

# Radsatzwellenprüfung im eingebauten Zustand

Thomas HECKEL<sup>1</sup>, Rainer BOEHM<sup>1</sup>, Harry FEHLAUER<sup>1</sup>, Daniel BRACKROCK<sup>1</sup> Wolfgang SPRUCH<sup>2</sup>, Ulf BIELAU<sup>2</sup> <sup>1</sup> BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin <sup>2</sup> Büro für Technische Diagnostik GmbH & Co. KG BTD, Brandenburg

**Kurzfassung.** Um den sicheren Betrieb von Schienenfahrzeugen zu gewährleisten, wird das Rad-Schiene System in regelmäßigen Intervallen auf viele verschiedene Materialfehler und Ermüdungserscheinungen überprüft. Sicherheitsrelevante Bauteile sind z.B. die Radsatzwellen, welche einer hohen Wechselbeanspruchung unter unterschiedlichen Betriebszuständen unterliegen. Am ausgebauten Radsatz werden bei der regelmäßigen Inspektion daher eine Vielzahl zerstörungsfreier Prüfverfahren eingesetzt.

Ziel des hier vorgestellten Projektes ist es, eine automatisierte Ultraschallprüftechnik auf Basis der Phased-Array-Technik zu entwickeln, die im eingebauten Zustand mit einer minimalen Anzahl an Ankoppelstellen die gesamte Radsatzwellenoberfläche auf betriebsbedingte Schädigungen überprüft.

Hierzu werden zusätzlich zur Entwicklung speziell angepasster Ultraschallsensoren in diesem Projekt Signalverarbeitungsalgorithmen eingesetzt, um die bildhafte Darstellung der Prüfergebnisse zu verbessern.

Eine große Herausforderung stellen hierbei die schwierigen Ankoppelbedingungen aufgrund der komplexen Geometrien an der Radsatzwelle selbst sowie Farbschichten und Schmutz auf der Radsatzwelle dar.

Auf der akustischen Seite kommt ein Phased-Array-Prüfkopf zum Einsatz, der mit einer akustischen Linse und einer Wasservorlaufstrecke arbeitet. Auf der Seite der Signalverarbeitung werden Algorithmen zur Unterdrückung von Formanzeigen und zum automatischen Empfindlichkeitsausgleich eingesetzt.

## Einführung

Um den sicheren Betrieb von Schienenfahrzeugen zu gewährleisten, wird das Rad-Schiene System in regelmäßigen Intervallen auf viele verschiedene Materialfehler und Ermüdungserscheinungen überprüft. Die Radsatzwellen gehören dabei zu den sicherheitstechnisch sensiblen Bauteilen, die im Betrieb großen Wechselbelastungen ausgesetzt sind. Dadurch besteht die Gefahr, dass durch kleine Beschädigungen oder Materialungänzen Risse initiiert werden, die durch die ständig wechselnde Dehnungsrichtung des Materials wachsen und im Extremfall zum Bruch der Achse führen können. Um eine hohe Sicherheit des Bahnverkehrs gewährleisten zu können, werden in regelmäßigen Wartungsintervallen verschiedene zerstörungsfreie Prüfverfahren am ausgebauten Radsatz eingesetzt.

Ziel des hier vorgestellten Projektes ist es, eine automatisierte Ultraschallprüftechnik auf Basis der Phased-Array-Technik zu entwickeln, die die gesamte Radsatzwellenoberfläche auf betriebsbedingte Schädigungen überprüft, ohne dass die Welle ausgebaut



werden muss. Eine Prüfung ohne Demontage würde die Prüfkosten erheblich reduzieren und z.B. eine Verkürzung der Prüfintervalle erheblich vereinfachen.

Die offensichtlichen Nachteile bei der Ultraschallprüfung der Radsatzwellen im eingebauten Zustand sind die beschränkte Zugänglichkeit und zumindest die bei einigen Wellentypen damit verbundene reduzierte Anzahl von Ankoppelstellen. Schmutz, Lackierungen und Beschichtungen stellen ebenfalls eine Herausforderung dar, da die Ankoppelung schwächer und auch weniger gleichmäßig ist. Dies stellt zusätzlich höhere Anforderungen die Auswertung. Um diesen Nachteilen zu begegnen wurde die Prüftechnik in vielfacher Hinsicht weiter entwickelt. Der Stand der Entwicklung wird in dem Beitrag vorgestellt.

- 1. Verringerung der Ankoppelschwankungen durch lokale Tauchtechnik
- 2. Steigerung der Empfindlichkeit
- 3. Erweiterung des Einschallwinkelbereichs
- 4. Verbesserung der Fehleranzeigenerkennbarkeit durch Signalverarbeitung

## 2. Verbesserung der Prüftechnik

#### 2.1 Ankoppeltechnik: lokale Tauchtechnik



Abb. 1. Wasserspalt: "lokale Tauchtechnik"

Eine definierte Wasservorlaufstrecke (siehe Abb. 1) reduziert in gewissem Maße die Echohöhenschwankungen, die von Unebenheiten und Beschichtungen auf der Koppelfläche verursacht werden.

### 2.2 Ankoppeltechnik: Linsentechnik für den Krümmungsausgleich

Grundsätzlich verspricht ein größerer Prüfkopf eine größere Empfindlichkeit. In Richtung der Wellenachse, die in der Einschallebene des Phased Arrays liegt, ist der Platz wellentypabhängig zum Teil stark begrenzt und eine Verlängerung kaum möglich. Vergrößert man die Breite des Prüfkopfs, also die Abmessung senkrecht zur Einschallebene über das übliche Maß von ca. 14 – 16 mm (bei Wellendurchmessern von 160 mm) hinaus, dann gelingt eine Empfindlichkeitserhöhung nur mit zusätzlichem Krümmungsausgleich.

Abb. 2 Bild 1 zeigt die simulierte Echohöhenverteilung eines kleinen Reflektors für einen 16 mm breiten Prüfkopf. Bei einem doppelt so breiten Prüfkopf (Abb. 2 Bild 2) führt die Defokussierung an der zylindrischen Bauteiloberfläche nur zu einem stärker aufgeweiteten Schallbündel. Die maximale Echohöhe wächst nicht.

Wird die Defokussierung jedoch kompensiert (Abb. 2 Bild 4), dann entspricht der berechnete Echohöhengewinn der Vergrößerung der Schwingerfläche. Wie in Abb. 2 Bild 3 zu sehen, hat bei einem schmalen Prüfkopf der Krümmungsausgleich keine nennenswerte Wirkung.

Durch die lokale Tauchtechnik bietet sich an, für den Krümmungsausgleich den Wasserspalt zwischen dem Plexiglaskeil und der Radsatzwelle aus Stahl linsenförmig auszubilden. Das Prinzip der fokussierenden Wasserlinse ist in Abb. 3 skizziert.



Abb. 2. berechnete Schallfelder (Empfindlichkeitsverteilungen) verschieden breiter Prüfköpfe mit und ohne Krümmungskompensation



Abb. 3. Krümmungsausgleich durch Wasserlinse

Abb. 4. gemessene Echohöhe an 2 mm Sägeschlitz

Die vergleichende Messung der Echohöhen (Abb. 4) mit und ohne Wasserlinse an einem 2 mm tiefen Sägeschnitt als Testreflektor bestätigt die Wirkung des Krümmungsausgleichs mit der Linse. Aufgrund der geometrischen Bedingungen ist die Fokussierung der Linse nicht unabhängig vom Einschallwinkel und die gewählte Linse ein Kompromiss. Im Beispiel ist der Echohöhengewinn für die großen Einschallwinkel mit + 11 dB am größten.

### 2.3 Prüfkopfdesign

Für die meisten Anwendungen von Phased Array Winkelprüfköpfen ist die verbreitete Technik mit 16 Elementen ausreichend. Dabei erlaubt der übliche Schwenkwinkelbereich von  $40 - 70^{\circ}$  auch relativ große Elementbreiten bis zum ca. 1.5fachen der Wellenlänge. Bei der hier gegebenen Aufgabenstellung ist es jedoch besonders vorteilhaft, wenn bei eingeschränkter Positionierungsfreiheit der Prüfköpfe auf der Radsatzwelle die Empfindlichkeit an den Rändern des Schwenkbereichs nicht zu schnell abfällt. In Abb. 5 sind die berechneten Richtcharakteristiken für zwei Phased Arrays gegenüber gestellt (3 MHz,

 $\alpha_0 = 45^\circ$  trans). Die Richtcharakteristiken der ganzen Arrays bei 70, 45, 35 und 13° werden von den Richtcharakteristik der einzelnen Elemente begrenzt. Diese sind normiert in den Bildern mit dargestellt und bilden die jeweils die Einhüllende Kurve für die Winkelabhängigkeit der Echohöhe des Arrays. Der Gewinn bei sehr großen und sehr kleinen Einschallwinkeln entscheidet im Zweifel über die Nachweisgrenze.



**Abb. 5.** Richtcharakteristiken zweier Phased Arrays. Fall 1: 16 El., d = 1.4 mm; Fall 2: 32 El., d = 0.9 mm, Schwenkwinkel  $\alpha = 70^{\circ}$  (grün),  $\alpha = 45^{\circ}$  (dunkelblau),  $\alpha = 35^{\circ}$  (hellblau),  $\alpha = 13^{\circ}$  (braun)

2.4 Signalverarbeitung: Lösungsansätze zur Verbesserung der Trennung von Form- und Fehleranzeigen



Abb. 6. Radsatzwellentestkörper mit Sägeschnitten als Testfehler

Wie in Abb. 6 skizziert erscheinen die Testfehler unter verschiedenen Winkeln; siehe auch Tabelle in Abb. 7. Die Ergebnisdarstellung in Abb. 7 zeigt Time Displacement (TD)-Bilder, die auf der Zeitachse die Ausschnitte aus den A-Bildern enthalten, die beim jeweiligen Einschallwinkel aus dem Schallwegbereich der gegenüberliegenden Oberfläche kommen.



Abb. 7. TD-Bilder aller Einschallwinkel ohne (A) und mit (B) Signalverarbeitung, TGC Gewichtung

Im Bild A in Abb. 7 sind alle Echosignale enthalten und nur mit einem generellen Winkelund Schallwegausgleich gewichtet. Im Bild B in Abb. 7 ist eine Time Gain Control (TGC) Kennlinie überlagert, die an den Stellen in den A-Bildern, an denen die Echos der Querschnittsübergänge liegen (sogenannte Formanzeigen), die Empfindlichkeit absenken, um die Formanzeigen zu unterdrücken und / oder die Empfindlichkeit in der Nachbarschaft der Formanzeigen zu erhöhen, um dort liegende Fehleranzeigen hervor zu heben. Auf diese Weise sind im Ergebnisbild Fehleranzeigen optisch deutlich leichter erkennbar. Die Amplitudenbewertung einer gefundenen Fehleranzeige muss selbstverständlich an den Signaldaten erfolgen. originalen Die TGC-Kennlinien wurden hier aus der Radsatzwellengeometrie abgeleitet, die hierfür genau bekannt sein muss.



Abb. 8. Ausschneiden der Formanzeigen durch signalbasierte Anpassung der Verstärkung

Bei der zur Erzeugung von Abb. 8 angewandten Methode wird der Charakter der geometriebedingten Anzeigen genutzt, um adaptive TGC-Kennlinien automatisiert zu erzeugen. Hierbei werden mit Hilfe eines Softwarealgorithmus in den einzelnen A-Bildern Formanzeigen identifiziert. In jeder Prüffunktion werden anschließend über die aus den Positionen der Formanzeigen berechnete TGC-Kennlinie die Formanzeigen weitgehend unterdrückt und anschließend das B-Bild berechnet.

### 3. Zusammenfassung

Im Beitrag werden Entwicklungen zur Verbesserung der Radsatzwellenprüfung beschrieben, die notwendige Voraussetzungen sind auf dem Weg zur möglichst vollautomatischen Ultraschallprüfung von Radsatzwellen im eingebauten Zustand.

Die als lokale Tauchtechnik bezeichnete Ankoppeltechnik reduziert die Echohöhenschwankungen, die von Unebenheiten und Beschichtungen auf der Koppelfläche verursacht werden. Zur Erhöhung der Empfindlichkeit wird die Breite des Prüfkopfes gegenüber üblichen Abmessungen etwa verdoppelt. Die dann notwendige Krümmungskompensation, die mit Hilfe einer Wasserlinse realisiert wird, die sich gut in die lokale Tauchtechnik integrieren lässt, führt zu einem Echohöhengewinn von bis zu 11 dB.

Durch schmalere Schwingerelemente wird der Schwenkwinkelbereich des Phased Arrays vergrößert. Die auf 32 vergrößerte Anzahl der Elemente führt zu einer gesamten Schwingerfläche von  $32 \times 32 \text{ mm}^2$  mit entsprechender Empfindlichkeit.

Die Erkennbarkeit echter Fehleranzeigen wird dadurch verbessert, dass die sogenannten Formanzeigen unterdrückt werden und die entstehenden Bilder viel leichter auszuwerten sind. Für die Algorithmen zur Erzeugung der schallwegabhängigen Verstärkung für die Bildbearbeitung gibt es verschiedene Ansätze. Sie befinden sich in Entwicklung und werden an die Randbedingungen der Aufgabenstellung angepasst.

## Referenzen

[1] Th. Heckel, R. Boehm, D. Brackrock, H. Fehlauer, W. Spruch, U. Bielau "Wheel Set Axle Inspection Using Advanced Phase Array Approach", ECNDT 2014, Prag (Tschechien)