

Fehlerdiagnose in der Ultraschallprüfung durch iterative Modellierung

vorgelegt von
Dipl.- Ing. Dirk Tschardtke

von der Fakultät III - Prozesswissenschaften -
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -
genehmigte Dissertation

angefertigt an der
Fachgruppe Zerstörungsfreie Prüfung;
akustische und elektrische Verfahren der
Bundesanstalt für Materialforschung
und -prüfung (BAM)
in Berlin

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr. rer. nat. H.-J. Hoffmann
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. J. Grosch
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. H. Wüstenberg

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 20.02.2002

Berlin 2002
D 83

Danksagung

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Wüstenberg, für die Anregung zu dieser Arbeit, die er in allen Phasen betreut und unterstützt hat. Seine stete Diskussionsbereitschaft und sein anwendungsorientierter Blickwinkel sowie die stets konstruktive Kritik waren mir besonders auch in schwierigen Phasen eine unschätzbare Hilfe. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Grosch danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferats.

Dem Leiter der Fachgruppe VIII.4 für Ultraschallprüfung mit elektrischen und akustischen Verfahren, Herrn Dr.-Ing. A. Erhard, sowie Herrn Dr. rer. nat. J. Döring danke ich für die freundliche Betreuung, für ein immer offenes Ohr und die Bereitschaft, jedes Problem ausdiskutieren und mir mit Rat und Tat zur Seite zu stehen.

Herrn Dipl.-Phys. R. Boehm danke ich für die vielen Anregungen, die zu einem besseren Verständnis der Ultraschallmodellierung beigetragen haben, sowie für die Bereitstellung von Modellrechnungen mit der Punktquellensynthese.

Den Herren Dr.-Ing. G. Brekow und Dipl.-Ing. E. Schulz für die Unterstützung bei den durchgeführten Messungen, Herrn Dipl.-Ing. Montag für die Hilfestellung bei der Programmierung und Datenstruktur der Messdateien.

Für unkomplizierte Lösung verwaltungstechnischer Aufgaben Frau K. Tamm und Frau R. Gierke.

In der einen oder anderen Weise haben noch viele weitere Menschen diese Arbeit unterstützt, begleitet und beeinflusst: Dipl.-Ing. N. Bertus, Dipl.-Ing. T. Heckel, R. Heller-Kowallis, Dipl.-Ing. W. Möhrle, Dipl.-Ing. T. Rehfeldt, Dipl.-Ing. G. Schenk, Dipl.-Ing. U. Tessaro, Dipl.-Ing. U. Völz. Ihnen allen, sowie den hier nicht namentlich genannten gilt mein herzlicher Dank.

Meinen Eltern danke ich dafür, dass sie mir durch ihre Unterstützung und Förderung überhaupt die Möglichkeit geschaffen haben, diese Arbeit zu schreiben.

Schließlich danke ich meiner Frau Katja, nicht nur für ihr Interesse an meiner Forschung, sondern auch besonders für ihre Toleranz, Unterstützung und Geduld, die sie mir während der Entstehung dieser Arbeit entgegengebracht hat.

Berlin, Februar 2002

Dirk Tschardtke

Gliederung

1	Einleitung.....	3
2	Methoden zur Fehlergrößenbestimmung mit Ultraschall	7
2.1	Untersuchungsgrundsätze der Ultraschallprüfung	7
2.2	Amplitudenbewertung	9
2.3	Laufzeitauswertung (TOFD- Technik).....	12
2.4	Echodynamikauswertung.....	16
2.5	Mustervergleich.....	17
2.5.1	Bewertung nach Echodynamikmustern	17
2.5.2	Bildvergleich	18
2.5.3	Digitale Speicherung und Darstellung von A- Bildern	20
2.6	Rekonstruktionsverfahren.....	22
2.6.1	Synthetische Apertur Fokus Technik (SAFT)	22
2.6.2	Akustische Holographie	24
2.6.3	Ultraschalltomographie versus Röntgentomographie	25
2.7	Zwischenbewertung	28
2.8	Das schnelle, halbanalytische Modell der BAM (FSAM = Fast- Semi- Analytical- Model)	32
2.8.1	Grundlagen der Wellenausbreitung und -beugung.....	32
2.8.2	Anwendung der Beugungstheorien bei der Schallfeldberechnung	34
2.8.3	Grundsätze der Modelltechnik	35
2.8.4	Grundannahmen des Modells.....	37
2.8.5	Sendeimpuls und Prüfkopfspektrum.....	53
2.8.6	Analytische Beschreibung des Schallfeldes	56
2.8.7	Geometrische Beschreibung der Prüfanordnung (Nachweis von schräg liegenden Rissen)	61
3	Verifikation und Anwendung der Modellvorstellungen im FSAM.....	65
3.1	Beschreibung des Prüfsystems	65
3.2	Untersuchung der Prüfkopfschallfeldbeschreibung	66
3.3	Die Reflektortypen des Modells	82
3.4	Verifikation des FSAM an verschiedenen Testreflektoren	87
3.5	Interpretation von kritischen Prüfbefunden	94
3.6	Systematisierung mit Hilfe der Evolutionsstrategie	105
3.6.1	Grundgedanken zum Einsatz der Evolutionsstrategie	105
3.6.2	Prinzip der Evolutionsstrategie	106

3.6.3	Erweiterungsfähigkeit des FSAM mit der Evolutionsstrategie	110
4	Zusammenfassung	122
5	Anhang	126
5.1	Darstellung der vier Hauptmuster für Echodynamiken	126
5.2	Herleitungen der FRESNEL- KIRCHHOFFSCHEN- und RAYLEIGH- SOMMERFELDSCHEN- Integralsätze	132
5.2.1	FRESNEL- KIRCHHOFFSCHES- Beugungsintegral.....	132
5.2.2	RAYLEIGH- SOMMERFELDSCHEN- Beugungsintegrale	137
5.3	Skizzen der berücksichtigten Schallwege	141
5.4	Zeichnungen der Testkörper BAM 63-1 bis BAM 63-7	143
5.5	Schnittbilder des Schallfeldes vom MWB 45° N4 quer zur Einschallebene und in der Einschallebene.....	150
5.6	Eingabeparameter des iterativen Rechenmodells.....	151
5.7	Schematischer Programmablauf und Routinen des Rechenmodells .	153
6	Literatur.....	157

1 Einleitung

Mit der Verwendung von Dampfdruckkesseln zu Beginn der industriellen Revolution begannen auch erste Erfahrungen mit den Gefahren beim Betrieb der neuen Technik. Gedanken über die Zuverlässigkeit der eingesetzten Technik kamen auf. Allerdings waren wissenschaftlich begründete Verfahren zur Prüfung von Werkstoffen und Geräten noch unbekannt. Heute spielt der Sicherheitsaspekt eine wesentliche Rolle und weist den Prüf- und Kontrollverfahren und hier insbesondere den zerstörungsfreien Prüfungen eine wichtige Funktion zu.

Der heutige Stand der Technik stellt sehr viel höhere Anforderungen an die Qualität des verwendeten Materials und hat neue Anwendungen hervorgebracht, die noch vor wenigen Jahrzehnten undenkbar waren. So fordern wir heute nicht nur allgemein die Sicherheit von Anlagen oder Produkten, sondern quantifizierbare Angaben z. B. zur Einschätzung ihrer Lebensdauer. In Folge dessen stiegen die Ansprüche an die zerstörungsfreien Prüfverfahren und deren quantitative Aussagen erheblich. Daher ist heute die quantitative Beschreibung von nachgewiesenen und belassenen Qualitätsmängeln eine wichtige Forderung. Mit Hilfe der Verfahren der bruchmechanischen Bewertung finden in diesem Zusammenhang vielfach Untersuchungen zur Gebrauchstauglichkeit („fitness for purpose analysis“) oder kritische technische Beurteilungen („engineering critical assessment“, ECA) statt. Sie benötigen genaue Aussagen aus der zerstörungsfreien Prüfung über die anzunehmenden Fehlergrößen.^{1 u. 2}

In vielen Fällen können die Fehlereigenschaften aus a priori Kenntnissen, beispielsweise aus der Herstellung, bereits grob eingeschätzt werden. So kann man bei der Schweißnahtprüfung Bundefehler zwischen den Schweißlagen häufig durch die Angabe der Schweißlagenhöhe dimensionieren. In Bereichen, in denen Reparaturen an Rohrleitungen und Schweißkonstruktionen schwierig

¹ Denys, Rudi u. a.: Weld Defect Acceptance Criteria. Bericht, Laboratorium Soete, Universität Gent im Auftrag der International Pipe Line & Offshore Contractors Association (<http://www.iploca.com>), 1999

² The International Institute Of Welding: The Evaluation Of Ultrasonic Signals. Document IIS/IIW-850-86, Cambridge, 1987

sind (z. B. im Offshore- Bereich) oder wo Anlagen mit den vorliegenden Fehlern aus unterschiedlichen Gründen weiter betrieben werden müssen, sind derartige Abschätzungen durch andere Prüfungen oder Bewertungen abzusichern. In diesen Fällen werden genauere quantitative Aussagen der Ultraschallprüfung (US- Prüfung) immer bedeutsamer.

Da aber in der zerstörungsfreien Prüfung mit Ultraschall viele Verfahren nur scheinbar quantitative Aussagen über die Größenausdehnung der Prüfbefunde liefern, ist für eine zunehmende Zahl von Anwendungen diese nicht dimensionierende zerstörungsfreie Prüfung nur begrenzt verwendbar. Die quantitativen Aussagen der US- Prüfung, wie z. B. die sogenannte Ersatzfehlergröße (s. u.), dienen heute mehr der Sicherung einer reproduzierbaren und objektiven Prüfdurchführung, als der Größenbestimmung im eigentlichen Sinn. Heute gilt aber auch für die US- Prüfung, dass sie eine Fehlerdiagnose mit Aussagen über die vorliegende Fehlerart, -größe und -lage ermöglichen muss. Die Fehlerlage kann mit den heutigen Ultraschall- Impuls- Echo- Verfahren im allgemeinen schnell und ausreichend genau ermittelt werden. Weitaus schwieriger ist die Bestimmung der Fehlerart und -größe. Die vielfältigen Gründe dafür werden im folgenden Abschnitt noch näher erläutert. Dieser Umstand ist der Anlass für die vorliegende Arbeit, die versucht, die Interpretationsstrategien von Anzeigen der US- Prüfung durch Modellierung zu erweitern.

Die vorliegende Arbeit versucht, eine iterative Modellierung der Prüfbefunde als Möglichkeit zur Fehlerdiagnose vorzustellen. Die Notwendigkeit und die Chancen dieses Ansatzes werden klar, wenn man die Leistungen und Grenzen aller anderen Methoden zur Fehlerbeschreibung bei der US- Prüfung kritisch betrachtet. Kritische Betrachtung heißt auch, dass man die Methoden an dem erhofften Optimalergebnis, einem realistischen Fehlerbild, misst. Je weiter die Fehlergrößenbestimmungsmethoden von diesem Ziel entfernt sind, umso unsicherer sind sie. In der US- Prüfung kann man vier Hauptbereiche bei den Methoden zur Fehlergrößenbestimmung unterscheiden: die amplitudengestützten, die laufzeitgestützten, die mustergestützten und die rekonstruktionsgestützten Verfahren. Eine eigentliche Fehlerabbildung streben nur die rekonstruktionsgestützten Verfahren an, die anderen nähern sich diesem Ziel nur sehr unvollkommen oder gar nicht.

Die Verfahren, die versuchen, den Fehler unmittelbar aus dem Messbefund zu rekonstruieren, d. h. die versuchen, den direkten Prozess der Entstehung der Fehlerantwort zu invertieren (inverse Verfahren), sind aber durch den Umstand, dass Fehler in der Regel eine ausgeprägte Richtwirkung für Schallwellen haben, stark eingeschränkt. Die Bedeutung dieses Umstandes wird klar, wenn man die Computertomographie (CT) und eine Entsprechung in der US-Prüfung, die Echotomographie (ET) betrachtet. Da die bei der CT benutzte bildgebende Wechselwirkung, die Strahlenabsorption, in jedem Pixel von der Einstrahlrichtung unabhängig ist, kann mit der Radon-Transformation eine größengerechte Rekonstruktion der Fehler erreicht werden. Das ist bei der ET nur für kleine Einschlüsse mit ungerichteter Streuwirkung möglich. Bei gerichtet reflektierenden Rissen versagt diese Abbildungstechnik. Bei jeder Fehlerabbildung mit Ultraschall besteht aber grundsätzlich das Handicap der mehr oder weniger stark gerichteten Reflexion. Die bei den Abtastungen für Rekonstruktionsverfahren benutzten Datensätze sind damit im allgemeinen unvollständig und gestatten meist keine eindeutige Fehlerabbildung. Wie sich das bei den vier Verfahren auswirkt, wird in Abschnitt 2 beschrieben. Wegen der genannten prinzipiellen Einschränkung erscheint es angebracht, neue Ansätze zur Unterstützung und Ergänzung der klassischen Fehlerbewertungsverfahren zu erproben. Die Verwendung mehrerer Informationsquellen (a priori Informationen aus der Fertigung, Richtungsverhalten bestimmter Fehler, etc.) zur Ergänzung der eingeschränkten Daten bei den Rekonstruktionsverfahren führte schon in den 80er Jahren zu Expertensystemen (z. B. „COMSON“, computer aided ultrasonic flaw- diagnosis system, Voest- Alpine AG und Krautkrämer GmbH)^{3 u. 4}. Sie fanden aber keine große Resonanz und haben heute keine Bedeutung mehr. Damals war die bildhafte Darstellung aller Ergebnisse noch zu aufwändig und der plausible Vergleich z. B. mit Modellrechnungen nicht sehr aussichtsreich, da der Vergleich einzelner Daten oder auch Kurven in Diagrammen, wie z. B. der Echodynamikkurve, wegen der Mehrdeutigkeit keine verlässlichen Rückschlüsse erlaubte. An dieser Stelle setzt die vorliegende Arbeit an. Es soll

³ Frielinghaus*, R.; Hackl**, M.; Krenmayr**, F.; Spengler**, F.: COMSON, ein mobiles Ultraschall-Prüfsystem zur Analyse von Schweißnahtfehlern. In: Steel & Metals Magazine, Band 27 (1989) H. 9, S. 673-676. *Krautkrämer GmbH, Köln-Hürth; **Voest- Alpine AG, Linz

⁴ Frielinghaus*, R.; Niklas*, L.; Außerwöger**, J.; Spengler**, F.; Ganglbauer**, O.: Aspects of Practical Application of the Comson Flaw- diagnosis System. Konferenz- Einzelbericht, 4. European conference of non- destructive testing. Vol. 4. Proceedings, London: Pergamon Press, 1988, S. 2461-2470. *Krautkrämer GmbH, Köln-Hürth; **Voest- Alpine AG, Linz

sowohl eine iterativ sich schneller und besser anpassende Modellrechnung, als auch ein auf Bildauswertung gestützter systematischer Mustervergleich zur Verbesserung der Fehlerbewertung herangezogen werden. Der auf Bildauswertung gestützte Mustervergleich war dabei der zentrale Ansatzpunkt.⁵

⁵ Erhard, Anton; Tschardtke, Dirk; Wüstenberg, Hermann: Ultraschallprüfung an Schweißnähten - Bewertung kritischer Befunde mit Modellrechnungen. In: Materialprüfung, 42(2000), H. 11-12, S. 433-436

2 Methoden zur Fehlergrößenbestimmung mit Ultraschall

2.1 Untersuchungsgrundsätze der Ultraschallprüfung

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf Problemstellungen aus der Schweißtechnik. Die getroffenen Aussagen können aber ohne Schwierigkeiten auch auf andere Anwendungsgebiete übertragen werden. Die zerstörungsfreie Materialprüfung kann als Diagnosetechnik bei geschweißten Komponenten und Systemen für innere, von außen nicht sichtbare, Fehler betrachtet werden. Hierzu wird sie für zwei Hauptziele eingesetzt:

- Qualitätssicherungsfunktion: Bewertung der Qualität einer Schweißnaht und im besonderen der Verarbeitungsqualität.
- Gebrauchstauglichkeitsuntersuchung: Abgabe einer begründeten Garantie, dass die Schweißnaht keine Fehler enthält, von denen die strukturelle Integrität beeinträchtigt werden könnte.

In Abhängigkeit vom Einsatzzweck der Schweißnaht bzw. dem angestrebten Untersuchungsziel wird mal das eine, mal das andere Ziel überwiegen. Um die Effektivität und Wirtschaftlichkeit einer US- Prüfung zu fördern, wird in der europäischen Normung versucht, das Ultraschallverfahren und die Regeln für eine Anzeigenbewertung gemeinsam mit den Akzeptanz- und Ablehnungskriterien für Ungängen zu spezifizieren (DIN EN 1712, 1713 und 1714). Die Wahl der quantitativen Ungängen- Kriterien muss im Hinblick auf die geplante Funktion einer Prüfung entweder auf eine qualitätssichernde oder tauglichkeitsorientierte Anwendung hin getroffen werden.

Diese Problematik wird in Bild 1 veranschaulicht. Die drei übereinanderstehenden Blöcke zeigen, dass die US- Prüfung eine Beurteilung der Stabilität einer Schweißnaht nur im Sinn des Fehlerakzeptanzstandards trifft. Aus diesem Grund muss dieser die technischen Anforderungen für eine Freiheit von Schweißfehlern realistisch widerspiegeln. Dabei darf man die Kosten der Komponente, ihre notwendigen Serviceleistungen und die Konsequenzen im Versagensfall nicht aus dem Auge verlieren. Die linke Spalte in Bild 1 bezieht

sich auf eine Qualitätssicherungskontrolle, die rechte auf eine Gebrauchstauglichkeitsuntersuchung.

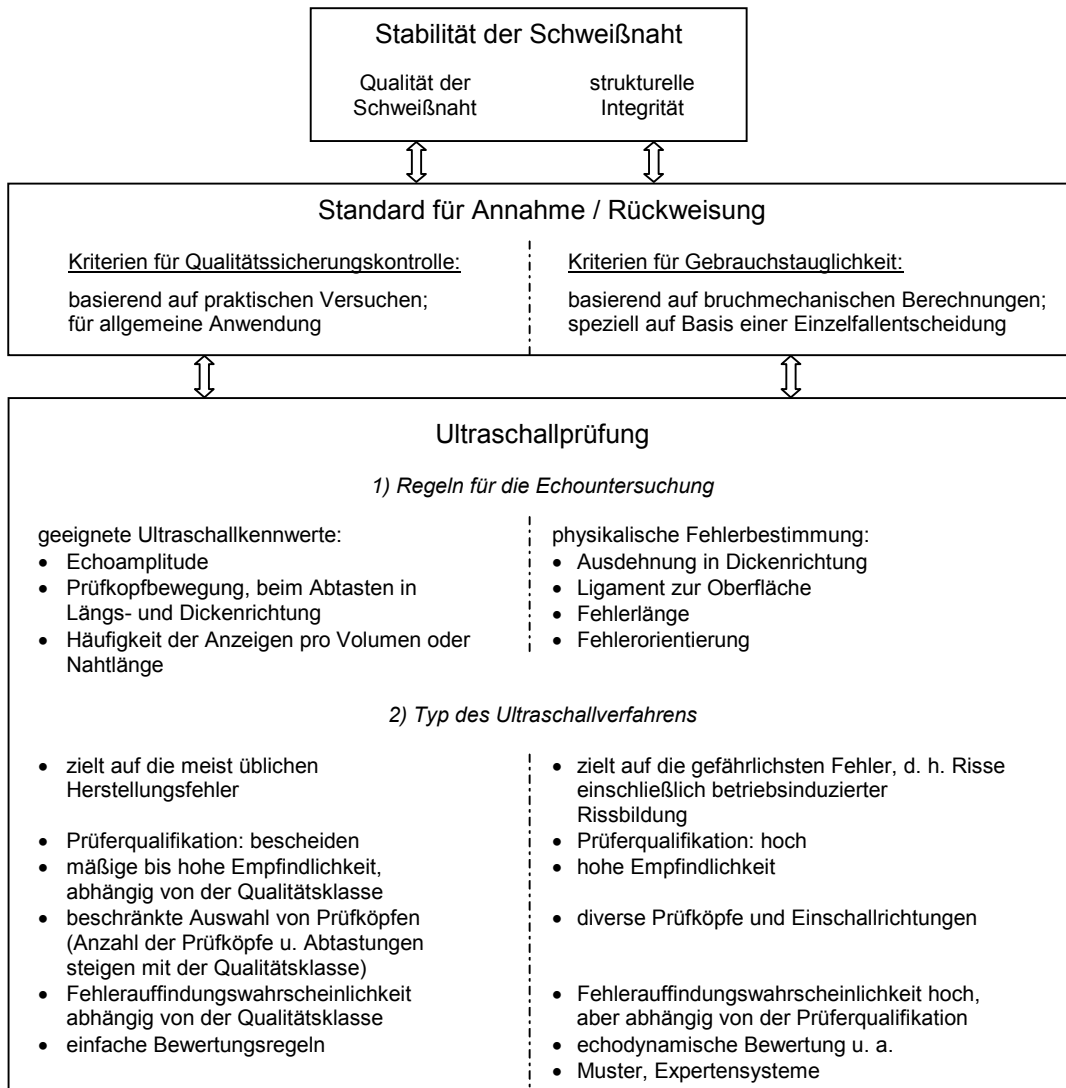


Bild 1: Beziehung zwischen der Fehlerfreiheit der Schweißnaht, dem Fehlerakzeptanzstandard und den Aspekten der US- Prüfung, wie sie bei der Qualitätssicherungskontrolle und der Gebrauchstauglichkeitsuntersuchung zu beachten sind.⁽⁶⁾ unten)

Abhängig von den oben genannten Bedingungen wird die Untersuchung mehr oder weniger stark in Richtung einer der beiden Ziele ausgerichtet sein. Die Angaben in den beiden Spalten stellen extreme Ausprägungen dar, in der Realität ergibt sich heute oft eine Mischform. Ein Vergleich der beiden Spalten in Bild 1 zeigt, dass die Anforderungen an die Untersuchungsmethode und das Prüfpersonal für die Gebrauchstauglichkeitsuntersuchung deutlich höher sind als für eine Qualitätssicherungskontrolle. Dies muss bei der Festlegung der Prüfaufgabe beachtet werden, da der erforderliche Prüfaufwand sonst unnötig

ansteigt. In bestimmten Bereichen kann aber nicht auf diese großen Bemühungen verzichtet werden.⁶

Die je nach den vorliegenden Randbedingungen angewendeten Prüfkonzepete stellen also sehr unterschiedliche Anforderungen an die Gerätetechnik und das Prüfpersonal. Der Prüfaufwand und die Schwierigkeiten bei der Interpretation der Prüfbefunde können dabei extrem ansteigen (z. B. bei Anwendungen im Offshore- Bereich oder in der Kerntechnik). In den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten Grundprinzipien der heute in der US- Prüfung angewendeten Anzeigenbewertung vorgestellt. Ausgehend von den einfachen Verfahren wie der Amplitudenbewertung mit einer sehr beschränkten Aussagekraft werden anschließend die aufwändigeren Rekonstruktionsverfahren (z. B. SAFT, Echotomographie) beschrieben. Dabei soll vor allem auf die Schwierigkeiten und grundsätzlichen Grenzen der einzelnen Methoden eingegangen werden.

2.2 Amplitudenbewertung

Grundlage jeder Anzeigenbewertung bei der US- Prüfung ist eine reproduzierbare Einstellung der Prüfeempfindlichkeit, so dass alle signifikanten Fehler mit nachvollziehbaren Kriterien registriert werden können. Die Empfindlichkeit darf aber nicht so hoch gewählt werden, dass das Schirmbild mit einer Vielzahl unerwünschter Echoanzeigen (Hintergrundrauschen) gefüllt wird, die von vielen verschiedenen Quellen stammen können (prüfkopfinterne Echos, Streuechos von der Bauteiloberfläche, kleine Einschlüsse, Kornrauschen, elektronisches Rauschen, u. a.). In dieser Vielzahl von Anzeigen könnte selbst eine Fehleranzeige größerer Echohöhe unerkannt bleiben.

Die Prüfeempfindlichkeit kann im wesentlichen auf zwei Wegen eingestellt werden. Die größte nutzbare Empfindlichkeit ist erreicht, wenn die Höhe des Hintergrundrauschens noch nicht wesentlich wird. Eine weitere Erhöhung der Verstärkung verbessert dann den Signal- Rausch- Abstand nicht. Die als primäre Referenz dienende Rauschhöhe soll 5 % der Bildschirmhöhe nicht überschreiten. Externe Referenzreflektoren werden dabei nicht in die Betrachtung einbe-

⁶ The International Institute Of Welding: The Evaluation Of Ultrasonic Signals. S. 4-11

zogen. Die Höhe der Rauschschwelle ist bei kurzen Entfernungen am größten, durch eine entfernungsabhängige Verstärkungszunahme kann eine gleichmäßige Rauschhöhe erzeugt werden. Alternativ kann der betrachtete Tiefenbereich auch in mehrere Prüfzonen mit dann nahezu konstanter Rauschhöhe unterteilt werden. Die zweite Möglichkeit zur Einstellung der Prüfempfindlichkeit besteht im Vergleich mit Referenzreflektoren (Bauteilrückwand oder Bohrung bzw. Nut in einem Testblock). Als Schwellwert für die Anzeigenbeurteilung dient dann die Anzeighöhe des Referenzreflektors bei einer bestimmten Verstärkung und Entfernung. Entfernungsunterschiede zwischen dem Prüfkopf und dem Referenzreflektor bzw. Fehler müssen berücksichtigt werden, da sie aufgrund der Schallschwächung und Bündelaufweitung die Echohöhen beeinflussen.⁷

Die Verwendung von realen Ungängen, wie z. B. zylindrischen Bohrungen quer zum Schallstrahl oder Flachbodenbohrungen als Kreisscheibenreflektor senkrecht zum Schallstrahl, für die reproduzierbare Einstellung der Empfindlichkeit ergibt zugleich folgende Möglichkeit. Die Echohöhe aufgefundener Fehler kann mit der dieser Referenzreflektoren verglichen und so über die Anzeigenamplitude ein Bezug zur Größe des Referenzreflektors, der dann zum Vergleichsreflektor wird, hergestellt werden. Auf diese Weise kann zwischen registrierpflichtigen (Schwellwert überschritten) und registrierfreien Anzeigen (unterhalb Schwellwert) unterschieden werden.

Die Herstellung realistischer Testkörper ist aufwändig bzw. häufig gar nicht möglich. Man müsste sich mit mechanischen Annäherungen begnügen. Für spezielle Fehlertypen, wie z. B. durch interkristalline Spannungsrisskorrosion entstandene Risse, werden Testkörper mit Nuten verwendet, in der Annahme, dass der Fehlernachweis der Nuten mit denselben physikalischen Wechselwirkungen erfolgt, wie bei der interkristallinen Spannungsrisskorrosion. Künstliche Reflektoren haben eine sehr glatte und gleichmäßige Oberfläche mit optimalen Reflexionsbedingungen. Natürliche Fehler sind im Gegensatz dazu meist rau und uneben. Die einfallende Welle wird daher nicht gleichmäßig zum Prüfkopf zurückgeworfen und Schallanteile gehen verloren (vgl. Bild 2). Außerdem sind natürliche Fehler üblicherweise nicht wie in Bild 2 dargestellt senkrecht zur Ein-

⁷ The International Institute Of Welding: The Evaluation Of Ultrasonic Signals. S. 45-47

schallrichtung orientiert, so dass wegen der i. a. stark ausgeprägten Richtwirkung des Reflektors weitere Schallenergie verloren geht.

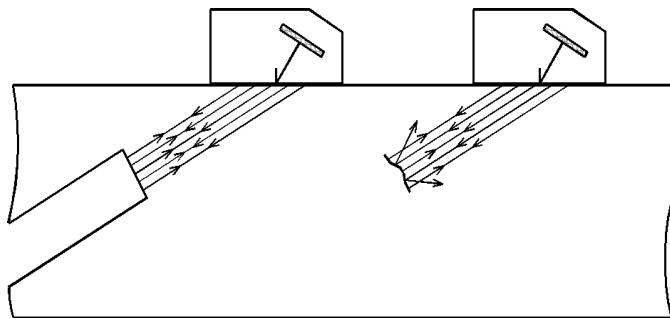


Bild 2: Reflexionsbedingungen am Testreflektor und natürlichem Fehler

Bei der Fehlergrößenbestimmung ermittelt der Prüfer üblicherweise die Größe eines Modellreflektors, welcher unter möglichst gleichen Bedingungen dieselbe Echoamplitude hervorruft. Als Referenzreflektoren werden Flachbodenbohrungen (flat bottom holes, \varnothing 3 mm), Zylinderbohrungen (cylindrical holes, \varnothing 3 mm) und Nuten (notches, i. a. 1-2 mm tief) verwendet. Die ermittelte Fehlergröße entspricht aufgrund der unterschiedlichen Form, Orientierung und Oberflächenbeschaffenheit des natürlichen Fehlers und des Modellreflektors nicht der tatsächlichen Fehlergröße und wird als Ersatzreflektor- bzw. Ersatzfehlergröße bezeichnet. Ein klassisches Hilfsmittel für diesen Vergleich ist das AVG- Diagramm in Bild 3.

Die erste Anwendung des AVG- Diagramms bezog sich auf Schmiedestücke, in denen in den 50er Jahren des vorigen Jahrhunderts wasserstoffbedingte „Fischaugen“ häufige Fehler waren, die der Kreisscheibe gut entsprechen. Das AVG- Diagramm hat den Vorteil, ohne fallspezifische Testkörper auszukommen. Aber alle oben erwähnten Einflüsse auf die Echohöhe gehen auch hier ein. Die Amplitude ist also zur Fehlergrößenbestimmung als einzige Informationsquelle nicht geeignet. Sie stellt aber im Zusammenhang mit anderen Fakten eine der wichtigsten Basisinformationen für eine Fehlerbewertung dar, z. B. dann, wenn bei einer manuellen US- Prüfung die optimierten Anzeigen von Prüfköpfen mit unterschiedlichen Einschallwinkeln und Einschallpositionen vorliegen.

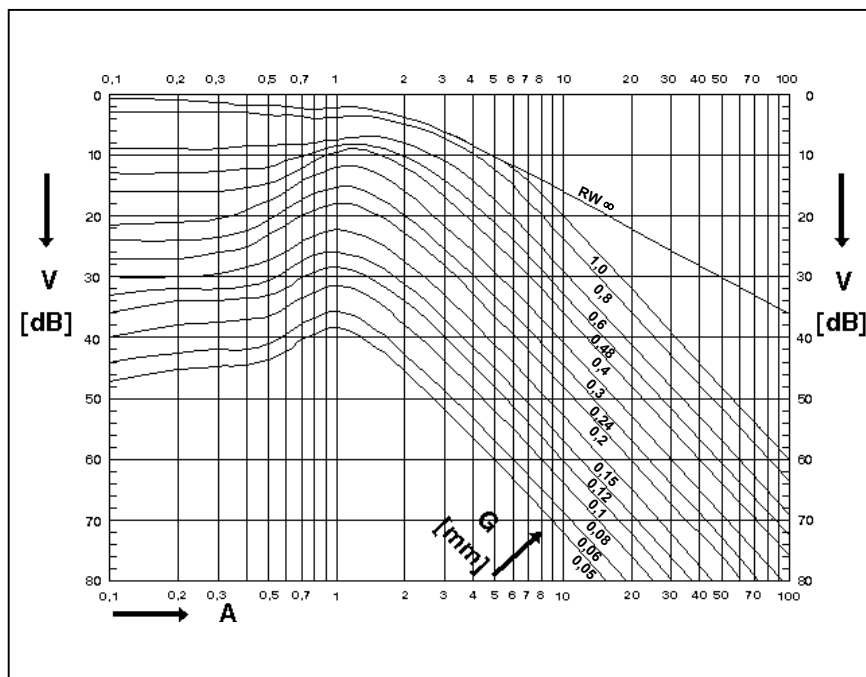


Bild 3: allgemeines AVG- Diagramm zur Fehlergrößenbestimmung (überarbeitet)⁸

A: Abstand, normiert auf die Nahfeldlänge des Prüfkopfes

V: Verstärkungsdifferenz [dB]

G: Ersatzreflektorgröße [mm]

2.3 Laufzeitauswertung (TOFD- Technik)

Die TOFD- Technik (Time of flight diffraction technique) wird im deutschen Sprachgebrauch als Laufzeit- Beugungs- Technik bezeichnet. Aus den gemessenen Anzeigenmustern können Informationen über die Laufzeiten von durch Beugung an Risspitzen entstehenden Echoanzeigen direkt entnommen werden. Die typische Prüfanordnung des TOFD- Verfahrens mit zwei Winkelprüfköpfen für Longitudinalwellen ist in Bild 4 dargestellt.

⁸ Diederichs, Rolf: Nondestructive Testing Encyclopedia. In: <http://www.ndt.net>

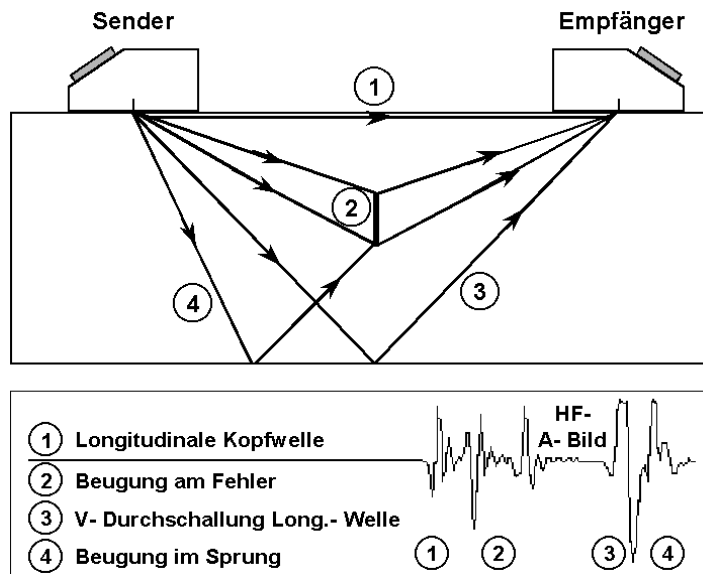


Bild 4: Prinzip der TOFD-Technik

Die Prüfköpfe stehen sich in einem festen Abstand gegenüber und arbeiten in Sende- Empfangs- Technik. Der Prüfkopfabstand ist abhängig von der Wanddicke des Prüfkörpers und wird so gewählt, dass sich die beiden Schallbündelachsen in der Mitte des zu untersuchenden Bereiches schneiden. Der Keilwinkel der Prüfköpfe wird so gewählt, dass der Grenzwinkel für die Totalreflexion der Longitudinalwelle unterschritten wird. Im Gegensatz zu den üblichen Verfahren treten daher im Prüfobjekt beide Wellenarten (die Transversalwelle und die Longitudinalwelle) gemeinsam auf. Allerdings treffen die Anzeigen von Longitudinalwellen wegen der höheren Schallgeschwindigkeit im ersten Teil eines A- Bildes (vgl. Bild 4) ein und werden dort nicht durch Transversalwellen gestört. Dies ermöglicht die leichte Identifikation von fehlerbedingten Beugungsanzeigen in vielen Fällen durch ein typisches Muster im TD- Bild (Time- Displacement- Bild) dieser Technik (s. a. Bild 5). Ausgewertet werden nur von Longitudinalwellen hervorgerufene Anzeigen. Aus diesem Grund sind in Bild 4 nur Laufwege der Longitudinalwelle eingezeichnet.

Vom sendenden Prüfkopf breitet sich eine longitudinale Kopfwelle entlang der Oberfläche des Prüfobjektes auf direktem Weg zum empfangenden Prüfkopf aus (vgl. Echo 1 in Bild 4). Sie erscheint im TD- Bild als Anzeige mit der kürzesten Laufzeit. Eine weitere Echoanzeige entsteht durch die Reflexion der sich in das Material ausbreitenden Longitudinalwelle an der Rückwand (V- Durchschallung, vgl. Echo 3 in Bild 4). Die Laufzeiten dieser beiden Echoanzeigen bleiben bei einer Verschiebung des Prüfkopfespanns konstant und ergeben

zwei parallel liegende Echostreifen (vgl. Echo 1 u. 3 in Bild 5), zwischen denen die Beugungsanzeigen, die bewertet werden können, liegen. Der Bereich dient bei der TOFD- Technik quasi als „Auswertungsfenster“, da alle durch die Beugung der Longitudinalwelle im halben Sprungabstand hervorgerufenen Echoanzeigen innerhalb dieses Bereiches liegen. Die Beugungsanzeigen der Longitudinalwelle im Sprungabstand haben größere Laufzeiten als die V- Durchschallungsanzeige (vgl. z. B. Echo 4 in Bild 4) und erscheinen daher hinter diesem Bereich. Anzeigen von der Transversalwelle liegen aufgrund der kleineren Schallgeschwindigkeit ebenfalls hinter dem Auswertungsfenster und können sicher von den Anzeigen der Longitudinalwelle unterschieden werden. Man versucht bei der TOFD- Technik, aus den Laufzeiten der Echoanzeigen die Tiefenlage des Reflektors zu ermitteln. Können im TD- Bild die Anzeigen vom oberen und unteren Reflektorrand erkannt werden, so kann aus deren Laufzeitunterschied ein Versuch zur Bestimmung der Fehlergröße unternommen werden. Die Bewertung der Ergebnisse der TOFD- Technik beruht wesentlich auf dem Muster nach Art von Bild 5 und der quantitativen Auswertung der Laufzeiten.⁹

Die TOFD- Technik gilt heute bei manchen Einsätzen als schnelles Prüfverfahren. Dieses für die Werbung benutzte Argument ist allerdings mit bedenklichen Folgen für die Nachweissicherheit von Fehlern vor allem in der Nähe der Oberfläche verbunden. Da die Schallbündel der verwendeten Prüfköpfe für eine schnelle Abtastung und Erfassung des gesamten Volumens einen großen Öffnungswinkel haben müssen, ist die Empfindlichkeit in den Randzonen reduziert. Bei der Prüfung von Schweißnähten wird das Prüfkopfgespann parallel zur Naht bewegt, die gemessenen A- Bilder werden aneinandergereiht und ergeben ein C- (TD-) Bild, wie in Bild 5. Die einfache Parallelbewegung gestattet eine schnelle, leicht automatisierbare Prüfung.

⁹ Silk, M.G.; Kear, P. E.: TOFD - The time of Flight Diffraction Technique - Theoretical Aspects and Practical Applications. In: Il Giornale delle Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica, 2/93, S. 28-38

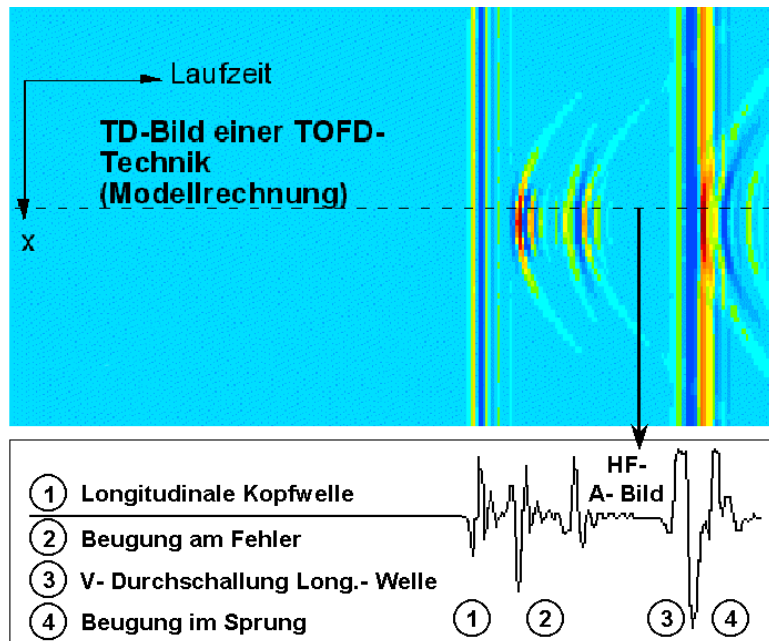


Bild 5: A- und C- (TD-) Bild bei der TOFD- Technik

Während bei der klassischen US- Prüfung i. a. starke Wechselwirkungen, wie die direkte Reflexion einer Welle an der Fehlerfläche, zum Fehlernachweis verwendet werden, bewertet das TOFD- Verfahren hingegen nur schwache Wechselwirkungen, die Beugung an Fehlerrändern. Die auf schwachen Wechselwirkungen basierende Bewertung muss sehr gewissenhaft gegen Irrtümer abgesichert werden.¹⁰ Die in [10] und auch in [11] und [12] vorgetragenen kritischen Betrachtungen zum TOFD- Verfahren zeigen allerdings, dass das Potenzial zur Fehlertiefenbestimmung beim TOFD- Verfahren nur in Fällen mit ungestörten Anzeigen nutzbar ist, was selten zutrifft. Das TOFD- Verfahren ist das erste Ultraschallprüfverfahren gewesen, das die Bewertung nur auf die Interpretation von Mustern abstellt. Für die Fehlerdiagnose war damit ein neuer Weg beschriftet worden.

¹⁰ Tessaro, Ute: Charakterisierung der Ultraschallanzeigen an plattierten Komponenten durch Auswertung von Beugungsmustern. Diplomarbeit, TU Berlin, 04/ 2001, S. 11f

¹¹ Brekow*, G.; Erhard*, A.; Schulz*, E.; Wüstenberg*, H.; Kreier**, P.: Critical Assessment to the TOFD Approach for Ultrasonic Weld Inspection. Kopenhagen: Tagungsband 7th European Conference On Non- Destructive Testing (ECNDT), 26.-29.05.1998, S.1236-1243, *Bundesanstalt für Materialprüfung und -forschung (BAM Berlin), ** Innotest (Schweiz)

¹² Brekow, G.; Erhard, A.; Wüstenberg, H.: TOFD- und Impuls- Echo- Messungen an Rohrschweißnähten. Vortrag DACH- Jahrestagung d. DGZfP, Berichtsband 63, Band 1, Bamberg, 07.-09.09.1998, S. 213-221

2.4 Echodynamikauswertung

Bei der Echodynamikauswertung wird der Echohöhenverlauf entlang der mit dem Prüfkopf abgetasteten Strecke untersucht. Zur Bestimmung der Längenausdehnung eines Reflektors kann man das vom Prüfkopf ausgesendete Schallbündel, gemäß Bild 6, parallel zur Längsachse oder in Fehlertiefenrichtung, wie in Bild 7, entlang des zu untersuchenden Reflektors führen. Die Prüfkopfpositionen, an denen die Echohöhe der Reflektoranzeige auf eine definierte Schwelle abgesunken ist, werden notiert. Aus der Entfernung zwischen diesen beiden Prüfkopfpositionen links und rechts von der maximalen Echoanzeige lässt sich die Reflektorlänge oder Reflektortiefenausdehnung abschätzen.

Das in der DIN EN 1712 erwähnte Verfahren bezieht sich nur auf die Abschätzung der Fehlerlänge, da die Ortsauflösung vom Bündeldurchmesser am Ort des betrachteten Reflektors abhängig ist. Ist der Reflektor in der betrachteten Richtung kleiner als der Bündeldurchmesser, kann die Methode

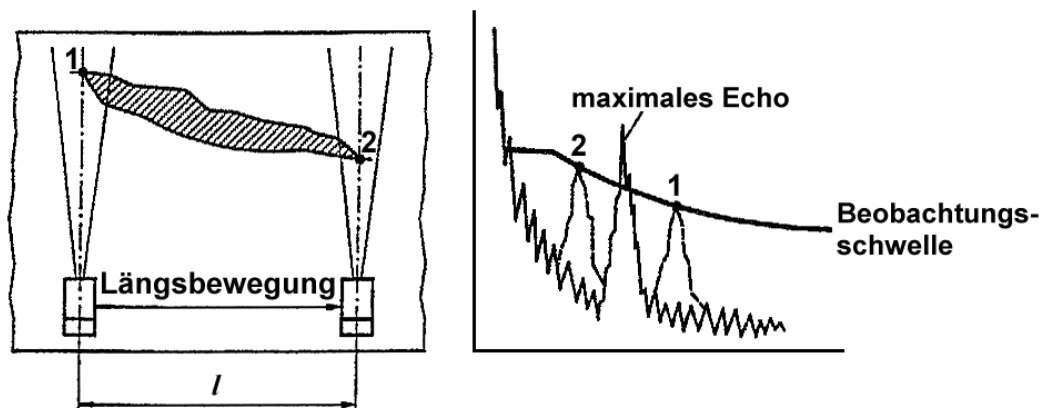


Bild 6: Auswertetechnik mit fester Amplitudenschwelle unter Verwendung der Schallbündelachse¹³

nicht bzw. nur beschränkt angewendet werden. Die zu untersuchenden Reflektoren weisen aber häufig kleine Tiefenausdehnungen auf, größere Abmessungen treten üblicherweise nur in Längsrichtung auf. Daher ist im allgemeinen nur eine sehr unbefriedigende Einschätzung der Tiefenausdehnung, aber eine mittlere bis gute Längeneinschätzung möglich.

¹³ DIN EN 1712: Ultraschallprüfung von Schweißverbindungen - Zulässigkeitsgrenzen. Berlin: Beuth, 1997, S.3 u. 7

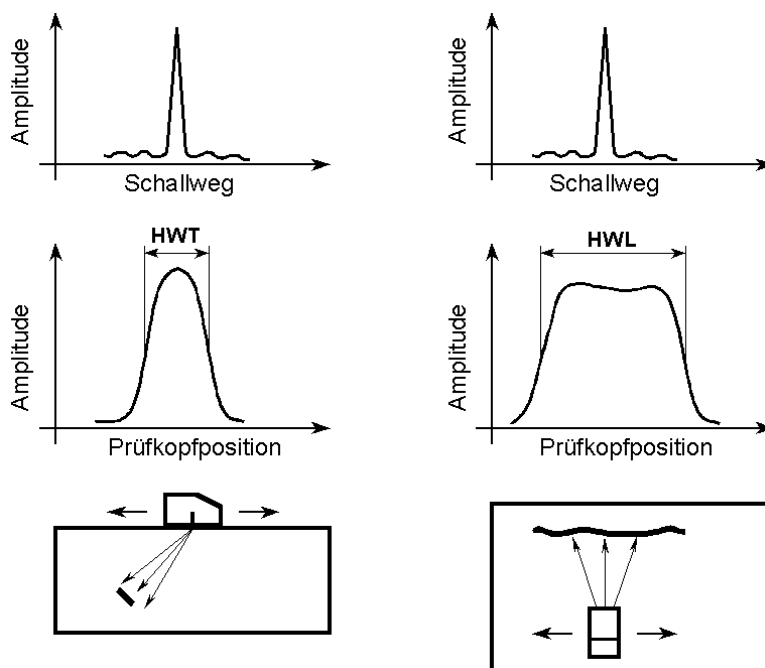


Bild 7: Bestimmung der Halbwertstiefe und -länge von Reflektoren

2.5 Mustervergleich

Die Erfahrungen mit der TOFD- Technik und die prinzipiellen Grenzen der in den Abschnitten 2.1 bis 2.4 dargestellten Methoden führten zunächst in England¹⁴ und dann in der CEN- Normung¹⁵ zur Empfehlung, Muster zur Bewertung heranzuziehen.

2.5.1 Bewertung nach Echodynamikmustern

Je nach Abtastrichtung des Prüfkopfes und der Fehlergeometrie in der betreffenden Achse ergeben sich verschiedene charakteristische A- Bilder und Echodynamikmuster, die in vier Hauptmuster eingeteilt werden können. Die Auswertung der Dynamikmuster in verschiedenen Richtungen kann weitere Hinweise auf die Fehlerart, -lage und -größe ergeben.¹⁶

¹⁴ BS 3923 Part1: Methods for ultrasonic examination of welds. Methods for manual examination of fusion welds in ferritic steels. London: British Standards Institution (BSI), 1986

¹⁵ DIN EN 1713: Ultraschallprüfung - Charakterisierung von Anzeigen in Schweißnähten. Berlin: Beuth, 1998

¹⁶ The International Institute Of Welding: The Evaluation Of Ultrasonic Signals. S. 31

Reflektortypen der vier Hauptmuster für Echodynamiken:

- Muster I. punktartige, nicht auflösbare Reflektoren
- Muster II. ziemlich glatte, ausgedehnte Reflektoren
- Muster III. raue und unregelmäßig ausgedehnte Reflektoren
 - a) etwa senkrecht zur Einschallrichtung
 - b) schräg zur Einschallrichtung
- Muster IV. Gruppe mehrerer kleiner Reflektoren

Eine detaillierte Darstellung dieser Muster und ihrer Probleme ist im Anhang 5.1 zu finden. Die Einführung dieses Musterkataloges sollte erreichen, dass die Anzeigenbewertung je nach vorliegendem Muster gezielt angepasst werden kann. Damit werden die größten Irrtümer bei falscher Anwendung einer Halbwertsausdehnung oder einer AVG- Ersatzfehlergröße reduziert. Die prinzipiellen Grenzen bei der Fehlergrößenbestimmung mit Ultraschall werden damit aber nicht überwunden.

2.5.2 Bildvergleich

Die manuellen Methoden zur Reflektorcharakterisierung, wie die Amplitudenbewertung, die Echodynamikauswertung und die Bewertung von Echodynamikmustern, basieren auf der konventionellen A- Bild- gestützten Fehlersuche mit Ultraschall und den dabei zur Verfügung stehenden Informationen. Dies sind im wesentlichen die Echoamplituden und das Echodynamikverhalten während einer Prüfkopfbewegung. Diese Techniken müssen, unter sorgfältiger Berücksichtigung der physikalischen Prinzipien der Wellenausbreitung und ihrer Wechselwirkung mit dem Fehler, intelligent eingesetzt werden. Sie können zu recht genauen Reflektoreinschätzungen führen. Das International Institute of Welding hat in [17] die unter konservativen Annahmen damit erreichbaren Fehlergrößen in einer Tabelle (vgl. Tabelle 1 unten) angegeben.

Reflektorposition	Dickenrichtung		Längsrichtung	
	kleinste Größe [mm]	Genauigkeit [mm]	kleinste Länge [mm]	Genauigkeit [mm]
nahe der Prüffläche (0-5 mm Tiefe)	3*	± 3	4*	± 4
innenliegend Reflektortiefe [mm]				
5 - 25 mm	3	± 3	4	± 4
25 - 75 mm	3	± 3	7	± 7
75 - 125 mm	5	± 5	10	± 10
nahe der Gegenfläche Wanddicke [mm]				
10 - 25 mm	4	± 4	4	± 4
25 - 75 mm	4	± 4	7	± 7
75 - 125 mm	5	± 5	10	± 10

* mit bearbeiteten Schweißoberflächen, um Störsignale zu beseitigen

Tabelle 1: Typische kleinste Reflektorgößen, die mit manuellen Ultraschallverfahren ermittelt werden können. Außerdem sind typische Messfehlergrößen für Reflektoren, außerhalb dieser beschränkten Größen, aufgelistet.¹⁷

Für kritische Anwendungen wird diese Genauigkeit häufig nicht ausreichen. Als wichtigste Möglichkeit zur Überwindung dieser Grenzen wird der Übergang zu automatischen oder halbautomatischen US- Prüfungen (auch mechanisierte US- Prüfung genannt) gesehen, der durch die gleichzeitige Datenerfassung von Prüfkopfposition und A- Bild in Rechnern die bildliche Darstellung der Prüfergebnisse in unterschiedlichster Form gestattet.^{18 u. 19} In der Literatur werden viele Ansätze für diese Verfahren und Geräte beschrieben. Darin inbegriffen sind die digitale Speicherung und Darstellung von A- Bildern, die Gruppenstrahlerprüfköpfe zur elektronischen Schallfeldbewegung für die Fehlerabtas-

¹⁷ The International Institute Of Welding: The Evaluation Of Ultrasonic Signals. S. 12

¹⁸ Fernández, Francisco; Tanarro, Antonio: Application of automated ultrasonic inspection systems to industrial processes. Kopenhagen: Tagungsband 7th European Conference On Non- Destructive Testing (ECNDT), 26.-29.05.1998, S.452-459

¹⁹ Moreira, Edson V.; Martins de Oliveira, Luiz F.; Pinto Ferreira, Sérgio R.: The State of the Art of Weld Seam Inspection on Pipes by Automated Ultrasonic System Using Special Composite Transducers. Rom: Vortrag, 15th World Conference On Non-Destructive Testing (WCNDT), 15.-21.10.2000

tung (s. a. [20] und [21]) und Rekonstruktionsverfahren wie die synthetische Apertur Fokus Technik (SAFT) und die akustische Holographie. In den folgenden Kapiteln wird darauf näher eingegangen.²²

2.5.3 Digitale Speicherung und Darstellung von A- Bildern

Beim Einsatz automatischer Prüfmethode und Methoden mit einer auf die Datenaufnahme gestützten Datenauswertung (z. B. SAFT) ist die digitale Speicherung von A- Bildern mit den zugehörigen Prüfkopfpositionen erforderlich. Durch die Speicherung der A- Bilddaten und der Parameter, die das Prüfsystem hinreichend beschreiben, wird der Prüfbefund im Rahmen der üblichen Fehlertoleranzen reproduzierbar dokumentiert. Alle im Rahmen dieser Arbeit gespeicherten Daten von Messungen und theoretischen Rechnungen verwenden ein von der Arbeitsgemeinschaft ZEUS²³ erarbeitetes Datenformat. Die Arbeitsgemeinschaft ZEUS bestand aus einigen Industriebetrieben, dem Fraunhofer- Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (Izfp) in Saarbrücken und der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM).

Um eine bestmögliche Vergleichbarkeit mit experimentellen Resultaten zu gewährleisten, werden die Daten von den an der BAM entwickelten Rechenmodellen im gleichen Format gespeichert. Die gespeicherten Dateien enthalten im einfachsten Fall einzelne A- Bilder. Die Echoamplituden werden mit einer Speichertiefe von 8-bit aufgelöst. Zur Unterscheidung unterschiedlicher Echohöhen stehen also 256 Amplitudenwerte zur Verfügung. Gleichgerichtete Signale werden im Bereich von 0 bis 255 aufgetragen. Bei hochfrequenten Signalen wird der Nullpunkt für die Echohöhen auf den Wert 127 verschoben. Die negative Halbwelle wird im Bereich von 0 bis 127, die positive Halbwelle im Bereich von

²⁰ Döring, J.; Erhard, A.; Möhrle, W.; Schenk, G.: Gerät zur Linearabtastung mit Strahlerprüfköpfen (Real- Time- Scanner- Gerät). Vortrag DACH- Jahrestagung d. DGZfP, Berichtsband 52.2, Lindau, 13.-15.05.1996, S. 541-548

²¹ Erhard, A.; Möhrle, W.; Montag, H.-J.; Schenk, G.: Schweißnahtprüfung mit Real- Time- Scanner- Prüfköpfen. Vortrag DACH- Jahrestagung d. DGZfP, Berichtsband 59.1, Dresden, 05.-07.05.1997, S. 103-111

²² The International Institute Of Welding: The Evaluation Of Ultrasonic Signals. S. 43

²³ Montag, H.-J.: Datenstrukturen für die automatisierte Prüfung. Vortrag im Seminar "Automatisierung der Ultraschallprüfung, Gerätetechnik und Regeln zur Anwendung und Auswertung", Berichtsband 62 der DGZfP, Saarbrücken, 17.-18.11 1997, S. 129-138

128 bis 255 dargestellt. Die Schallwegpositionen innerhalb der betrachteten Blende können mit 256 bzw. 512 Pixeln aufgelöst werden. Bei der Abtastung einer oder mehrerer Prüfspuren (z. B. bei mäanderförmiger Abtastung) werden die A- Bilder (vgl. Bild 8) von allen Prüfkopfpositionen in der Messdatei gespeichert. Für jede Prüfspur ergibt die Aneinanderreihung der A- Bilder ein TD- Bild (Time- Displacement- Bild, vgl. Bild 9). Alle erzeugten Mess- und Rechen- daten können mit den von HANS- JOACHIM MONTAG an der BAM entwickelten Pro- grammen WINBILD.EXE^{©24} und WINABILD.EXE^{©24} ausgewertet und miteinan- der verglichen werden.

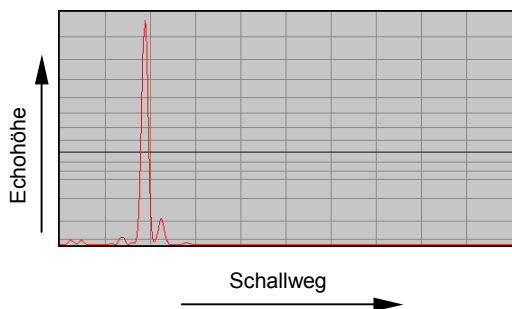


Bild 8: A- Bilddarstellung

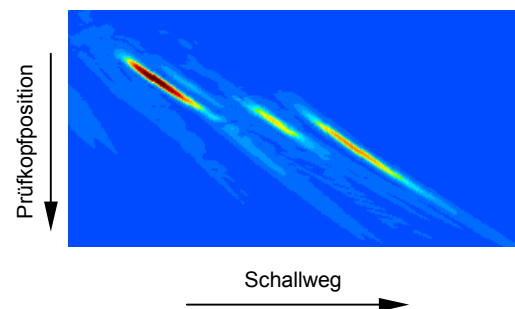


Bild 9: TD- Bilddarstellung

Die Bilddarstellung ist zwar eine wesentliche Voraussetzung für eine verbesserte Fehlerdiagnose, aber die damit eröffneten Chancen werden durch die gleichen physikalischen und technischen Grenzen eingeengt wie die unter 2.1 bis 2.5 dargestellten Ansätze. Die Bilddarstellung muss zwei Gruppen von Verfahren unterscheiden:

1. Man versucht mit mathematisch- physikalisch begründeten Rekonstruktionsstrategien aus dem Datensatz einer mechanisierten US- Prüfung ein Fehlerbild zu „rekonstruieren“ (Invertierung des Prozesses der Entstehung des Prüfbefundes). Darauf wird in Abschnitt 2.6 eingegangen.
2. Aus dem Datensatz wird ohne mathematisch- physikalischen Hintergrund rein ingenieurmäßig ein B- (TD-) oder C- (TD-) Bild mit deutbarer Kontext- Information, aber ohne erhöhte Fehlerauflösung entwickelt. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird gezeigt werden, dass derartige Bilder für eine iterative, modellgestützte Bewertung eine ausgezeichnete Ausgangsbasis sein können.

²⁴ Copyright: Hans-Joachim Montag, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Labor VIII.41 (Ultraschallverfahren), Unter den Eichen 87, 12200 Berlin

2.6 Rekonstruktionsverfahren

2.6.1 Synthetische Apertur Fokus Technik (SAFT)

Ein relativ aufwändiges Verfahren mit einer zweidimensionalen mechanischen Abtastung des Prüfkörpers und einer dreidimensionalen (perspektivischen) Darstellung, ist die Synthetische Apertur Fokus Technik (SAFT- UT, Synthetic Apertura Focusing Technique for Ultrasonic Testing). Die Rekonstruktionsalgorithmen des SAFT- Verfahrens wie auch der akustischen Holographie setzen voraus, dass der Fehler sich wie ein Streukörper der physikalischen Optik oder wie ein Bornscher Streuer verhält. Physikalische Optik heißt, dass die Oberflächengeometrie des Streuers weitgehend konvex ist (ungerichtete Streuung) und er einen Reflexionsfaktor gleich eins für Schallwellen darstellt.^{25 u. 26} Dies ist eine Einschränkung, welche die gleiche Qualität hat, wie die Forderung nach richtungsunabhängigen Wechselwirkungen bei der Echotomographie (siehe Abschnitt 2.6.3). Das Prüfobjekt wird mit einem Prüfkopf mit weit geöffneten Schallbündel zweidimensional (mäanderförmig) abgetastet. Dabei muss das Signal in seiner hochfrequenten Form gespeichert werden, da für die Auswertung auch die Phaseninformation benötigt wird. Die empfangenen Signale werden digitalisiert und zusammen mit den Manipulatorpositionen (Prüfkopfpositionen) auf einem PC gespeichert. Die gespeicherten Informationen können vor Ort oder zu einem späteren Zeitpunkt folgendermaßen ausgewertet werden:

Der Prüfkörper wird von einem Rechner in kleine würfelförmige Elemente $V(i, j)$ unterteilt. In Bild 10 ist das Prinzip des SAFT- UT anhand einer Messspur dargestellt. Die anderen Messspuren liegen in der Darstellungsebene. Jedes Volumenelement wird nun nacheinander als Reflektorort betrachtet. Für jede Prüfkopfposition x_i innerhalb der Apertur wird dem betrachteten Volumenelement der relevante Echoanteil H_{xi} aus dem dazugehörigen A- Bild amplituden- und phasenrichtig zugeordnet. Dies ist die Echoinformation im Schall-

²⁵ Langenberg*, K. J.; Schmitz**, V.: Ultraschall- Rekonstruktionsverfahren mit synthetischer Apertur (Thesenpapier). Kassel: *Fachgebiet Theoretische Elektrotechnik d. Universität GH Kassel, **Fraunhofer- Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren Saarbrücken, 1985

²⁶ Langenberg, K. J.: Applied Inverse Problems For Acoustic, Electromagnetic And Elastic Wave Scattering. In: Basic Methods Of Tomography And Inverse Problems, Malvern Physics Series, 1987, ISBN 0-85274-281-1, S. 127-469

weg s_i , der dem Abstand zwischen dem Prüfkopf und dem Volumenelement entspricht.

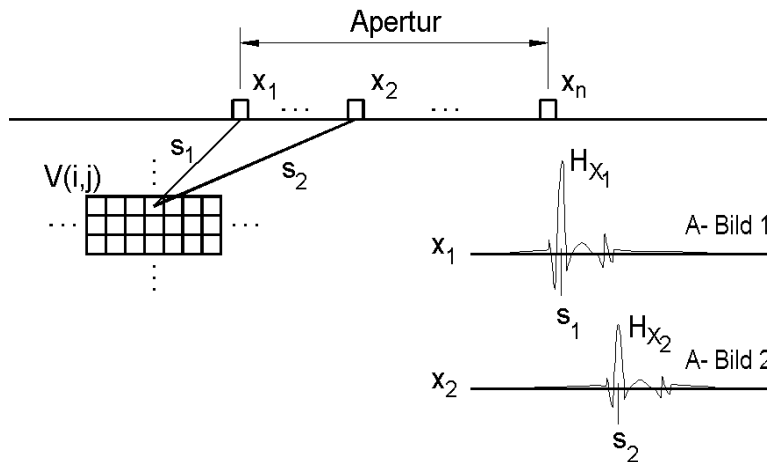


Bild 10: Prinzip des SAFT- UT

Die Signalanteile von verschiedenen Positionen, welche zu dem selben Volumenelement gehören, werden in Abhängigkeit von ihrer Phaseninformation miteinander konstruktiv oder destruktiv überlagert. Auf diese Weise erhält man nur für tatsächliche Reflektororte durch eine konstruktive Interferenz große Echoamplituden, für Orte ohne Reflektoren dagegen eine Auslöschung durch destruktive Interferenz. Der schließlich für jedes Volumenelement ermittelte Amplitudenwert wird durch den Rechner in geeigneter Weise dreidimensional abgespeichert und aufbereitet. Der formale Zusammenhang zwischen den phasenrichtig betrachteten Amplitudenwerten H_{X_i} in den A- Bildern und dem Amplitudenwert $H_{V(i,j)}$ eines Volumenelementes ist in Gleichung 1 beschrieben.

$$H_{V(i,j)} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n H_{X_i}$$

Gleichung 1: Berechnung der Amplitudenwerte beim SAFT- UT

m : Anzahl der Messspuren

$H_{(X_i)}$: Amplitudenwert einer Prüfkopfposition

n : Anzahl der Prüfkopfpositionen

$H_{V(i,j)}$: Amplitudenwert eines Volumenelementes

j : Laufzahl für die Messspuren

i : Laufzahl für die Prüfkopfpositionen

Der Abtast- und Rechenvorgang simuliert bei konstruktiver Interferenz einen Ultraschallwandler, dessen Größe der abgetasteten Fläche entsprechen würde, mit einer für die Reflektortiefenlage geeigneten fokussierenden Linse. Die Wandlerapertur und die Linse werden also durch den Abtastvorgang synthetisiert, daher die Bezeichnung „Synthetic Aperture Focusing Technique“. Das

Auflösungsvermögen entspricht der verwendeten Ultraschall- Wellenlänge, der Entfernung und der Apertur. Durch die Signalmittelung werden hohe Signal-Rausch- Abstände ermöglicht. Dies wird ein wenig dadurch eingeschränkt, dass für die Datenaufnahme ein kleiner Prüfkopf mit großer Divergenz benötigt wird, der auch viele Struktursignale aufnimmt, welche die Rekonstruktion stören können. Der Nachteil liegt in dem für die aufwändige Rekonstruktion erforderlichen Zeitraum, so dass derzeit keine Echtzeitdarstellung möglich ist. Es wird jedoch versucht, das SAFT- UT zu einem Echtzeit- Verfahren zu entwickeln.²⁷ Der große Zeitbedarf des rechenintensiven Auswerteverfahrens wird durch die wachsenden Prozessortakraten der heutigen Computer und besserer Auswertungsalgorithmen immer weiter kompensiert.

2.6.2 Akustische Holographie

Die akustische Holographie hat heute kaum noch große Bedeutung, da durch die moderne Computertechnik die SAFT- Rekonstruktion in allen Einsatzbereichen gleichwertig und sogar überlegen ist. Bei der akustischen Holographie kann die Bestrahlung des Objektes mit den üblichen Ultraschallsendern erfolgen. Die Referenzwelle kann durch einen mit dem Sendeimpuls konphasen, elektronischen Referenztakt ersetzt werden. Das Hologramm kann elektronisch gespeichert werden. Eine typische Anordnung für dieses Verfahren ist in Bild 11 dargestellt. Der Ultraschallsender S wird mit einem Sinussignal gespeist und beleuchtet das Objekt monochromatisch.

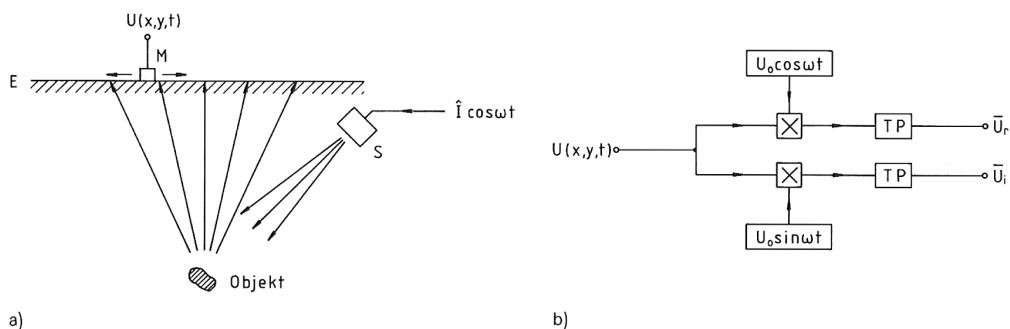


Bild 11: Akustische Holographie, a) Abtastung des Schallfeldes auf der Messebene E mit einem Mikrophon M , b) Gewinnung der Hologrammfunktion

²⁷ Krautkrämer, Josef u. Herbert: Werkstoffprüfung mit Ultraschall. S. 274-275

Die resultierende Schalldruckverteilung in der Messebene E wird mit einem Mikrophon M aufgenommen, das den Untersuchungsbereich zeilenweise abtastet. Das Hologramm entsteht durch Demodulation der Mikrofonspannung. Seine Ausgangsspannung $U(x, y, t)$ wird gemäß Bild 11b mit zwei vom Signalgenerator abgeleiteten Referenzspannungen $U_0 \cdot \cos(\omega t)$ und $U_0 \cdot \sin(\omega t)$ multipliziert. Die Produkte werden zeitlich gemittelt und mit den Tiefpässen TP gefiltert. Als Ergebnis erhält man den Real- und Imaginärteil der komplexen Hologrammfunktion \bar{U}_r und \bar{U}_i . Die Hologrammfunktion und jeder ihrer Anteile enthält die für eine Rekonstruktion notwendigen Amplituden- und Phaseninformationen, der vom Objekt ausgehenden Streuwelle.²⁸

2.6.3 Ultraschalltomographie versus Röntgentomographie

Das Ziel von rechnergestützten Tomographieverfahren (Computer-tomographie, CT) ist die Erzeugung zweidimensionaler Schnitte bzw. dreidimensionaler Bilder vom untersuchten Objekt. Der Erfolg der CT mit Röntgenstrahlen führte zu weiteren Anwendungen des in Bild 12 dargestellten Grundprinzips auf andere physikalische Wechselwirkungen mit den abzubildenden Objekten wie Kernresonanz und Ultraschall.

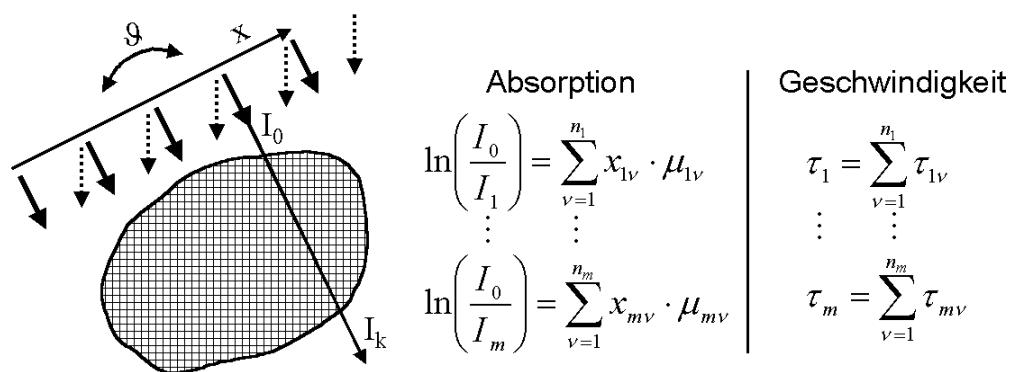


Bild 12: Prinzip der Computertomographie zur Bestimmung der Absorptions- bzw. Geschwindigkeitsverteilung in einem Objekt²⁹

²⁸ Kuttruff, Heinrich: Physik und Technik des Ultraschalls. Stuttgart, S. Hirzel Verlag, 1988, S. 311-320

²⁹ Mundry, E.; Wüstenberg, H.: Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung. Unveröffentlichtes Vorlesungsskript, TU Berlin, 1995 / 96

Die Voraussetzung zur Bestimmung der Objekteigenschaften aus den Messdaten, gemäß der Formeln in Bild 13, ist die Radon- Transformation als Rekonstruktionsprinzip mit zahlreichen Modifikationen. Sie kann z. B. über FOURIER- Transformationen, als gefilterte Rückprojektion, als algebraische Rekonstruktion oder als Matrixinversion ausgeführt werden.³⁰ Das Rekonstruktionsprinzip wurde auf den Ultraschallbereich in verschiedenen Modifikationen, insbesondere der Echotomographie (ET), z. B. von HILLER³¹ und KLANKE³² übertragen.

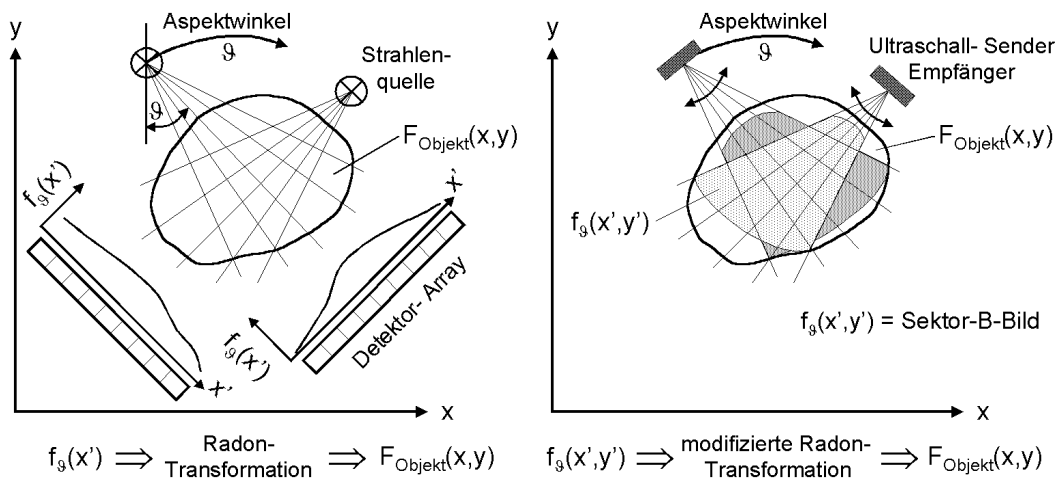


Bild 13: links: Röntgen- CT mit Detektor- Array; rechts: Echotomographie mit Sektor- B- Bild

Was sind die Voraussetzungen für dieses Verfahren?

1. viele Aspektwinkel, 360°- Zugänglichkeit
2. Unabhängigkeit der Wechselwirkungen zwischen Strahlung bzw. Welle und Objektpixel von der Einfallsrichtung
3. konstante Ausbreitungsbedingungen (geradlinige Ausbreitung paralleler Strahlen mit konstanter Geschwindigkeit) insbesondere für Wellen und Strahlen im Medium
4. Abtasttheorem (Einfluss der Punktdichte innerhalb der Apertur)

Die Erfüllung der aufgeführten Voraussetzungen unterliegt beim Röntgen- und Ultraschallverfahren unterschiedlichen Einschränkungen. Eine beschränkte Zu-

³⁰ Gomm, T. J.; Mauser, J.A.: State of the Technology: Ultrasonic Tomography. In Materials Evaluation 7 (1999), S. 748

³¹ Hiller, D: Ultraschall- Abbildung mittels rückgestreuter Signale nach einem verallgemeinerten Computertomographie- Konzept. Diss., TU Erlangen, 1984

³² Klanke, Heinz- Peter: Beitrag der Ultraschall- Echotomographie zur Qualitätssicherung schwerer Schmiedeteile. Diss., TU Berlin, D83, 1992

gänglichkeit ($< 360^\circ$) bedingt einen Informationsverlust und die Rekonstruktionsaufgabe wandelt sich in ein sogenanntes unterbestimmtes bzw. schlecht gestelltes Problem. TILLACK hat diese Problemstellung bezogen auf die Röntgen-CT untersucht. Man versucht, den Informationsverlust durch die Einführung von a priori Wissen zu kompensieren. Beim sogenannten Regularisierungsverfahren (TICHONOV- Regularisierung) wird empirisches, bei den BAYESSCHEN Verfahren statistisches a priori Wissen zu den unvollständigen Daten hinzugefügt. Dadurch kann das schlecht gestellte in ein gut gestelltes Problem überführt werden und die Rekonstruktion erfolgen.³³ Die zweite und dritte Voraussetzung spielt auf die Radiographie bezogen keine Rolle. Durch eine in der Apertur genügend groß gewählte Punktdichte lässt sich der in der vierten Voraussetzung genannter Einfluss für beide Verfahrensarten minimieren.

Im Vergleich dazu ergeben sich beim Ultraschallverfahren für die ersten drei Voraussetzungen erhebliche Einschränkungen. Eine Datenergänzung bei beschränkter Zugänglichkeit wie bei der Röntgen-CT ist nicht möglich, da hierfür die zweite und dritte Voraussetzung erfüllt sein muss. Zum einen unterliegen die Wechselwirkungen beim Ultraschallverfahren aber einer starken Abhängigkeit von der Einfallsrichtung, zum anderen sind die Ausbreitungsbedingungen der Schallwellen oft richtungsabhängig und daher nicht konstant. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit kann zudem ortsabhängig sein. Infolgedessen durchqueren die Schallstrahlen das Objekt nicht geradlinig, sondern auf gekrümmten Bahnen. Das Rekonstruktionsergebnis wird dadurch unter Umständen erheblich verfälscht.³⁴ Die Vielzahl der sich ergebenden Einschränkungen gilt für alle Rekonstruktionsverfahren mit Ultraschall (z. B. SAFT, ET, Holographie). Auch die theoretisch am besten begründeten Verfahren eröffnen keine allgemein anwendbare Strategie für die Rekonstruktion. Auf diesen Sachverhalt wiesen bereits LANGENBERG, SCHMITZ und WÜSTENBERG in [25] und [35] hin. Daraus

³³ Tillack, Gerd- Rüdiger: Simulation und Rekonstruktion für strahlendiagnostische Verfahren, Habilitationsschrift, TU Dresden, 2001

³⁴ Kuttruff, Heinrich: Physik und Technik des Ultraschalls. S. 326-327

³⁵ Langenberg*, K. J.; Schmitz**, V.; Wüstenberg***, H.: Darstellungsformen für die Ergebnisse von automatisierten Ultraschallprüfungen - Algorithmen für die Bildgewinnung. Vortrag im Seminar „Automatisierung in der Ultraschallprüfung“, Berichtsband 17 der DGZfP, Berlin, 1988, S. 89-99: *Fachgebiet Theoretische Elektrotechnik d. Universität GH Kassel,

ergibt sich als Konsequenz, die von TILLACK beim Röntgenverfahren aufgezeigten Möglichkeiten mit zusätzlichen a priori Informationen zu verwenden, z. B. über die Fehlerart aus der Herstellung und über die möglichen Orientierungen und Lagen in Zusammenhang mit Hinweisen aus Prüfergebnissen. Die rein mathematisch- statistische Einführung von a priori Wissen wie bei der Röntgen- CT in [33] muss aber beim Ultraschall, wegen der stark abweichenden Voraussetzungen, durch andere Wege ersetzt werden. Der inverse Vorgang, aus den Prüfdaten mathematisch begründet auf den wahren Reflektor zu schließen, ist bei Ultraschall stark begrenzt und muss durch eine interaktive Modellierung ersetzt werden. Ein Modell, eine heuristische Mischung von a priori Wissen und Informationen aus Messungen, soll die Einführung des a priori Wissens ohne Inversion ermöglichen. Hier besteht die Chance a priori Wissen aus der Herstellung der Komponente mit ersten Einschätzungen aus den Prüfergebnissen in ein Ausgangsfehlermodell zusammenzuführen, das durch geeignete Strategien (z. B. iterative Modellierung, Evolutionsstrategien) an das wahre Fehlerbild angepasst werden kann (s. a. Bild 14). Dazu sind erforderlich:

- a) Modelle, die ausreichend wirklichkeitstreu (validiert) sind
- b) eine Vergleichsmöglichkeit von komplex dargestellten Prüfergebnissen und Befunden von Modellrechnungen in bildlicher Form

Beide Voraussetzungen sind die beiden notwendigen Seiten einer Fehlerdiagnose durch iterative Modellierung und werden nachfolgend beschrieben.

2.7 Zwischenbewertung

Mit den bisherigen Darstellungen wurden die Möglichkeiten und Grenzen verschiedener Bewerte- und Auswerteverfahren für Ultraschallsignale erläutert. Je nach Prüfsituation werden die Voraussetzungen einer Methode besser erfüllt, als die der anderen. Die Verfahren bieten keine einheitliche Lösung, sondern erfordern immer eine fallweise Betrachtung der Situation. Da aber grundsätzlich alle am Fehler für den Nachweis verwendbaren Wechselwirkungen mit den Ult-

raschallwellen (Reflexion, Beugung, Wellenumwandlung) stark von der Auftreffrichtung und der Fehlergeometrie abhängen, kann eine eindeutige Aussage zu Fehlereigenschaften und Fehlergröße daher nur unter Hinzuziehung weiterer a priori Informationen erreicht werden. Da es für die Ultraschallprüfung nur schwer möglich ist, die Verwendung von a priori Informationen beim Prozess der Fehlerbewertung ähnlich systematisch und mathematisch begründet einzubringen, wie es in [33] von TILLACK für die Computertomographie mit Röntgenstrahlen gezeigt wird, soll in dieser Arbeit gezeigt werden, wie mit Hilfe der iterativen Modellierung die gezielte Benutzung zusätzlicher Informationen ermöglicht werden kann.

Heute stehen schnell ablaufende Rechenmodelle für die US- Prüfung mit unterschiedlicher Leistung und Qualität zur Verfügung, mit denen ein neuer Ansatz in Richtung Expertensysteme sinnvoll erscheint. Diese Modelle basieren einerseits auf Methoden, bei denen das Volumen räumlich und zeitlich diskretisiert wird, wie z. B. bei der Methode der finiten Elemente (FEM). Darauf basierende numerische Methoden der Modellierung (EFIT und ähnliche Verfahren) wurden von MARKLEIN ausführlich untersucht.³⁶ Diese numerischen Methoden gelten heute als die exaktesten Modellierungen in der Ultraschallprüfung. Die Finiten- Element- Methoden beschreiben die physikalischen Wechselwirkungen zwischen den Volumenelementen direkt und können sogar numerische Lösungen bereitstellen, wenn analytische Lösungen nicht bekannt sind.³⁷ Ihre Anwendung ist jedoch z. Zt. auf räumlich eng begrenzte Probleme beschränkt, da für große Volumina die Rechenzeiten zu stark anwachsen und eine iterative Modellierung damit nicht sinnvoll ist. Dieser Zeitbedarf kann verringert werden, wenn nur kleine Volumina (z. B. unmittelbare Fehler- und Prüfkopfumgebung) berechnet werden. Die langen Schallwege dazwischen können mit allgemeinen Vorstellungen über die Schallfeldform, -ausbreitung und -schwächung beschrieben werden. Beim Übergang von der finiten Modellierung auf die allgemeine Beschreibung sind dann aber häufig komplizierte Randwertprobleme zu

³⁶ Marklein, René: Numerische Verfahren zur Modellierung von akustischen, elektromagnetischen, elastischen und piezoelektrischen Wellenausbreitungsproblemen im Zeitbereich basierend auf der Finiten Integrationstechnik. Diss., Universität Gesamthochschule Kassel, 1997

³⁷ Schumm, Andreas: Using CAD representations in transient soundfield calculations through curved surfaces. Diss., TU Berlin, D83, 05/1998

lösen. Zur Zeit gibt es zu diesem Ansatz aber noch keine handhabbaren Programme.

Da für die Vermittlung zwischen Prüfkopf- und Fehlerumgebung dann sowieso die Prinzipien der Strahlverfolgungsmodelle (Ray- Tracing- Modelle) verwendet werden müssen, liegt es nahe, verbesserte Formen dieser Ray- Tracing- Ansätze für eine iterative Modellierung heranzuziehen. Dazu gibt es vor allem in Frankreich eine Reihe von weit entwickelten Programmpaketen („MEPHISTO“, „CHAMP-SONS“³⁸ etc.), die aber stark auf spezielle Probleme der US- Prüfung an Nuklearkomponenten zugeschnitten sind und für die Aufgabe der iterativen Modellierung wenig geeignet sind. SCHUMM beschreibt in [37] die Wellenausbreitung an gekrümmten Oberflächen mit einem Strahlverfolgungsmodell. Zur Berücksichtigung der Transmission und Reflexion an Grenzflächen wird bei der Schallfeldberechnung nach dem HUYGENSSCHEN Prinzip der Beitrag einzelner Kugelstrahlen auf der Schwingerfläche durch Strahlverfolgung nach dem FERMATSCHEN Prinzip und der Verwendung der Durchlass- bzw. Reflexionsfaktoren für ebene Wellenbündel aufsummiert. LANGENBERG hat den Streuvorgang von ebenen Druck- bzw. Scherwellen an Fehlern unter anderem mit der Näherungsmethode der physikalischen Elastodynamik beschrieben.³⁹ In diesem Ansatz wird angenommen, dass die Teilchenverschiebung auf der Oberfläche eines spannungsfreien Streukörpers (Risses) den „Amplituden“ der auf dieser Oberfläche gedachten Punktquellen entspricht. Bei den Berechnungen werden die Punktrichtwirkung der Punktquellen und die Reflexions- und Modekonversionsfaktoren berücksichtigt. Die Punktrichtwirkungen der physikalischen Elastodynamik entsprechen dabei jedoch nicht den nach MILLER- PURSEY bekannten Punktrichtwirkungen. Der in der vorliegenden Arbeit verfolgte iterative Modellansatz mit einem schnellen semi- analytischen Modell, dessen Grundlagen und Funktionsweise nachfolgend erörtert werden, verwendet eine Beschreibung des Streuvorganges, die auf LANGENBERGS Beitrag in [39] zurückgeht.

³⁸ Lasserre*, F.; Mathonnet*, H.; Lecoeur- Taïbi**, I.; Lhémy**, A.: Application des logiciels de modélisation MEPHISTO et CHAMP-SONS au contrôle des cuves des réacteurs à eau sous pression. Vortrag Congress on Nondestructive Testing (COFREND), Nantes, 22.-26.9.1997, *Intercontrôle, Rungis, Frankreich, **CEA CEREM, Saclay, Frankreich

³⁹ Langenberg, K. J., u.a.: Physikalische Elastodynamik statt Punktquellensynthese. Kassel: Interner Bericht des Fachgebiets Theoretische Elektrotechnik d. Universität GH Kassel, 1987, S. 2

Um aus den unvollständigen Datensätzen eine genaue Vorstellung über den vorliegenden Fehler abzuleiten, bestehen zwei Möglichkeiten. Eine mathematisch gestützte Einführung von a priori Wissen nach [33] ist für die Ultraschallprüfung ungeeignet. Die hier vorgeschlagene Variante besteht in der Erstellung von Hypothesen über die Fehlersituation im Objekt aus a priori Kenntnissen und deren Verifikation durch Modellrechnungen. Diese iterative Modellierung erlaubt situationsbedingt eine Bewertung nach den in 2.2-2.6 dargestellten Bewertungsprinzipien. Je nachdem welche Kriterien aussagekräftig sind, kann eine Amplituden-, Laufzeit-, Echodynamik- oder Musterbewertung erfolgen, wobei die vergleichende Modellrechnung aus den angestellten Vermutungen gesicherte Aussagen machen kann.

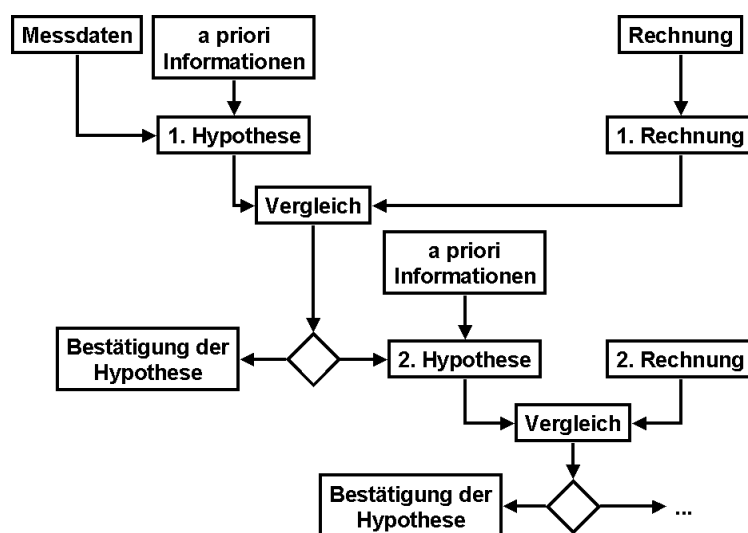


Bild 14: Arbeitsprinzip der iterativen Modellierung

Das Arbeitsprinzip dieser Methode ist in Bild 14 schematisch dargestellt. Die Messdaten führen zusammen mit a priori Informationen zu einer ersten Fehlerhypothese. Durch den Vergleich mit der ihr entsprechenden Modellrechnung kann sie bestätigt oder verworfen werden. Im zweiten Fall muss mit weiteren a priori Informationen eine zweite Hypothese aufgestellt werden, die mit einer zweiten Rechnung verifiziert werden soll. Dieses Verfahren wird so lange angewendet, bis eine aufgestellte Hypothese bestätigt werden kann. Für die Umsetzung dieses Arbeitsprinzips werden zwei verschiedene Ansätze gemacht. Die Fehlerhypothesen können zum einen manuell von einem Experten aufgestellt und überprüft werden. Zum anderen wird eine Systematisierung des iterativen Vorgehens auf Basis von Evolutionsstrategien vorgeschlagen. Die Komplexität des Problems stellt jedoch hohe Ansprüche an die Auswertung, die mit

einem quasi automatischen Verfahren, wie der Evolutionsstrategie, nur schwer erfüllt werden können. Auf diesen Umstand wird im Anschluss an die Modellbeschreibung genauer eingegangen.

2.8 Das schnelle, halbanalytische Modell der BAM (FSAM = Fast- Semi- Analytical- Model)

2.8.1 Grundlagen der Wellenausbreitung und -beugung

Die wellenphysikalischen Grundlagen der verwendeten Modelltechnik werden in Anhang 5.2 näher erläutert. Obwohl das darauf aufbauende Modell auf die Beschreibung einer skalaren Wellenausbreitung in einem homogenen, isotropen Medium zurückgeführt wird, werden die Grundsätze der Wellenausbreitung und Wechselwirkungen in elastischen Medien ersatzweise durch Punkttrichtwirkungen an Prüfkopf und Fehler, sowie durch Reflexionsfaktoren und wo erforderlich auch durch die getrennte Behandlung einzelner Polarisations Ebenen für die einzelnen Wellenarten beachtet. Das Schallfeld wird auf Basis des FRESNEL-HUYGENSSCHEN- Prinzips beschrieben. Die FRESNEL- KIRCHHOFFSCHEN- und die RAYLEIGH- SOMMERFELDSCHEN- Integralsätze werden im Anhang 5.2 dargestellt. Mit den beiden Integraltheorien kann die Erregung eines Fehlers $\Phi_{Fehler}(r, \omega)$ innerhalb eines geschlossenen Volumens V als Funktion der Erregung $\Phi_{Strahler}(r, \omega)$ auf dessen Oberfläche S beschrieben werden (vgl. Bild 15).

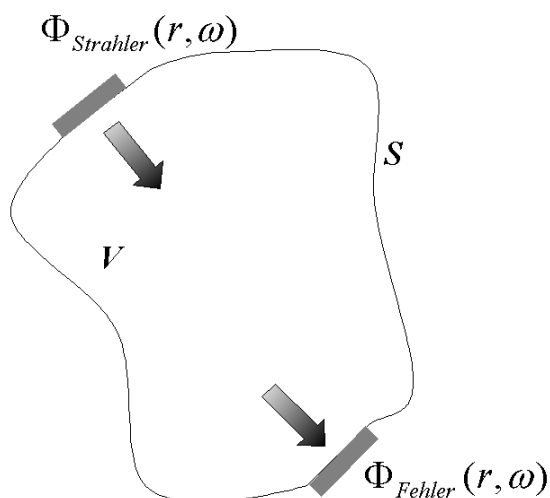


Bild 15: Beschreibung der von einer skalaren Welle in einem Volumen hervorgerufenen Erregung

Wenn man die FRESNEL- KIRCHHOFFSCHE- Beugungstheorie auf elastische Medien anwendet, gelten erhebliche Einschränkungen. Die Güte einer elastodynamischen Beugungstheorie nach KIRCHHOFF wurde bereits von CHAPMAN zwischen 1980 und 1990 an einem Vergleich mit der exakten Methode (COD, dynamic crack opening displacement) untersucht.⁴⁰ Danach kann die Ultraschallbeugung an glatten und ebenen Rissen mit der KIRCHHOFFSCHEN Beugungstheorie ausreichend gut beschrieben werden, wenn die Beobachtungsrichtung nah an der gespiegelten Einfallrichtung liegt (Prinzip: Einfallswinkel = Ausfallswinkel; Wellenreflexion). Mit der KIRCHHOFFSCHEN Näherungsmethode können die Hauptkeule und allenfalls die erste Seitenkeule des gebeugten Schallfeldes gut beschrieben werden. Die Theorie kann außerdem in Richtungen mit starker Modenkonversion eingesetzt werden. Weicht die Beobachtungsrichtung stärker von der gespiegelten Einfallrichtung ab, wird die Beugung an den Reflektorrändern bedeutend, die im KIRCHHOFFSCHEN Ansatz unterbetont ist. Es kommt hinzu, dass die KIRCHHOFFSCHE Näherungsmethode für skalare Wellenausbreitung die komplexen Vorgänge an den Rissspitzen in elastischen Medien (z. B. mit Beteiligung von RAYLEIGH- Wellen auf den Rissflächen) nicht erfasst. Das gebeugte Schallfeld kann in diesem Fall besser mit der geometrischen Beugungstheorie (GTD, geometrical theory of diffraction) beschrieben werden.

Die Schwäche der KIRCHHOFFSCHEN Beugung bei der Einschätzung von Rissspitzenanzeigen wird durch die Einführung der elastodynamischen Punktrichtwirkung nur geringfügig verbessert. Wenn sie dennoch bei dem verwendeten Modell durchgängig benutzt wird, dann vor allem wegen der schnellen Berechnung auch unter Beachtung von Wellenumwandlungseffekten und dem Umstand, dass in den meisten Fällen die Amplituden von Rissspitzen damit um maximal 6 dB falsch eingeschätzt werden, was bei den in realen Fällen stark schwankenden Erscheinungsbildern von Rissspitzen (sie können sein: zerklüftet, mit Korrosionsprodukten angefüllt, unter Druck stehend etc.) nicht sehr starke Auswirkungen hat. Daraus ergibt sich von den Modellannahmen her eine so große Bandbreite von weitgehend unbekanntem Einflussgrößen, dass eine

⁴⁰ Chapman, R. K.: Ultrasonic scattering from smooth flat cracks: An elastodynamic KIRCHHOFF diffraction theory (main report). Manchester: frühere Central Electricity Generating Board (CEGB), UK, Report Nr. NWR/SSD/84/0059/R, 09/1984, S. 1, 2 u. 45

genauere Beschreibung der Rissspitzenbeugung den Wert des Modells in Bezug auf seine Praxishöhe kaum wesentlich verbessern würde.

2.8.2 Anwendung der Beugungstheorien bei der Schallfeldberechnung

Da ein erheblicher Teil des Aufwandes bei der Modellierung von US- Prüfproblemen in der Berechnung der Prüfkopfschallfelder besteht, muss man die Grenzen der Integralsätze von FRESNEL- KIRCHHOFF betrachten. Der Geltungsbereich der vorgestellten Beugungstheorien ist auf ein geschlossenes Volumen beschränkt. Die einfachen Formeln der Integralsätze versagen, sobald eine zusätzliche Grenzfläche vorhanden ist oder der betrachtete Punkt außerhalb des beschriebenen Volumens liegt. Die aus der Lösung der Wellengleichung ermittelten Integrale können aber mit halbanalytischen Verfahren numerisch ausgewertet werden. Als Beispiel für solche Verfahren sei auf die von KÜHNICKE und VÖLZ vorgestellten Integraltransformationsmethoden zur Schallfeldberechnung hingewiesen. Nach KÜHNICKE und VÖLZ können sie vorteilhaft eingesetzt werden, wenn die geometrischen Abmessungen gleich der Wellenlänge oder auch deutlich größer sind. Bei der Schallfeldberechnung unterscheiden KÜHNICKE und VÖLZ eine harmonische und eine impulsförmige Anregung. In beiden Fällen wird von der Lösung des Rand- Anfangswert- Problems der Wellengleichung für punktförmige Quellen mit Hilfe der genannten Integraltransformationsmethoden ausgegangen. Als Ergebnis der Transformationen ergeben sich bei harmonischer Anregung harmonische GREENSCHE Funktionen und transiente GREENSCHE Funktionen bei impulsförmiger Anregung.

Die Berechnung des vom Ultraschallwandler in das Volumen abgestrahlten Feldes erfolgt durch eine Punktquellensynthese. Die Wandlerfläche wird dazu in einzelne Elementarquellen zerlegt. Das Feld des Ultraschallwandlers ergibt sich aus der Addition der von diesen Punktquellen abgestrahlten „Elementarfelder“. Auf diese Weise lassen sich beliebig geformte Quellen, die für die einzelnen Quellpunkte verschiedene zeitliche Anregungen besitzen können, gut simulieren. Die Punktquellensynthese liefert für eine ausgedehnte Quelle auf der Oberfläche eines Volumens für genügend dicht liegende Quellpunkte und entsprechende Randbedingungen die exakte Lösung. Zur Berechnung des Schallfeldes in geschichteten Körpern, die wie mehrere Volumina betrachtet

werden können, wird eine Separationsmethode vorgeschlagen. Bei dieser wird das Schallfeld für jede Schicht separat berechnet. Das in der ersten Schicht berechnete Feld dient als Anregung für die Feldberechnung in der zweiten Schicht und so fort. Mit dieser Methode besteht die Möglichkeit der exakten Berechnung des Schallfeldes in geschichteten Körpern. Der Rechenzeitaufwand ist jedoch erheblich, da für jede Schicht eine Punktquellensynthese durchgeführt werden muss.⁴¹

Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Modellansätze zielen auf eine schnell arbeitende und interaktive Rechentechnik ab. Unter diesem Gesichtspunkt sind daher diese Methoden wegen des erheblichen Zeitbedarfs für die Berechnungen nicht geeignet. Die Modelltechnik muss, um ein Maximum an Rechenzeit einzusparen, an Stelle dieser exakten Lösungen mit Näherungen arbeiten. Für zeitrelevante Berechnungen setzen KÜHNICKE und VÖLZ zwar auch Näherungen ein, die aber bei weitem nicht ausreichen, um ein interaktives Arbeiten zu gestatten. Trotzdem kann unter dem Gesichtspunkt der exakten Berechnung die Methode von KÜHNICKE und VÖLZ als Referenz für andere Näherungsansätze angesehen werden. Sie kann zusammen mit Messungen an Testblöcken der Verifikation der approximativen Modelltechnik dienen.

Um die Wechselwirkungen der Ultraschallwelle mit dem Fehler korrekt zu beschreiben, muss der gesamte Weg vom Sender zum Fehler und zurück betrachtet werden. Die Schallschnelle bzw. ihre Komponenten im Prüfkopfschallfeld am Ort des Fehlers werden durch die Schallfeldberechnung bestimmt und dienen als Ursache bei der Berechnung des vom erregten Fehler am Prüfkopf empfangenen Signals.

2.8.3 Grundsätze der Modelltechnik

Das hier betrachtete und weiterentwickelte Ultraschallmodell ist in der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung seit 1995 entwickelt worden. Das Modell sollte zunächst als Erklärung bestimmter Beobachtungen beim Prüfen

⁴¹ Kühnicke, Elfgard; Völz, Uwe: Ultraschallprüfköpfe - Design für komplizierte Prüfgeometrien. In: Materialprüfung, 40(1998), H. 1-2, S. 7-9

mit dem Ultraschall- Impuls- Echoverfahren dienen. Pädagogische Anwendungen bei der Ausbildung von Prüfpersonal und schließlich die Verifikation der Benutzung von Prüfsystemen im Sinne einer technischen Begründung („technical justification“, s.a. [42 u. 43]) kamen später hinzu. Unter anderem wird das Modell heute zur Beurteilung von Prüfsituationen und der Auswirkung der Variation von Prüfparametern, zur Vorausberechnung der bei einer Prüfung zu erwartenden Echohöhen und -dynamiken und auch zur Interpretation von Messergebnissen eingesetzt. Die Modellentwicklung war dabei immer orientiert am prüftechnisch Relevanten und nicht am theoretisch Machbaren. Das Grundprinzip des Modellansatzes soll im Folgenden erläutert werden.

Die Bezeichnung „analytisch“ trägt das Modell aufgrund der enthaltenen mathematisch- physikalischen Beschreibungen einzelner Sachverhalte. So werden die geometrischen Verhältnisse der zu simulierenden Prüfsituation vektoranalytisch dreidimensional beschrieben. Hierzu zählen die Geometrie des Bauteils, des Reflektors und der Prüfköpfe sowie die Schallwege einschließlich der auftretenden Winkel. Für Prüfanordnungen mit komplexer Geometrie, bei denen die Einschallebene gegenüber den Oberflächennormalen des Bauteils gedreht wird, müssen spezielle Modellformulierungen herangezogen werden.⁴⁴ Sie müssen zusätzlich die in diesen Fällen auftretenden, mitunter starken Polarisierungseffekte berücksichtigen. Im Rahmen der Modellierung der US- Prüfung von aufgeschrumpften Turbinenradscheiben wurden z. B. mit dem Modell Bedingungen vorausgesagt, unter denen das Winkelspiegelecho nahezu Null werden sollte. Der Vergleich der Modellrechnung mit der Messung an einem entsprechenden Testkörper in [44] bestätigte diesen Effekt eindeutig. Der Effekt beruht auf einer Drehung der Polarisierungsebene bei der Winkelspiegelreflexion um genau 90°. Die zum Prüfkopf zurückkehrende Welle ist in bezug auf die Einschallebene des Prüfkopfes rein horizontal polarisiert und kann daher nicht

⁴² EUR 17299 EN: European Methodology for Qualification of non- destructive testing. Second Issue, Petten (Netherlands): European Commission, Joint Research Centre, Institute for Advanced Materials, 1997

⁴³ VGB-R 516 (VGB- ENIQ- Richtlinie): Methodik für das Vorgehen bei der Qualifizierung von zerstörungsfreien Prüfungen. 1. Ausgabe, Essen: VGB Power Tech e. V., 2001

⁴⁴ Boehm*, R.; Lohmann**, H.- P.; Becker**, E.; Schreiner**, T.: Vergleich von Messung und Modellierung am Beispiel der Ultraschallprüfung einer aufgeschrumpften Turbinen- Radscheibe. Vortrag DACH- Jahrestagung d. DGZfP, Berichtsband 63.1, Bamberg, 7.-9.9.1998, S.59-71, *BAM Berlin, **Siemens AG Mühlheim

empfangen werden. Bei den in dieser Arbeit betrachteten Anordnungen liegt die Einschallebene jedoch im rechten Winkel zu den Hauptbegrenzungsflächen der Bauteile, so dass mit keinen nennenswerten Polarisierungseffekten gerechnet werden muss. Es wird daher eine vereinfachende Geometriebeschreibung ohne vektoranalytische Formulierungen für den Modellansatz verwendet, bei dem diese Effekte nicht ohne großen Aufwand mit erfasst werden können.

2.8.4 Grundannahmen des Modells

Voraussetzungen für das BAM- Modell:

1. Grundlagen der Echosignalbestimmung
2. Berücksichtigung elastischer Medieneigenschaften bei einer skalaren Schallausbreitung durch Zusatzannahmen
3. Geometrie und Werkstoff (Medium)
4. Schallfelder der Prüfköpfe
5. Wechselwirkungen am Fehler
6. Verknüpfung von Prüfkopf und Fehler durch unterschiedliche Schallwege

zu 1: Grundlagen der Echosignalbestimmung

Für schubspannungsfreie Medien wird folgende Entstehungsgeschichte eines Echosignals dem Modell zugrunde gelegt:

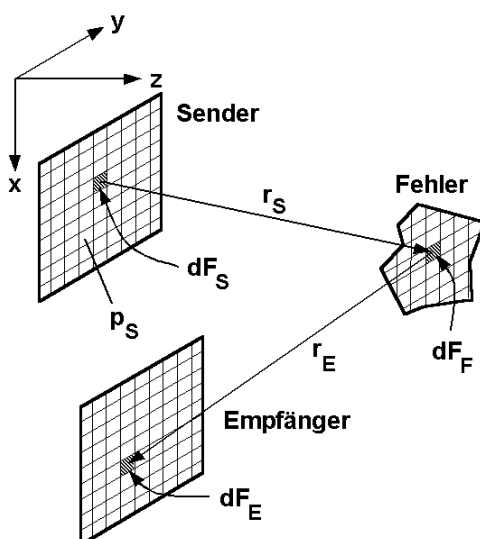


Bild 16: Entstehung des Echosignals

Die folgenden Kurzzeichen gelten für Bild 16 und die folgenden Gleichungen:

<i>Index S: Sender</i>	<i>p: Schalldruck</i>
<i>Index F: Fehler</i>	<i>v: Schallschnelle</i>
<i>Index E: Empfänger</i>	<i>C: Konstante</i>

Vom Sender wird der Fehler angeregt und strahlt nun seinerseits das „reflektierte“ Fehlerschallfeld zum Empfänger, was durch die folgende Sequenz von Integralen entsprechend dem durch die FRESNEL- KIRCHHOFFSCHEN- Beugungsintegrale gegebenen Formalismus beschrieben wird:

a) Sender - Schallfeld

$$v_S(r_S) = C_0 \cdot \int_{F_S} p_S \cdot \frac{e^{-j \cdot k \cdot r_S}}{r_S} \cdot dF_S$$

b) Erregung des Fehlers $p_F = v_S(r_S(F)) \cdot const.$

c) Abstrahlung vom Fehler

(setzt voraus, dass die abstrahlende Erregung dem primären, einfallenden Schallfeld gleich oder mindestens proportional ist, was an sich nur eingeschränkt angenommen werden darf)

$$v_F(r_F) = C_0 \cdot \int_{F_F} \frac{e^{-j \cdot k \cdot r_F}}{r_F} \cdot v_S(r_S(F)) \cdot dF_F$$

d) Integration über die Empfängerfläche wegen der Spannungsbildung an den Elektroden durch eine Mittelwertbildung über die Ladung

$$H_E = C_E \cdot \int_{F_E} v_F(r_F(E)) \cdot dF_E$$

Damit kann man für H_E schreiben:

$$H_E = C_E \cdot C_0^2 \cdot p_S \cdot \int_{F_F} \left[\int_{F_S} \int_{F_E} \frac{e^{-j \cdot k \cdot r_S}}{r_S} \cdot \frac{e^{-j \cdot k \cdot r_E}}{r_E} \cdot dF_E \cdot dF_S \right] dF_F$$

Für ein festes Fehlerelement dF_F sind bei der Integration über die Sender- oder Empfängerfläche die Schallwege r_S und r_E voneinander unabhängig. Daher kann man die beiden Integrationen über dF_S und dF_E getrennt für sich durchführen und erhält für H_E einen Ausdruck, der das Produkt der beiden Schallfelder von Sender bzw. Empfänger enthält:

$$H_E = C_E \cdot C_0^2 \cdot p_S \cdot \int_{F_F} \left[\underbrace{\int_{F_S} \frac{e^{-j \cdot k \cdot r_S}}{r_S} dF_S}_{\text{Schallfeld des Senders}} \cdot \underbrace{\int_{F_E} \frac{e^{-j \cdot k \cdot r_E}}{r_E} dF_E}_{\text{Schallfeld des Empfängers}} \right] dF_F$$

Die gewählte Schreibweise deutet an, dass damit der Formalismus der Echosignalbildung auch eine andere Interpretation erlaubt:

Das Fehlerelement dF_F wird vom Senderschallfeld angeregt und ergibt am Empfangsprüfkopf ein Signal, das mit dem Schallfeld des Empfangsprüfkopfes gewichtet wird. Das Empfangs- „Schallfeld“ wird genauso gemittelt wie das Senderschallfeld, es ist über das Reziprozitätsgesetz mit ihm verknüpft. Man kann demnach die Aufgabe der Echosignalermittlung bei einem Modell der Ultraschallprüfung durch folgende drei Teilaufgaben ersetzen:

1. Man ermittelt für die Objektgeometrie die Schallwege und Winkel für die einzelnen zu beachtenden Wechselwirkungen.
2. Man ermittelt die Schallfelddaten von Sende- und Empfangsprüfkopf am Ort des Fehlers. Da für die Empfangsfunktion bei den üblichen Impulsecho-Prüfanordnungen mit einem Schwinger dieselben Formeln wie für den Sendevorgang gelten, läuft das dann auf eine Quadrierung der Schallfeldfunktionen hinaus. Die typischen Punktrichtwirkungen an der Ankopplungsfläche können in die Schallfelddaten miteinbezogen werden.
3. Man summiert über alle Fehlerelemente die Beiträge zum Echosignal auf. Dabei können nun die nötigen Wellenumwandlungseffekte und Punktrichtwirkungen und, wenn nötig, auch Polarisationsrichtungen mit beachtet werden.

zu 2: Berücksichtigung elastischer Medieneigenschaften bei einer skalaren Schallausbreitung durch Zusatzannahmen

Alle Schallausbreitungserscheinungen in Bild 16 werden wie für schubspannungsfreie Medien beschrieben unter Verwendung z. B. der Rayleigh- Formel für Schallfelder (des in den Integralsätzen zusammengefassten Formalismus der Schallfeldentstehung). Die Berücksichtigung der Eigenschaften elastischer Medien bei Reflexion, Brechung und Beugung erfolgt durch Zusatzannahmen, z. B. der Reflexions- und Durchlässigkeitsfaktoren für ebene Wellen inklusive der typischen Wellenumwandlungen, sowie durch Punktrichtwirkungen an Prüfkopf und Fehler und wo nötig auch durch getrennte Beschreibung verschiedener Polarisationsrichtungen. Die Reflexions- und Durchlässigkeitsfaktoren für ebene Wellen bei elastischen Medien können [45, 46 und 47] entnommen werden. Sie werden benutzt bei der Reflexion von Schallwellen an formbedingten Grenzflächen der Prüfobjekte auch wenn diese gekrümmt sind (siehe Ausführungen zu Punkt 4). Bei den Punktrichtwirkungen werden die Ankopplungsfläche des Prüfkopfes und Reflexionen an Fehlerflächen unterschieden. Die Punktrichtwirkungen von Prüfköpfen werden aus der Behandlung des LAMBSCHEN Problems in der von MILLER und PURSEY angegebenen Form verwendet.^{48 u. 49} Ein einfaches Schema für die Erweiterung derer Punktrichtwirkungen für unterschiedlich akustisch belastete Ankopplungsflächen ist in Bild 17 wiedergegeben. Dazu werden die Punktrichtwirkungen unter Benutzung der Reflexionsfaktoren für ebene Wellen mit Hilfe der Reziprozitätsgesetze für beliebig belastete Oberflächen ermittelt.^{47, 50 u. 51}

⁴⁵ Krautkrämer, Josef u. Herbert: Werkstoffprüfung mit Ultraschall. 4. Aufl., Berlin, Springer, 1980

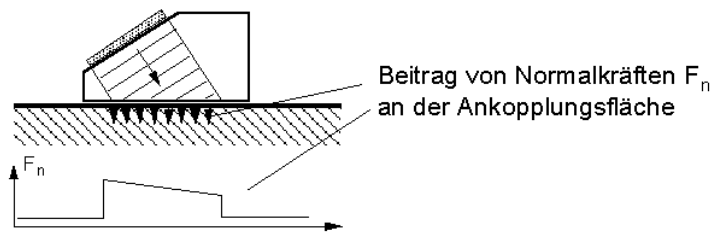
⁴⁶ Schoch, Arnold: Schallreflexion, Schallbrechung und Schallbeugung. In: Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften, Band 23 (1950), S.127-234

⁴⁷ Wüstenberg, Hermann: Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall, Diss., TU Berlin 1972

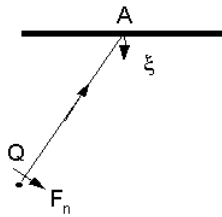
⁴⁸ Miller, G. F.; Pursey, H.: The field and radiation impedance of mechanical radiators on the free surface of a semi- infinite isotropic solid. Proc. Roy. Soc. London, A 223 (1954), S. 521-542

⁴⁹ Lamb, H.: On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid. In: Philosophical transactions of the Royal Society of London, Series A: Physical Science and Engineering, Vol. 203 (1904), S. 1-42

⁵⁰ Gutin, L. Y.: Theory of stationary vibrations of an elastic half- space. In: Zh. tekhn. Fiz., 21 (1951), S. 892-906

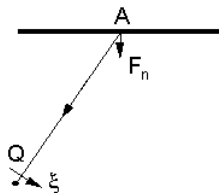


Die Punkttrichtwirkung einer punktförmigen Normalkraft F_n kann nach den folgenden Erklärungen unter Verwendung des Reziprozitätstheorems abgeleitet werden:



Die Quelle Q schwingt mit der Kraft F_n und erregt im Punkt A eine beinahe ebene Welle mit der Teilchenauslenkung ξ .

$$\xi = \frac{F_n \cdot e^{jks}}{4 \cdot \pi \cdot \mu \cdot S} \cdot \left[\sin \alpha + R_{t \rightarrow t} \cdot \sin \alpha - R_{t \rightarrow l} \cdot \frac{c_l}{c_t} \cdot \sqrt{\left(\frac{c_t}{c_l} \right)^2 - \sin^2 \alpha} \right]$$



Dies entspricht nach dem Reziprozitätstheorem dem Fall einer Normalkraft F_n im Punkt A, die am Punkt Q die Teilchenauslenkung ξ hervorruft.

Bild 17: Die Punkttrichtwirkung von Ultraschallprüfköpfen für elastische Medien.

Die Punkttrichtwirkungen von in elastischen Medien eingebetteten elastischen Reflektoren werden unter Punkt 5 beschrieben.

zu 3: Geometrie und Werkstoff (Medium)

In dem als homogen und isotrop angenommenen Medium werden außer der Fehlerfläche und einer ebenen oder gekrümmten Rückwand keine weiteren Grenzflächen berücksichtigt. Für die Modelle werden vektorgeometrische Beschreibungen verwendet. Diese Beschreibungen sind insbesondere deswegen erforderlich, weil die wichtigen Winkeldefinitionen (Einschall-, Schielwinkel des Prüfkopfes, Auftreff- und Beobachtungswinkel an der Fehlerfläche bzw. den -elementen und Reflexionswinkel an Grenzflächen des Prüfobjektes) ohne solche Festlegungen sehr unübersichtlich werden.

⁵¹ Gutin, L. Y.: The radiation into an elastic medium from a piston vibrating in an infinite elastic screen. In: Soviet physics- acoustics, Vol. 9 Nr.3 (1964), S. 256-262

zu 4: Schallfelder der Prüfköpfe

Die wichtigsten Vereinfachungen für ein schnell am Rechner ablaufendes Modell befassen sich mit der Ermittlung der Prüfkopfschallfelder. Die dazu erforderlichen Ansätze und Näherungen werden durch einen Vergleich zwischen über lange Wasserstrecken angekoppelten Prüfköpfen in Tauchtechnik mit den in direkten Kontakt angekoppelten Winkelprüfköpfen mit kurzen Plexiglasvorlaufstrecken erläutert (vgl. Bild 18).

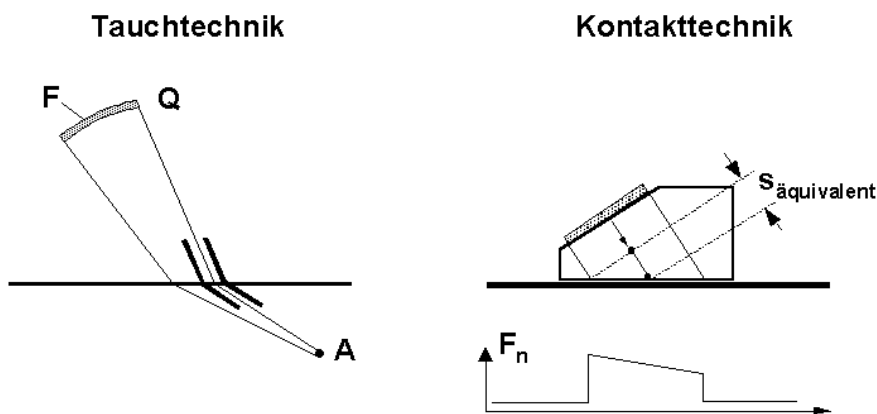


Bild 18: Vergleich der Modellansätze für die Tauch- und Kontakttechnik

$$p(r) = \frac{\rho \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \int v(A) \cdot \frac{e^{-j \cdot k \cdot r}}{r} \cdot T(r) \cdot dA$$

Gleichung 2: modifizierte RAYLEIGH- Formel

Die Beschreibung des Schallfeldes für die Tauchtechnik beruht auf der Anwendung der RAYLEIGH- Formel unter physikalisch begründeter Berücksichtigung der Grenzflächen. Dazu muss die Geschichte eines den Quellpunkt mit dem Zielpunkt A verbindenden Weges betrachtet werden. Zunächst muss der Durchstoßpunkt durch die Grenzfläche durch Anwendung des FERMATSCHEN Prinzips ermittelt und dann ein winkelabhängiger, grenzflächenspezifischer Durchlässigkeitsfaktor berücksichtigt werden, der in der modifizierten RAYLEIGH- Formel als $T(r)$ auftaucht. Verschiedene Formulierungen der Durchlassfaktoren (s. a. Echodurchlässigkeit) finden sich in [45], [47] und bei A. SCHUMM in [37]. Mit dem Prinzip der stationären Phase kann die Benutzung der Durchlässigkeitsfaktoren für unendlich ausgedehnte Wellen und Grenzflächen auch für ein schmales strahlbegleitendes Wellenbündel angenommen werden (vgl. Bild 18 links). Die Durchlässigkeitsfaktoren werden mit dem winkelabhängigen Faktor

multipliziert und ergeben einen Ausdruck, der mit dem von WÜSTENBERG in [47] und KRAUTKRÄMER in [45] für ebene Grenzflächen angegebenen übereinstimmt.

$$T(r) = D_{12} \cdot \frac{\cos \alpha_2}{\cos \beta_1} \quad \text{Gleichung 3: winkelabhängiger Durchlässigkeitsfaktor}$$

Dieser Faktor tritt bei SCHUMM als Grenzfall für ebene Flächen auf, ist dort allerdings allgemeiner formuliert und gültig für beliebig gekrümmte Flächen. Damit können Schallfelder für die Tauchtechnik durch Lösung des modifizierten RAYLEIGH- Integrals auch unter Berücksichtigung elastischer Medien beschrieben werden. Ein ähnliches Prinzip wird von BOEHM auch für die Kontakttechnik verwendet. Diese Schallfeldbeschreibung ist aber auch mit einer aufwändigen Integration über die Wandlerfläche verknüpft.

Im Gegensatz dazu kann man für die rechts dargestellte Kontakttechnik mit kurzen Plexiglasvorlaufstrecken auch eine andere Modellvorstellung benutzen. Man nimmt in der Vorlaufstrecke wegen der kleineren Wellenlänge eine annähernd parallele Wellenausbreitung bis zur Grenzfläche an und ermittelt aus der Projektion die Erregung an der Grenzfläche. Der Ort des virtuellen Prüfkopfes wird um den schallfeldäquivalenten Weg $S_{\text{äquivalent}}$ in den Keil hinein verlagert (vgl. Bild 18 rechts). Der schallfeldäquivalente Weg ergibt sich aus Überlegungen, die der Annahme der stationären Phase ähneln (s.a. [52]). Man kann dann einen Rechteckschwinger um diesen fiktiven Ort annehmen und das Schallfeld dieses Rechteckschwingers in geeigneter Orientierung ohne Berücksichtigung der Grenzfläche für die Schallfelddarstellung heranziehen. Um die notwendige Integration zu umgehen, wird davon ausgegangen, dass sich die Schallfelder von Prüfkopfsystemen mit ebenen oder schwach fokussierenden Schwingern nach dem Schema in Bild 19 beschreiben lassen.⁵³

⁵² Erhard*, A.; Möhrle*, W.; Rotter*, B.; Wüstenberg*, H. ; Pitkänen**, J.: A Parametric Study of Ultrasonic Probes with PVDF- Transducers. Vortrag 12th World Conference on NDT, Band 1, Amsterdam, 23.-28.4.1989, S.691-698, *Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung; **VTT, Espoo, Finnland

⁵³ Kutzner, J.; Möhrle, W.; Schulz, E.; Wüstenberg, H.: Zur Auswahl der Membranform bei Winkelprüfköpfen für die Ultraschallprüfung. In: Materialprüfung 18 (1976), H. 7, S. 223-230

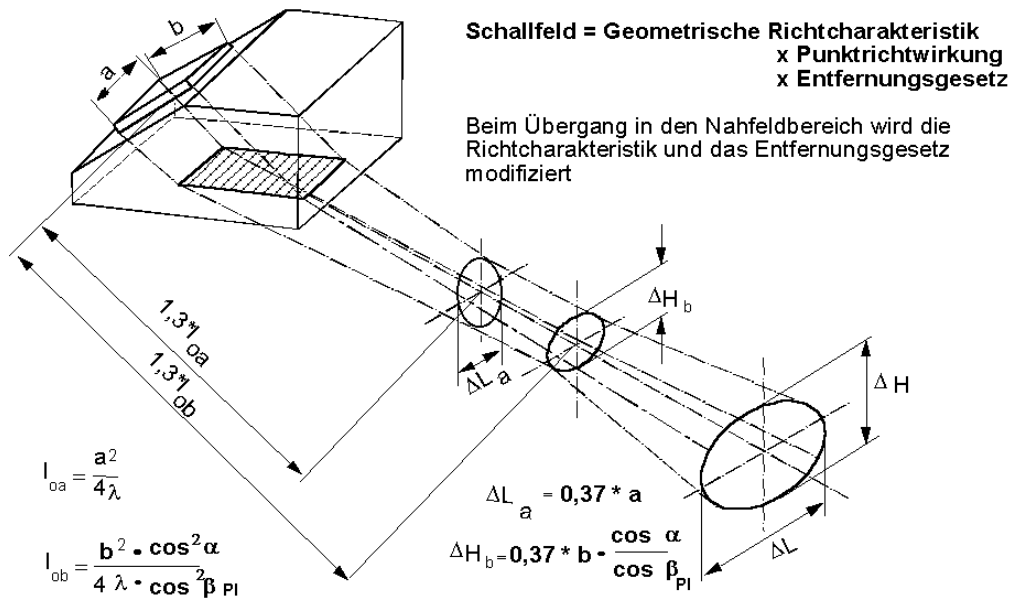
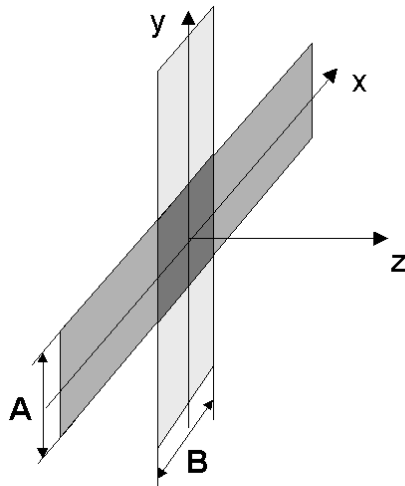


Bild 19: Schematische Form des Schallbündels von Winkelprüfköpfen

Wenn man für den Fall des Streifens annimmt, dass das Schallfeld auf der Achse ähnlich dem Schallfeld einer Kolbenmembran mit modifizierter Vorlaufstrecke zu beschreiben ist, dann ergeben sich die in Bild 20 wiedergegebene Richtcharakteristik und das Entfernungsgesetz. Daraus ergibt sich die in [53] dargestellte Formulierung für das bei der Modellierung zu verwendende Schallfeld. Interessant in dieser Darstellung ist, dass sowohl für die Richtcharakteristik als auch für das Entfernungsgesetz eine Produktdarstellung für den Einfluss der beiden Seitenlängen des Rechteckschwingers in der Näherung verwendet werden kann.



Schallfeld für die Modellierung:

$$p(x, y, z) = p(z) \cdot p(\vartheta_x) / p_0 \cdot p(\vartheta_y) / p_0 \cdot p_{\text{Punktrichtwirkung}}(\vartheta)$$

(verwendbar bis $z > 0,7 \cdot L_0$)

Entfernungsgesetz:

(Schalldruck auf der Achse)

$$p(z) = C \cdot \frac{P_0}{\lambda} \cdot \sqrt{\sin\left(\frac{\pi \cdot L_{0a}}{2 \cdot z}\right)} \cdot \sqrt{\sin\left(\frac{\pi \cdot L_{0b}}{2 \cdot z}\right)}$$

$$L_{0a} = 1,3 \cdot \frac{A^2}{4 \cdot \lambda}$$

$$L_{0b} = 1,3 \cdot \frac{B^2}{4 \cdot \lambda}$$

Richtcharakteristik:

$$p(\vartheta_x) / p_0 = \frac{\sin(B \cdot \pi / \lambda \cdot \sin(\vartheta_x))}{B \cdot \pi / \lambda \cdot \sin(\vartheta_x)}$$

$$p(\vartheta_y) / p_0 = \frac{\sin(A \cdot \pi / \lambda \cdot \sin(\vartheta_y))}{A \cdot \pi / \lambda \cdot \sin(\vartheta_y)}$$

Bild 20: Beschreibung des Schallfelds eines Rechteckschwingers durch Multiplikation der Schallfeldfunktionen von zwei gekreuzten Streifen

Für die im Modell verwendeten Näherungen wird die Beschreibung der Richtcharakteristik im Nahfeldbereich des Prüfkopfes (vgl. Bild 19) so modifiziert, dass die Schallbündelerweiterung bei Annäherung an den Prüfkopf wiedergegeben werden kann. Ein wichtiger Unterschied der Kontakttechnik zur Tauchtechnik ergibt sich dadurch, dass der Einfluss der Grenzfläche nicht durch ein dem Durchlassfaktor $T(r)$ entsprechenden Faktor innerhalb des Integrals berücksichtigt wird, sondern durch Punktrichtwirkungen nach MILLER und PURSEY für Normalkräfte auf der Grenzfläche. Durch die Winkelabhängigkeit dieser Normalkräfte ergeben sich allerdings im Zusammenwirken mit den Punktrichtwirkungen nach MILLER und PURSEY quantitativ und qualitativ die gleichen Abhängigkeiten. Da alle Schallfeldbetrachtungen an sich nur den Sendefall beschreiben, müsste eigentlich für den Empfangsfall eine getrennte Rechnung erfolgen. Hier wird aber das Reziprozitätstheorem (s.a. [54]) herangezogen. Danach kann Ursache und Wirkung unter Berücksichtigung entsprechender Reziprozitätsfaktoren vertauscht werden, d.h. das für das Modell im Empfangsfall die gleichen Schallfeldbeschreibungen (Richtcharakteristik und Entfernungsgesetz) gelten.

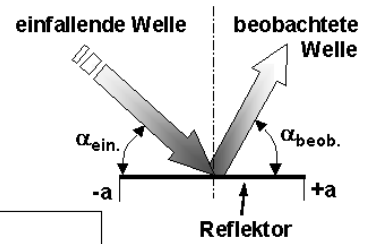
⁵⁴ Cremer, Lothar: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik - Wellentheoretische Raumakustik. Band 3, Leipzig: Hirzel Verlag, 1950, S.107-115

Das Gesamtschallfeld ist hiernach aus dem primären Schallfeld des sendenden Prüfkopfes und dem sekundären Feld des Fehlers zusammengesetzt. Das primäre Feld spielt im Empfangsfall normalerweise keine Rolle, da seine Wirkrichtung im allgemeinen nicht in der Richtung des empfangenden Prüfkopfes liegt. Im Modell wird daher nur das sekundäre Feld berücksichtigt. Unter bestimmten geometrischen Bedingungen, wie z. B. im speziellen Fall einer TOFD-Anordnung, stehen sich die beiden Prüfköpfe jedoch gegenüber und es kommt zu einer Überlagerung des Primär- und Sekundärfeldes. Liegt der Fehler nun sehr nah unter der Prüfoberfläche wird das Sekundärfeld zum größten Teil durch Interferenzen ausgelöscht. Der Empfangsprüfkopf kann quasi nur noch die Beugungsanzeigen der Reflektorränder registrieren. Dieser Effekt wird vom Modell quantitativ nicht richtig beachtet und es werden in diesen Fällen deutlich zu große Echohöhen berechnet.

zu 5: Wechselwirkungen am Fehler

Der von dem Schallfeld des Prüfkopfes erregte Fehler strahlt gemäß dieser Erregung ein Schallfeld ab (vgl. Bild 23), das von dem empfangenden Prüfkopf aufgenommen wird. Um diesen Vorgang besser zu erfassen, wird der Fehler (vgl. Bild 24) in einzelne kleine flächenhafte Elemente zerlegt, für welche die elastodynamischen Punktquellenrichtwirkungen für begrenzte Reflektoren nach LANGENBERG herangezogen werden. Dadurch werden alle wichtigen Phänomene, wie Wellenumwandlungen u. s. w., für die beiden Wellenarten (transversal und longitudinal) einigermaßen korrekt beschrieben. Diese elastodynamischen Punktquellenrichtwirkungen können nach Bild 21 als aus der Richtwirkung von MILLER- PURSEY und den speziellen Dipolrichtwirkungen kleiner Strahler (Elemente) zusammengesetzt betrachtet werden.

Die elastodynamischen Punktquellenrichtwirkungen sind aus zwei Faktoren zusammengesetzt, der Punkt- richtwirkung von unendlich ausgedehnten Oberflächen nach Miller / Pursey (=Pktri ($\alpha_{\text{einfallend}}$)) und den elasto- dynamischen Dipolrichtwirkungen (=Dipolri($\alpha_{\text{beobachtet}}$)) von kleinen Strahlern im elastischen Medium.



$$\text{PktQuellri}(\alpha_{\text{ein.}}, \alpha_{\text{beob.}}) = \text{Pktri}(\alpha_{\text{ein.}}) \times \text{Dipolri}(\alpha_{\text{beob.}})$$

Miller- Pursey's Punkttrichtwirkungen für Transversal- und Longitudinalwellen können nach dem Reziprozitätstheorem unter Verwendung der Reflexionsfaktoren für ebene Wellen bestimmt werden. Die Dipolrichtwirkungen sind unten angegeben.

elastodynamische Dipolrichtwirkungen:

$$\begin{aligned} \text{PL}_{\text{tan}} &= \sin(\alpha_{\text{beobachtet}}) \cdot \cos(\alpha_{\text{beobachtet}}) \cdot (\text{CT}/\text{CL})^2 & \text{PT}_{\text{tan}} &= 1/2 - \sin^2(\alpha_{\text{beobachtet}}) \\ \text{PL}_{\text{nor}} &= 1/2 - (\text{CT}/\text{CL})^2 \sin^2(\alpha_{\text{beobachtet}}) & \text{PT}_{\text{nor}} &= \sin(\alpha_{\text{beobachtet}}) \cdot \cos(\alpha_{\text{beobachtet}}) \end{aligned}$$

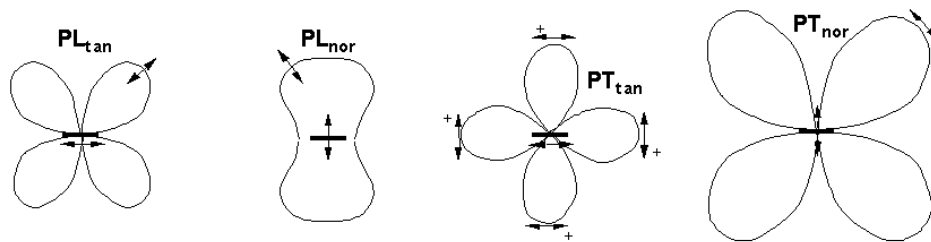


Bild 21: Die elastodynamischen Punktquellenrichtwirkungen begrenzter Reflektoren nach K. J. Langenberg.

zu 6: Verknüpfung von Prüfkopf und Fehler durch unterschiedliche Schallwege

Das zentrale Prinzip des analytischen Rechenmodells der BAM ist die Möglichkeit, vielfache Wechselwirkungen zu berücksichtigen, was mit anderen analytischen Modellbeschreibungen im allgemeinen schwierig ist. Da bei jedem Prüfproblem häufig mehrere Wechselwirkungen zur Anzeige beitragen können und oft nicht klar ist, welcher Mechanismus im einzelnen Fall überwiegt, ist es erforderlich, die Mechanismen additiv zu berücksichtigen. Dies geschieht in der Entwicklungsphase eines Modells durch die Zusammenstellung aller möglichen Schallwege und Mechanismen, die einen Beitrag zur Anzeige liefern können. Im Einzelfall können dies zwischen 10 und 20 Wege sein, deren Ermittlung und Einführung im Modell ein gewisses Expertenwissen voraussetzt. Das Bild 22 zeigt am Beispiel eines schlitzzartigen Reflektors (einer Nut) eine Zusammenstellung solcher Wege. Das in dieser Arbeit verwendete Modell berücksichtigt 14 verschiedene Wechselwirkungen.

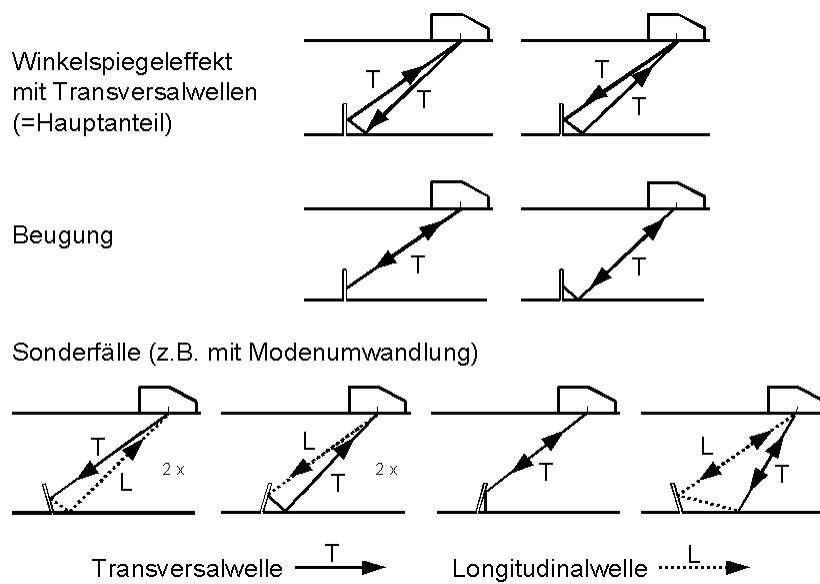


Bild 22: Schallwege und Teilwellen des Modells am Beispiel des Winkelspiegeleffektes

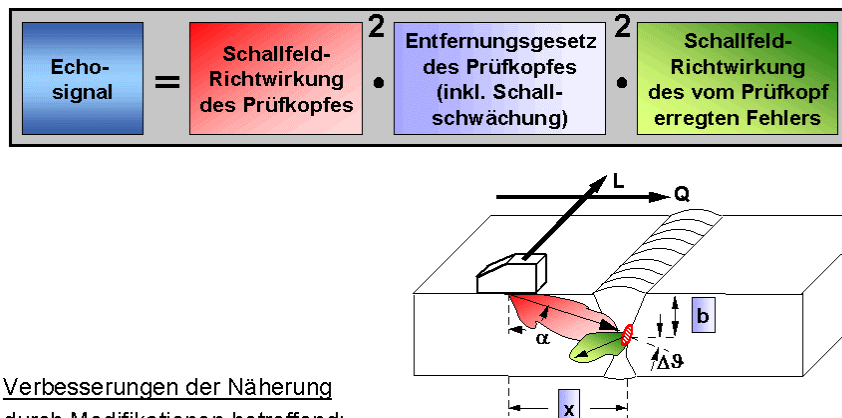
Die akustische Verbindung zwischen den Prüfköpfen und dem Fehler wird durch eine Reihe von ultraschallphysikalisch sinnvollen und für die Prüfsituation bedeutsamen Schallwegen hergestellt. Die Auswahl der Schallwege setzt die Analyse der akustischen Verhältnisse voraus und erfordert Expertenwissen in Form von Prüf- und Modellerfahrung. Diese Auswahl könnte systematisiert werden durch CAD- Systeme und entsprechender „Ultraschall- Intelligenz“.

Das Modell wird als „halbanalytisch“ bezeichnet, da es nicht auf der Basis einer geschlossenen mathematischen Lösung für die Problemstellung arbeitet. An einigen Stellen werden Näherungsformeln zur Beschreibung der physikalischen Verhältnisse verwendet. Außerdem ist die Anzahl der berücksichtigten akustischen Wechselwirkungen (Schallwege) beschränkt.

Es handelt sich bei dem untersuchten Modell um ein „schnelles“ Modell, da durch die Einführung der angesprochenen Näherungen und der Beschränkung auf die relevanten Wechselwirkungen viel Rechenzeit gespart werden kann. Eine weitere deutliche Reduktion des Rechenaufwandes wird durch eine Beschränkung des berechneten Zeitbereiches erreicht. Darauf wird weiter unten noch genauer eingegangen.⁵⁵

⁵⁵ Boehm, Rainer; Erhard, Anton; Wüstenberg, Hermann: Darstellung des Entwicklungsstandes des schnellen, halbanalytischen Modells (FSAM) für die US- Prüfung anhand von Beispielen. Vortrag DACH- Jahrestagung d. DGZfP, Berichtsband 68, Band 1, Celle, 10.-12.05.1999, S. 317-323

Die Entstehung des Echosignals für eine betrachtete Wechselwirkung ist schematisch in Bild 23 dargestellt. Das Echosignal wird durch eine multiplikative Überlagerung der Schallfeldrichtwirkung des Prüfkopfes, der Schallfeldrichtwirkung des reflektierenden Fehlers und des Entfernungsgesetzes von Prüfkopf und Fehler beschrieben. Dabei müssen die Schallfeldrichtwirkungen des sendenden und des empfangenden Prüfkopfes berücksichtigt werden. Im Fall einer einfachen Prüfanordnung mit nur einem Prüfkopf im Impuls- Echobetrieb kann dies wegen des Reziprozitätstheorems mit einer Quadrierung der Schallfeldrichtwirkung des Prüfkopfes und des Entfernungsgesetzes erreicht werden, wie es in Bild 23 angedeutet wird.



- Punktrichtwirkung an der Ankopplungsfläche des Prüfkopfes nach Miller/Pursey
- elastodynamische Punktquellenrichtwirkung von begrenzten Reflektoren
- Reflexionsfaktoren und Wellenumwandlungen für ebene Wellen an Grenzflächen
- vielfache Wechselwirkungen und entsprechende Schallwege

Bild 23: Entstehung des Echosignals im einfachen Modell für eine US- Prüfung

In Bild 24 sind die geometrischen Verhältnisse des Modells für eine einfache Geometrie schematisch dargestellt. Die Fehlerfläche wird in kleine Fehlerelemente Q unterteilt, über die zur Berechnung der Impulsantwort integriert wird. Mit einer ausreichend feinen Unterteilung der Fehlerfläche können dann auch Beugungsphänomene an den Fehlerrändern zumindest qualitativ ausreichend genau erfasst werden.

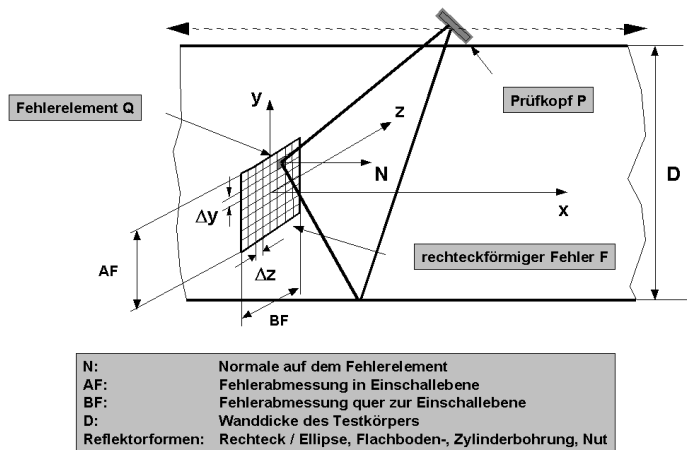


Bild 24: Geometrie für ein Rechenmodell zur US-Prüfung

Die Unterteilung der Fehlerfläche ermöglicht zusammen mit der vektoriellen Beschreibung der Geometrie die Berücksichtigung von quasi beliebigen Fehlerformen. Für die Reflektorformen Rechteck, Ellipse, Flachbodenbohrung und Nut existierten bereits funktionsfähige geometrische Beschreibungen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Formulierung zur Simulation einer Zylinderbohrung erfolgreich in das Modell integriert.

In Bild 24 sind zwei Beispiele für unterschiedliche Schallwege zwischen dem Prüfkopf und einem Fehlerelement dargestellt. Es handelt sich um den direkten Weg zwischen Prüfkopf und Fehlerelement und den Umweg über die Rückwand. Auch die Kombination beider Wege als „Dreiecksreflexion“ wird vom Modell berücksichtigt. Insgesamt werden 14 verschiedene Schallwege berücksichtigt, die im Einzelfall je nach Geometrie jedoch sehr unterschiedlich zum Gesamtecho beitragen. Unter den 14 Schallwegen sind auch solche mit Direktreflexion und -beugung, sowie mehrere Sonderfälle, zum Teil mit Modenumwandlung. Die Schallwege werden nach dem Prinzip der Strahlverfolgung (ray-tracing) vom Quellpunkt (dem Prüfkopf) bis zum Zielpunkt (dem Fehler) ermittelt. Alle dazwischen auftretenden Verbindungspunkte, wie z. B. ein Wellenumwandlungspunkt an der Rückwand, werden nach dem Prinzip von FERMAT bestimmt, d. h. es wird immer der kürzeste Weg für die Schallausbreitung berücksichtigt. Die graphischen Darstellungen aller Schallwege sind in Anhang 5.3 zu finden.

Die Berechnungen werden zunächst im Frequenzbereich durchgeführt. Das für alle Frequenzstützstellen eines Spektrums berechnete Signal wird anschließend mit dem komplexen Spektrum des Prüfkopf- Sendeimpulses gefaltet und

schließlich durch eine inverse FOURIER- Transformation (FFT) in ein Zeitsignal umgesetzt. Das Spektrum des Sendeimpulses enthält eine diskrete Anzahl von Stützstellen aus dem Impulsverlauf. Der Frequenzabstand zwischen den Stützstellen bestimmt die Dauer des berechenbaren Zeitbereichs. Mit wachsender Stützstellenanzahl nimmt daher bei gleicher Bandbreite die Größe des Zeitbereichs zu, im gleichen Verhältnis steigt aber auch die benötigte Rechenzeit. Da aber die genaue Lage des Zeitsignals auch durch eine quasi „a priori“ Information über die wahrscheinliche Lage des Echoimpulses, d. h. des Erwartungszeitpunktes für den Signalschwerpunkt festliegt, kann man versuchen, diesen Umstand für die Beschränkung des Spektrums auf eine reduzierte Stützstellenzahl zu nutzen. Durch die simple geometrische Ermittlung des Schallweges für die wichtigste Wechselwirkung ist dies leicht möglich.⁵⁶

Im Folgenden wird die im Programm für die iterative Modellierung gewählte Prozedur zur Berechnung des Gesamtechos mit einer Gleichung am Beispiel eines Schallweges mit Umweg über eine Rückwandreflexion (s.a. Bild 24) dargestellt.

Zunächst wird für jeden berücksichtigten Schallweg vom Sender zum Empfänger ein Echoanteil „ $Echo_{Weg}(\omega)$ “ berechnet. Der Echoanteil wird gemäß Gleichung 4 durch mehrere komplexe, frequenzabhängige Größen bestimmt.

$$Echo_{Weg}(\omega) = \sum_{Rf-Elemente} R_{w_S}(\omega) \cdot A_{S \rightarrow Rf}(\omega) \cdot R_{w_{Rf}}(\omega) \cdot R_{\infty}(\vartheta) \cdot R_{w_E}(\omega) \cdot A_{Rf \rightarrow E}$$

R_w : Richtwirkung, enthält die geometrische
und die Punktrichtwirkung

R_{∞} : Reflexionsfaktor
 A : Abstandsfunktion

S : Sender

E : Empfänger

R_f : Reflektor

ω : Kreisfrequenz

ϑ : Einfallswinkel

Gleichung 4: Echoanteil eines Schallweges

Die Richtwirkungen und Entfernungsgesetze werden durch die in den Bildern 17, 19 und 20 dargestellten Beziehungen beschrieben. Sie sind abhängig von den Schallgeschwindigkeiten, der Geometrie sowie der Wellenlänge bzw. Frequenz. Ein Programmablauf des verwendeten Programms ist im Anhang 5.7

⁵⁶ Erhard, Anton; Tschardtke, Dirk; Wüstenberg, Hermann: Ultraschallprüfung an Schweißnähten - Bewertung kritischer Befunde mit Modellrechnungen. S. 434f

angegeben. Die Berechnung der Echoanteile ist im Modell der zeitintensivste Vorgang, da dazu drei ineinander verschachtelte Rechenschleifen durchlaufen werden müssen. Die innere Schleife durchläuft die Frequenzstützstellen im Impulsspektrum. Die beiden Äußeren beziehen sich auf die Laufparameter zur Bestimmung der geometrischen Beziehungen des betrachteten Reflektorelements in jeweils einer der beiden Koordinatenachsen. Die auf diese Weise berechneten Echoanteile aller Schallwege werden zur Echoamplitude „*EchoAmpl(ω)*“ aufsummiert. Da sie nur für die diskreten Punkte der Frequenzstützstellen berechnet wird, stellt sie eine diskrete Systemfunktion der Ultraschallprüfanordnung dar.

$$EchoAmpl(\omega) = \sum_{Schallwege} Echo_{Weg}(\omega)$$

Die Systemfunktion wird mit dem Spektrum des Sendeimpulses „*PkSpektrum(ω)*“ multipliziert und mit der inversen FFT in den Zeitbereich transformiert. So erhält man für jede Prüfkopfposition x das hochfrequente Signal des „*EchoImpulses(t, x)*“ im Zeitbereich.

$$EchoImpuls(t, x) = FFT^{-1}[EchoAmpl(\omega, x) \cdot PkSpektrum(\omega, x)]$$

Der Echoimpuls befindet sich wie in Bild 25 dargestellt innerhalb der Grenzen t_{anf} und t_{end} des berechneten Zeitbereiches. Für den Impulsschwerpunkt wird der Zeitpunkt t_{erw} als Schalllaufzeit der wichtigsten Wechselwirkung vorausberechnet. Der Echoimpuls wird gleichgerichtet und die Einhüllende entsprechend der vom gewünschten A- Bildformat vorgegebenen Schallweg- Pixelierung an der laufwegrichtigen Stelle in das A- Bild eingetragen. Die Grenzen des Zeitbereiches geben dann in Form der Schallwege s_{anf} und s_{end} die Begrenzungen des berechneten Schallwegbereiches an. Der im A- Bild dargestellte tatsächliche Schallwegbereich ist im allgemeinen größer als der zuvor genannte, dadurch wird die Vergleichbarkeit mit dem von der Messung vorgegebenen A- Bildformaten einfacher. Bei der Bildauswertung muss man jedoch beachten, dass außerhalb des berechneten Schallwegbereiches keine Aussagen getroffen werden können. Bestehen Zweifel betreffend der Lage des Schallwegbereiches, so können die Schallweggrenzen in den A- Bildern sichtbar gemacht werden und dann durch Korrekturlaufzeiten ähnlich der Laufzeitjustierung am Ultraschall- Impuls- Echogerät auf die richtige Laufzeit eingestellt werden.

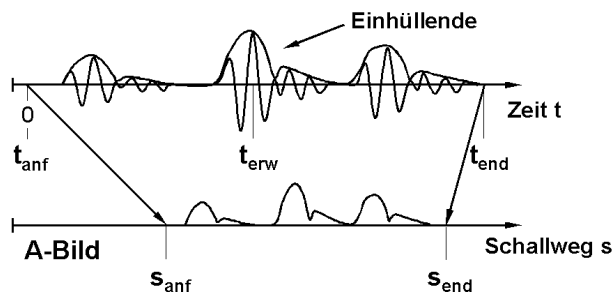


Bild 25: Gleichrichtung des Echoimpulses und laufwegrichtige Eintragung in das A- Bild

Die entlang einer Prüfspur berechneten A- Bilder (vgl. Bild 8) werden dann zeilenweise aufeinanderfolgend und untereinander dargestellt. Die Amplitudendynamik wird dabei in 256 Stufen farb- bzw. grauwertcodiert umgesetzt. Auf diese Weise entsteht ein TD- Bild (vgl. Bild 9).

2.8.5 Sendeimpuls und Prüfkopfspektrum

Der im Modell angenommene Sendeimpuls bzw. dessen komplexes Spektrum kann über verschiedene Wege bestimmt werden:

- Es besteht die Möglichkeit, das Spektrum mit der gewünschten Anzahl von Frequenzstützstellen mit einem elektrotechnischen Vierpolmodell vorauszuberechnen. Für die Berechnung existiert in der BAM ein eigenständiges Programm (s.a. [57]), in das umfangreiche Konstruktions- und Materialdaten über den Prüfkopf eingegeben werden müssen. Entsprechende Daten sind z. B. die Abmessungen sowie die Schallgeschwindigkeit, die Dielektrizitätskonstante, die akustische Impedanz und der elektrisch- mechanische Kopplungsfaktor des Schwingers, das Material und der Winkel des Vorlaufkeils, Informationen über Klebe-, Dämpfungs- und Ankoppelschichten, sowie die Schallgeschwindigkeiten in allen auftretenden Schichten. Die berechneten Frequenzstützstellen werden komplex, d. h. in Form von Real- und Imaginärteilen, in einer Datei zum späteren Einlesen gespeichert.⁵⁸ Die

⁵⁷ Beierke, S.: Entwurf einer Vierpol- Übertragungskette zur Optimierung von Ultraschallprüfköpfen. Studienarbeit, TU Berlin, 1986, angefertigt im ehemaligen Laboratorium 6.21 an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

⁵⁸ Boehm, Rainer; Erhard, Anton; Schulz, Eduard; Wüstenberg, Hermann: Winkelspiegel- und Rissspitzenecho in Abhängigkeit von der Reflektororientierung: Ein Vergleich von Messung und Modellrechnung in TD- Bilddarstellung. Vortrag DACH- Jahrestagung d. DGZfP, Berichtsband 52.2, Lindau, 13.-15.05.1996, S.568f

Vierpolspektren und -impulse haben eine sehr gute Übereinstimmung in der Impulsform, insbesondere auch hinsichtlich der typischen Asymmetrie, mit den realen Echosignalen. Daher werden sie hier als Referenz für andere synthetische Impulsnäherungen verwendet.

- Es besteht die Möglichkeit, das Spektrum mit einer empirischen Formel von einer im Modell integrierten Funktion berechnen zu lassen. Die Frequenzstützstellen werden aus einer synthetisierten Gaußkurve mit einer vorgegebenen Bandbreite entnommen. Diese Formel wurde im Rahmen dieser Arbeit leicht modifiziert, so dass mit der neuen Formulierung Frequenzanteile oberhalb der Mittenfrequenz besser simuliert werden. Die auf diese Weise synthetisierten Spektren erzeugen symmetrische Impulse, während bei den Impulsen aus dem Vierpolmodell einem schnellen Anstieg stets ein langsamerer Abfall folgt. Bei allen bisherigen vergleichenden Rechnungen traten aber dadurch in den resultierenden A- bzw. TD- Bildern keine signifikanten Formabweichungen auf. Die Übereinstimmung der synthetischen mit den Vierpol- Spektren wird daher als ausreichend betrachtet. In den folgenden Bildern sind die mit den verschiedenen Methoden berechneten Spektren und Impulse für die Prüfköpfe MWB 45° 2 MHz, MWB 45° 4 MHz und SWB 45° 5 MHz der Firma Krautkrämer gegenübergestellt. Man erkennt im Spektrum die deutlich bessere Anpassung der neuen empirischen Formel an das Vierpol- Modell oberhalb der Mittenfrequenz. Dieser Effekt wird um so stärker, je höher die Mittenfrequenz des Prüfkopfes ist. Im mittleren Amplitudenbereich zeigt sich gleichzeitig, dass insbesondere bei den 4 und 5 MHz- Prüfköpfen der Kurvenverlauf noch etwas „bauchiger“ sein müsste, d. h. in diesem Bereich müsste die Bandbreite etwas größer sein. In den Impulsvergleichen ist vor dem Impulsschwerpunkt leider ein gegenläufiger Effekt zu erkennen, da die Abweichungen dort etwas größer geworden sind, als bei der alten Formulierung. Hinter dem Impulsschwerpunkt ist die neue Formulierung besser. Die empirische Formel zur Berechnung der synthetischen Spektren ist in den folgenden Gleichungen beschrieben.

$$de_{fr} = f_{ro} \cdot k_{ap}^{-1} \qquad \text{Gleichung 5}$$

de_{fr}: Abstand zwischen den Frequenzstützstellen [MHz]

f_{ro}: obere Grenzfrequenz des Spektrums [MHz]

k_{ap}: Anzahl der Frequenzstützstellen

$$DBfreq = fmitte \cdot 0,233$$

Gleichung 6

DBfreq: Bandbreite des Spektrums [MHz]

0,233: Formfaktor zur Anpassung des Spektrums an reale Spektren

$$freq = (jj - 1) \cdot defr$$

Gleichung 7

freq: Frequenz einer betrachteten Frequenzstützstelle [MHz]

jj: Laufzahl im Intervall [1, kap+1]

$$Spektrum(jj) = e^{-\left(\frac{freq - fmitte}{DBfreq + DBfakt}\right)^2}$$

Gleichung 8: modifizierte Formel zur Berechnung des synthetischen Spektrums

Die neue Formel zur Berechnung des synthetischen Spektrums in Gleichung 8 unterscheidet sich von der alten Formulierung durch den im Nenner des Exponenten eingeführten Faktor *DBfakt*.

$$DBfakt = 3 \cdot \pi \cdot e^{\frac{fmitte}{2}} \cdot \sin\left(\frac{jj}{2 \cdot kap}\right)$$

Gleichung 9: neuer Faktor in der Formel zur Berechnung des Spektrums

- Die experimentelle Ermittlung der Prüfkopfspektren nach Real- und Imaginärteil ist zwar möglich, wurde aber in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt, da die beiden anderen Ansätze für die gestellte Aufgabe der iterativen Modellierung genügend genau sind.

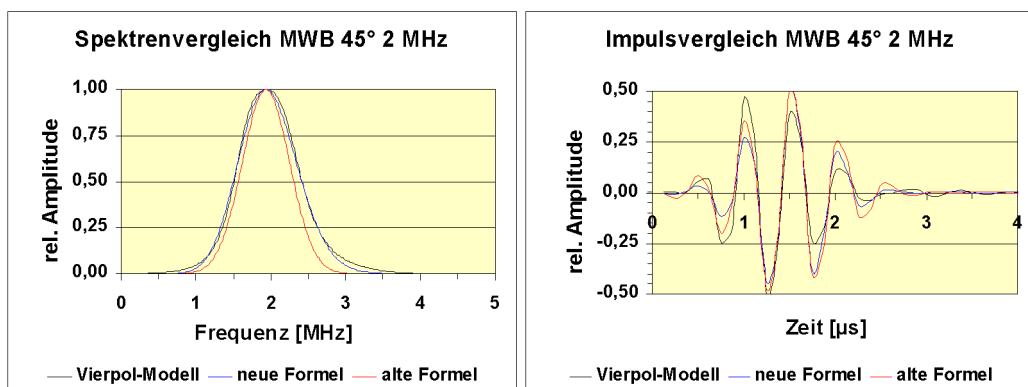


Bild 26: Spektren- und Impulsvergleich für den MWB 45° 2 MHz

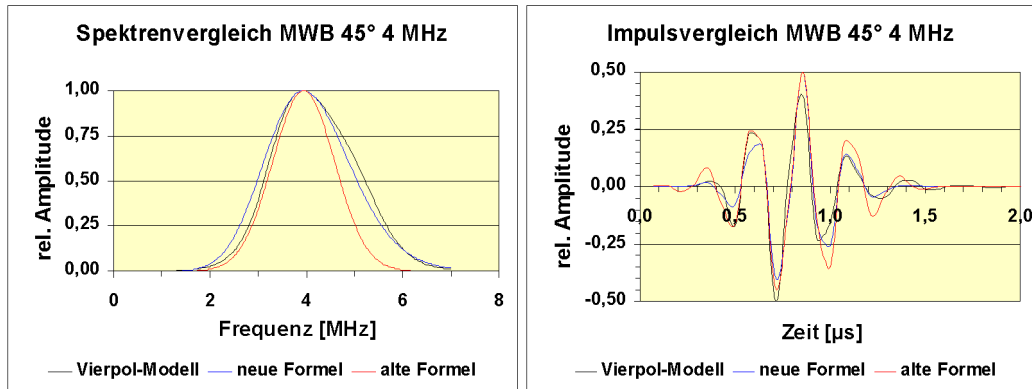


Bild 27: Spektren- und Impulsvergleich für den MWB 45° 4 MHz

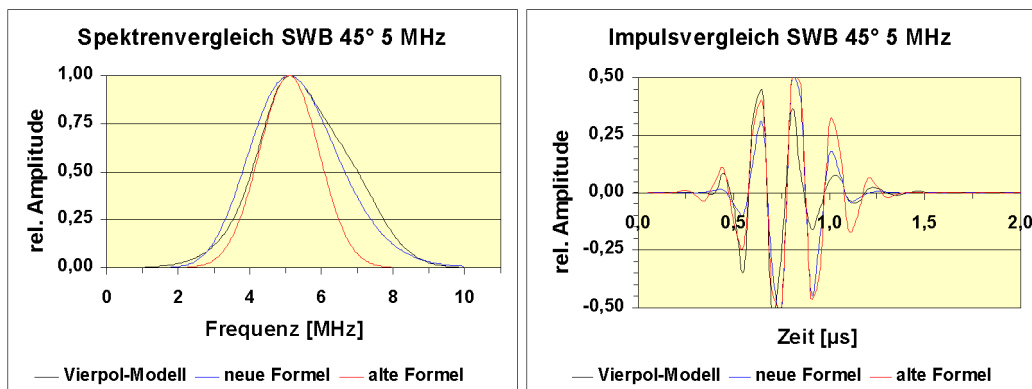


Bild 28: Spektren- und Impulsvergleich für den SWB 45° 5 MHz

Für kritische Fälle werden die Vierpol- Spektren bevorzugt. Dies ist vom Zeitaufwand für eine TD- Bild- Berechnung her unerheblich. Allerdings muss das jeweilige Prüfkopfspektrum durch eine langwierige Anpassung an die reale Prüfkopfsituation bestimmt werden, da vom Hersteller der Prüfköpfe die für das Vierpolmodell benötigten Angaben meist nicht vorliegen.

2.8.6 Analytische Beschreibung des Schallfeldes

Die mathematisch korrekte Beschreibung des Prüfkopfschallfeldes müsste wie die Berechnung des vom Fehler reflektierten Schallfeldes durch Integration über die Schwingerfläche erfolgen. Dieser zeitintensive Vorgang würde jedoch die Rechenzeit des Modells stark verlängern (ca. um den Faktor 2-10). Um diese Rechenzeiten zu vermeiden, kann man zwischen zwei Möglichkeiten wählen:

1. Man kann für alle interessierenden Raumpunkte (Voxel) des Prüfobjektes die Schallfeldinformationen in einer vorbereitenden Rechnung ermitteln und abspeichern. Das erfordert viel Arbeitsspeicher wegen der Frequenzstützenanzahl und muss alle Schallwegmöglichkeiten des Modells offen halten. Bei Wellenumwandlungen mit FERMAT- Wegberechnung versagt dieser Ansatz. Ein ähnlicher Weg wird auch im Modell „MEPHISTO“ der CEA (French Atomic Energy Commission, Frankreich) in Form des Schallfeldprogramms „CHAMP-SONS“ verwendet (s.a. [38]).
2. Man berechnet die Schallfelder für jede Prüfkopfposition aufs Neue und benutzt dazu analytische Näherungen, wie sie in Abschnitt 2.8.4 beschrieben sind. Die analytische Schallfeldbeschreibung (vgl. Bild 19) berücksichtigt die Vorlaufstrecke bei Berechnung geometrischer Größen in Form der schallfeldäquivalenten Vorlaufstrecke und bei Berechnung von laufzeitrelevanten Größen in Form der laufzeitäquivalenten Vorlaufstrecke (vgl. Gleichung 10).

$$VPL_{ae} = VPL \cdot \frac{c_1}{c_2} \qquad VPL_s = VPL \cdot \frac{c_2}{c_1}$$

VPL_{ae}: schallfeldäquivalente Vorlaufstrecke *VPL*: Vorlaufstrecke
VPL_s: laufzeitäquivalente Vorlaufstrecke *c₁*: Schallgeschwindigkeit in der
c₂: Schallgeschwindigkeit im Material *Vorlaufstrecke*

Gleichung 10: schallfeld- und laufzeitäquivalente Vorlaufstrecke

Die Näherung enthält wellenlängenabhängig das Entfernungsgesetz, die geometrische Richtwirkung mit Nahfeldkorrektur und die wellenlängenunabhängige Punktrichtwirkung. Für die verschiedenen Wellenmoden eines Prüfkopfes (transversal oder longitudinal) werden jeweils getrennte Näherungen verwendet.⁵⁸ Die Ursprünge der analytischen Formulierung gehen auf die Ansätze zur Schallfeldbeschreibung von Prüfköpfen von WÜSTENBERG⁴⁷, ERHARD⁵⁹ und BOEHM, wie in [60] dargestellt und zur physikalischen Elastodynamik von

⁵⁸ Erhard, Anton: Untersuchungen zur Ausbreitung von Longitudinalwellen an Oberflächen bei der Materialprüfung mit Ultraschall, Diss., TU Berlin, D83, 1982

⁶⁰ Möhrle, Walter; Wüstenberg, Hermann: Erfahrungen mit theoretischen Modellen für Schallfeld- und Impulsverhalten beim Bau von Sonderprüfköpfen für die Ultraschallprüfung. Vortrag DACH- Jahrestagung d. DGZfP, Berichtsband 28, Luzern, 06.-08.05.1991, S.204-215

LANGENBERG, MILLER, PURSEY⁴⁸ und KUTZNER⁶¹ zurück. Die Gültigkeit der Schallfeldnäherungen des Modells wurde durch viele experimentelle Untersuchungen belegt.⁵⁵

Das Prüfkopfschallfeld wird nach Abschnitt 2.8.4 durch eine analytische Formulierung aus dem Produkt zweier Teile beschrieben (vgl. Gleichung 11). Der erste Teil beschreibt die Entfernungsabhängigkeit des Schalldrucks von Rechteckschwingern auf der Bündelachse. Er besteht aus dem Entfernungsgesetz $A(z)$ und dem Ausbreitungsterm e^{-jkr} , die zusammen eine modifizierte Kugelwellenfunktion, für eine sich von einem einzigen Quellpunkt - in der Regel vom um einen schallfeldäquivalenten Wert verschobenen Schwingermittelpunkt - ausbreitende Kugelwelle, beschreiben. In Bild 29 ist der Schalldruckverlauf für die Prüfköpfe MWB 45 2 MHz und SWB 45 2 MHz bis zu einem Schallweg von 150 mm dargestellt, so wie sie das Modell verwendet. Bei kontinuierlicher Membrananregung oszilliert der Schalldruck aufgrund von Interferenzerscheinungen im Nahfeldbereich zwischen maximalen und minimalen Schalldruckwerten stark. Bei impulsförmiger Anregung werden die Interferenzerscheinungen und damit die Schalldruckschwankungen schwächer, je kürzer der Impuls ist. Bei sehr kurzen Impulsen ist der Schalldruck im Nahfeld nahezu konstant. Da die Schwinger im allgemeinen impulsförmig angeregt werden, schwankt der Schalldruck im Rechenmodell unterhalb der Nahfeldlänge nicht mehr sehr stark, wie in Bild 29 zu erkennen ist.⁶²

⁶¹ Kutzner, Jürgen: Grundlagen der Ultraschallphysik. Stuttgart, Teubner, 1983

⁶² Tschardtke, Dirk: Experimentelle Verifikation von theoretischen Modellen zur Empfindlichkeitseinstellung bei SEL- Winkelprüfköpfen für die Ultraschallprüfung. Diplomarbeit, TU Berlin, 1997, S. 25f

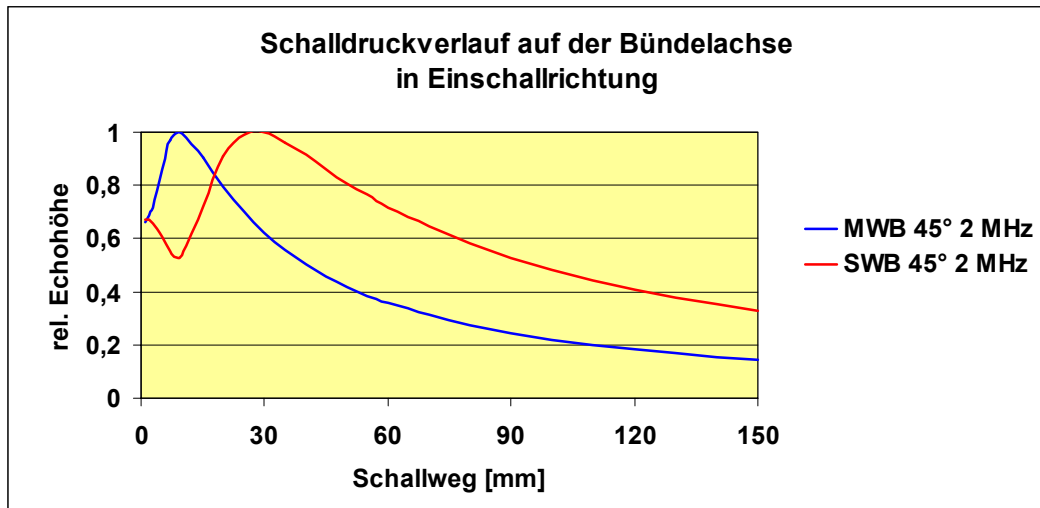


Bild 29: Schalldruckverlauf für die Prüfköpfe MWB 45° N2 und SWB 45° N2

Der zweite Teil der analytischen Formulierung beschreibt die Richtcharakteristik des Prüfkopfes. Dieser Ansatz ist jedoch nur in genügender Entfernung (im Fernfeldbereich) vom Prüfkopf gültig. Im Nahbereich ist diese Beschreibung an sich unzulässig. Um aber dennoch die einfache Produktdarstellung für das Schallfeld auch im Bereich um die Nahfeldlänge herum ($s \geq 0.6 \cdot N$) zu benutzen, muss man die Richtcharakteristik in diesem Bereich modifizieren. Die Richtcharakteristik wird dazu im Nahbereich des Prüfkopfes durch Anwendung folgender Erweiterung verändert. Als Nahbereich wird der Bereich unterhalb der frequenzabhängigen Nahfeldlänge definiert. Aufgrund der im Frequenzbereich vorzunehmenden Berechnungen kann der Nahbereich nicht, wie allgemein üblich, nur über die Nahfeldlänge der Mittenfrequenz des Spektrums definiert werden. Vielmehr existiert für jede Frequenzstützstelle des eingesetzten Spektrums eine eigene Nahfeldlänge. Unterschreitet die Entfernung vom Prüfkopf zum Fehlerelement die 1.5-fache Nahfeldlänge einer Frequenzstützstelle, so wird an dieser Stelle die Schwingerabmessung künstlich verkleinert. Der verkleinerte Schwinger wird anschließend für die Berechnung der Richtcharakteristik des Prüfkopfes verwendet. Er findet im Rechenmodell sonst keine Anwendung. Dem verkleinerten Schwinger entspricht eine größere Divergenz und somit ein größerer Bündeldurchmesser. Je näher ein Fehlerelement an den Prüfkopf heranrückt, desto kleiner wird die Schwingerabmessung. Mit diesem Ansatz hat die Schallfelddarstellung die Form:

$$p(r) = A(z) \cdot e^{-j \cdot k \cdot r} \cdot R_w(\alpha) \cdot P_{ktri}(\alpha)$$

Entfernungsgesetz · Ausbreitungsterm · Richtcharakteristik

Gleichung 11: Schallfelddarstellung des Modells

Mit dieser Vorgehensweise können zwar Echosignale und damit A- und TD-Bilder berechnet werden, die Form der Wellenfronten ist jedoch im Nahbereich wegen der Kugelwellenformulierung für die Wellenausbreitung eine Kugelfläche und weicht von der tatsächlichen Form mehr oder weniger ab. BOEHM hat die Impulsausbreitung für den Winkelprüfkopf MWB 45 N 4 sowohl mit der analytischen Beschreibung, als auch auf der Basis einer Integration über Punktquellen in einer Ebene senkrecht zur Einschallebene berechnet. Die Ergebnisse sind in Bild 30 und Bild 31 gegenübergestellt. Die einzelnen Impulse haben einen Abstand von 5 μ s. In der Darstellung für die analytische Beschreibung erkennt man deutlich die starke kreisförmige Krümmung der Wellenfront, je näher der Impuls am Schwinger liegt. Bei der Berechnung auf Basis der Punktquellensynthese mit einer Integration über die Schwingerfläche tritt dieser Effekt erwartungsgemäß nicht auf. Im Nahbereich entstehen in der Realität Zylinderwellen von den Schwingerkanten. Diese werden von der analytischen Formulierung nicht wiedergegeben, sie könnten aber durch die Einführung von Randwellen an der Schwingerkante simuliert werden. Wegen der fehlenden Interferenzmöglichkeit der von den Punktquellen am Schwingerrand ausgehenden Wellen, werden die Randwellen bei der Punktquellensynthese automatisch erzeugt. Bei der analytischen Schallfeldbeschreibung stehen dem Vorteil der schnellen und interaktiven Rechentechnik die Grenzen der Anwendbarkeit vor allem im Nahfeld gegenüber. Die Näherungen können bei allen Problemen, bei denen die Annahme von Kugelwellen nicht stören - und das sind die meisten Prüfsituationen in der zerstörungsfreien Prüfung - angewendet werden.

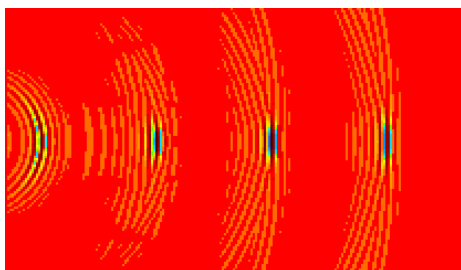


Bild 30: analytische Beschreibung der Impulsausbreitung

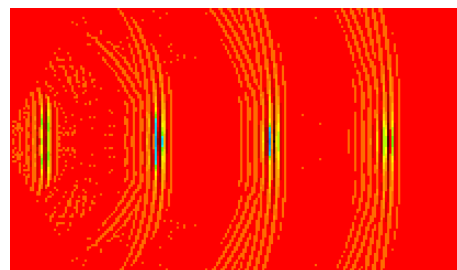


Bild 31: Impulsausbreitung auf Basis der Punktquellensynthese

Die Rechenzeitzunahme bei Verwendung der Punktquellensynthese konnte von BOEHM durch eine Vorausberechnung des Prüfkopfschallfeldes und Speicherung in einer Datei deutlich reduziert werden. In der Datei werden die Schallfelddaten diskreter Punkte innerhalb eines vorzugebenden Volumenbereichs abgelegt. Bei dieser Berechnung wird die Schallfeldinformation des betrachteten Ortes durch eine Interpolation zu den benachbarten diskreten Schallfeldpunkten ermittelt. Trotzdem nimmt die Rechenzeit gegenüber der Näherungsrechnung fallweise beträchtlich zu. In den zukünftigen Modellversionen könnten auch beide Ansätze miteinander kombiniert werden. Dadurch könnte im Geltungsbereich der Näherung schnell gerechnet werden und bei Überschreiten dieses Bereichs automatisch oder halbautomatisch mit der Punktquellensynthese weitergerechnet werden.

2.8.7 Geometrische Beschreibung der Prüfanordnung (Nachweis von schräg liegenden Rissen)

In Bild 32 sind die wichtigsten geometrischen Größen einer simulierten Prüfanordnung zum Nachweis von schräg liegenden Rissen mit dem Winkelspiegelfeffekt dargestellt. Als Bezugspunkt dient der Schallaustrittspunkt an der Prüfkopfsohle. Von dort ausgehend werden die beiden fiktiven Schallquellenpunkte für Transversal- und Longitudinalwellen innerhalb des Prüfkopfes berechnet. Dazu wird die Vorlaufstrecke für jeden Wellenmode in eine schallfeldäquivalente Vorlaufstrecke umgerechnet. Die beiden Strecken sind in Bild 33 mit den Bezeichnungen $VPLI$ für die Transversalwelle und $VPLIL$ für die Longitudinalwelle eingezeichnet. Die schallfeldäquivalente Vorlaufstrecke verlängert den Schallstrahl unter Beibehaltung des Einschallwinkels im Prüfkörper in den Plexiglaskeil hinein. Die Fehlertiefe BFT bezieht sich auf den Abstand zwischen der Fehlermitte und der Prüffläche. Sie wird vom Modell um den Anteil der Vorlaufstrecke in Tiefenrichtung vergrößert. Auch hier werden beide Wellenmoden unterschieden. Auch alle anderen Größen (z. B. die Wanddicke DI und die Prüfkopfposition in bezug auf die Reflektormitte X) werden um den Vorlaufstreckenanteil in Tiefen- bzw. Dickenrichtung vergrößert. Die Größen A und B geben den Abstand des betrachteten Fehlerelementes von der Fehlermitte an. Die schallfeldäquivalente Vorlaufstrecke wird bei der Berechnung aller geometrie- und schallfeldbedingten Einflüsse verwendet. Für die Berechnung von lauf-

zeitrelevanten Größen (z. B. dem Phasenmaß) wird eine laufzeitäquivalente Vorlaufstrecke eingesetzt.

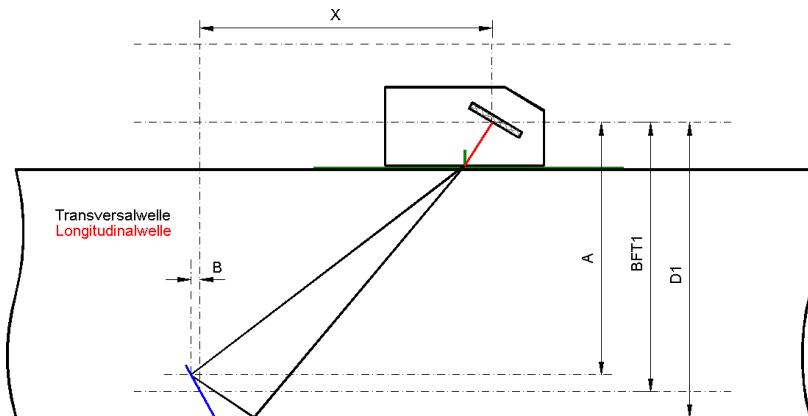


Bild 32: Geometrische Entfernungen zwischen Prüfkopf und Reflektorelement

Die Rückwand wird als unendlich ausgedehnte Fläche (Spiegelebene) betrachtet. Die geometrischen Größen für den Sender (Prüfkopf 1) werden direkt aus der Prüfanordnung berechnet. Für die Berechnung der entsprechenden Größen des Empfängers (Prüfkopf 2) wird die vorliegende Prüfanordnung mit der Rückwand als Spiegelebene nach unten projiziert (vgl. Bild 33). Diese Vorgehensweise setzt eine planparallele Geometrie zwischen der Ankopplungsfläche und der Rückwand voraus.

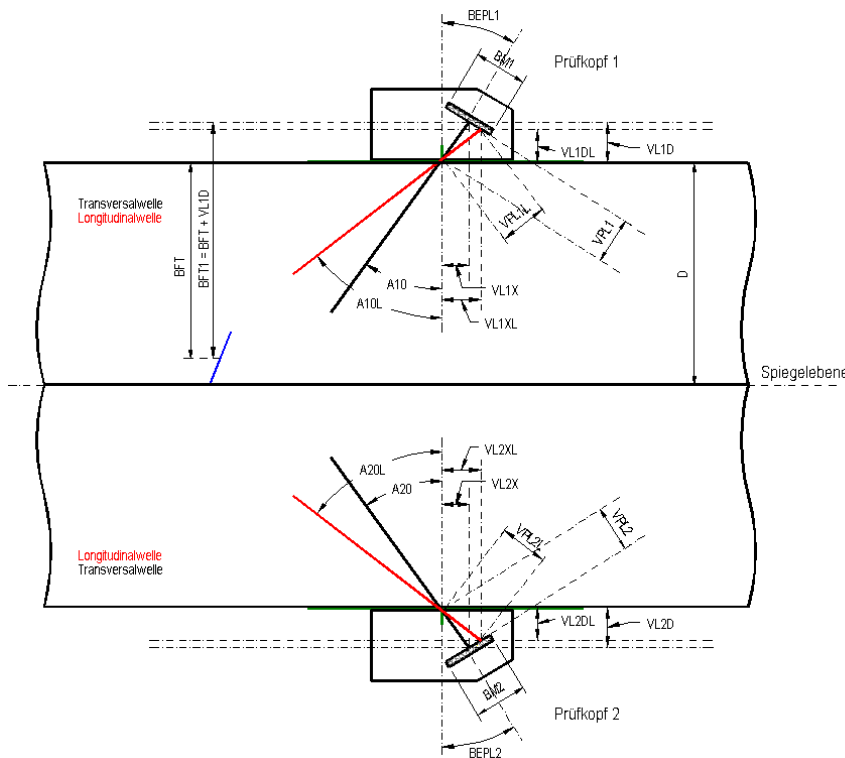


Bild 33: Geometrische Beschreibung der Prüfanordnung im planparallelen Fall

Da neben der Reflexion an der Rückwand und an Fehlern keine Krümmungen und zusätzlichen Grenzflächen berücksichtigt werden, erhält man ein stabiles Modell, das auch mit komplizierten Fehlergeometrien fertig wird. Die derzeitige einfache Formulierung der Geometrieverhältnisse ist für die Beschreibung einer Prüfanordnung mit einer gekrümmten Rückwand, wie in Bild 34, nicht geeignet. Die Spiegelung kann dann nicht mehr an einer Ebene durchgeführt werden, sondern muss an der Tangentialebene auf der gekrümmten Oberfläche im jeweiligen Reflexionspunkt erfolgen (vgl. Bild 34). Die Bestimmung des Auftreffpunktes der Wellenfront auf der Rückwand wird dann schwieriger, wenn an Stelle der Reflexion eine Wellenumwandlung stattfindet und das Prinzip von FERMAT angewendet werden muss, um den Reflexionsort zu bestimmen.

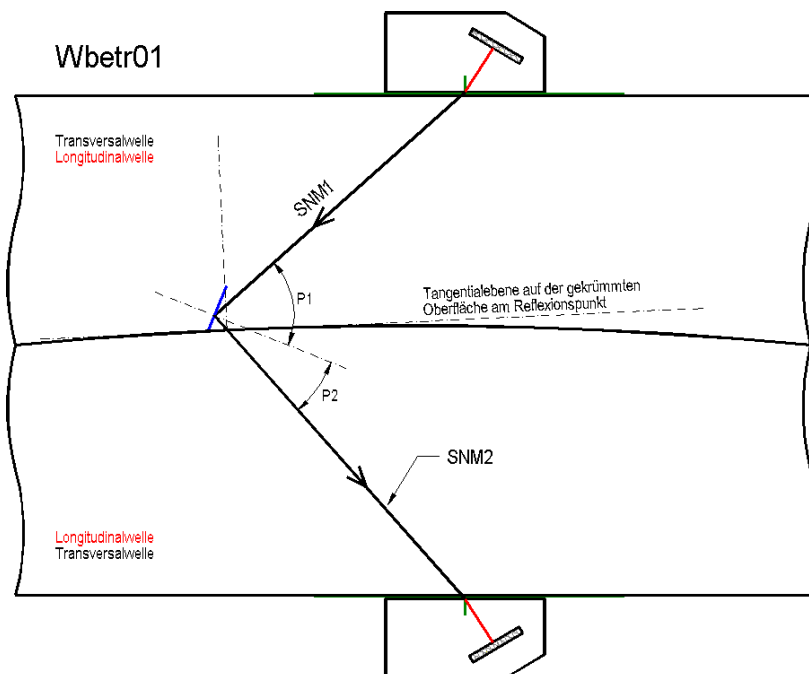


Bild 34: Geometrische Beschreibung der Prüfanordnung mit gekrümmter Rückwand

Die Struktur des für die iterative Modellierung verwendeten Programms hat die im Flussdiagramm (Bild 35) dargestellte Form. Ein Eingabeteil mit der in Tabelle 5 in Anhang 5.6 wiedergegebenen Parameterliste dient der allgemeinen Eingabe von beliebigen Daten. Für eine iterative Arbeitsweise kann ein begrenzter Teil der Parameter auch manuell verändert werden, um die Anpassung an reale Fehlersituationen in kurzer Zeit zu ermöglichen. Im Flussdiagramm sind die Einsprungpunkte für die Verwendung im Rahmen der in Abschnitt 3.6 erläuterten Evolutionsstrategie und für manuelle Iteration (manuelle Parametermodifikation) eingetragen.

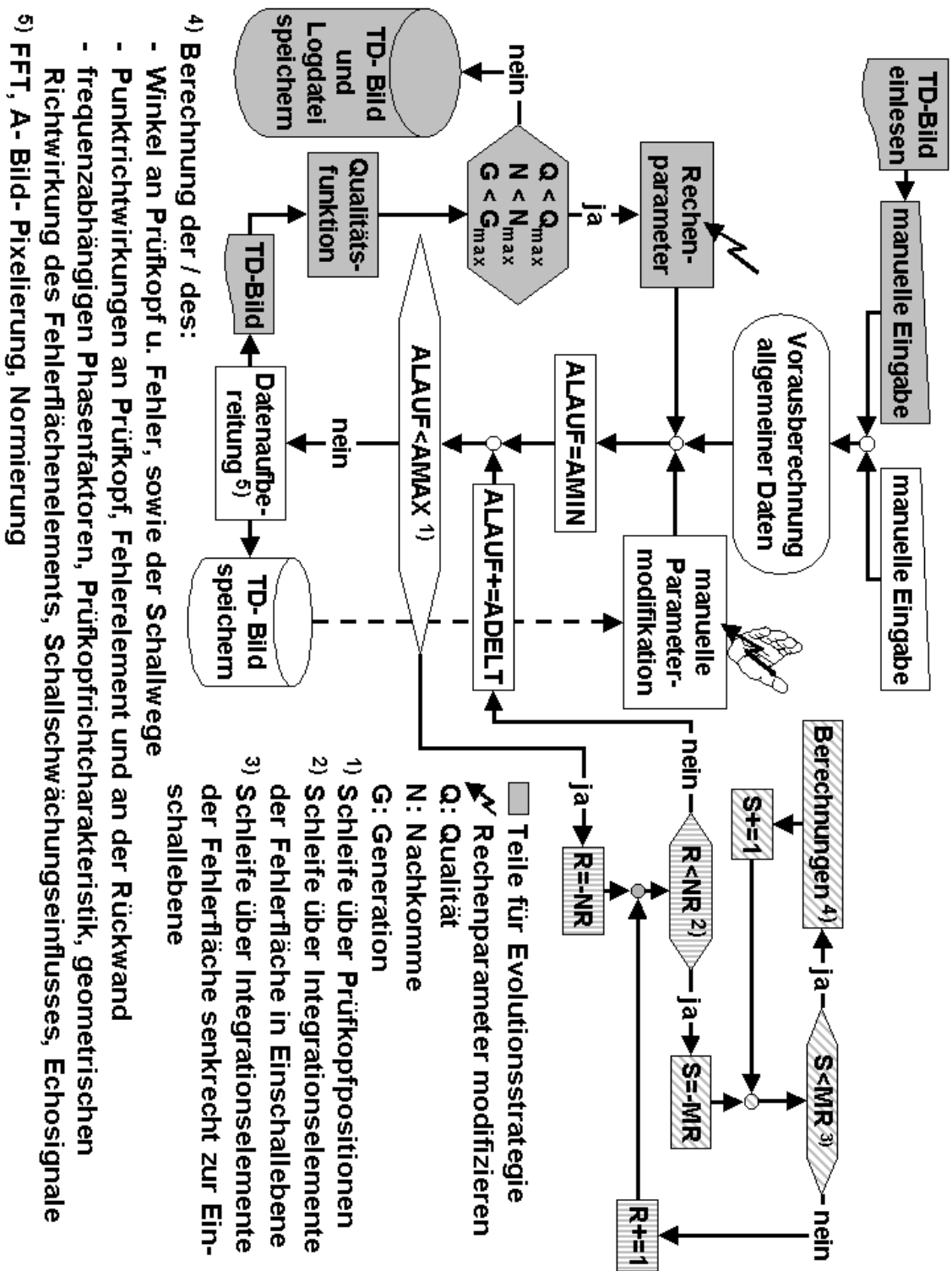


Bild 35: Struktur des für die iterative Modellierung verwendeten Programms

3 Verifikation und Anwendung der Modellvorstellungen im FSAM

3.1 Beschreibung des Prüfsystems

Für die im Rahmen der Untersuchung des Rechenmodells durchgeführten Messungen wurde das in Bild 36 gezeigte Prüfsystem eingesetzt. Als Ultraschallmessgerät diente ein USIP 20 der Fa. Krautkrämer. Die Ultraschallsignale wurden auf einen industriellen Mess- PC mit einer Analog- Digital- Wandlerkarte übertragen. Es wurden MWB-, SWB-, und WB- Winkelprüfköpfe der Serie E von Fa. Krautkrämer verwendet. Die Prüfköpfe hatten Frequenzen von 2 und 4 MHz und Einschallwinkel von 45° und 70°.

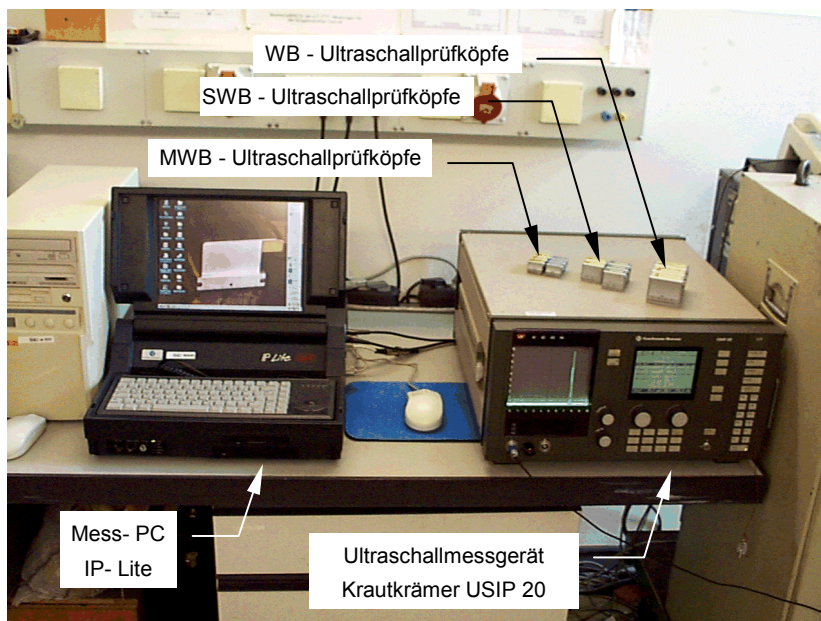


Bild 36: Mess- PC, Ultraschallmessgerät und -prüfköpfe

Die Prüfköpfe wurden in einer Prüfkopfhalterung wie in Bild 37 gezeigt befestigt, die durch ein in zwei Achsen steuerbaren Manipulator bewegt werden konnte. Mit dieser Anordnung wurden mechanisierte Prüfungen durchgeführt. Für die Messungen standen ferritische Testblöcke mit funkenrodierten Nuten unterschiedlicher Tiefenausdehnung und Schräglage zur Verfügung (z. B. Bild 38). Die Nutenbreite betrug etwa 200 μm , die Nutdachfläche sollte daher keinen merklichen Einfluss auf die Messungen haben. Es wurde ein umfangreicher Messdatensatz für Vergleiche mit dem Rechenmodell angefertigt.

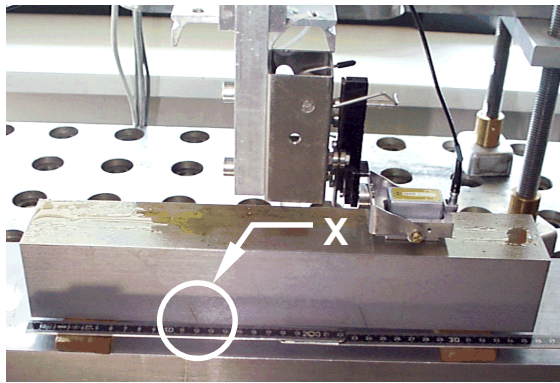


Bild 37: Messanordnung mit SWB 70° 2 MHz

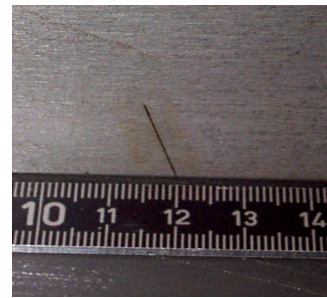


Bild 38: Einzelheit X, Nut, 15 mm tief, Neigung: -20°

In Bild 39 ist die Echoanzeige einer Nut auf dem Leuchtschirm des Ultraschallmessgerätes bei 160 mm Schallweg dargestellt. Bild 40 zeigt das auf dem Mess- PC digitalisierte A- Bild. Durch entsprechende Justierung kann das gewünschte A- Bildformat eingestellt werden. Die Echopositionen müssen zu Beginn der Messungen mit Hilfe des Rückwandechos am Kontrollkörper 1 justiert werden. Anschließend sind zuverlässige und reproduzierbare Messungen mit dem Prüfsystem möglich. Die Linearität des Verstärkers im Ultraschallmessgerät wurde überprüft.

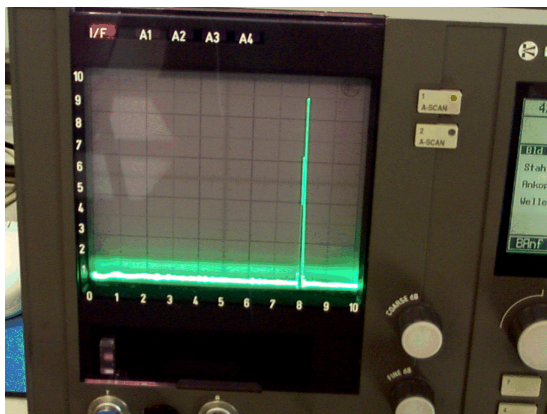


Bild 39: Echoanzeige der Nut (15 mm, -20°) auf dem Leuchtschirm des Ultraschallmessgerätes bei acht Skalenteilen (= 160 mm Schallweg)

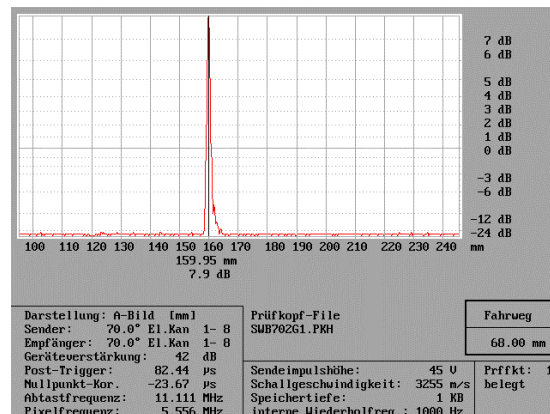


Bild 40: Echoanzeige der Nut (wie in Bild 39) auf dem Mess- PC

3.2 Untersuchung der Prüfkopfschallfeldbeschreibung

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurde zunächst das Rechenmodell von seiner bisherigen Plattform Quick Basic bzw. Visual Basic in die Sprache Visual C++ portiert. Anlass war die Nutzung einer benutzerfreundliche-

ren Benutzeroberfläche mit Fenstertechnik und Mausbedienung und insbesondere die erheblich höhere Rechengeschwindigkeit. Durch begleitende Vergleiche zwischen Messung und Modellrechnung konnte die Anpassung des Rechenmodells an die Realität erheblich verbessert werden. Einige der im Modell enthaltenen Näherungsformeln wurden dabei so überarbeitet, dass sie jetzt die in Abschnitt 2.8.4 beschriebene Form haben. So verwendeten einzelne Programmstellen, an denen Eigenschaften der Longitudinalwelle beschrieben werden, ehemals die gleichen Routinen wie für die Transversalwelle. Dies erfolgte aus der Erfahrung heraus, dass die dort auftretenden Abweichungen bei der Berechnung der Longitudinalwelle nicht bedeutend waren. Außerdem wurde dadurch die Menge des verwendeten Programmcodes kleiner gehalten und seine Übersichtlichkeit gefördert. An diesen Stellen wurden nun aber doch zusätzliche an die jeweilige Wellenart angepasste Routinen eingefügt, um die Genauigkeit der Berechnungen zu steigern. Die Überarbeitungen und Verbesserungen des Rechenmodells liefern die Grundlage für alle weiteren Untersuchungen und stellen einen wesentlichen Teil der durchgeführten Arbeiten dar.

Der Erfolg der durchgeführten Veränderungen im Quellcode wird anhand der Prüfkopfschallfeldbeschreibung in verschiedenen Abständen von der Schwingeroberfläche gezeigt. Die Darstellung des Entwicklungsstandes des schnellen, halbanalytischen Modells anhand von Beispielen auf der Jahrestagung der DGZfP im Jahr 1999 von BOEHM, ERHARD und WÜSTENBERG⁵⁵ gab den Anlass für die Berechnung der folgenden Bilder. In dem Beitrag wurde deutlich gemacht, dass die früher verwendeten Näherungen für die Prüfkopfschallfelder zwar in den meisten der betrachteten Fälle genau genug sind. Aber im Bereich des Nahfeldes zeigen sich jedoch Abweichungen, da dort der Geltungsbereich der Näherungsformeln überschritten wird. In der Veröffentlichung wurde dazu die Abhängigkeit der Echohöhe vom seitlichen Abstand der Schallbündelachse zur Mitte eines Kreisscheibenreflektors mit 3 mm Durchmesser untersucht. In Bild 41 sind die Daten aus [55] dargestellt. Die Kurve für die damalige Näherungsrechnung ist als „frühere Formelnäherung“, die der Punktquellensynthese als „Punktsynthese“ bezeichnet. Zusätzlich wurden die Echohöhen der korrigierten Näherungsformulierung berechnet und in das Bild mit der Bezeichnung „korrigierte Formelnäherung“ eingefügt. Die korrigierte Formelnäherung beschreibt die Amplitudenverhältnisse deutlich besser. Die Kurve verläuft in geringerem Abstand von der Messung, was einem breiteren Schallfeld entspricht

und durch Korrekturen in der Richtcharakteristik erreicht wurde. Der „Wendepunkt“ in der Kurve der alten Formelnäherung bei etwa 3.5 mm seitlichem Abstand entspricht dem Übergang von der Haupt- zur ersten Nebenkeule des Schallfeldes. Hier sinken die Amplituden überdurchschnittlich stark ab und ergeben größere Abweichungen von den tatsächlichen Echohöhen. Bei der neuen Formulierung erfolgt dieser Übergang in deutlich schwächerer Form, ist aber im Vergleich zur Messung immer noch überbetont. Früher trat bei 3 mm seitlichem Abstand die größte Abweichung von -26 dB auf, sie liegt jetzt bei -7 dB. Das durchschnittliche Amplitudenverhältnis ist von 16.9 auf 2.9 dB gesunken.

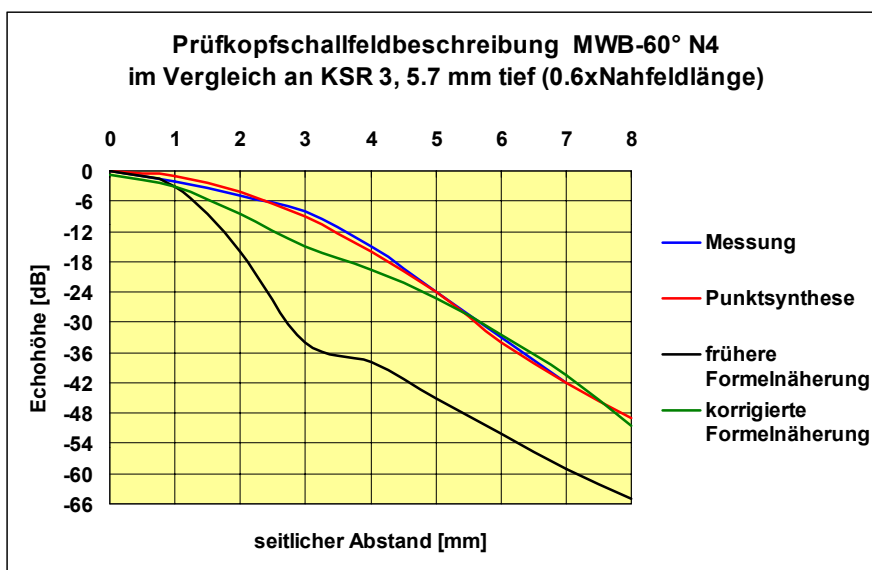


Bild 41

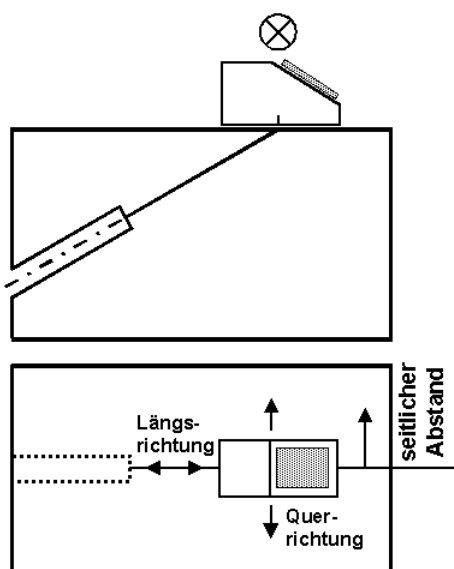


Bild 42: Skizze der Messanordnung

Die in Bild 41 eingetragenen Amplitudenwerte stammten bei der ursprünglichen Untersuchung nicht von einer einfachen Abtastung senkrecht zum Zentralstrahl (Querfahrt), sondern wurden auf folgende Weise ermittelt. Im jeweiligen seitlichen Abstand wurde eine Abtastung in Längsrichtung durchgeführt (vgl. Bild 42) und das Maximum der dazugehörigen Amplituden in das Bild eingetragen. Die Prüfkopfpositionen liegen daher in der Querrichtung nicht auf einer Geraden, wie dies bei einer Querfahrt der Fall wäre. Diese Vorgehensweise ist relativ aufwändig und vor allem messtechnisch sehr schwierig durchzuführen, da die Prüfkopfpositionierung bei dieser Methode sehr genau sein muss. Für die folgenden Untersuchungen der Prüfkopfschallfeldbeschreibung wurden daher echte Längs- und Querfahrten an verschiedenen Flachbodenbohrungen durchgeführt. Es wurden die Prüfköpfe MWB 45° und 70° mit Frequenzen von 2 und 4 MHz verwendet. Die Flachbodenbohrungen hatten einen Durchmesser von 3 mm und waren senkrecht zum Zentralstrahl des jeweiligen Prüfkopfes orientiert (-45° bzw. -20°). Für jeden Prüfkopf wurden Messungen und Rechnungen in beiden Abtastungsrichtungen an vier Bohrungen in verschiedener Tiefenlage durchgeführt. Die in den 32 Bildern dargestellten Resultate geben einen Überblick zu den Eigenschaften der Näherung. Jedem Bild kann die Tiefenlage der Bohrung und der auf die Nahfeldlänge des verwendeten Prüfkopfes bezogene Abstand zwischen der Schwinger- und der Bohrungsoberfläche entnommen werden. Die Prüfkopfposition mit der maximalen Amplitude entspricht der Nullposition in den einzelnen Kurven. Die ersten acht Bilder (Bild 43 - Bild 50) zeigen die Ergebnisse für den MWB 45° N2. Die Abstände der Bohrungen entsprechen der 1.1-; 2.2-; 3- und 4.1-fachen Nahfeldlänge. In Bild 43 erkennt man, dass sich im Bereich hinter dem Maximum (hinter der Nahfeldlänge) die Ergebnisse der Formelnäherung und der Punktquellensynthese kaum unterscheiden. Während im Bereich vor dem Maximum (Nahfeldbereich) die mit der Formelnäherung berechneten Amplituden deutlich zu stark abfallen, da hier der Geltungsbereich der Formelnäherung überschritten wird. Etwa 4 mm vor dem Maximum beträgt die Abweichung der Formelnäherung ca. 7 dB. Der Vergleich der Querfahrt in Bild 44 zeigt, dass die Echohöhen mit zunehmenden Abstand von der Reflektormitte zu stark abnehmen, da hier die mit der Näherungsformel berechnete Schallfeldbreite zu gering ist. Die Punktquellensynthese liefert gegenüber der Messung gelegentlich abweichende Echohöhen, was zum Teil auf messtechnische Probleme, zum Teil aber auch, wie in Bild 43, auf bei der Punktquellensynthese nicht beachtete Effekte, wie z. B. das Auftreten von

Kriechwellen (s.a. [59]) beim Winkelprüfkopf MWB 45° N2 zurückzuführen ist. Grundsätzlich fällt auf, dass die Punktquellensyntheserechnung in Abständen unterhalb der Nahfeldlänge deutlich bessere Echohöheneinschätzungen als die Näherung ermöglicht. Bei Benutzung der Punktquellensynthese für die Modellierung muss aber darauf geachtet werden, dass die Schallfelder im Nahfeldbereich für einen genügend großen Raumbereich berechnet werden. Wenn dieser Raumbereich zu klein ist, dann findet das Rechenmodell nicht für jeden zu berechnenden Reflektorpunkt die notwendigen Schallfeldinformationen und die berechneten Amplituden sinken dann zu stark ab. Diesen Effekt erkennt man in Bild 59 und angedeutet in Bild 61, anhand des starken Amplitudenabfalls vor dem Maximum. Die Grenzen des vorausberechneten Schallfeldvolumens wurden für den MWB 70°N2 offenbar zu schmal gesetzt.

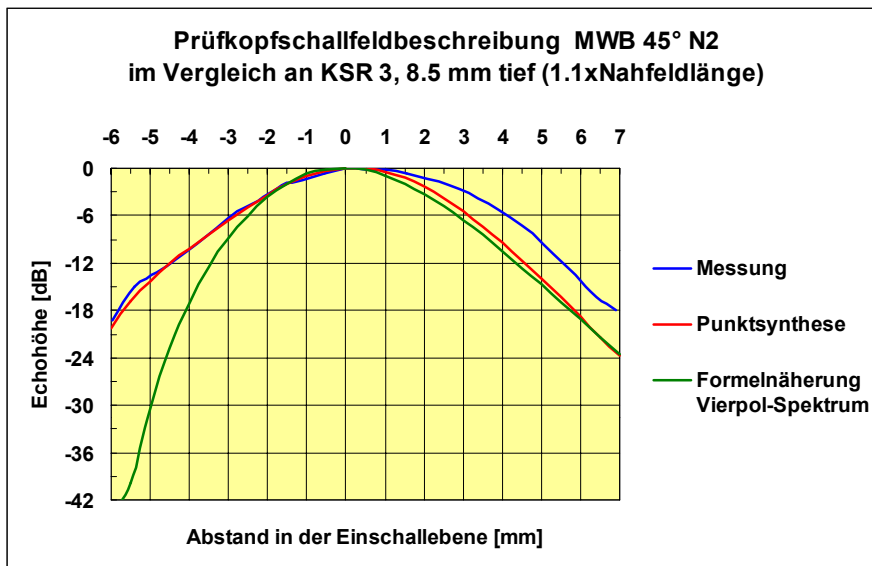


Bild 43

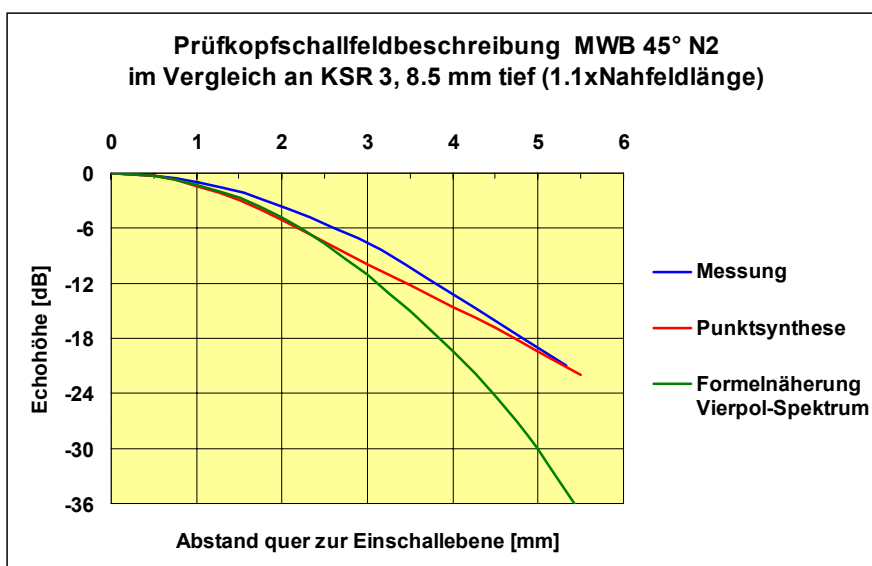


Bild 44

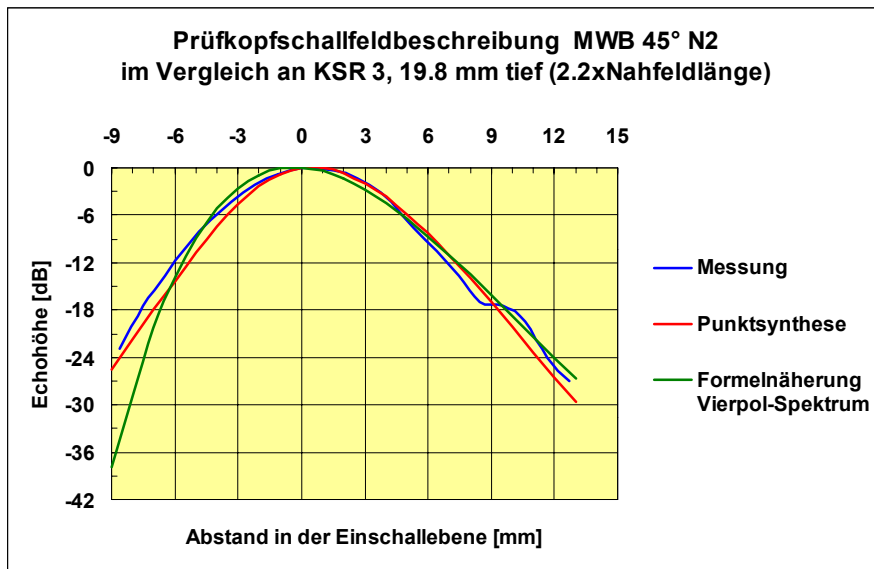


Bild 45

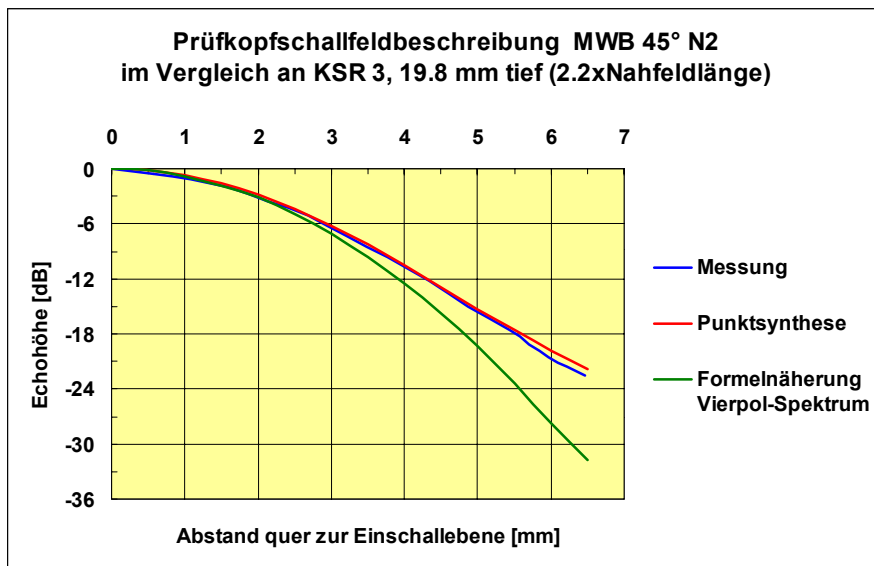


Bild 46

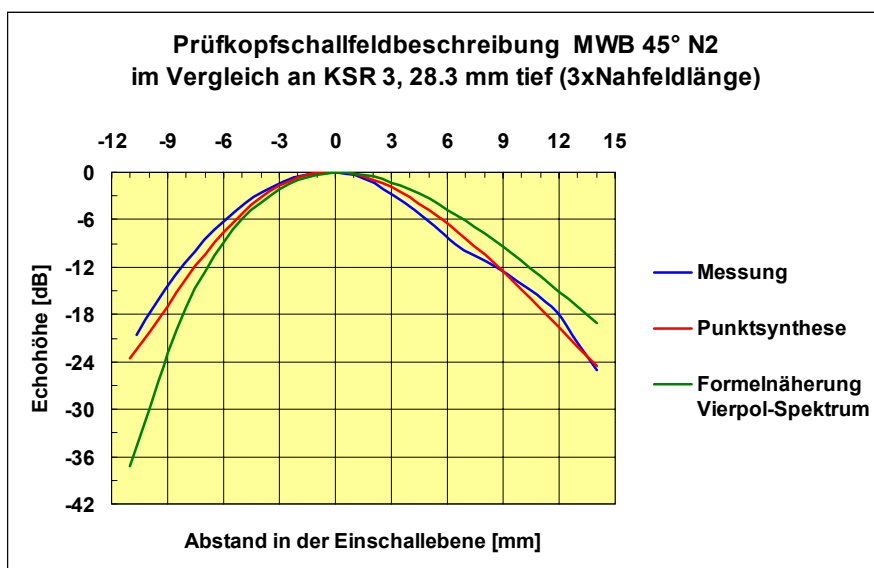


Bild 47

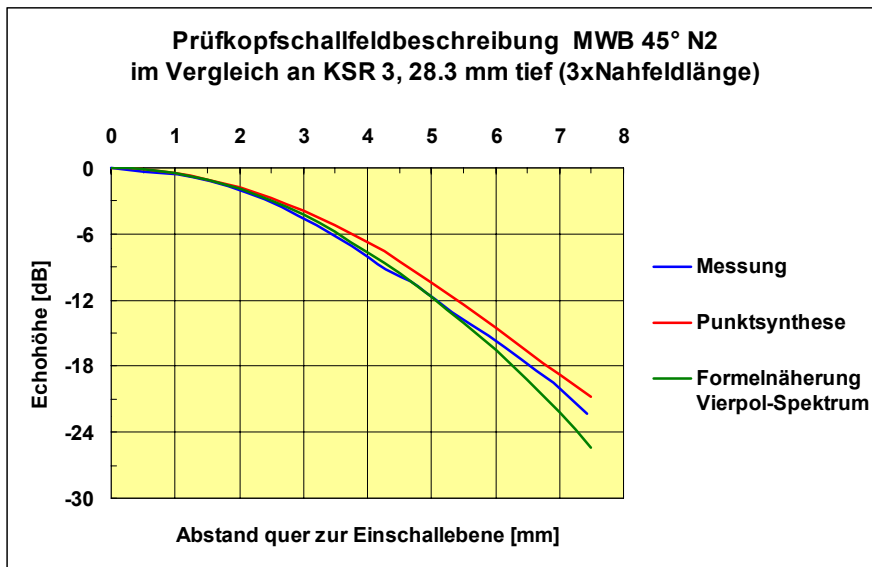


Bild 48

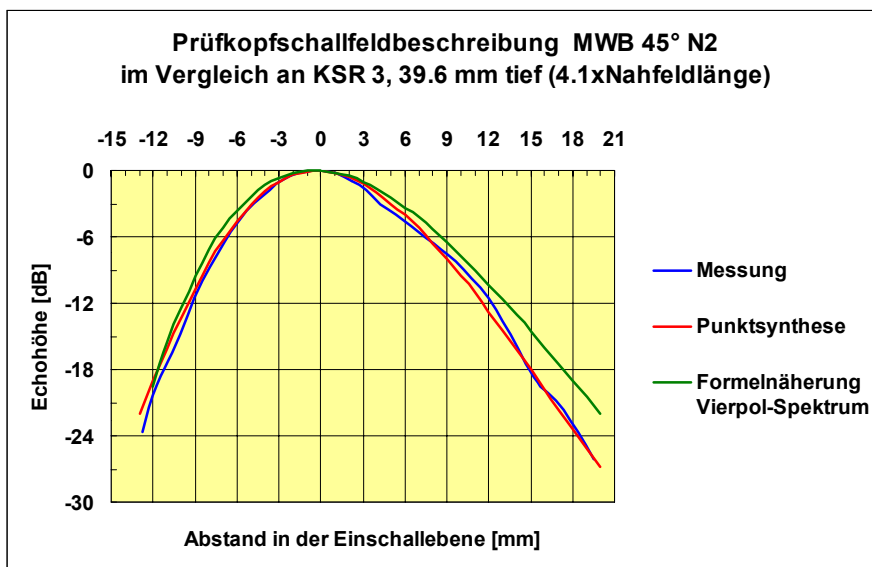


Bild 49

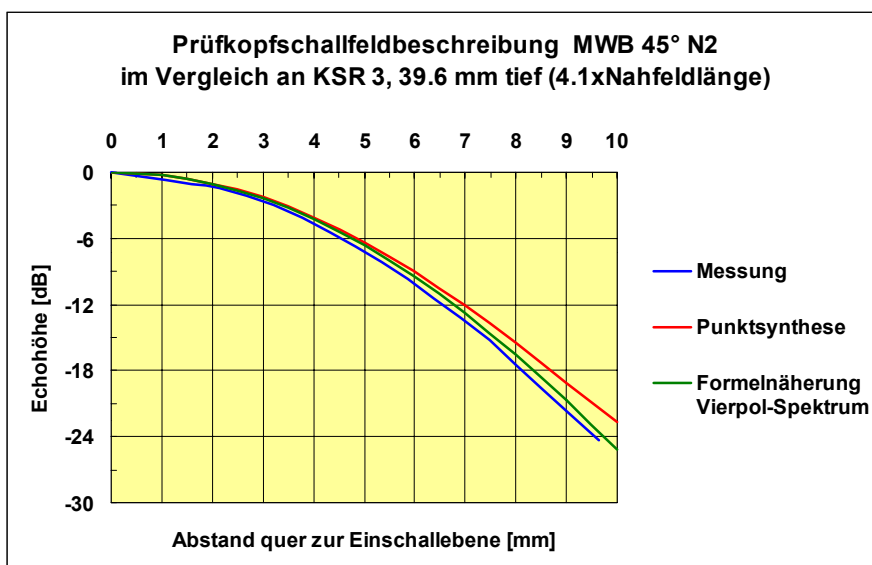


Bild 50

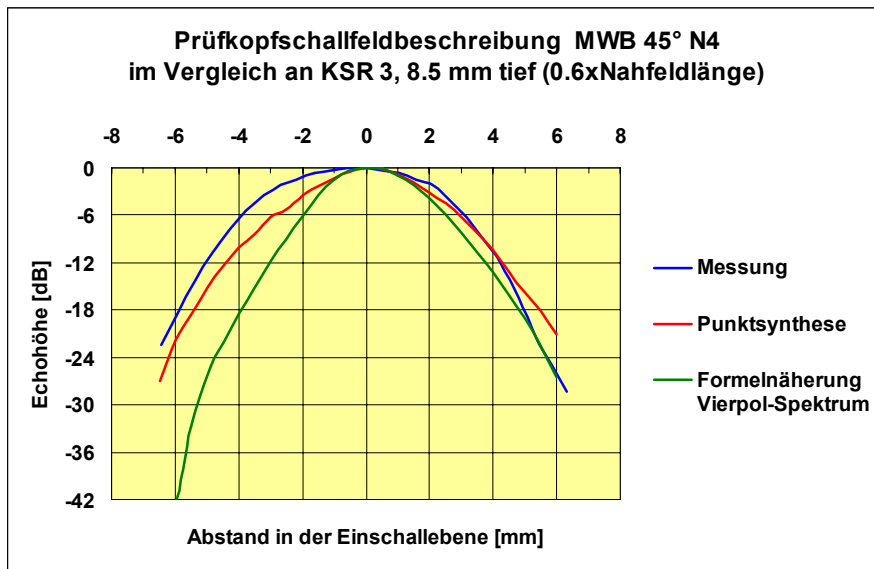


Bild 51

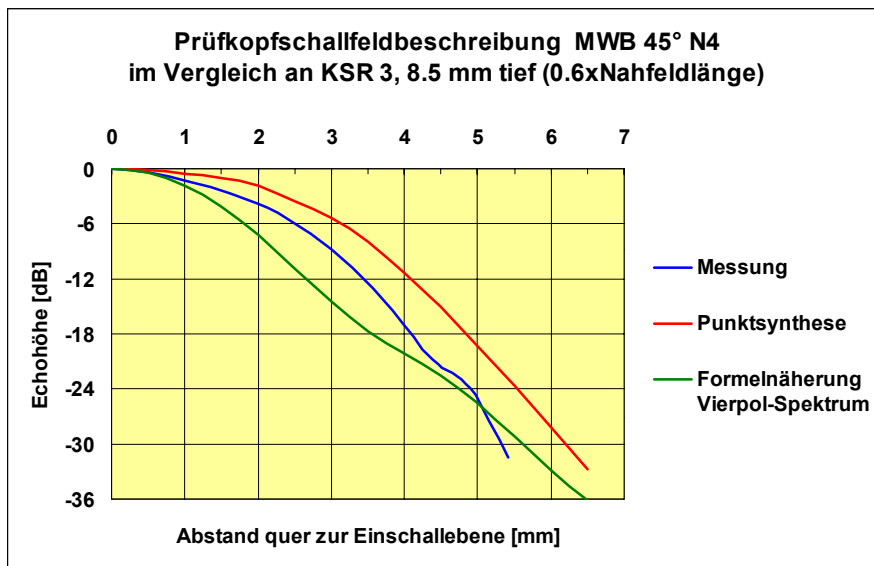


Bild 52

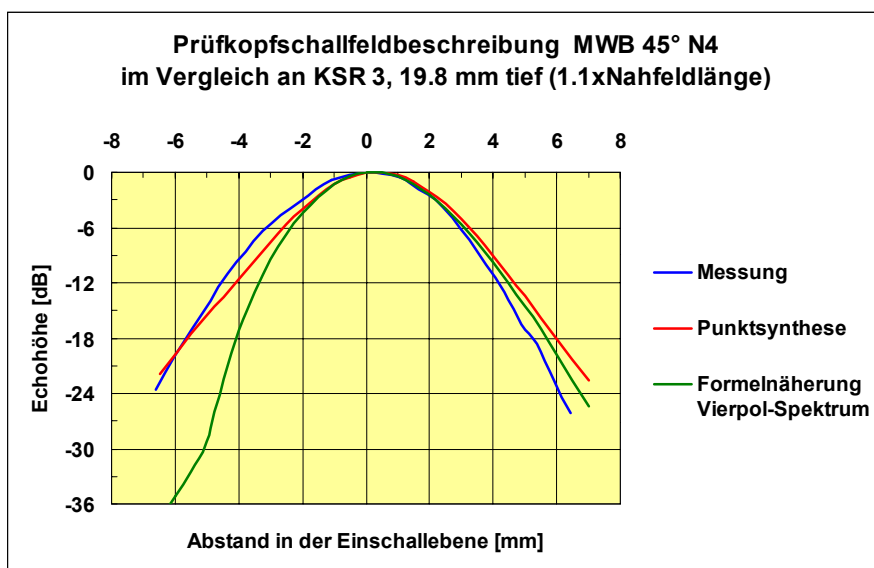


Bild 53

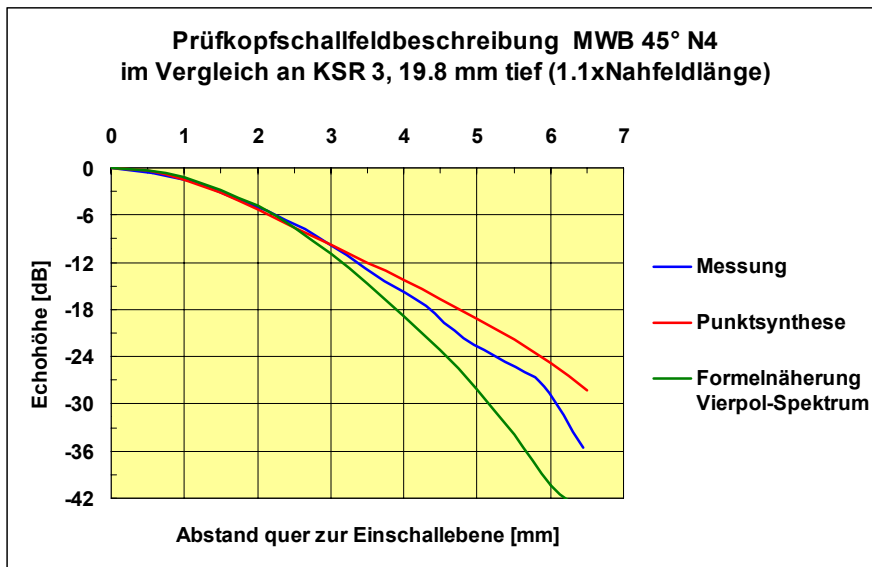


Bild 54

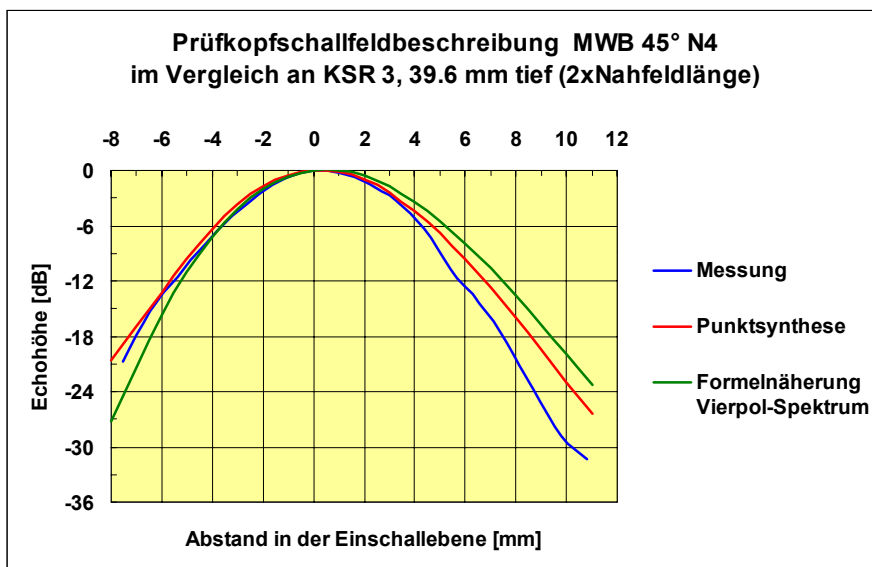


Bild 55

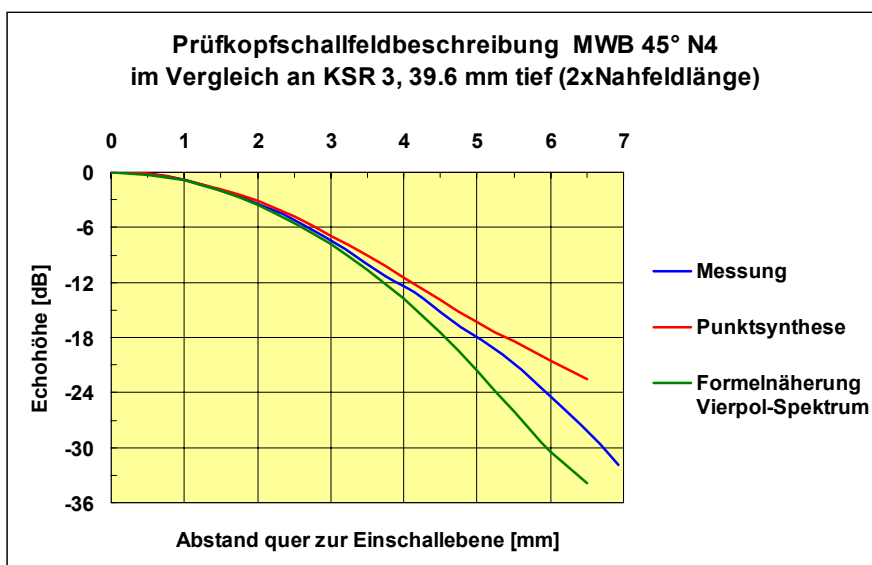


Bild 56

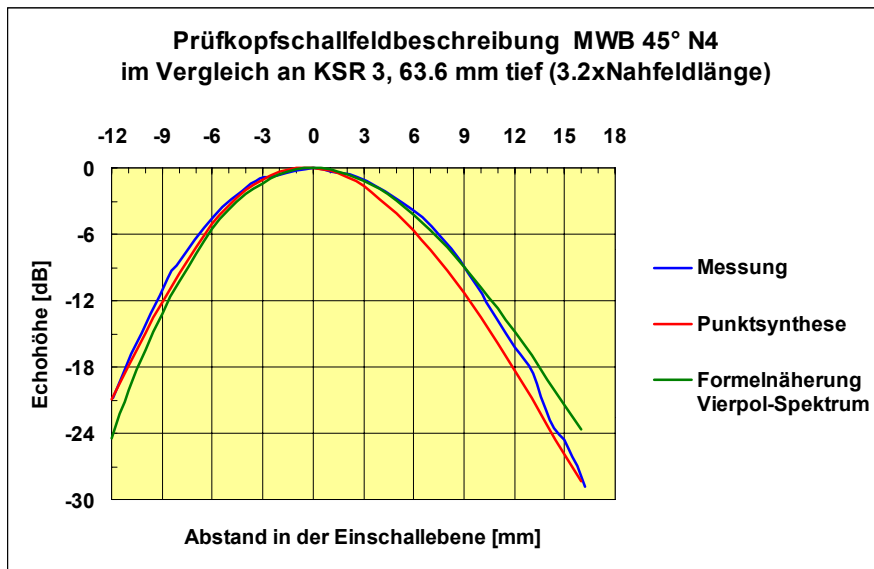


Bild 57

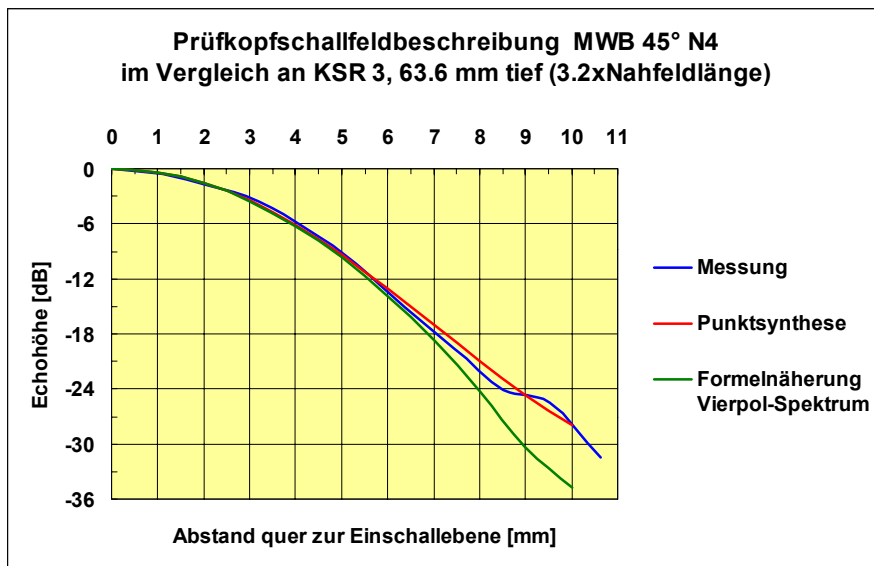


Bild 58

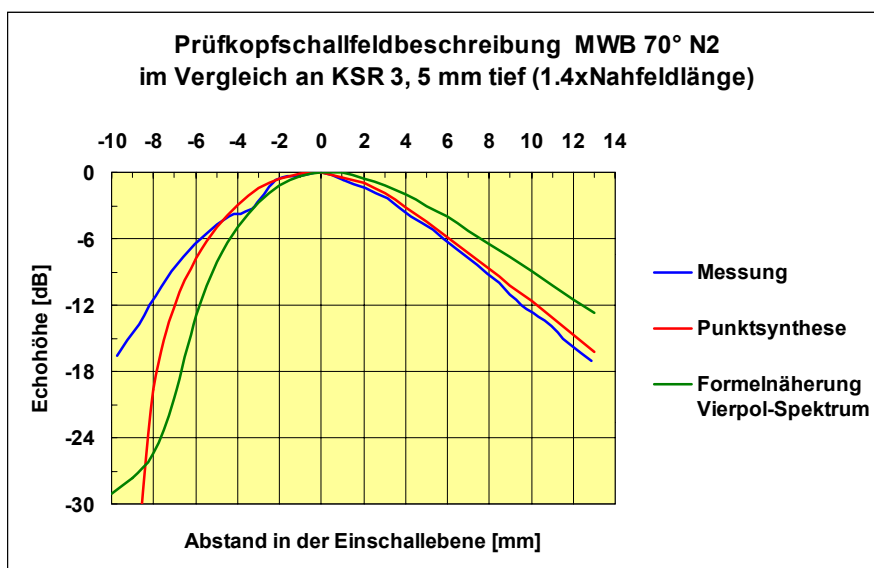


Bild 59

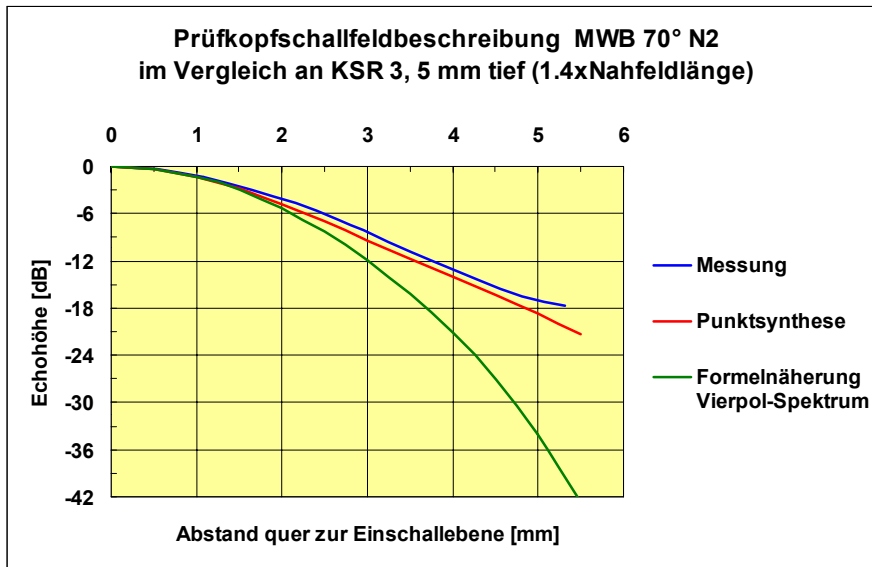


Bild 60

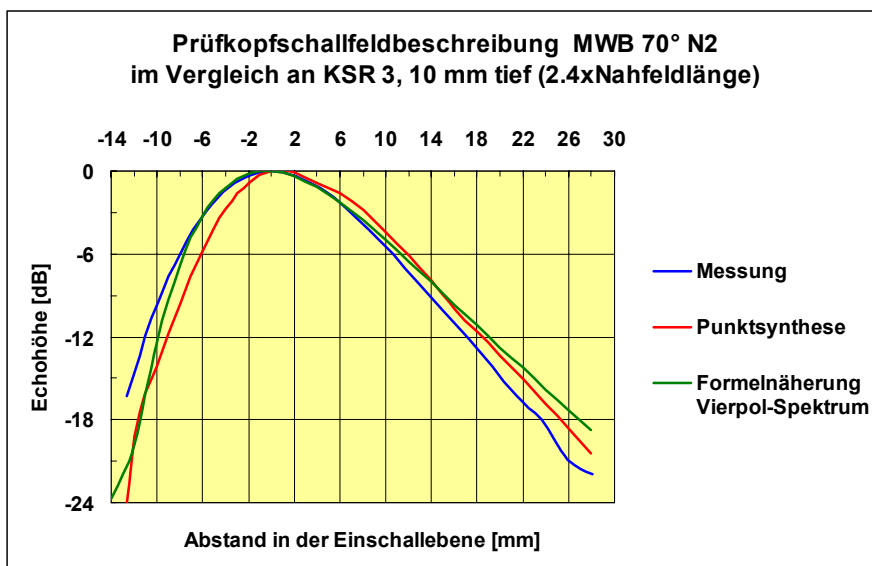


Bild 61

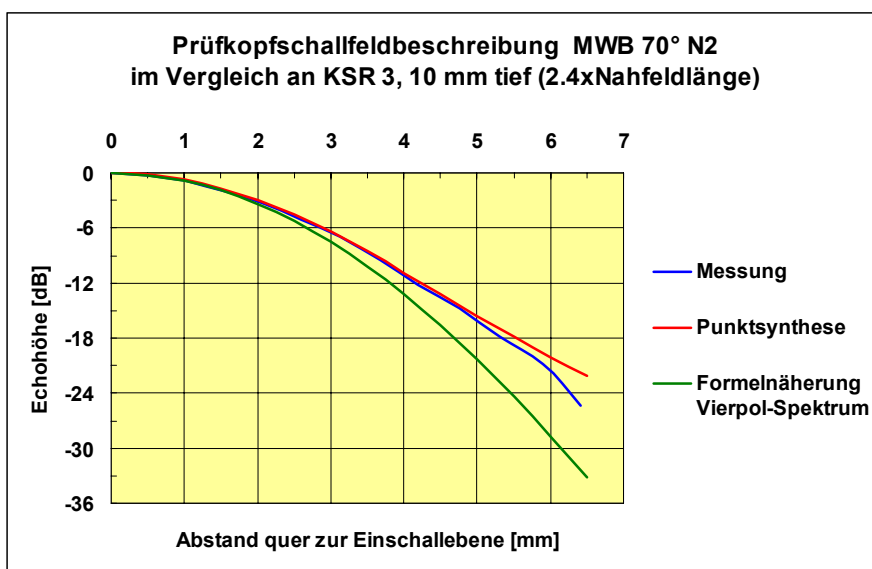


Bild 62

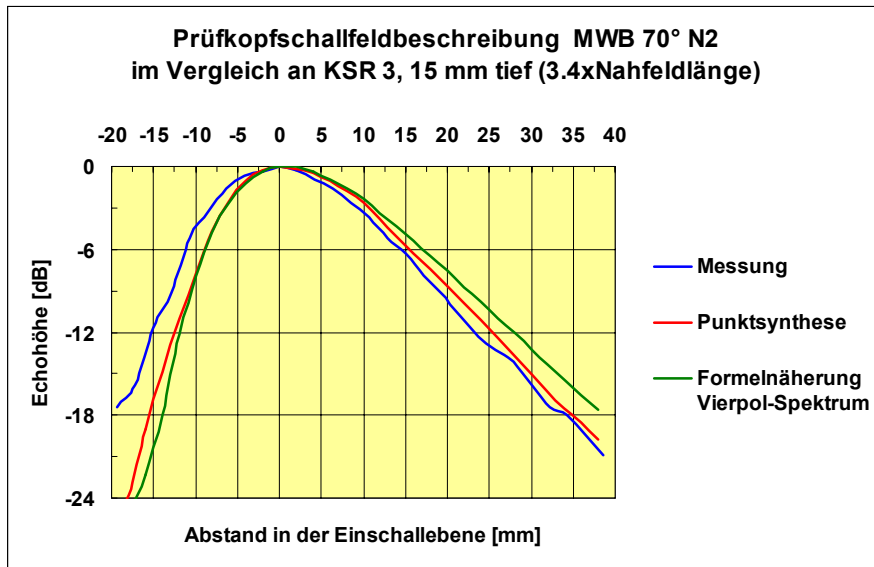


Bild 63

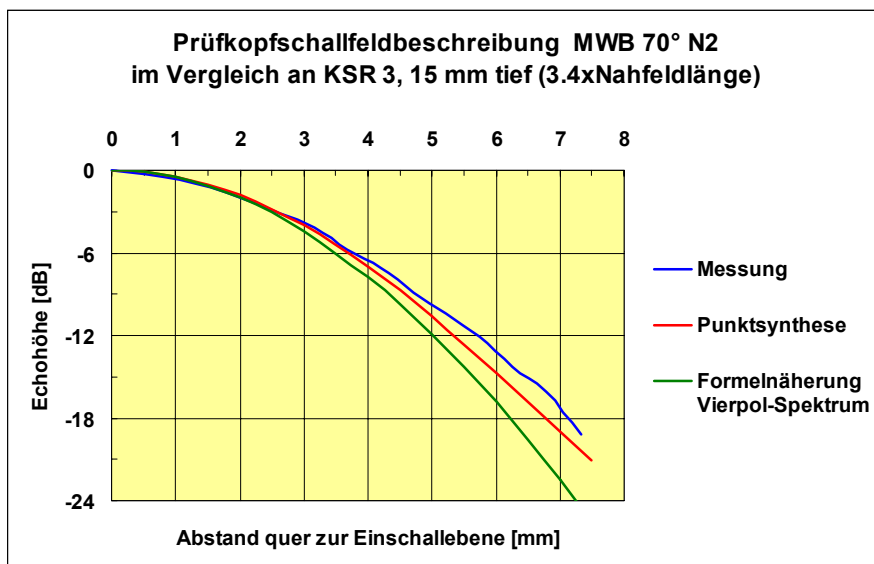


Bild 64

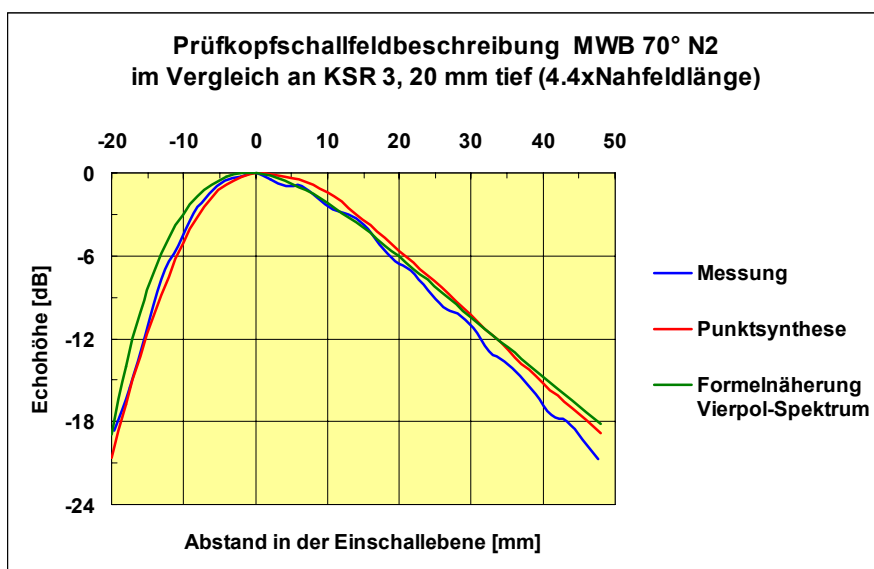


Bild 65

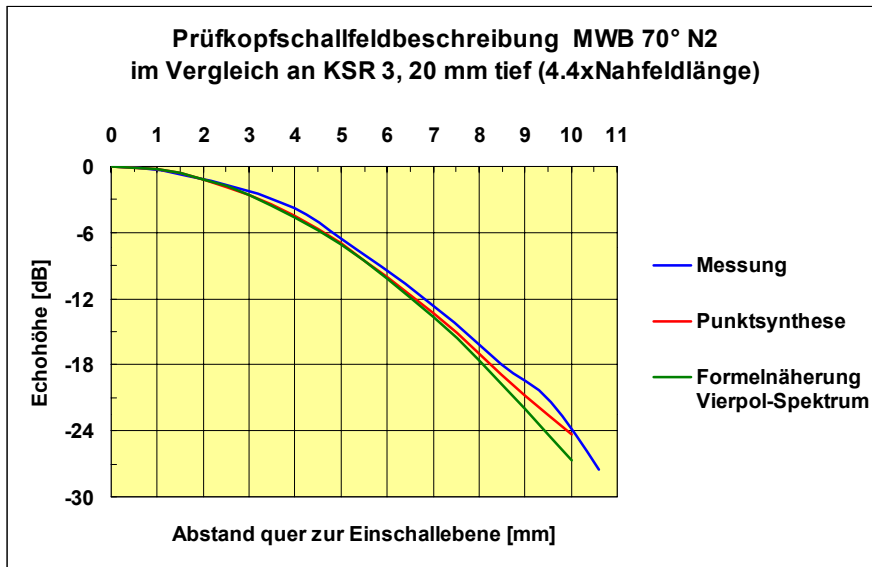


Bild 66

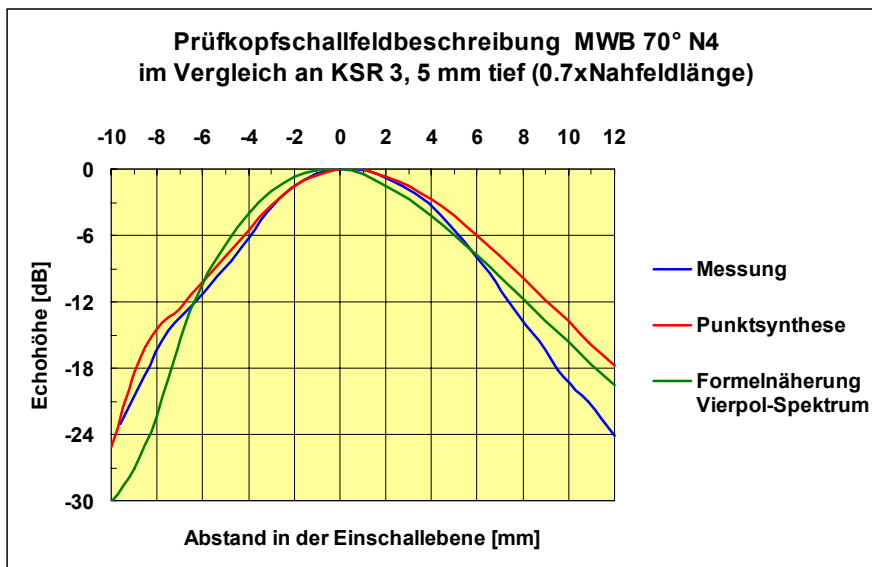


Bild 67

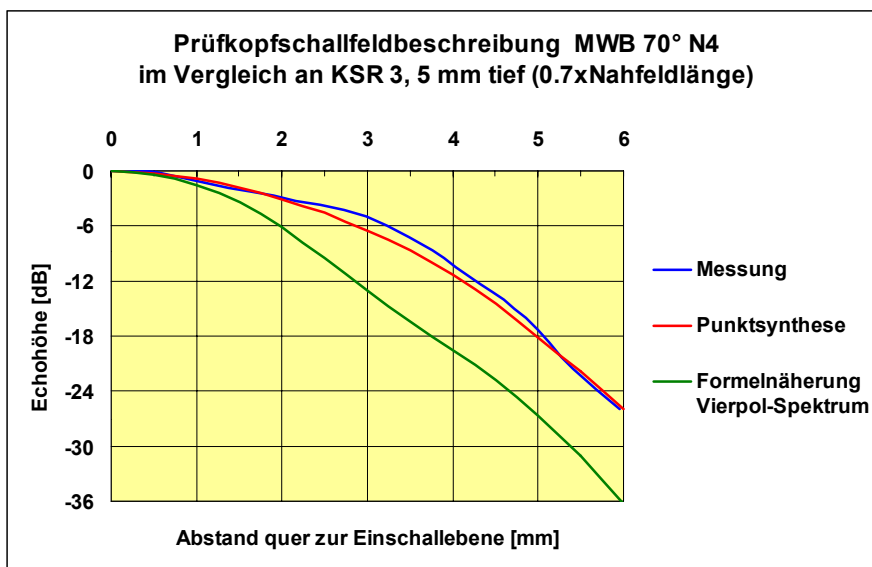


Bild 68

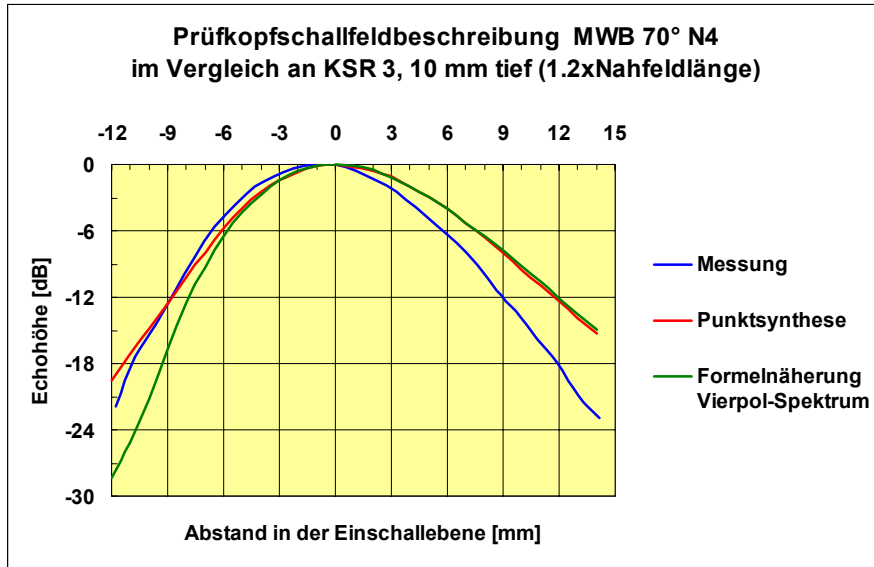


Bild 69

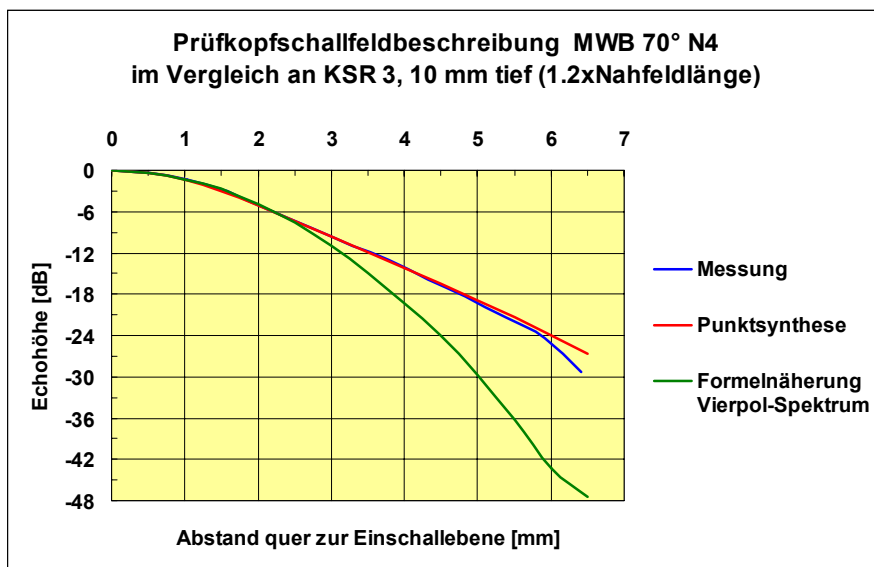


Bild 70

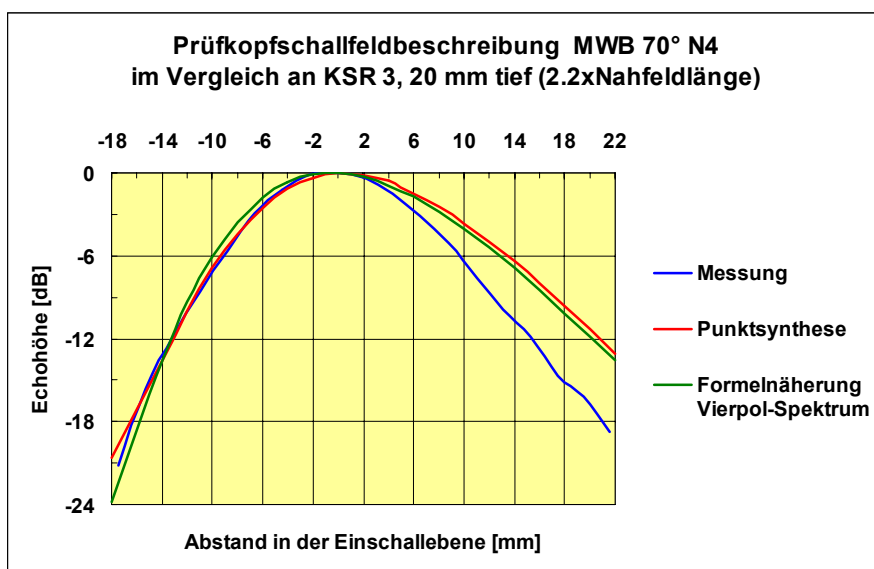


Bild 71

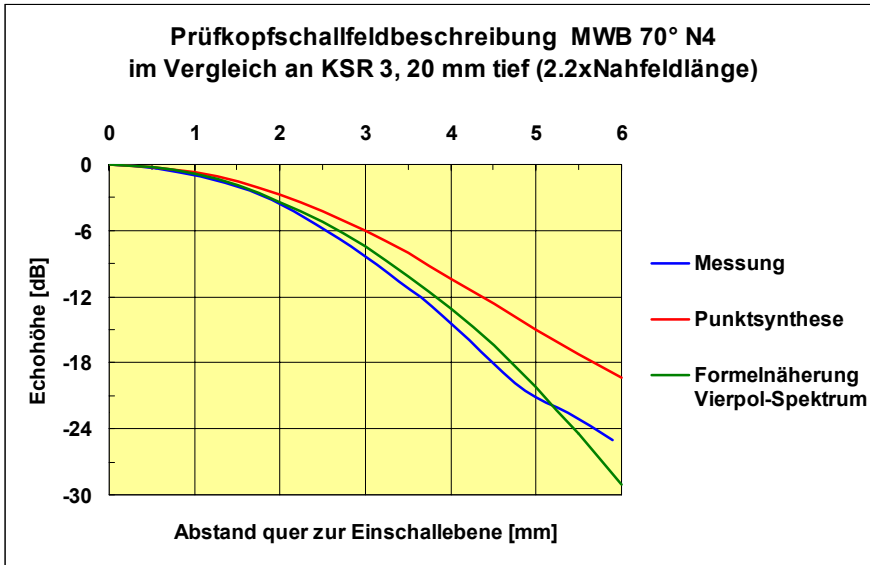


Bild 72

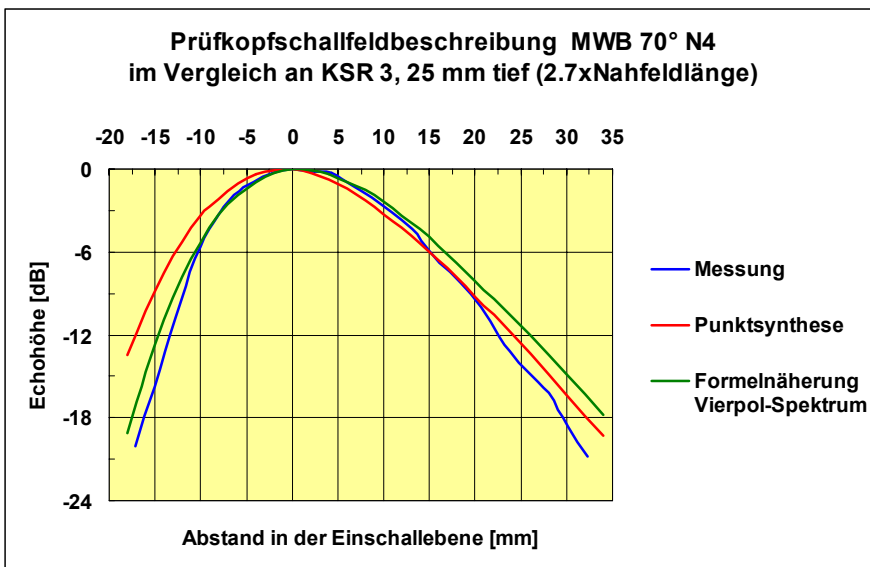


Bild 73

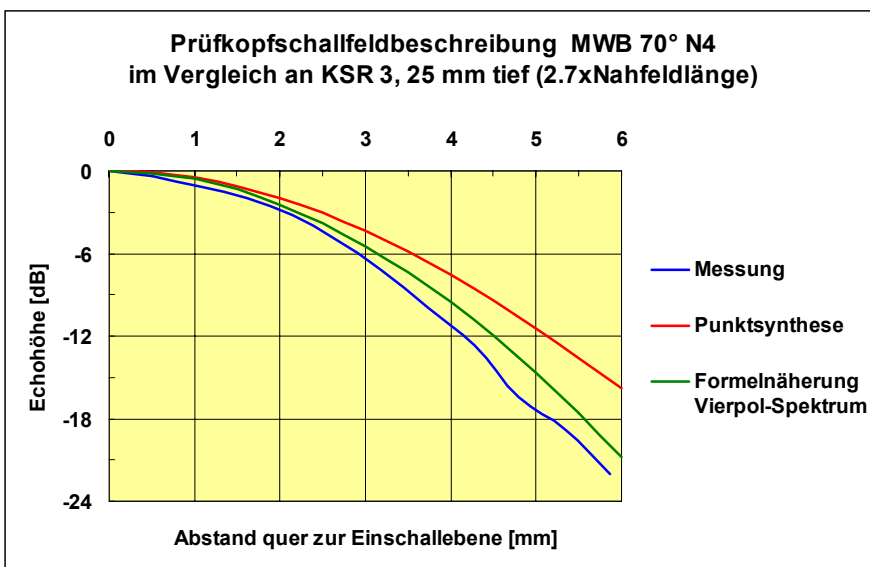


Bild 74

Aus den berechneten Echodynamikkurven in Längs- und Querrichtung können folgende allgemeine Aussagen abgeleitet werden: Im Fernfeldbereich treten keine signifikanten Unterschiede zwischen der Punktquellensynthese und der korrigierten Näherungsformel auf. Unterhalb der Nahfeldlänge weichen die Echohöhen der Näherungsformel in Längsrichtung um so stärker zu kleineren Werten ab, je näher der Prüfkopf dem Reflektor kommt. Die Abweichungen zwischen Messung und Punktquellensynthese und zwischen Messung und Näherung zeigen kein einheitliches Bild. Mal liegt die Näherung dichter an der Messung, mal die Punktquellensynthese, was vermutlich mit der Präzision der Messung zu tun hat, die aber dem Prüfalltag entspricht und somit typisch für Prüfergebnisse sein dürfte. Dies legt den Schluss nahe, dass es für die iterative Modellierung gar nicht nötig sein wird, eine bessere Beschreibung des Schallfeldes als durch die Näherung bewirkt anzuwenden. Die Echohöhen auf der Bündelachse können aber dennoch bis hinab zu Abständen um die 0.6-fache Nahfeldlänge für Vergleichszwecke herangezogen werden, was in der Praxis normalerweise ausreicht. In den Bereichen, in denen der Geltungsbereich der Näherungsformel überschritten wird, können die Berechnungen mit der Punktquellensynthese durchgeführt werden. Die Abweichungen liegen dann wieder im Bereich von 2-4 dB, unter der Voraussetzung, dass für alle zu berechnenden Punkte die notwendigen Schallfeldinformationen vorliegen. In Bild 75 sind die Schnittbilder durch das Schallfeld des MWB 45° N4 des Näherungsmodells (FSAM) mit und ohne Nahfeldnäherung, sowie das der Punktquellensynthese dargestellt. Man erkennt die deutliche Verbesserung der Schallfelddarstellung im Näherungsmodell durch die Nahfeldnäherung. Die berechneten Nahfeldlängen und die Gültigkeitsgrenze bei etwa der 0.6-fachen Nahfeldlänge sind im Bild gekennzeichnet. Das mit der Punktquellensynthese berechnete Schallfeld scheint v-förmig abgeschnitten zu sein. Dies kommt durch den beschränkten Raumwinkel für den die Schallfeldinformationen berechnet wurden zustande. Für Berechnungen im Nahfeldbereich, insbesondere seitlich des Zentralstrahles, muss ein größeres Schallfeldvolumen vorausberechnet werden.

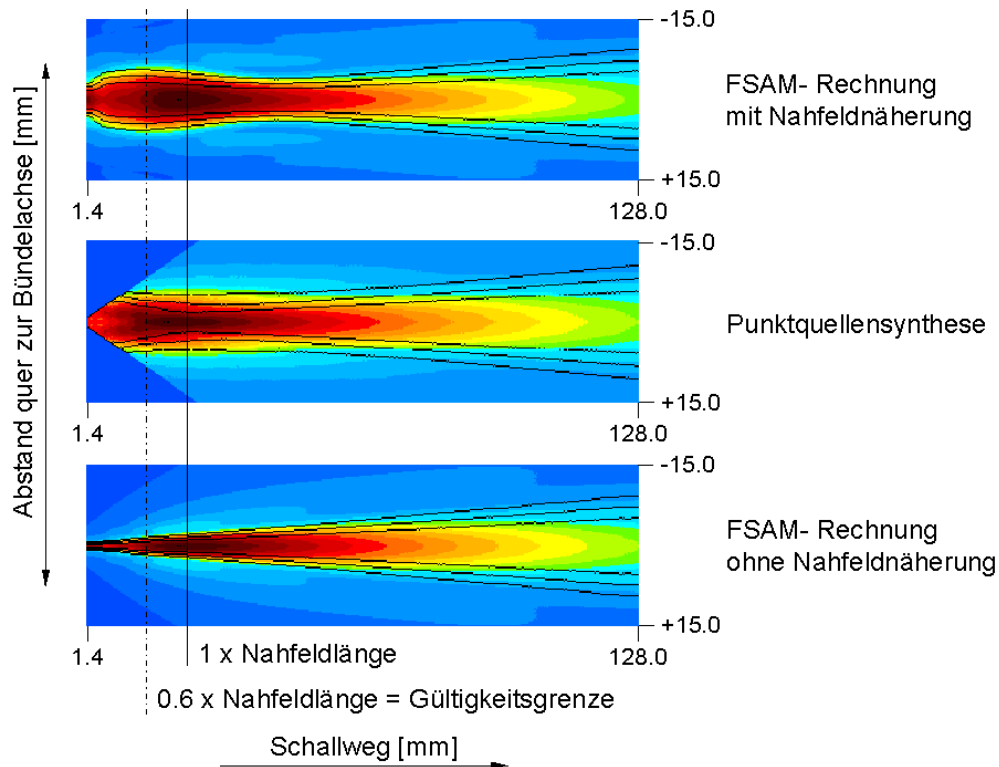


Bild 75: Schnittbilder durch das Schallfeld des MWB 45° N4 entlang der Bündelachse quer zur Einschallebene

3.3 Die Reflektortypen des Modells

Die im Modell eingeführten Reflektoren waren zunächst auf flächenhafte Formen beschränkt und konnten z. B. Nuten, d. h. Oberflächenarisse simulieren. Zur Erhöhung der Rechengenauigkeit wird die Fläche in kleine Elemente eingeteilt, über die integriert wird (Bild 76 links). Mit der Unterteilung in Fehlerelemente ist es möglich, auch Kreisscheiben, d. h. Flachbodenbohrungen oder elliptische Reflektoren zu beschreiben, indem nicht benötigte Fehlerelemente an den Rändern bei der Berechnung nicht berücksichtigt werden. Bei einer ausreichend feinen Unterteilung kann die Kreisfläche relativ genau nachgebildet werden (Bild 76 rechts). Beide Reflektoren in Bild 76 sind in $(2 \cdot 7 + 1) \times (2 \cdot 7 + 1)$ -Elemente eingeteilt. Diese Notation wird in der vorliegenden Rechentechnik verwendet und bedeutet, dass sich im Beispiel von Bild 76 jeweils sieben Elemente links bzw. rechts vom mittleren Element befinden. Die Gesamtanzahl der Elemente beträgt beim Rechteck damit $15 \times 15 = 225$ Elemente. Bei der Kreisscheibe reduziert sich diese Zahl in diesem Beispiel auf 177 Elemente. Diese beiden Reflektortypen können geometrisch relativ einfach beschrieben werden,

da alle Elemente auf einer ebenen Fläche liegen. Bei einer Schräglage des Reflektors ergibt sich für alle Elemente ein konstanter Neigungswinkel und eine gegenseitige Verschiebung, was beim Rechenstart mit eingegeben werden kann. Eine Modifikation der Kreisscheibe ist eine Ellipse, die dann entsteht, wenn unterschiedliche Elementanzahlen in beiden Koordinatenrichtungen verwendet werden.

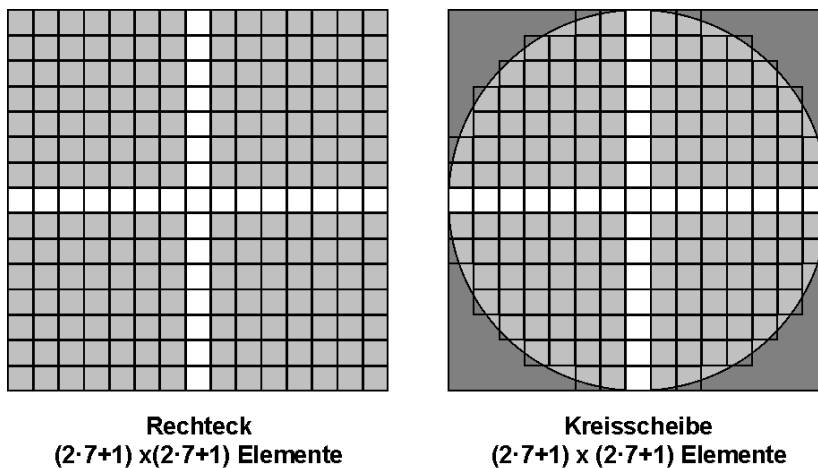


Bild 76: Einteilung eines Rechtecks (links), Simulation einer Kreisscheibe durch Weglassen von Randelementen (rechts)

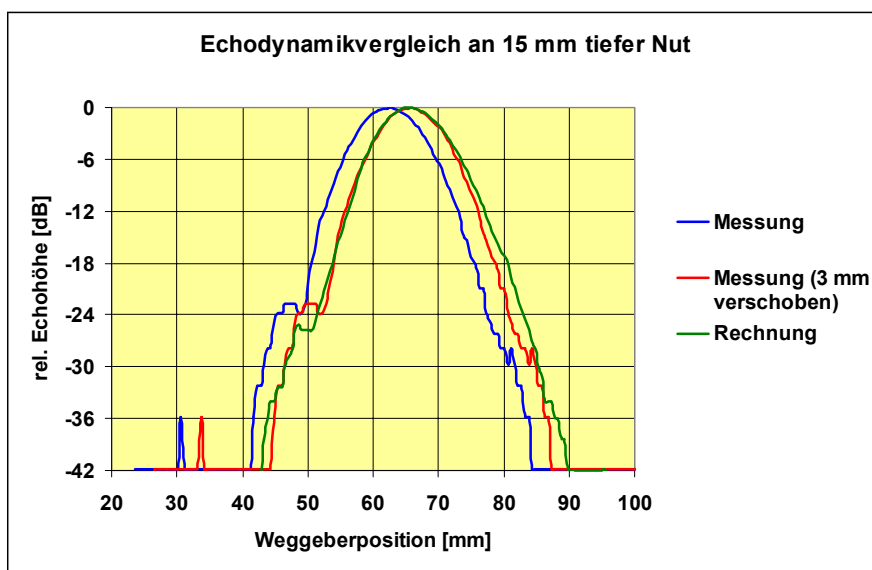
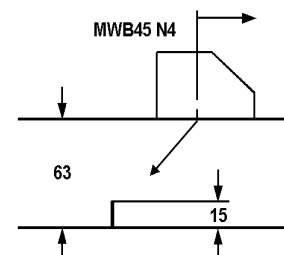


Bild 77

Der Echodynamikvergleich an einer 15 mm tiefen Nut in Bild 77 mit dem Prüfkopf MWB 45° N4 zeigt, dass die Kurven der Messung und der Rechnung sich gut entsprechen, wobei die Messung zunächst wegen mangelhafter Weggeber-Positionierung um etwa 3 mm parallel verschoben war (blaue Kurve in Bild 77).



Die gute Übereinstimmung zwischen der Messung und der Rechnung wird deutlich, wenn man die Messkurve um 3 mm nach rechts verschiebt. Dann verlaufen die beiden Kurven quasi deckungsgleich. Die auftretenden Abweichungen entstehen durch Fehler bei der Gerätejustierung und der Prüfkopfpositionierung auf dem Testblock und nur zu einem kaum bemerkbaren Teil durch die im Modell verwendeten Näherungen.

Ein weiterer wichtiger Reflektortyp in der US- Prüfung ist eine Querbohrung oder „Zylinderbohrung“. Ihre Längsachse liegt im allgemeinen quer zur Einschallrichtung, so dass die Mantelfläche des Bohrungszylinders angeschallt wird. Um diesen Reflektortyp im Modell zu erfassen, wurde der geometrische Teil des Modells um eine Beschreibung für eine Zylinderbohrung erweitert. Bild 78 zeigt eine schematische Darstellung der geometrischen Überlegungen. Durch die Beschreibung wird nur die dem Prüfkopf zugewandte Seite der Bohrung erfasst. Die am Bohrungsrand umlaufende „Kriech“- Welle wird nicht vom Rechenmodell berücksichtigt. Zur Integration über die Zylinderfläche der Bohrung wird diese durch parallele rechteckige Streifen mit polygonaler Grundfläche simuliert. Jeder Streifen hat eine andere Schräglage und berührt den Bohrungsmantel auf seiner Mittelachse. Die Länge der Streifen entspricht der Bohrungslänge. Die Tiefenlage der Bohrung BFT ist auf ihren Mittelpunkt bezogen. Die Lage der Streifen in bezug auf den Bohrungsmittelpunkt wird über die Berechnung der beiden Maße a und b in Bild 78 bestimmt.

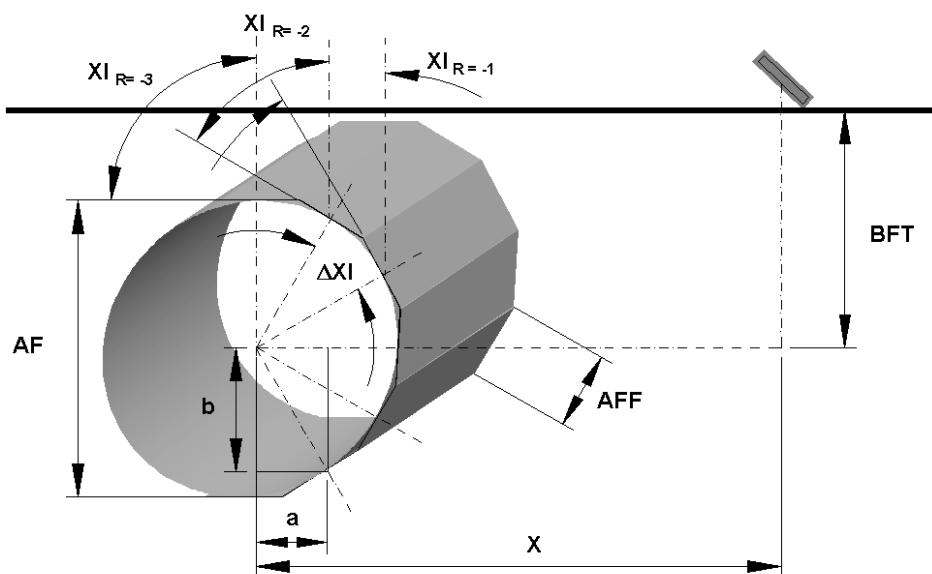


Bild 78: Geometrisches Modell für die Simulation einer Zylinderbohrung

In der Längsrichtung der Bohrung wird die gewünschte Anzahl von Rechenelementen für die Integration vorgegeben. In Umfangsrichtung darf die Elementanzahl jedoch nicht zu klein werden. Einerseits wird der Zylindermantel mit wenigen großen Elementen nur sehr unzureichend beschrieben, andererseits darf die Elementgröße die halbe Wellenlänge nicht überschreiten, um artifizielle Beugungseffekte zu unterdrücken. Aus diesen Gründen wird in Umfangsrichtung die Verhältniszahl *Lambdafakt* (< 0.5) eingegeben. Sie beschreibt das Verhältnis der Elementgröße zur Wellenlänge. Das Rechenmodell bestimmt zunächst über die vorliegende Wellenlänge *ALAM* die sich daraus ergebende maximale Elementgröße AF_{max} .

$$AF_{max} = ALAM \cdot Lambdafakt \quad \text{Gleichung 12}$$

Zusammen mit dem Bohrungsdurchmesser *AF* kann daraus der von einem Element abgedeckte Winkelbereich *dXI* des Bohrungsmantels berechnet werden.

$$dXI = 2 \cdot \arctan\left(\frac{ALAM \cdot Lambdafakt}{AF}\right) = 2 \cdot \arctan\left(\frac{AF_{max}}{AF}\right) \quad \text{Gleichung 13}$$

Die Elementanzahl auf jeder Seite des mittleren Elementes *NR* ergibt sich aus folgender Beziehung.

$$NR = \left(\frac{PI}{2 \cdot dXI}\right) = \left(\frac{PI}{4 \cdot \arctan\left(\frac{ALAM \cdot Lambdafakt}{AF}\right)}\right) \quad \text{Gleichung 14}$$

Die sich ergebende rationale Elementanzahl wird auf die nächste ganze Zahl aufgerundet, so dass insgesamt etwas mehr als die Hälfte der Bohrung abgedeckt wird, da auf jeder Seite ein halbes Element übersteht. Aus der Elementanzahl kann die tatsächliche Elementgröße *AFF* berechnet werden:

$$AFF = AF \cdot \tan\left(\frac{PI}{2 \cdot NR}\right) \quad \text{Gleichung 15}$$

Für jeden Elementstreifen muss über die folgende Beziehung die Schräglage XI_R berechnet werden.

$$XI_R = \frac{R \cdot PI}{2 \cdot NR}$$

Gleichung 16

R: Laufzahl für die Streifen $R = [-NR, -NR+1, \dots, 0, \dots, NR-1, NR]$

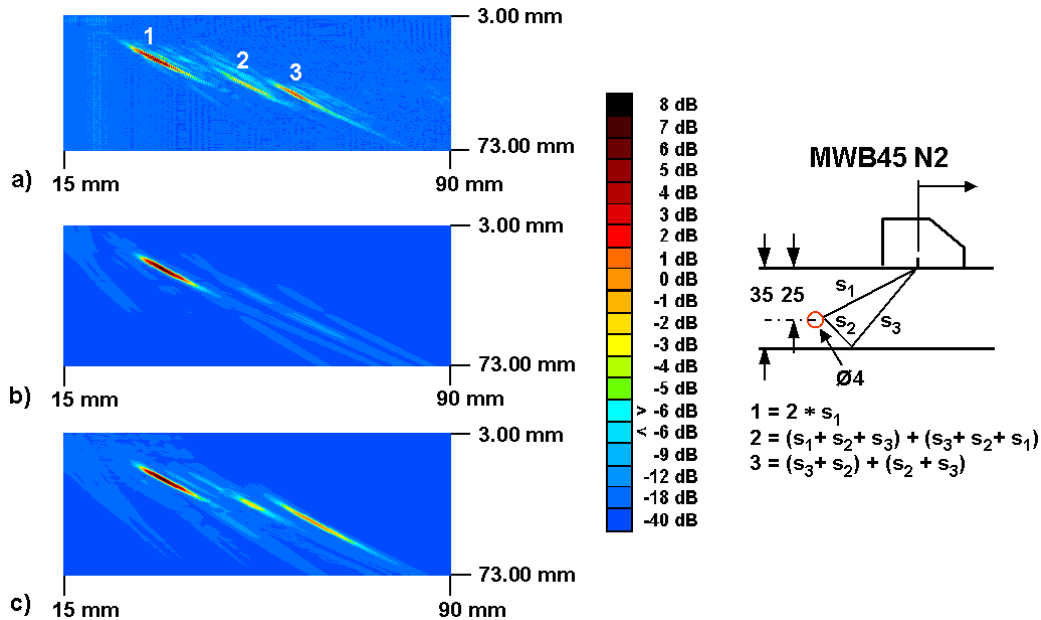


Bild 79: Vergleich der TD- Bilder der Reflektorbeschreibungen von der 4 mm Zylinderbohrung, a) Messung, b) Rechnung als schmaler Streifen, c) Rechnung mit neuer geometrischer Beschreibung als Zylinderbohrung

In Bild 79 ist das Resultat des geometrischen Modells einem Messbefund gegenübergestellt. Bild 79 a zeigt den Messbefund. Die vordere Anzeige entsteht im direkten Weg (vgl. Schallweg W_{betr2} in Anhang 5.3). Darauf folgt mit einem etwas größerem Schallweg die Anzeige von einem Dreiecksweg, der bei oberflächennahen Rissen zum Winkelspiegel wird. Sie setzt sich im Modell aus den beiden Beiträgen W_{betr01} und W_{betr02} (s. a. Anhang 5.3) zusammen. Die letzte Anzeige mit dem größten Schallweg entsteht über den halben Sprung und entspricht damit W_{betr3} in Anhang 5.3. Bild 79 b zeigt die einfachere Modellierung in Form eines sehr schmalen Streifens mit senkrechter Orientierung zum Zentralstrahl. Die direkte Beugungsanzeige ist als Einzige im Bild gut erkennbar. Wenn die Positionen der Beugungsanzeige im halben Sprung und der Winkelspiegelanzeige bekannt sind, kann man sie im TD- Bild erahnen. Ihre Amplituden sind jedoch viel zu gering. Bild 79 c zeigt die Berechnung der neuen geometrischen Beschreibung nach Bild 78. Man erkennt deutlich, dass die Amplitudenverhältnisse zwischen der direkten Beugungsanzeige und den anderen beiden Anzeigen wesentlich besser den tatsächlichen Verhältnissen entsprechen. Eine numerische Auswertung der einzelnen Echohöhen und

-positionen erfolgt anschließend im Rahmen der Verifikation des Rechenmodells an verschiedenen Testreflektoren.

3.4 Verifikation des FSAM an verschiedenen Testreflektoren

Das vervollständigte und verbesserte Rechenmodell wurde durch Vergleiche mit Messdaten verifiziert. Für den Vergleich wurden die zur Verfügung stehenden Modellreflektoren Nut, Flachbodenbohrung und Zylinderbohrung herangezogen. Für jeden Reflektortyp wurde ein geeigneter Testkörper zur Verfügung gestellt (vgl. Bild 80). Die Messung an einer Nut wurde an einem 35 mm dicken Testkörper mit einer 1 mm tiefen und zur Oberfläche geöffneten, senkrechten Nut durchgeführt. Als Prüffläche wurde die der Nut gegenüberliegende Testkörperoberfläche verwendet, so dass die Nuttiefe bei 34.5 mm lag. Weiterhin wurde ein Testkörper mit einer Flachbodenbohrung von 4 mm Durchmesser, einer Neigung von -45° (d. h. senkrecht zum Zentralstrahl eines 45° -Prüfkopfes) und einer Tiefe von 21.5 mm ausgesucht. Die Flachbodenbohrung wurde senkrecht in die um 45° geneigte Testkörperseite eingebracht (vgl. Bild 80 Mitte). Der dritte Testkörper enthielt eine Zylinderbohrung von 4 mm Durchmesser in einer Tiefe von 25 mm und hatte ebenfalls eine Wanddicke von 35 mm. Für die Messungen an der Nut und der Flachbodenbohrung wurde der Prüfkopf MWB 45° N4 verwendet. Für die Zylinderbohrung wurde ein Prüfkopf MWB 45° N2 eingesetzt, da mit ihm die beiden Nebenanzeigen über den halben Sprungabstand wegen der größeren Bündeldivergenz wesentlich deutlicher nachgewiesen werden können. Die Berechnungen wurden mit einem Vierpol-Spektrum und mit einem synthetischen Spektrum durchgeführt und dem entsprechenden Messergebnis gegenübergestellt. In Bild 81 sind die Ergebnisse an der Nut dargestellt. Die Maße der berechneten TD-Bilder entsprechen denen der gemessenen TD-Bilder und sind direkt vergleichbar.

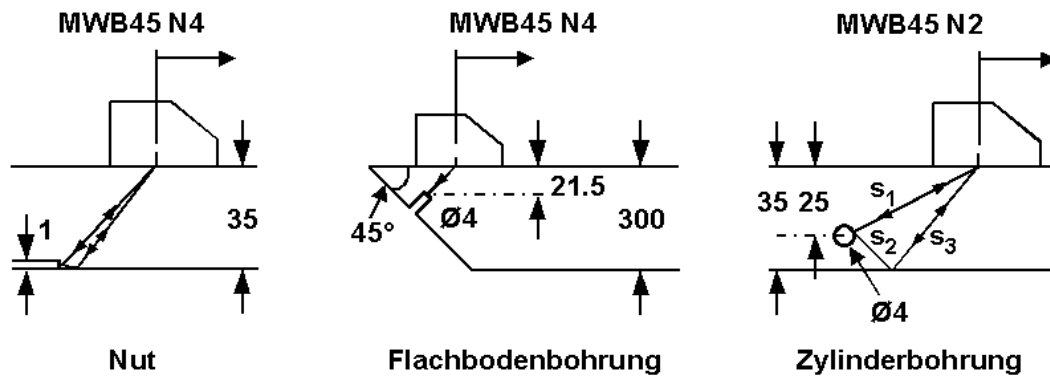


Bild 80: Skizzen der für die Verifikation des Modells verwendeten Testkörper

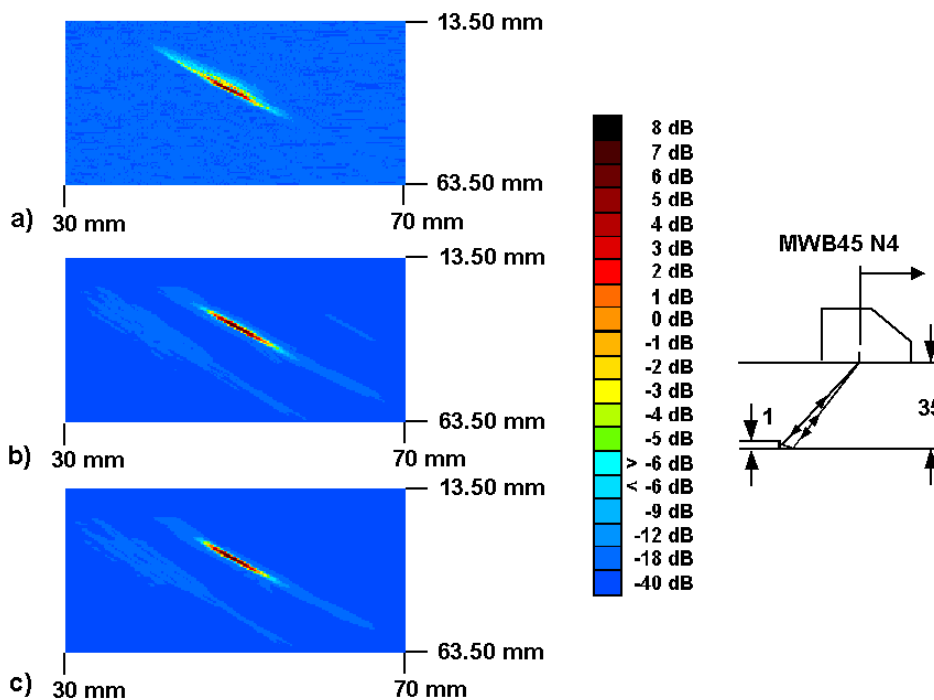


Bild 81: Vergleich der TD- Bilder von der 1 mm Nut, a) Messung, b) Rechnung mit Vierpol- Spektrum, c) Rechnung mit synthetischem Spektrum

Die Echobreite und -dynamik wird von den Berechnungen gut wiedergegeben. Die Echohöhe der 1 mm Nut wird in allen drei Fällen als Empfindlichkeitsreferenz für den Vergleich der jeweiligen Echohöhen von den beiden anderen Reflektortypen herangezogen. Die Echohöhendifferenz wird daher in Bild 82 Null gesetzt. Der Vergleich der Weggeber- und Schallwegpositionen des Amplitudenmaximums zeigt, dass die berechneten Werte zwar tendenziell etwas zu groß sind, die Berechnungen können aber dennoch als genau betrachtet werden, da die Abweichungen maximal 1 mm betragen und damit im Bereich der Messungenauigkeiten liegen.

Der Einfluss des gewählten Spektrums bei der Modellierung rührt vom Einfluss des Phasenspektrums her. Während beim synthetischen Spektrum nur ein Betrag, quasi also der Realteil mit Phase gleich Null vorgegeben wird, hat das Vierpol- Spektrum durchaus ein frequenzabhängiges Phasenspektrum und damit eine Gruppenlaufzeit, die sich in Bild 82 zeigt. Im übrigen kann man bei der Berechnung des Vierpol- Spektrums nach [57] eine willkürliche Laufzeit als Verschiebungszeit der FOURIER- Transformation zur Feinjustierung vorgeben.

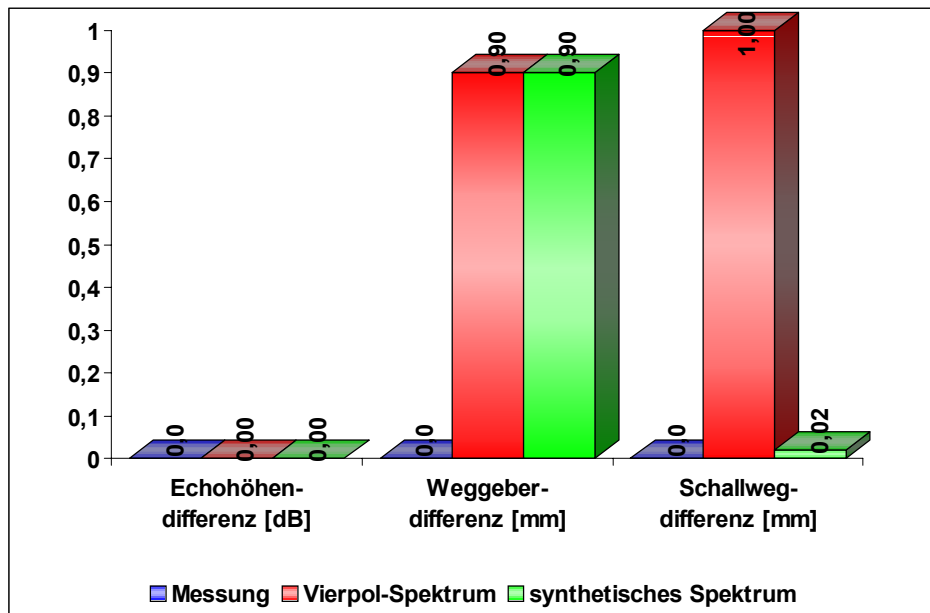


Bild 82: Vergleich der Positionsdaten der Rechnung mit der Messung an einer 1 mm Nut

In Bild 83 sind die Ergebnisse von der Flachbodenbohrung dargestellt. Im Messbefund (Bild 83 a) erscheint hinter der Bohrungsanzeige noch eine weitere Anzeige mit einer langen Echodynamik. Diese Anzeige stammt von einer Testkörperkante und wird vom Rechenmodell nicht berücksichtigt. Die Auswertung bezieht sich daher ausschließlich auf die Bohrungsanzeige. Auch im Fall der Flachbodenbohrung kann von einer guten Übereinstimmung zwischen der Messung und den Berechnungen gesprochen werden. Die Auswertung der Positionsdaten und der Echohöhen in Bild 84 bestätigt diese Aussage.

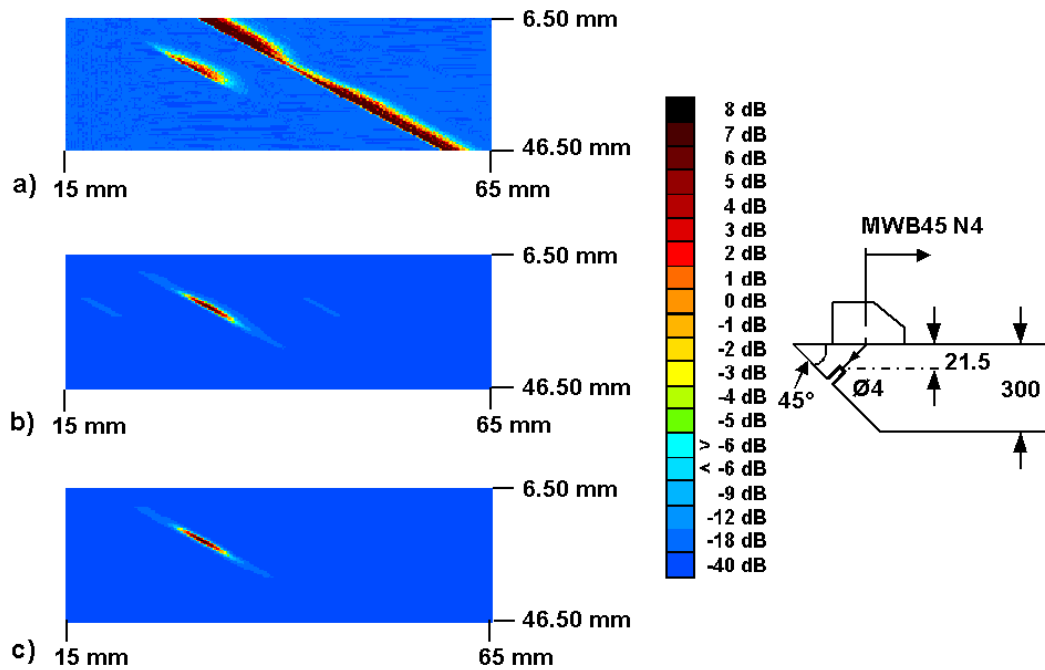


Bild 83: Vergleich der TD- Bilder von der 4 mm Flachbodenbohrung, a) Messung, b) Rechnung mit Vierpol- Spektrum, c) Rechnung mit synthetischem Spektrum

Im Vergleich zur Nut ist die Echohöhe der Flachbodenbohrung bei der Messung 6.7 dB größer. Bei den Berechnungen ergeben sich Amplitudenzuwächse von 9.4 dB beim Vierpol- Spektrum bzw. 9.5 dB beim synthetischen Spektrum. Die berechneten Echohöhen sind also um 2.7 bzw. 2.8 dB zu groß. Diese Abweichungen liegen in der üblichen Streubreite von Testkörpermessungen. Da zudem der Schallweg von etwa 30 mm an der Stelle des Amplitudenmaximums etwa einer Nahfeldlänge des verwendeten Prüfkopfes entspricht, befindet man sich hier also schon am Rand des Geltungsbereiches des Näherungsmodells. Die Weggeberpositionen des Amplitudenmaximums stimmen mit der in der Messung gut überein. Die Schallwegdifferenzen von 1.4 und 0.4 mm liegen bereits im Bereich der Messungenauigkeiten.

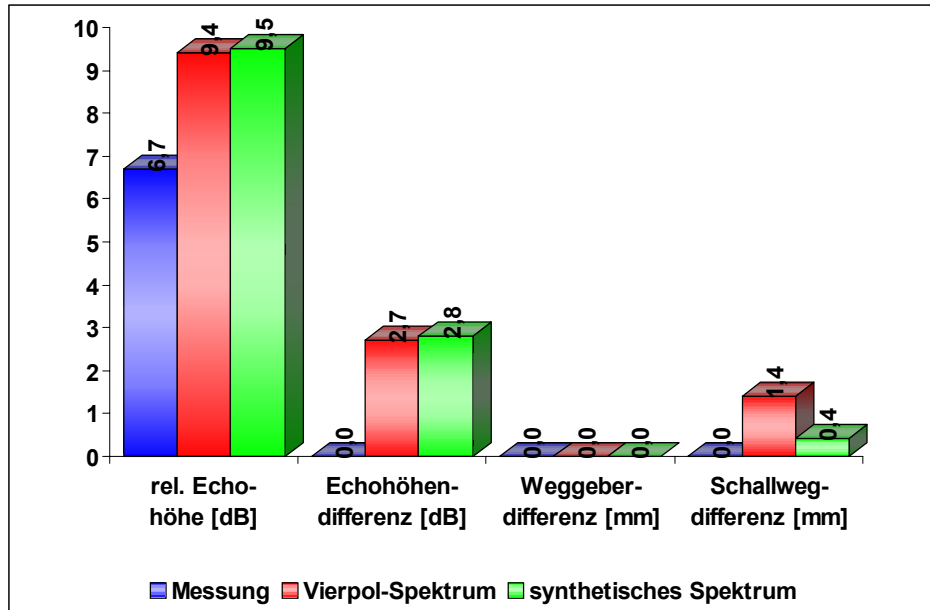


Bild 84: Vergleich der Echohöhen mit denen der Nut und den Positionsdaten von der Messung an einer Flachbodenbohrung ($\varnothing 4$ mm)

Zuletzt soll ein Vergleich an der Zylinderbohrung durchgeführt werden. In Bild 85 sind die TD- Bilder der Messung und der Berechnungen mit der neuen Modellbeschreibung für die Zylinderbohrung gegenübergestellt.

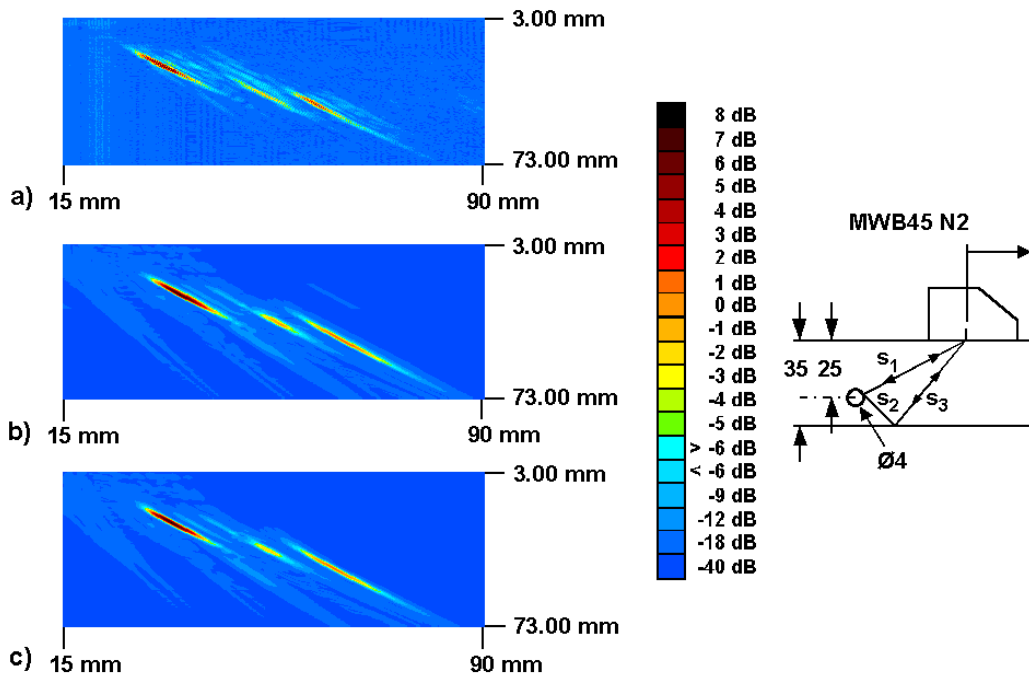


Bild 85: Vergleich der TD- Bilder von der 4 mm Zylinderbohrung, a) Messung, b) Rechnung mit Vierpol- Spektrum, c) Rechnung mit synthetischem Spektrum

Bei der Auswertung werden zusätzlich die Daten von zwei weiteren Berechnungen, bei denen die Zylinderbohrung wie früher als schmaler Streifen simu-

liert wurde, ausgewertet. In Bild 86 sind zunächst die Daten der vorderen Echoanzeige E1 (Hauptanzeige, Beugung im direkten Weg) dargestellt. Die Echohöhe war bei der Messung gegenüber der Nut 2 dB größer. Bei den beiden Berechnungen als Zylinderbohrung ergeben sich um 1.3 bzw. 2.0 dB größere Amplituden. Die Amplituden von den Berechnungen als Rechteck (schmaler Streifen) sind mit diesen Werten nicht vergleichbar und können nicht ausgewertet werden. Beim Vergleich der Weggeber- und Schallwegdifferenzen fallen zwei Eigenschaften auf. Die Weggeberdifferenzen stehen offensichtlich mit der Art der geometrischen Beschreibung des Reflektors (hier Zylinderbohrung bzw. Rechteck) in Zusammenhang und sind unbeeinflusst von der Auswahl des Spektrums. Bei den Schallwegdifferenzen ist es umgekehrt, sie hängen scheinbar von den Amplituden- und Phaseninformationen des gewählten Spektrums ab und sind unabhängig von der Wahl der Reflektorgeometrie. Die geringsten Abweichungen ergeben sich bei der Berechnung als Zylinderbohrung mit einem synthetischen Spektrum. Die Schallwegdifferenz bei Verwendung des Vierpol-Spektrums beträgt 1.9 mm und ist immer noch als ausreichend zu bewerten.

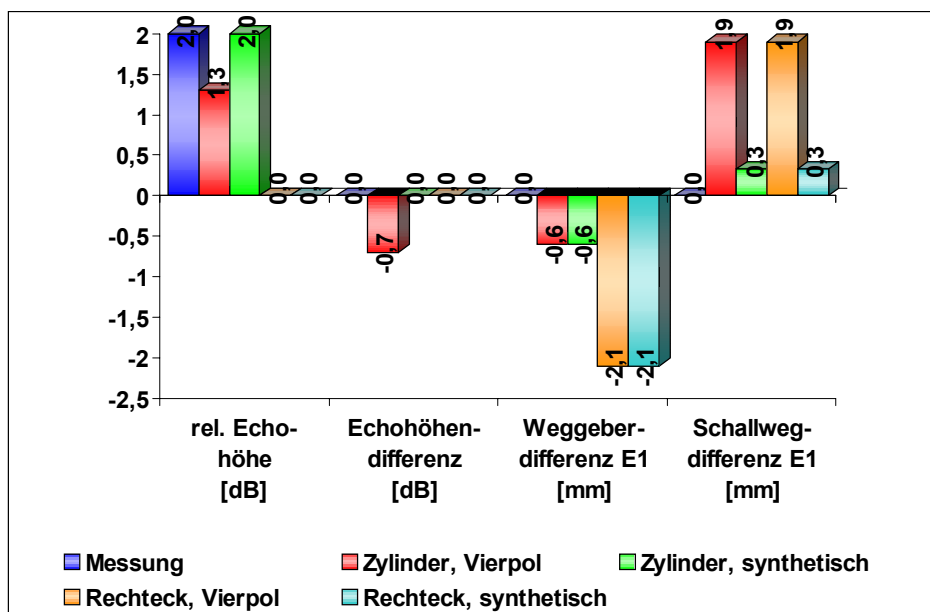


Bild 86: Vergleich der Echohöhen der Hauptanzeige mit denen der Nut und der Positionsdaten mit der Messung an einer Zylinderbohrung ($\varnothing 4$ mm)

In Bild 87 werden die Weggeber- und Schallwegdifferenzen der beiden Nebenanzeigen ausgewertet. Die mittlere Anzeige in den TD-Bildern, d. h. der Winkelspiegelweg ist mit der Bezeichnung E2 gekennzeichnet, die Beugungsanzeige im halben Sprung mit E3. Auch in diesem Fall stimmen die Positionsda-

ten der Berechnungen als Zylinderbohrung mit einem synthetischen Spektrum am besten mit den Messergebnissen überein. Auch hier scheinen die Weggeberdifferenzen mit der Reflektorbeschreibung zu korrelieren. Die Beziehung zwischen den Schallwegdifferenzen und dem gewählten Spektrum lässt sich für die Winkelspiegelanzeige noch gut aufrecht erhalten. Bei der Beugungsanzeige im halben Sprung E3 gibt es bereits größere Abweichungen, weil die Lage des Zeitfensters für die FOURIER- Transformation des Modells sich nach der Hauptechoanzeige, hier der Anzeige E1, richtet und für E3 dann unter Umständen größere Fehler auftreten können. Dies kann nur durch ein größeres Zeitfenster, d. h. mehr Stützstellen im Frequenzbereich und damit mehr Rechenzeit verbessert werden.

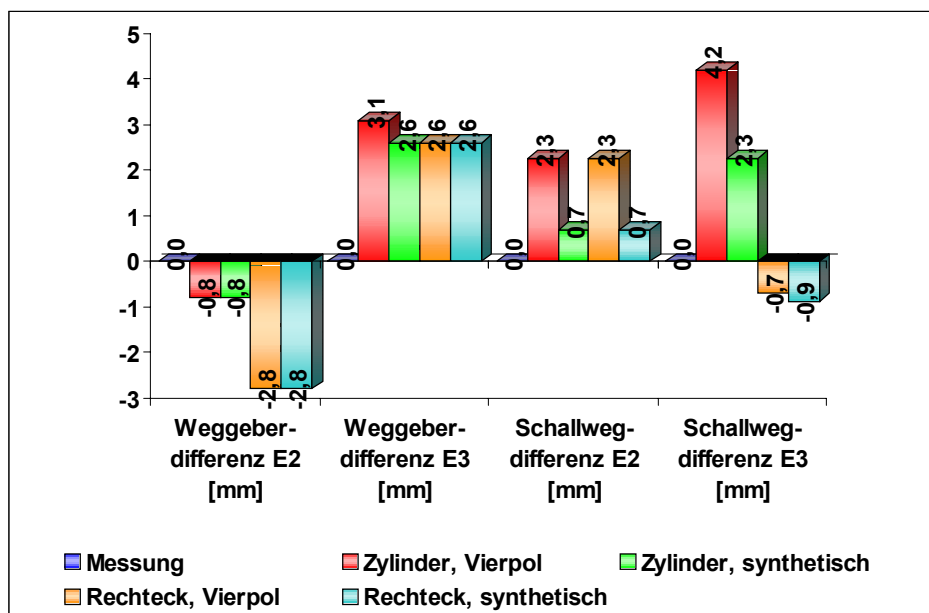


Bild 87: Vergleich der Positionsdaten der Nebenanzeigen mit denen der Messung an einer Zylinderbohrung ($\varnothing 4$ mm)

Den größten Vorteil der neuen Reflektorbeschreibung zeigt jedoch Bild 88. Hier sind die Echohöhenverhältnisse zwischen der direkten Beugungsanzeige E1 und der Winkelspiegelanzeige E2 bzw. der Beugungsanzeige im halben Sprung E3 dargestellt. Die Echohöhendifferenzen betragen für die Winkelspiegelanzeige mit der neuen Reflektorbeschreibung nur noch 0.2 bzw. -1 dB. Bei der Berechnung als Rechteck wichen die Echohöhen noch um -12 bzw. -14.2 dB ab. Noch ausgeprägter ist der Unterschied bei der Beugungsanzeige im halben Sprung. Die neue Formulierung ergibt Differenzen von -2.2 bzw. -2.4 dB, während die Amplitude früher um -17.1 bzw. -19.4 dB zu klein berechnet wurde. Die Einführung des Reflektortyps Zylinderbohrung kann damit als

Erfolg gewertet werden, da nun fundierte Echohöhenabschätzungen an diesem Reflektortyp möglich sind.

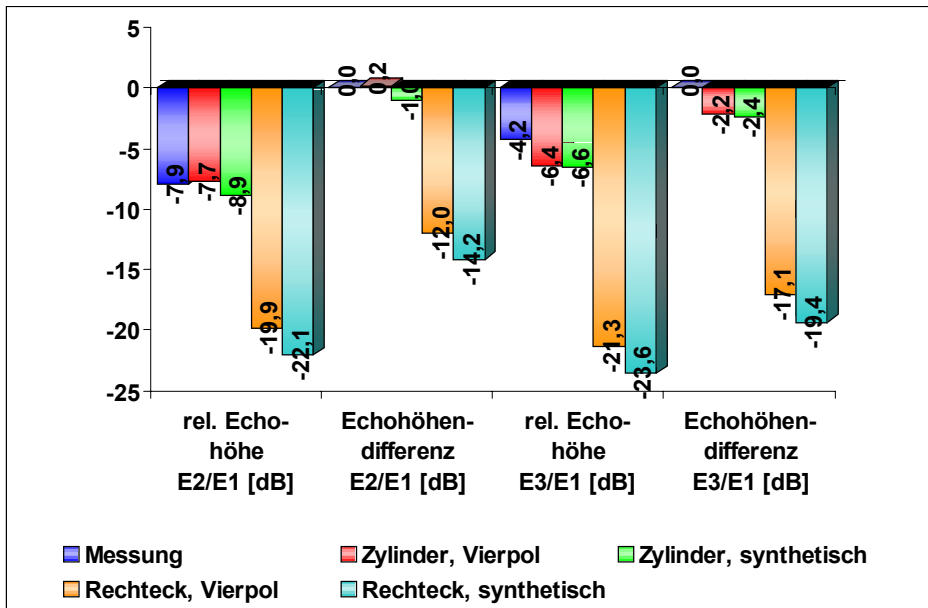


Bild 88: Vergleich der Echohöhen der Nebenanzeigen mit denen der Messung an einer Zylinderbohrung ($\varnothing 4$ mm)

3.5 Interpretation von kritischen Prüfbefunden

Die Verifikation des Rechenmodells zeigt, dass der jetzige Entwicklungsstand der Modelltechnik so weit vorangekommen ist, dass die beobachteten Abweichungen dort, wo sie nicht durch noch vorhandene systematische Schwachstellen bedingt sind, sich im Rahmen der üblichen experimentellen Unschärfe bewegen. Die an den Testreflektoren entstandenen Echodynamikmuster werden vom Modell mit guter Übereinstimmung wiedergegeben. Wenn die geometrischen Verhältnisse richtig beschrieben werden, kann man die zu erwartenden Echohöhen über den Vergleich mit Referenzreflektoren gut abschätzen. Die Echohöhen der Nebenanzeigen z. B. werden mit der neuen Beschreibung für die Zylinderbohrung, die den realen Verhältnissen näher kommt, sehr viel besser wiedergegeben. Gestützt auf das erforderliche Expertenwissen ist das Rechenmodell somit geeignet, in einem iterativen Prozess aufgestellte Vermutungen über eine Fehlersituation im Prüfteil zu überprüfen. An zwei praktischen Fällen werden mögliche Szenarien am Beispiel der zerstörungsfreien Schweißnahtprüfung an Rohren im Folgenden vorgestellt.

Die Prüfung von Rohrrundnähten in Kraftwerken wird in der Praxis mit Ultraschall- und / oder Röntgenverfahren durchgeführt. Die häufig unregelmäßigen geometrischen Verhältnisse sowie unzureichende Informationen über die Durchführung der Schweißung und das Querschnittsprofil im Bereich der Schweißnaht führen oft zu großen Unsicherheiten bei der Interpretation von Prüfbefunden. Ein klassisches Problem stellen dabei Anzeigen aus dem Bereich der Wurzel- und Decklagenraupen dar.⁶³ Die Anzeigen aus dem Decklagenbereich sind leicht überprüfbar, da dieser Bereich meist von außen zugänglich ist. Weitaus schwieriger ist die Bewertung von Anzeigen aus dem Wurzelbereich, da hier im Allgemeinen keine Zugänglichkeit besteht. Besonders schwer ist die Abgrenzung von zur Innenoberfläche des Rohres geöffneten Rissen und solchen mit einem Ligament zur Innenwand. Die nach innen geöffneten Risse sind besonders kritisch, da sie neben einer wesentlich höheren Kerbwirkung bei mechanischer Belastung der Spaltkorrosion bzw. Spannungsrisskorrosion ausgesetzt sind.

Wichtige Voraussetzungen zur Unterscheidung zwischen Form- und Fehleranzeigen und zu einer Aussage über die Fehlerlage (mit Ligament oder ohne) sind Kenntnisse über die Schweißnahtvorbereitung, die Schweißtechnik und ihre Parameter, sowie die ungefähre Wurzelgeometrie und -qualität. Des Weiteren sind Informationen über möglichen Versatz und Wanddickenunterschiede hilfreich, die in Zweifelsfällen über eine Wanddickenmessung ermittelt werden können. Eine klassische Methode zur Untersuchung von Wurzelkerben- und Wurzelraupenanzeigen wird im Folgenden beschrieben.⁶⁴ Die Ultraschallanzeige von beiden Schweißnahtseiten wird am Schirmbild des Impulsecho-Gerätes auf die gleiche Schallwegposition positioniert (vgl. Bild 89). Aus den dazugehörigen Prüfkopfpositionen lässt sich ein gemeinsamer Ort der Anzeigenherkunft ermitteln und in drei Fälle unterscheiden: Eine Anzeige von der Wurzelkerbe mit Rissverdacht auf einer Seite bzw. auf beiden Seiten der Schweißnaht und eine Anzeige von der Wurzelraupe. Diese Vorgehensweise ist aber dann eine ziemliche Überforderung für den Prüfer, wenn er sie an vielen Stellen

⁶³ Erhard, Anton; Tschardtke, Dirk; Wüstenberg, Hermann: Bewertung kritischer Befunde bei der Ultraschallprüfung an Schweißnähten mit Modellrechnungen. Vortrag DACH- Jahrestagung d. DGZfP, Berichtsband 73, Band 1, Innsbruck, 29.-31.05.2000, S. 105-117

⁶⁴ DIN 54125: Manuelle Prüfung von Schweißverbindungen mit Ultraschall. Berlin: Beuth, Januar 1989, Abschnitt 8.3, S. 11f

der Schweißnaht anwenden muss. Daher gab es immer wieder Versuche, diese Problematik durch bessere Ansätze zu beherrschen. In einem TD- Bild von der Längsabtastung einer Schweißnaht [C- (TD-) Bild] erscheinen Anzeigen von der Wurzelraupe und von Wurzelkerben, d. h. von Kanten in Form von nichtverschweißten Bereichen im Wurzelbereich bei der Schweißnahtvorbereitung, als relativ gerade und quasi parallel verlaufende Linien. Bei einer handgeschweißten Wurzel sind diese Anzeigen entsprechend der unregelmäßigen Gestalt der Wurzel zudem sehr ungleichmäßig. Die Bildinterpretation ist daher häufig nicht trivial.

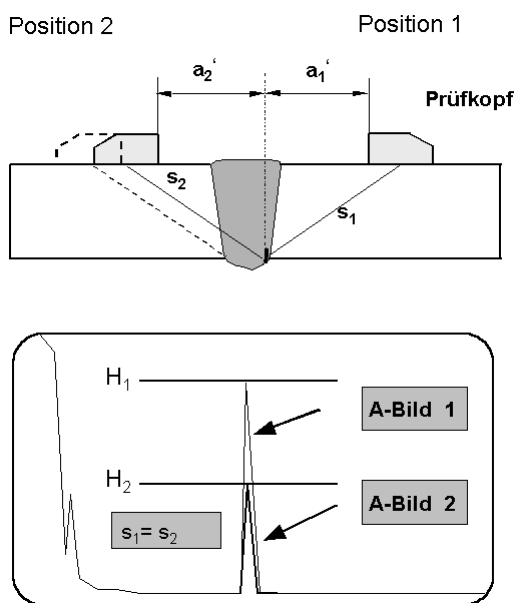


Bild 89: klassische Methode zur Untersuchung von Wurzelkerben- und Wurzelraupen anzeigen

Das Modell wurde zunächst an die vorliegende Prüfsituation angepasst, indem zusätzlich zwei weitere Reflektoren implementiert wurden. Sie sollen eine Wurzelraupe bzw. -kerbe simulieren (vgl. Bild 90). Darüber hinaus kann mit dem standardmäßig berechneten Reflektor beispielsweise ein Lagen- oder Flankenbindefehler mit oder ohne Ligament zur Innenoberfläche berücksichtigt werden. Mit dem modifizierten Modell können jetzt die A- und TD- Bilder entsprechender Abtastungen auf einem handelsüblichen PC berechnet werden. In Tabelle 2 sind die zusätzlichen Eingabeparameter für das geänderte Modell zu den bereits in Tabelle 5 aufgeführten Werten zusammengestellt. Während der Berechnungen wird die Prüfkopfanzordnung und die Schweißnaht mit den angenommenen Reflektoren auf dem Monitor abgebildet. Außerdem erscheint eine Darstellung des gerade berechneten A- Bildes (vgl. Bild 91, links oben) und des TD- Bildes, das beim Verschieben des Prüfkopfes entsteht. Bei einer Querab-

tastung entsteht ein B- (TD-) Bild (vgl. Bild 91, rechts unten) und bei einer Längsabtastung ein C- (TD-) Bild (vgl. Bild 91, rechts oben). Die Berechnung eines TD- Bildes aus ca. 50 A- Bildern dauert bei Vorgabe von drei verschiedenen Reflektoren je nach Ausrüstung des verwendeten PC ca. zwei bis fünf Minuten. Wenn man wie in diesem Fall mehrere Reflektoren simuliert, müssen streng genommen für jeden alle Schallwege beachtet werden. Bei den hier betrachteten Störanzeigen von der Wurzelraupe und -kerbe wurde die Schallwegauswahl auf die Schallwege mit den beim Problem größten Echohöhen reduziert, da die anderen nicht mehr störende Anzeigehöhen produzieren.

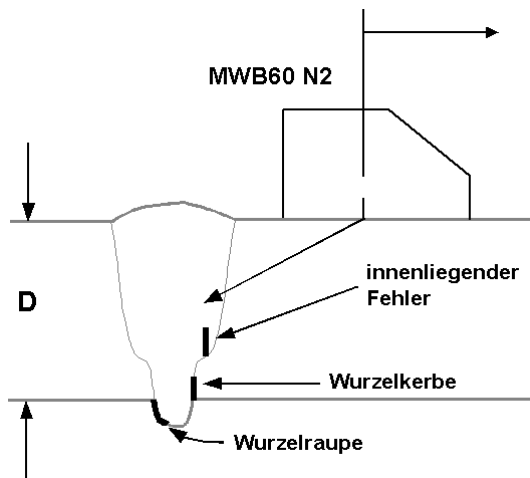


Bild 90: angepasstes Modell mit drei Reflektoren

Kurzformelzeichen	Bedeutung	Dimension / Einheit
kerbAF	Tiefe der Kerben an der Schweißnahtwurzel	[mm]
kerbBF	Länge der Kerben an der Schweißnahtwurzel	[mm]
kerbXI	Schräglage der Wurzelkerbe in Einschallebene	[°]
Delbfwu	Wurzelüberhöhung	[mm]
Radiuswu	Radius der Wurzelüberhöhung	[mm]
Delxwurz	x- Position der Wurzelkante	[mm]
Delxkerb	x- Position der Wurzelkerbe	[mm]
angular dev.	Schräglage der Wurzelkante in Einschallebene	[°]
MR2	Bestimmt die Anzahl der Integrationselemente des Wurzelreflektors senkrecht zur Einschallebene (entspricht der Längenausdehnung), $mm2=2*MR2+1$	[-]
Deltq	x- Position des Hauptfehlers relativ zur Schweißnahtmitte	[mm]

Tabelle 2: zusätzliche Eingabeparameter für das Modell mit drei Reflektoren

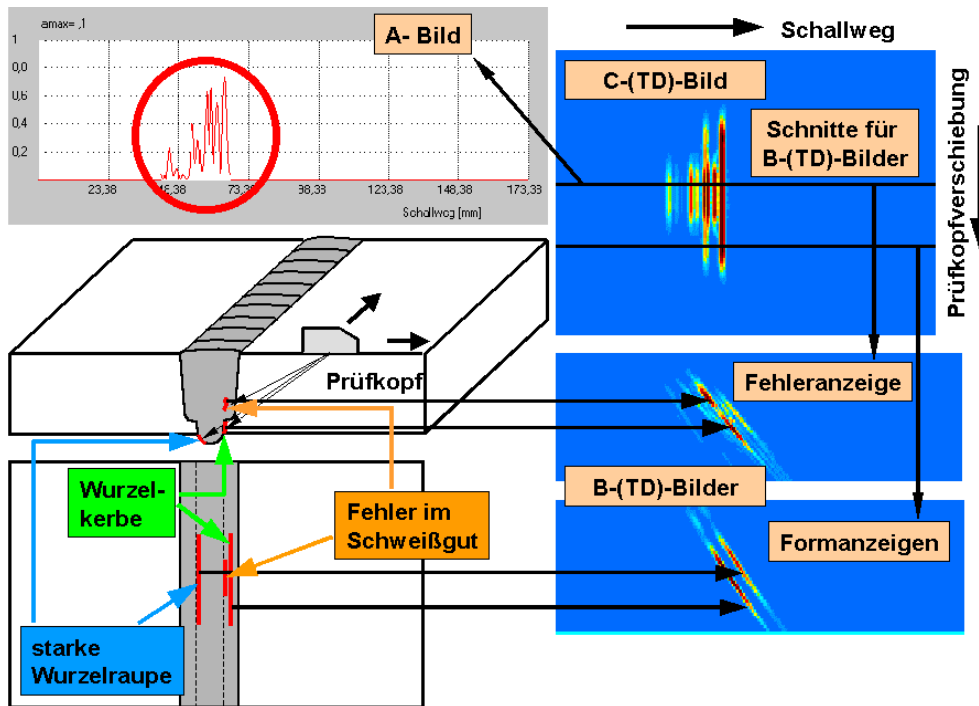


Bild 91: Form- und Fehleranzeigen in A-, B-(TD)- und C-(TD)- Bildern bei der US-Prüfung einer Schweißnaht mit dem Rechenmodell

Eine Ursachenklärung durch die Interpretation am einzelnen A- Bild scheint aufgrund der komplizierten A- Bildstruktur mit zahlreichen kaum unterscheidbaren Echoanzeigen kaum möglich (vgl. Bild 91, links oben). Eine verbesserte Unterscheidung von Form- und Fehleranzeigen ist nur mit einer automatischen Prüfung und Bilddarstellung möglich. Das daneben verwendbare iterative Rechenmodell zeigt hier seine größte Stärke und dient als nützliches Werkzeug, um die Prüfergebnisse besser zu deuten. Der Charakter einzelner Anzeigen kann leicht überprüft werden und so verschiedene Fehlerhypothesen untersucht werden.

In Bild 92 sind vier C- Bilder mit unterschiedlichen Fehlersituationen dargestellt. Im Inneren der Schweißnaht wurde ein Lagenbindefehler als Reflektor angenommen. Die Bilder zeigen Fehlerhypothesen mit und ohne Formanzeigen von der Wurzelraupe und -kerbe. Die Länge der Wurzelraupe bzw. -kerbe wurde bewusst größer als beim Lagenbindefehler gewählt, damit ihre Anzeigen an der größeren Darstellungslänge gut erkennbar sind. Durch eine Veränderung der Rechenparameter kann mit dieser Strategie die Wahrscheinlichkeit verschiedener Fehlerhypothesen in bezug auf den Messbefund untersucht werden. Zusätzlich zur Modifikation der Anzahl und Eigenschaften der Reflektoren können auch die einzelnen Schallwege getrennt voneinander betrachtet werden. So

kann die Ursache jeder in den Bildern auftretenden Anzeige ermittelt werden. Mit dem Rechenmodell können auf diese Weise auch die Echohöhen einzelner Schallweganteile untersucht werden. Dies ist in einer Messung nicht immer möglich, da dort Echoanzeigen mit nahezu gleich großen Schallwegen zusammenfallen. In den Bildern, in denen die Formanzeigen berücksichtigt sind, ist dieser Effekt erkennbar. Die Formanzeigen überlagern die Echoanzeigen einiger Schallwege des Lagenbindefehlers. Deren Echohöhen können dann in einem Messbefund nicht einzeln ausgewertet werden. Bei den Rechnungen können hingegen die jeweils störenden Effekte abgeschaltet und so die Anzeigen eingeschätzt werden. Dies ist insbesondere auch für Zwecke der Prüfer- Ausbildung sehr nützlich.

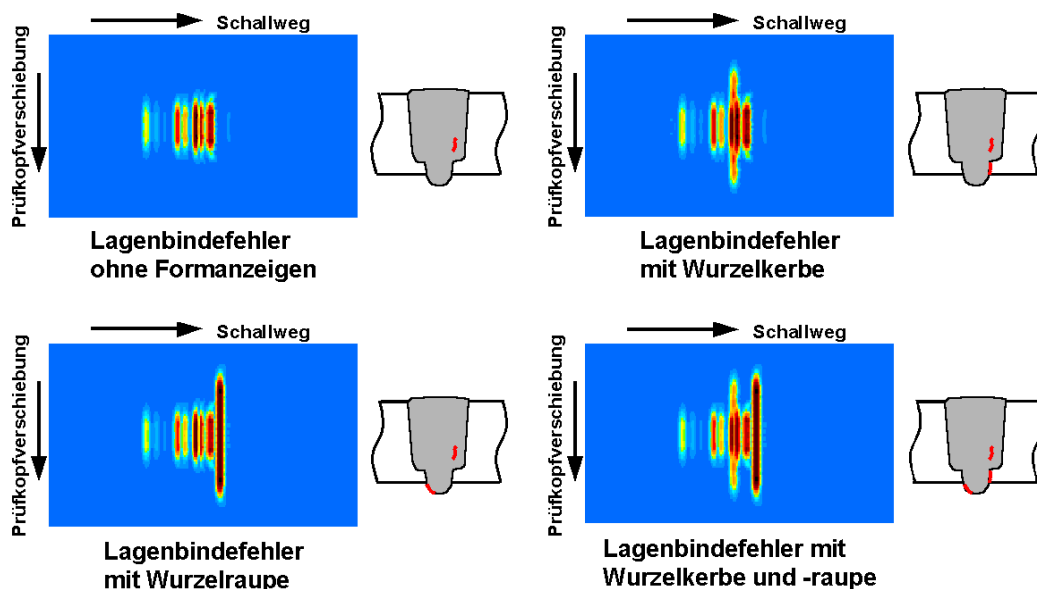


Bild 92: Simulation verschiedener Fehlerhypothesen an einer Schweißnaht

In einem zweiten Beispiel wird der Nutzen der schrittweisen Annäherung der Modellrechnung an den Messbefund über mehrere Fehlerhypothesen durch „iterative Modellierung“ demonstriert:

Die Rundnaht in einer austenitischen Rohrleitung war zerstörungsfrei mit Ultraschall und Röntgenstrahlung geprüft worden. Dabei tauchte bei der Filmauswertung der Verdacht auf rissartige Fehler im Flankenbereich der Naht, in der Nähe der innenliegenden Wurzel, auf. Das Prüfproblem bestand in diesem Falle darin, die Vermutung innenliegender Fehler mit Restligament zur Innenoberfläche gegen die auch mögliche Interpretation von an der Innenoberfläche ausgehenden Rissbildungen abzugrenzen. Die Wanddicke der Rohrleitung betrug 31 mm bei einem Durchmesser von 300 mm. Für die Überprüfung der Mo-

dellrechnungen wurde der in Bild 93 dargestellte Testkörper angefertigt. Der Testkörper enthält funkenerodierte Testfehler, die eine kräftige Wurzelkerbe (2 mm tiefe Nut) und einen innenliegenden senkrecht zur Oberfläche orientierten Flanken- oder Lagenbindefehler (3 mm tiefe Nut mit 4 mm Ligament zur Innenoberfläche) simulieren sollen.

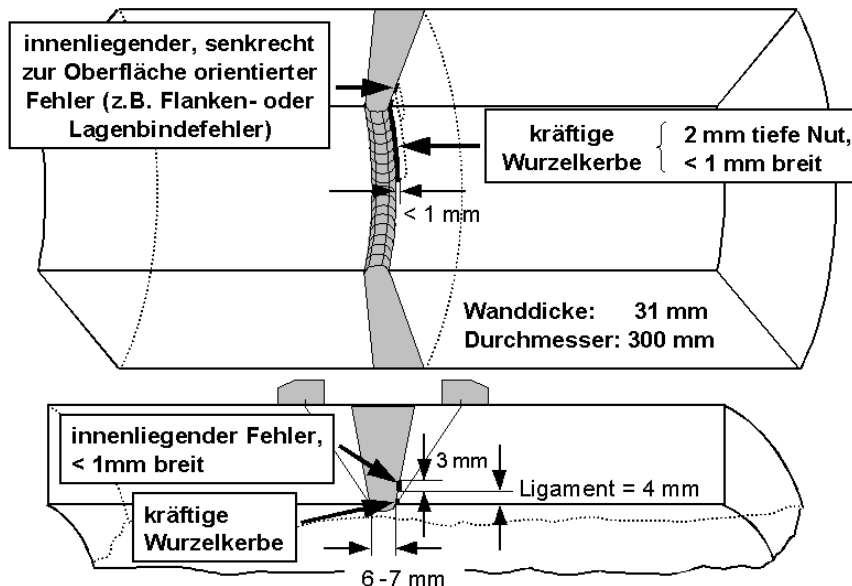


Bild 93: Rohrförmiger Testkörper für die Schweißnahtprüfung

In Bild 94 ist die Messung mit einem MWB 60° N2 (60° Einschallwinkel, 2 MHz Transversalwellen) der entsprechenden Modellrechnung gegenübergestellt. Es ergibt sich eine befriedigende Übereinstimmung der wesentlichen Echoanzeigen. Der Signal- Rausch- Abstand ist in der Modellrechnung wegen der fehlenden messtechnisch bedingten Störeffekte größer. Die Amplitude der Rissspitzenanzeige ist kleiner als in der Messung. Möglicherweise liefert die 1 mm breite Dachfläche der funkenerodierten Nut einen stärkeren Einfluss, als in der Modellrechnung. Diesem Effekt könnte durch die Berücksichtigung dieser Dachfläche innerhalb des Modells Rechnung getragen werden

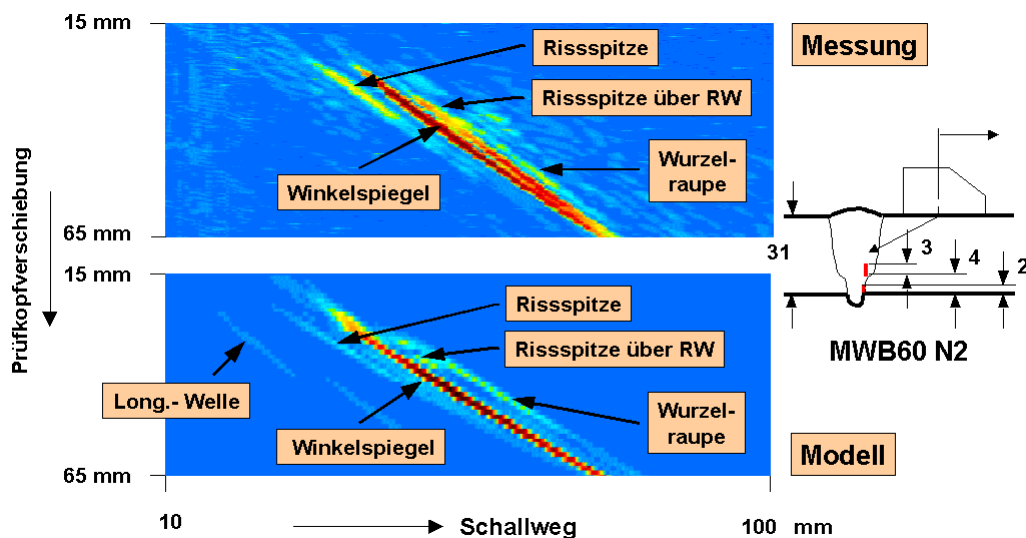


Bild 94: Vergleich Messung - Modell für den 60°-Prüfkopf am Testkörper (Bild 93)

Der Echohöhenabstand zwischen einer Nut (2 mm tief u. 25 mm lang = „KTA“-Nut⁶⁵) und dem innenliegenden Reflektor ergibt zwischen Messung und Modell eine Abweichung von etwa 2 dB. Nach diesem Vergleich wurden Modellrechnungen mit den Transversalwellenprüfköpfen MWB 60° N2 und MWB 35° N2 durchgeführt, um ein Prüfkonzept zur sicheren Unterscheidung von innenliegenden Fehlern und von an der Innenoberfläche beginnenden Rissbildungen zu erarbeiten. Das Grundprinzip geht auf folgenden Umstand zurück: Beim 60°-Prüfkopf ergeben innenliegende Fehler relativ zur „KTA“-Nut eine große Echohöhe, während der 35°-Prüfkopf an der Innenoberfläche liegende Fehler stärker betont und erheblich kleinere Echoanzeigen von innenliegenden Reflektoren liefert.

⁶⁵ KTA 3211.4: Druck- und aktivitätsführende Komponenten von Systemen außerhalb des Primärkreises - Teil 4: Wiederkehrende Prüfungen und Betriebsüberwachung. Salzgitter, Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), 6/1996

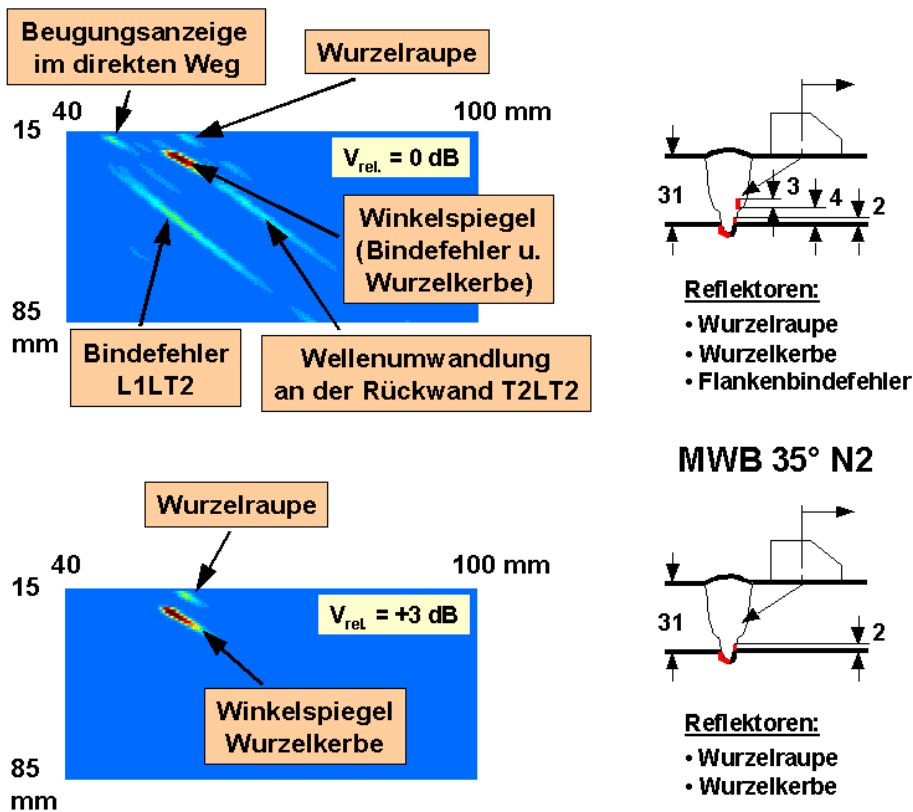


Bild 95: Modellrechnungen für den 35°- Prüfkopf

In Bild 95 sind zwei Modellrechnungen für den 35°- Prüfkopf dargestellt. Im oberen Teilbild wurde eine Fehlersituation mit den drei Reflektoren Flankenbindefehler, Wurzelraupe und -kerbe zu Grunde gelegt. In der zweiten Rechnung wurde der Flankenbindefehler nicht mehr berücksichtigt. Die Wurzelkerbe entspricht dabei einer möglichen Rissbildung an der Innenoberfläche des Rohres. Durch den steilen Einschallwinkel des 35°- Prüfkopfes ergeben sich für den Flankenbindefehler und die Wurzelkerbe etwa gleich große Schallwege. Ihre beiden Winkelspiegelanzeigen überlagern sich daher in einer Anzeige und können nicht getrennt ausgewertet werden. Die Amplitude der Winkelspiegelanzeige in der zweiten Rechnung (Wurzelkerbenanzeige allein) ist gleich groß ausgesteuert wie in der Ersten, dazu musste die Verstärkung um 3 dB erhöht werden. Die fehlenden 3 dB entsprechen gerade dem Anteil, den der Flankenbindefehler in der ersten Rechnung beigetragen hat. Im zweiten Teilbild fallen außerdem alle sekundären Anzeigen, wie die Beugungsanzeige und die Wellenumwandlungsanzeigen, fort. Da es sich bei diesen Anzeigen jedoch um schwache Wechselwirkungen mit kleinen Echohöhen handelt, können sie nicht als sicheres Kriterium zur Identifikation eines innenliegenden Fehlers herangezogen werden. Hier kann nur der Echohöhenunterschied der Winkelspiegelan-

zeige als Hilfe dienen, jedoch reicht die geringe Differenz von 3 dB als einziges Kriterium für eine Bewertung nicht aus.

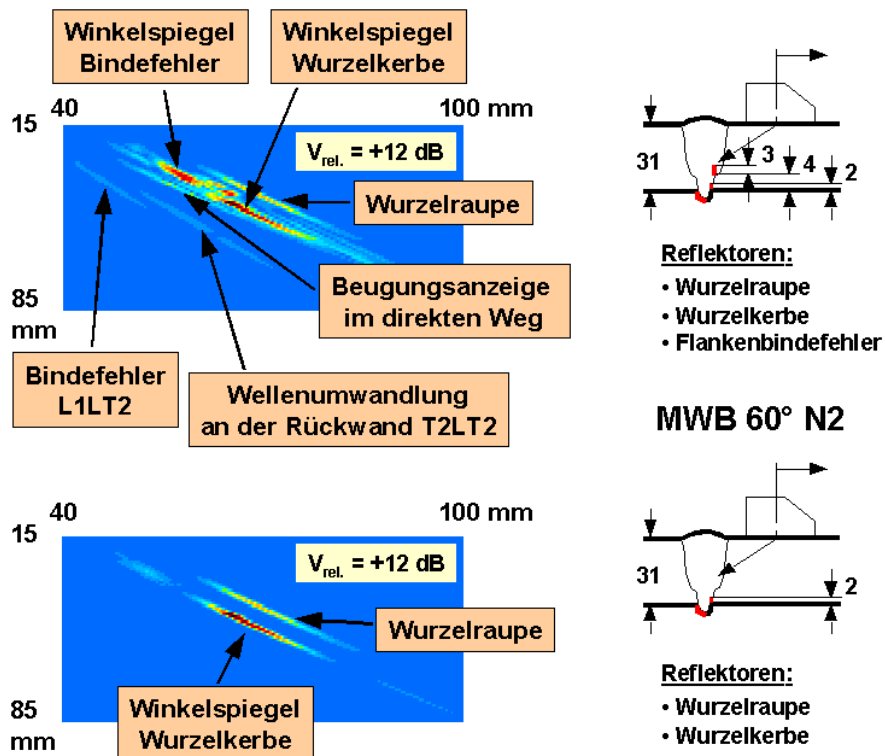


Bild 96: Modellrechnungen für den 60°-Prüfkopf

Schließt man jedoch die in Bild 96 dargestellten Modellrechnungen für den 60°-Prüfkopf unter sonst gleichen Voraussetzungen in die Auswertung mit ein, so ergibt sich eine deutlich bessere Interpretationsbasis. Beim 60°-Prüfkopf ergeben sich deutlich unterschiedliche Schallwege, so dass die Anzeigen des Bindefehlers und der Wurzelkerbe deutlich aufgetrennt werden. Die Echohöhe des Bindefehlers erreicht dabei fast die der Wurzelkerbe. Die Winkelspiegelanzeige der Wurzelkerbe hat die größte Amplitude, die Verstärkung ist daher in beiden Modellrechnungen gleich. Sie wurde lediglich gegenüber den Rechnungen mit dem 35°-Prüfkopf um 12 dB erhöht. Bei Fortfall des Flankenbindefehlers im unteren Bildteil erkennt man sehr deutlich den Wegfall der vorderen starken Winkelspiegelanzeige. Ebenso entfallen die Sekundäranzeigen, deren Echohöhen auch hier für eine Bewertung nicht ausreichen würden. Doch anhand eines Mustervergleichs der starken Wechselwirkungen in den berechneten Fehlerhypothesen mit dem Prüfbefund kann das Vorliegen der einen oder der anderen Fehlerart erheblich sicherer bestätigt werden.

Eine weitere nützliche Anwendung der Modellrechnung bestand im vorliegenden Fall in dem Vergleich mit Aussagen zur Fehlergeometrie aufgrund von Röntgenbildern der Schweißnaht. Auf Basis des Röntgenbefunds wurde eine Fehlerschräglage von $+16^\circ$ angenommen (Bild 97 oben). Die Interpretation eines ergänzenden Ultraschallbefundes ergab die widersprüchliche Annahme der entgegengesetzten Reflektorneigung -16° (Bild 97 unten). Um den auftretenden Widerspruch aufzulösen, wurden beide Hypothesen mit dem Rechenmodell nachgerechnet. Die Echoanzeigen des innenliegenden Reflektors entstehen im ersten Fall ($+16^\circ$) über eine Umlenkreflexion unter Einbeziehung der Innenoberfläche. Bei der negativen Reflektorneigung ergibt sich eine Orientierung etwa senkrecht zur Einschallrichtung des 60° -Prüfkopfes, die Echoanzeige entsteht hier im direkten Weg zwischen dem Prüfkopf und dem Reflektor. Die bei gleicher Verstärkung berechneten Bilder machen deutlich, dass sich sowohl von der Echohöhe, als auch vom Anzeigenmuster bei dem 60° -Prüfkopf für unterschiedliche Schräglagen gleichartige Resultate ergeben können. Mit dem Rechenmodell konnte so eine Mehrdeutigkeit des Ultraschallmessbefundes nachgewiesen und der Fehler bei seiner Interpretation aufgedeckt werden. Der scheinbare Widerspruch zur Radiographie wurde damit gegenstandslos.

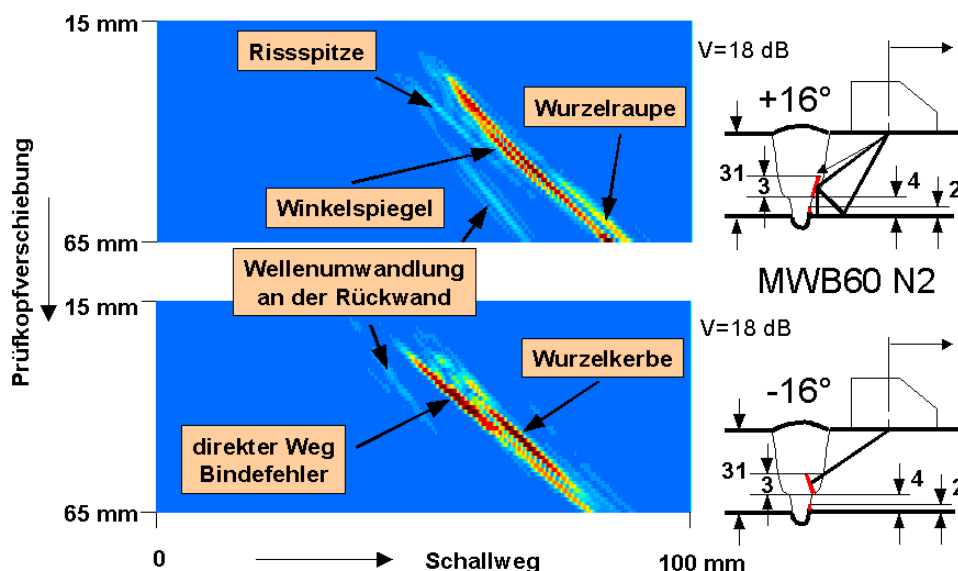


Bild 97: Entstehung gleichartiger Prüfbefunde bei unterschiedlicher Reflektorneigung

3.6 Systematisierung mit Hilfe der Evolutionsstrategie

3.6.1 Grundgedanken zum Einsatz der Evolutionsstrategie

Die eingangs betrachteten Bewertungsmethoden (siehe Abschnitt 2) lassen sich in zwei Gruppen unterscheiden: Eine Gruppe der Verfahren versucht, die gesuchten Fehlerparameter aus den Messdaten abzuleiten (z. B. durch Amplitudenbewertung oder Mustervergleich). Die andere Gruppe, die der Fehlerrekonstruktionsverfahren, ist bemüht, die Quelle der Störung, den Fehler, über mathematische Inversionsverfahren aus den Messdaten zu ermitteln. Sie sucht also nach der Lösung des inversen Problems (z. B. Holographie, SAFT, Echotomographie). Die für die Rekonstruktion zu lösenden Integrale sind im allgemeinen nur durch Näherungen bestimmbar und setzen, wenn dieser Weg zur Fehlerdiagnose dienen soll, meistens voraus, dass der Fehler möglichst richtungsunabhängig mit der verwendeten Ultraschallwelle in Wechselwirkung tritt. Da dies nur selten der Fall ist, taugen die Ansätze mit einer Lösung des inversen Problems nur sehr begrenzt als alleiniges Instrument zur Fehlerdiagnose. Das hier vorgestellte und untersuchte iterative Ultraschallmodell berechnet aus den vorzugebenden Eingabeparametern einen Rechenbefund, der im Rahmen der Modell- und Messgenauigkeit dem Prüfbefund entsprechen sollte. Voraussetzung für die Rechnung ist die Definition einer Fehlerhypothese mit geometrischen Angaben über den angenommenen Fehler. Folglich eignet sich das Modell nicht zur Lösung des inversen Problems auf direktem Weg. Die vorgestellte Methode der iterativen Modellierung hat jedoch bei bisherigen Einsätzen gezeigt, dass über die Untersuchung mehrerer Fehlerhypothesen unter Einführung von a priori und Expertenwissen eine Interpretation des Prüfbefundes möglich ist. Dafür ist allerdings der Einsatz von entsprechend gut qualifiziertem Personal erforderlich. Im Folgenden wird gezeigt, wie man das inverse Problem auch durch eine Systematisierung der iterativen Modellierung lösen könnte. Das Rechenmodell wird dazu mit dem Prinzip der Evolutionsstrategie kombiniert.

Evolutionsstrategien wurden in Deutschland seit Mitte der sechziger Jahre verwendet. In Firmen und Universitäten wurde untersucht, ob die Evolutionsstrate-

gie zur Optimierung technischer Probleme eingesetzt werden könnte.^{66, 67} Man geht von der Hypothese aus, dass die biologische Evolutionsmethode eine optimale Strategie zur Anpassung der Lebewesen an ihre Umwelt darstellt. Deshalb sollte es sich lohnen, Prinzipien der biologischen Evolution auch zur Optimierung technischer Systeme heranzuziehen. An der Technischen Universität Berlin beschäftigte sich RECHENBERG im Jahr 1964 bei der Entwicklung eines widerstandsminimalen Strömungskörpers (Gelenkplattenversuch im Windkanal) mit dieser Fragestellung.⁶⁸ Er konnte die Evolutionsstrategie während seiner Untersuchungen zur Lösung verschiedener Problemstellungen erfolgreich einsetzen. DÖRING, von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, setzte 1986 Algorithmen der Evolutionsstrategie zur Optimierung von AOW/ SAW- Bandpassfiltern (AOW- akustische Oberflächenwellen; SAW- surface acoustical waves) nutzbringend ein.⁶⁹ Durch die vielversprechende Anwendung der Evolutionsstrategie an unterschiedlichen technischen Problemstellungen entstand die Idee, mit dem Verfahren die iterative Modellierung für die Fehlerdiagnose quasi zu automatisieren.

3.6.2 Prinzip der Evolutionsstrategie

Der heutige Wissenschaftszweig Bionik und auch andere Technikbereiche stützen sich auch auf die Erkenntnis, dass die heutigen Lebewesen das Ergebnis einer über drei Milliarden Jahre andauernden Evolution sind. In dieser Zeitspanne wurde alles Unangepasste eliminiert und an die jeweilige Umwelt optimal angepasste Lebensformen geschaffen. Die Evolution unterliegt dabei selbst auch einer Evolution. Für das Überleben einer Art ist nicht nur die momentane Lebensleistung eines Individuums wichtig. Nach mehreren Generationen wird auch die bessere Vererbungsstrategie, die eine schnellere Umweltanpassung ermöglicht, ausgelesen und weiterentwickelt.

⁶⁶ Schwefel, Hans- Paul: Experimentelle Optimierung einer Zweiphasendüse. Bericht 35 des AEG- Forschungsinstituts Berlin zum Projekt MHD- Staustrahlrohr, 1968

⁶⁷ Körner, W. u.a.: Optimierung der Geometrie quer angeströmter Rohrrippen hinsichtlich des Wärmeübergangs. In: Verfahrenstechnik 7 (1973), S.109-113

⁶⁸ Rechenberg, Ingo: Evolutionsstrategie '94. Stuttgart, Frommann- Holzboog, 1994, S.25

⁶⁹ Döring, Joachim: Die Entwicklung von AOW- Bandpassfiltern unter Anwendung der biologischen Evolution. Dissertation an der Akademie der Wissenschaften der DDR, 1986

Mit der Evolutionsstrategie sollte das Prinzip der biologischen Evolution in den technischen Bereich übertragen werden. Der biologische Prozess sollte nicht schlicht kopiert, sondern vielmehr die Funktionsprinzipien der Evolution verstanden und so weit möglich in die Technik „übersetzt“ werden. Bei maximaler Abstraktion lässt sich die biologische Evolution als ein zweistufiger Prozess auffassen. Es werden zufällige Variationen erzeugt, deren unvorteilhafte Varianten anschließend ausgesondert werden (Mutations- Selektions- Prinzip). Unter folgenden Voraussetzungen lässt sich dieses Prinzip auch auf technische Systeme anwenden: Die Erbanlagen eines Lebewesens (der Genotyp) entsprechen den Konstruktionsunterlagen für ein technisches Gebilde. Die Informationen der Gene in den Chromosomen eines Organismus entsprechen den Maßangaben auf der Konstruktionszeichnung des technischen Objektes. Das Erscheinungsbild des Lebewesens (der Phänotyp) wird mit dem betriebsfertigen technischen Objekt verglichen. Das Maß für den Entwicklungsstand eines Lebewesens ist seine Vitalität in einer bestimmten Umwelt. Im Fall der hier betrachteten technischen Objekte wird dafür seine Qualität in bezug auf die vorgegebenen Randbedingungen und Anforderungen herangezogen.⁷⁰

Die aufgestellten Voraussetzungen erinnern stark an den klassischen Maschinenbau. Es werden Zeichnungen von technischen Objekten erstellt, nach deren Maßen die Objekte, beispielsweise auf einer Drehbank, hergestellt werden können. Dieser Ansatz lässt sich dennoch leicht auch auf abstraktere Forschungsgegenstände, wie die Modellierung der US- Prüfung, übertragen. Die bei der Prüfung aufgenommenen Messdaten, z. B. ein TD- Bild, entsprechen dem an seine Umwelt optimal angepassten Lebewesen am Ende einer lange dauernden Evolution. Das Verfahrensziel ist die bestmögliche Nachbildung der Messdaten mit dem Rechenmodell. Das Modell entspricht den erwähnten Konstruktionsunterlagen, da mit ihm die TD- Bilder berechnet werden. Die Informationen der Gene sind die eingegebenen Rechenparameter.

Die Eingabewerte des Modells teilen sich in zwei verschiedene Gruppen, da nur wenige für den Evolutionsprozess relevant sind. In diesem Sinn unrelevante Daten sind etwa das Prüfkopfspektrum, die Bauteildicke oder die Schallgeschwindigkeiten. Sie müssen natürlich mit den bei der Messung vorliegenden

⁷⁰ Rechenberg, Ingo: Evolutionsstrategie '94. S. 257-264

Werten übereinstimmen, bleiben aber während der Evolution konstant. Die relevanten Daten werden während der Evolution angepasst und beschreiben Fehlertyp und -geometrie, zu ihnen gehören unter anderen auch die Tiefenlage, die Schräglage und die Ausdehnung des Fehlers. Das aus einem Parametersatz berechnete TD- Bild entspricht seinem Phänotyp. Die Qualität dieses TD-Bildes lässt sich aus der Übereinstimmung mit dem gemessenen TD- Bild ableiten. Entsprechen sich beide Bilder exakt, dann ist die maximale Qualität erreicht, der Evolutionsvorgang ist beendet. Anderenfalls müssen die Informationen der Gene (die relevanten Eingabewerte) durch einen Zufallsprozess mutiert und eine neue Berechnung durchgeführt werden, bis die gewünschte Übereinstimmung erreicht wird.

Aufgrund ihrer biologischen Herkunft entlehnt die Evolutionsstrategie einige Begriffe aus der Genetik. Das TD- Bild, als Phänotyp, wird demnach als Individuum betrachtet. Mehrere Individuen werden zu einer Generation zusammengefasst. Das aus den Eingabeparametern der ersten Fehlerhypothese berechnete TD- Bild gilt als Elter der ersten Generation. Alle weiteren TD- Bilder, die durch eine Modifikation dieses Parametersatzes berechnet werden, sind Nachkommen in der ersten Generation. Der Grundalgorithmus der Evolutionsstrategien ist die sogenannte zweigliedrige Evolutionsstrategie, von der zwei Varianten, die $(1 + \lambda)$ - und $(1, \lambda)$ - Evolutionsstrategien, existieren. In beiden erzeugt im Variationsschritt ein Elter λ mutierte Nachkommen. Im anschließenden Selektionsschritt liegt der Unterschied der beiden Varianten. Bei der $(1 + \lambda)$ - Evolutionsstrategie gelangen der Elter und die Nachkommen einer Generation in eine Selektionsurne. Der beste Gruppenvertreter wird selektiert und ist Elter der nächsten Generation. Bei der $(1, \lambda)$ - Evolutionsstrategie gelangen nur die Nachkommen in die Selektionsurne und der beste Nachkomme wird Elter der Folgegeneration. Die schematischen Abläufe der beiden Algorithmen zeigt Bild 98, eine Zeichenerklärung erfolgt in Bild 99.⁷¹

⁷¹ Rechenberg, Ingo: Evolutionsstrategie '94, S. 46

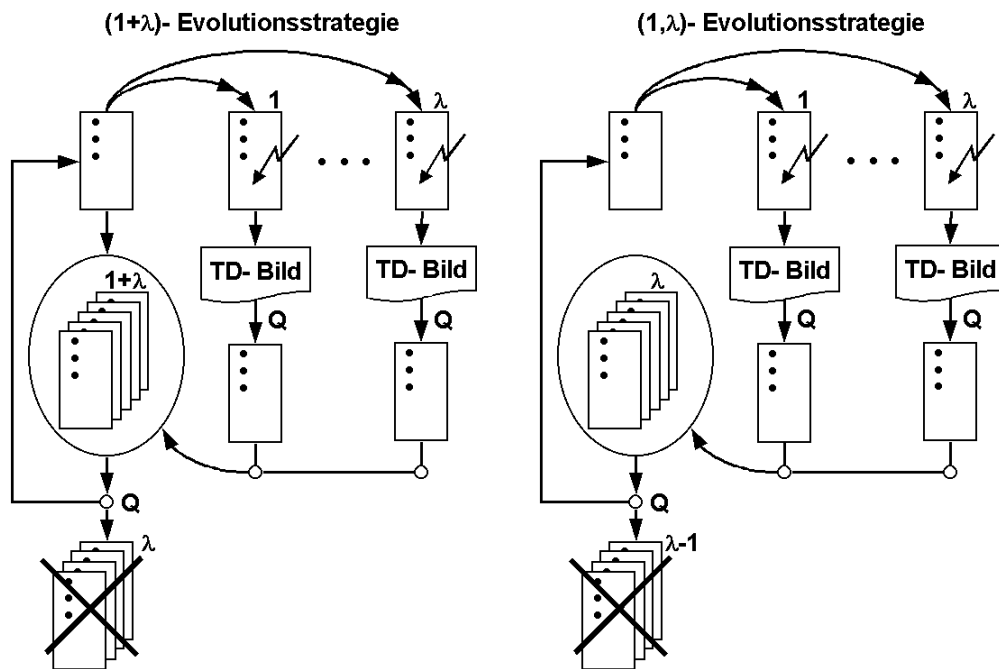


Bild 98: Schematischer Ablauf der $(1 + \lambda)$ - und $(1, \lambda)$ -Evolutionstrategie

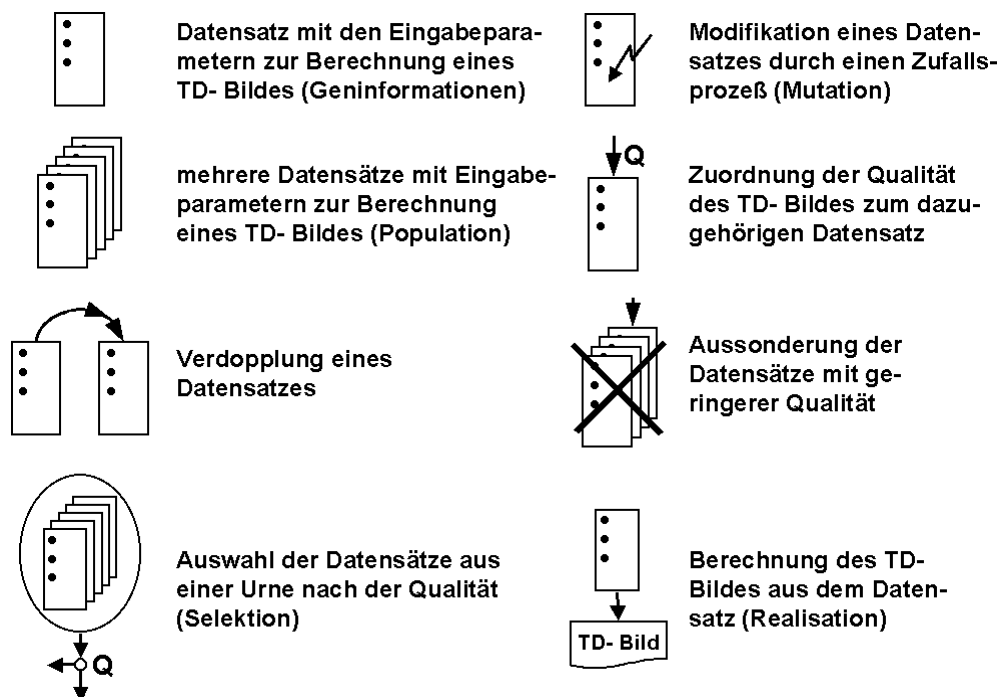


Bild 99: Zeichenerklärung für die Ablaufschemen in Bild 98

Als Maß für die maximalen Differenzen zwischen Elter und Nachkomme bei der Nachkommenvariation ist die Festlegung einer Schrittweite erforderlich. Sie ist besonders wichtig, da von ihr die Fortschrittsgeschwindigkeit (die Höhe des Qualitätszuwachses) abhängig ist. Eine zu große Schrittweite führt zu Rückschritten, bei zu kleiner Schrittweite kommt es zur Stagnation. RECHENBERG führt in diesem Zusammenhang den Begriff des Evolutionsfensters ein. Der

gewünschte Fortschritt kann danach nur mit Schrittweiten innerhalb der Grenzen des Evolutionsfensters erzielt werden. Diese Leistung wird vom Algorithmus der mehrgliedrigen Evolutionsstrategie mit Mutations- Schrittweiten- Regelung vollbracht.⁷² Die Mutations- Schrittweiten- Regelung bewirkt Schrittweitenänderungen während des Evolutionsprozesses.

Für die Untersuchungen zur Anwendung der Evolutionsstrategie zur Fehlerdiagnose wurde eine zufallsbasierte Methode verwendet, bei der in Abhängigkeit von einer Zufallszahl vergrößerte oder verkleinerte Mutationsschritte ausgeführt werden. Bezugswert für die Schrittweitenvariation ist die beste Mutations-schrittweite aus der vorherigen Generation, die am Beginn der neuen Generation zur Elternschrittweite wurde. Dadurch erwartet man, dass sich in einer Generation bevorzugt diejenige Schrittweite durchsetzt, die der momentanen Topologie des Qualitätsgebirges besser angepasst ist. Dieser Prozess wird auch als Evolution zweiter Art bezeichnet.⁷³

3.6.3 Erweiterungsfähigkeit des FSAM mit der Evolutionsstrategie

Um die Fähigkeit des Rechenmodells zu untersuchen, mit der Evolutionsstrategie zu kooperieren, wurde zunächst der Algorithmus der (I, λ) - Evolutionsstrategie mit der Modelltechnik realisiert. Dafür waren einige wesentliche Eingriffe in den Rechenablauf des Modells erforderlich (s. a. Flussdiagramm in Bild 35 in Abschnitt 2.8.7). Das Modell musste z. B. mit einer Routine erweitert werden, die alle nötigen Informationen aus der Messdatei ausliest. Außerdem musste die Rechenschleife umformuliert werden, da die bisherigen Rechnungen einen konstanten Abstand zwischen den Prüfkopfpositionen voraussetzten. Bei der Aufnahme der Messdaten ist der Messrechner aber während der Digitalisierung der Daten kurzfristig ausgelastet und kann kein neues A- Bild aufnehmen. Wenn zu diesem Zeitpunkt der Triggerimpuls von der Weggebereinheit des Manipulators zur Aufnahme des nächsten A- Bildes gesendet wird, verzögert sich die Datenaufnahme einen Moment. Bis zur Aufnahme des nächsten A- Bildes hat sich der Prüfkopf dann ein bis zwei zehntel Millimeter weiterbewegt

⁷² Rechenberg, Ingo: Evolutionsstrategie '94, S. 72f

⁷³ Rechenberg, Ingo: Evolutionsstrategie '94, S. 47f

und in einer Messspur werden dadurch durchschnittlich etwa 5% weniger A-Bilder aufgenommen, als theoretisch vorgesehen. Für den Evolutionsprozess wurde die Rechenschleife so modifiziert, dass als Prüfkopfpositionen die aus der Messdatei ausgelesenen Weggeberpositionen verwendet werden, damit die gemessenen und berechneten TD- Bilder vergleichbar sind.

Die größte Schwierigkeit bei der Umsetzung der Evolutionsstrategie stellt die Definition einer dem Problem angepassten und geeigneten Qualitätsfunktion dar. Die mit der Qualitätsfunktion zu vergleichenden TD- Bilder sind zweidimensionale Bilder. Die Qualitätsfunktion hat die Aufgabe, die darin enthaltenen Bildinformationen zu bewerten und so weit zu reduzieren, dass die Qualität durch eine skalare Größe ausgedrückt werden kann. In Abhängigkeit von der Fehlersituation enthalten die TD- Bilder aber mehr oder weniger komplexe Bildinformationen. Daher erscheint es sinnvoll, die Qualitätsfunktion auf Basis von Algorithmen zur Bildauswertung zu definieren. Hierfür sind in der Literatur zahlreiche Verfahren angegeben, deren Anwendung jedoch beliebig aufwändig werden kann. Um die Erweiterungsfähigkeit des Modells mit der Evolutionsstrategie einzuschätzen, wurde daher zunächst nur eine einfache Funktion definiert (vgl. Gleichung 17).

$$Q = \frac{\sum_{n=1}^{ABildN} \sum_{m=1}^{PixelN} Ampl_{mess}(n, m) - \sum_{n=1}^{ABildN} \sum_{m=1}^{PixelN} |Ampl_{rech}(n, m) - Ampl_{mess}(n, m)|}{\sum_{n=1}^{ABildN} \sum_{m=1}^{PixelN} Ampl_{mess}(n, m)}$$

Q :	Qualität	$Ampl_{mess}(n, m)$:	Amplitudenwert von der
$PixelN$:	Anzahl der Pixel pro A- Bild		Messung im Bildpunkt (n, m)
$ABildN$:	Anzahl der A- Bilder	$Ampl_{rech}(n, m)$:	Amplitudenwert von der
			Rechnung im Bildpunkt (n, m)

Gleichung 17: Qualitätsfunktion für den Eignungstest

In diese Qualitätsfunktion gehen aber keine Formkriterien aus der TD- Bildstruktur ein. Daher sind die ersten Resultate auch nicht zu verallgemeinern. Die Qualitätsbewertung entsteht durch einen Vergleich der Informationen in den Bildpunkten der Messdatei mit den korrespondierenden Bildpunkten in der Rechendatei. Bei hundertprozentiger Übereinstimmung der Mess- und Rechen-

daten ergibt sich nach Gleichung 17 definitionsgemäß die Qualität eins. Aufgrund der einfachen Bewertung ist der Einfluss von auftretenden Rauscheffekten und Differenzen bei den Schallwegen bzw. Prüfkopfpositionen auf den ermittelten Qualitätswert sehr ausgeprägt. Dies wird im anschließend durchgeführten Eignungstest deutlich, der ungehindert dessen durchgeführt werden kann.

Ein erster Versuch wurde anhand einer Messung an der 15 mm tiefen und senkrecht orientierten Nut im Testkörper BAM 63-2 durchgeführt. Eine Zeichnung des 63 mm dicken Testblocks befindet sich in Anhang 5.4. Die Nut ist oberflächenverbunden und liegt gegenüber der Prüfoberfläche. Als Prüfkopf wurde wie bei der Messung der MWB 45° N4 verwendet. In Bild 100a erkennt man wie erwartet eine einzelne starke Echoanzeige. Sie wird durch den Winkelspiegeleffekt der aus der Rückwand und der Nut gebildeten Ecke hervorgerufen. Die Messdatei hat ein sehr gleichmäßig über das Bild verteiltes Rauschen mit einem hohen Signal- Rausch- Abstand von etwas über 40 dB. Da die Nut durch eine Funkenerosion hergestellt wurde, hat sie eine sehr geringe Schlitzbreite (ca. 0.2 mm) und die Beugungsanzeigen von der Rissspitze haben deutlich kleinere Amplituden als bei gesägten Schlitzten größerer Breite. Aufgrund der schwachen Wechselwirkung der Rissspitze mit der Ultraschallwelle sind die Amplituden ihrer Anzeigen nicht viel größer als das Rauschniveau und die Rissspitzenanzeigen sind in Bild 100a kaum von den Rauscheffekten zu differenzieren. Eine Auswertung dieser Anzeigen kann aber in digitaler Form erfolgen. Bild 100b zeigt eine der Fehlersituation im Testblock exakt entsprechende Modellrechnung. Die Modellrechnung ergibt ein der Messung sehr ähnliches TD- Bild ohne Rauscheffekte. Die beiden Rissspitzenanzeigen werden im TD- Bild korrekt wiedergegeben. Trotzdem ergibt sich nur ein Qualitätswert von 0.095, da die Qualitätsbewertung auf den Amplitudendifferenzen zwischen allen Bildpunkten des gemessenen und berechneten TD- Bildes basiert und die im gesamten Messbild auftretenden Rauscheffekte den Qualitätswert deutlich senken.

Um dieses Problem zu umgehen wurde folgendermaßen vorgegangen:
Für die einfache Qualitätsfunktion ist bei der Qualitätsbewertung die im TD- Bild enthaltene Winkelspiegelanzeige wesentlich. Der ermittelte Qualitätswert hängt vor allem von der korrekten Amplitudenhöhe, der Übereinstimmung der Echo-

dynamik und deren Position im TD- Bild ab. Die beiden Rissspitzenanzeigen hingegen liefern bei dieser Art der Qualitätsbewertung im Vergleich zu den im gesamten TD- Bild vorhandenen Rauscheffekten einen vernachlässigbaren Qualitätsbeitrag. Aus diesen Gründen wurden die Rauscheffekte und damit zwangsweise verbunden auch die darin enthaltenen Rissspitzenanzeigen in der Messdatei unterdrückt und die Modellrechnung mit der modifizierten Messdatei (vgl. Bild 100c) verglichen. Dieser Vergleich ergibt einen deutlich höheren Qualitätswert von 0.281. Die weitere Qualitätsdifferenz zur Maximalqualität eines geht auf das Konto der erwähnten Differenzen bei den Schallwegen und Prüfkopfpositionen. Bei der Messung entstehen Abweichungen durch Fehler bei der Gerätejustierung und der Prüfkopfpositionierung auf dem Testblock, bei der Rechnung durch die im Modell verwendeten Näherungen. Der verhältnismäßig niedrige Qualitätswert soll aber nicht über die Güte der Modellrechnung hinwegtäuschen. Er ergibt sich im wesentlichen aus der hohen Empfindlichkeit der hier verwendeten einfachen Qualitätsfunktion. Der in Abschnitt 3.3 in Bild 77 dargestellte Echodynamikvergleich an dieser Nut zeigte bereits die gute Übereinstimmung zwischen Messung und Modellrechnung.

Diese hier gewählte Vorgehensweise ist jedoch keinesfalls allgemeingültig. Sie dient an dieser Stelle nur zur Reduktion der Empfindlichkeit der Qualitätsfunktion auf die Rauscheffekte in der Messdatei. Der durch die Unterdrückung der Rissspitzenanzeigen bei der Qualitätsbewertung hervorgerufene Fehler ist in diesem Fall deutlich kleiner als der durch die Rauscheffekte resultierende. Nur so lässt sich diese Maßnahme rechtfertigen. Bei Verwendung einer leistungsfähigeren Qualitätsfunktion auf Basis von Algorithmen der Bildauswertung würde den Rissspitzenanzeigen, insbesondere unter Einbeziehung des Anzeigenmusters in die Bewertung, eine bedeutendere Rolle zukommen und die gewählte Methode wäre unzulässig. Zu einer Musterbewertung ist die einfache Qualitätsfunktion jedoch ungeeignet.

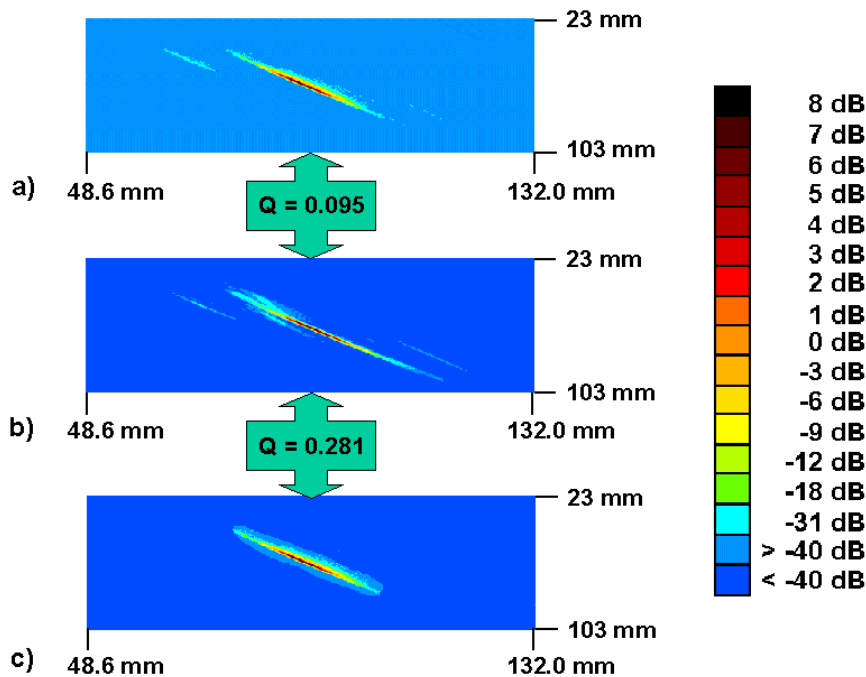


Bild 100: Vergleich der TD- Bilder und Qualitätswerte an der 15 mm Nut, a) verrauschte Messung (Rauschen optisch nicht erkennbar), b) Modellrechnung, c) Messung (Rauschen unterdrückt)

Da das Rechenmodell diese relativ einfache Fehlersituation trotz der dargestellten Grenzen beherrscht, soll an diesem Beispiel auch die Kombination mit der Evolutionsstrategie untersucht werden. Um bei diesem Versuch die Schwierigkeiten der einfachen Qualitätsfunktion zu umgehen, wird an Stelle des gemessenen das mit dem Modell berechnete TD- Bild (Bild 100b) als „Messbefund“ vorgegeben. So kann die maximale Qualität eins erreicht und der Rechenalgorithmus getestet werden. Die Rechnung erfolgt als (1+10)- Evolutionsstrategie, d. h. in jeder Generation werden ausgehend vom Elter zehn Nachkommen berechnet. Die Nachkommen und der Elter kommen in die Selektionsurne und das Individuum (TD- Bild) mit der höchsten Qualität wird Elter der nächsten Generation. In Tabelle 3 sind die Reflektorparameter für die Berechnungen und das Ergebnis der Evolution dargestellt. Die Reflektorparameter der als „Messbefund“ dienenden Modellrechnung entsprechen der Situation im Testblock. Die Startwerte für den ersten Elter entsprechen der vom Experten aufgestellten ersten Fehlerhypothese. Für den Test wurden hier die Tiefenausdehnung der Nut, die Schräglage der Nut in der Einschallebene und ihre Tiefenlage modifiziert. Diese drei Parameter sollen von der Strategie optimiert werden. Die Nutbreite und die Schräglage der Nut quer zur Einschallebene wurden exakt vorgegeben und bleiben während der Rechnungen konstant. Als

Abbruchkriterien für den Evolutionsprozess wurden 200 Generationen und eine Qualität von 0.9 definiert. Bei Erfüllung eines dieser Kriterien wird die Evolution beendet und das Ergebnis protokolliert.

Reflektorparameter	„Messbefund“ Modellrechnung	Startwerte für 1. Elter	Parameter- verhalten	Ergebnis der Evolution
AF	15 mm	10 mm	variabel	14.39 mm
BF	60 mm	60 mm	fest	60 mm
AMUE	0°	0°	fest	0°
XI	0°	-5°	variabel	0.016°
BFT	55.5 mm	45 mm	variabel	55.8 mm

AF: Reflektortiefenausdehnung *BF:* Reflektorbreite
AMUE: Winkel quer zur Einschallebene *XI:* Winkel in der Einschallebene
BFT: Tiefenlage (bezogen auf die Reflektormitte)

Tabelle 3: Reflektorparameter und Evolutionsergebnis

Mit den in der Protokolldatei abgespeicherten Daten kann der Verlauf des Evolutionsprozesses nachvollzogen werden. In Bild 101 ist die Qualitätsentwicklung, der Verlauf der Schrittweite und die der Schräglagen quer zur Einschallebene und in der Einschallebene dargestellt. Die Evolution wurde in der 18. Generation beendet, das Abbruchkriterium war die erreichte Qualität des zweiten Nachkommen dieser Generation von 0.917, wodurch die geforderte Qualität von 0.9 übertroffen wurde. Die Gesamtrechnzeit auf einem PC mit einem AMD K6-II- Prozessor (Taktfrequenz 500 MHz) betrug 2:04:52 Stunden. In dieser Zeit wurden in den 17 abgeschlossenen Generationen $17 \cdot 10 = 170$, in der 18. Generation weitere zwei Nachkommen und der Elter der ersten Generation, also insgesamt 173 TD- Bilder berechnet. Die Zeit zur Berechnung eines Bildes betrug damit einschließlich der Auswertungszeit nur etwa 44 Sekunden. Die Schrittweite, als Maß für die Veränderung der Reflektorparameter wurde bis zur 6. Generation von anfangs 1.0 bis auf 3.71 erhöht. Dadurch wurde zwischen der 5. und 8. Generation ein großer Qualitätsanstieg erreicht. Mit steigender Qualität befindet man sich näher am gewünschten Optimum, so dass große Parameteränderungen keinen Qualitätsfortschritt mehr erzielen. Aus dieser Konsequenz setzen sich zum Ende der Evolution zunehmend die Nachkommen mit kleineren Schrittweiten durch. In Folge dessen nimmt die Steigung der Qualitätskurve ab. Die vorgegebene Schräglage in der Einschallebene von -5° wird bis zur 7. Generation vergrößert und erreicht dort einen Maximalwert

von $+1.86^\circ$. Danach setzen sich wieder Nachkommen mit kleinerer Schräglage durch und am Ende wird mit 0.016° quasi der korrekte Winkel von 0° ermittelt.

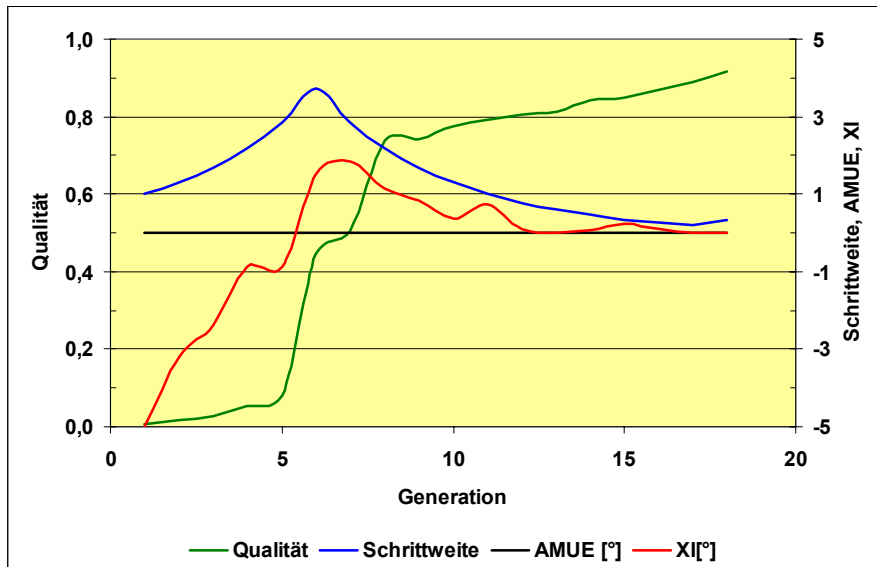


Bild 101: Qualitätsentwicklung und Verlauf der Schrittweite, der Nutschräglagen quer zur Einschallebene (AMUE= konst.) bzw. in der Einschallebene (XI)

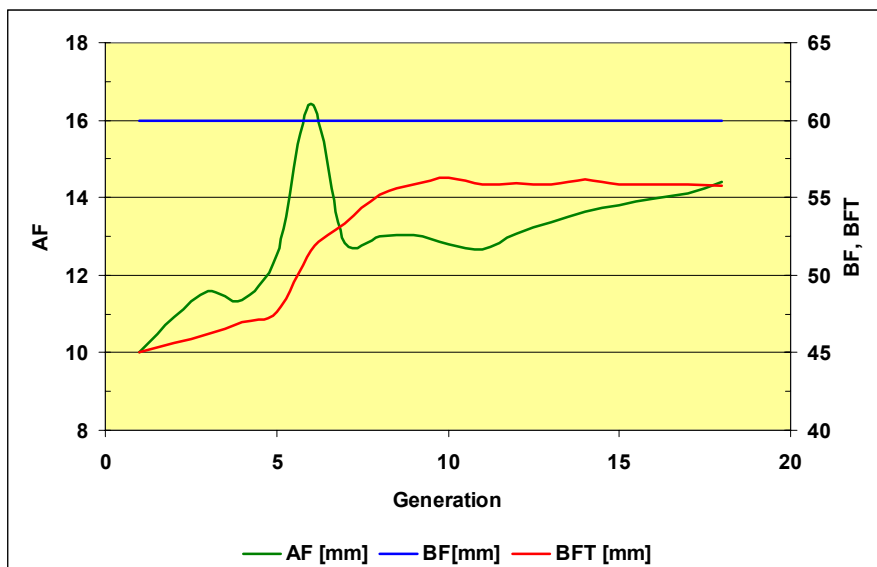


Bild 102: Verlauf der Nuttiefenausdehnung (AF), der Nutbreite (BF= konst.) und der Tiefenlage (BFT)

In Bild 102 ist der Verlauf der Nuttiefenausdehnung, der Nutbreite (=konst.) und der Tiefenlage dargestellt. Die zu gering vorgegebene Tiefenausdehnung wird allmählich vergrößert und erreicht im Bereich der großen Schrittweiten einen Maximalwert von 16.42 mm. Im weiteren Verlauf wird die Tiefenausdehnung dann wieder verringert und kommt zum Ende mit 14.39 mm der tatsächlichen Nuttiefe sehr nahe. Die Tiefenlage der Nut, ebenfalls zu gering vorgegeben,

wird im Verlauf der Evolution vergrößert und erreicht mit 55.8 mm zum Schluss ebenfalls den korrekten Wert.

In Bild 103 sind einige Stufen im Evolutionsprozess dargestellt, man erkennt deutlich den starken Qualitätssprung von der 5. zur 6. Generation.

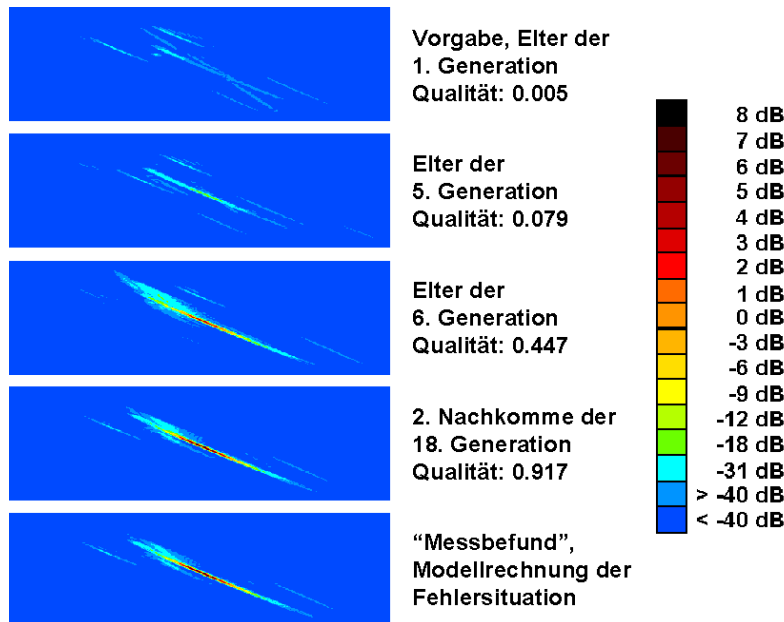


Bild 103: Stufen im Evolutionsprozess

Anhand einer weiteren Evolutionsrechnung gegen einen „echten“ Messbefund sollen die auftretenden Schwierigkeiten des Verfahrens verdeutlicht werden. Die Berechnungen beziehen sich diesmal auf die Messung der 10 mm tiefen und um 10° geneigten Nut in einem Testkörper aus Stahl (vgl. Zeichnung BAM 63-3 Anhang 5.4) mit dem Winkelprüfkopf MWB 45° N4 (4MHz).

Die Wanddicke beträgt wie im vorigen Beispiel 63 mm, die Nut ist ebenfalls oberflächenverbunden und liegt gegenüber der Prüfoberfläche. Die Messung wurde so ausgeführt, dass sich die Nut dem Prüfkopf entgegenneigt (vgl. Bild 104). Nach der Definition der Schräglage innerhalb des Modells entspricht dies einer Neigung von +10°.

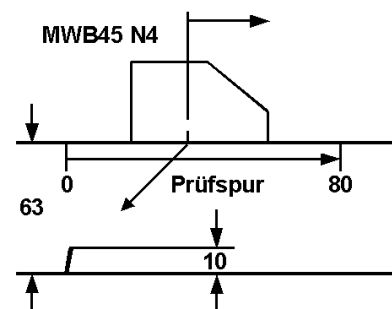
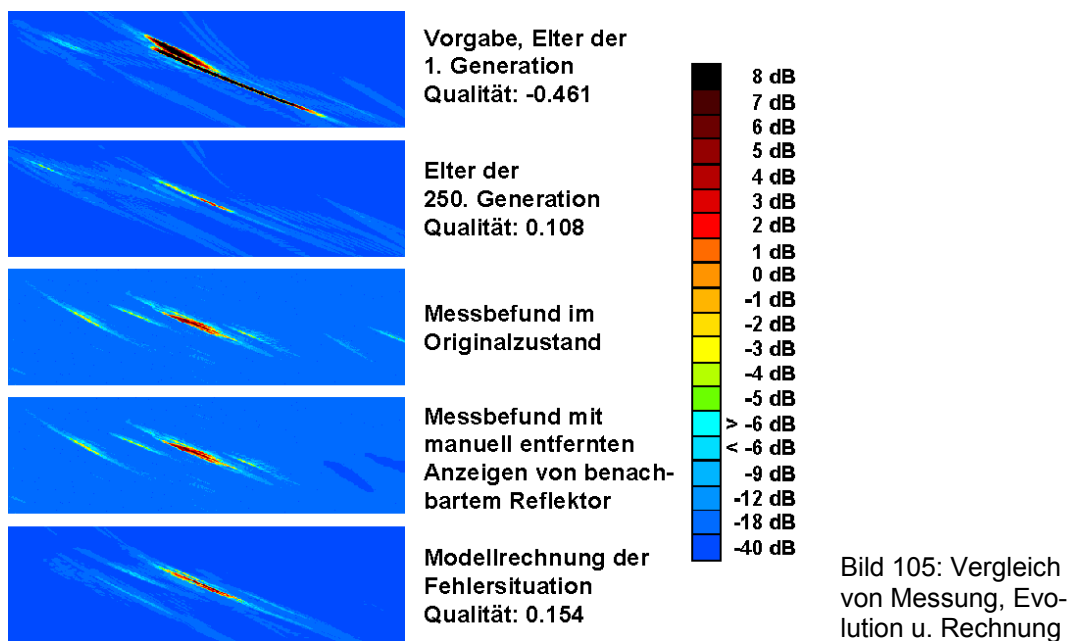


Bild 104

In der Mitte von Bild 105 ist das gemessene TD- Bild dargestellt. Diese Fehlersituation erzeugt ein viel komplexeres Anzeigenmuster als das der 0°- Nut. Vor und hinter der Hauptanzeige sind zwei Beugungsanzeigen von der oberen Risspitze (Nutspitze) zu erkennen. Die erste Rissspitzenanzeige mit einem

kürzeren Schallweg (links von der Hauptanzeige) entspricht dem als *Wbetr2* bezeichneten Schallweg in Anhang 5.3. Die Zweite (rechts von der Hauptanzeige) mit einem längeren Schallweg entspricht dem Schallweg *Wbetr3*. Ganz links im TD- Bild tritt ein Longitudinalwellenecho auf, das wegen der höheren Schallgeschwindigkeit bei einem kürzeren Schallweg erscheint. Am rechten Bildrand erscheint eine weitere sehr schwache Anzeige einer Longitudinalwelle und eine Rissspitzenanzeige, die am Bildrand abgeschnitten ist. Diese beiden Anzeigen stammen von der neben der 10 mm tiefen Nut liegenden 5 mm tiefen Nut im Testblock und sind daher nicht relevant. Für den Evolutionsprozess wurden diese beiden Anzeigen daher manuell aus dem TD- Bild entfernt, um die Berechnungen nicht zu stören (vgl. Bild 105).



Da die Echoanzeigen in einem breiten Schallwegbereich erscheinen, muss auch ein vergleichbar breiter Zeitbereich berechnet werden. Die Berechnungen müssen daher mit 256 Stützstellen im eingesetzten Prüfkopfspektrum durchgeführt werden. In Folge dessen steigt die Rechenzeit gegenüber den ersten Rechnungen im vorigen Beispiel (mit 64 Stützstellen) auf etwa 2:36 Minuten pro TD- Bild an. Die der exakten Fehlersituation entsprechende Modellrechnung ist in Bild 105 ganz unten dargestellt. Das berechnete Anzeigenmuster entspricht dem gemessenen Bild grundsätzlich. Die beiden Rissspitzenanzeigen sind etwas schwächer als in der Messung ausgeprägt. Der Schwerpunkt in der Echo-dynamik der Longitudinalwellenanzeige liegt bei einer anderen Position und ihre Echohöhe ist auch kleiner als im Prüfbefund. Aufgrund der Bildunter-

schiede und der geschilderten Empfindlichkeit der einfachen Qualitätsfunktion ergibt sich in bezug auf die Messung eine Qualität von 0.154. Für den Evolutionsprozess wurde eine (1+2)- Evolutionsstrategie ausgewählt, so dass in jeder Generation nur zwei Nachkommen berechnet werden. Auf diese Weise werden erzielte Qualitätsfortschritte schneller in die nächste Generation übernommen. Als Abbruchkriterien wurde die Übersteigerung einer Qualität von 0.15 bzw. einer Anzahl von mehr als 250 Generationen definiert. In Tabelle 4 sind die Reflektorparameter und das Ergebnis der Evolution dargestellt. Die TD- Bilder des Elters der ersten und letzten Generation sind dem Messbefund und der exakten Rechnung in Bild 105 gegenübergestellt. Der erste Elter hat eine Qualität von -0.461, der letzte Elter eine von 0.108. Die gewünschte Qualität von 0.15 wurde nicht erreicht, daher wurde die Berechnung nach 250 Generationen beendet. Es wurden somit in knapp 22 Stunden $1+250*2=501$ TD- Bilder berechnet.

Reflektorparameter	„Messbefund“ Modellrechnung	Startwerte für 1. Elter	Parameter- verhalten	Ergebnis der Evolution
AF	10 mm	15 mm	variabel	15.38 mm
BF	60 mm	60 mm	fest	60 mm
AMUE	0°	0°	fest	0°
XI	10°	+5°	variabel	-2.72°
BFT	58.08 mm	50 mm	variabel	46.21 mm

AF: Reflektortiefenausdehnung

BF: Reflektorbreite

AMUE: Winkel quer zur Einschallebene

XI: Winkel in der Einschallebene

BFT: Tiefenlage (bezogen auf die Reflektormitte)

Tabelle 4: Reflektorparameter und Evolutionsergebnis

Die Berechnung führte nicht zu dem gewünschten Ergebnis, da das Verfahren an einem lokalen Maximum der einfachen Qualitätsfunktion hängen geblieben ist. In Bild 106 erkennt man den zu Beginn der Evolution zu erwartenden Anstieg der Schrittweite. Entgegen der Erwartung ergibt eine Verringerung der Nutschräglage XI bei gleichzeitiger Erhöhung der Nuttiefenausdehnung AF und Tiefenlage BFT (vgl. Bild 107) einen ansteigenden Qualitätswert. Bald wird sogar mit negativer Schräglage und großer Nuttiefenausdehnung eine Qualität von etwa 0.1 erreicht. Die Schrittweite ist nicht groß genug, um den Elter so stark zu mutieren, dass wieder Nachkommen mit positiver Schräglage, kleinerer Tiefenausdehnung und größerer Tiefenlage entstehen, die außerdem noch eine höhere Qualität aufweisen. Da sich nun erwartungsgemäß allmählich wieder Nachkommen mit kleinerer Schrittweite durchsetzen, verschlechtert sich

diese Situation weiter. Die Evolution stagniert und konvergiert schließlich gegen das lokale Maximum in der Qualitätsfunktion. Die hohe Empfindlichkeit und das Unvermögen der einfachen Qualitätsfunktion, das Anzeigenmuster in den TD-Bildern zu vergleichen, hat dazu beigetragen, dass diese Problematik nicht gelöst werden konnte. Eine auf einem Bildauswertungsalgorithmus basierende Qualitätsfunktion würde dieses Verhalten nicht so extrem zeigen, doch auch hier muss immer mit lokalen Extremstellen in der Qualitätsbewertung gerechnet werden. Bei der Interpretation von kritischen Prüfbefunden (vgl. Kapitel 3.5) wurde bereits auf die Entstehung ähnlicher Anzeigenmuster bei unterschiedlichen Fehlersituationen hingewiesen. Auch die beste Qualitätsfunktion müsste ihnen ähnliche Qualitätswerte zuordnen und hätte damit lokale Extremstellen. Aufgrund der großen Menge von Berechnungen liegt die Rechenzeit schnell im Bereich mehrerer Stunden und es werden sehr leistungsfähige Rechner benötigt. Messrauschen und Anzeigen im Messbefund von irrelevanten Reflektoren aus der Prüfobjektgeometrie und ähnlichen stören die Qualitätsbewertung und müssen unterdrückt werden.

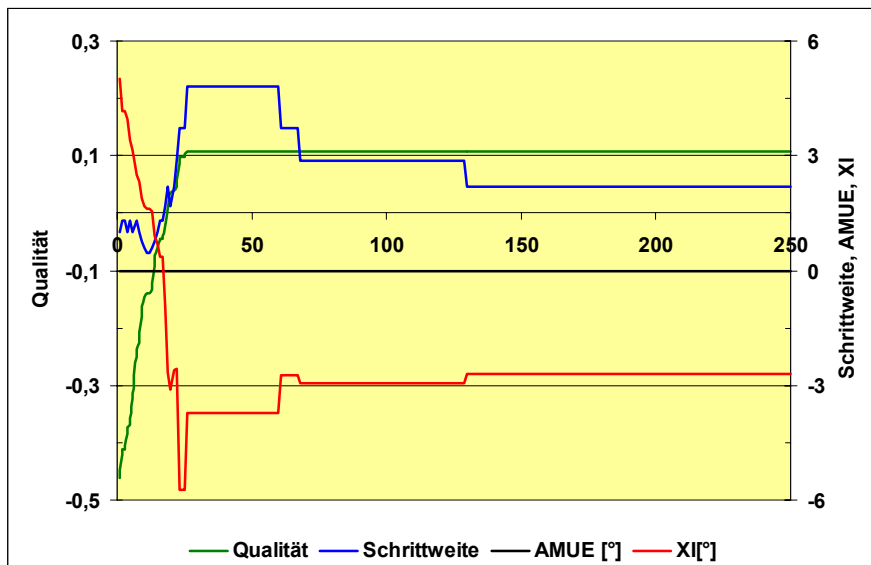


Bild 106: Qualitätsentwicklung und Verlauf der Schrittweite, der Nutschräglagen quer zur Einschallebene (AMUE= konst.) bzw. in der Einschallebene (XI)

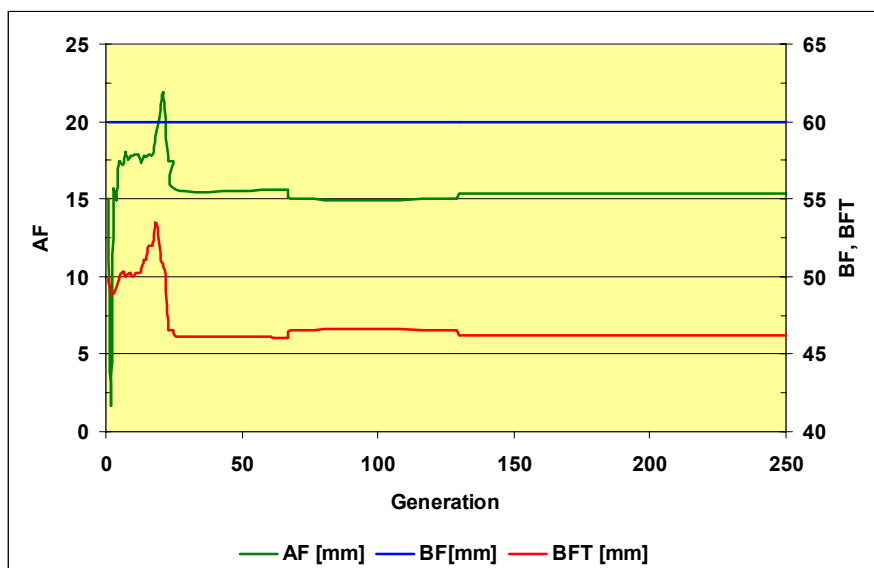


Bild 107: Verlauf der Nuttiefenausdehnung (AF), der Nutbreite (BF= konst.) und der Tiefenlage (BFT)

Der angedeutete Weg einer Verknüpfung von Evolutionsstrategien und dem iterativen Modell stellt zur Zeit wegen des hohen Zeitbedarfs und wegen der noch nicht optimal gelösten Wahl einer Qualitätsfunktion keinen effizienten Weg zur Fehlerdiagnose dar. Zur Zeit wird überlegt, ob sich die Arbeit an der Definition einer zielgerichteten Qualitätsfunktion mit dem Mittel der Bildverarbeitung lohnen würde. Probleme wie die Unempfindlichkeit gegen Positionsunschärfen von Bilddetails, Rauschen und Amplitudendifferenzen müssen noch geklärt werden.

4 Zusammenfassung

Ein Ziel der Arbeit bestand ursprünglich darin, ein Rechenmodell zur US- Prüfung mit einer Evolutionsstrategie zu verknüpfen. Dabei wurde bemerkt, dass für derartige „Fehlerrückschlussstrategien“ eine abgesicherte und überprüfte Modelltheorie erforderlich ist. Da das anfangs vorliegende Rechenmodell den Anforderungen für die Verwendung der Evolutionsstrategie nicht genügte, verlagerte sich der Schwerpunkt der Arbeit zunächst auf die Erarbeitung eines validierten und erprobten Modells. Aber selbst damit zeigte sich, dass ein Arbeiten mit der Evolutionsstrategie nicht ohne weiteres möglich ist. Daher wurde der Weg der iterativen Modellierung gewählt.

Die Einschränkungen der verschiedenen Bewertungs- und Untersuchungsverfahren zur Fehlerdiagnose in der US- Prüfung lassen in Abhängigkeit von der Prüfsituation nur eine fallweise Anwendung zu. Die erzielbaren Ergebnisse sind durch prinzipielle Grenzen, wie die orientierungsabhängigen Wechselwirkungen der US- Wellen mit dem Fehler, in ihrer Genauigkeit stark begrenzt. Im allgemeinen enthalten sie nur einen Teil der für eine belastbare Fehlerdiagnose erforderlichen Informationen. Eine zuverlässige Bewertung ist meist durch die Zusammenfassung der Ergebnisse mit denen aus anderen ZfP- Verfahren und die Nutzung von a priori Informationen z. B. aus der Fertigungsgeschichte einer Komponente oder des Fehlerentstehungsmechanismus möglich, die wie die Teile eines Mosaiks ein „Gesamtbild“ ergeben. Der Einsatz anderer Prüfverfahren bedingt immer einen höheren Zeit-, Arbeits- und Kostenbedarf und sollte möglichst durch Verbesserung der Fehlerdiagnostik mit einem Verfahren begrenzt werden.

Die vorgeschlagene iterative Modellierung der US- Prüfung bietet dazu, wie die vorliegende Untersuchung zeigt, eine Möglichkeit. Die Durchführung der Modellrechnungen beginnt mit der Aufstellung einer Fehlerhypothese unter Einführung von a priori Informationen. Die Nachrechnung der Fehlerhypothesen ermöglicht den Vergleich mit den Messergebnissen. Die aufgestellten Fehlerhypothesen können so abgesichert oder wieder verworfen, Messergebnisse

überprüft und bestätigt werden. Das Rechenmodell dient dabei als universelles Werkzeug und ermöglicht die Bewertung der Amplitude, der Laufzeit, der Echodynamik und des Anzeigenmusters, also aller auch bei anderen Bewertungs- und Untersuchungsverfahren herangezogenen Bewertungskriterien. Für die Modellbedienung und die Analyse der akustischen Verhältnisse ist allerdings Expertenwissen aus Prüf- und Modellerfahrung erforderlich. Die im Rahmen dieser Untersuchung erfolgten Modellmodifikationen konnten gemeinsam mit der Modellverifikation die Zuverlässigkeit der Modellrechnungen deutlich steigern. Die Berechnungen können schnell und interaktiv durchgeführt werden und die Ergebnisse liegen in wenigen Minuten vor.

Mit einer Kombination des Rechenmodells mit der Evolutionsstrategie wurde der Versuch unternommen, die iterative Modellierung zu systematisieren. Diese Kombination würde die Lösung des inversen Problems, d. h. die Bestimmung der Ursache für die akustische Störung in den Messdaten, ermöglichen. Der Vorteil dieser Technik liegt darin, dass dazu die inverse Lösung der Wellenausbreitung und -beugung nicht bekannt sein muss. Für die Verwendung von in Bildern (z. B. TD- Bildern) dargestellten Befunden für die Evolutionsstrategie ist jedoch die Definition einer komplexen Qualitätsfunktion unter Berücksichtigung vieler Randbedingungen erforderlich. Schallweg- und Weggeberdifferenzen, die von Justier- und Positionierfehlern bzw. durch die eingesetzten Näherungen im Modell herrühren, dürfen bei der Qualitätsbestimmung keine dominierende Rolle spielen. Der Messbefund enthält neben den Anzeigen des zu untersuchenden Reflektors häufig Anzeigen von Prüfteilkanten (Formanzeigen) und von weiteren Reflektoren. Sie stören zusammen mit auftretenden Rauschereffekten die Qualitätsbewertung und müssen unterdrückt werden, ohne Fehler mit zu unterdrücken. Moderne Strategien für den Vergleich komplexer und ver-rauschter Signale basieren häufig auf dem Prinzip der ein- bzw. zweidimensionalen normalisierten Kreuzkorrelation. Anwendungsfälle sind beispielsweise die Schallanalyse zur Auffindung loser Teile in Rohrleitungen und die Texterkennung in der Bildverarbeitung. Die Analyse liefert Aussagen über den Grad der Übereinstimmung von zwei Signalen und über deren gegenseitige Verschie-

bung.⁷⁴ Die Entwicklung einer effektiveren Qualitätsfunktion für die Kombination des Rechenmodells mit der Evolutionsstrategie sollte daher auf dieser Basis erfolgen. Messbefunde aus einer begrenzten Apertur können jedoch mehrdeutig sein. Die Anwendung automatischer Bewertungsverfahren stößt dann an ihre Grenzen. Eine zuverlässige Bewertung von kritischen Befunden mit mehreren möglichen Ursachen kann in diesen Fällen nur mit Expertenwissen über den Weg der iterativen Modellierung erfolgen. Hierfür müssen alle zur Verfügung stehenden Informationen zusammengetragen und gemeinsam bewertet werden. Damit ist ein automatisch arbeitendes Rechenmodell überfordert.

Die Rechenzeit für ein TD- Bild hängt neben dem verwendeten PC- System stark von der Prüfsituation ab. Entscheidenden Einfluss hat dabei die Breite des zu berechnenden Zeitbereichs, in dem die zu erwartenden Echoanzeigen liegen. Entsteht wie im ersten Evolutionsversuch ein einfaches Echoanzeigemuster, reicht ein schmaler Zeitbereich aus und die Berechnung kann mit einer geringen Stützstellenanzahl durchgeführt werden. Das schnelle Rechenmodell FSAM liefert dann etwa ein TD- Bild pro Minute. Komplizierte Echoanzeigemuster erfordern die Berechnung eines breiteren Zeitbereichs und ergeben Rechenzeiten bis hin zu etwa fünf Minuten pro TD- Bild. Da das Prinzip der Evolutionsstrategie auf der Durchführung vieler Versuche beruht, ergeben sich jedoch verfahrensbedingt dann wieder erhebliche Rechenzeiten. Die beiden dargestellten Versuche mit Rechenzeiten von 2 bzw. 22 Stunden demonstrieren diesen Nachteil deutlich. Der Einsatz der Evolutionsstrategie bringt also gerade bei komplexen Fehlerbefunden den Nachteil eines großen Zeitbedarfs mit sich, auch wenn die Lösung der Probleme bei der Qualitätsbewertung durch eine Weiterentwicklung der Qualitätsfunktion auf Basis der heutigen Strategien bei Signalvergleichen möglich scheint. Mit dem Ansatz der Evolutionsstrategie ist daher ein interaktives Arbeiten vor Ort, wie mit der iterativen Modellierung, unmöglich. Da die Fehlerdiagnose jedoch im allgemeinen in kurzen Zeiträumen erfolgen soll, wird der Einsatz der iterativen Modellierung wohl vor allem im direkten manuellen optimieren der Fehlerparameter durch einen Experten erfol-

⁷⁴ Wenzel, Lothar: Strategien bei Signalvergleichen. In: Elektronik, 25 (1999), S. 64-68

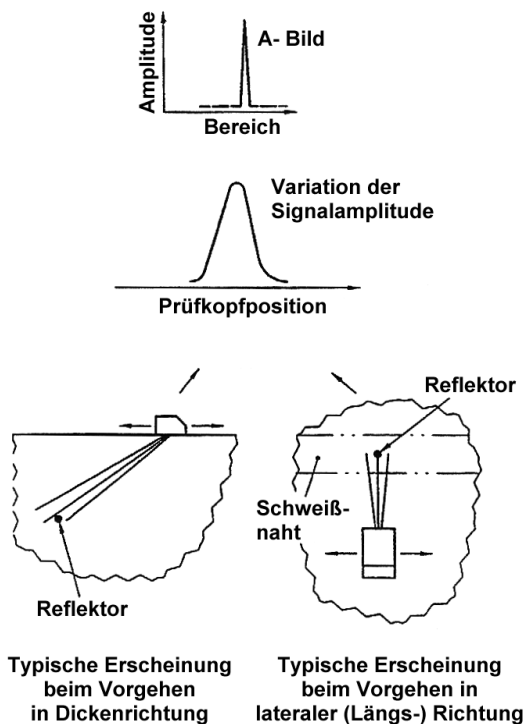
gen und nicht automatisiert z. B. durch die Evolutionsstrategie. Dies ermöglicht auf einfache Weise die Einführung der a priori Informationen.

Die iterative Modellierung basiert auf drei Teilprozessen, der Analyse der möglichen Wechselwirkungen, der Separation dieser Wechselwirkungen in diverse Schallwege und schließlich der Synthese der auf den verschiedenen Wegen berechneten Signale zum Gesamtsignal. Die ersten beiden Teilprozesse müssen z. Zt. auf Basis von Expertenwissen für jeden Prüffall neu gelöst werden. Als Ersatz für die angedachte Verknüpfung des iterativen Modells mit der Evolutionsstrategie wird zur Zeit überlegt, das Modell mit einem modernen CAD-System zu erweitern und damit die ersten beiden Prozesse zu systematisieren. Neben diesen Anwendungsgebieten eignet sich das iterative Rechenmodell natürlich auch für die Bewertung und Optimierung von Prüfmethode sowie für die Ausbildung bzw. Schulung von Prüfpersonal.

5 Anhang

5.1 Darstellung der vier Hauptmuster für Echodynamiken

Muster I. Impulsantwort von punktaktigen, nicht auflösbaren Reflektoren



Bereich: Schallwegbereich

Bild 108: Antwort eines punktaktigen Reflektors⁷⁵

Die Impulsantwort und das Echodynamikmuster von punktaktigen Reflektoren sind in Bild 108 dargestellt. Das A- Bild zeigt für jede Prüfkopfposition eine einzelne scharfe Anzeige. Die Amplitude der Anzeige steigt gleichmäßig auf ein Maximum an und fällt danach gleichermaßen bis zum Rauschen ab. Dies ist die charakteristische Antwort von Reflektoren, deren Abmessung in der betrachteten Richtung kleiner als das entsprechende Auflösungsvermögen ist. Punktförmige Reflektoren haben dieses Echodynamikmuster in beiden Abtastungsrichtungen (Längs- und Dickenrichtung). Das Auflösungsvermögen in Längsrichtung wird durch den Durchmesser des Schallbündels am Reflektorort bestimmt. In Dickenrichtung hängt es von der Impulslänge und dem Einschallwinkel ab. Eine Schrägeinschallung ergibt auf Kosten der stärkeren Signalschwächung

⁷⁵ DIN EN 1713: Ultraschallprüfung - Charakterisierung von Anzeigen in Schweißnähten. Berlin, 1998, Anhang C

eine bessere Entfernungsauflösung. Bei 45°- Einschallung wird die Echoanzeige von nah an der Rückwand oder oberflächenverbundenen Reflektoren durch den Winkelspiegeleffekt hervorgerufen. Die reflektierende Ecke, die von dem Riss und der Rückwand gebildet wird, erzeugt in diesem Fall ungeachtet von der Rissgröße dieses Dynamikmuster. Schwächere Echoanzeigen, die von der Winkelspiegelanzeige aus bei kürzeren Schallwegen erscheinen, können auf eine entsprechende Rissfläche und -spitze hinweisen (Rissspitzentechnik). So lange es keine Feinstruktur der Echoanzeige gibt, die den Prüfer zur Position der Reflektorkanten führt, kann die Reflektorgröße nur über die maximale Amplitude abgeschätzt werden. Für diese Abschätzung kann die beschriebene AVG- Methode verwendet werden.

Muster II. Impulsantwort von glatten, ausgedehnten Reflektoren

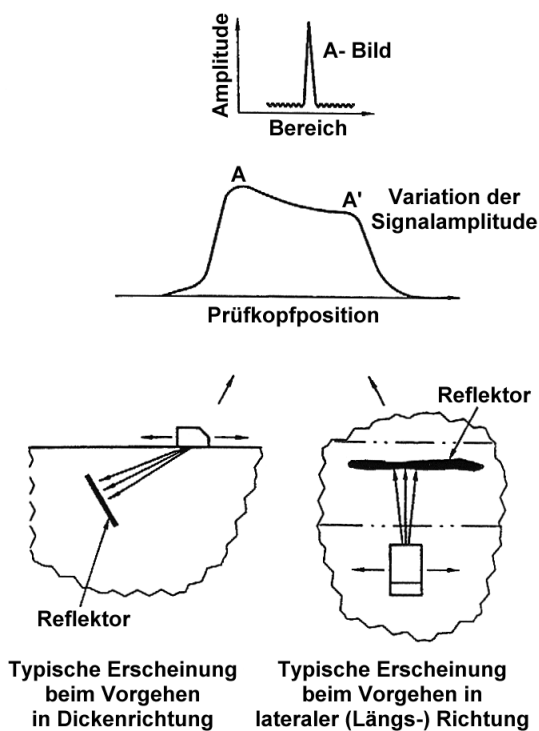


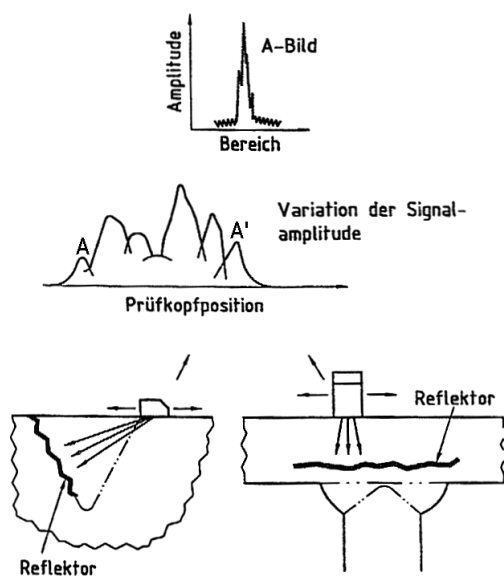
Bild 109: Antwort eines glatten ausgedehnten Reflektors⁷⁵

Bild 109 zeigt die Antwort von glatten und ausgedehnten Reflektoren. In jedem A- Bild erscheint, wie bei den kleinen Reflektoren (vgl. Muster I), eine einzelne scharfe Echoanzeige. Die Amplitude steigt bis auf ein Plateau und behält diese Größe mit oder ohne kleinere Schwankungen bis zu einer Höhe von etwa 4 dB bei. Anschließend fällt die Echoanzeige wieder gleichmäßig auf den Rauschpegel ab. Dieses Dynamikmuster ist charakteristisch für einen glatten, geraden Reflektor, wie eine Schlackenzeile, die in Längsrichtung abgetastet wird. Es

kann auch bei der Abtastung in Dickenrichtung eines glatten, ebenen Reflektors auftreten, wie bei einem Flankenbindefehler, wenn das Prüfkopfschallfeld nahezu senkrecht auftrifft. Der Prüfkopf wird je nach Untersuchungsrichtung entlang des Reflektors oder über ihn herüber geführt. Die Amplituden auf dem Plateau nahe den Rändern des Reflektors werden notiert und mit A und A' wie in Bild 109 gekennzeichnet. An jedem Rand des Reflektors wird der Prüfkopf so ausgerichtet, dass die Signalhöhe um 6 dB (d. h. 50 %) unter den lokalen Plateauwert gefallen ist. Die Reflektorgröße wird dann wie bei der Halbwerts- methode beschrieben abgeschätzt. Die Ungenauigkeit entspricht wegen der be- grenzten Auflösung des Ultraschallbündels etwa der 6 dB- Bündelbreite.⁷⁶

Muster III. Impulsantwort von rauen und unregelmäßigen Reflektoren

a) Nahezu senkrecht zur Einschallrichtung orientiert (Bild 110):



Typische Erscheinung
beim Vorgehen
in Dickenrichtung

Typische Erscheinung
beim Vorgehen
in lateraler (Längs-)Richtung

Bild 110: Antwort eines ausgedehnten Reflektors, bei fast senkrechtem Einfall (⁷⁵ oben)

In jedem A- Bild erscheint eine einzelne zerklüftet bzw. ausgefranst wirkende Echoanzeige. Während der Prüfkopfbewegung zeigt die Echoanzeige starke Amplitudenschwankungen, die auch größer als 6 dB sein können. Dieses Muster ist charakteristisch für einen rauen Reflektor, wie einen lamellenartigen Riss, der unter senkrechtem Einfall untersucht wird.

⁷⁶ The International Institute Of Welding: The Evaluation Of Ultrasonic Signals. S. 31, 40 u. 41

b) Schräg zur Einschallrichtung orientiert (Bild 111):

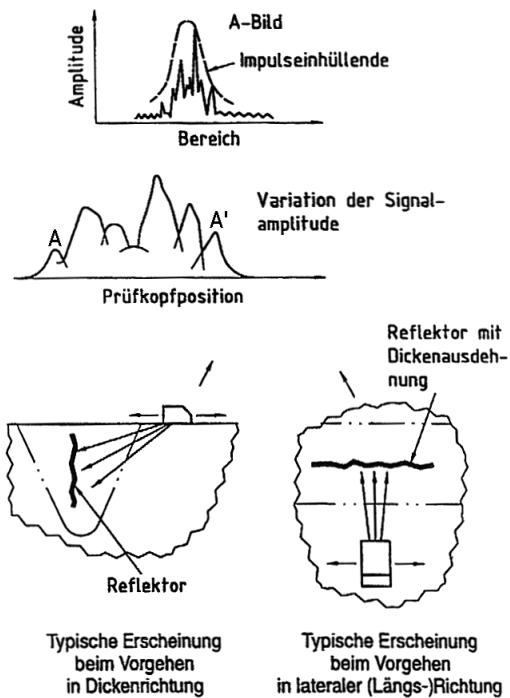


Bild 111: Antwort eines ausgedehnten Reflektors bei schrägem Einfall „Wanderecho-Muster“ (⁷⁵ oben)

Bei schräger Orientierung des Reflektors zur Einschallrichtung ergibt sich als Impulsantwort eine ausgedehnte zufällige Anzeigenfolge von Neben- bzw. Tochteranzeigen (subsidiary peaks), die innerhalb einer glockenförmigen Impulshüllkurve liegen. Während der Prüfkopfbewegung läuft jede dieser Anzeigen durch die Impulshüllkurve hindurch, erreicht in der Mitte der Hüllkurve ihr eigenes Maximum, und fällt anschließend wieder ab. Das gesamte Signal zeigt starke zufällige Amplitudenschwankungen, größer als 6 dB. Das Anzeigemuster wird auch als „Wanderecho-Muster“ (travelling echo pattern) bezeichnet und ist charakteristisch für die Beobachtung rauer Reflektoren unter schräger Einfallrichtung. Für eine Größenabschätzung werden die Positionen gesucht, an denen die Echoanzeigen von den Reflektorrändern ihre maximale Amplitude erreichen. Diese Positionen sind in Bild 110 und in Bild 111 mit A und A' gekennzeichnet. Aus diesen Positionen und den dazugehörigen Entfernungen können Informationen über die Position, Größe und Orientierung des Reflektors gewonnen werden. Die Anwendung dieser Technik erfordert ein besonderes Urteilsvermögen beim Auswählen des geeigneten Einschallwinkels am Reflektor, um eine gute Auflösung der Randsignale mit angemessenem Signalpegel über dem Rauschniveau zu erhalten. Außerdem werden Übung,

Sorgfalt und Erfahrung benötigt, um die Randanzeigen korrekt zu identifizieren. In einigen Fällen kann die Identifikation mehrdeutig sein.⁷⁷

Muster IV. Impulsantwort von Reflektorgruppen

Mehrere kleine dicht nebeneinander liegende Reflektoren bilden ein Cluster. Wenn ihr Abstand groß genug ist, ergibt sich für jeden Reflektor das Dynamikmuster I. Liegen die Reflektoren zu dicht beieinander, dann interferieren ihre Echoanzeigen miteinander und man kann den Cluster nicht auflösen. Dieser Effekt kann bei starker Porosität in Schweißnähten auftreten.

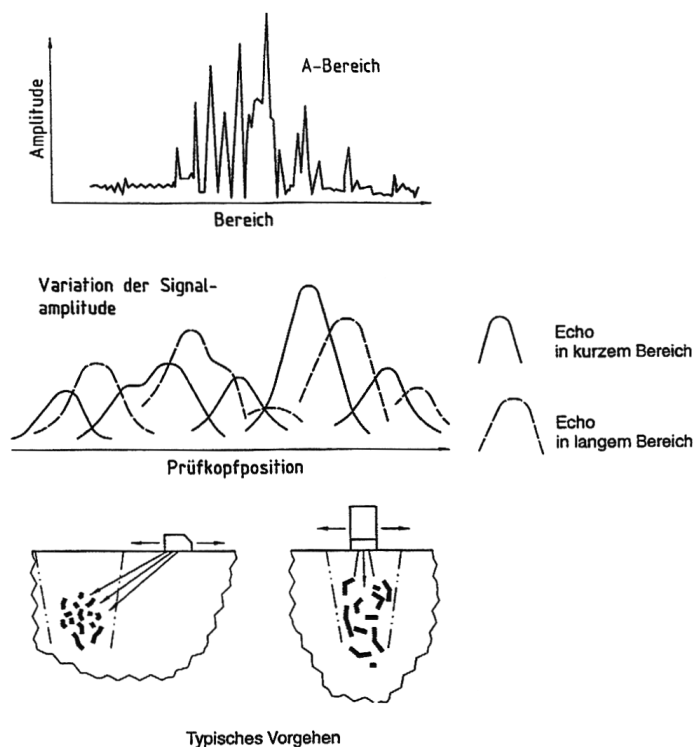


Bild 112: Antwort mehrerer Reflektoren (⁷⁵ oben)

Die Interpretation und Beurteilung solcher Reflektorcluster stellt die US-Prüfung vor besondere Probleme. Die Impulsantwort wird von der Größe, Gestalt und Orientierung der einzelnen Reflektoren und des Reflektorgebiets beeinflusst. Ein weiterer Einfluss entsteht durch den Grad der räumlichen Trennung der Reflektoren. Die Beurteilung der strukturellen Bedeutung dieser Reflektoren innerhalb von Gebrauchstauglichkeitsanalysen ist schwierig. Die Größe einzelner Reflektoren kann über ihre maximale Echoamplitude durch die Bestimmung der Ersatzfehlergröße abgeschätzt werden. Höhere Anforderungen werden an

⁷⁷ The International Institute Of Welding: The Evaluation Of Ultrasonic Signals. S. 31, 41 u. 42

die US- Prüfung gestellt, wenn außerdem die Trennung der Reflektoren in Relation zu ihrer Größe abgeschätzt werden soll. Eine grobe Abschätzung des Reflektorabstands ist nur dann möglich, wenn die Anzeigen zwischen benachbarten Echospitzen bis auf das Rauschniveau abfallen. Liegen die Reflektoren dichter zusammen, fallen die Anzeigen nicht bis auf das Rauschniveau ab. Die Beurteilung sollte dann auf den Ersatzfehlergrößen und der Größe des Reflektorgebiets basieren. So versucht man zu zeigen, dass es kleiner als ein einzelner ebener Reflektor ist, der zum Versagen der Komponente führen kann. Das Reflektorgebiet kann über die Reflektoranzeigen mit den kürzesten und längsten Schallwegen an verschiedenen Prüfkopfpositionen und unter verschiedenen Einschallrichtungen bestimmt werden.⁷⁸

⁷⁸ The International Institute Of Welding: The Evaluation Of Ultrasonic Signals. S. 31, 42 u. 43

5.2 Herleitungen der FRESNEL- KIRCHHOFFSCHEN- und RAYLEIGH-SOMMERFELDSCHEN- Integralsätze

5.2.1 FRESNEL- KIRCHHOFFSCHES- Beugungsintegral

Eine Welle in einem homogenen, isotropen und störungsfreien Raum genügt der Wellendifferentialgleichung:

$$\Delta \vec{E} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad \text{Gleichung 18: Wellendifferentialgleichung im quellenfreien Raum}$$

$$\pm c = \pm \frac{\omega}{k}, \quad k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$$

c : Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle k : Wellenzahl

Bei Beschränkung auf monochromatische, linear polarisierte Wellen, d. h.

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = [0, U(\vec{r}, t), 0] \quad \text{mit} \quad U(\vec{r}, t) = U(\vec{r}) \cdot e^{-i\omega t}$$

reduziert sich die Wellendifferentialgleichung auf die skalare, zeitunabhängige Helmholtzgleichung:

$$\Delta U(\vec{r}) + k^2 \cdot U(\vec{r}) = 0 \quad \text{Gleichung 19: HELMHOLTZ- Gleichung}$$

Die Lösung der HELMHOLTZ- Gleichung erfolgt mit Hilfe von zwei skalaren Funktionen U und G , für die nach dem zweiten Satz von GREEN folgende Beziehung gilt:

$$\int_V (U \Delta G - G \Delta U) dV = \oint_S \left(U \frac{\partial G}{\partial \vec{n}} - G \frac{\partial U}{\partial \vec{n}} \right) dS$$

Damit kann das zu berechnende Volumenintegral in ein Flächenintegral überführt werden. Wenn die beiden Funktionen so gewählt werden, dass sie selbst Lösungen der HELMHOLTZ- Gleichung sind, d. h. wenn

$$\Delta U + k^2 U = 0 \quad \text{und} \quad \Delta G + k^2 G = 0, \quad \text{dann gilt}$$

$$\oint_S \left(U \frac{\partial G}{\partial \vec{n}} - G \frac{\partial U}{\partial \vec{n}} \right) dS = 0. \quad \text{Gleichung 20}$$

Um die Erregung U in einem Punkt \vec{r} im Innern des Volumens V zu beschreiben wird für die Funktion G eine von \vec{r} ausgehende Kugelwelle eingesetzt (\vec{r}' ist ein Punkt auf der Oberfläche S):

$$G = \frac{e^{ik|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|}$$

Mit dieser Voraussetzung kann der GREENSCHE Satz im Quellpunkt der Kugelwelle G nicht mehr angewandt werden, da sie dort singularär ist. Zur Vermeidung der Singularität wird bei der Integration ein kugelförmiges Volumen um den Punkt \vec{r} ausgelassen und der GREENSCHE Satz auf das verbleibende Volumen angewandt (vgl. Bild 113).

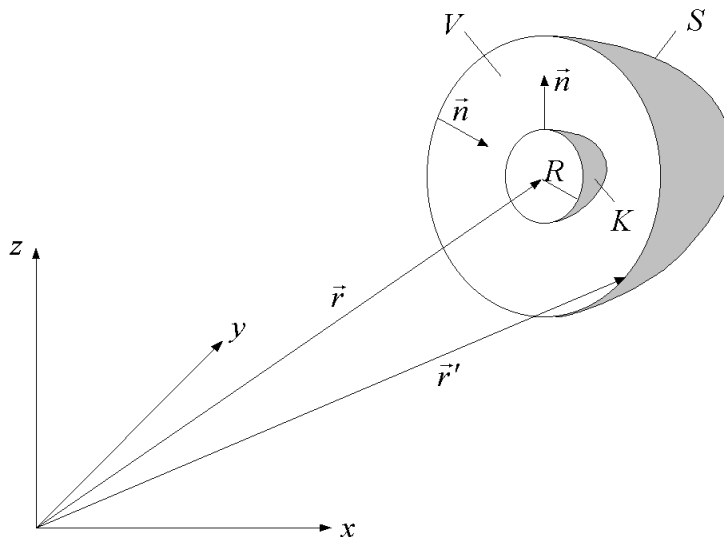


Bild 113: Schnitt durch das Volumen V , auf das der GREENSCHE Satz angewandt wird. Von der Integration ausgeschlossen ist die Kugel K mit dem Radius R um den Beobachtungspunkt.

Die Gleichung 20 lässt sich dann folgendermaßen darstellen:

$$\oint_S \left[U \frac{\partial G}{\partial \vec{n}} - G \frac{\partial U}{\partial \vec{n}} \right] dS + \oint_K \left[U \frac{\partial G}{\partial \vec{n}} - G \frac{\partial U}{\partial \vec{n}} \right] dS = 0$$

S : Oberfläche des äußeren Volumens K : Oberfläche der ausgesparten Kugel

Gleichung 21: Integralgleichung unter Ausschluss der Singularität

Diese Formel kann durch eine genauere Betrachtung des zweiten Integralterms vereinfacht werden. Wie im Folgenden gezeigt wird, liefert sie im Grenzübergang (Kugelradius $\rightarrow 0$) einen konstanten Beitrag P . Mit R als Kugelradius ist

$$P = \lim_{R \rightarrow 0} \oint_K \left(U \frac{\partial G}{\partial \vec{n}} - G \frac{\partial U}{\partial \vec{n}} \right) dS \quad \text{Gleichung 22}$$

mit $G = \frac{e^{ikR}}{R}$. Gleichung 23

Die Normalenableitung von G auf K lautet:

$$\frac{\partial G}{\partial \vec{n}} = \nabla \left(\frac{e^{ikR}}{R} \right) \cdot \vec{n} = \left(ik - \frac{1}{R} \right) \frac{e^{ikR}}{R} \quad \text{Gleichung 24}$$

Nach den beiden letzten Gleichungen sind G und $\partial G / \partial \vec{n}$ auf K konstant. Da U selbst stetig ist, nähert sich U an den konstanten Wert $U(R=0)$ an. Damit vereinfacht sich Gleichung 22 zu:

$$P = \lim_{R \rightarrow 0} \left(U \frac{\partial G}{\partial \vec{n}} \cdot 4\pi R^2 \right) - \lim_{R \rightarrow 0} G \oint_K \frac{\partial U}{\partial \vec{n}} dS \quad \text{Gleichung 25}$$

Der zweite Summand ist Null, denn mit Ω als Raumwinkel ($dS = R^2 d\Omega$) und $U = \text{konst.}$ wird

$$\lim_{R \rightarrow 0} G \oint_K \frac{\partial U}{\partial \vec{n}} dS = \lim_{R \rightarrow 0} \frac{e^{ikR}}{R} \oint_K \frac{\partial U}{\partial \vec{n}} R^2 d\Omega = \lim_{R \rightarrow 0} R \cdot e^{ikR} \oint_K \frac{\partial U}{\partial \vec{n}} d\Omega = 0.$$

Damit verbleibt in Gleichung 25 nur der erste Summand, der nach Einsetzen der Normalenableitung von G lautet

$$P = \lim_{R \rightarrow 0} \left\{ U \cdot \left(ik - \frac{1}{R} \right) \frac{e^{ikR}}{R} \cdot 4\pi R^2 \right\} = -4\pi U.$$

Eingesetzt in Gleichung 21 ergibt sich das FRESNEL- KIRCHHOFFSCHE- Beugungsintegral:

$$U(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \oint_S \left\{ U(\vec{r}') \frac{\partial}{\partial \vec{n}} \frac{e^{ik|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} - \frac{e^{ik|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} \frac{\partial}{\partial \vec{n}} U(\vec{r}') \right\} d^2 \vec{r}'$$

Gleichung 26: FRESNEL- KIRCHHOFFSCHES- Beugungsintegral

Es beschreibt die Erregung U eines beliebigen Punktes \vec{r} im Innern eines geschlossenen Volumens V als Funktion der Erregung auf dessen Oberfläche. Außerhalb des Volumens V ist $U(\vec{r}) = 0$. Nach SOMMERFELD stellt die Kugelwelle in Gleichung 26 nur eine mathematische Hilfsgröße dar, sie ist gewissermaßen

eine „Sonde“ mit der das Feld untersucht wird. Ihr Ursprung ist der Beobachtungspunkt \vec{r} . Im Rahmen des HUYGENSSCHEN Prinzips wird ihre Bedeutung uminterpretiert. Ihr Ursprung liegt nun in einem Punkt \vec{r}' auf der Oberfläche des geschlossenen Volumens V und sie läuft zum Beobachtungspunkt \vec{r} . Das Beugungsintegral beschreibt dann die Interferenz HUYGENSSCHER Elementarwellen, die von jedem Oberflächenelement $d^2\vec{r}'$ des Volumens V ausgehen. Ihre Anregungsstärke ist durch U und $\partial U / \partial \vec{n}$ gegeben. Im Innern des Volumens liefern sie die Feldstärke $U(\vec{r})$, außerhalb addieren sie sich zu Null.

Für die Berechnung des Feldes hinter einem beugenden Objekt, soll das FRESNEL- KIRCHHOFFSCHE- Integral nun auf eine Öffnung A in einem ebenen Schirm angewendet werden (Bild 114). Die für die beugende Schirmöffnung abgeleiteten Beziehungen gelten gleichermaßen für einen in Dickenrichtung schwingenden Kolben (rotationssymmetrischer Schwinger) oder eine angeregte Kreisscheibe (Flachbodenbohrung).

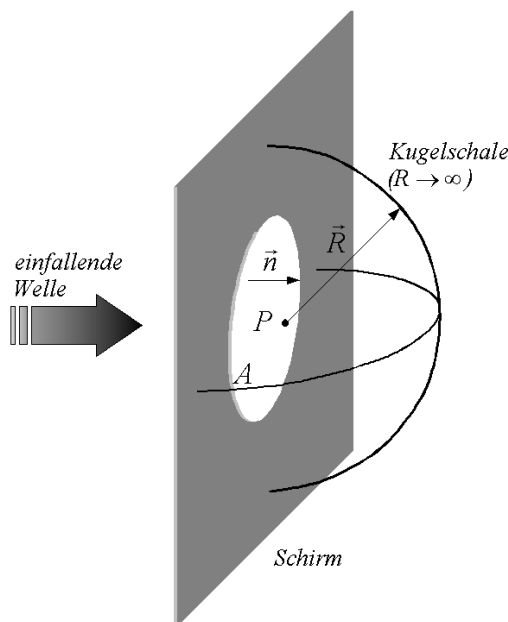


Bild 114: Anwendung des FRESNEL- KIRCHHOFFSCHEN- Beugungsintegrals auf die Beugung an einer Öffnung in einem ebenen Schirm

Die Oberfläche des Volumens besteht aus der Schirmöffnung A , dem lichtundurchlässigen Schirm und einer Kugelschale mit unendlich großem Radius um den Beobachtungspunkt P , um das Volumen zu schließen. Das Integral über die Kugelschale mit dem Mittelpunkt \vec{r} lautet mit $\vec{R} = \vec{r}' - \vec{r}$ und $d^2\vec{r}' = R^2 d\Omega$:

$$U(\vec{r}) = \lim_{R \rightarrow \infty} \int_K \left\{ U(\vec{R}) \cdot \left(\frac{1}{R} - ik \right) \frac{e^{ikR}}{R} - \frac{e^{ikR}}{R} \frac{\partial}{\partial \vec{n}} U(\vec{R}) \right\} R^2 d\Omega$$

Bei der Bildung der Normalenableitung von e^{ikR}/R muss beachtet werden, dass \vec{n} die innere Normale der Kugelschale ist. Dadurch kommt es gegenüber Gleichung 24 zu einem Vorzeichenwechsel.

$$U(\vec{r}) = \lim_{R \rightarrow \infty} \int_K \left\{ U(\vec{R}) - R \left[ikU(\vec{R}) + \frac{\partial}{\partial \vec{n}} U(\vec{R}) \right] \right\} e^{ikR} d\Omega \quad \text{Gleichung 27}$$

$U(\vec{R})$ ist die Erregung auf der Kugelfläche. Das Integral wird Null, wenn

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \left\{ U(\vec{R}) - R \left[ikU(\vec{R}) + \frac{\partial}{\partial \vec{n}} U(\vec{R}) \right] \right\} = 0.$$

Hat die Quelle von $U(\vec{R})$ eine begrenzte Öffnung, ist die „Endlichkeitsbedingung“ $\lim_{R \rightarrow \infty} U(\vec{R}) = 0$ automatisch erfüllt und es bleibt als Forderung an $U(\vec{R})$ die „SOMMERFELDSCHES Ausstrahlungsbedingung“:

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \left\{ R \left[ikU(\vec{R}) + \frac{\partial}{\partial \vec{n}} U(\vec{R}) \right] \right\} = 0.$$

Sie besagt, dass sich $U(\vec{R})$ im Unendlichen wie eine auslaufende Kugelwelle verhalten soll, d. h. $U(\vec{R})$ muss für $R \rightarrow \infty$ mindestens so schnell abnehmen wie $1/R$. Zur Auswertung des verbleibenden Integrals über die Öffnung und die Schirmrückseite werden die KIRCHHOFFSCHEN Randbedingungen angesetzt.

$$U(\vec{r}'), \frac{\partial U(\vec{r}')}{\partial \vec{n}} = \begin{cases} \text{ungestört} & \text{in der Öffnung} \\ 0 & \text{auf der Schirmrückseite} \end{cases}$$

Damit lautet das Integral der FRESNEL- KIRCHHOFFSCHEN- Beugungstheorie, in dem nur noch über die Öffnung A integriert werden muss:

$$U(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \oint_A \left\{ U(\vec{r}') \frac{\partial}{\partial \vec{n}} \frac{e^{ik|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} - \frac{e^{ik|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} \frac{\partial}{\partial \vec{n}} U(\vec{r}') \right\} d^2\vec{r}' \quad \text{Gleichung 28}$$

Das Integral beschreibt die skalare Erregung U in einem Punkt \vec{r} hinter einem undurchlässigen Schirm, an dessen Öffnung A eine einfallende Welle gebeugt wird.

Die gleichzeitige Vorgabe von U und $\partial U / \partial \vec{n}$ in den KIRCHHOFFSCHEN Randbedingungen stellt eine Überbestimmung des Randwertproblems dar. Es genügt bereits eine der beiden Randbedingungen zu kennen. Außerdem sind die beiden Randwerte auf der Schirmrückseite ($U = 0$ und $\partial U / \partial \vec{n} = 0$) mathematisch widersprüchlich, da ein dreidimensionales Potential U , das mit seiner gesamten Normalenableitung längs eines endlichen Flächenstücks (hier auf der Schirmrückseite) Null wird, auch im ganzen Raum Null werden muss. Trotz aller Einschränkungen und Widersprüche können die entstehenden Beugungsfelder mit dem FRESNEL- KIRCHHOFFSCHEN- Beugungsintegral im allgemeinen gut beschrieben werden.

5.2.2 RAYLEIGH- SOMMERFELDSCHEN- Beugungsintegrale

Aus dem FRESNEL- KIRCHHOFFSCHEN- Beugungsintegral können die einfacheren RAYLEIGH- SOMMERFELDSCHEN- Beugungsintegrale abgeleitet werden.

Ihre Herleitung erfolgt unter Vorgabe nur jeweils einer der beiden Randbedingungen. Daher entsteht kein mathematischer Widerspruch wie bei dem FRESNEL- KIRCHHOFFSCHEN- Beugungsintegral. Die eingesetzten Randwerte werden von den Beugungsintegralen reproduziert. Die RAYLEIGH- SOMMERFELDSCHEN- Beugungsintegrale ergeben sich, wenn im FRESNEL- KIRCHHOFFSCHEN- Beugungsintegral für die Beugung an einer Öffnung A in einem ebenen Schirm (Gleichung 28) an Stelle der Kugelwelle die der Randbedingung entsprechende GREENSCHE Funktion $G(\vec{r}, \vec{r}')$ eingesetzt wird.

$$U(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \oint_A \left\{ U(\vec{r}') \frac{\partial}{\partial \vec{n}} G(\vec{r}, \vec{r}') - G(\vec{r}, \vec{r}') \frac{\partial}{\partial \vec{n}} U(\vec{r}') \right\} d^2 \vec{r}' \quad \text{Gleichung 29}$$

Wird U als Randwert vorgegeben, dann muss, damit der zweite Summand im Integranden von Gleichung 29 Null wird, dort $G = 0$ gelten. Bei $\partial U / \partial \vec{n}$ als Randwert muss entsprechend $\partial G / \partial \vec{n} = 0$ sein, damit der erste Summand Null wird. In beiden Fällen muss G auch die HELMHOLTZ- Gleichung und die SOMMERFELDSCHEN Ausstrahlungsbedingung erfüllen.

An einem ebenen Schirm kann die GREENSCHE Funktion mit der Spiegelungsmethode bestimmt werden (vgl. Bild 115). Sie wird aus der Überlagerung

zweier vom realen Beobachtungspunkt P und seinem Spiegelbild P' ausgehender Kugelwellen gebildet (Gleichung 30).

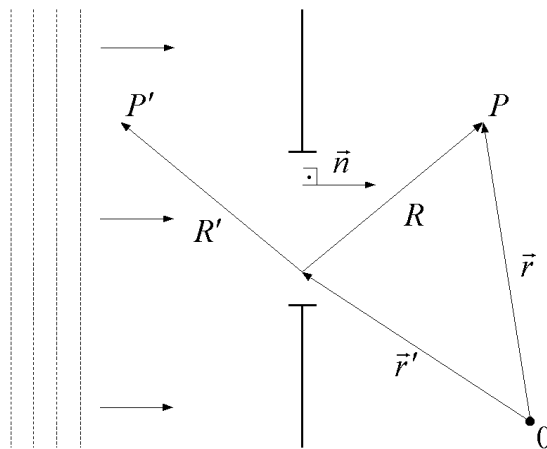


Bild 115: Bildung der GREENSCHEN Funktion in der Beugungsebene mit Hilfe der Spiegelungsmethode. P ist der reale Beobachtungspunkt und P' sein Spiegelbild.

In der Schirmebene sind wegen $R=R'$ die Amplituden der beiden Kugelwellen identisch,

$$\frac{e^{ikR}}{R} = \frac{e^{ikR'}}{R'} \quad \text{Gleichung 30}$$

ihre Normalenableitungen unterscheiden sich aber im Vorzeichen, da ihre Quellen auf verschiedenen Seiten des Schirmes liegen.

$$\frac{\partial}{\partial \vec{n}} \left(\frac{e^{ikR}}{R} \right) = - \frac{\partial}{\partial \vec{n}} \left(\frac{e^{ikR'}}{R'} \right) \quad \text{Gleichung 31}$$

Die Überlagerung der beiden Kugelwellen in der Schirmebene wird so gewählt, dass der nicht als Randbedingung vorgegebene Anteil in Gleichung 29 Null wird.

Randbedingung U :

Ist G die Differenz der beiden von P und P' ausgehenden Kugelwellen

$$G = \left(\frac{e^{ikR}}{R} - \frac{e^{ikR'}}{R'} \right), \text{ so ist in der Schirmebene nach Gleichung 31}$$

$$\frac{\partial G}{\partial \vec{n}} = 2 \cdot \frac{\partial}{\partial \vec{n}} \left(\frac{e^{ikR}}{R} \right) \text{ und nach Gleichung 30 } G = 0.$$

Durch Einsetzen in Gleichung 29 ergibt sich mit $R = |\vec{r} - \vec{r}'|$ das Integral der ersten RAYLEIGH- SOMMERFELDSCHEN- Beugungstheorie.

$$U_1(\vec{r}) = \frac{1}{2\pi} \int_A U(\vec{r}') \frac{\partial}{\partial \vec{n}} \frac{e^{ik|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d^2\vec{r}'$$

Gleichung 32: erstes RAYLEIGH- SOMMERFELDSCHES- Beugungsintegral

Randbedingung $\partial U / \partial \vec{n}$:

Ist G dagegen die Summe beider Kugelwellen

$$G = \left(\frac{e^{ikR}}{R} + \frac{e^{ikR'}}{R'} \right), \text{ so ist in der Schirmebene } G = 2 \cdot \left(\frac{e^{ikR}}{R} \right) \text{ und } \frac{\partial G}{\partial \vec{n}} = 0.$$

Das Integral der zweiten RAYLEIGH- SOMMERFELDSCHEN- Beugungstheorie lautet nach Einsetzen in Gleichung 29.

$$U_2(\vec{r}) = \frac{1}{2\pi} \int_A \frac{e^{ik|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \frac{\partial}{\partial \vec{n}} U(\vec{r}') d^2\vec{r}'$$

Gleichung 33: zweites RAYLEIGH- SOMMERFELDSCHES- Beugungsintegral

Eine Modifikation dieses Beugungsintegrals ist die sogenannte RAYLEIGH- Formel:

$$p(r) = \frac{j \cdot \omega \cdot \rho}{2 \cdot \pi} \cdot \int_A \frac{e^{-j \cdot k \cdot r}}{r} \cdot v(A) \cdot dA$$

Bild 116: RAYLEIGH- Formel

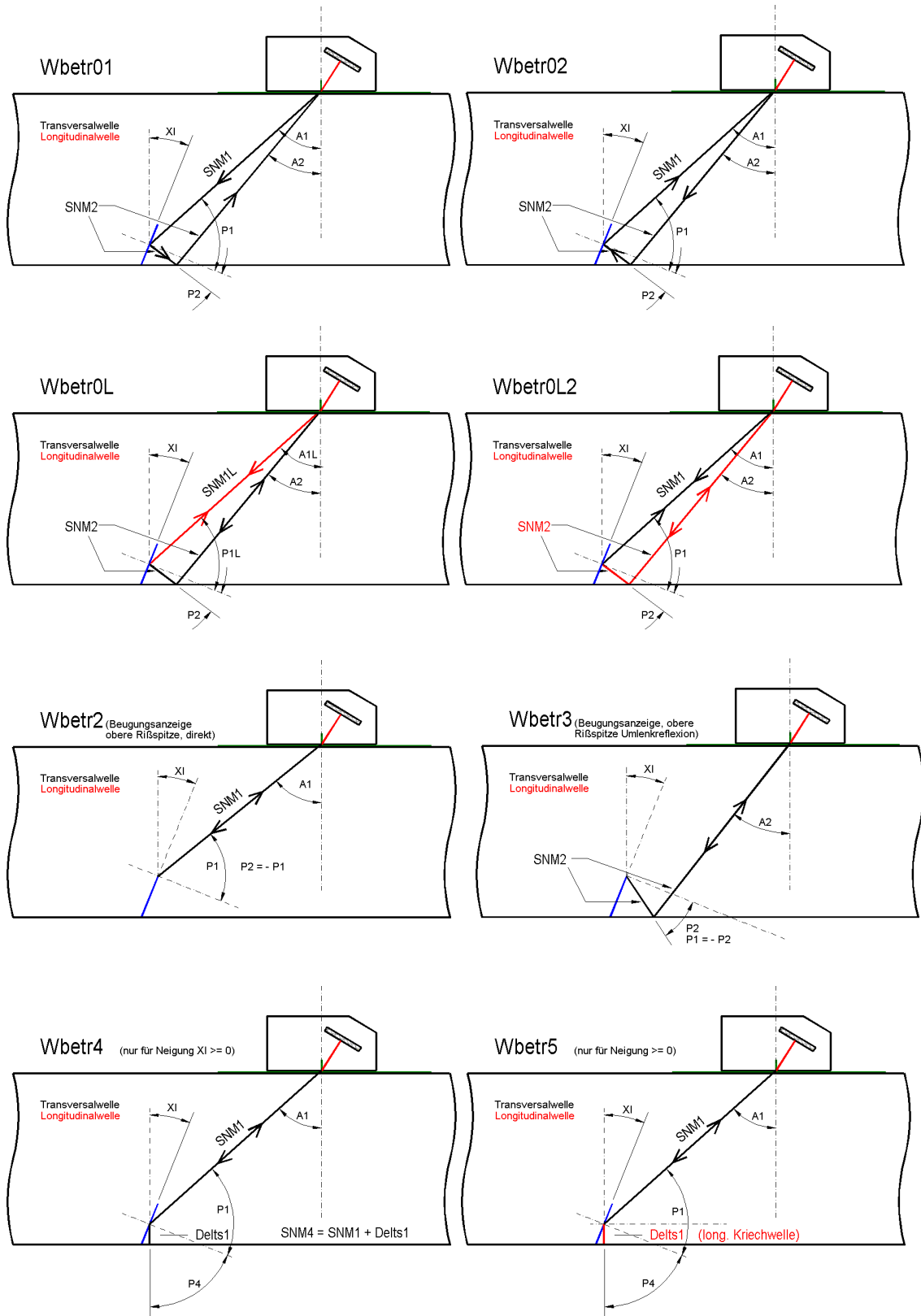
Die Integration dieser Formel und die insbesondere bei Mehrschichtsystemen nötigen Zusatzannahmen sind die wichtigsten Voraussetzungen für das in dieser Arbeit verwendete Modell.

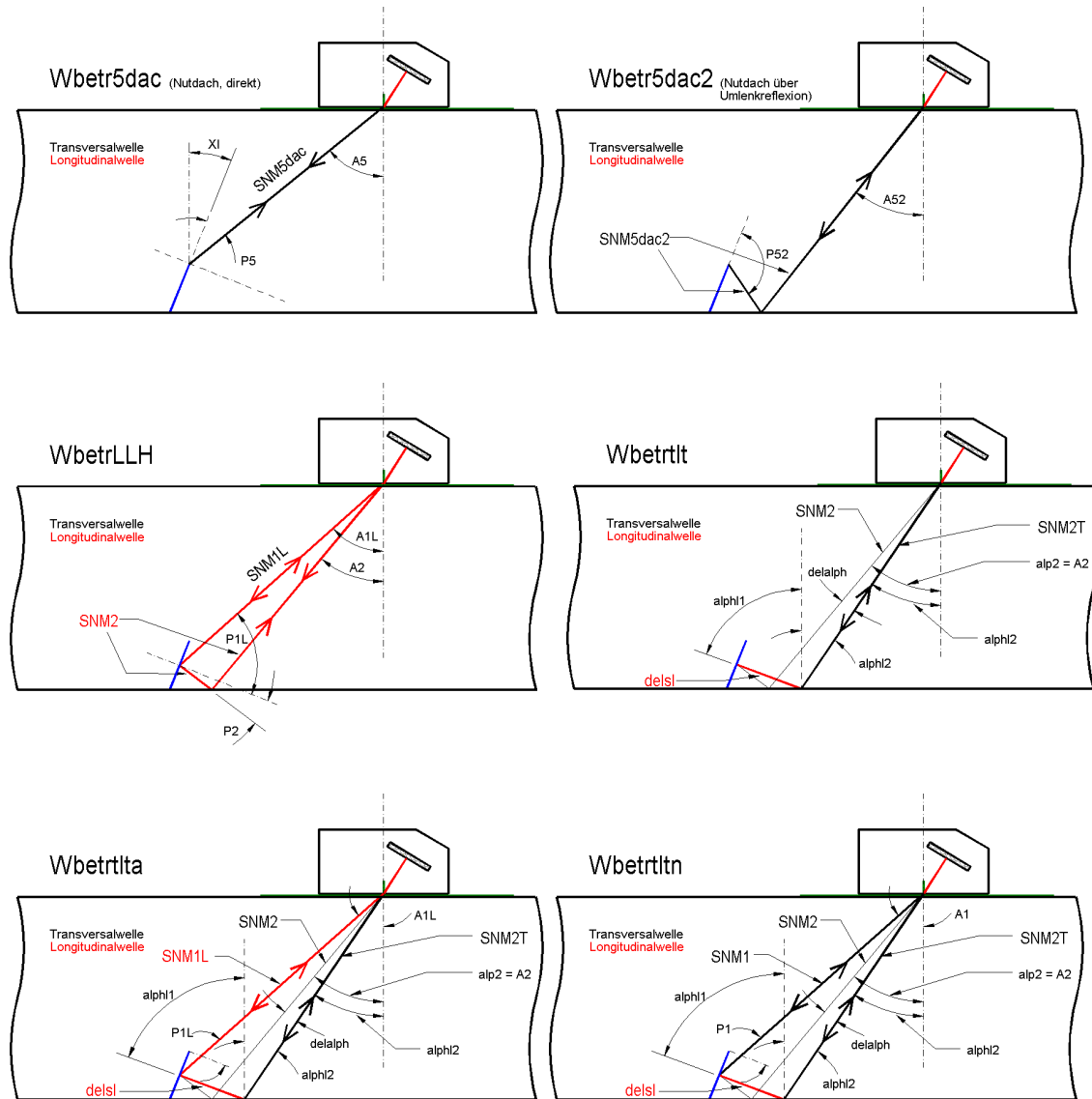
In einem Fazit äußert TOTZECK, dass das FRESNEL- KIRCHHOFFSCHE- Beugungsintegral als Mittelwert der beiden RAYLEIGH- SOMMERFELDSCHEN- Beugungsintegrale betrachtet werden kann. Seine Vergleiche zwischen gemessenen und berechneten Beugungsfeldern ergaben, dass keines der drei Beugungsintegrale universell einsetzbar ist. Der Grad der Übereinstimmung zwischen der jeweiligen Theorie und der Realität hängt stark von den Bedingungen

ab, unter denen die Beugung stattfindet. Diese Bedingungen bewirken, dass die in der Beugungstheorie angesetzte Randbedingung mehr oder weniger gut erfüllt wird und beeinflussen auf diese Weise die Güte der Übereinstimmung.⁷⁹

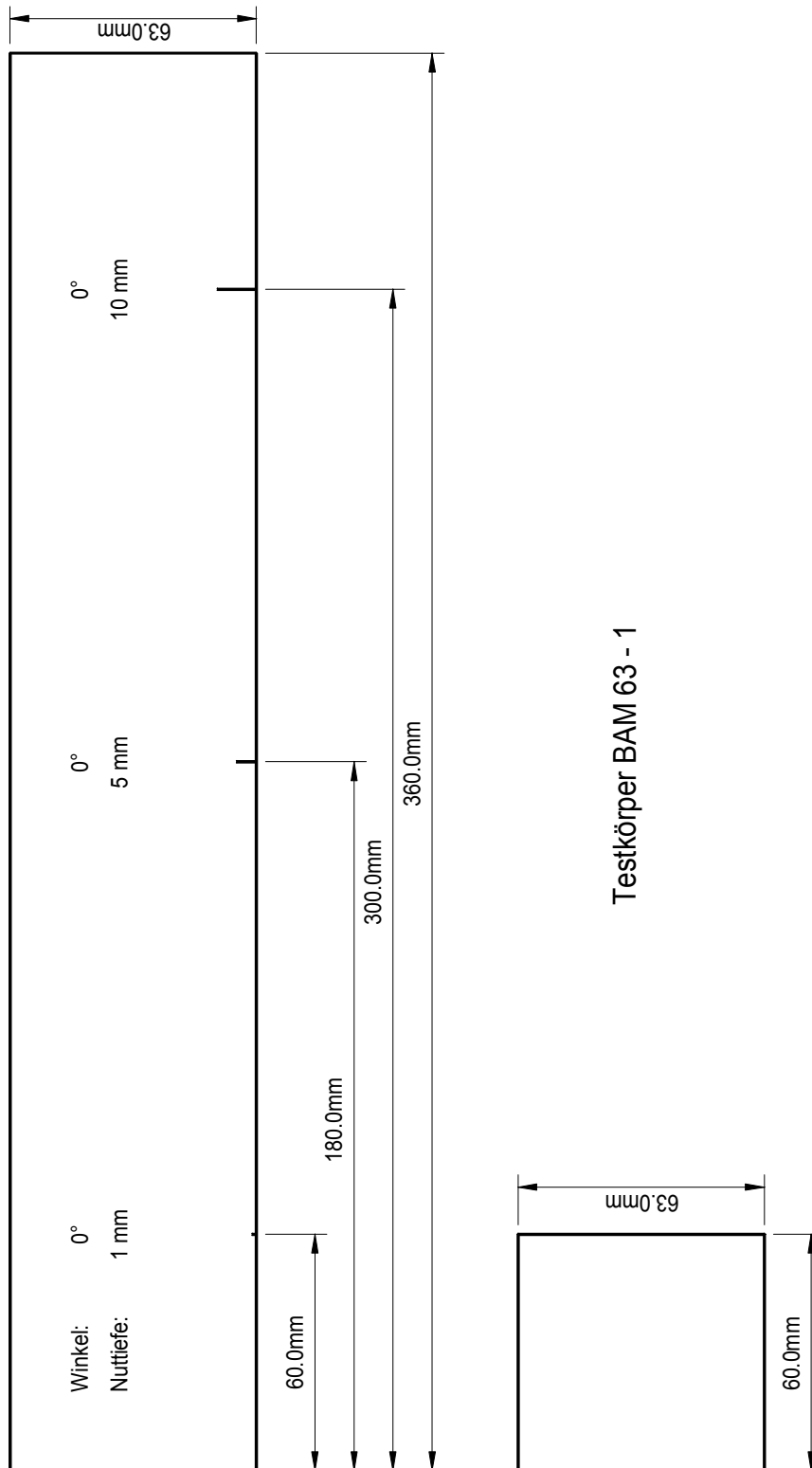
⁷⁹ Totzeck, Michael: Gültigkeitsbereich der skalaren Beugungstheorien nach KIRCHHOFF und RAYLEIGH- SOMMERFELD im Nahfeld kleiner Phasenobjekte. Diss., TU Berlin, D83, 1989, S.57-62, 84-86 u. 156f

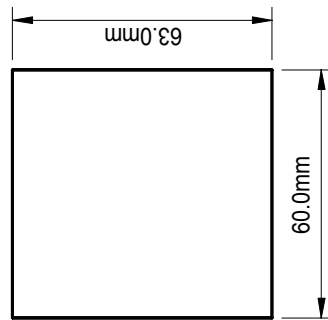
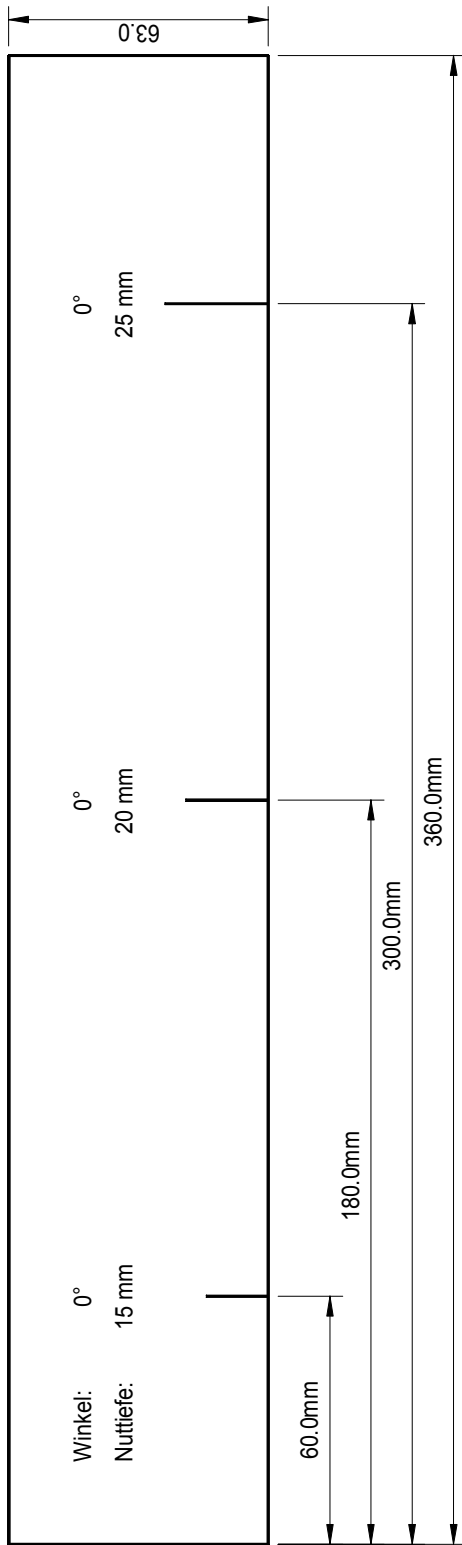
5.3 Skizzen der berücksichtigten Schallwege



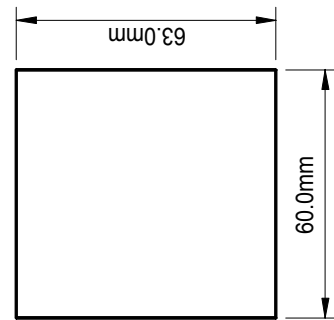
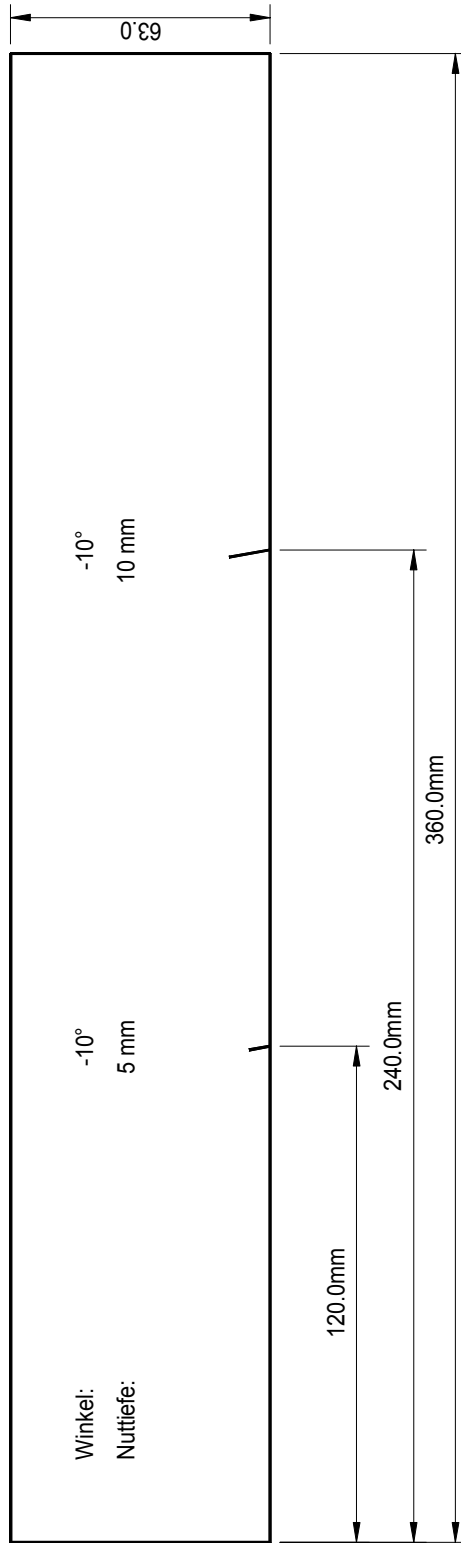


5.4 Zeichnungen der Testkörper BAM 63-1 bis BAM 63-7

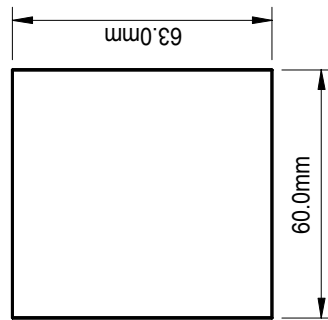
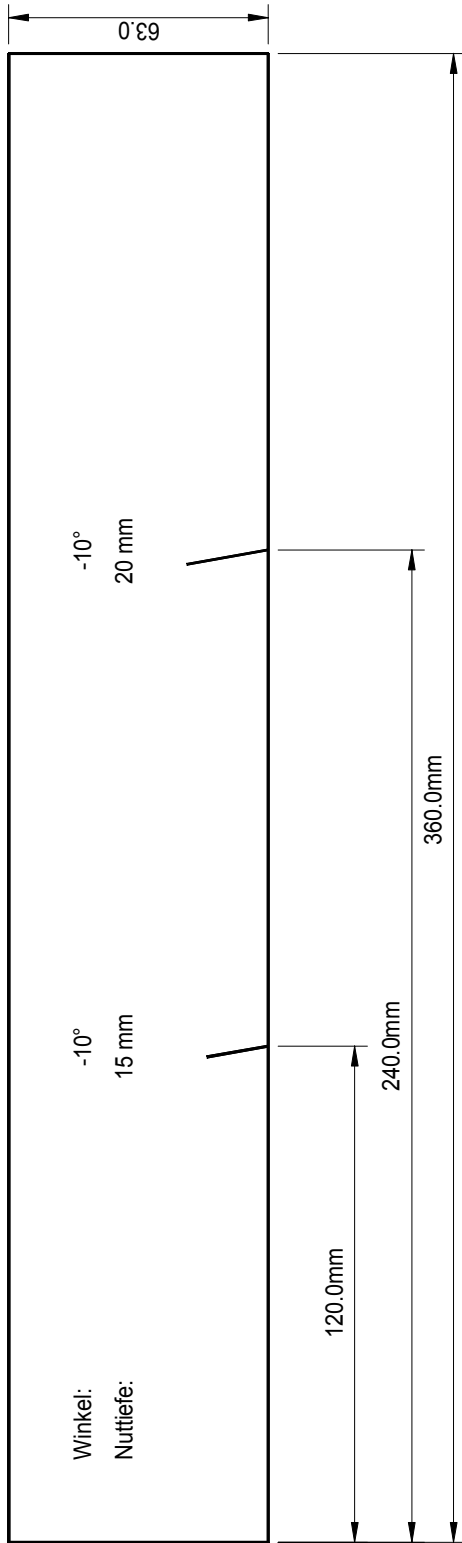




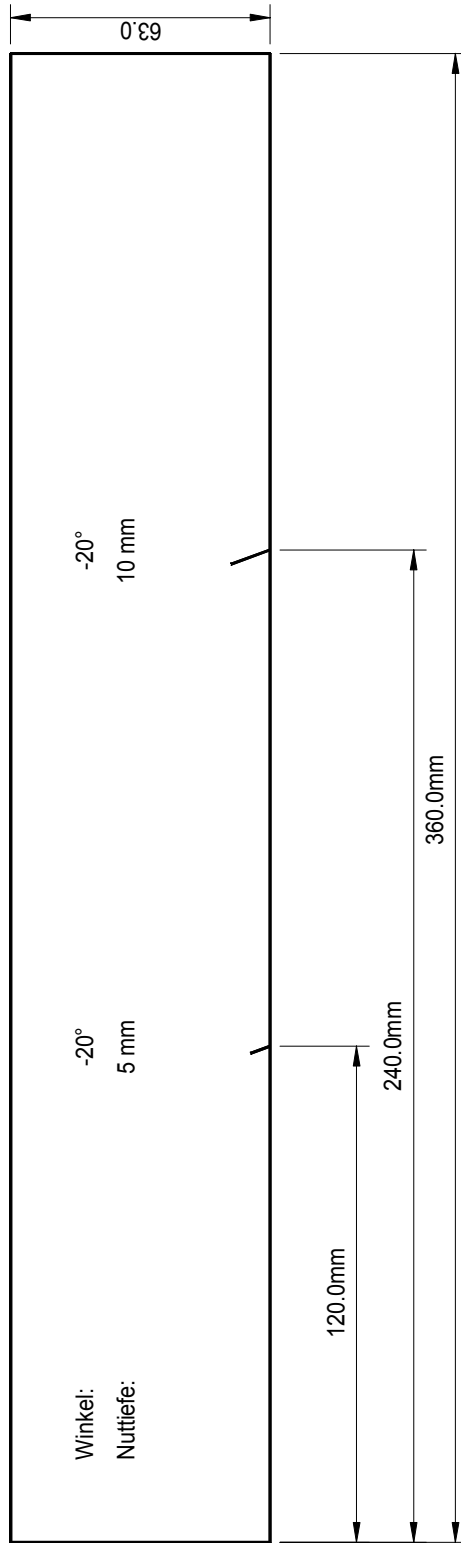
Testkörper BAM 63 - 2



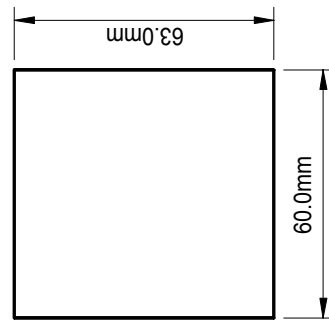
Testkörper BAM 63 - 3

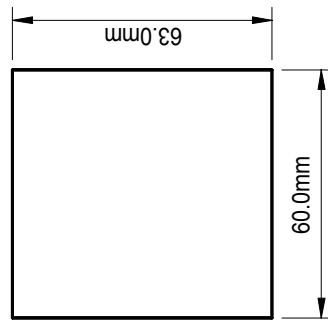
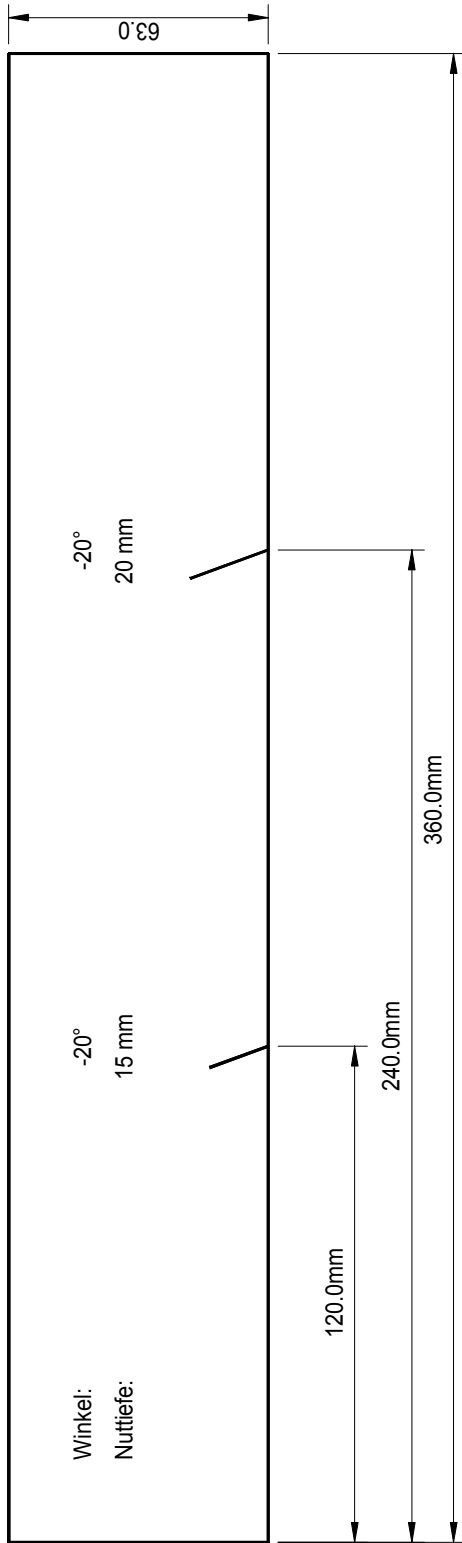


Testkörper BAM 63 - 4

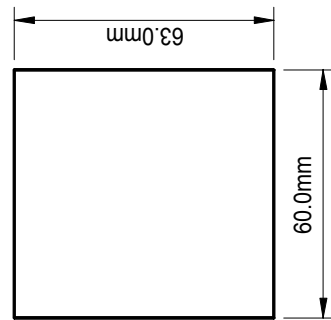
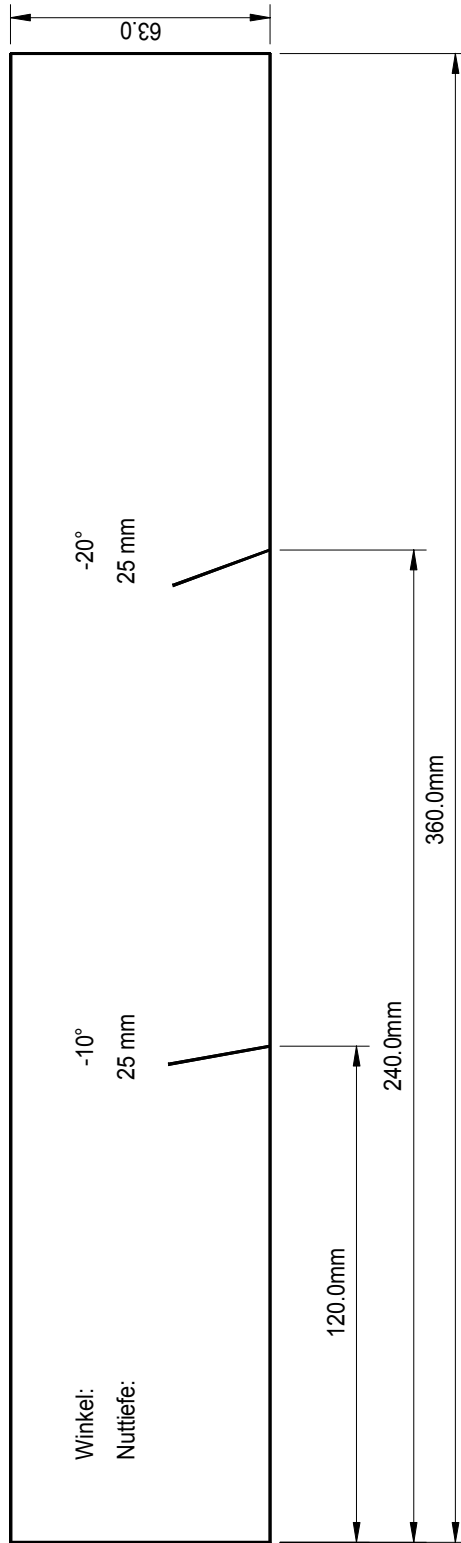


Testkörper BAM 63 - 5



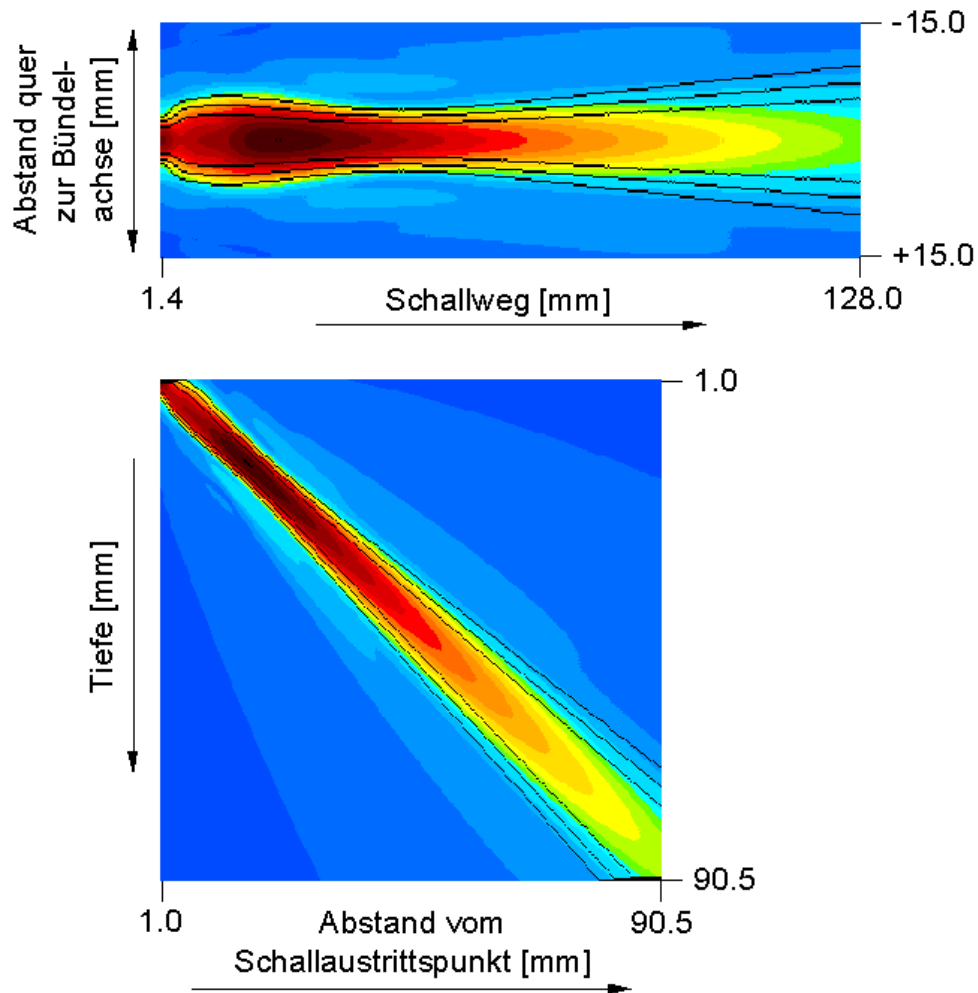


Testkörper BAM 63 - 6



Testkörper BAM 63 - 7

5.5 Schnittbilder des Schallfeldes vom MWB 45° N4 quer zur Einschallebene und in der Einschallebene



5.6 Eingabeparameter des iterativen Rechenmodells

Kurzformelzeichen	Bedeutung	Dimension / Einheit
flaghf	Umschaltung von HF- zu gleichgerichteter A- Bild-Berechnung und Darstellung	1=HF 0=gleichgerichtet
AM1 / 2	Schwingerausdehnung von Prüfkopf 1 / 2 senkrecht zur Einschallebene	[mm]
BM1 / 2	Schwingerausdehnung von Prüfkopf 1 / 2 parallel zur Einschallebene	[mm]
BEPL1 / 2	Keilwinkel von Prüfkopf 1 / 2	[°]
Einschallwinkel 1 / 2	Einschallwinkel des Prüfkopfes 1 / 2 zur Speicherung in der TD- Bild- Datei	[°]
VPL1 / 2	Vorlaufstrecke von Prüfkopf 1 / 2	[mm]
Y	Abstand der Prüfkopfschallaustrittspunkte in Einschallebene	[mm]
Spektrumart	Art des für die Berechnung verwendeten Spektrums 0=integriertes Vierpol- Spektrum mit 64 Stützstellen, fmitte 2 MHz, fro 4 MHz 1=Spektrum aus Datei (*.spk) einlesen 2=internes, künstliches Spektrum	0, 1 oder 2 (siehe mittlere Spalte)
fmitte	Mittenfrequenz des Spektrums bei Rechnung mit internem, künstlichen Spektrum	[MHz]
kap	Zahl der Stützstellen im Frequenzbereich	[-]
fro	obere Grenzfrequenz des Spektrums (bei Verwendung eines internen Spektrums)	[MHz]
Abtastung	Richtung der Abtastbewegung des Prüfkopfes 0=in Einschallebene 1=senkrecht zur Einschallebene	0 oder 1 (siehe mittlere Spalte)
AMIN	Beginn der Abtastbewegung des Prüfkopfes in Abtastrichtung	[mm]
AMAX	Ende der Abtastbewegung des Prüfkopfes in Abtastrichtung	[mm]
ADELTA	Inkrement der Prüfkopfposition in Abtastrichtung	[mm]
Weg1_Setz	Setzposition des Prüfkopfes in Abtastrichtung	[mm]
Weg2_Setz	Setzposition des Prüfkopfes senkrecht zur Abtastrichtung (feste Position)	[mm]
D	Wanddicke	[mm]
CLPL	Longitudinal- Wellengeschwindigkeit in Plexiglas	[m/s]
CT	Transversal- Wellengeschwindigkeit im Prüfobjekt	[m/s]
CL	Longitudinal- Wellengeschwindigkeit im Prüfobjekt	[m/s]
AF	Fehlerausdehnung in Einschallebene	[mm]
BF	Fehlerausdehnung senkrecht zur Einschallebene	[mm]
AMUE	horizontale Fehlerschräglage	[°]
XI	vertikale Fehlerschräglage (bei Querbohrung für die Reflektorelemente vom Modell bestimmt)	[°]
BFT	Tiefenlage der Fehlermitte	[mm]
kappas	Schallschwächung	[dB/m]
Nutdachwahl	Option für Berechnung ohne bzw. mit Nutdach	0=ohne 1=mit
Nutdach	Größe des Nutdachs bei nutartigem Testreflektor (z.B. Sägeschnitt)	[mm]
IZYL	Unterscheidung zwischen zylindrischem Reflektor (Querbohrung) mit dem Durchmesser AF oder Rechteck- Fehlerfläche AF*BF	1=Querbohrung 0=Rechteck
IELLIP	Unterscheidung zwischen elliptischem bzw. Kreisscheiben- Reflektor mit den Halbmessern AF	1=Ellipse/Kreis 0=Rechteck

	und BF oder Rechteck- Fehlerfläche $AF \cdot BF$	
NR	Bestimmt die Anzahl der Integrationselemente auf der Fehlerfläche in Einschallebene ($nn=2 \cdot NR+1$)	[-]
Lambdafakt	Bestimmt die Anzahl der Integrationselemente auf dem Umfang der Querbohrung NR nach Gleichung 14 in Abschnitt 3.3	Vielfaches der Wellenlänge λ [-]
MR	Bestimmt die Anzahl der Integrationselemente auf der Fehlerfläche senkrecht zur Einschallebene ($mm=2 \cdot MR+1$)	[-]
flagvor	Speicherung des TD- Bildes ohne bzw. mit Vorlauf	0=ohne 1=mit
Normierung	Option zur Speicherung des TD- Bildes normiert auf dessen maximale Amplitude bzw. nicht normiert	0=nicht normiert 1=normiert
Pixelanzahl	Anzahl der Pixel pro A- Bild	0=256 1=512
Avorlauf	wählbarer Vorlauf für die A- Bild- Darstellung	[mm]
tauverz	dient zur Feinkorrektur von spektrumsbedingten Vorlaufzeiten bei der richtigen Positionierung des A- Bildes	[μ s]
ampdB	Verstärkung, dient zur Echohöhenanpassung im A- Bild (ähnlich dem Verstärkungssteller am US-Gerät)	[dB]
Pixelabst	kleinstes Schallwegelement für die A- Bilddarstellung (bei HF- Darstellung durch FFT- Auflösung ersetzt)	[mm]
Anz_Generationen	Anzahl der maximal zu berechnenden Generationen für die Evolutionsstrategie	[-]
Anz_Nachkommen	Anzahl der zu berechnenden Nachkommen (TD- Bilder) pro Generation	[-]
Max_Qualität	Qualitätswert, bei dessen Erreichen die Optimierung beendet werden soll	Zahl im Intervall (0,1]
Elter.Schrittweite	Größe der Schrittweite für die Variation der Fehlerparameter zum Evolutionsbeginn	[-]
Evolution.-Schrittweiten_Aenderungsfaktor	Größe des Faktors zur Änderung der Schrittweite (Mutationsschrittweitenregelung)	[-]
Evolution.-AF_FEST	Option, ob Fehlerausdehnung in Einschallebene bei Evolutionsstrategie fest oder variabel ist	0=fest 1=variabel
Evolution.-BF_FEST	Option, ob Fehlerausdehnung senkrecht zur Einschallebene bei Evolutionsstrategie fest oder variabel ist	0=fest 1=variabel
Evolution.-AMUE_FEST	Option, ob horizontale Fehlerschräglage bei Evolutionsstrategie fest oder variabel ist	0=fest 1=variabel
Evolution.-XI_FEST	Option, ob vertikale Fehlerschräglage bei Evolutionsstrategie fest oder variabel ist	0=fest 1=variabel
Evolution.-BFT_FEST	Option, ob Tiefenlage der Fehlermitte bei Evolutionsstrategie fest oder variabel ist	0=fest 1=variabel

Tabelle 5: Parameterliste der Eingabewerte des Modells

5.7 Schematischer Programmablauf und Routinen des Rechenmodells

Startbildschirm mit einigen Informationen zum Modell; BAM_Erstbildschirm(CDC* pDC):
Optimierung der Simulation einer Ultraschallprüfung mit einer iterativen Modellanpassung.
Berechnung der A- Bilder für den Rissnachweis mit einer Impuls- Echo- Technik für Transversalwellen. Riss mit Rückwandeinfluss, A-Bild und TD- Bild, enthält Winkelspiegeleffekt für Tiefenlage: $BFT = \text{Wanddicke} - \text{Tiefenausdehnung} / 2 * \cos(XI)$; XI= Reflektorwinkel in der Einschallebene
BAM- Berlin, Fachgruppe VIII.4, Akustische und elektrische Verfahren der ZfP
H. Wüstenberg, R. Boehm, D. Tschardtke

Definition der für das Programm benötigten globalen Variablen und Feldvariablen

Wahl der Programmvariante (Berechnung einer Nut, Flachbodenbohrung bzw. Querbohrung oder Optimierung mit Evolutionsstrategie (z. Zt. nur für Nut))
Dateneingabe und Auswahl des Typs für das Prüfkopfspektrum

Berechnungen vor der Schleife über die Prüfkopfpositionen; BAM_Berechnungen(CDC* pDC):
Ermittlung der Anzahl der zu berechnenden A-Bilder; BAM_Abildanzahl():
Berechnung der Größe der Fehlerflächenelemente AFF und BFF für die Integration
 $VPL1ae = \text{Schallfeldäquivalente Vorlaufstrecke}$, verlängert den Schallstrahl im Stahl in den Keil hinein mit der Richtung des Einschallwinkels im Stahl und wird für alle geometrie- und schallfeldbedingten Einflüsse verwendet
 $VLP1S = \text{Laufzeitäquivalente Vorlaufstrecke}$, soll für Dämpfung und Phasenmaß, d.h. für laufzeitrelevante Größen, verwendet werden
Einbeziehung der Vorlaufstrecke in alle Schallfeldrechnungen (Geometrie, Entfernungsgesetz und Richtcharakteristik)

Beginn der ersten vorbereitenden Frequenzschleife
Berücksichtigung der frequenzabhängigen Nahfeldlängen (Felder: SNAH1A[jjj], SNAH1B[jjj], SNAH2A[jjj], SNAH2B[jjj])
Berücksichtigung der frequenzabhängigen Schallschwächung (Feld: RO[jjj])
Ende der ersten vorbereitenden Frequenzschleife

Beginn der Schleife über die Prüfkopfpositionen; BAM_Rechenschleife_X(CDC* pDC):
Rechenschleife für die Berechnung von Nut, Zylinderbohrung u. Flachbodenbohrung

Erwartungszeit für den Impulsschwerpunkt, Zeiterwartungswert in Vielfachen des durch das Frequenzband und die Stützstellen bedingten Zeitintervalls der Impulsberechnung der FFT,
Erwartungszeit für den Impulsschwerpunkt, Anfangszeit und Ende des A-Bildausschnittes

Beginn der zweiten vorbereitenden Frequenzschleife
Berücksichtigung der Schallfeldform im Nahfeldbereich durch verringerte Schwingerabmessungen bei der Richtcharakteristik des Prüfkopfes (Felder: AMM1[jjj], BMM1[jjj], AMM2[jjj], BMM2[jjj])
Ende der zweiten vorbereitenden Frequenzschleife

Beginn der geometrischen Berechnungen

Beginn der äußeren Schleife f. d. Integration über die Fehlerfläche in Richtung Fehlerliefte;
BAM_AeussererIntegrationsschleife()

Beginn der inneren Schleife f. d. Integration über die Fehlerfläche in Richtung Fehlerlänge;
BAM_InnereIntegrationsschleife()

Geometriedefinitionen für die Winkel an Prüfkopf und Fehler und die Schallwege für die verschiedenen, berücksichtigten Wechselwirkungen und wenn notwendig Anwendung des FERMATSCHEN Prinzips durch BAM_Fermat()

Punktquellenrichtwirkung des Fehlerflächenelementes bei:

- Weg SNM2 trans. + SNM1L long.
- Weg delsl long.+SNM2 trans. (long./long. am Fehler)
- Weg SNM2 trans. + delsl long. + SNM1L long. (long./long. am Fehler)
- Weg SNM1 trans. + SNM2 long.
- Weg SNM1 trans. + Delts1 trans. = SNM4
- Weg SNM1 trans. + SNM2 trans. (Hauptwinkelspiegelanteil H)
- Weg SNM2 trans. + SNM1 trans. (Hauptwinkelspiegelanteil R)
- Weg SNM1 trans. + SNM1 trans. (Beugungsanteil H)
- Weg SNM2 trans. + SNM2 trans. (Beugungsanteil H)
- Weg SNM1 trans.+Delts1 long.
- Weg SNM5dac trans. + SNM5dac trans. (Nutdach direkt)
- Weg SNM5dac2 trans. + SNM5dac2 trans. (Nutdach über Rückwand)
- Weg SNM1 trans. + delsl long. + SNM2 trans.
- Weg SNM1L long. + SNM2 long. (Hauptwinkelspiegelanteil H für Longitudinalwellen)

Punktquellenrichtwirkung am Prüfkopf:

- transversal Weg SNM1
- longitudinal Weg SNM1L
- transversal u. longitudinal Weg SNM2
- transversal für Nutdach Weg SNM5dac
- transversal für Nutdach über Rückwand Weg SNM5dac2

Reflexion longitudinal in transversal an der Rückwand

Reflexionsfaktor TT und LL an der Rückwand

Beginn der Hauptfrequenzschleife, ab hier Berechnung der frequenzabhängigen Größen

Berechnung der Phasenfaktoren

Prüfkopfrichtcharakteristik für:

- Weg SNM1 transversal
- Weg SNM2 transversal
- Weg SNM2 (Fermat tit) transversal
- Weg SNM1 longitudinal
- Weg SNM2 longitudinal
- Weg SNM5 transversal
- Weg SNM5 transversal

Geometrische Richtwirkung des Fehlerflächenelementes bei:

- Weg SNM1 trans. + SNM2 trans. oder SNM2 trans. + SNM1 trans.
- Weg SNM2 trans. + SNM1L long.
- Weg SNM1 trans. + SNM2 long.
- Weg SNM1L long. + delsl long. + SNM2 trans.
- Weg SNM2 trans. + delsl long. und zurück (FERMAT)
- Weg SNM1 trans. + Delts1 trans.
- Weg SNM1 trans. + SNM1 trans.
- Weg SNM2 trans. + SNM2 trans.
- Weg SNM1 trans. + Delts1 long.
- Weg SNM5dac trans. + SNM5dac trans. (Nutdach)
- Weg SNM5dac2 trans. + SNM5dac2 trans. (Nutdach über Rückwand)
- Weg SNM1 trans. + delsl long. + SNM2 trans.
- Weg SNM1L long. + SNM2 long. oder SNM2 long. + SNM1L long.

Betrag der Richtwirkungen der Prüfköpfe und der Fehler Elemente für die verschiedenen Wege

Phase der Richtwirkungen der Prüfköpfe und der Fehler Elemente für die verschiedenen Wege

Schallschwächungseinfluss für die verschiedenen Wege

Entfernungsgesetze des Prüfkopfs für die verschiedenen Wege

Addition der Beiträge für die verschiedenen Wege und Wellenmoden

Ende der Hauptfrequenzschleife

Ende der inneren Schleife f. d. Integration über die Fehlerfläche
Ende der äußeren Schleife f. d. Integration über die Fehlerfläche

Multiplikation mit dem Impulsspektrum (in CC(jj) und ccl(jj) enthalten) und Normierung auf die Frequenzstützstellenanzahl

Berechnung des Zeitverlaufes durch FOURIER- Transformation; BAM_PROCFFFT()

Normierung für die graphische Darstellung; BAM_manomi()

A- Bildpixelierung; BAM_Abildpixelierung(Rechendatei1.Pixelanzahl)

graphische Darstellung:

A- Bild und Rechendaten; BAM_Skizze_Graph_Pixelanzahl(pDC, Rechendatei1.Pixelanzahl)
Amplitudendaten; BAM_Skizze_kurve2_Pixelanzahl(pDC, Rechendatei1.Pixelanzahl)
Prüfanordnung; BAM_Skizze_PK(pDC)
TD- Bild; BAM_Skizze_TD_Teilbild(pDC)

Ende der Schleife über die Prüfkopfpositionen

Normierung auf d. max. Amplitude im TD- Bild; BAM_MaxWertNorm(Rechendatei1.Pixelanzahl)
TD- Bild speichern; BAM_DAT_Speichern()

Ende des Programms

Die Routinen des Rechenmodells:

BAM_Abildanzahl(): Prüfen, dass die A- Bildanzahl 512 nicht überschreitet

BAM_Abildpixelierung(short Pixelanzahl): Der Pixelabstand Pixelabst wird in mm vorgegeben. Die Pixelanzahl ist 256 oder 512. Die A-Bildlänge ergibt sich daraus. Der A-Bildlänge entspricht ein Zeitbereich TABer im A-Bild. Der berechnete gleichgerichtete Impuls wird an die zeitlich richtige Stelle im A-Bild eingetragen. Wenn der Pixelabstand im A-Bild größer ist als bei der Berechnung, dann wird dem A-Bildpixel das Maximum aus dem entsprechenden Kurvenstück zugeordnet.

BAM_Spektrum(): integriertes Vierpol- Spektrum verwenden (MWB 45°, 2 MHz, 64 Stützstellen)

BAM_SpektrumLaden(): Spektrum aus einer Datei laden

BAM_SpektrumSynthetisch(): Spektrum aus einer Gaußkurve entnehmen

Für die Berechnung der Reflexionsfaktoren:

BAM_RLL(): longitudinal - longitudinal

BAM_RLT(): longitudinal - transversal

BAM_PRTT(): transversal - transversal

Für die Berechnung der Punktrichtwirkungen:

BAM_PKLx(), BAM_PKLz(), BAM_PKTx(), BAM_PKTz()

Für die Berechnung der Dipolrichtwirkungen:

BAM_PKRiaus(), PLx, PLz, PTx, PTz

Näherungen für die Punktrichtwirkungen am Prüfkopf:

BAM_PRITK(): für Transversal-Wellen mit Nahfeldeinfluss; U. Haufe, Kutzner und Erhard,

FRESNEL- Näherung für die Punktrichtwirkungen

BAM_PRIWL(): für Longitudinal- Wellen

BAM_PROCFFFT(): schnelle FOURIER- Transformation für die Transformation aus dem Frequenz in den Zeitbereich

Routinen für die Dateneingabe:

BAM_manuelleDateneingabe_FBB(): für Flachbodenbohrung (Kreisscheibe)

BAM_manuelleDateneingabe_Nut(): für Nut (Rechteck)

BAM_manuelleDateneingabe_ZYL(): für Zylinderbohrung (Querbohrung)

BAM_manuelleDateneingabe_Opt_Nut(): für Optimierung einer Nut

BAM_ParameterLaden(): gespeicherte Eingabeparameter laden

BAM_ParameterSpeichern(): Eingabeparameter speichern

BAM_ParameterAnzeigen(): geladene Eingabeparameter anzeigen
BAM_Logdatei(): Schreiben der Datei Nutopt.log mit dem Evolutionsverlauf
BAM_manomi(): Funktion zur Normierung für die graphische Darstellung
BAM_MaxWertNorm(short Pixelanzahl): Normierung auf die max. Amplitude im TD- Bild
BAM_Feramat(): Berechnung d. Reflexionswinkel an d. Gegenfläche nach dem FERMAT- Prinzip
BAM_Skizze_Graph_Pixelanzahl(CDC* pDC, short Pixelanzahl): Graphische Darstellung des A-Bildes für 256 oder 512 Pixel und Ausgabe von max. Amplitude, Verstärkung, Prüfkopfposition (x- u. z- Achse), Pixelanzahl, Pixelgröße, Schrittweite bei Evolution, Fehlerelementzahl NR und Elementgröße AFF in Einschallrichtung bei Zylinderbohrung, Wanddicke, Rechenzeit und Datum.
BAM_Skizze_kurve2_Pixelanzahl(CDC* pDC, short Pixelanzahl): Zeichnen der Kurve des berechneten Signals für 256 oder 512 Pixel. Der durch die FFT-Rücktransformation berechnete Zeitbereich hat die Größe $t_{ber} = (\text{Frequenzstützstellenzahl/obere Grenzfrequenz})$. Die Zeitdarstellung hat die Länge t_{ber} und wird um den Erwartungswert des Impulsschwerpunktes t_{erw} zentriert.
BAM_Skizze_PK(CDC* pDC): Zeichnung der Prüfanordnung
BAM_Skizze_TD_Teilbild(CDC* pDC): Zeichnung des TD- Bildes (nur bei 256 Pixeln pro A- Bild)
BAM_Initialisierung(): Initialisierung wichtiger Variablen und Null setzen einiger Feldvariablen
BAM_DAT_Speichern(): Speichern des TD- Bildes als DAT-File für Winbild.exe
BAM_AeussereIntegrationschleife(): äußere Schleife für die Integration über die Fehlerfläche in Richtung Fehlertiefe, d. h. in Einschallrichtung
BAM_InnereIntegrationschleife(): innere Schleife für die Integration über die Fehlerfläche in Richtung Fehlerlänge, d. h. senkrecht zur Einschallrichtung
BAM_Phase1(): für Betrag und Phase der Punktquellenrichtwirkungen

zusätzliche Routinen für die Evolutionsstrategie:

BAM_DAT_Lesen(): Einlesen der Messdaten aus DAT-Files für Evolutionsstrategie
BAM_Evolution_Erstqualitaet(): Bestimmung der Qualität des ersten Elters
BAM_Evolution_Qualitaet_Nachkomme(): Bestimmung der Qualität der Nachkommen
BAM_Evolution_X_PLUS_Y(CDC* pDC): Evolutionschema (1+Y)-Evolutionsstrategie
BAM_Evolution_Nachkommenschleife(): Schleife für die Berechnung der Nachkommen und Erzeugung der zufallsbasierten Modifikation der Fehlerparameter für die Evolutionsstrategie
BAM_Skizze_Evolutionsparameter(CDC* pDC): graphische Ausgabe der Evolutionsparameter (ersetzt bei der Evolution die sonst dargestellte Prüfanordnung)
BAM_DAT_Opt_Speichern(): Speichern des TD- Bildes als DAT-File für Winbild.exe nach Evolution

6 Literatur

- Beierke, S.: Entwurf einer Vierpol- Übertragungskette zur Optimierung von Ultraschallprüfköpfen. Studienarbeit, TU Berlin, 1986, angefertigt im ehemaligen Laboratorium 6.21 an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
- Boehm, Rainer; Erhard, Anton; Schulz, Eduard; Wüstenberg, Hermann: Winkelspiegel- und Rissspitzenecho in Abhängigkeit von der Reflektororientierung: Ein Vergleich von Messung und Modellrechnung in TD- Bilddarstellung. Vortrag DACH- Jahrestagung d. DGZfP, Berichtsband 52.2, Lindau, 13.-15.05.1996, S.568f
- Boehm*, R.; Lohmann**, H.- P.; Becker**, E.; Schreiner**, T.: Vergleich von Messung und Modellierung am Beispiel der Ultraschallprüfung einer aufgeschrumpften Turbinen- Radscheibe. Vortrag DACH- Jahrestagung d. DGZfP, Berichtsband 63.1, Bamberg, 7.-9.9.1998, S.59-71, *BAM Berlin, **Siemens AG Mühlheim
- Boehm, Rainer; Erhard, Anton; Wüstenberg, Hermann: Darstellung des Entwicklungsstandes des schnellen, halbanalytischen Modells (FSAM) für die US- Prüfung anhand von Beispielen. Vortrag DACH- Jahrestagung d. DGZfP, Berichtsband 68, Band 1, Celle, 10.-12.05.1999, S. 317-323
- Brekow*, G.; Erhard*, A.; Schulz*, E.; Wüstenberg*, H.; Kreier**, P.: Critical Assessment to the TOFD Approach for Ultrasonic Weld Inspection. Kopenhagen: Tagungsband 7th European Conference On Non- Destructive Testing (ECNDT), 26.-29.05.1998, S.1236-1243, *Bundesanstalt für Materialprüfung und -forschung (BAM Berlin), ** Innotest (Schweiz)
- Brekow, G.; Erhard, A.; Wüstenberg, H.: TOFD- und Impuls- Echo- Messungen an Rohrschweißnähten. Vortrag DACH- Jahrestagung d. DGZfP, Berichtsband 63, Band 1, Bamberg, 07.-09.09.1998, S. 213-221
- BS 3923 Part1: Methods for ultrasonic examination of welds. Methods for manual examination of fusion welds in ferritic steels. London: British Standards Institution (BSI), 1986
- Chapman, R. K.: Ultrasonic scattering from smooth flat cracks: An elastodynamic KIRCHHOFF diffraction theory (main report). Manchester: frühere Central Electricity Generating Board (CEGB), UK, Report Nr. NWR/SSD/84/0059/R, 09/1984, S. 1, 2 u. 45
- Cremer, Lothar: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik - Wellentheoretische Raumakustik. Band 3, Leipzig: Hirzel Verlag, 1950, S.107-115

- Denys, Rudi u. a.: Weld Defect Acceptance Criteria. Bericht, Laboratorium Soete, Universität Gent im Auftrag der International Pipe Line & Offshore Contractors Association (<http://www.iploca.com>), 1999
- Diederichs, Rolf: Nondestructive Testing Encyclopedia. In: <http://www.ndt.net>
- DIN 54125: Manuelle Prüfung von Schweißverbindungen mit Ultraschall. Berlin: Beuth, Januar 1989, Abschnitt 8.3, S. 11f
- DIN EN 1712: Ultraschallprüfung von Schweißverbindungen - Zulässigkeitsgrenzen. Berlin: Beuth, 1997, S.3 u. 7
- DIN EN 1713: Ultraschallprüfung - Charakterisierung von Anzeigen in Schweißnähten. Berlin: Beuth, 1998
- Döring, Joachim: Die Entwicklung von AOW- Bandpassfiltern unter Anwendung der biologischen Evolution. Dissertation an der Akademie der Wissenschaften der DDR, 1986
- Döring, J.; Erhard, A.; Möhrle, W.; Schenk, G.: Gerät zur Linearabtastung mit Strahlerprüfköpfen (Real- Time- Scanner- Gerät). Vortrag DACH- Jahrestagung d. DGZfP, Berichtsband 52.2, Lindau, 13.-15.05.1996, S. 541-548
- Erhard, Anton: Untersuchungen zur Ausbreitung von Longitudinalwellen an Oberflächen bei der Materialprüfung mit Ultraschall, Diss., TU Berlin, D83, 1982
- Erhard*, A.; Möhrle*, W.; Rotter*, B.; Wüstenberg*, H. ; Pitkänen**, J.: A Parametric Study of Ultrasonic Probes with PVDF- Transducers. Vortrag 12th World Conference on NDT, Band 1, Amsterdam, 23.-28.4.1989, S.691-698, *Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung; **VTT, Espoo, Finland
- Erhard, A.; Möhrle, W.; Montag, H.-J.; Schenk, G.: Schweißnahtprüfung mit Real- Time- Scanner- Prüfköpfen. Vortrag DACH- Jahrestagung d. DGZfP, Berichtsband 59.1, Dresden, 05.-07.05.1997, S. 103-111
- Erhard, Anton; Tschardtke, Dirk; Wüstenberg, Hermann: Bewertung kritischer Befunde bei der Ultraschallprüfung an Schweißnähten mit Modellrechnungen. Vortrag DACH- Jahrestagung d. DGZfP, Berichtsband 73, Band 1, Innsbruck, 29.-31.05.2000, S. 105-117
- Erhard, Anton; Tschardtke, Dirk; Wüstenberg, Hermann: Ultraschallprüfung an Schweißnähten - Bewertung kritischer Befunde mit Modellrechnungen. In: Materialprüfung, 42(2000), H. 11-12, S. 433-436
- EUR 17299 EN: European Methodology for Qualification of non- destructive testing. Second Issue, Petten (Netherlands): European Commission, Joint Research Centre, Institute for Advanced Materials, 1997
- Fernández, Francisco; Tanarro, Antonio: Application of automated ultrasonic inspection systems to industrial processes. Kopenhagen: Tagungsband 7th

European Conference On Non- Destructive Testing (ECNDT),
26.-29.05.1998, S.452-459

Frielinghaus*, R.; Niklas*, L.; Außerwöger**, J.; Spengler**, F.; Ganglbauer**,
O.: Aspects of Practical Application of the Comson Flaw- diagnosis System.
Konferenz- Einzelbericht, 4. European conference of non- destructive
testing. Vol. 4. Proceedings, London: Pergamon Press, 1988, S. 2461-2470.
*Krautkrämer GmbH, Köln-Hürth; **Voest- Alpine AG, Linz

Frielinghaus*, R.; Hackl**, M.; Krenmayr**, F.; Spengler**, F.: COMSON, ein
mobiles Ultraschall- Prüfsystem zur Analyse von Schweißnahtfehlern. In:
Steel & Metals Magazine, Band 27 (1989) H. 9, S. 673-676. *Krautkrämer
GmbH, Köln-Hürth; **Voest- Alpine AG, Linz

Gomm, T. J.; Mauseth, J.A.: State of the Technology: Ultrasonic Tomography.
In: Materials Evaluation, 7 (1999), S. 748

Gutin, L. Y.: Theory of stationary vibrations of an elastic half- space. In: Zh.
tekhn. Fiz., 21 (1951), S. 892-906

Gutin, L. Y.: The radiation into an elastic medium from a piston vibrating in an
infinite elastic screen. In: Soviet physics- acoustics, Vol. 9 Nr.3 (1964),
S. 256-262

Hiller, D.: Ultraschall- Abbildung mittels rückgestreuter Signale nach einem ver-
allgemeinerten Computertomographie- Konzept. Diss., TU Erlangen, 1984

Klanke, Heinz- Peter: Beitrag der Ultraschall- Echotomographie zur Qualitätssi-
cherung schwerer Schmiedeteile. Diss., TU Berlin, D83, 1992

Körner, W. u.a.: Optimierung der Geometrie quer angeströmter Rohrrippen hin-
sichtlich des Wärmeübergangs. In: Verfahrenstechnik 7 (1973), S.109-113

Krautkrämer, Josef u. Herbert: Werkstoffprüfung mit Ultraschall. 4. Aufl., Berlin,
Springer, 1980, S. 274f

KTA 3211.4: Druck- und aktivitätsführende Komponenten von Systemen au-
ßerhalb des Primärkreises - Teil 4: Wiederkehrende Prüfungen und Be-
triebsüberwachung. Salzgitter, Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), 6/1996

Kühnicke, Elfgard; Völz, Uwe: Ultraschallprüfköpfe - Design für komplizierte
Prüfgeometrien. In: Materialprüfung, 40(1998), H. 1-2, S. 7-9

Kuttruff, Heinrich: Physik und Technik des Ultraschalls. Stuttgart, S. Hirzel Ver-
lag, 1988, S. 311-320 u. 326f

Kutzner, Jürgen: Grundlagen der Ultraschallphysik. Stuttgart, Teubner, 1983

Kutzner, J.; Möhrle, W.; Schulz, E.; Wüstenberg, H.: Zur Auswahl der Memb-
ranform bei Winkelprüfköpfen für die Ultraschallprüfung. In: Materialprüfung
18 (1976), H. 7, S. 223-230

- Lamb, H.: On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid. In: Philosophical transactions of the Royal Society of London, Series A: Physical Science and Engineering, Vol. 203 (1904), S. 1-42
- Langenberg*, K. J.; Schmitz**, V.: Ultraschall- Rekonstruktionsverfahren mit synthetischer Apertur (Thesenpapier). Kassel: *Fachgebiet Theoretische Elektrotechnik d. Universität GH Kassel, **Fraunhofer- Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren Saarbrücken, 1985
- Langenberg, K. J., u.a.: Physikalische Elastodynamik statt Punktquellensynthese. Kassel: Interner Bericht des Fachgebiets Theoretische Elektrotechnik d. Universität GH Kassel, 1987, S. 2
- Langenberg*, K. J.; Schmitz**, V.; Wüstenberg***, H.: Darstellungsformen für die Ergebnisse von automatisierten Ultraschallprüfungen - Algorithmen für die Bildgewinnung. Vortrag im Seminar „Automatisierung in der Ultraschallprüfung“, Berichtsband 17 der DGZfP, Berlin, 1988, S. 89-99: *Fachgebiet Theoretische Elektrotechnik d. Universität GH Kassel, **Fraunhofer- Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren Saarbrücken, ***Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung Berlin
- Lasserre*, F.; Mathonnet*, H.; Lecoeur- Taïbi**, I.; Lhémy**, A.: Application des logiciels de modélisation MEPHISTO et CHAMP-SONS au contrôle des cuves des réacteurs à eau sous pression. Vortrag Congress on Nondestructive Testing (COFREND), Nantes, 22.-26.9.1997, *Intercontrôle, Rungis, Frankreich, **CEA CEREM, Saclay, Frankreich
- Marklein, René: Numerische Verfahren zur Modellierung von akustischen, elektromagnetischen, elastischen und piezoelektrischen Wellenausbreitungsproblemen im Zeitbereich basierend auf der Finiten Integrationstechnik. Diss., Universität Gesamthochschule Kassel, 1997
- Miller, G. F.; Pursey, H.: The field and radiation impedance of mechanical radiators on the free surface of a semi- infinite isotropic solid. Proc. Roy. Soc. London, A 223 (1954), S. 521-542
- Möhrle, Walter; Wüstenberg, Hermann: Erfahrungen mit theoretischen Modellen für Schallfeld- und Impulsverhalten beim Bau von Sonderprüfköpfen für die Ultraschallprüfung. Vortrag DACH- Jahrestagung d. DGZfP, Berichtsband 28, Luzern, 06.-08.05.1991, S.204-215
- Montag, H.-J.: Datenstrukturen für die automatisierte Prüfung. Vortrag im Seminar "Automatisierung der Ultraschallprüfung, Gerätetechnik und Regeln zur Anwendung und Auswertung", Berichtsband 62 der DGZfP, Saarbrücken, 17.-18.11 1997, S. 129-138
- Moreira, Edson V.; Martins de Oliveira, Luiz F.; Pinto Ferreira, Sérgio R.: The State of the Art of Weld Seam Inspection on Pipes by Automated Ultrasonic System Using Special Composite Transducers. Rom: Vortrag, 15th World Conference On Non-Destructive Testing (WCNDT), 15.-21.10.2000

- Mundry, E.; Wüstenberg, H.: Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung. Unveröffentlichtes Vorlesungsskript, TU Berlin, 1995/96
- Rechenberg, Ingo: Evolutionsstrategie '94. Stuttgart, Frommann- Holzboog, 1994, S.25, 46-48, 72f u. 257-264
- Schoch, Arnold: Schallreflexion, Schallbrechung und Schallbeugung. In: Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften, Band 23 (1950), S.127-234
- Schumm, Andreas: Using CAD representations in transient soundfield calculations through curved surfaces. Diss., TU Berlin, D83, 05/1998
- Schwefel, Hans- Paul: Experimentelle Optimierung einer Zweiphasendüse. Bericht 35 des AEG- Forschungsinstituts Berlin zum Projekt MHD- Staustrahlrohr, 1968
- Silk, M.G.; Kear, P. E.: TOFD - The time of Flight Diffraction Technique - Theoretical Aspects and Practical Applications. In: Il Giornale delle Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica, 2/93, S. 28-38
- Tessaro, Ute: Charakterisierung der Ultraschallanzeigen an plattierten Komponenten durch Auswertung von Beugungsmustern. Diplomarbeit, TU Berlin, 04/ 2001, S. 11f
- The International Institute Of Welding: The Evaluation Of Ultrasonic Signals. Document IIS/IIW-850-86, Cambridge, 1987, S.4-12, 31, 40-43 u. 45-47
- Tillack, Gerd- Rüdiger: Simulation und Rekonstruktion für strahlendiagnostische Verfahren, Habilitationsschrift, TU Dresden, 2001
- Totzeck, Michael: Gültigkeitsbereich der skalaren Beugungstheorien nach KIRCHHOFF und RAYLEIGH- SOMMERFELD im Nahfeld kleiner Phasenobjekte. Diss., TU Berlin, D83, 1989, S.57-62, 84-86 u. 156f
- Tscharntke, Dirk: Experimentelle Verifikation von theoretischen Modellen zur Empfindlichkeitseinstellung bei SEL- Winkelprüfköpfen für die Ultraschallprüfung. Diplomarbeit, TU Berlin, 1997, S. 25f
- VGB-R 516 (VGB- ENIQ- Richtlinie): Methodik für das Vorgehen bei der Qualifizierung von zerstörungsfreien Prüfungen. 1. Ausgabe, Essen: VGB Power Tech e. V., 2001
- Wenzel, Lothar: Strategien bei Signalvergleichen. In: Elektronik, 25 (1999), S. 64-68
- Wüstenberg, Hermann: Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall, Diss., TU Berlin 1972