

Ein schneller hybrider EFIT-Solver zur Berechnung simulationsgestützter POD-Kurven für die Ultraschallprüfung

Frank SCHUBERT^{*}, Raphaële RAILLON^{**}, Vincent DORVAL^{**},
Catherine GILLES-PASCAUD^{**}, Jean-Yves CHATELLIER^{***},
Hans-Uwe BARON^{****}, Johanna MENGES^{****}

^{*} Fraunhofer IZFP Dresden, Maria-Reiche-Str. 2, 01109 Dresden,
frank.schubert@izfp-d.fraunhofer.de,

^{**} CEA-LIST, Centre de Saclay, Bât. 611, PC 120, 91191 Gif-sur-Yvette, France

^{***} Snecma (Safran-Group), Villaroche site, Rond-point René Ravaud, Réau,
77550 Moissy-Cramayel, France

^{****} MTU Aero Engines GmbH, Dachauer Str. 665, 80995 München,
www.picasso-ndt.eu

Kurzfassung. Die Elastodynamische Finite Integrationstechnik (EFIT) stellt ein leistungsfähiges und vielseitiges numerisches Verfahren zur Simulation der Ultraschallausbreitung und -streuung dar. Dabei werden alle in der Wellengleichung implizit enthaltenen wellenphysikalischen Phänomene wie Beugung, Modenumwandlung, Mehrfachstreuung etc. automatisch berücksichtigt. Aufgrund des hohen Rechenaufwandes bei hochfrequenten 3D-Problemen war die Anwendbarkeit von EFIT für POD- oder Optimierungsprobleme, bei denen eine Vielzahl von Einzelrechnungen mit unterschiedlichen Modellparametern durchgeführt werden muss, bislang stark eingeschränkt. Im Rahmen des von der EU geförderten Projekts PICASSO (Improved reliability inspection of aeronautic structures by simulation-supported POD) wurde ein neuartiger hybrider EFIT-Solver, EFIT-H, entwickelt, dessen Rechenzeitbedarf gegenüber dem vollnumerischen 3D-EFIT um zwei bis drei Größenordnungen niedriger liegt. Parallel dazu wurde der erforderliche Hauptspeicherbedarf ebenfalls drastisch reduziert, so dass nun auch realistische 3D-Probleme auf handelsüblichen PCs durchgeführt werden können. In der Arbeit wird zunächst die Funktionsweise des neuen Algorithmus vorgestellt, bei dem nur noch die direkte Wechselwirkung mit dem Fehler bei Bedarf vollnumerisch gelöst wird, während die Berechnung des Prüfkopfwellenfeldes sowie der Wellenausbreitung zwischen Wandler und Fehler mit schnelleren halbanalytischen Methoden erfolgt. Nach der Validierung der Software werden erste zwei Tauchtechnikanwendungen aus der Luftfahrtindustrie vorgestellt.

Einführung

Die Erzeugung von POD-Kurven (POD: Probability of Detection, Fehlerauffindwahrscheinlichkeit) für zerstörungsfreie Prüfverfahren in sicherheitsrelevanten Branchen, wie z.B. der Luftfahrtindustrie, gestaltet sich in der Praxis bislang äußerst aufwendig und kostenintensiv, da eine große Anzahl von Testkörpern mit verschiedenen Fehlern hergestellt und von unterschiedlichen Prüfern untersucht werden muss. Ein zusätzliches Problem liegt in der Erzeugung realer Fehlerbilder, was nur eingeschränkt und mit zum Teil erheblichem Aufwand möglich ist. In vielen Fällen begnügt man sich daher mit einfachen Modellfehlern wie Nuten oder kugelförmigen Einschlüssen.



Ziel des im 7. Forschungsrahmenprogramms der EU geförderten Projekts PICASSO (Improved reliability inspection of aeronautic structures by simulation-supported POD, [1]) ist es daher, einen erheblichen Teil der POD-Messungen durch Simulationsrechnungen zu ersetzen, vorhandene experimentelle Daten zu ergänzen und somit genauere, schnellere und preisgünstigere POD-Studien zu ermöglichen. Im Projekt werden dazu POD-Kurven für die Wirbelstrom-, Ultraschall- und Röntgen-Prüfung metallischer Luftfahrtwerkstoffe ermittelt. Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Ultraschallprüfung.

1. Prüfaufgabe

Die zugrunde liegende Prüfaufgabe bestand darin, Fehler in zylindrischen Billets aus unterschiedlichen Titanlegierungen zu finden und daraus POD-Kurven zu erstellen. Die Prüfung erfolgte als automatisierte Multizonenprüfung in Tauchtechnik entweder von der ebenen Stirnseite oder der gekrümmten Mantelfläche (Abb. 1). Als Prüffrequenzen wurden Werte zwischen 5 und 15 MHz verwendet. Typische Fokusslängen in Wasser lagen zwischen 150 und 400 mm.

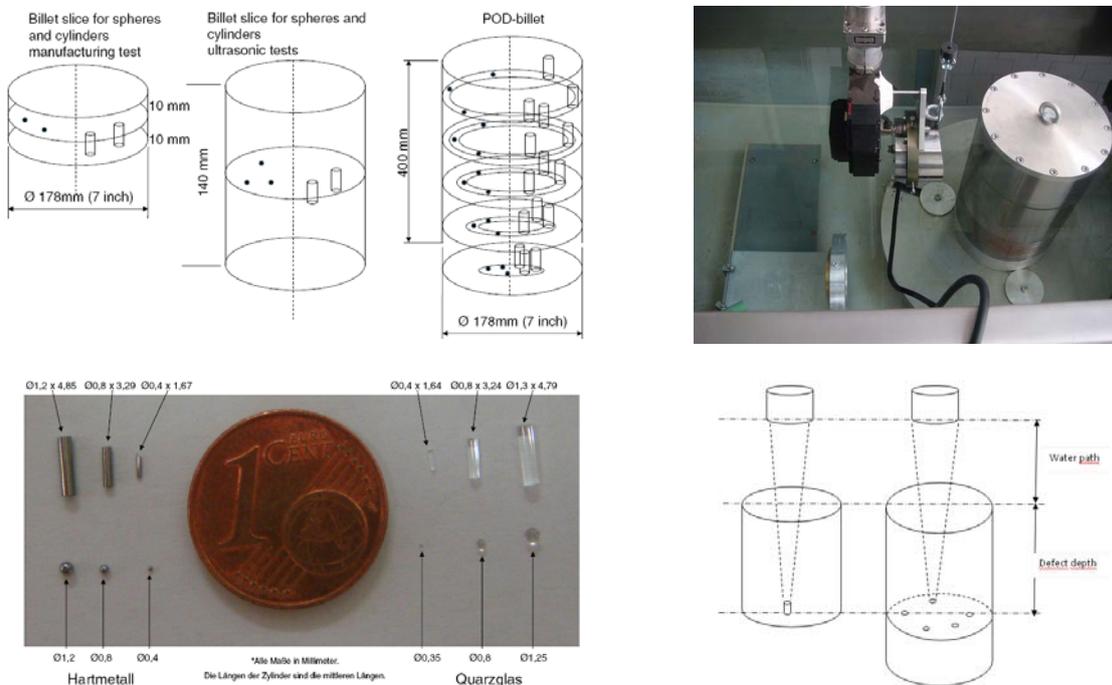


Abbildung 1: Automatisierte Multizonen-Tauchtechnikprüfung von zylindrischen Titanbillets mit künstlich eingebrachten Fehlstellen.

Um im Rahmen von POD-Studien möglichst viele Fehler aus unterschiedlichem Material und verschiedener Größe zu erzeugen, wurden kugelförmige und zylindrische Einschlüsse mittels Diffusionsbonden in verschiedene Tiefen der Prüfobjekte eingebracht (25-140 mm). Der Durchmesser der Einschlüsse schwankte dabei zwischen 0.4 und 2 mm.

2. Ultraschallsimulationen

Im PICASSO-Projekt kam neben dem kommerziellen UT-Modul von CIVA [2] auch eine IZFP-eigene Implementation der Elastodynamischen Finiten Integrationstechnik (EFIT, [3-4]) zur Anwendung.

Bei der EFIT-Methode handelt es sich um ein explizites numerisches Zeitbereichsverfahren zur Lösung der Wellengleichung für unterschiedliche Materialmodelle. Alle wellenphysikalischen Phänomene wie z.B. Beugung, Brechung, Modenwandlung, Mehrfachstreuung, geführte Wellen etc. sind somit in der Lösung automatisch enthalten, ohne dass weitergehende Näherungen notwendig sind. Da EFIT den Raum (3D) und zusätzlich die Zeit diskretisiert, ergibt sich effektiv eine „4D-Diskretisierung“, die insbesondere bei hochfrequenten und großen Modellen zu einem exorbitant hohen Rechenaufwand und Speicherbedarf führt. POD-Studien, für die hunderte oder tausende von Einzelrechnungen benötigt werden, sind mit diesem Ansatz praktisch nicht durchführbar.

Im Gegensatz zu EFIT handelt es sich bei CIVA-UT um einen halbanalytischen, erweiterten Ray Tracer, der auf der sogenannten Pencil-Methode beruht [5]. Er zeichnet sich durch kurze Rechenzeiten auch bei 3D-Problemen aus, ist aber auf einfache Streumodelle wie z.B. die Born'sche Näherung beschränkt. Weiterführende Wellenphysik, die insbesondere dann relevant wird, wenn die typischen Abmessungen der Streuer in die Größenordnung der Wellenlänge kommen, muss dem Streuprozess explizit aufgeprägt werden und ist dann auch nur für eine gewisse Klasse von Streuern gültig. So wurde im Rahmen von PICASSO z.B. die bislang in CIVA 10 eingesetzte modifizierte Born'sche Näherung [6] durch die analytische Streutheorie von Ying und Truell [7] ergänzt. Diese beinhaltet die gesamte Wellenphysik, ist aber nur für kugelförmige Einschlüsse, die von ebenen Wellen beaufschlagt werden, anwendbar.

Der Vergleich der beiden Simulationstools zeigt, dass beide jeweils bestimmte Stärken und Schwächen hinsichtlich Genauigkeit und Rechengeschwindigkeit aufweisen, die für die Durchführung von simulationsgestützten POD-Studien relevant sind. Eines der Hauptziele bei der Weiterentwicklung des EFIT-Codes bestand deshalb darin, die Rechengeschwindigkeit deutlich zu erhöhen, dabei aber möglichst viele der Vorteile des ursprünglichen EFIT-Codes, insbesondere sein breiter Anwendungsbereich und die wellenphysikalische Lösung, beizubehalten. Dies konnte durch die Entwicklung eines hybriden EFIT-Solvers (EFIT-H) erreicht werden, dessen Prinzip im folgenden Abschnitt erläutert wird.

3. Grundlagen des hybriden EFIT-Solvers (EFIT-H)

Die Hauptidee von EFIT-H besteht darin, die numerische EFIT-Methode mit einer transienten Punktquellensynthese sowie einem erweiterten Ray-Tracer zu verknüpfen. Dabei wird lediglich das anregende sowie das rückgestreute Wellenfeld strikt wellenphysikalisch gerechnet, die Wellenausbreitung zwischen Prüfkopf und Streuer inklusive des Durchgangs durch die Wasser-Festkörper-Grenzfläche dagegen mit einfacheren halb-analytischen Methoden behandelt (Abb. 2).

3.1 Prüfkopf-Wellenfeld

Das transiente, vom Ultraschallwandler angeregte Wellenfeld im Wasser lässt sich sehr effektiv und mit moderatem Rechenaufwand wellenphysikalisch bestimmen. Für achsensymmetrische Aperturen kann die CEFIT-Methode [8], eine achsensymmetrische Variante von EFIT in Zylinderkoordinaten, eingesetzt werden. Für nicht-achsensymmetrische Aperturen kann stattdessen auf die EFIT-PSS-Methode [9] zurückgegriffen werden, welche die numerische Berechnung einer einzelnen Punktquelle mit dem Prinzip einer transienten Punktquellensynthese (PSS: Point Source Synthesis) verknüpft. Dieses Verfahren erlaubt auch die Berücksichtigung realer Prüfkopfaperturen, die vorher z.B. mittels Laservibrometrie vermessen wurden. Als Alternative zu den oben beschriebenen teilnumerischen Ansätzen bieten sich auch halbanalytische Verfahren auf der Basis Green'scher Funktionen an.

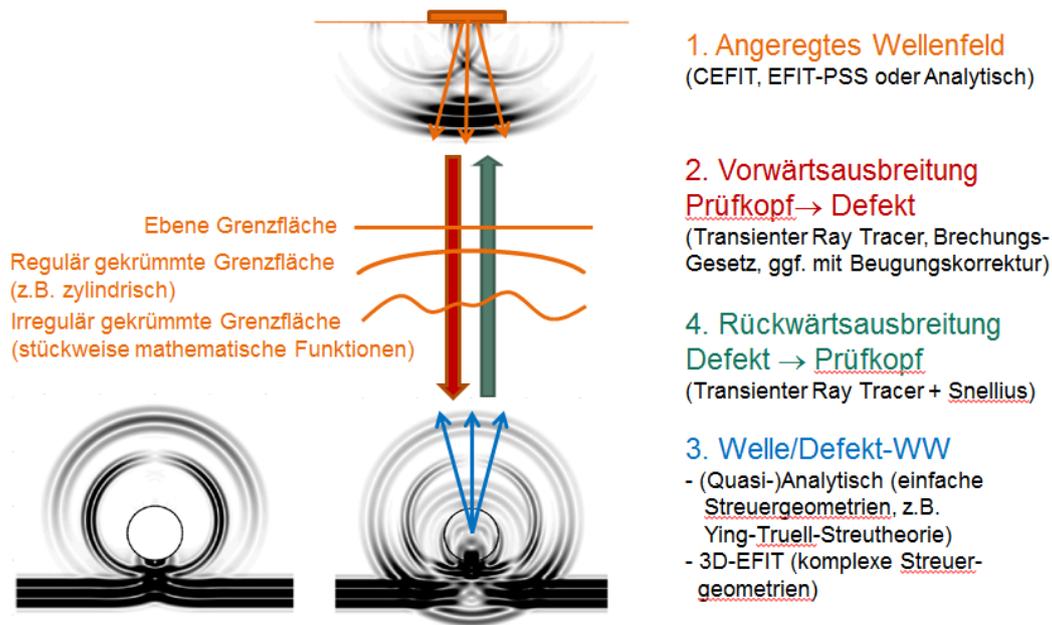


Abbildung 2: Grundlagen des hybriden EFIT-Solvers (EFIT-H).

Das für einen bestimmten Prüfkopf ermittelte Wellenfeld muss immer nur einmal berechnet werden. Es wird anschließend in einer Datenbank gespeichert und steht somit für alle nachfolgenden Simulationen, die den gleichen Prüfkopf verwenden, ohne zusätzlichen Rechenaufwand zur Verfügung.

3.2 Vorwärtsausbreitung vom Prüfkopf zum Defekt

Die Ausbreitung der vom Prüfkopf abgestrahlten Wellen zum Streuer wird mit Hilfe eines transienten Ray Tracers berechnet. Dazu werden zunächst aus der in Abschnitt 3.1 berechneten Wellenfront die Poynting-Vektoren extrahiert, die die Startvektoren für das Ray Tracing bilden. Für jeden Strahl wird dann das in diese Richtung abgestrahlte Zeitsignal bzw. die darin codierte Frequenzinformation ermittelt und bis zum Streuer weiterpropagiert. Dabei wird beim Übergang vom Wasser zum Festkörper das Snellius'sche Brechungsgesetz verwendet, ggf. ergänzt durch Beugungskorrekturen für endliche Schallbündeldurchmesser.

Die resultierende Amplitude am Ort des Streuers ergibt sich dann aus vier verschiedenen Anteilen, der geometrischen Schwächung (ermittelt aus der lokalen Aufweitung benachbarter Strahlen), die Teilreflexion an der Wasser-Festkörper-Grenzfläche, die Phase der Wellen (ermittelt im Frequenzbereich) sowie die i.A. frequenzabhängige Schallschwächung im Wasser und im Festkörper, die entweder analytisch oder alternativ durch empirische Zusammenhänge ausgedrückt wird. In der augenblicklichen Version von EFIT-H können sowohl ebene, als auch zylindrisch gekrümmte Wasser-Festkörper-Grenzflächen realisiert werden. Das beschriebene Ray Tracing-Prinzip lässt sich aber ohne Probleme auch auf irregulär gekrümmte Grenzflächen erweitern, sofern sich diese durch stückweise stetige, mathematische Funktionen beschreiben lassen.

3.3 Wechselwirkung mit dem Fehler

Für die Wechselwirkung der einfallenden Welle mit dem Fehler ist es notwendig, die gesamte Wellenphysik des Streuvorgangs zu erfassen. Dies kann auf verschiedene Weise passieren. Für reguläre Streuergeometrien und auf der Basis vereinfachender Annahmen über das einfallende Wellenfeld können in manchen Fällen analytische Streutheorien verwendet

werden. So lässt sich zum Beispiel die Streuung einer ebenen Welle an einem kugelförmigen Einschluss mit Hilfe der Ying-Truell-Theorie exakt beschreiben [7].

Steht keine Streutheorie zur Verfügung, wie etwa bei komplexeren oder irregulären Streuern, kann die Wechselwirkung numerisch mittels EFIT berechnet werden, wobei nur die unmittelbare Umgebung des Streuers diskretisiert wird. In Abb. 2 wurde die Streuung einer ebenen Welle mit einem kugelförmigen elastischen Einschluss bzw. einem kugelförmigen Hohlraum mit Hilfe der achsensymmetrischen EFIT-Methode (CEFIT, [8]) berechnet. Bei nicht-achsensymmetrischen Problemen erfolgt die Berechnung mittels 3D-EFIT.

Die im vorliegenden Fall und auch im restlichen Text verwendete Ebene Wellen-Näherung hat den Vorteil, dass der Streuprozess als Funktion von ka , d.h. dem Produkt aus Wellenzahl k und dem Streueradius a beschrieben werden kann. Somit muss in Analogie zum Prüfkopfwellenfeld auch das Streufeld nur ein einziges Mal für einen bestimmten ka -Bereich bestimmt werden. Es kann dann ebenfalls in einer Datenbank abgelegt und bei Bedarf für alle Simulationen mit gleichem Streuertyp verwendet werden, ohne dass explizit neu gerechnet werden muss. Dies reduziert den Rechenaufwand bei POD-Studien dramatisch. Im allgemeinen Fall lassen sich mit 3D-EFIT auch beliebig einfallende Wellenfelder berücksichtigen. In diesem Fall muss aber für jede Einzelrechnung der Streuvorgang am Fehler explizit neu simuliert werden, was den Rechenaufwand deutlich ansteigen lässt.

3.4 Rückwärtsausbreitung vom Defekt zum Prüfkopf

Analog zum Vorgehen beim Prüfkopfwellenfeld werden aus der vom Fehler hervorgerufenen Streuwelle die Poynting-Vektoren und somit die Startvektoren für den anschließenden Ray Tracer ermittelt. Erneut werden die in die verschiedenen Raumrichtungen abgestrahlten Zeitsignale berechnet und durch die Festkörper-Wasser-Grenzfläche bis zur Prüfkopfpapertur propagiert. Dabei kommt erneut das Brechungsgesetz mit Beugungskorrekturen für endlich ausgedehnte Schallbündel zur Anwendung. Am Ort des Prüfkopfes kann schließlich das detektierte Rückstreusignal als finales Ergebnis der Simulation extrahiert werden. Die maximale Amplitude dieses Signals als Funktion der Streuergröße liefert die Grundlage für den hier verfolgten POD-Ansatz (sog. \hat{a} vs. a -Kurven, [10]).

4. Anwendungsbeispiel 1: Al_2O_3 -Einschlüsse in TA6V-Zylindern

Das erste Anwendungsbeispiel beschreibt die Multizonen-Prüfung von TA6V-Zylindern (Ti-6Al-4V), in die durch Diffusionsbonden kugelförmige Al_2O_3 -Einschlüsse eingebracht wurden. Die Prüfung erfolgte über die ebene Stirnseite der Zylinder (vgl. Abb. 1, unten rechts). Die Mittenfrequenz des Sendesignals betrug 10 MHz. Die akustisch relevanten Materialparameter waren $c_p = 10846$ m/s, $c_s = 6350$ m/s und $\rho = 3974$ kg/m³ für den Einschluss und $c_p = 6228$ m/s, $c_s = 3146$ m/s und $\rho = 4400$ kg/m³ für das Matrixmedium. Für das EFIT-H-Modell wurde eine vollständige akustische Kopplung zwischen beiden Phasen angenommen. Im Titan-Basiswerkstoff wurde zusätzlich eine Dämpfung α von 0.054 dB/mm für die P-Welle und 0.062 dB/mm für die S-Welle angesetzt, empirisch jeweils ermittelt bei einer Frequenz von 10 MHz. Als Frequenzabhängigkeit wurde eine quadratische Funktion angenommen, d.h. $\alpha \sim f^2$. Es kamen verschiedene Prüfköpfe mit unterschiedlichen Fokuslängen und Wasservorlaufstrecken zum Einsatz.

Abb. 3 zeigt die Rückstreuamplitude des Al_2O_3 -Einschlusses in der TA6V-Matrix als Funktion der Defektgröße. Die blaue Kurve zeigt das monochromatische Ergebnis der Ying-Truell-Streutheorie für $f = 10$ MHz. Es zeigt eine Reihe auffälliger Resonanzen. Die rote Kurve dagegen zeigt die Breitbandlösung unter Annahme einer Signalbandbreite von ca. 70%. Man erkennt deutlich, dass sich bis auf die erste Hauptresonanz bei $d = 0.46$ mm

alle anderen Resonanzen herausmitteln. Es verbleibt lediglich der monotone Anstieg für größere Durchmesser.

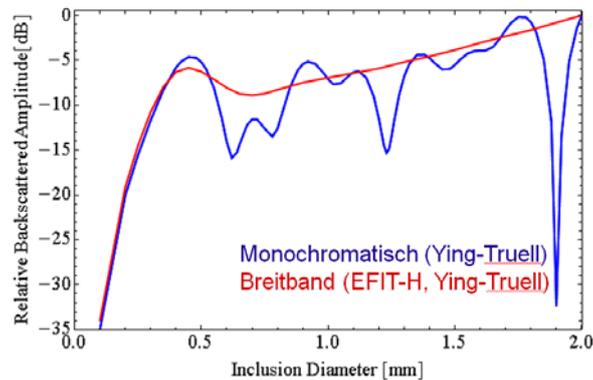


Abbildung 3: Rückstreumplitude eines kugelförmigen Al_2O_3 -Einschlusses in einer TA6V-Matrix als Funktion des Einschlussdurchmessers. Die Kurven sind auf die Amplitude eines 2 mm-Streuers normiert (0 dB).

Die Streuerwechselwirkung für die Breitbandlösung in Abb. 3 wurde im vorliegenden Fall mit dem achsensymmetrischen CEFIT-Code berechnet (rote Kurve). Sie ist bis auf vernachlässigbare numerische Effekte praktisch identisch mit der Ying-Truell-Theorie, wenn man diese auf alle im Sendesignal enthaltenen Frequenzen anwendet und daraus anschließend die Breitbandlösung erzeugt.

Abb. 4 zeigt für einen ausgesuchten Fall (Streuertiefe = 25.4 mm, Fokusslänge = 152.4 mm) den Vergleich der EFIT-H-Ergebnisse mit denen von CIVA-UT sowie experimentellen Messungen. Neben den Resultaten der augenblicklichen CIVA-Version 10.1, die noch auf der modifizierten Born'schen Näherung basiert, sind auch Ergebnisse einer erweiterten SOV-Lösung (Separation of Variables) aufgeführt, die in eine der kommenden CIVA-Versionen einfließen soll und die im Wesentlichen auf der Ying-Truell-Streutheorie beruht. Wie man in Abb. 4 erkennt, ist letztere eher im Einklang mit den Messungen als die Born'sche Lösung.

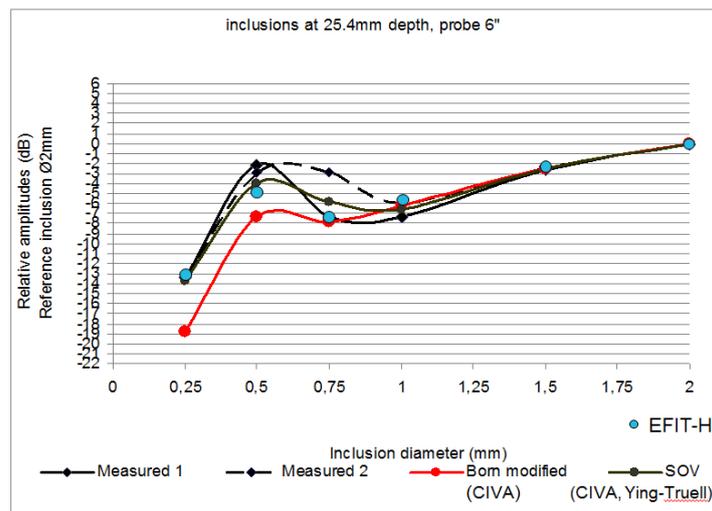


Abbildung 4: Vergleich der EFIT-H-Ergebnisse mit denen von CIVA-UT und experimentellen Ergebnissen.

Die EFIT-H-Ergebnisse stimmen qualitativ und auch quantitativ gut mit den SOV-Lösungen und den Messungen überein. Die Abweichungen zwischen beiden Simulationswerkzeugen sind dabei durchweg kleiner als die Unterschiede zwischen den beiden Messkurven. Behält man die in Abb. 4 verwendete Normierung auf den 2 mm-Streuer bei, erhält man auch für die anderen Prüfzonen vergleichbare Ergebnisse, die sich nur geringfügig

(maximal 2-3 dB) voneinander unterscheiden. In Abb. 5 wird die über alle Prüfzonen gemittelte EFIT-H-Kurve mit den kompletten Messkurven verglichen.

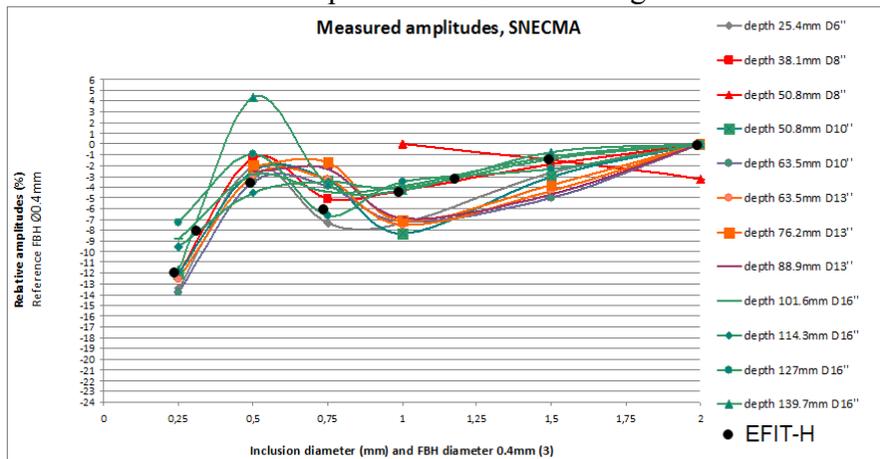


Abbildung 5: Vergleich der über alle Prüfzonen gemittelten EFIT-H-Ergebnisse mit den experimentellen Daten.

Man erkennt, dass die EFIT-H-Ergebnisse sehr gut mit zumindest einer Hälfte der Messkurven verträglich sind. Die andere Hälfte dagegen zeigt signifikante Abweichungen nach unten ($d > 1.0$ mm) und nach oben ($d \approx 0.75$ mm). Hierbei ist allerdings keine Systematik hinsichtlich größerer oder kleinerer Prüftiefen zu erkennen, so dass man von individuellen, im Modell nicht berücksichtigten Eigenheiten der jeweils verwendeten Prüfköpfe ausgehen muss. Der generelle Verlauf der Kurve sowie die Resonanz bei $d \approx 0.5$ mm wird aber in jedem Fall korrekt wiedergegeben. Somit kann insgesamt von einer erfolgreichen Validierung der Simulationen für den hier vorliegenden Anwendungsfall ausgegangen werden.

5. Anwendungsbeispiel 2: WC-Einschlüsse in Ti 6246-Billets

Im zweiten Anwendungsbeispiel wurden Wolframkarbid(WC)-Einschlüsse in zylindrischen Billets aus Ti6246 betrachtet. Auch diese Einschlüsse wurden mittels Diffusionsbonden in verschiedene Zonen des Billets eingebracht. Im Gegensatz zu Anwendungsbeispiel 1 erfolgte die Immersionsprüfung hier von der gekrümmten Mantelfläche (Abb. 1, oben rechts). Die Prüffrequenz betrug auch hier 10 MHz. Die für die Simulationen notwendigen Materialparameter waren $c_p = 6655$ m/s, $c_s = 3984$ m/s und $\rho = 15630$ kg/m³ für die WC-Einschlüsse und $c_p = 6122$ m/s, $c_s = 3180$ m/s und $\rho = 4500$ kg/m³ für das Matrixmedium. Erneut wurde von einer idealen akustischen Kopplung zwischen Streuer und Matrix ausgegangen. Die Dämpfungskonstanten waren aufgrund der Grobkörnigkeit des POD-Billets ungefähr doppelt so groß wie in Beispiel 1.

Abb. 6 zeigt die berechneten Rückstreuamplituden für einen kugelförmigen WC-Einschluss in einer Ti6246-Matrix. Zum Vergleich sind auch die Kurven für Quarzglas-Einschlüsse und für Poren sowie für das Materialsystem aus Beispiel 1 dargestellt.

Anhand des linken Bildes in Abb. 6 erkennt man deutlich, dass sich die grundsätzlichen Kurvenverläufe lediglich im Bereich der Resonanz bei $d \approx 0.46$ mm voneinander unterscheiden. Al₂O₃ in TA6V zeigt dort die stärkste Überhöhung. WC und Quarz in Ti6246 weisen kleinere Minima auf, während die Pore keine Resonanz zeigt.

Ein Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen in Abb. 7 zeigt, dass die Übereinstimmung in diesem Fall weder qualitativ noch quantitativ zufriedenstellend ist. Zunächst einmal fällt auf, dass die Streuung der Messwerte hier deutlich größer ausfällt als in

Anwendungsbeispiel 1 (vgl. Abb. 5). Dies ist im Wesentlichen auf technologische Schwierigkeiten bei der Herstellung des Billets zurückzuführen, die zu einem sehr grobkörnigen Material und damit verbunden zu einer starken Ultraschallstreuung führten.

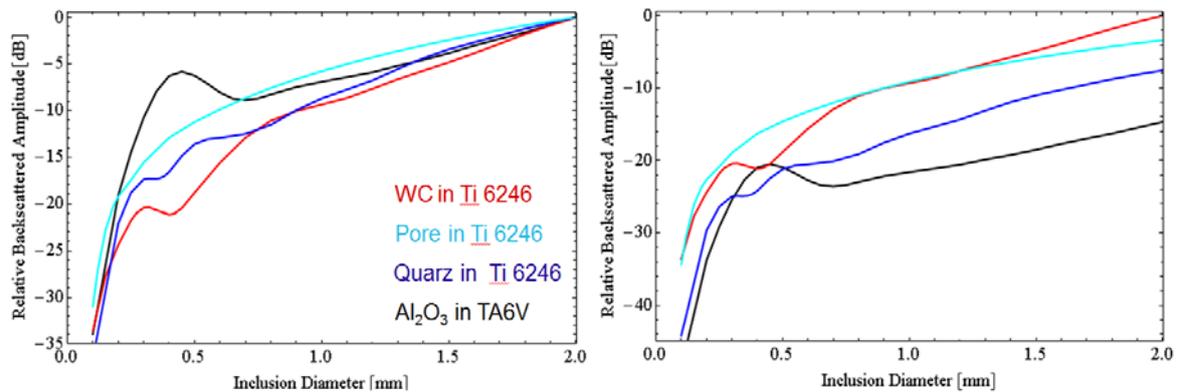


Abbildung 6: Rückstreuamplituden verschiedener kugelförmiger Einschlüsse in einer Ti6246-Matrix als Funktion des Einschlussdurchmessers. Als Vergleich ist auch die Kurve aus Anwendungsbeispiel 1 dargestellt. Im linken Bild sind alle Kurven auf die Amplitude des jeweiligen 2 mm-Streuers normiert (0 dB). Im rechten Bild erfolgte die Normierung auf den stärksten 2 mm-Streuer (hier WC in Ti6246).

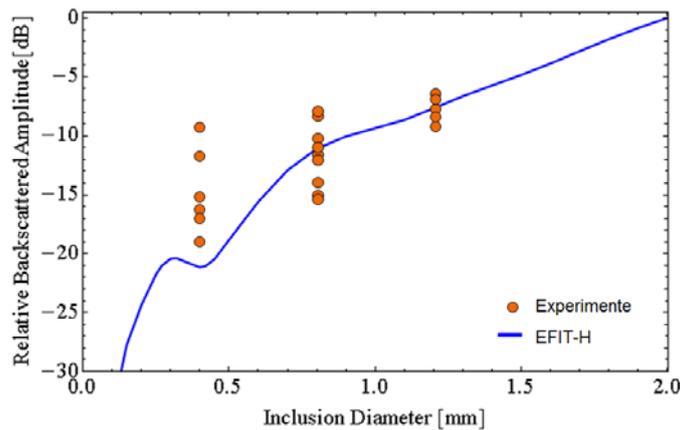


Abbildung 7: Vergleich der berechneten Rückstreuamplituden von WC in Ti6246 mit experimentellen Messungen. Im vorliegenden Fall ist der Mittelwert der Messwerte für $d = 1.2$ mm auf den zugehörigen EFIT-H-Wert kalibriert.

Während die Rückstreuamplituden für die mittlere Streuergröße ($d = 0.8$ mm) noch mit den simulierten Daten verträglich sind, führen insbesondere die kleinen Streuer ($d = 0.4$ mm) in den Messungen zu deutlich stärkeren Rückstreuamplituden, als dies von diesem Materialsystem erwartet wird. Der Grund für diese Diskrepanz könnte zum einen darin liegen, dass sich im Rahmen des Diffusionsbonds im Interface zwischen Streuer und Matrix erhöhte Porositäten oder sogar Delaminationen bilden, die die Rückstreuung verstärken. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass solche Probleme insbesondere für sehr kleine Streuer auftreten können.

Eine weitere Erklärungsmöglichkeit liegt in der Tatsache, dass sich um einen Wolfram-Einschluss in einer α - β -Titanlegierung durch Diffusion eine ausgeprägte β -Phase ausbilden kann, die mit Wolfram angereichert ist [11]. Diese Zone weist andere elastische Eigenschaften auf und verändert daher das Streuverhalten.

In beiden Fällen ist zu erwarten, dass eine Modellerweiterung auf ein Dreiphasensystem (Matrix, WC-Einschluss und Übergangszone) zu einer Annäherung zwischen Simulations- und Messergebnissen führen kann. Allerdings ist zur genauen Auslegung des Mo-

dells eine mikroskopische Analyse der Übergangszone notwendig, die z.B. anhand von Schlifffbildern erfolgen kann.

6. Erzeugung simulationsgestützter POD-Kurven

Zur Erzeugung simulationsgestützter POD-Kurven ist es notwendig, einige der frei wählbaren Modellparameter statistisch variieren zu lassen und die Rechnung jeweils mit dem veränderten Parametersatz zu wiederholen. Dadurch ergibt sich statt einer einzelnen Kurve eine Schar von Punkten, die die Grundlage jeder POD-Analyse darstellt. Die Verteilungsfunktionen der freien Modellparameter sollten dabei möglichst empirisch ermittelt, zumindest aber plausibel abgeschätzt werden können. In der momentanen EFIT-H-Version können die folgenden Parameter statistisch verändert werden:

- der Abstand zwischen Prüfkopf und Defekt,
- die laterale Position des Wandlers relativ zur Wasser-Festkörper-Grenzfläche,
- der Neigungs- oder Kippwinkel des Prüfkopfes,
- die Größe des Defekts,
- die räumliche Orientierung des Defekts (nur für irreguläre Geometrien).

Dazu können Gauß- oder Rechteckverteilungen mit frei wählbaren Mittelwerten und Varianzen verwendet werden. Zukünftig ist die Erweiterung obiger Liste auf weitere freie Modellparameter geplant, wie z.B. schwankende elastische Materialkenngrößen, Oberflächenrauigkeiten und Matrix/Streuer-Interfacebedingungen.

Abb. 8 zeigt das Ergebnis einer simulationsgestützten POD-Analyse am Beispiel des Al_2O_3 -Einschlusses in TA6V (siehe Kap. 4). Dazu wurden für jeden Streuerdurchmesser zehn Einzelrechnungen mit statistisch schwankenden Modellparametern durchgeführt. Aus den Datenpunkten kann die zugrunde liegende POD-Kurve ermittelt werden, aus der sich der 90% POD-Wert und die zugehörigen 95%-Konfidenzintervalle bestimmen lassen. Im vorliegenden Fall wurde der klassische Berens-Ansatz verwendet [10]. Es ergibt sich $a(\text{POD}=90\%) = 0.69 \text{ mm}$ und $a(\text{POD}=90\%/95\%) = 0.779 \text{ mm}$.

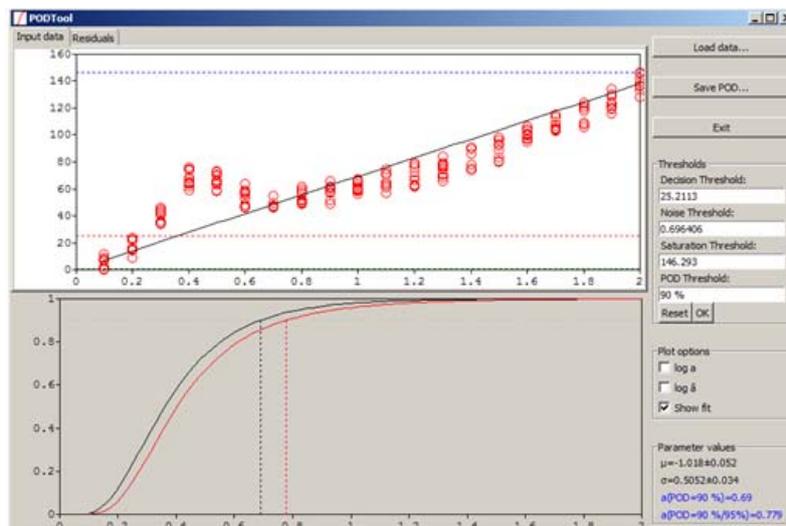


Abbildung 8: Beispiel einer POD-Analyse (Al_2O_3 -Einschlüsse in TA6V), berechnet mit EFIT-H.

Aus Abb. 8 wird allerdings auch deutlich, dass für das vorliegende Modellsystem eine der Grundannahmen des Berens-Ansatzes, nämlich ein weitgehend linearer Zusammenhang zwischen Rückstreuamplitude und Defektgröße nicht gut erfüllt ist. Insbesondere im Bereich der Resonanz bei $d \approx 0.46 \text{ mm}$ kommt es zu einer signifikanten Abweichung

vom linearen Verhalten. Um auch solchen Fällen Rechnung zu tragen, wurden im Rahmen des PICASSO-Projekts weiterführende, über den Berens-Ansatz hinausgehende POD-Ansätze verfolgt. Details dazu werden in [12] vorgestellt.

Zusammenfassung

Simulationsgestützte POD-Verfahren versuchen einen Teil der aufwendigen POD-Experimente durch numerische Simulationsrechnungen zu ersetzen. Der konventionelle EFIT-Code ist aufgrund des enormen Rechenaufwandes für hochfrequente 3D-Probleme aber nicht für POD-Studien geeignet. Deshalb wurde ein hybrider Ansatz (EFIT-H) verfolgt, der einen sinnvollen Kompromiss zwischen Rechengenauigkeit und -geschwindigkeit darstellt. Der Beschleunigungsfaktor gegenüber dem vollnumerischen 3D-EFIT beträgt je nach Anwendung zwischen 100 und 1000. CIVA-UT und EFIT-H liefern für bestimmte Anwendungsfälle plausible Ergebnisse, die gut (d.h. bis auf wenige dB) mit experimentellen Messungen übereinstimmen. Daneben existieren allerdings auch Anwendungen, in denen (noch) keine befriedigenden Ergebnisse vorliegen. Hier sind Erweiterungen der Modellvorstellungen notwendig. EFIT-H liefert mindestens ebenso gute Ergebnisse wie CIVA-UT. Perspektivisch liegt ein Vorteil von EFIT-H in der Möglichkeit, irreguläre Streugeometrien und realistischere Fehlerbilder zu simulieren. Der Solver steht als Windows-Executable zur Verfügung und kann über eine offene Schnittstelle gesteuert und an nahezu beliebige POD-Softwareplattformen angedockt werden.

Danksagung

Die hier vorgestellten Arbeiten wurden von der Europäischen Kommission im 7. Forschungsrahmenprogramm (FP7/2007-2013) unter der Vertragsnummer 234117: PICASSO gefördert. Wir danken weiterhin Christian Gollwitzer (ehemals BAM) für die Implementierung und Bereitstellung des POD-Tools aus Abb. 8.

Referenzen

- [1] www.picasso-ndt.eu
- [2] www.extende.com/civa-2/civa-ut
- [3] P. Fellinger, R. Marklein, K.-J. Langenberg, S. Klaholz, “Numerical modeling of elastic wave propagation and scattering with EFIT- elastodynamic finite integration technique”, *Wave Motion*, vol.21, pp. 47-66, 1995.
- [4] 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.
- [5] N. Gengembre, A. Lhémy, “Pencil method in elastodynamics: application to ultrasonic field computation”, *Ultrasonics* 38, 495–499, 2000.
- [6] M. Darmon, P. Calmon, B. Bèle, “An integrated model to simulate the scattering of ultrasound by inclusions in steels”, *Ultrasonics* 42, 237–241, 2004.
- [7] C.F. Ying, R. Truell, “Scattering of a plane longitudinal wave by a spherical obstacle in an isotropically elastic solid”, *J. Appl. Phys.*, 27 (9), pp. 1086-1097, 1956.
- [8] F. Schubert, B. Koehler, A. Peiffer, “Time domain modeling of axisymmetric wave propagation in isotropic elastic media with CEFIT – Cylindrical Elastodynamic Finite Integration Technique“, *Journal of Computational Acoustics*, Vol. 9, No. 3, 1127-1146, 2001.
- [9] F. Schubert, B. Lamek, “Fast Numerical Calculations of 3-D Phased Array Wave Fields Based on Transient Point Source Synthesis“, 10th European Conference on Non-Destructive Testing, ECNDT 2010. CD-ROM: 7.-11.06.2010, Moskau, 2010.
- [10] Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment, MIL-HDBK-1823A, 7. April 2009, US Department of Defence.
- [11] Titanium - 2nd edition - Gerd Lütjering & James C. Williams, Springer 2007, Fig. 3.14b.

[12] N. Dominguez, T. Yalams, V. Feuillard, "Progress in POD estimation: methods and tools", 4th International Symposium on NDT in Aerospace, 13.-15.11.2012, Augsburg, Germany (angemeldet und eingereicht).