hergestellten Prüfköpfe konnten die geforderte Empfindlichkeit nicht erreichen. Es wurden Überlegungen angestellt, wie die Prüftechnik weiterentwickelt werden kann, damit die Empfindlichkeit erreicht wird: indem der Prüfkopf vorfokussiert wird oder Sampling Phased Array verwendet werden.

Eine Methode zur Schallfeldmodulation mit Phased Array wurde vorgestellt. Dabei wird ein Matrixarray verwendet um nicht-divergierende Schallfelder, die auch Besselstrahlen genannt werden, zu erzeugen. Bisherige Techniken diese Schallfelder zu erzeugen, bestanden aus dem Verwenden von konischen Linsen. Mit der hier vorgestellten Technik wird eine elektronische, konische Linse erzeugt.

Es wurde gezeigt, dass es möglich ist mit Phased Array ein nicht-divergierendes Schallfeld zu erzeugen. Die besten Parameter dafür wurden durch Simulation ermittelt. An Versuchen wurde festgestellt, dass das Schallfeld wirklich einen, im Vergleich zur konventionellen Fokussierung, verlängerten Fokusbereich hat und somit eine größere Tiefe mit hoher Empfindlichkeit prüfen kann.

Der Vorteil an der Phased Array Technik für die Erzeugung von Besselstrahlen ist, dass die Technik flexibel ist. Ein Prüfkopf kann in zwei Betriebsarten verwendet werden. Mit den Besselstrahlen kann eine Prüfung des gesamten Tiefenbereichs durchgeführt werden. Falls an einer Stelle eine Anzeige auftaucht, kann die Betriebsart des Prüfkopfs umgeschaltet werden und auf den Bereich der Anzeige fokussiert werden. Damit können kritische Bereiche genauer untersucht werden.

Literaturverzeichnis

1. [Ashr04] Ashraf, A., Rajakumar, C., The Boundary Element Method – Application in Sound and Vibration, 2004, Taylor and Francis, Kapitel 1
2. [Avyl98] van der Avyle, J. A., Brooks, J. A., Powell, A. C., Reducing Defects in Remelting Processes for High-Performance Alloys, JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Science, 50 (3), 1998, pp. 22-25
3. [Bamb04] Bamberg, J., Feist, W.-D., Verfahren und Vorrichtung zum Prüfen eines Bauteils mittels Ultraschall, sowie Verwendung des Verfahrens und der Vorrichtung, Europäische Patentschrift, EP 1 690 084 B1, 09.11.2004
4. [Barg12] Bargel, H.-J., Schulze, G., Grundlagen der Metall- und Legierungskunde, in Werkstoffkunde, Herausgeber Bargel, H.-J., Schulze, G., Springer Verlag, 11. Auflage, 2012
5. [Barg12-2] Bargel, H.-J., Werkstoffprüfung, in Werkstoffkunde, Herausgeber Bargel, H.-J., Schulze, G., Springer Verlag, 11. Auflage, 2012
6. [Baro13] Baron, H.-U., Henkel, B., Bellon, C., Deresch, A., Simulation Based POD Estimation for Radiographic Testing of Turbine Blades, 5th European-American Workshop on Reliability of NDE – Lecture 12, <http://www.nde-reliability.de/portals/nde-reliability2013/BB/lecture12.pdf>, Stand 09.2014
7. [Bart96] Barthe, P. G., Slayton, M. H., 1.5-D Ultrasound Transducer Array Characterization, 18th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 1996
8. [Bere84] Berens, A. P., Hovey, P. W., Flaw Detection Reliability Criteria, Volume I – Methods and Results, AFWAL-TR-84-4022, Air Force Wright-Aeronautical Laboratories, 1984, <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA142001>, Stand 12.2014
9. [Bere89] Berens, A. P., NDE Reliability Data Analysis, Metals Handbook, 9th edition, Vol. 17, pp. 689-701, ASM International, 1989
10. [Brac11] Brackrock, D., Kreuzbruck, M., Schenk, G., Ultraschall Untersuchungen an Vergleichskörper-Reflektoren, DGZfP-Jahrestagung 2011 - Poster 55
11. [Bras05] Brasche, L., Chiou, T., Thompson, B., et. al., Contaminated Billet Study, FAA report DOT/FAA/AR-05/16, 2005
12. [Bräu09] Bräunling, W. J. G., Flugzeugtriebwerke, Springer Verlag, 2009, Kapitel 2
13. [Bula05] Bulavinov, A., Der getaktete Gruppenstrahler, Saarbrücken, Universität des Saarlandes, Dissertation, 2005
14. [Burk96] Burkel, R. H., Sturges, D. J., et. al., Probability of Detection for Applied Ultrasonic Inspections, Review of Progress in QNDE, Thompson, D.O. and Chimenti, D.E. eds, Plenum Press, New York, NY, Vol. 15, 1996, pp. 1991-1998
15. [Burk02] Burkel, R. H., Chiou, C. P., Keyes, T. K., A Methodology for the Assessment of the Capability of Inspection Systems for Detection of Subsurface Flaws in Aircraft Turbine Engine Components, FAA report DOT/FAA/AR-01/96, 2002
16. [Buij08] Buijk, A. J., Finite Volume (FV) and Finite Element (FE) integration in Simufact.forming http://www.simufact.de/en/ressource/data_article/Simufact_A_Finite_Volume_and_Finite_Element_Integration.pdf, Stand 10.14
17. [Calm00] Calmon, P., Lhémy, A., Lecur-Tad'bi, I., Raillon, R., Recent Developments in Ultrasonic NDT Modelling in CIVA, 15th World Conference on Nondestructive Testing, 2000

18. [Chen88] Cheng, R.C. H., Iles, T. C., One-sided Confidence Bands for Cumulative Distribution Functions, *Technometrics*, Vol. 32, 1988, pp.155-159
19. [Dodh09] United States Department of Defense Handbook, Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment, MIL-HDBK-1823, 2009
20. [Domi12] Dominguez, N., Mahaut, S., Yalamas, T., Feuillard, V., Progress in POD Estimation: Methods and Tools, 4th International Symposium on NDT in Aerospace 2012 - Th.2.A.3
21. [Drin06] Drinkwater, B. W., Wilcox, P. D., Ultrasonic Arrays for Non-destructive Evaluation: A Review, *NDT&E International* Vol. 39, Issue 7, October 2006, Pages 525–541
22. [Duco12] Ducouso-Ganjehi, L., Dorval, V., Chatillon, S., Jenson, F., Gilles-Pascaud, C., Modelling of the Ultrasonic Propagation in Titanium Alloy Materials, 4th International Symposium on NDT in Aerospace 2012 – Th.2.B.2
23. [Dunc81] Duncan, R. M., Blenkinsop, P. A., Goosey, R. E., Titanium Alloys, The Development of Gas Turbine Materials, Applied Science Publishers, 1981, Kapitel 3
24. [Essl04] Esslinger, J., Gabel, J., Smarsly, W., Zukünftige Anforderungen an Hochtemperaturwerkstoffe im Flugturbinenbau, Beiträge zur 27. Vortragsveranstaltung der Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle und der Arbeitsgemeinschaft für Hochtemperaturwerkstoffe, 2004
25. [Faa01] FAA Advisory Circluar AC 33.14-1, Damage Tolerance for High Energy Turbine Engine Rotors, 2001
26. [Fahr10] Fahrbach, F. O. & Rohrbach, A. A line scanned light-sheet microscope with phase shaped self-reconstructing beams. *Opt. Express* 18, 24229 (2010)
27. [Fahr11] F. O. Fahrbach, A. Rohrbach, Propagation stability of self-reconstructing Bessel beams enables contrast-enhanced imaging in thick media, *Nat. Commun.*3.632 (2011)
28. [Fell95] Fellingner, P., Marklein, R., Langenberg, K. J., Klaholz, S., Numerical modeling of elastic wave propagation and scattering with EFIT – elastodynamic finite integration technique, *Wave Motion*, 1995
29. [Fücs05] Fücsök, F., Müller, C., Scharmach, M., Measuring of the Reliability of NDE, The 8th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing, Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering, 2005, pp. 173-180
30. [Gall84] Gallagher, J. P., Giessler, F. J., et. al., United States Air Force Handbook of Damage Tolerant Design, 1984, Version von <http://www.afgrow.net/applications/DTDDHandbook/pdfs.aspx>, Stand 09-2014
31. [Gene11] Generazio, E. R., Binomial Test Method for Determining Probability of Detection Capability for Fracture Critical Applications, NASA report NASA/TP-2011-217176, <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20110015149.pdf>, Stand 11.2014
32. [Gene14] Generazio, E. R., Interrelationships Between Receiver/Relative Operating Characteristics Display, Binomial, Logit and Bayes' Rule Probability of Detection Methodologies, NASA report NASA/TM-2014-218183, 2014
33. [Geng03] Gengembre, N., Pencil Method for Ultrasonic Beam Computation, World Conference on Ultrasonics, 2003, <http://www.conforg.fr/wcu2003/procs/cd1/articles/000538.pdf>, Stand 09.2014
34. [Gigl95] Gigliotti, Perocchi, Nieters, Gilmore, Design and Fabrication of forged ti-6al-4V blocks with synthetic ti-n inclusions for estimation of detectability, Review of Progress in QNDE, Thompson, D.O. and Chimenti, D.E. eds, Plenum Press, New York, NY, Vol.14, 1995, pp.2089-2096
35. [Gilm96] Gilmore, R.S., Multizone Ultrasonic Inspection Method and Apparatus, United States Patent, Patent Nr. 5,533,401, 1996

36. [Gust11] Gust, N., Improvement of Signal Analysis for the Ultrasonic Microscopy, Dresdner Beiträge zur zerstörungsfreien Prüftechnik, Band 2, TUDpress, Kapitel 3, pp. 27- 37
37. [Hain89] Haines, E., Hanrahan, P., et. al., An Introduction to Ray-Tracing, The Morgan Kaufman Series in Computer Graphics, Verlag Morgan Kaufman, 1989, Kapitel "A Bit of History" und Kapitel 1
38. [Hass05] Hassan, W., Vensel, F., Knowles, B., Lupien, V., Improved Titanium Billet Inspection Sensitivity through Optimized Phased Array Design, Part II: Experimental Validation and Comparative Study with Multizone, Review of Progress in QNDE, Thompson, D.O. and Chimenti, D.E. eds, Plenum Press, New York, NY, Vol.25, 2005
39. [Hayw90] Hayward, G., Hossack, J. A., Unidimensional modeling of 1-3 composite transducers, J. Acoust. Soc. Am. 88, 599 (1990)
40. [Heut14] Heutschi, K., Vorlesungsunterlagen Akustik Schallfeldberechnung, ETH Zürich, Autumn Semester 2014, <http://www.isi.ee.ethz.ch/teaching/courses/ak1/akustik-schallfeldberechnungen.pdf>, Stand 09.2014
41. [Hick09] Hicken, H., Henrich, R., Meier, T., Bisle, W., Ultraschall "Phased Array"-Technologie zur Inspektion von Flugzeug-Nietnahtstrukturen, DGZfP-Jahrestagung 2009 – Di.1.B.1
42. [Hilb12] Hilbrans, H., Nichteisenmetalle, in in Werkstoffkunde, Herausgeber Bargel, H.-J., Schulze, G., Springer Verlag, 11. Auflage, 2012
43. [Hold80] Holdsworth, S. R., The Significance of Defects in Nickel Base Superalloys, Superalloys 1980, 4th International Symposium, Proceedings, http://www.tms.org/superalloys/10.7449/1980/Superalloys_1980_375_383.pdf, Stand 09.14
44. [Holm05] Holmes C., Drinkwater B. C., Wilcox P. D., Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation, NDT&E International 38 (2005) 701–711
45. [Holm10] Holm, Prieur, Low sidelobe limited diffraction beams in the nonlinear regime, The Journal of the Acoustical Society of America, 09/2010; 128(3):1015-20
46. [Howa96] Howard, P.J. and Gilmore, R.S., Ultrasonic Noise and the Volume of the Ultrasonic Pulse, Review of Progress in QNDE, Thompson, D.O. and Chimenti, D.E. eds, Plenum Press, New York, NY, Vol. 15B, 1996
47. [Howa96-2] Howard, P. J., Copley, D. C., et. al., An Improved Methodology for the Inspection of Titanium Alloys, IEEE Ultrasonics Symposium, 1996
48. [Hsu89] Hsu, D.K., Margetan, F.J., Thompson, D.O., Bessel beam ultrasonic transducer: fabrication method and experimental results, Applied Physical Letters, 55 (20), pp. 2066 – 2068, 1989
49. [Iddi02] Iddings, F. A., Shull, P. J., Liquid Penetrant, in Nondestructive Evaluation – Theory, Techniques and Applications, Herausgeber Shull, P. J., Marcel Dekker Verlag, 2002
50. [Jack94] Jackman, L. A., Maurer, G. E., Widge, S., White Spots in Superalloys, Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives (1994), Proceedings, http://www.tms.org/superalloys/10.7449/1994/Superalloys_1994_153_166.pdf, Stand 09.2014
51. [Karp02] Karpelson, A., Piezotransducers creating narrow weakly diverging ultrasonic beam, NDT.net, Vol. 7 No. 6, June 2002
52. [Karp06] Karpelson, A., Piezotransducers with acoustic lenses forming narrow weakly diverging ultrasonic beams, ECNDT 2006 – Mo.2.7.2.
53. [Katac10] Katchadjian, P., Desimone, C., Garcia, A. D., Application of Axicon Lenses in Ultrasonic Techniques, Review of Progress of QNDE 29, pp.1043-1050 (2010).
54. [Kell05] Keller, M., Patton, T., et.al., Inspection Development for Titanium Billet – Engine Titanium Consortium Phase II, DOT/FAA/AR-05/30, 2005

55. [Kell05-2] Keller, M., Degtyar, A., Umbach, J., Brasche, L., Inspection Development for Large-Diameter Titanium Billet—Engine Titanium Consortium Phase II, DOT/FAA/AR-05/47, 2005
56. [Kemp12] Kempainen, M., Virkkunen, I., Production of Real Flaws in Probability of Detection (POD-) Samples for Aerospace Applications, 4th International Symposium on NDT in Aerospace 2012
57. [Kita10] Kitazawa, S., Kono, N., Baba, A., Adachi, Y., A Three-Dimensional Phased Array Ultrasonic Testing Technique, European Conference on Nondestructive Testing, ECNDT 2010, http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_03_70.pdf, Stand 11.2014
58. [Krau86] Krautkrämer, J., Krautkrämer, H., Werkstoffprüfung mit Ultraschall, Springer-Verlag, 5. Auflage 1986
59. [Lama99] Lamarre, A., Mainguy, F., Dynamic Focusing of Phased Arrays for Nondestructive Testing: Characterization and Application, The e-Journal of Nondestructive Testing, Vol. 4, No. 9, 1999, NDT.net, <http://www.ndt.net/article/v04n09/lamarre/lamarre.htm>, Stand 09.2014
60. [Lerc09] Lerch, R., Sessler, G., Wolf, D., Technische Akustik, Springer Verlag, 2009
61. [Leym06] Leymarie N., Calmon, P., Fouquet, T., Schumm, A., Semi-Analytical-Fem Hybrid Modeling of Ultrasonic Defect Responses, European Conference on Nondestructive Testing, ECND 2006, Poster 150, <http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/P150.pdf>, Stand 09.2014
62. [Lind02] Lindgren, A., Shull, P. J., Joseph, K., Hagemaijer, D., Magnetic Particle, in Nondestructive Evaluation – Theory, Techniques and Applications, Herausgeber Shull, P. J., Marcel Dekker Verlag, 2002
63. [Lu90] Lu, J.-Y., Greenleaf, J. F., Ultrasonic Nondiffracting Transducer for Medical Imaging, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol 37, No. 5, September 1990
64. [Lupi00] Lupien, V., Cancre, F., Ultrasonic Phased Array Inspection of Titanium Billets, Review of Progress in QNDE, Thompson, D.O. and Chimenti, D.E. eds, Plenum Press, New York, NY, Vol.19, 2000
65. [Lupi01] Lupien, V., Cancre F., Ultrasonic phased array inspection of titanium billets, Review of Progress in QNDE, Thompson, D.O. and Chimenti, D.E. eds, Plenum Press, New York, NY, Vol. 20, 2001, pp. 919-926
66. [Lupi03] Lupien, V., Hassan, W., Progress in Ultrasonic Phased Arrays for Billet Inspection, Review of Progress in QNDE, Thompson, D.O. and Chimenti, D.E. eds, Plenum Press, New York, NY, Vol.22, 2003
67. [Lupi05] Lupien, V., Hassan, W., Dumas, P., Improved Titanium Billet Inspection Sensitivity through Optimized Phased Array Design, Part 1: Design Technique, Modelling and Simulation, Review of Progress in QNDE, Thompson, D.O. and Chimenti, D.E. eds, Plenum Press, New York, NY, Vol.25, 2005
68. [Lütj07] Lütjering, G., Williams, J. C., Titanium, Springer Verlag, 2. Edition, 2007,
69. [Male12] Maleo, N., PICASSO imProved reliability inspeCtion of Aeronautic structure through Simulation Supported POD, 4th International Symposium on NDT in Aerospace 2012 - Th.1.A.3
70. [Marg02] Margetan, F. J., Roberts, R., Chiou, C.-P., Thompson, R. B., Determination of the Effective Focal Characteristics of Bicylindrically-Focussed Ultrasonic Transducers, Review of Progress in QNDE, Thompson, D.O. and Chimenti, D.E. eds, Plenum Press, New York, NY, Vol.21, 2002
71. [Marg02-2] Margetan, F. J., Gigliotti, M., Brasche, L., et. al., Fundamental Studies: Inspection Properties for Engine Titanium Alloys, FAA report DOT/FAA/AR-02/114, 2002
72. [Marg07] Margetan, F.J., Umbach J., et.al., Inspection Development for Titanium Forgings, FAA report DOT/FAA/AR-05/46, 2007
73. [Mark06] Marklein, R., Numerical Simulation of Fields and Waves in Nondestructive Testing, European Conference on Nondestructive Testing, ECNDT 2006 – Tu.1.3.1.
74. [Mart02] Martz, H. E., Jr., Logan, C. M., Shull, P. J., Radiology, in Nondestructive Evaluation – Theory, Techniques

and Applications, Herausgeber Shull, P. J., Marcel Dekker Verlag, 2002

75. [Mart03] Martinez, O. Aknakh, M., Ullate, L. G., Montero de Espinosa, F., A small 2D ultrasonic Array for NDT Applications, NDT&E, Volume 36, Issue 1, January 2003, Pages 57–63
76. [Mata72] Matay, I. M., Ultrasonic Distance Amplitude Correction Unit, United States Patent, Patent Nr. 3,690,153, 1972
77. [Meng10] Menges, J., Potentiale der Ultraschall Phased Array Technik bei MTU, DGZfP Fachausschuss Materialcharakterisierung, 26.10.2010
78. [Meng11] Menges, J., Bamberg, J., Baron, H.-U., Schubert, F, Simulation of ultrasonic scattering from inclusions using laser engravings in glass samples, Review of Progress in QNDE, Thompson, D.O. and Chimenti, D.E. eds, Plenum Press, New York, NY, Vol. 31, 2011
79. [Meng12] Menges, J. and Bamberg, J., Forming non-defracting beams using a 2D-matrix phased array probe, Review of Progress in QNDE, Thompson, D.O. and Chimenti, D.E. eds, Plenum Press, New York, NY, Vol. 32, 2012
80. [Meng13] Menges, J., Meburger, M., Schulungsunterlagen Ultraschall Level 2, Level 3 Kurs, MTU Aero Engines München, ZfP-Schule, Stand 2013
81. [Meye00] Meyer, P. A., Anderson, J. W., Ultrasonic Testing Using Phased Arrays, 15th World Conference on Nondestructive Testing, 2000, <http://www.ndt.net/article/wcndt00/wcndt00.htm>, Stand 09.2014
82. [Meye04] Meyendorf, N. G.H., Eylon, D., Frankel, G. S., Hoffmann, J., et. al., Degradation of Aircraft Structures, in Nondestructive Materials Characterization with Application to Aerospace Materials, Herausgeber, Meyendorf, N.G.H., Nagy, P., Rohklin, S. I., Kapitel 1, Springer Verlag, 2004
83. [Mitt06] Mitchell, A., Kawakami, A., Cockcroft, S. L., Beta Fleck and Segregation in Titanium Alloy Ingots, High Temperature Materials and Processes, Band 25, Heft 5-6, 2006
84. [Müll06] Müller, C., Elaguine, M., Bellon, C., et. al., POD (Probability of Detection) Evaluation of NDT Techniques for Cu-Canisters for Risk Assessment of Nuclear Waste Encapsulation, ECNDT 2006, <http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Fr.2.5.1.pdf>, Stand 12.2014
85. [Nava03] Navarrete, M., Villagran-Muniz, M., Ponce, L., Flores, T., Photoacoustic detection of microcracks induced in BK7 glass by focused laser pulses, Optics and Lasers in Engineering 40, 2003, pp. 5-11
86. [Neuh13] Neuhäusler, S., et. al., Level 3 Basic Kurs MTU München, Stand 2013
87. [Niet95] Nieters, E. J., Gilmore, R. S., Trzaskos, R. C., et. al., A Multizone Technique for Billet Inspection, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Vol. 14, Edited by D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum Press. New York, 1995
88. [Ntsp90] NTSP National Transportation Safety Board, Aircraft Accident Report, United Airlines Flight 232, PBSO-910406 NTSB/AAR-SO/06, 1990, <http://www.airdisaster.com/reports/ntsb/AAR90-06.pdf>, Stand 10.2014
89. [Olym04] Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Application: Olympus NDT Guidelines, Olympus NDT, 2004
90. [Pinc11] Pinchuk, R., Bulavinov, A., Kappes, W., Verbesserung der Prüfeempfindlichkeit und Aussagekraft der Phased Array Technik durch das eRDM Verfahren, DGZfP-Jahrestagung 2011
91. [Pete02] Peters, M., Leyens, C., Titan und Titanlegierungen, Verlag: Wiley-VCH, 3. Auflage, 2002
92. [Pogu02] Pogue, J., Garcia, A., Vazquez, J., et. al., Phased Array Technology Concepts, Probes and Applications, 8th European Congress on Nondestructive Testing, 2002
93. [Poll06] Pollock, T. M., Tin, S., Nickel-Based Superalloys for Advanced Turbine Engines: Chemistry,

Microstructure, and Properties, Journal Of Propulsion and Power Vol. 22, No. 2, 2006

94. [Rail12] Raillon, R., Schubert, F., Dorval, V., Gilles-Pascaud, C., Chatellier, J.-Y., Simulation Supported POD Methodology and Validation for Multi-Zone Ultrasonic Testing Procedure, 4th International Symposium on NDT in Aerospace 2012 – Th.2.A.1
95. [Raj07] Raj, B., Jayakumar, T., Thavasimuthu, M., Practical Non-Destructive Testing, Verlag Alpha Science International Ltd., 3. Auflage, 2007
96. [Rau06] Rau, E., Grauvogl, E., Manzke, H., Cyr, P., Ultrasonic Phased Array Testing of Complex Aircraft Structures , ECNDT 2006
97. [Reve12] Reverdy, F., Ithurrald, Dominguez, N., Advanced Ultrasonic 2D Phased-Array Probes, 18th World Conference on Nondestructive Testing, 2012
98. [Reve13] Reverdy, F., Dominguez, N., Jenson, F., Mahaut, S., Simulation Assisted POD in the Aeronautical Context, 5th European-American Workshop on Reliability of NDE, 2013
99. [Rieg12] Rieg, F., Hackenschmidt, R., Alber-Laukant, B., Finite Elemente Analyse für Ingenieure, Carl Hanser Verlag, 4. Auflage, 2012
100. [Rdte04] R/D Tech, Ultrasound Phased Array, The e-Journal of Nondestructive Testing, Vol. 7, No. 5 (Mai 2004), NDT.net, <http://www.ndt.net/article/v07n05/rdtech/rdtech.htm>, Stand 09.2014
101. [Rose12] Rosell, A., Persson, G., Simulation Supported POD Methodology and Validation for Automated Eddy Current Procedures, 4th International Symposium on NDT in Aerospace 2012, <http://2012.ndt-aerospace.com/Portals/aerospace2012/BB/th1a1.pdf>, Stand 09.2014
102. [Rumm10] Rummel, W. D., Nondestructive Inspection Reliability – History, Status and Future Path, 18th World Conference on Nondestructive Testing 2010, http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/608_wcndtfinal00607.pdf, Stand 11.2014
103. [Scha09] Schaefer, L., Tutorial POD-Basics, 4th European-American Workshop on Reliability of NDE, 2009
104. [Schl78] Schlengermann, U., The Focused Sound Field – a Versatile Tool for Ultrasonic Evaluation of Materials, Ultrasonic Materials Characterization: Proceedings of the First International Symposium on Ultrasonic Materials Characterization, 1978, <http://books.google.de/books?id=Tr8hKTFkZpIC&printsec=frontcover&hl=de#v=onepage&q&f=false>
105. [Schn04] Schneider, C. R. A., Rudlin, J. R., Review of statistical methods used in quantifying NDT reliability, 42nd Annual British Conference on NDT, 2003
106. [Schn09] Schnars, U., Kück, A., Application of POD Analysis at Airbus, 4th European-American Workshop on Reliability of NDE, 2009, <http://www.ndt.net/article/reliability2009/Inhalt/we3a1.pdf>, Stand 11.14
107. [Schu01] Schubert, F., Köhler, B., Peiffer, A., Time domain modeling of axisymmetric wave propagation in isotropic elastic media with CEFIT – Cylindrical Elastodynamic Finite Integration Technique, Journal of Computational Acoustics, Vol. 9, No. 3, 1127-1146, 2001
108. [Schu07] Schubert, F., Lamek, B., 3-D Ultrasonic Transducer Modeling Using the Elastodynamic Finite Integration Technique in Combination with Point-Source-Synthesis, European NDT Days, 2007
109. [Schu10] Schubert, F., Lamek, B., Fast Numerical Calculations of 3-D Phased Array Wave Fields Based on Transient Point Source Synthesis, 10th European Conference on Non-Destructive Testing, ECNDT 2010
110. [Schu11] Schubert, F., Barth, M., Menges, J., Baron, H.-U., Simulationsgestützte POD-Studien für die Ultraschallprüfung von Luftfahrtkomponenten, DGZfP-Jahrestagung 2011 – Mi.4.C.2
111. [Schu12] Schubert, F., Raillon, R., Dorval, V., Gilles-Pascaud, C., Chatellier, J.-Y., Baron, H.-U., Menges, J.,

Ein schneller hybrider EFIT-Solver zur Berechnung simulationsgestützter POD-Kurven für die Ultraschallprüfung, DACH-Jahrestagung 2012 in Graz – Mi.3.B.3

112. [Schu13] Schubert, F., Baron, H.-U., Menges, J., et. al., Simulation-Supported POD for Ultrasonic Testing – Recommendations from the PICASSO Project, 5th European-American Workshop on Reliability of NDE – Lecture 6
113. [Shul02] Shull, P. J., Eddy Current, in Nondestructive Evaluation – Theory, Techniques and Applications, Herausgeber Shull, P. J., Marcel Dekker Verlag, 2002
114. [Shul02-2] Shull, P. J., Tittmann, B. R., Ultrasound, in Nondestructive Evaluation – Theory, Techniques and Applications, Herausgeber Shull, P. J., Marcel Dekker Verlag, 2002
115. [Silk84] Silk, M. G., Ultrasonic transducers for nondestructive testing, Verlag Taylor & Francis, 1984, Kapitel 5.6
116. [Smar02] Smarsly, W., Triebwerkstoffe – Quo Vadis, Werkstoffkolloquium – Hochleistungswerkstoffe für Luftfahrt, Raumfahrt und Verkehr, 2002
117. [Spie12] Spies, M., Rieder, H., Dillhöfer, A., Modell-basierte Bestimmung der Auffindwahrscheinlichkeit (POD) von Volumenfehlern in schwerprüfbaaren Bauteilen, DACH-Jahrestagung der DGZFP, 2012 – Mi.3.B.1, <http://www.ndt.net/article/dgzfp2012/papers/mi3b1.pdf>, Stand 11.14
118. [Spie13] Spies, M., Dillhöfer, A., Müller, W., Rieder, H., Schmitz, V., SAFT, TOFD, Phased Array – Klassische Anwendungen und neuere Entwicklungen der Ultraschall-Bildgebung, Seminar des Fachausschuss Ultraschallprüfung, 11.-12. November 2013, Berlin
119. [Stur86] Sturges, D.J., Gilmore, R.S., Hovey, P.W., Estimating Probability of Detection for Subsurface Ultrasonic Inspection, Review of Progress in QNDE, Thompson, D.O. and Chimenti, D.E. eds, Plenum Press, New York, NY, Vol. 5A, 1986, pp. 929-937
120. [Szel09] Szelazek, J., Mackiewicz, S., Kowalewski, Z.L., New samples with artificial voids for ultrasonic investigation of material damage due to creep, NDT&E International, Vol. 42, 2009, pp. 150-156
121. [Thom08] Thompson, R. B., Meeker, B., Keller, M., et. al., Update of Default Propability of Detection Curves for the Ultrasonic Detection of Hard Alpha Inclusions in Titanium Alloy Billets, FAA report DOT/FAA/AR-07/63, 2008
122. [Turn81] Turner, F., The Forging of Gas Turbine Discs, in The Development of Gas Turbine Materials, Herausgeber Meetham, G. W., Applied Science Publishers, 1981, Kapitel 7
123. [Whit81] White, C. H., Nickel Base Alloys, in The Development of Gas Turbine Materials, Herausgeber Meetham, G. W., Applied Science Publishers, 1981, Kapitel 4
124. [Ying56] Ying, C. F., Truell, R., Scattering of a plane longitudinal wave by a spherical obstacle in an isotropically elastic solid, Journal of Applied Physics, Volume 27, pp 1086-1097, 1956

Anhang – Ansteuerung des Matrixarrays für die Erzeugung eines Besselstrahls

7x7 Elemente, Steigung 0,008

```
V2.1
PT FocusLT,64 //Beschreibung des verwendeten Gerätes

DF1,49,1,50,1,1,0,0,0,0,0,0,5000,5825 //DF[Nummer des Focal Laws],[Verwendete Elemente],[1=Piezo
//Module, 0=EMAT],[Pulsbreite=50ns],[Signalfolge, für Piezo immer
//1],[Betriebsweise, 1=Impulsecho],[Verstärkung],[Brechungswinkel
//für Anzeige],[Schräge für Anzeige],[Index der X-Achse für Anzeige],
//[Index der Y-Achse für Anzeige],[Vorlaufstrecke für Anzeige],[Tiefe
//der Fokussierung für Anzeige],[Schallgeschwindigkeit für Anzeige]
//Alle Werte für die Anzeige können nachträglich im System
//eingegeben werden.

DF25/0,115,3,0,0,25,25 //DF[Angesteuertes Element]/[Verstärkung für das Element],
//[Ansteuerungsspannung],[Filter, 3=Hoch- und Tiefpass],
//[Verzögerungszeit Sender],[Verzögerungszeit Empfänger],
//[Sendeelement],[Empfängerelement]

DF26/0,115,3,0,0,26,26
DF27/0,115,3,0,0,27,27
DF28/0,115,3,0,0,28,28
DF29/0,115,3,0,0,29,29
DF30/0,115,3,0,0,30,30
DF31/0,115,3,0,0,31,31
DF36/0,115,3,0,0,36,36
DF37/0,115,3,20,20,37,37
DF38/0,115,3,20,20,38,38
DF39/0,115,3,20,20,39,39
DF40/0,115,3,20,20,40,40
DF41/0,115,3,20,20,41,41
DF42/0,115,3,0,0,42,42
DF47/0,115,3,0,0,47,47
DF48/0,115,3,20,20,48,48
DF49/0,115,3,40,40,49,49
DF50/0,115,3,40,40,50,50
DF51/0,115,3,40,40,51,51
DF52/0,115,3,20,20,52,52
DF53/0,115,3,0,0,53,53
DF58/0,115,3,0,0,58,58
DF59/0,115,3,20,20,59,59
DF60/0,115,3,40,40,60,60
DF61/0,115,3,60,60,61,61
DF62/0,115,3,40,40,62,62
DF63/0,115,3,20,20,63,63
DF64/0,115,3,0,0,64,64
DF69/0,115,3,0,0,69,69
DF70/0,115,3,20,20,70,70
DF71/0,115,3,40,40,71,71
DF72/0,115,3,40,40,72,72
DF73/0,115,3,40,40,73,73
DF74/0,115,3,20,20,74,74
DF75/0,115,3,0,0,75,75
```

DF80/0,115,3,0,0,80,80
DF81/0,115,3,20,20,81,81
DF82/0,115,3,20,20,82,82
DF83/0,115,3,20,20,83,83
DF84/0,115,3,20,20,84,84
DF85/0,115,3,20,20,85,85
DF86/0,115,3,0,0,86,86
DF91/0,115,3,0,0,91,91
DF92/0,115,3,0,0,92,92
DF93/0,115,3,0,0,93,93
DF94/0,115,3,0,0,94,94
DF95/0,115,3,0,0,95,95
DF96/0,115,3,0,0,96,96
DF97/0,115,3,0,0,97,97

EF1

DS0,1

LS128

//Ende Focal Law [Nummer des Focal Laws]

//Ende der Focal Law Sequenz

//Laden der Sequenz