

Simulationsgestützte POD-Studien für die Ultraschallprüfung von Luftfahrt- komponenten

Frank SCHUBERT*, Martin BARTH*, Johanna MENGES**, Hans-Uwe BARON**

* Fraunhofer IZFP, Dresden (Kontakt: frank.schubert@izfp-d.fraunhofer.de)

** MTU Aero Engines, München (Kontakt: hans-uwe.baron@mtu.de)

Kurzfassung. Die Ermittlung von POD-Kurven für die zerstörungsfreie Prüfung sicherheitsrelevanter Luftfahrtkomponenten stellt in der Regel einen äußerst personal- und kostenintensiven Vorgang dar, weil dazu eine Vielzahl von Probekörpern mit unterschiedlichen Fehlstellen hergestellt und untersucht werden muss. Computergestützte Simulationsverfahren auf Basis halb-analytischer oder numerischer Modelle haben mittlerweile einen Entwicklungsstand erreicht, der es ermöglicht, praxisrelevante Prüfaufbauten auf realistische Art und Weise zu modellieren. Dadurch sollte sich prinzipiell ein großer Teil der POD-Experimente durch Simulationsrechnungen ersetzen lassen, so dass aussagefähige POD-Kurven in kürzerer Zeit und mit geringerem Aufwand erstellt werden können. Diese Fragestellungen werden derzeit im EU-Projekt PICASSO (Improved reliability inspection of aeronautic structures by simulation-supported POD) am Beispiel der Ultraschall-, Wirbelstrom- und Röntgenprüfung untersucht. Im vorliegenden Beitrag werden erste Ergebnisse simulierter Ultraschalluntersuchungen vorgestellt und mit experimentellen Daten verglichen. Für die Rechnungen kommt neben der kommerziellen ZfP-Software CIVA auch die Elastodynamische Finite Integrationstechnik (EFIT) zum Einsatz.

Einführung

Beim Projekt PICASSO (Improved reliability inspection of aeronautic structures by simulation-supported POD) handelt es sich um ein laufendes Projekt im 7. Rahmenprogramm der EU [1]. Es untersucht die Möglichkeit, wesentliche Teile aufwändiger experimenteller POD-Studien (POD: Probability of Detection, Fehlerauffindwahrscheinlichkeit) durch numerische Modellrechnungen zu ersetzen. Dazu werden simulationsgestützte POD-Kurven von metallischen Bauteilen (insbesondere Titan) im Rahmen der Wirbelstrom-, Ultraschall- und Röntgenprüfung berechnet. Hauptziel dabei ist es, die experimentell ermittelten POD-Daten zu ergänzen bzw. zu ersetzen und somit schnellere und preisgünstigere POD-Studien zu ermöglichen.

Projektpartner sind BAM (Berlin), Chalmers University (Göteborg), CEA-LIST (Gif-Sur-Yvette, Frankreich), IZFP-D (Dresden), TWI NDT (Swansea, Wales), EADS Innovation Works (Toulouse), MTU Aero Engines (München), Rolls Royce (Bristol), Snecma (Villaroche, Frankreich), Turboméca (Bordes, Frankreich), Volvo Aero (Trollhättan, Schweden), HTS (Coswig), PHIMECA (Paris) und Technic Control (Stettin).

Als Simulationsprogramme kommen VIC-3D [2], VAC (Volvo Aero Corporation) und CIVA-ET [3] für den Wirbelstrombereich, CIVA-RT [3] und aRTist [4] für den Röntgenbereich und CIVA-UT [3] sowie EFIT [5] für den Ultraschallbereich zum Einsatz. Die

vorliegende Arbeit beschränkt sich auf die Darstellung der Ultraschallanwendungen. Weitere Details auch zu den anderen Prüfverfahren finden sich in [1].

1. Erläuterung des prinzipiellen Ansatzes

1.1 Idealisertes Anwendungsbeispiel: Manuelle Rissdetektion mittels Winkelspiegel

Um den prinzipiellen Ansatz einer simulationsgestützten POD-Studie zu erläutern, betrachten wir zunächst das in Abb. 1 dargestellte idealisierte Anwendungsbeispiel einer manuellen Ultraschallprüfung. Dabei soll ein oberflächenverbundener Riss bzw. eine Nut mit Hilfe eines 45°-Scherwellenprüfkopfes auf Basis des Winkelspiegeleffekts detektiert werden.

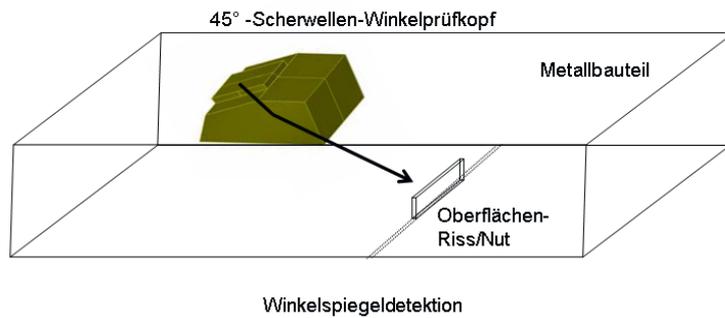


Abbildung 1: Idealisertes Anwendungsbeispiel für die manuelle Ultraschallprüfung: Winkelspiegel-Rissdetektion mit 45°-Scherwellenprüfkopf.

Wir betrachten zunächst den Fall eines Risses, der senkrecht zur Bauteilrückwand liegt. Das am Ort des Wandlers detektierte Echo hängt im Wesentlichen von der Höhe des Risses (hier Risstiefe) ab und kann zum Beispiel mit Hilfe der Elastodynamischen Finiten Integrationstechnik (EFIT, [5]) berechnet werden. Abb. 2 zeigt Wellenfrontschnappschüsse für einen Fall, in dem die Risstiefe groß gegenüber der (mittleren) Wellenlänge des Anregungssignals ist. Abb. 3 zeigt das zugehörige berechnete Sensorsignal.

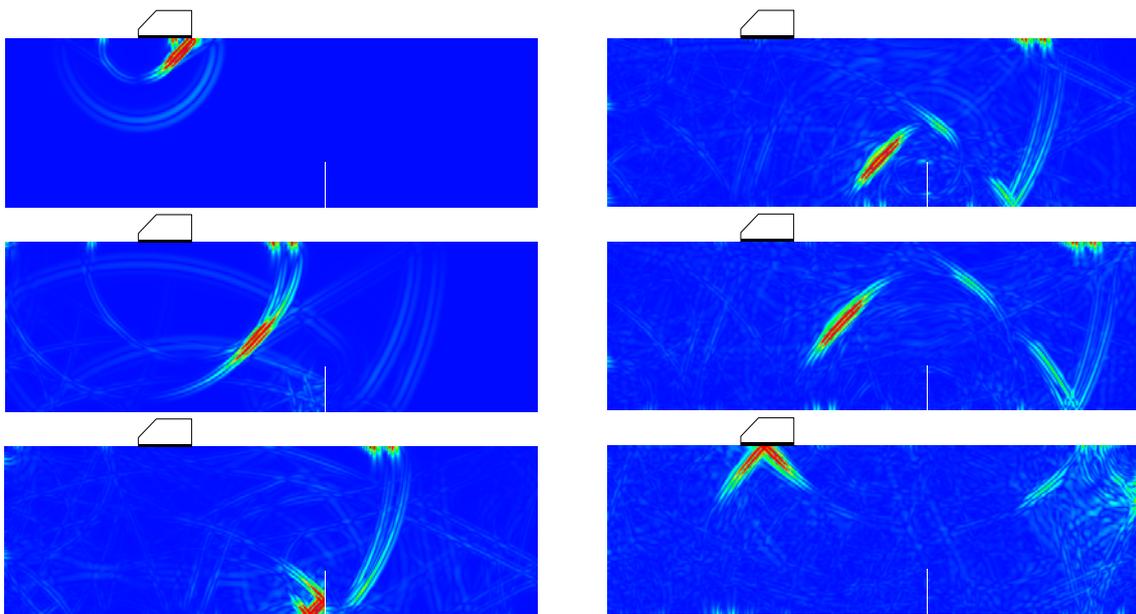


Abbildung 2: 2D-EFIT-Simulation in einer Schnittebene des in Abb. 1 dargestellten Prüfaufbaus.

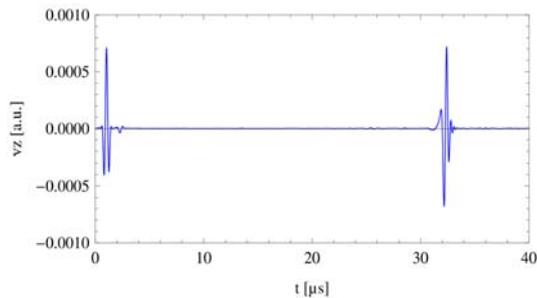


Abbildung 3: Berechnetes Echosignal am Ort des Wandlers. Zu erkennen ist der Anregungsimpuls sowie das Winkelspiegelecho bei ca. 32 μs .

Das in Abb. 3 gezeigte Signal ist (bis auf geringe und hier kaum sichtbare numerische Effekte) praktisch rauschfrei. Es basiert zudem auf der Annahme einer perfekten Ankopplung des Prüfkopfes und stellt somit eine Idealisierung dar. Bei einer realen Handprüfung würden das Gefügerauschen, das Rauschen der Messelektronik sowie die unweigerlich auftretenden Ankoppelschwankungen zu einem begrenzten und veränderlichen Signal/Rausch-Verhältnis führen. Insbesondere bei kleinen Fehlergrößen (kleiner oder gleich der Wellenlänge) treten dabei auch Fälle auf, in denen das Echosignal im Rauschen verschwindet und vom Prüfer nicht mehr identifiziert werden kann.

Analog zu der in den Abb. 2 und 3 dargestellten Vorgehensweise wurde die reflektierte Amplitude als Funktion der Risstiefe mit EFIT berechnet (Abb. 4, linkes Teilbild). Unter Berücksichtigung eines konstanten Rauschpegels (ermittelt z.B. aus einer realen Messung) sowie einem statistischen Modell der Ankoppelschwankungen (welches sich ebenfalls aus realen Messdaten ergibt) kann aus dieser Kurve unmittelbar die relevante POD-Kurve ermittelt werden (Abb. 4, rechtes Teilbild).

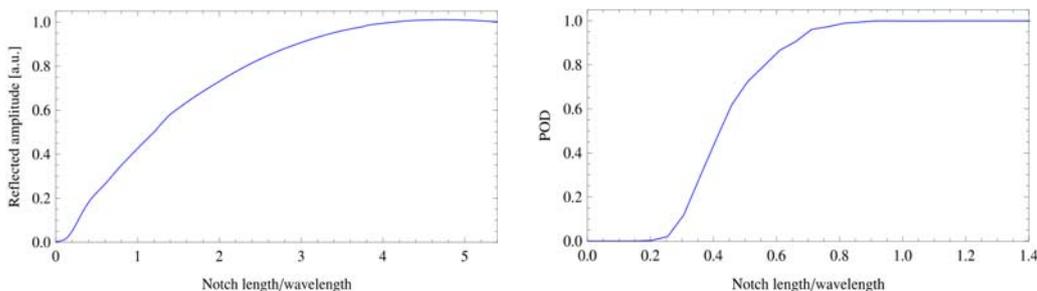


Abbildung 4: Mit EFIT berechnete Echoamplitude als Funktion der Risstiefe (links) und daraus abgeleitete POD-Kurve basierend auf statistischen Modellen des Rauschens und der Ankoppelschwankungen (rechts).

Neben dem Einfluss der Risstiefe (bei unveränderter Rissgeometrie) lassen sich mit dem simulationsgestützten POD-Ansatz auch neue Rissgeometrien berücksichtigen, ohne dass dazu ein neuer POD-Testkörper erstellt werden müsste.

Stellen wir uns dazu vor, dass im Rahmen einer POD-Messung ein Testkörper wie in Abb. 1 verwendet worden ist, bei dem die eingebrachten Risse eine Risstiefe haben, die mit der (mittleren) Wellenlänge vergleichbar ist. Dabei könnte sich z.B. eine POD von knapp 80% ergeben. Nachdem wir Rauschpegel und Ankoppelschwankungen *experimentell* ermittelt und statistisch beschrieben haben, lässt sich das Modell so einstellen, dass sich ebenfalls eine POD von 80% ergibt (Kalibrierung von Experiment und Modell). Anschließend kann etwa der Einfluss einer beliebigen Rissneigung relativ zur ursprünglichen senkrechten Lage rein numerisch untersucht werden, wobei das für die Kalibrierung verwendete Rauschmodell sowie das Modell der Ankoppelschwankungen unverändert bleiben. Im vorliegenden Fall ergab sich damit für einen um 45° nach rechts geneigten Riss eine leichte Zunahme der POD auf 82%, für einen um 45° nach links geneigten Riss dagegen eine deutliche Abnahme auf knapp 15% POD.

1.2 Rauschmodelle

Wie oben dargelegt, stellt die Berücksichtigung von verrauschten Signalen einen zentralen Aspekt bei der Ermittlung von simulationsgestützten POD-Kurven dar. Dabei lassen sich prinzipiell zwei verschiedene Ansätze verfolgen. Bei einem „externen“ Rauschmodell werden zunächst analog zu Abb. 2 und 3 idealisierte Echosignale berechnet, ohne dass das Rauschen der Messapparatur und insbesondere das Gefügerauschen explizit berücksichtigt wird. Erst nach der Rechnung wird das Echosignal mit einem bestimmten Rauschpegel überlagert, der sich aus real vermessenen Rauschsignalen ergibt. Die in Abschnitt 1.1 erläuterten Beispiele wurden auf diese Art und Weise erzielt. Der Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass die Rauscherzeugung getrennt von der Simulation erfolgen kann und somit zahlreiche verrauschte Signale auf Basis einer einzigen Simulationsrechnung erzeugt werden können.

Ein wesentlicher Nachteil liegt allerdings darin, dass das Rauschmodell im Allgemeinen nicht auf andere Materialien und insbesondere nicht auf andere Frequenzen übertragen werden kann. Dazu sind jeweils neue Kalibrierungsmessungen notwendig. Um frequenzabhängige Effekte, wie sie auch in der Praxis auftreten, zu berücksichtigen, müssen „interne“ Rauschmodelle verwendet werden, welche die reale Mikrostruktur des untersuchten Materials (Abb. 5) explizit in die Simulation einbeziehen. Obwohl sich damit der Rechenaufwand erheblich vergrößert (für jedes verrauschte Signal wird eine neue Simulationsrechnung benötigt), können damit frequenzabhängige Streu- und Dämpfungseffekte sehr viel realistischer nachgebildet werden. Im PICASSO-Projekt werden dazu sowohl Partikelhaufwerke als auch polykristalline Voronoi-Modelle (Abb. 6) verwendet.

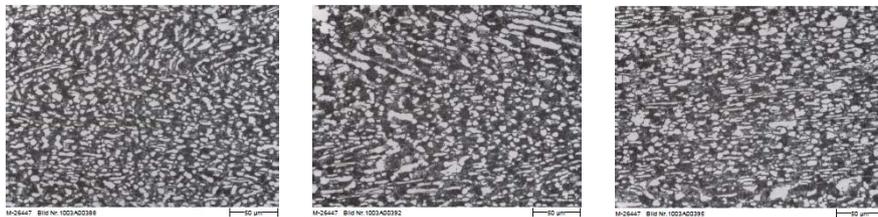


Abbildung 5: Mikroskopische Aufnahmen realer Titangefüge.

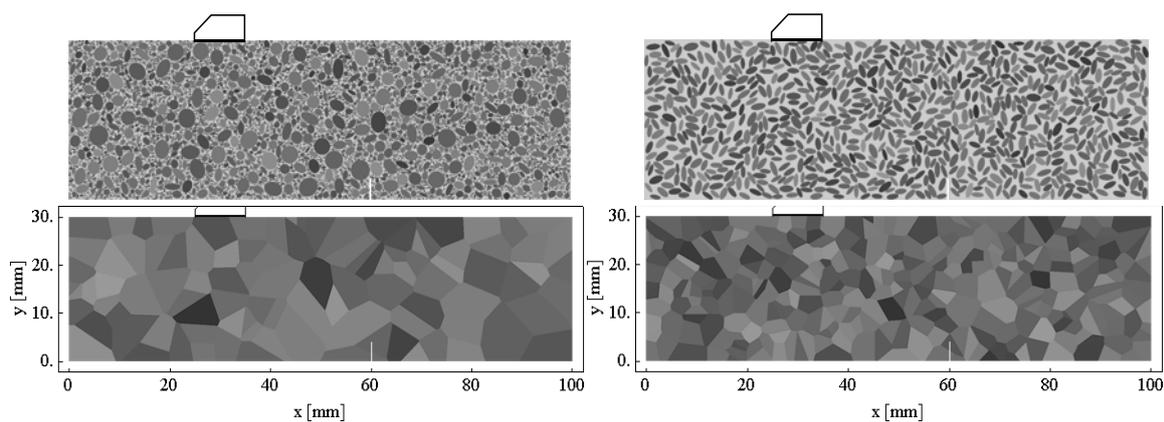


Abbildung 6: Verschiedene partikuläre (oben) und polykristalline Mikrostrukturmodelle (unten) für die EFIT-Simulation. Sie führen zu frequenzabhängigen Streu- und Dämpfungseffekten.

Im Rahmen solcher Modelle, die sowohl in 2D als auch in 3D verfügbar sind, können jedem Partikel oder jedem Korn statistisch schwankende Materialkenngrößen zugeordnet werden. Dadurch kommt es beim Durchgang der Wellen zu einer frequenzabhängigen Streuung und Dämpfung, wobei die hohen Frequenzen stärker mit der Mikrostruktur wechselwirken als die niedrigen. Infolgedessen fällt in unserer Beispielanwendung das Winkel-

spiegelecho mit zunehmenden Impedanzunterschieden nicht nur kleiner sondern auch niederfrequenter aus (Abb. 7). Auch das Signal/Rausch-Verhältnis verschlechtert sich („Mikrostrukturrauschen“).

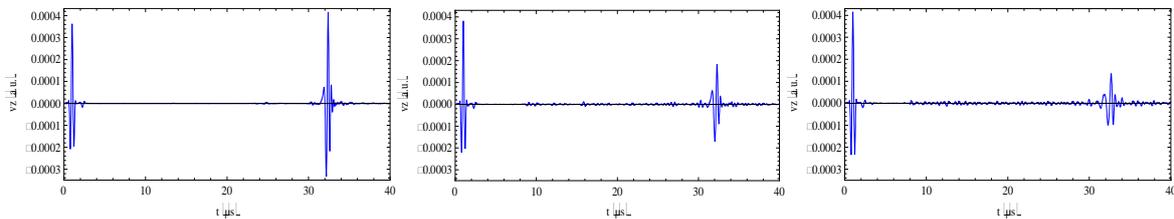


Abbildung 7: Abhängigkeit des Winkelspiegelechos von den Eigenschaften einer partikulären Mikrostruktur: Homogenes Medium (links), $\pm 5\%$ Abweichung (Mitte) sowie $\pm 10\%$ Abweichung (rechts) der akustischen Impedanz der Körner relativ zur Matrix.

2. Reale und künstliche Fehler in Titan-Billets

2.1 Billetprüfung

Titan-Rohmaterial wird bei Triebwerksherstellern wie MTU üblicherweise in Form zylindrischer Billets geprüft (Abb. 8, links). Dabei wird in der Regel von der Mantelfläche, in bestimmten Fällen auch von der Stirnseite gemessen. Dazu kommen üblicherweise Multi-zonen-Prüfköpfe, aber auch speziell entwickelte und auf einen bestimmten Billettdurchmesser angepasste Phased Array-Prüfköpfe mit Fermat-Fläche [6] als aktiver Apertur zum Einsatz (Abb. 8, rechts).

Bei realen Fehlern wird in der Praxis zwischen Typ1- („Hard alpha inclusions“) und Typ2-Fehlern („High Aluminum defects“) sowie HDI's („High density inclusions“) und Hohlräumen (Voids) unterschieden. Diese Fehler liegen in der Regel in zylindrischer oder ellipsoider Form parallel zur Billet-Achse vor.

Im Rahmen von POD-Studien werden diese realen Fehler durch künstliche Quarzglas- (für Typ 2 und Voids) bzw. Wolframcarbid-Einschlüsse (für HDI's) ersetzt. Dabei werden zylindrische und sphärische Geometrien verwendet. Üblich sind Durchmesser von ca. 0.4, 0.8 und 1.2 mm sowie Längen (für Zylinder) von 1.6, 3.2 und 4.8 mm (Abb. 9).

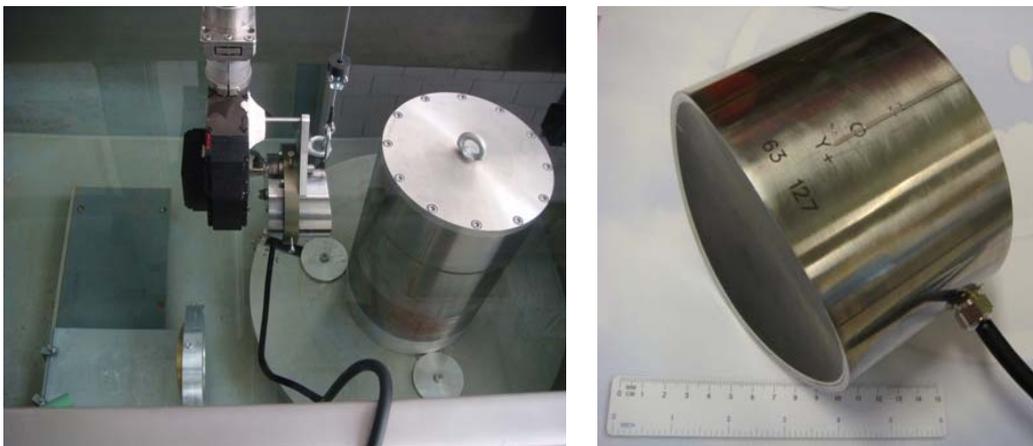


Abbildung 8: Automatisierte Ultraschallprüfung von Titan-Billets (links) mit Hilfe von speziellen Phased Array-Prüfköpfen mit Fermat-Fläche (rechts).



Abbildung 9: Künstliche Hartmetall- und Quarzglas-Einschlüsse zum Einbau in POD-Titantestkörper.

2.2 Herstellung von POD-Testkörpern durch Diffusionsbonden

Die in Abb. 9 dargestellten künstlichen Fehler werden üblicherweise mittels Diffusionsbonden bzw. „Hippen“ (HIP: Heiß-Isostatisches Pressen) in das Originalmaterial (hier Titan) eingebracht. Dazu werden zunächst mehrere zylindrische Scheiben gleichen Durchmessers erzeugt, von deren frei zugänglichen Stirnflächen aus kleine Hohlräume eingearbeitet werden. Darin werden die Einschlüsse eingebracht und die verbleibenden Hohlräume ggf. mit einem Füllmittel versehen. Anschließend erfolgt das Heißpressen der stirnseitigen Kontaktflächen wobei durch Diffusion eine mechanisch und akustisch schlüssige Verbindung der beiden Teile erfolgt. Der Vorgang kann mehrfach mit verschiedenen Stirnflächen wiederholt werden, so dass sich dadurch ganze POD-Testkörper mit zahlreichen Testfehlern unterschiedlicher Größe, Lage und Orientierung herstellen lassen (Abb. 10).

Erste auf diese Art erzeugte Testkörper wurden im Rahmen des PICASSO-Projekts von MTU hergestellt (Abb. 11). Anhand von Röntgen-CT-Aufnahmen und Messungen im Ultraschallmikroskop konnte dabei die korrekte Verbringung und Platzierung von Metall- und Quarzglaseinschlüssen dokumentiert werden (Abb. 12).

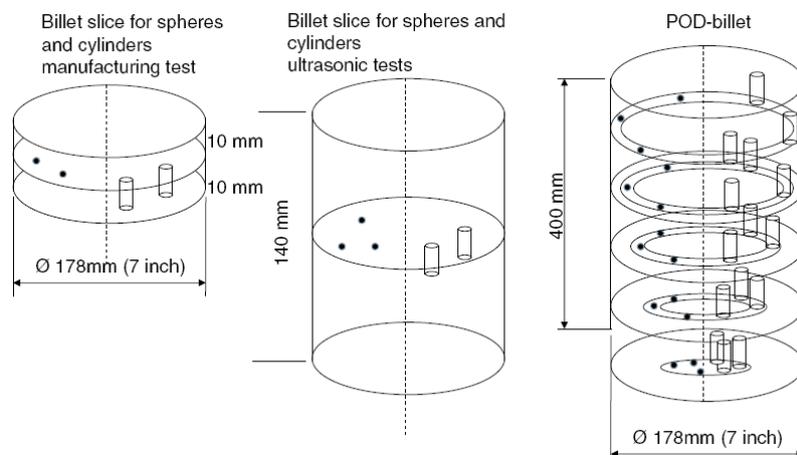


Abbildung 10: Plan zur schrittweisen Realisierung von diffusionsgebondeten Testkörpern im PICASSO-Projekt: Vom Fertigungsmuster (links), über den ersten Ultraschall-Testkörper mit einfach diffusionsgebondeter Grenzfläche (Mitte) bis hin zum POD-Billet mit mehrfach gebondeten Grenzflächen.

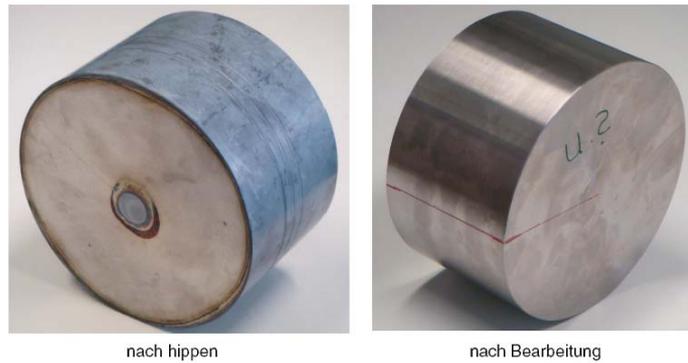


Abbildung 11: Erster Ultraschall-Testkörper mit eingebrachten Fehlstellen nach dem „Hippen“ (links) und nach anschließender Oberflächenbearbeitung (rechts).

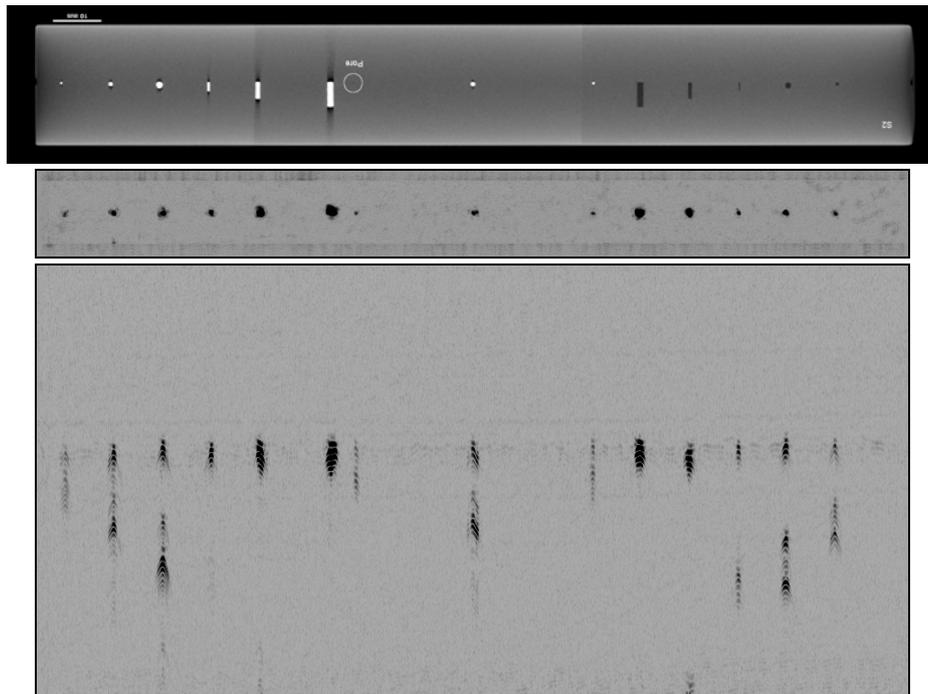


Abbildung 12: Vermessung der eingebrachten Fehlstellen durch Röntgen-CT (oben) sowie US-C- (Mitte) und B-Scan (unten), jeweils bei 20 MHz gemessen (Metalleinschlüsse im Rö-Bild weiß, Quarzglas dunkel).

2.3 EFIT- und CIVA-Simulationen

Im Rahmen der oben geschilderten Billet-Problematik wurden verschiedene Simulationen an einfachen Streugeometrien wie Kugeln und Zylindern durchgeführt. Beide Simulationsprogramme weisen dabei sehr unterschiedliche Charakteristiken auf. Die kommerzielle CIVA-UT-Software [3] verfolgt einen eher pragmatischen semi-analytischen Ansatz und arbeitet mit diversen Streunäherungen, die nicht in allen relevanten Fällen Gültigkeit besitzen. Zudem werden häufig bestimmte wellenphysikalische Effekte wie z.B. Oberflächen- und Grenzflächenwellen vernachlässigt. Dafür können mit CIVA auch bei komplexen dreidimensionalen und hochfrequenten Problemen schnelle Lösungen berechnet werden.

Demgegenüber stellt die derzeit nicht kommerziell erhältliche EFIT-Software (Elastodynamische Finite Integrationstechnik, [5]), eine Eigenentwicklung des IZFP Dresden, einen vollnumerischen Zugang bereit, der mit hoher Genauigkeit, dafür aber auch mit einem deutlich höheren Rechenaufwand verbunden ist. Sämtliche in der Wellengleichung implizit enthaltene Phänomene, wie Oberflächen- und Grenzflächenwellen, Modenkonver-

sionen, Mehrfachstreuung etc. sind automatisch in der bereitgestellten Lösung enthalten. Die notwendige Volumendiskretisierung bedeutet aber gerade bei hochfrequenten 3D-Problemen einen enormen Rechenaufwand, der in vielen Fällen nur auf Spezialrechnern zu bewältigen ist.

Im vorliegenden Anwendungsfall der künstlich eingebrachten Kugel- und Zylinderstreuer handelt es sich jedoch um vergleichsweise einfache Streugeometrien, die mit der achsensymmetrischen Variante der EFIT-Methode berechnet werden können [7]. Diese CEFIT-Technik reduziert den Rechenaufwand auf ein Quasi-2D-Problem und ist somit auch auf üblichen PCs in akzeptabler Zeit zu bewältigen. Die Methode wurde anhand von analytischen Lösungen und zum Teil auch experimentellen Daten validiert und stellt daher eine Referenz für diese Art von Streuproblemen dar.

Im Rahmen des PICASSO-Projekts werden derzeit umfangreiche Vergleichsstudien zwischen CEFIT und CIVA auf der Grundlage des in Abb. 13 (links) dargestellten Aufbaus mit fokussierten Wandlern durchgeführt. Dabei werden verschiedene Arten von Streuern (Quarzglas, Wolframcarbid und Hohlräume in Form von Kugeln, Zylindern und Kreisscheiben) mit unterschiedlichen Größen untersucht. Auch experimentelle Daten werden als Vergleich herangezogen.

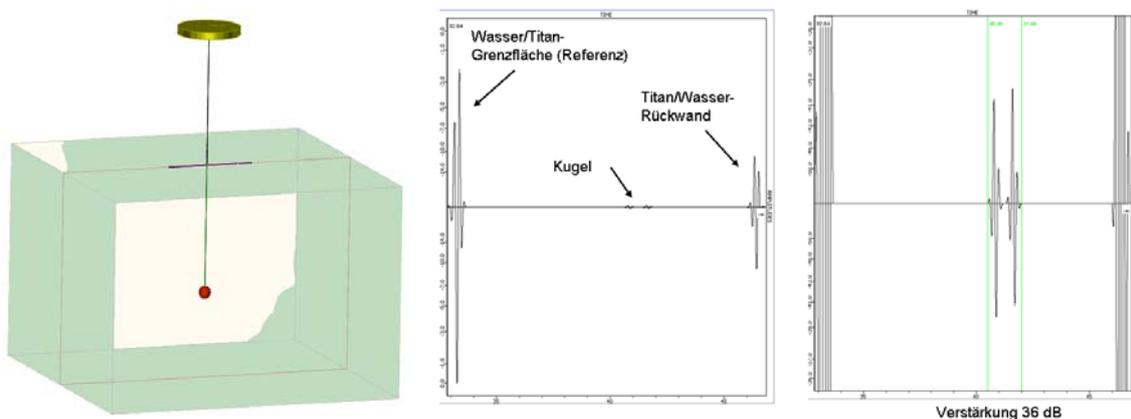


Abbildung 13: Prüfaufbau mit Wasservorlauf und einfachen Streugeometrien für den CIVA/CEFIT-Vergleich (links). Die Bilder in der Mitte und rechts zeigen das CIVA 10-Ergebnis für einen 1.2 mm Quarzglaseinschluss in Titan.

Die bisher vorliegenden Ergebnisse an Kugeleinschlüssen zeigen, dass für Streuer, die kleiner als bzw. vergleichbar mit der Wellenlänge sind, eine akzeptable Übereinstimmung zwischen beiden Simulationsprogrammen erzielt wird. Die Abweichungen beim direkt von der Oberfläche des Streuers reflektierten Echosignals bewegen sich dabei lediglich zwischen 1 und 2 dB. In den CIVA-Rechnungen zeigt sich allerdings, dass bestimmte (hier allerdings eher sekundäre) von der Wellenphysik beeinflusste Phänomene (z.B. Echo von der Streuerunterseite sowie Abschattungseffekte der Rückwand) meist nicht korrekt wiedergegeben werden. Auch können mit der aktuellen CIVA-Version derzeit keine Streuer berücksichtigt werden, die größer als die Wellenlänge sind, was eine nicht unerhebliche Einschränkung bei der Erstellung simulationsgestützter POD-Kurven darstellt. Im PICASSO-Projekt wird daher versucht, diese Lücke zu schließen.

Auch der Vergleich mit experimentellen Daten (bislang nur an Kreisscheiben realisiert) liefert eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit den simulierten Daten, wobei auch hier mit einer Unsicherheit von $\pm 1-2$ dB zu rechnen ist. Die derzeit durchgeführten Studien werden im Projekt systematisch weitergeführt. Ziel ist die Erstellung einer Anwendungsmatrix, die einen schnellen Überblick darüber ermöglicht, in welchen Fällen (Streugeometrie, Material und Größe) die Rechenprogramme brauchbare oder weniger brauchbare Ergebnisse liefern.

3. Lasergravuren in Quarzglas

Die in Abschnitt 2.2 beschriebene Herstellung von POD-Testkörpern aus dem Originalmaterial Titan ist mit erheblichem Aufwand verbunden. Es können zudem nur vergleichsweise einfache Streugeometrien realisiert werden und die Reproduzierbarkeit der Fehler im Hinblick auf die akustische Kopplung zwischen Einschluss und Matrix stellt eine große Herausforderung bei der Herstellung dar.

Eine mögliche Alternative zur Erzeugung künstlicher Fehler in POD-Testkörpern bieten Lasergravuren in Quarzglas. Letzteres weist ähnliche Schallgeschwindigkeiten wie Titan auf, ist aber transparent und erlaubt die Einbringung nahezu beliebiger reproduzierbarer Fehlergravuren, angefangen bei einfachen Kreisscheiben- und Kugelstreuern bis hin zu komplexen unregelmäßigen Rissaufwerken. Abb. 14 zeigt einen Quarzglasblock mit lasergravierten Kreisscheibenstreuern unterschiedlichen Durchmessers.

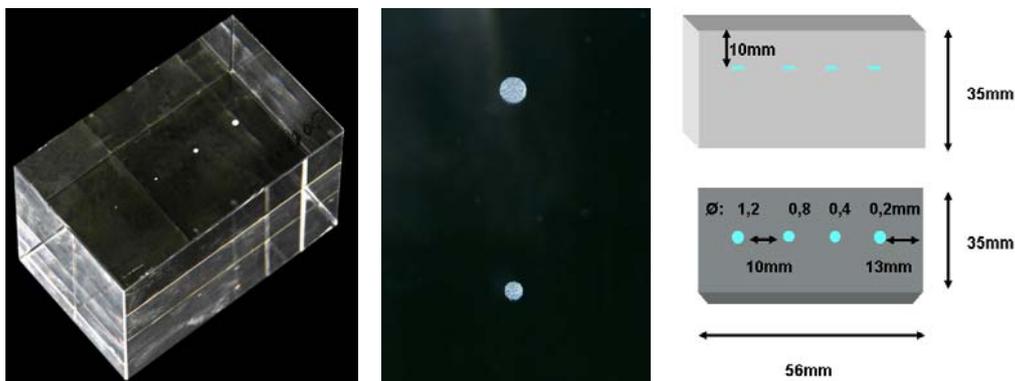


Abbildung 14: Quarzglastestkörper mit lasergravierten Kreisscheibenstreuern im Volumen.

Um die Rückstreucharakteristik der eingebrachten Kreisscheiben zu untersuchen, wurden Ultraschallmessungen durchgeführt und diese mit den Ergebnissen an Flachbodenbohrungen gleichen Durchmessers verglichen (Abb. 15).

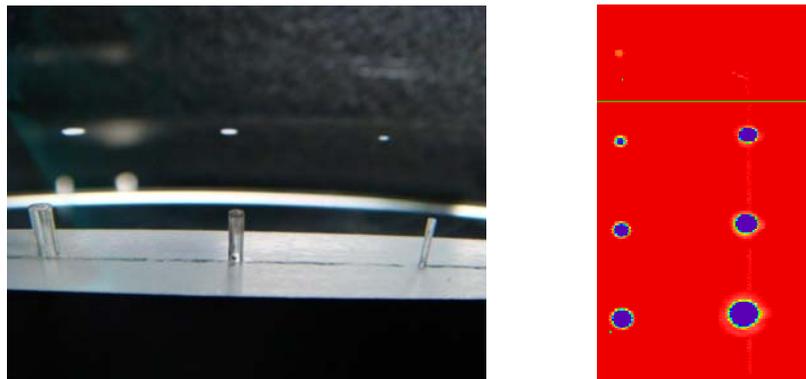


Abbildung 15: Flachbodenbohrungen und lasergravierte Kreisscheiben im Quarzglas (links) und C-Bild einer Ultraschallmessung an beiden Streuertypen (rechts). Die Echos der Kreisscheiben (linke Spalte im C-Bild) fallen deutlich kleiner aus als die der Flachbodenbohrungen (rechte Spalte).

Unter Annahme einer ideal reflektierenden Grenzfläche sind für Kreisscheiben und Flachbodenbohrungen die gleichen Rückstreumplituden zu erwarten. Diese Annahme wurde durch entsprechende CEFIT-Vergleichsrechnungen bestätigt. Im Experiment zeigt sich jedoch, dass die Echos der Lasergravuren um rund 10 dB kleiner ausfallen als die ideal reflektierenden Flachbodenbohrungen. Ein mikroskopischer Blick auf die gravierten Fehler zeigt warum (Abb. 16).

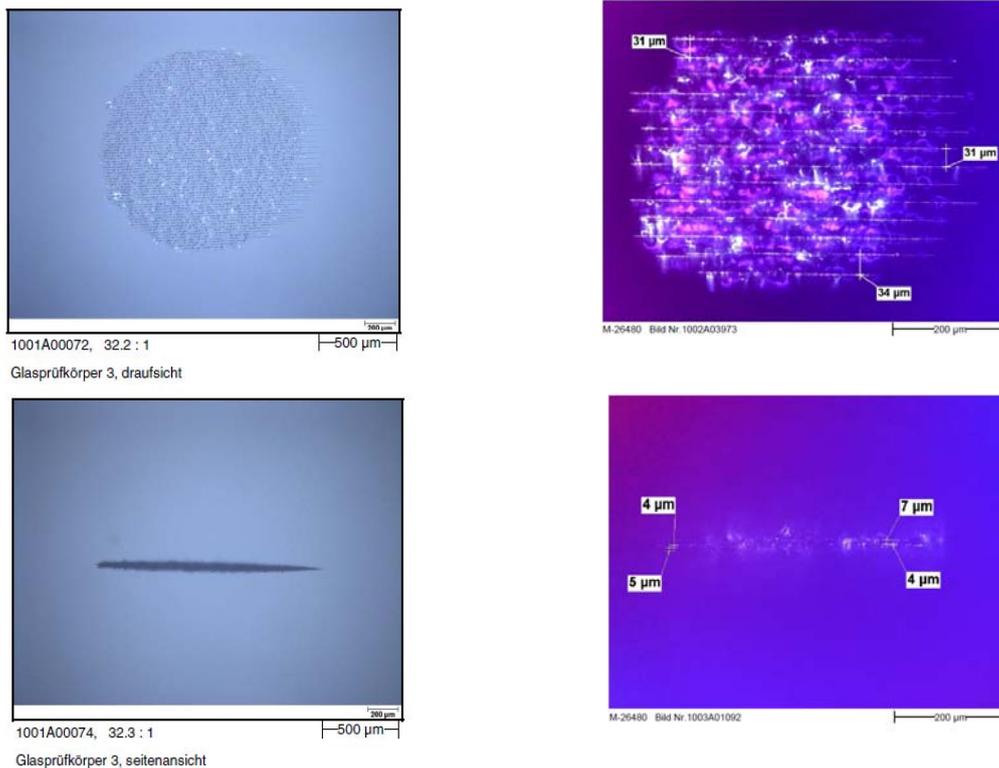


Abbildung 16: Mikroskopische Aufnahmen einer lasergravierten Kreisscheibe. Deutlich ist die Rauigkeit und Teildurchlässigkeit der Grenzfläche zu erkennen.

Wie in Abb. 6 gezeigt, sind die lasergravierten Grenzflächen durch eine sichtbare Rauigkeit (im μm -Bereich) und Teildurchlässigkeit gekennzeichnet. Dies führt zu deutlich reduzierten Ultraschallechos im Vergleich zu gleich großen Flachbodenbohrungen.

Sollen Lasergravuren als Alternative zur Herstellung von POD-Testkörpern verwendet werden, müssen die frequenzabhängigen Rückstreu- und Transmissionseigenschaften der Gravuren bekannt sein. Diese Werte müssen anschließend in die Simulationsprogramme integriert werden, um simulationsgestützte POD-Studien zu ermöglichen. Zu diesem Zweck wurden weitere Quarzblöcke mit großflächigen ebenen Lasergravuren hergestellt und deren Reflektions- und Transmissionseigenschaften in Kontakttechnik vermessen. Bei 10 MHz ergab sich dabei ein 11dB-Abfall des reflektierten Signals gegenüber einer (ideal reflektierenden) Rückwand in gleicher Tiefe sowie ein 2dB-Abfall des transmittierten Signals gegenüber ungraviertem Glas.

Im Anschluss an die Messungen wurde ein erweitertes EFIT-Modell erstellt, in dem die ideal reflektierende durch eine teildurchlässige und raue Grenzfläche ersetzt wurde. Daran wird ein signifikanter Teil des einfallenden Wellenfeldes diffus gestreut (Abb. 17).

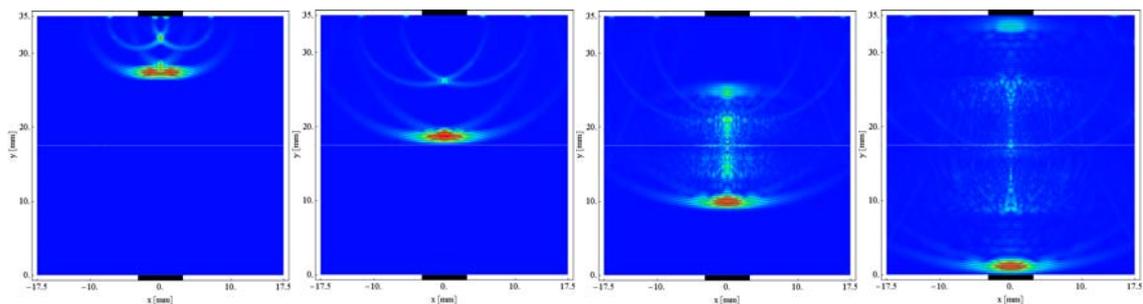


Abbildung 17: EFIT-Simulation der Wechselwirkung einer Ultraschallwelle (10 MHz) mit einer teildurchlässigen und rauen Grenzfläche.

Derzeit laufen systematische Studien, um die optimale Konfiguration der drei freien Parameter der Grenzfläche zu ermitteln. Diese drei Parameter sind die geometrische Durchlässigkeit (in Prozent der Gesamtfläche), der Root Mean Square(RMS)-Wert der rauen Grenzfläche sowie deren Autokorrelationslänge in lateraler Richtung. Es lässt sich bereits jetzt absehen, dass die beste Annäherung an die oben beschriebenen experimentellen Befunde mit einer Durchlässigkeit von ca. 50% und Rauigkeitsparametern zwischen 30 und 60 μm erreicht wird. Letztere liegen in der gleichen Größenordnung wie die tatsächlichen Rauigkeitswerte, die sich aus den mikroskopischen Aufnahmen in Abb. 16 (rechts) ergeben. Bei Verwendung dieser Werte zeigt sich auch in der Simulation der beobachtete Abfall des reflektierten und transmittierten Signals von rund 11 bzw. 2 dB. Ohne Berücksichtigung der Rauigkeit kann diese Übereinstimmung dagegen in keinem Fall erreicht werden.

4. Stand der Simulationen

Die bisherigen Erfahrungen mit CIVA zeigen, dass die Software schnelle und in vielen Fällen auch brauchbare Ergebnisse liefert. In anderen Fällen dagegen erscheinen die Ergebnisse zu ungenau oder werden (wie bei Streuergrößen jenseits der Wellenlänge) gar nicht bereitgestellt. Insbesondere fehlt derzeit eine systematische Übersicht aus der hervorgeht, in welchen Fällen die Software für POD-Zwecke eingesetzt werden kann und in welchen Fällen eher Vorsicht geboten ist.

Die EFIT-Software zeichnet sich dagegen durch eine hohe Flexibilität und Genauigkeit aus, krankt aber meist am exorbitanten Rechenaufwand, insbesondere in 3-D und bei hohen Frequenzen. Die achsensymmetrische Alternative (CEFIT) ist schneller, jedoch nicht überall einsetzbar.

Generell fehlt es derzeit an Alternativen, die schnell und genau (genug) sind, um auch komplexe POD-Probleme mit akzeptablem Rechenaufwand zu lösen. Aus diesem Grund werden im PICASSO-Projekt hybride Ansätze verfolgt, die einen bestmöglichen Kompromiss aus Genauigkeit und Schnelligkeit anstreben. Hauptidee dabei ist die Trennung der Berechnung des einfallenden Wellenfeldes und der eigentlichen Wechselwirkung mit dem Streuer (Abb. 18). Das einfallende Feld kann dabei meist mit halb-analytischen Ansätzen schnell und effizient berechnet werden. Eine Möglichkeit dazu bietet die EFIT-PSS-Methode [8], die eine raumzeitliche Wellenfeldüberlagerung auf Basis einer transienten Punktquellensynthese durchführt. Damit lassen sich im Vergleich zum klassischen EFIT auch hochfrequente dreidimensionale Probleme berechnen. Allerdings ist bei diesem Ansatz die Wechselwirkung mit Streuern explizit ausgeschlossen.

Für die Welle-Streuer-Wechselwirkung werden abhängig von der Geometrie der Fehler zwei verschiedene Ansätze verfolgt. Für einfache Streuergeometrien können *analytische* Lösungen für einfallende ebene oder sphärische Wellen verwendet werden, die allgemein gültig sind, d.h. an keine explizite Streunäherung geknüpft sind. Um sie zu erhalten wird die einfallende Welle durch das mit EFIT-PSS berechnete Feld am Ort des Streuers ersetzt. Anschließend wird die Rückstreuamplitude für diese Wechselwirkung ermittelt (Abb. 18, links). Für komplexere (und realistischere) Fehlergeometrien wird die Welle-Streuer-Wechselwirkung durch die *numerische* 3D-EFIT-Methode berechnet, wobei nur die unmittelbare Umgebung des Streuers diskretisiert wird (Abb. 18, rechts). Das notwendige Feld auf der Oberfläche des diskretisierten Bereichs wird durch die schnelle EFIT-PSS-Methode bereitgestellt. In beiden Fällen (analytisch und numerisch) erfolgt die Berechnung der Rückstreuamplitude unter Verwendung von Reziprozitätsbeziehungen zwischen einfallendem und rückgestreutem Feld sowie ggf. unter Verwendung von Kalibrierungsmessungen. Die Entwicklung und Validierung der hier beschriebenen hybriden Ansätze ist Gegenstand laufender Arbeiten im PICASSO-Projekt.

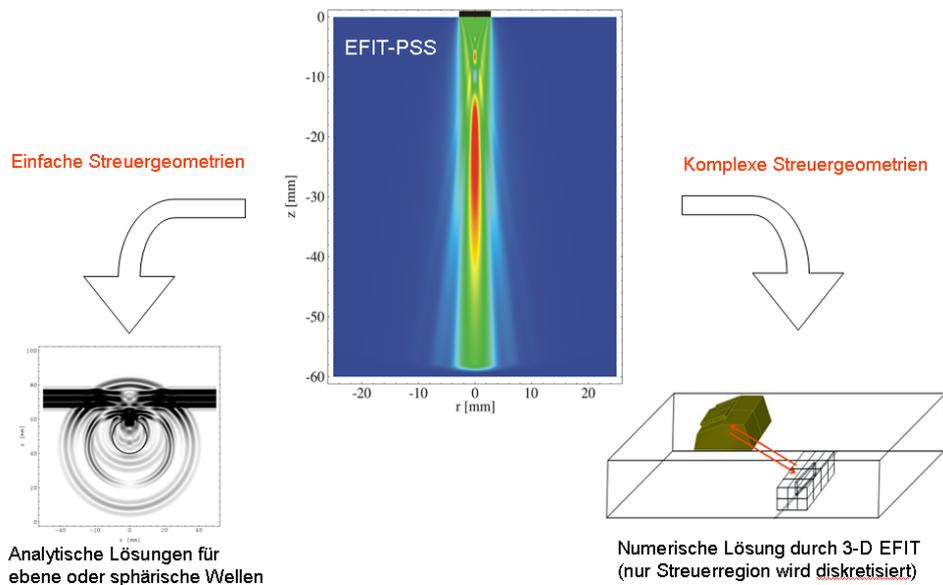


Abbildung 18: Hybride Ansätze zur getrennten Berechnung von einfallendem Wellenfeld und der Welle-Streuer-Wechselwirkung.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Simulationsgestützte POD-Verfahren versuchen einen Teil der aufwendigen POD-Experimente durch numerische Simulationsrechnungen zu ersetzen. Dabei muss besonderes Augenmerk auf die Validierung der Rechenprogramme gelegt werden. Neben der Berechnung der rückgestreuten Signalamplituden müssen interne oder externe Rauschmodelle verwendet werden. Auch diese sind entsprechend zu validieren.

CIVA und EFIT liefern für einfache Streugeometrien, wie sie im Zusammenhang mit der Prüfung von Titan-Billets auftreten, plausible Ergebnisse, die gut mit experimentellen Messungen übereinstimmen. Für aufwändigere Bauteil- und Streugeometrien sind dagegen Weiterentwicklungen notwendig. Dabei werden u.a. hybride Ansätze verfolgt, die einen Kompromiss zwischen Rechengenauigkeit und Rechengeschwindigkeit anstreben.

Lasergravuren in Glastestkörpern stellen eine interessante Möglichkeit dar, die komplexe Herstellung von POD-Testkörpern aus dem Originalmaterial durch ein einfacher und flexibler zu handhabendes Modellsystem zu ersetzen. Dabei müssen allerdings Durchlässigkeit und Rauigkeit der erzeugten Grenzflächen in Experiment und Simulation berücksichtigt werden.

6. Referenzen

- [1] www.picasso-ndt.eu
- [2] www.sabbagh.com/vic3d.html
- [3] www.extende.com
- [4] www.cituk-online.com/acatalog/Section_BAM_ARTIST_Radiographic_Simulator.html
- [5] F. Schubert, "Numerical time-domain modeling of linear and nonlinear ultrasonic wave propagation using finite integration techniques – Theory and applications", *Ultrasonics* 42, 221-229, 2004.
- [6] O. Le Baron, J. Pogue, L. Gallet, "Enhanced resolution transducers for thick piece ultrasonic inspection : The FERMAT transducer concept", In: Proc. of 8th ECNDT Barcelona, Spanien, 2002.
- [7] F. Schubert, A. Peiffer, B. Köhler, T. Sanderson, "The elastodynamic finite integration technique for waves in cylindrical geometries", *J. Acoust. Soc. Am.* 104 (5), 2604-2614, 1998.
- [8] F. Schubert, B. Lamek, "Fast Numerical Calculations of 3-D Phased Array Wave Fields Based on Transient Point Source Synthesis", In : Proc. of ECNDT 2010, Moskau.