

Maßgeschneiderte, dreidimensionale Ultraschallfelder für Anwen- dungen in der ZfP

Sebastian STANDOP¹, Roman KOCH², Werner LAMMERICH¹, Daniel HOLZHAUER¹,
Stephan FALTER¹

¹ GE Sensing & Inspection Technologies GmbH, Hürth

² GE Sensing & Inspection Technologies GmbH, Alzenau

Kurzfassung. Einer der wesentlichen Fortschritte im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung mit Ultraschall besteht darin, mithilfe bildgebender Verfahren möglichst akkurate Ergebnisse bei der Prüfung komplexer Werkstücke zu erzielen. Insbesondere die Einführung der Phased-Array Technik hat diesen Trend weiter beschleunigt. Darauf aufbauend, werden empfängerseitig komplexe, typischerweise Laufzeit-basiert, Algorithmen dazu benutzt, diese zu optimieren, um ein dem realen Fehlerbild immer besser entsprechendes Abbild zu generieren.

Das Time-Reverse-Mirror Verfahren ist eines der wenigen Konzepte, welches eine senderseitige Optimierung der Schallfelder mit Phased-Array Prüfköpfen bewerkstelligt, ebenfalls mit dem Ziel einer erhöhten Prüfauflösung oder einer erhöhten Prüfgeschwindigkeit. Wie im Vorfeld durch Simulationen gezeigt wurde, lässt sich dieses Verfahren so implementieren, dass auf diese, computergestützte Weise komplexe, dreidimensionale akustische Bilder erzeugt werden können, die sich von den üblicherweise mittels Phased-Array Ansteuerung generierbaren Schallfeldern signifikant unterscheiden.

Wir präsentieren hier neben dem Simulationsmodell Tauchtechnikmessungen der Schallfelder und diskutieren die Übereinstimmung sowie mögliche Anwendungen.

1 Das Time-Reverse-Mirror Verfahren

Beim Time-Reverse Mirror Verfahren [1, 2, 3] handelt es sich um ein iterativ arbeitendes Verfahren, welches sich des als Zeitinversion bekannten physikalischen Prinzips bedient. Vereinfacht dargestellt, basiert dieses darauf, dass die propagierenden Wellenfelder sich auf Ihren Ursprung zurückpropagieren lassen, wenn man mathematisch betrachtet die zeitliche Ausbreitung umkehrt. Obwohl die Gültigkeit des Verfahrens voraussetzt, dass der gesamte, dreidimensionale Zustand bekannt sein muss, was in der Praxis nicht der Fall sein kann, besteht die Möglichkeit, mithilfe von Phased-Array Prüfköpfen sowie geeigneter Ultraschallsender dieses Verfahren zur Schallfeldformung einzusetzen.

In Tabelle 1 sind die wesentlichen Schritte dargestellt: im ersten Schritt, den man als Primäremission bezeichnen kann, wird eine möglichst ebene Welle, ggf. unter einem Winkel, in das zu prüfende Volumen eingeschallt. Befinden sich in diesem Volumen Reflektoren, so senden diese abhängig von Ihrer geometrischen Struktur Ultraschallwellen zurück zum aussendenden Prüfkopf, welche dann dort empfangen werden (Schritt 2). Betrachtet man diese Einzelement A-Scans, so finden sich in diesen charakteristische Signaturen, welche sich auf die Reflektoren im Material zurückführen lassen. Gemäß der Theorie des Time-Reverse-Mirror Verfahrens werden diese Einzelementesignale nun zeitlich invertiert über geeignete Senderelemente im Rahmen einer Sekundäremission wieder in das Prüfvolumen ausgesendet, was man auch als Sekundäremission bezeichnen kann (Schritt 3). Im Rahmen eines nicht mehr dargestellten, vierten Schritts würden nun die Reflektorsignale erneut aufgenommen mittels bekannter Methoden des Beam-Processings, beispielsweise zu Summen-A-Bildern verarbeitet, so dass alle Arten der bekannten Darstellungen entstehen könnten. Auch erweiterte Verfahren, wie DDF oder Paint-Brush-Processing können dann basierend auf diesem Urdatenfeld eingesetzt werden [4, 6].

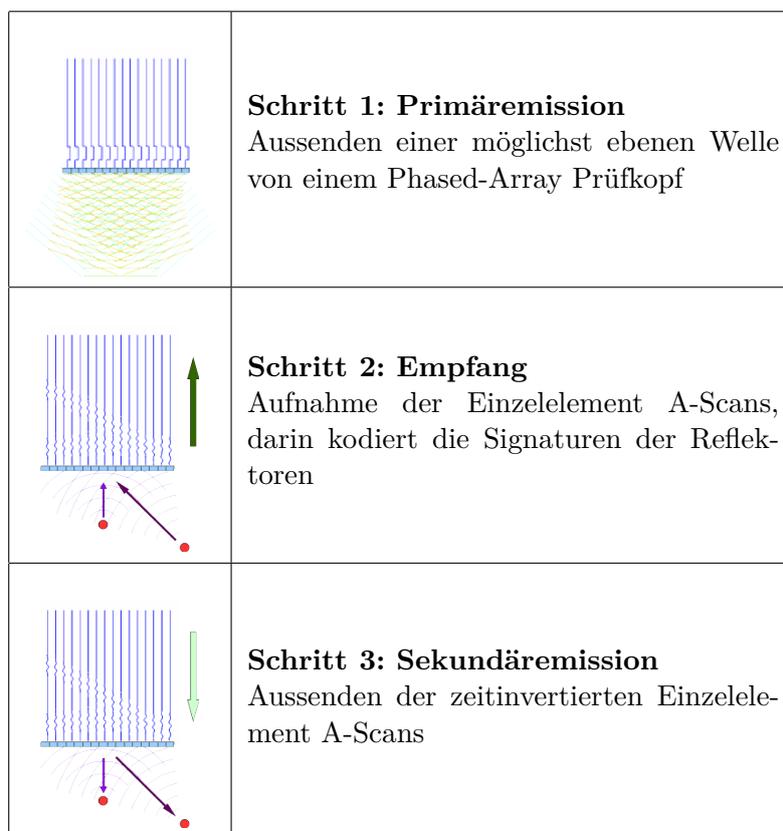


Abbildung 1: Schritte bei der Anwendung des Time-Reverse-Mirror Verfahrens

Der zentrale Unterschied zum Standardverfahren besteht also letztlich in der Sekundäremission. Bei dieser entsteht keine ebene oder einfach fokussierte Welle sondern ein Schallfeld, dessen

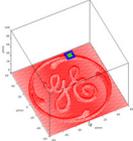
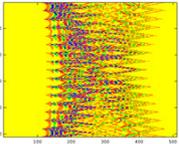
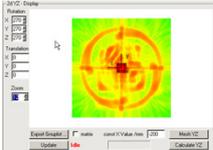
	<p>Schritt 1: Bild des zu erzeugenden Schallfelds</p>
	<p>Schritt 2: Berechnung der Transferfunktion</p>
	<p>Schritt 3: Schallfelderzeugung, Transferfunktion als Senderanregung (Simulation)</p>

Abbildung 2: Erzeugung komplexer Schallfelder

Charakteristik sich durch die Reflektoren ergibt. Dieses kann bei realen Fehlern, welche als Reflektoren wirken, beliebig kompliziert sein. An dem in Tabelle 1 dargestellten Beispiel mit Punktrefektoren lässt sich aber leicht erkennen, dass man es im einfachsten Fall mit einem Schallfeld zu tun hat, welches sich als multifokal bezeichnen lässt.

Obwohl bereits in den 1990er Jahren Prüfgeräte entwickelt wurden, welche in der Lage waren, das Time-Reverse-Mirror Verfahren einzusetzen, hat es nicht außerordentlich viele industrielle Anwendungen gefunden. Das hat vornehmlich wirtschaftliche Gründe. Einerseits war die Phased-Array Technik noch nicht Stand der Technik und in Ihrer Anwendung mit hohen Kosten verbunden, andererseits war der Aufbau der für die Sekundäremission benötigten Sender darüber hinaus mit technischen Schwierigkeiten verbunden, so dass das Gesamtsystem typischerweise für Industrieanwendungen zu aufwendig und zu teuer war. Aber auch technisch ist die Anwendung mit einigen Schwierigkeiten verbunden. Insbesondere ist es eine Eigenschaft des Verfahrens, dass schwache Reflektoren auch vergleichsweise schwache Signaturen erzeugen, während starke Reflektoren oder beispielsweise Kanten kräftige Signaturen hervorrufen. Bei der Sekundäremission führt das dann dazu, dass die ohnehin starken Reflektoren bevorzugt angeschallt werden. Zwar ergibt sich auch eine Verstärkung für die schwachen Reflektoren, allerdings würde man es bei den meisten Anwendungen bevorzugen, wenn dieses Verhalten genau umgekehrt wäre, eben um diese "kleinen Fehler verbessert auffinden zu können.

2 Computergenerierte Hologramme

Heutzutage hat sich die Phased-Array Technik als Stand der Technik etabliert. In diesem Rahmen rückt auch das Time-Reverse-Mirror Verfahren wieder in den Fokus der Betrachtung. Aufgrund der in Abschnitt 1 erwähnten, prinzipiellen Probleme wird im Rahmen dieser Veröffentlichung jedoch abweichend vom ursprünglichen Verfahren ein Weg aufgezeigt, wie man die Theorie des Verfahrens nutzen kann, um ein geeignetes, abstrakt gesprochen multifokales Schallfeld zu berechnen, welches dann mittels geeigneten Sendern generiert wird. Ein solches multifokales Schallfeld wird dann insbesondere dazu eingesetzt, prüftechnisch bekannte Geometrieigenschaften, wie Orientierungen, Kanten, oder Fehlerlagen so in die Berechnung des Schallfeldes einzubeziehen, dass sich in diesem Rahmen Prüf Vorteile ergeben.

Um das mathematisch korrekt zu berechnen, lässt sich am einfachsten der aus der Optik bekannte Ansatz heranziehen, welcher eingesetzt wird, um computergenerierte Hologramme zu berechnen [5]. Der wesentliche Unterschied besteht nur darin, dass man es bei prüftechnischen

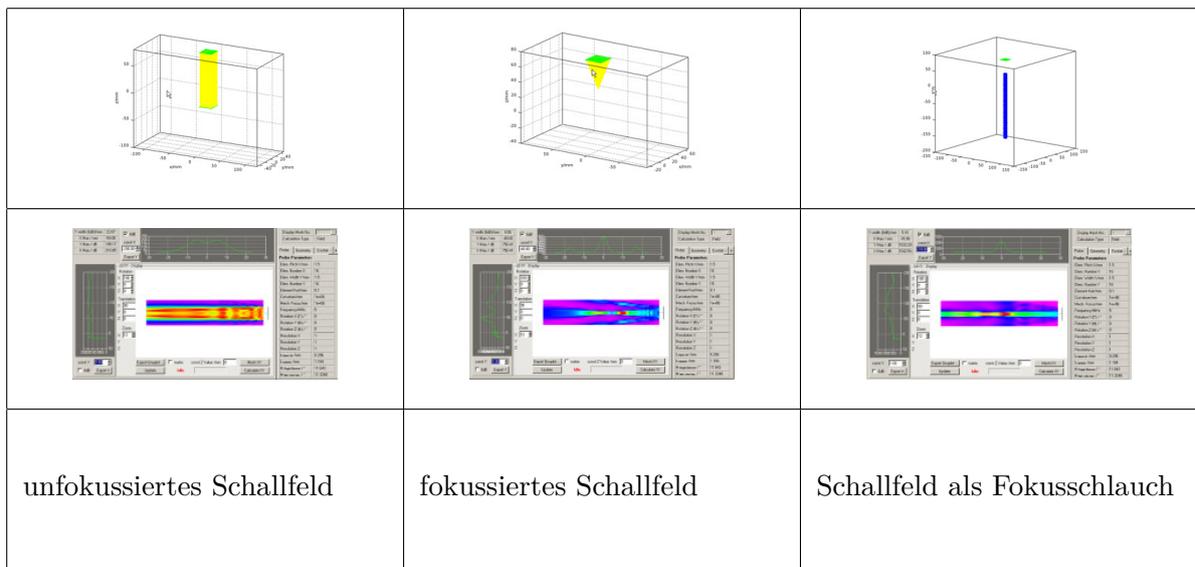


Abbildung 3: Erzeugung eines Fokusschlauchs als Beispiel zur Optimierung der Ultraschallprüfung mit langen Laufwegen

Anwendungen nahezu ausschließlich mit transienten Feldern zu tun hat und dass die zeitaufgelösten Signale die Kontrolle von Phase und Amplitude erlauben. Das spiegelt sich bei der inversen Aussendung wieder. In der Optik arbeitet man mit monofrequenten, kohärenten Wellen. Das eigentlich Hologramm entsteht dann in einer Ebene oder einem Volumen und wird bei der Rekonstruktion mit einer monofrequenten, kohärenten Lichtquelle, also einem Laser, beleuchtet.

Verallgemeinert wird aus den in Abschnitt 1 dargestellten multifokalen Schallfeldern ein zweidimensionales Bild in der Ebene, beziehungsweise ein dreidimensionales Bild im Raum. Dieses Bild kann man sich so entstanden denken, als dass es aus einzelnen Punkten besteht, von denen jeder einen Fokus im Sinne des multifokalen Schallfeldes darstellt. Im Rahmen der Prüfanwendung muss dann dargestellt werden, wie sich ein für die Zwecke der Prüfung optimiertes Bild darstellt. Dieses wird dann als Eingabe in den Berechnungsalgorithmus gegeben. Das Ergebnis des Algorithmus kann als Transferfunktion bezeichnet werden und ist direkt das Funktionsfeld welches für die Senderanregung benötigt wird. In Abbildung 2 ist die Prozedur exemplarisch illustriert.

Ein anderes, für eine reale Prüfung relevantes Beispiel ist in Abbildung 3 simuliert. Betrachtet man Prüfprobleme mit vergleichsweise langen Laufwegen, ergeben sich Optimierungsprobleme, da man einerseits für eine möglichst große Tiefenwirkung bei gegebener Frequenz einen hinreichend großen Ultraschallwandler einsetzen muss. Dieser zeigt im Nahfeldbereich (Abbildung 3, Spalte 1) die typischen, beugungsbedingten Inhomogenitäten, was bei der Prüfung letztlich zu verringerten Prüfempfindlichkeiten in diesem Bereich führen kann. Andererseits kann der Strahl im Nahfeld mithilfe von Verzögerungszeiten fokussiert werden. Auf diese Weise erreicht man zwar einerseits eine hohe Intensität im Fokuspunkt, erkauft jedoch durch eine vergleichsweise kurze Länge (Rayleigh-Länge), innerhalb welcher dieser Strahl für eine Prüfung hinreichend gut



Abbildung 4: Ringförmiges Schallfeld senkrecht zur Ausbreitungsachse

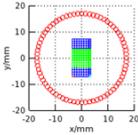
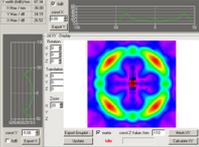
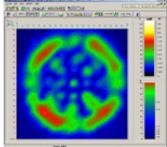
		
multifokaler Bildansatz	simuliertes, ringförmiges Schallfeld	gemessenes, ringförmiges Schallfeld

Abbildung 5: In Wasser gemessenes, ringförmiges Schallfeld senkrecht zur Ausbreitungsachse in 110mm Abstand zum Prüfkopf

lokalisiert ist (vgl. Abbildung 3, Spalte 2).

Empfängerseitig lassen sich beide Effekte durch DDF kompensieren[6]. Senderseitig ist das nur sehr aufwendig möglich, beispielsweise indem man verschiedene Prüfschüsse mit verschiedenen Tiefen durchführt, und die Ergebnisse entweder sequentiell und getrennt betrachtet oder auf komplexe Art und Weise zu einem A-Bild kombiniert, welches dann ausgewertet wird. In beiden Fällen ist das in jedem Fall mit einer Verkleinerung der Prüfgeschwindigkeit verbunden. Mithilfe der holographischen Bilderzeugung kann unter geeigneten Randbedingungen ein multifokales Feld so aufbauen, dass ein Ultraschallschlauch entsteht, der im Nahfeld über eine nahezu homogene Schallfeldbreite verfügt (vgl. Abbildung 3, Spalte 2).

3 Beispiele und experimentelle Ergebnisse

Um die Leistungsfähigkeit des Verfahrens zu verifizieren, wurden sowohl qualitative als auch quantitative Messungen durchgeführt und mit den Simulationsergebnissen verglichen. Dazu wurden insbesondere einfache, regelmäßige Geometrien betrachtet. Besonders gut geeignet sind dazu ringförmige Schallfelder, da diese offensichtlich große Unterschiede zu konventionellen Schallfeldern aufweisen, aber aufgrund der Symmetrie vergleichende Angaben zur Amplitude zwischen den Ultraschallfeldern zulassen. Abbildung 4 zeigt die Simulation einer solchen Ringstruktur, die in einer Schnittfläche senkrecht zur Ausbreitungsrichtung entsteht.

Für die experimentelle Verifikation dieser Ringe wurde ein einfacher Laboraufbau erstellt. Basierend auf einem Phased-Arraykopf mit 8x16 Elemente bei 2MHz und einem pitch von 0.9mm x 0.9mm wurde ein virtueller Prüfkopf von 8x8 Elementen definiert. Diese wurden mittels geeigneter Sender angesteuert, deren Anregungsfunktion frei definierbar war. In einer Tauchtechnik wurde anschließend mittels eines Hydrophons, eines konventionellen Ultraschallgeräts und eines Scanners inklusive C-Scan Auswertesoftware das Schallfeld abgetastet und als C-Scan dargestellt. Bedingt durch die kleine Apertur des Hydrophons kann man von einer nahezu punkweisen Abtastung des Schallfeldes ausgehen. Winkelkorrekturen wurden nicht durchgeführt.

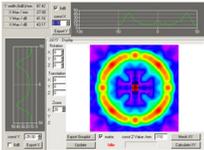
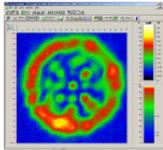
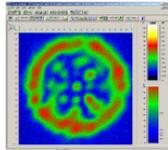
		
homogenisiertes, ringförmiges Schallfeld / simuliert	homogenisiertes, ringförmiges Schallfeld / gemessen	homogenisiertes, ringförmiges Schallfeld / gemessen, Prüfkopfinhomogenitäten einbezogen

Abbildung 6: Homogenisierung von Feldern durch gewichtete Bildpunkte

Wie man aus Abbildung 5 erkennt, wird die qualitative Struktur des gemessenen Schallfeldes durch die Simulation in außerordentlich guter Art und Weise wiedergegeben. Aufgrund der prinzipiellen Symmetrie des Aufbaus sowie der Ansteuerung ist die Simulation ebenfalls vollständig symmetrisch, wohingegen die Messung unsymmetrisch ist, was sich an einer verstärkten Intensität im dritten Quadranten erkennen lässt (vgl. Abbildung 5, Spalte 2,3). Dieses Verhalten ist normalen Fertigungsinhomogenitäten des Phased-Array Prüfkopfs geschuldet. Um diese Asymmetrien auszugleichen, können die Bildpunkte bei der Berechnung der Transferfunktion zusätzlich einer Gewichtung unterzogen werden. Auch in diesem Fall sind die Ergebnisse von Messung und Simulation in ausgezeichneter Übereinstimmung zueinander, wie man in Abbildung 6 erkennen kann. Auch die natürlichen Inhomogenitäten des Prüfkopfs lassen sich prinzipiell ausgleichen, obwohl in diesem Fall eine aus einer Einzelelementmessung gewonnene, elementbezogene Empfindlichkeitskorrektur voraussichtlich effektiver einsetzbar ist.

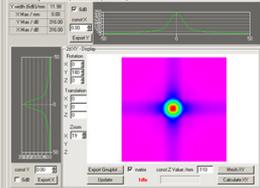
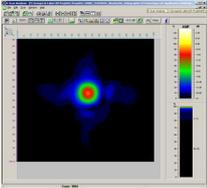
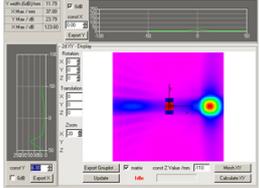
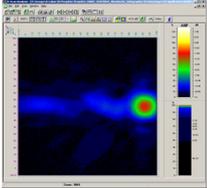
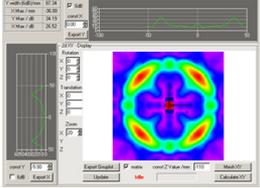
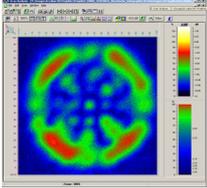
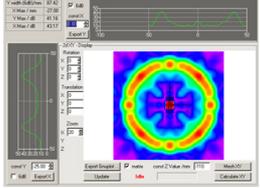
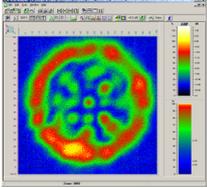
Schusstyp	Simulation	Messwerte Simulation	Messung	Messwerte bei 80% Amplitude
Senkrecht		314 - 0dB		76dB
19° Ablenkung, 0°-polar		223 - 3dB		82.5dB
Ringförmig, ungewichtet 19° Ablenkung, 0°-polar		34.2 - 19.25dB		92dB
Ringförmig, gewichtet 19° Ablenkung, 0°-polar		41.8 - 17.5dB		93.5dB

Tabelle 1: Vergleichende quantitative Ergebnisse

Um darüber hinaus prüftechnische Anwendungen zu erarbeiten, sind insbesondere Betrachtungen zum Signal-Rausch-Abstand erforderlich. Rein auf den Ultraschallsender bezogen bedeutet das, dass im Wesentlichen eine Betrachtung der Amplituden des Bildfeldes notwendig ist. Hierzu lassen sich aus den betrachteten, ringförmigen Ultraschallfeldern bereits einfache Schlüsse ziehen. Tabelle 1 zeigt erste Ergebnisse dieser Messungen. Ausgehend vom Signal eines rechnerisch punktfokussierten Ultraschallfeldes (Spalte 1) betrachtet man zunächst einen um ca. 19° geschwenkten Strahl, welcher typischerweise Beugungsverluste aufweist (Spalte 2). Im Anschluss daran betrachtet man die holographisch erzeugten Ringbilder und vergleicht dann die mit dem Hydrophon aufgenommenen Intensitäten. Dabei treten Abweichungen von ca. 3dB zwischen Simulation und Messung auf. Dies ist einerseits modellbehafteten Abweichungen geschuldet,

aber auch Vereinfachungen im Messaufbau und den Fertigungsinhomogenitäten des Arrays. Da die eingesetzten Komponenten noch Laborcharakter haben, konnte keine kalibrierte Messung umgesetzt werden, was für höhere Genauigkeiten zwingend notwendig ist. Unter diesen Randbedingungen kann die Übereinstimmung nach wie vor als gut bezeichnet werden. Die beobachtete Abnahme der Intensitäten wird vor dem Hintergrund der deutlich größeren, beschallten Fläche, welche im Schnitt senkrecht zur Ausbreitungsrichtung erkennbar ist, anschaulich offensichtlich. Es kann als natürlicher Wesenszug von simultan multifokalen Schallfeldern angesehen werden, dass sich die relativen Amplituden der einzelnen Fokuspunkte die zum Erzeugungszeitpunkt vorhandene Senderenergie gemäß ihrer Gewichtung in der Transferfunktion teilen.

4 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Veröffentlichung wurde gezeigt, dass sich auf der Basis programmierbarer Sender komplexe, für Anwendungen optimierbare Schallfelder erzeugt werden können. Dies wurde zunächst durch Simulationen vorbereitet und anschließend im Experiment verifiziert. Im Rahmen der erzielbaren Messgenauigkeiten kann man zusammenfassend von einer außerordentlich guten Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment sprechen. Durch die flexible Handhabung des Laboraufbaus lassen sich mit geeigneten Prüfköpfen Szenarien erarbeiten, die bekannte Prüfprobleme weiter optimieren oder auch neue Anwendungsfelder erschließen. Der geschilderte Algorithmus zur Definition der Transferfunktion, der auf dem Time-Reverse-Mirror Verfahren beruhenden computergenerierten Holographie, lässt sich im Rahmen der zerstörungsfreien Prüfung mit Ultraschall im Wesentlichen dazu einsetzen, komplexe Geometrien in der Prüfsituation zu berücksichtigen. Es zeigt sich aber auch, dass diese Technik nicht naiv eingesetzt werden sollte. Durch die physikalischen Randbedingungen, wie den Aufbau des Array-Prüfkopfs oder die Apertureigenschaften ergeben sich Interferenzeffekte, welche, wenn nicht konstruktiv durch Simulationen untersucht und optimiert, zu anschaulich unerwarteten Intensitäts- und damit letztlich Prüflücken führen können. Im Rahmen dieser Untersuchungen konnte jedoch auch gezeigt werden, dass derartige Optimierungen möglich und durchführbar sind.

Literatur

- [1] R. Mallart, M. Fink, ISPIE Vol. 1733 (1992)
- [2] M. Fink, IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., Freq. Contr, Vol.39, pp. 555-566 (1992)
- [3] F. Wu, J. L. Thomas and M. Fink, IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., Freq. Contr, Vol.39, pp. 567-578 (1992)
- [4] E. Eufrazio et al., "Practical application of the phased-array technology with Paint-Brush Evaluation for seamless tube testing", WCNDT 2004
- [5] R. Prause, D. Lange, S. Standop, R. Koch, and S. Falter, Proc. of the ECNDT, (2014)
- [6] R. Koch, S. Falter, "Erhöhung der Prüfsicherheit und der Prüfproduktivität durch erweiterte Phased-Array Technologien", DGZfP 2013