

# Analyseprüfung von Eisenbahnradsatzwellen mit Ultraschall

Thomas HECKEL, Rainer BOEHM, Dirk GOHLKE, Uwe VOELZ,  
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung  
Fachgruppe 8.4, Akustische und Elektromagnetische Verfahren  
Arbeitsgruppe 8.43, Ultraschallsonderprüftechniken  
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin  
Tel.: +49 30 8104 3686  
Fax.: +49 30 8104 1846  
[thomas.heckel@bam.de](mailto:thomas.heckel@bam.de)

**Kurzfassung.** Die wiederkehrende zerstörungsfreie Prüfung von längs gebohrten Eisenbahnradsatzwellen mit Ultraschall erfolgt im eingebauten Zustand aus der Wellenbohrung heraus. Neben den aufzufindenden Fehleranzeigen erzeugt aufgrund der geometrischen Bedingungen der Radsatzwelle hierbei jeder Querschnittsübergang eine umlaufende Formanzeige in der Ergebnisdarstellung. Durch den Prozess des Aufschrumpfens der Radscheiben auf die Sitze können weiterhin örtlich statistisch verteilte Bereiche im Sitz entstehen, die bei der Ultraschallprüfung Anzeigen hervorrufen, die so genannten Scheinanzeigen. Insbesondere in den Bereichen der Querschnittsübergänge ist zum einen die Prüfsituation sehr komplex, zum anderen ist hier die Wahrscheinlichkeit für eine Rissbildung am höchsten. Bei der Befundanalyse stößt die derzeit verwendete Prüftechnik in diesen Bereichen an ihre Grenzen, so dass nicht immer eine eindeutige Prüfaussage erfolgen kann. Im Bericht werden Lösungsansätze für Analyseverfahren vorgestellt, die auf Basis der Gruppenstrahlertechnik bzw. mit Fokusprüfköpfen in Verbindung mit dem Einsatz von Signalverarbeitung vielversprechende Ergebnisse zur Optimierung dieser Situation aufzeigen.

## Einleitung

Die zerstörungsfreie Untersuchung sicherheitsrelevanter Komponenten von Schienenfahrzeugen ist während der Herstellung und auch während des Fahrbetriebes notwendig, um die sichere Funktion der Fahrzeuge sicherzustellen. Aufgrund grundsätzlich unterschiedlicher Entstehungsprozesse von Materialfehlern in Eisenbahnradsatzwellen während der Neufertigung und im späteren Betriebsprozess, existieren unterschiedliche Anforderungen für die entsprechenden zerstörungsfreien Prüfungen.

## Wiederkehrende Prüfung

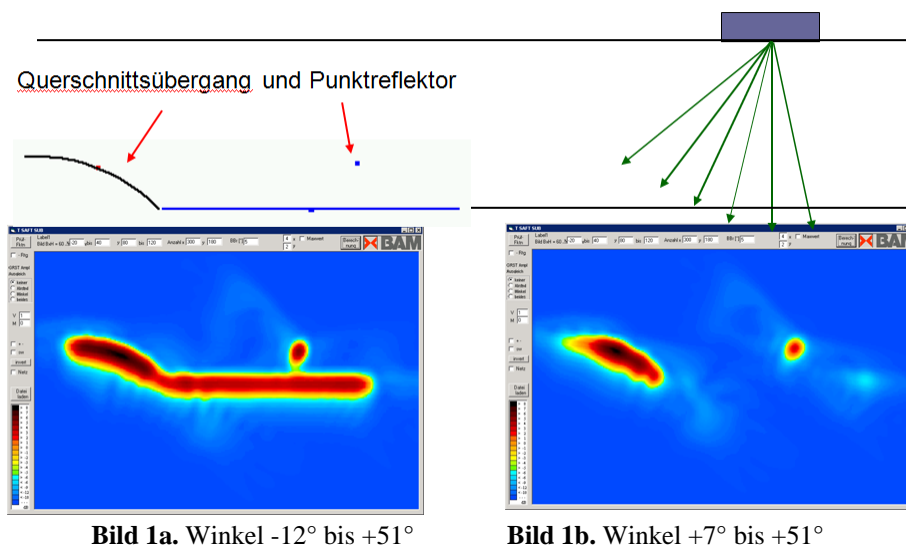
Die wiederkehrende zerstörungsfreie Prüfung von längsgebohrten Eisenbahnradsatzwellen mit Ultraschall erfolgt im eingebauten Zustand aus der Wellenbohrung heraus. Im Vordergrund steht bei der Prüfung das Auffinden rissartiger Strukturen auf der Wellenmantelfläche. Der Nachweis erfolgt hierbei mit Hilfe des sogenannten Winkelspiegeleffekts. Die Prüfung wird mechanisiert durchgeführt, wobei die

Wellenmantelfläche in Umfangs- und Längsrichtung mit einer Helixfahrt des Prüfkopfträgers abgetastet wird. Die Aufnahme der Messdaten erfolgt mit A-Bildern und Blendentechnik, die Darstellung der Prüfergebnisse erfolgt in Abwicklungsdarstellung als C-Bild. Blendenüberschreitungen werden in dieser Darstellung farbkodiert angezeigt und können der entsprechenden Längs- und Umfangskoordinate zugeordnet werden.

## SAFT-Verfahren

Zur Analyse von Befunden in längsgebohrten Eisenbahnratsatzwellen bietet sich das SAFT-Verfahren (Synthetic Aperture Focussing Technique) an, da mit diesem Verfahren die Ortsauflösung mechanisierter Ultraschallprüfungen unter geeigneten Randbedingungen erheblich verbessert werden kann. Der Nachweis erfolgt hierbei nicht mit Hilfe des so genannten Winkelspiegeleffekts und der Nutzung von Transversalwellen. Stattdessen kommen bei einer SAFT-Messung bevorzugt Longitudinalwellen im Winkelbereich von  $0^\circ$  bis  $60^\circ$  zum Einsatz.

Insbesondere in den Bereichen der Querschnittübergänge ist die Wahrscheinlichkeit für eine Rissbildung hoch. Hinzu kommt, dass durch den Prozess des Aufschrumpfens der Scheiben auf die an die Querschnittübergänge angrenzenden Sitze örtlich statistisch verteilte Bereiche im Sitz entstehen, die so genannte Scheinanzeigen hervorrufen.



**Bild 1a.** Winkel  $-12^\circ$  bis  $+51^\circ$

**Bild 1b.** Winkel  $+7^\circ$  bis  $+51^\circ$

Der Einsatz der SAFT-Rekonstruktion kann mit Hilfe einer Analysefahrt am montierten Radsatz klären, ob die Anzeigen von Reflektorpositionen innerhalb des Wellenvolumens, an der Grenzfläche oder außerhalb des Wellenvolumens stammen. Wenn die rekonstruierte Reflektorposition innerhalb des Wellenvolumens liegt, kann mit hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass diese Reflexion von einer betriebsbedingten rissartigen Schädigung stammt. Anderenfalls handelt es sich um eine Scheinanzeige. Bild 1 zeigt Ergebnisse einer Simulation der Prüfanordnung. In Bild 1a ist eine SAFT-Rekonstruktion der dargestellten Prüfanordnung für Einschallwinkel von  $-12^\circ$  bis  $+51^\circ$  abgebildet, in Bild 1b eine Rekonstruktion für die Einschallwinkel  $+7^\circ$  bis  $+51^\circ$ .

## **Testkörper**

Für die Untersuchungen wurde eine Testwelle mit einer Vielzahl von Sägeschnitten mit Tiefen von 1 mm und 2 mm auf der äußeren Mantelfläche von der DB AG zur Verfügung gestellt. Alle Sägeschnitte befinden sich vorzugsweise in der Nähe von Querschnittübergängen.

## **Prüfsystem**

Für die Messungen wurde von der BAM ein für SAFT-Rekonstruktionen optimierter Gruppenstrahlerprüfkopf entworfen, simuliert und in Zusammenarbeit mit der Firma GE aufgebaut. Der Prüfkopf ist für den Einsatz mit Longitudinalwellen in einem Winkelbereich von ca.  $0^\circ$  bis ca.  $60^\circ$  ausgelegt. Der Schwinger besteht aus 16 Elementen mit einer Nennfrequenz von 5 MHz. Der Prüfkopf ist an die Krümmung der inneren Mantelfläche der Testwelle angepasst. Für die Messungen wurde das Ultraschall-Gruppenstrahlergerät von Typ COMPAS 32 eingesetzt. Es wurde ein Wellenmanipulator der DB AG für die Positionierung des Prüfkopfes in der Welle verwendet. Er bietet in Verbindung mit dem COMPAS 32 die Möglichkeit, die Position des Prüfkopfes in der Welle mit einer Längskoordinate und einer Umfangskoordinate hochauflösend zu erfassen.

## **Durchführung der Untersuchungen**

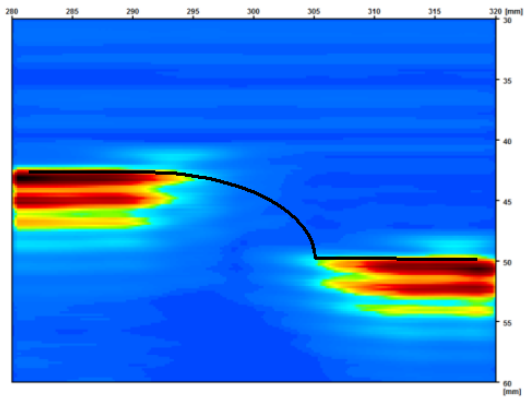
Bei der Messung wurden die Querschnittübergänge am Radsitz der Wellenschenkel A und B untersucht. Ziel war es, den Sägeschnitt kurz vor dem Querschnittübergang und den Sägeschnitt kurz hinter dem Querschnittübergang in einem SAFT-B-Bild abzubilden. Hierzu wurde während der Messung der Schallaustrittspunkt auf der Längsachse in einem Bereich von 200 mm verfahren, damit die ausgewählten Reflektoren von allen Winkelfunktionen erreicht werden konnten. Die Datenaufnahme erfolgte mit einer Schrittweite für den Einschallwinkel von  $1^\circ$ , einer Positionsauflösung von 0,1 mm und mit HF-Digitalisierung.

Für die SAFT-Rekonstruktion wurden entsprechende Auswertebereiche, bezogen auf die Längskoordinaten und die Tiefenbereiche der Reflektoren, ausgewählt und die Rekonstruktion unter Verwendung unterschiedlicher Winkelbereiche durchgeführt. Hierbei dienten die Einschallwinkel um  $0^\circ$  vorwiegend zur Geometrieerfassung und zur Ankoppelkontrolle. Die Einschallwinkel zwischen zirka  $5^\circ$  und  $60^\circ$  dienen der eigentlichen Fehlersuche.

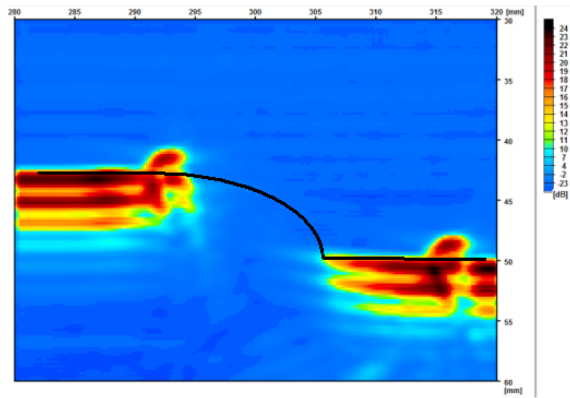
## **Prüfergebnis**

Die Bereiche der Querschnittübergänge an den Radsitzen wurden an der vorliegenden Radsatzwelle auf dem Wellenschenkel A mit 2 mm tiefen Testreflektoren und auf dem Wellenschenkel B mit 1 mm tiefen Testreflektoren vermessen. Der Querschnittübergang selbst kommt in den Bildern nicht zur Anzeige, da die Einschallung vom kleinen Radius aus zum größeren Radius hin erfolgte.

In den Bildern 2a und 2b sind die Ergebnisse am Wellenschenkel A dargestellt. Bild 2a zeigt eine Rekonstruktion des Winkelbereiches von  $-2^\circ$  bis  $+2^\circ$ . Diese Darstellung dient zur Ermittlung der Wellenkontur bzw. stellt das Echosignal der äußeren Mantelfläche dar. Da das Schallbündel in Richtung des größeren Durchmessers schallt, wird die Kontur der Mantelfläche im Bereich des Korbogens nicht vollständig abgebildet. Zusätzlich zur Anzeige der Kontur wird bei den Längspositionen 292 mm und 317 mm mit einem leichten hellblau das Nutdach der Sägeschnitte abgebildet.



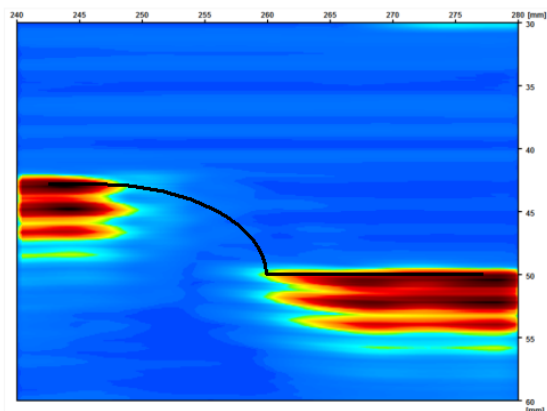
**Bild 2a.** -2° bis +2°



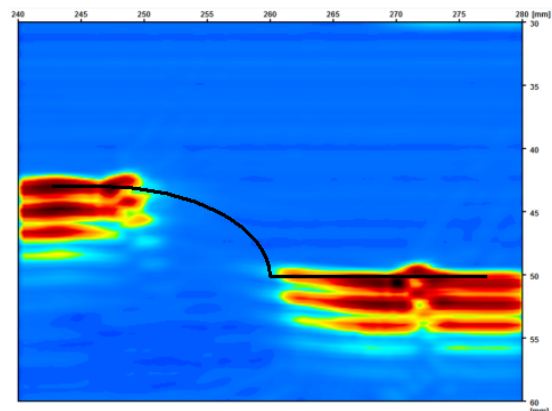
**Bild 2b.** -5° bis +60°

Bild 2b zeigt die Rekonstruktion aller aufgenommenen Winkel von -5° bis +60°. Die Anzeigen von Mantelfläche und Testreflektoren bilden sich deutlich ab. Man erkennt, dass die Anzeigen der Testreflektoren deutlich im Volumen der Welle rekonstruiert werden. Eine Abschätzung mit der Tiefenskala ergibt eine Nuttiefe von ca. 1,5 mm bis 2 mm für beide Reflektoren.

In den Bildern 3a und 3b sind die Ergebnisse am Wellenschenkel A dargestellt. Bild 3a zeigt eine Rekonstruktion des Winkelbereiches von -2° bis +2°. Diese Darstellung dient zur Ermittlung der Wellenkontur bzw. stellt das Echosignal der äußeren Mantelfläche dar. Da das Schallbündel in Richtung des größeren Durchmessers schallt, wird die Kontur der Mantelfläche im Bereich des Korbbogens nicht vollständig abgebildet.



**Bild 3a.** -2° bis +2°



**Bild 3b.** -5° bis +60°

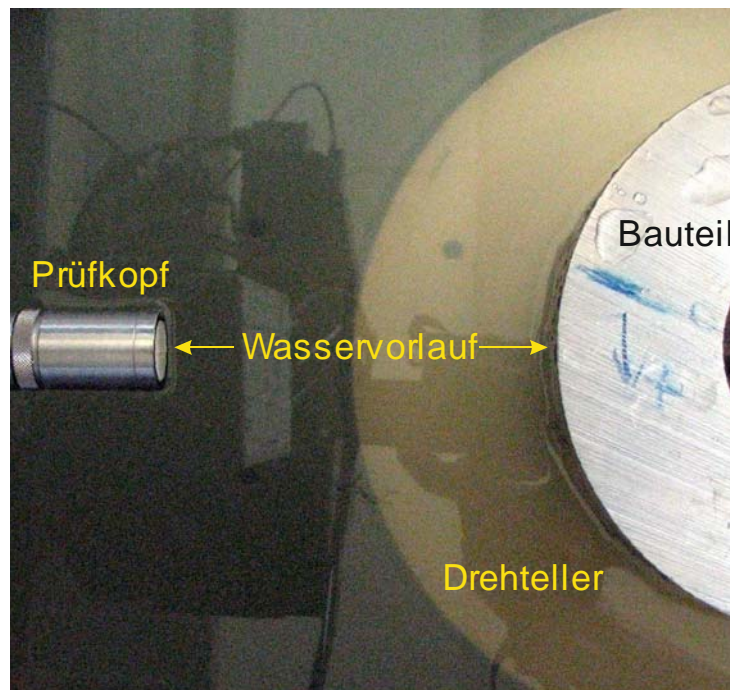
Bild 3b zeigt die Rekonstruktion aller aufgenommenen Winkel von -5° bis +60°. Die Anzeigen von Mantelfläche und Testreflektoren bilden sich deutlich ab. Man erkennt, dass die Anzeigen der Testreflektoren im Volumen der Welle rekonstruiert werden. Eine Abschätzung der Tiefenausdehnung ist nicht zuverlässig möglich.

## Fertigungsprüfung

Während der Herstellung von Radsatzwellen ist es für die Materialanalyse notwendig, den mikroskopischen Reinheitsgrad zu bestimmen. Im Vordergrund stehen bei dieser Untersuchung metallische und nichtmetallische Einschlüsse, Poren und Lunker. Bei den Bestimmungen des mikroskopischen Reinheitsgrades handelt es sich um zerstörende Untersuchungen. Die entnommenen Proben der Charge stehen somit für die Fertigung nicht zur Verfügung. Die Untersuchung kann aus diesem Grund nur anhand von Stichproben

erfolgen. Um eine 100% Prüfung der gefertigten Radsatzwellen auf den mikroskopischen Reinheitsgrad zu realisieren, wird eine zerstörungsfreie Prüfmethode benötigt. Hier bietet sich das Ultraschallverfahren nach Stahl-Eisen-Prüfblatt SEP 1927 an. Mit dieser Methode kann der Reinheitsgrad mit akustischen Methoden ermittelt werden.

Aufgrund der geometrischen Abmessungen der Radsatzwelle mit Längsbohrung kann das Regelwerk jedoch nicht direkt angewendet werden. Für die Prüfung einer längsgebohrten Eisenbahnradatzwelle in Anlehnung an die SEP 1927 wird der Einsatz fokussierender Prüfköpfe notwendig. Mit geeigneten Prüfkopfanordnungen ist hier sowohl eine Prüfung von der äußeren Mantelfläche als auch von der Innenbohrung aus realisierbar. Der Einfluss der Krümmung der Bauteiloberfläche muss bei der Prüfung berücksichtigt werden. Aufgrund der geringen Schallbündeldurchmesser im Fokusschlauch ist eine Abtastung mit einem Messpunkt Abstand von 0,25 mm notwendig.



**Bild 4.** Prüfanordnung in Tauchtechnik

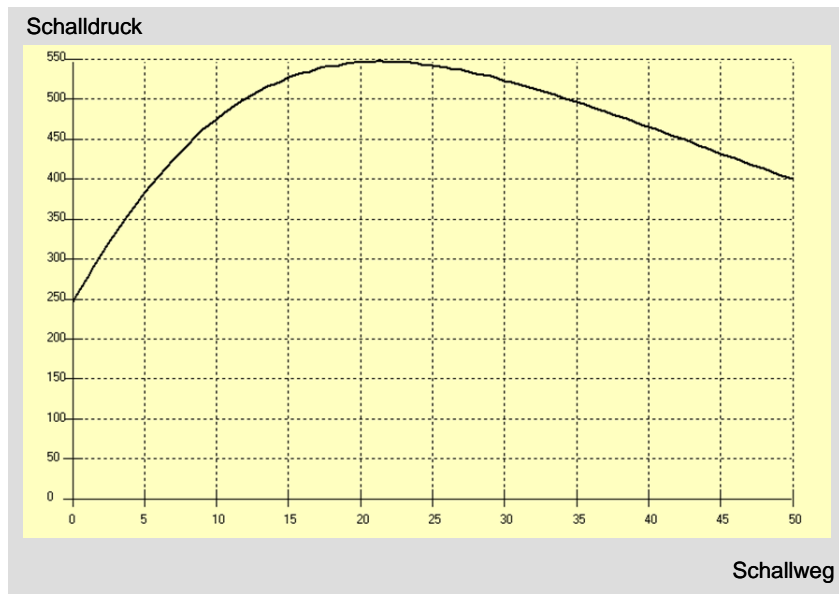
### **Justierkörper**

Für die Empfindlichkeitsjustierung wurde in Anlehnung an SEP 1927 ein Justierkörper mit Flachbodenbohrungen (FBB) in den entsprechenden Tiefen benötigt. Hierfür wurden aus einem Wellenabschnitt von ca. 50 mm Dicke zwei Justierkörper (je eine Halbschale) angefertigt: Eine für die Prüfung von außen mit FBB von innen und eine für die Innenprüfung mit FBB von außen. Die Wanddicke der Justierkörper beträgt ca. 45 mm und es wurden von der jeweiligen Seite FBB mit einem Durchmesser von 1,0 mm in 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 mm Tiefe eingebracht. An diesen Justierkörpern wurden die notwendigen Prüfparameter und die DAC-Kurven ermittelt, die für die Prüfung von außen bzw. innen notwendig waren.

### **Prüfung von der äußeren Mantelfläche**

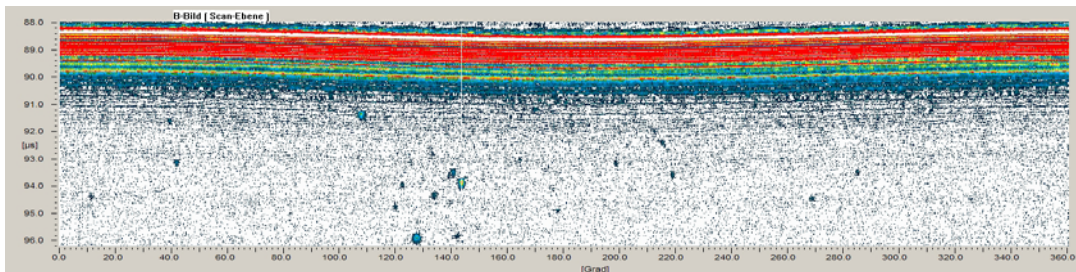
Für die Prüfung von der äußeren Mantelfläche aus (siehe Bild 4) wurde ein Fokusprüfkopf mit einer Frequenz von 10 MHz, einem Schwingerdurchmesser von 20 mm und einem Fokus von 200 mm eingesetzt. Die Wasservorlaufstrecke wurde so gewählt, dass der Fokus

auf eine Materialtiefe von 12 mm bis 35 mm optimiert war (siehe Bild 5). Die Wasservorlaufstrecke wurde mit dem Simulationprogramm Array3D SE berechnet und optimiert.



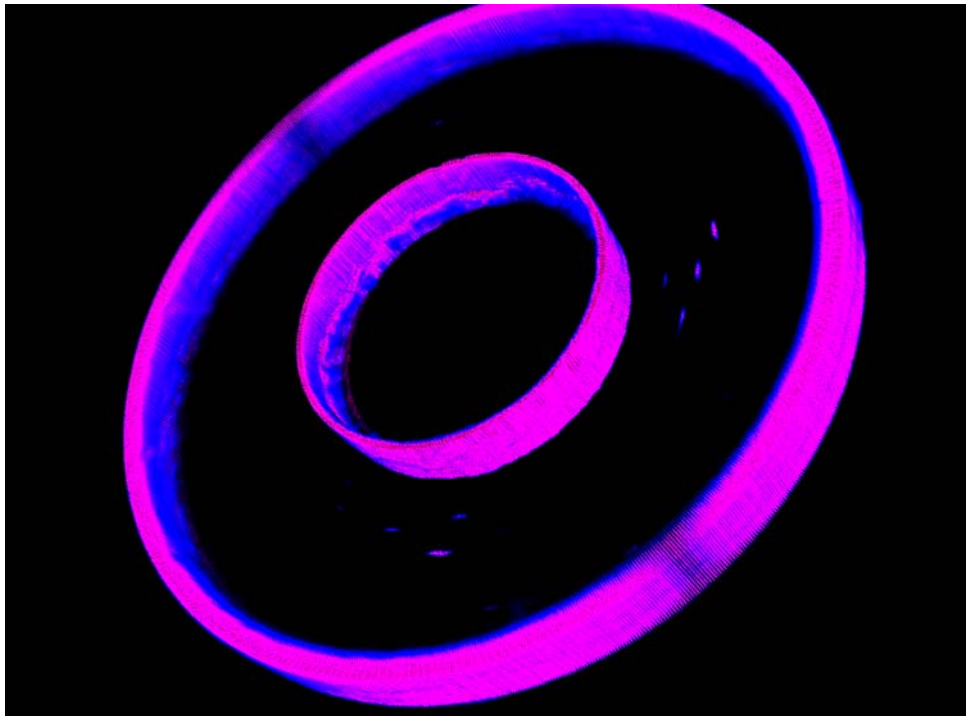
**Bild 5.** Schalldruckverteilung Außenprüfung

Bild 6 zeigt beispielhaft ein 2D-Prüfresultat dieser Messung in einer Schnittebene. Mit dieser Anordnung konnten Anzeigen bis zu KSR 0,125 mm an verschiedenen Radsatzwellenstählen bewertet werden.



**Bild 6.** B-Bild Außenprüfung

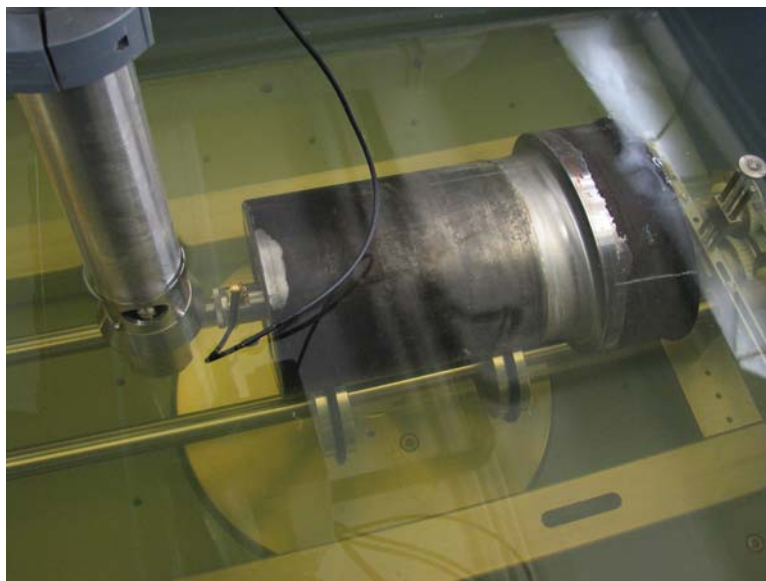
Mit Hilfe einer 3D-Visualisierung wurde ein Prüfbereich mit natürlichen Reflektoren rekonstruiert. Die 3D-Ansicht (Bild 7) gibt eine gute Übersicht über die räumliche Lage der Reflektoren. Die Fehlergrößenbestimmung erfolgte durch Amplitudenauswertung mit den klassischen A-, B- und C-Bild-Darstellungen.



**Bild 7.** 3D-Darstellung

### **Prüfung von der inneren Mantelfläche**

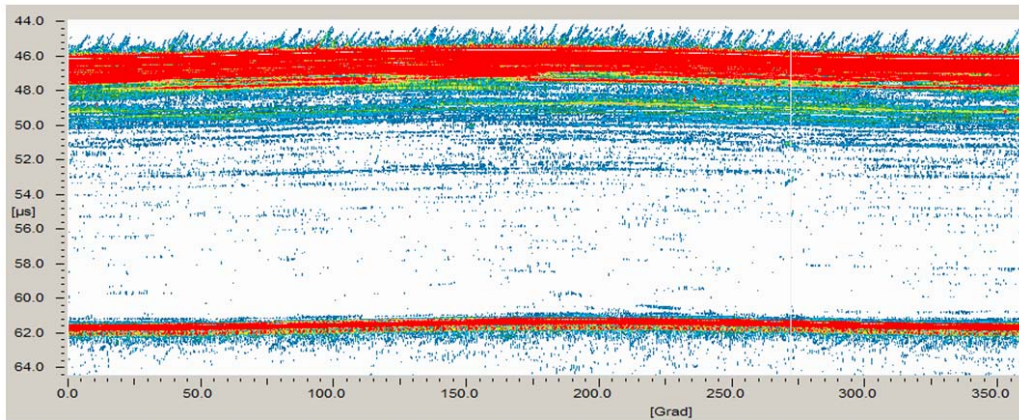
Die Prüfung von der inneren Mantelfläche aus wurde auch mit dem oben genannten Fokusprüfkopf durchgeführt (Bild 8). Um die notwendige Wasservorlaufstrecke realisieren zu können, wurde eine Prüfkopf-anordnung gewählt, bei der der Prüfkopf in Richtung Wellenachse schallt und das Schallbündel mit Hilfe eines akustischen Spiegels in die radiale Ebene umgelenkt wird. Der Fokus wurde auf eine Materialtiefe von 40 mm eingestellt.



**Bild 8.** Prüfanordnung Innenprüfung

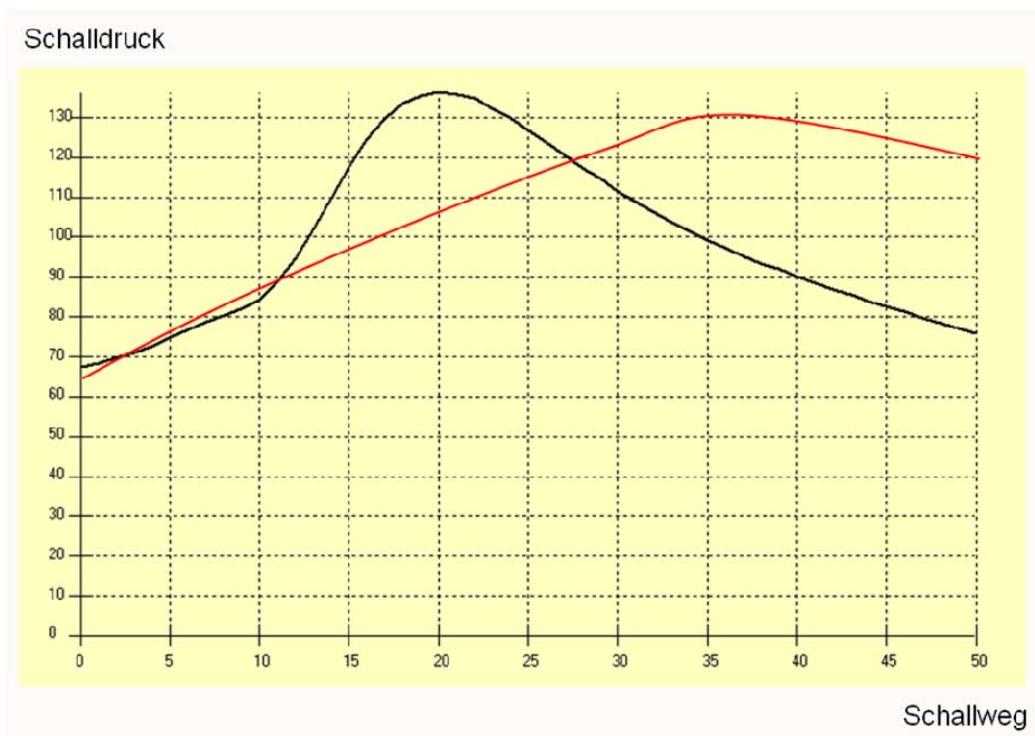
Mit dieser Anordnung konnte eine Bewertung von Anzeigen bis zu KSR 0,2 mm an verschiedenen Radsatzwellenstählen im an die äußere Mantelfläche angrenzenden Bereich vorgenommen werden. Bild 9 zeigt beispielhaft ein Prüfergebnis dieser Messung.

Im Fall der Innenprüfung werden, durch den Einfluss der stark gekrümmten Oberfläche der Bohrung auf das Schallfeld, die optimalen Bedingungen für einen Reflektornachweis nicht erreicht.



**Bild 9.** B-Bild Innenprüfung

Aus diesem Grund wurde für diese Geometrie mit Hilfe des Programms Array3D SE versucht, einen optimalen Prüfkopf zu entwerfen. Bild 10 zeigt den gewünschten Schalldruckverlauf (rote Linie), der durch die Prüfkopfoptimierung erreicht werden soll, und den bisher erzielten Kompromiss (schwarze Linie). Es hat sich gezeigt, dass für die optimierte Anordnung entweder ein Gruppenstrahlerprüfkopf oder eine spezielle akustische Linse benötigt wird, um die starke Krümmung der Mantelfläche der Innenbohrung auszugleichen. Die Arbeiten zur Realisierung eines solchen Prüfkopfes dauern zum Zeitpunkt der Berichtserstellung noch an.



**Bild 10.** Schalldruckverteilungen Innenprüfung



## **Zusammenfassung**

Für Wellen mit Längsbohrung wurden im Labormaßstab die Möglichkeiten untersucht, rissartige Fehler auf der äußeren Mantelfläche und Volumenfehler zu detektieren und hochauflösend zu analysieren.

Mit Hilfe des Einsatzes eines Gruppenstrahlerprüfkopfes unter Verwendung von Longitudinalwellen konnten an zwei typischen Querschnittsübergängen von Eisenbahnradsatzwellen im Labormaßstab Messdatensätze aufgenommen werden, die eine anschließende Auswertung mit Hilfe von SAFT-Algorithmen erlauben. Hierbei konnten die Anzeigen von Testreflektoren in Form von Sägeschnitten mit Tiefen von 1 mm und 2 mm nachgewiesen und eindeutig Reflexionsorten innerhalb des Wellenvolumens zugeordnet werden. Eine Bestimmung der Tiefenausdehnung der Reflektoren war bei den vorliegenden Testkörpern nicht in allen Fällen möglich.

Der Einsatz fokussierender Tauchtechnikprüfköpfe hat im Labormaßstab gezeigt, dass man mit der Ultraschallprüfung in der Lage ist Anzeigen aufzulösen, die zur Bestimmung eines Reinheitsgrades äquivalent zur mikroskopischen Bestimmung herangezogen werden können. Vorteil dieser Technik ist, dass das Prüfverfahren zerstörungsfrei angewendet werden kann. Im Falle der Prüfung aus der Innenbohrung heraus kann diese Technik sogar bei der wiederkehrenden Prüfung Anwendung finden. Aufgrund der starken Krümmungsradien der Mantelflächen muss eine simulationsgestützte Optimierung der Prüfkopfparameter erfolgen.