

30 Jahre AUROPA - Zuverlässige Prüfung der Lauffläche von Eisenbahnrädern im Überrollbetrieb

Frank NIESE¹, Michael HANS¹, Rainer NEUSCHWANDER¹,
Camillo DE LA RIVA², Peter NEUMANN²

¹ Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken

² Hegenscheidt-MFD GmbH & Co. KG, Erkelenz

Kurzfassung. Über 30 Jahre kontinuierliche Entwicklungsarbeit hat die Automatische Ultraschall-Rad-Oberflächen-PrüfAnlage AUROPA zu einem zuverlässigen Instrument für den sicheren Schienenschnellverkehr werden lassen. Sie dient zum Nachweis von rissartigen Einzelfehlern in der Lauffläche von Eisenbahnrädern und liefert zudem den integralen Verschleißzustand der Lauffläche. Es werden Ultraschall-Oberflächenwellen eingesetzt, die die Lauffläche bis zu einer Tiefe von etwa 8 mm abtasten.

In diesem Beitrag werden die aktuellen Entwicklungen und der erreichte Entwicklungsstand dargelegt. Zusätzlich werden die Ergebnisse einer umfangreichen Validierung vorgestellt und die Zuverlässigkeit anhand von Praxisbeispielen belegt.

Einführung

Über 30 Jahre kontinuierliche Entwicklungsarbeit hat die Automatische Ultraschall-Rad-Oberflächen-PrüfAnlage AUROPA zu einem zuverlässigen Instrument für den sicheren Schienenschnellverkehr werden lassen. Es dient zum Nachweis von rissartigen Einzelfehlern in der Lauffläche von Eisenbahnrädern und liefert zudem den integralen Verschleißzustand der Lauffläche. Es werden Ultraschall-Oberflächenwellen eingesetzt, die die Lauffläche bis zu einer Tiefe von etwa 8 mm abtasten.

Die Ultraschallwandlung erfolgt über ElektroMagnetische UltraSchall (EMUS) Prüfköpfe, die in ein Messgleis integriert sind und sogar eine Prüfung im Überrollbetrieb zulassen. Der wesentliche Vorteil dieser Technik liegt darin, dass direkt im Prüfobjekt Rayleigh-Wellen angeregt und abgegriffen werden können und somit ohne Koppelmittel gearbeitet werden kann. Dadurch kann auch bei niedrigen Umgebungstemperaturen zuverlässig geprüft werden. Zudem kann sich die Oberflächenwelle über mehrere Umläufe praktisch ungestört ausbreiten, was für die Anwendung des Messprinzips von entscheidender Bedeutung ist.

Allerdings ist die EMUS-Technik auch empfindlich gegenüber EM-Störungen, die insbesondere von der Antriebstechnik der Triebfahrzeuge ausgesendet wird. In den letzten Jahren konnten durch mechanische, elektrische und messtechnische Maßnahmen erhebliche Fortschritte in der Signalqualität erreicht werden. Zusätzlich wurden angepasste digitale Entstör- und Auswertalgorithmen implementiert, die eine zuverlässige Aussage über den Radsatzzustand ermöglichen.



Im Labor wurde eine Validierung des Prüfsystems mit Laufflächenfehlern unterschiedlicher Ausrichtung, Lage und Größe durchgeführt. Dazu wurden über 6700 Einzelmessungen sowohl im Stand- als auch im Überrollbetrieb durchgeführt, um eine belastbare Datenbasis für eine POD-Auswertung zu erhalten.

Wiederholungsmessungen in Bahnbetriebswerken haben die jetzt erreichte hohe Reproduzierbarkeit der Untersuchungsergebnisse in der Praxis bestätigt.

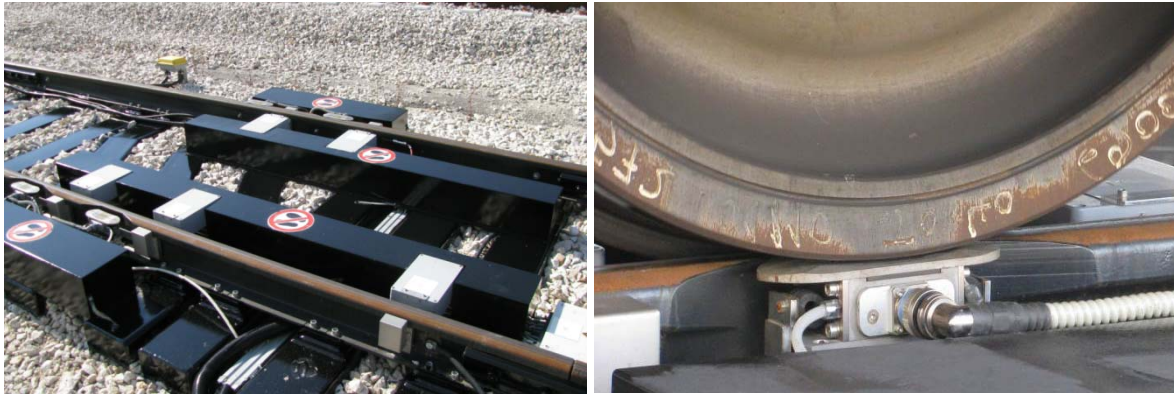


Abb. 1. Moderne Ausführungsform eines AUROPA-Inspektionsgleises (links); Eisenbahnrad auf EMUS-Prüfkopf im Überrollbetrieb (rechts)

Funktionsprinzip

Die Prüfung der Lauffläche erfolgt mit Ultraschall-Oberflächenwellen (Rayleigh-Wellen), die sich bidirektional, in und entgegen der Uhrzeigerrichtung ausbreiten. Sowohl die Anregung als auch der Abgriff der Ultraschallsignale erfolgt über in das Gleis integrierte elektromagnetische Ultraschall (EMUS) Prüfköpfe (Abb. 1). Diese Prüftechnik zeichnet sich dadurch aus, dass ohne Koppelmittel gearbeitet werden kann. Dadurch wird zum einen Messungen im Überrollbetrieb ermöglicht, zum anderen können sehr effektiv Rayleigh-Wellen in den Laufflächen erzeugt und detektiert werden. Über Lichtschranken am Gleis wird der Triggerzeitpunkt bestimmt, sodass die Schussauslösung genau dann stattfindet, wenn das Rad genau über den betreffenden Prüfkopf ist. Insgesamt sind 4 Prüfköpfe verbaut, zwei auf jeder Seite, dadurch lassen sich Totzonenbereiche abdecken sowie die Redundanz und damit die Messsicherheit erhöhen.

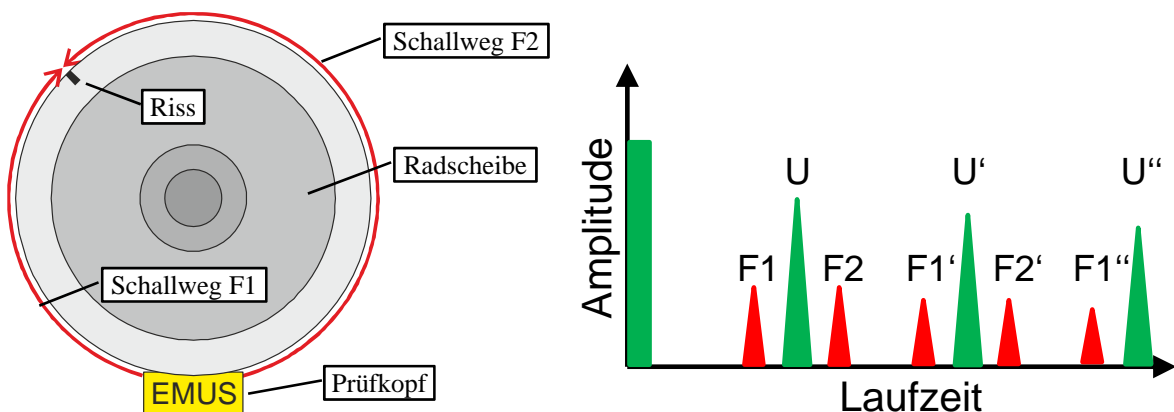


Abb. 2. Schematische Darstellung des Prüfprinzips und der Schallwege (links); Ultraschall-A-Bild im Fall einer fehlerhaften Radlauffläche, U Umlaufsignal, F Fehlersignal, Wiederholungsanzeigen sind mit ' bzw. '' gekennzeichnet (rechts)

Im fehlerfreien Fall breiten sich die Ultraschallimpulse während der Kontaktzeit mit dem Prüfkopf mehrere Umläufe auf der Radlauffläche in und entgegen der Uhrzeigerrichtung aus. Im A-Bild existieren dann nur die Umlaufsignale (Abb. 2). Trifft dagegen der Ultraschallimpuls auf einen Riss mit einer radial-axialen Ausrichtungskomponente wird ein Teil der Ultraschallenergie reflektiert. Diese Echosignale können abgegriffen werden und bilden zusätzliche Anzeigen zwischen den Umlaufsignalen. Zusätzlich zu den rissartigen Einzelfehlern können auch Aussagen über den integralen Verschleißzustand der Lauffläche gemacht werden. Dazu kann z.B. das Abklingverhalten der Umlaufsignalfolge ausgewertet werden.

Weiterentwicklungen zur Verbesserungen der Prüfaussage

Elektromagnetische Ultraschall (EMUS) Prüfköpfe senden und empfangen elastische Welle auf induktive Wechselwirkung mittels Spulen und überlagerten Magnetfeldern. Die zu Empfindlichkeitssteigerung hochohmig ausgelegte Empfangsspule detektiert neben dem Ultraschallsignal auch andere elektromagnetische Signale. Dadurch registriert der Empfänger eines EMUS-Prüfkopfes neben Spannungssignalen einer Ultraschallwelle auch solche von extern induktiv eingekoppelten (Stör-) Signalquellen. Beide Durchlaufen die gleiche Verstärkungs- und Filterkette und können nicht ohne weiteres voneinander unterschieden werden. Um einen Eindruck der realen Störsituation zu erhalten sind exemplarisch die HF-Urdaten einer AUROPA-Messung in Abb.3 dargestellt: Die Umlaufsignale sind kaum zu erkennen und das ganze A-Bild ist mit periodischen Störsignale überlagert.

Damit dennoch aussagekräftige Messungen mit dieser Technik im industriellen Umfeld möglich sind, wurden bei der AUROPA ein komplettes Maßnahmenbündel zur Entstörung, Signalverbesserung und Fehlersignalidentifikation erfolgreich erprobt und in die Anlage integriert.

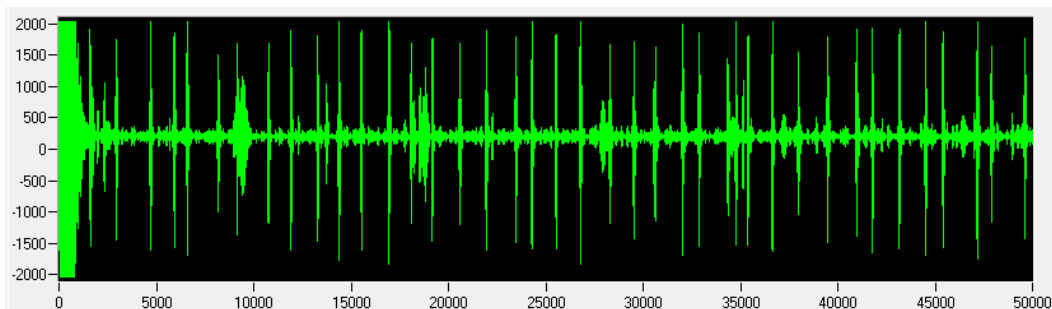


Abb. 3. Gestörte HF-Daten

2.1 digitale Phasenfilterung

Eine der klassischen Maßnahmen zur Elimination von Störsignalen ist das Differenzprinzip. Hierbei werden zwei in Abtastrichtung nahe benachbarte und elektrisch entkoppelte Empfangssonden verwendet, deren Ausgänge in Differenzgeschaltet sind. Übertragen auf die EMUS-Technik muss dazu das Differenzprinzip sowohl für die räumliche Komponente (Spurwellenlänge) wie auch die zeitliche Komponente (Frequenz) des Ultraschallsignals angewendet werden. Damit erreicht man, dass die Ultraschallsignale in dem Empfängerpaar **gegenphasige** Spannungen induzieren, während von außen einwirkende Störsignale **gleichphasige** Signale erzeugen.

Die klassische analoge Differenzbildung wirkt allerdings nur dann zuverlässig als Entstörung, wenn sowohl Gleichphasigkeit als auch Amplitudengleichheit der Störsignale

vorliegt. Dies ist jedoch in der Praxis nur in den wenigsten Fällen realisierbar. Die Abb. 4 (oben) zeigt die analoge Differenzbildung angewandt auf die Daten aus Abb. 3.

Eine deutliche bessere Filterwirkung kann dagegen mit einer numerischen Phasenfilterung erreicht werden. Dazu wird die relative Phasenlage zwischen den zwei Empfangssignalen berechnet. Alle Amplitudenwerte, deren relative Phasen nicht in einem parametrierbaren Intervall um 180° liegen, werden zu null gesetzt und zwar unabhängig von der Amplitude. Danach wird noch die Länge der bisher übrig gebliebenen Signale bewertet. Da ein Ultraschallsignal üblicherweise mehrere Schwingungszyklen umfasst, wird auch der Schwellwert hierfür entsprechend eingestellt. Wird er unterschritten werden auch diese Amplitudenwerte auf null gesetzt. Abschließend werden die gefilterten Signale der beiden Kanäle zusammengeführt. Dadurch kann eine scharfe Trennung zwischen Ultraschall und Stör- sowie Rauschsignalen erreicht werden (Abb. 4 unten). Weiter Informationen zur Phasenfilterung können auch [1] entnommen werden.

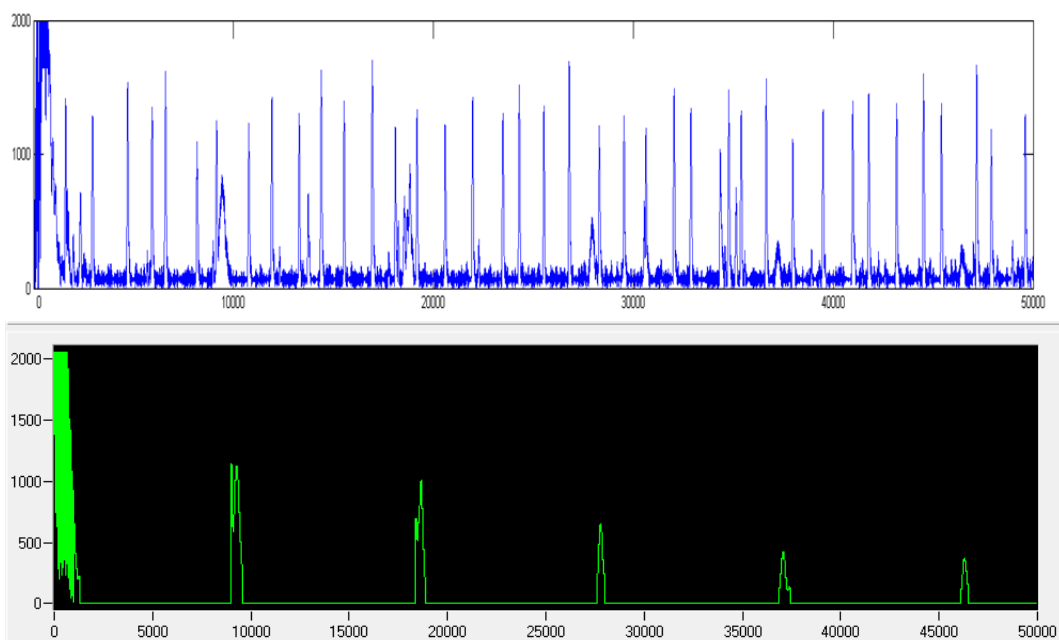


Abb. 4. Analoge Differenzbildung (oben), numerische Phasenfilterung (unten)

2.2 Plausibilitätsbetrachtungen

Eine weitere Verbesserung der Prüfaussage ließ sich durch Plausibilitätsbetrachtungen der einzelnen Anzeigen in Ultraschall-A-Bild erreichen. Hintergrund hierzu ist, dass aufgrund der kreisförmigen Geometrie des Prüfobjektes und der bidirektionalen Abstrahlcharakteristik der verwendeten Prüfköpfe sich die Anzeigen rissartiger Laufflächenfehler mehrfach im A-Bild wiederholen. Die Positionen der Wiederholungen sind mathematisch eindeutig bestimmbar. In Abb. 2 sind die Wiederholungsanzeigen schematisch eingetragen. Eine Anzeige wird nur dann vom Auswertalgorithmus als Fehler angezeigt, wenn eine parametrierbare Anzahl von Wiederholungen erreicht wird.

2.3 Kontrolle des Triggerzeitpunktes

Neben den Maßnahmen zur Entstörung und Fehlererkennung ist auch die Einstellung des Triggerzeitpunktes ein entscheidender Parameter für die Signalqualität. Nur wenn bei korrektem Kontakt zwischen Rad und Prüfkopf geschossen wird, ist eine maximale Wandlungseffizienz vorhanden. Eine Kontrolle bzw. Einstellhilfe wurde in das Prüfsystem

integriert. Dazu wird während des Überrollvorgangs die senkrechte Magnetfeldstärke zwischen Prüfkopf und Rad gemessen. Ist das Rad zentrisch über den Prüfkopf erreicht das Feld sein Maximum. Gleichzeitig werden in den Messschrieb die Triggerzeitpunkte eingeblendet (Abb. 5). In einem iterativen Prozess können somit die optimalen Einstellungen vorgenommen werden.

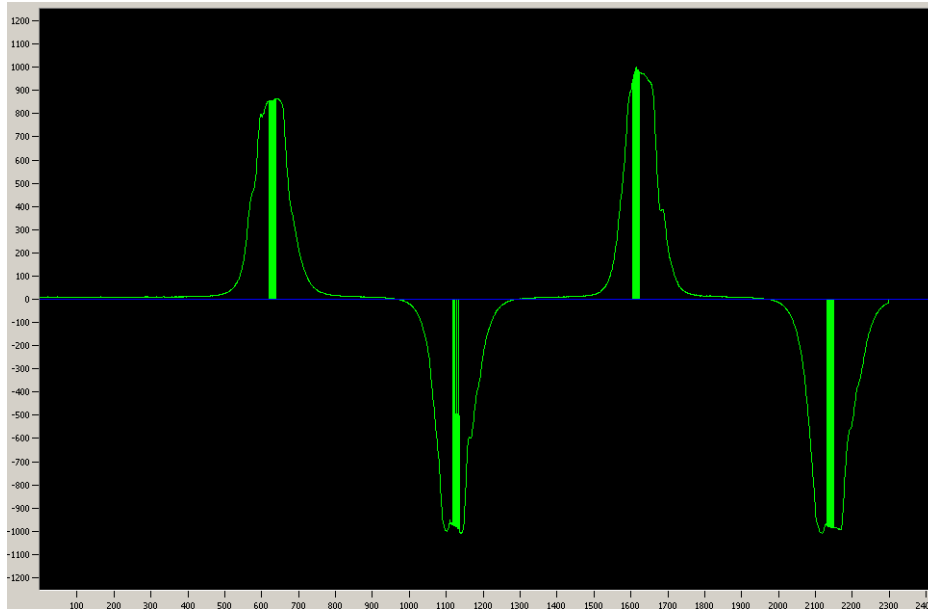


Abb. 5. Magnetfeldverlauf im Überrollprozess mit eingeblendeter Triggerauslösung



Abb. 6. EMUS-Prüfkopf mit mechanisch entkoppelter Vorortelektronikbox

2.5 konstruktive und elektronische Optimierungen

Eine weitere Möglichkeit die Signalqualität zu verbessern und dadurch die Zuverlässigkeit der Prüfaussage zu steigern, bietet die Messoption Mehrfachtrigger. Bei einer Überrollgeschwindigkeit von bis zu 5 km/h ergibt sich zwischen Rad und Prüfkopf eine Kontaktzeit von etwa 20 ms. Dieser Zeitraum ist ausreichend, um mehrere Schüsse auszulösen. Deshalb wurde die Elektronik dahingehend erweitert, dass eine Sequenz von bis zu 4 Messungen erfolgt. Die einzelnen Ergebnisse werden separat verarbeitet und

anschließend zusammengeführt. Dadurch erfolgt eine zusätzliche deutliche Störreduzierung.

Wird die Stärke der Ultraschallsignale erhöht, verbessert sich damit gleichzeitig das Signal-Rauschverhältnis. Deshalb wurden auch in diese Richtung Optimierungsarbeiten durchgeführt. Sie betreffen zum einen die Signalerzeugung: durch eine leistungsfähigere Endstufenelektronik konnte die Sendeleistung erhöht werden.

Zum anderen wurde die mechanische Kopplung zwischen Radoberfläche und Prüfkopf verbessert: Es wurde sowohl der Kontaktbereich an die Radkontur angepasst als auch die Massenverteilung des Prüfkopfes verändert. Dadurch wurde die (mechanische) Dynamik soweit optimiert, dass auch Messüberfahrten mit höheren Überfahrergeschwindigkeiten möglich geworden sind (Abb. 6).

Tabelle 1. Testfehlervariation für Validierung

Fehlerparameter		Fehlerparameter	
Nutorientierung	axial, radial	axiale Schräglage	-5°, 0° und +5°
Nutlängen	10, 15, 20 und 30 mm	radiale Schräglage	-5°, 0° und +5°
Nuttiefen	1.5, 3.0 und 4.5 mm	axiale Position bzgl. Messkreis	-20, 0 und +20 mm

Tabelle 2. Ergebnisse für die Fehlerlänge bei einer Fehlertiefe von 3 mm

Störhintergrund	$a_{90/95}$	$a_{95/95}$
keine EM- Störungen (Labor)	10.3 mm	11.9 mm
mittlere Störungen (Bahnumgebung, z.B. ICE 2)	19.0 mm	20.7 mm
starke Störungen (Bahnumgebung, z.B. 101)	23.3 mm	24.8 mm

Validierung

Um nachzuweisen wie erfolgreich in der Summe alle Verbesserungsmaßnahmen bisher waren, wurde anschließend die AUROPA einer umfangreichen Validierungsprozedur unterzogen. Dazu wurde ein Testfehlerkatalog aufgestellt (Tabelle 1). Die Testfehler wurden als axiale Nuten in die neuprofilierete Lauffläche eingebracht. Pro Rad wurde jeweils nur ein einziger Testfehler eingefräst, damit die Fehlerechos eindeutig den Fehlern zugeordnet werden können.

Die Messung wurde so durchgeführt, dass jeder Testfehler mit 24 unterschiedlichen Umfangspositionen relativ zum Prüfkopf erfasst werden konnte. Insgesamt wurden dazu über 6700 Einzelmessungen durchgeführt. Die Fehleranzeigen wurden erfasst und in Gruppen (zum Beispiel konstante Nuttiefe und variable Nutlänge) zusammengestellt. Daraus lässt sich die Amplitudenverteilung zu dem jeweiligen Fehlerparameter ableiten. Diese Verteilung dienen als Eingangsgrößen für eine POD-Berechnung (Probability of Detection). In Abb. 7 ist exemplarisch eine POD-Kurve für eine 3 mm tiefe Quernut mit variabler Länge dargestellt. Bei der Auswertung der $a_{90/95}$ - bzw. der $a_{95/95}$ -Werte wurden unterschiedliche untere Schwellen zugrunde gelegt, die verschiedene Störhintergründe und damit verschiedene Betriebsszenarien nachstellen. Neben ungestörten Labormessungen wurden auch ein mittlerer Störpegel, wie er z.B. durch einen ICE verursacht wird, und ein hoher Störpegel (bedingt durch die Baureihe 101) ausgewertet (Tabelle 2).

Im Labor lässt sich somit eine Quernut mit 10.3 mm Länge und 3 mm Tiefe mit 90%-er Wahrscheinlichkeit und einem 2 Sigma-Vertrauensintervall nachweisen, selbst im stark gestörten Fall kann eine 25 mm lange Nut gleicher Tiefe sogar mit 95% Wahrscheinlichkeit sicher detektiert werden.

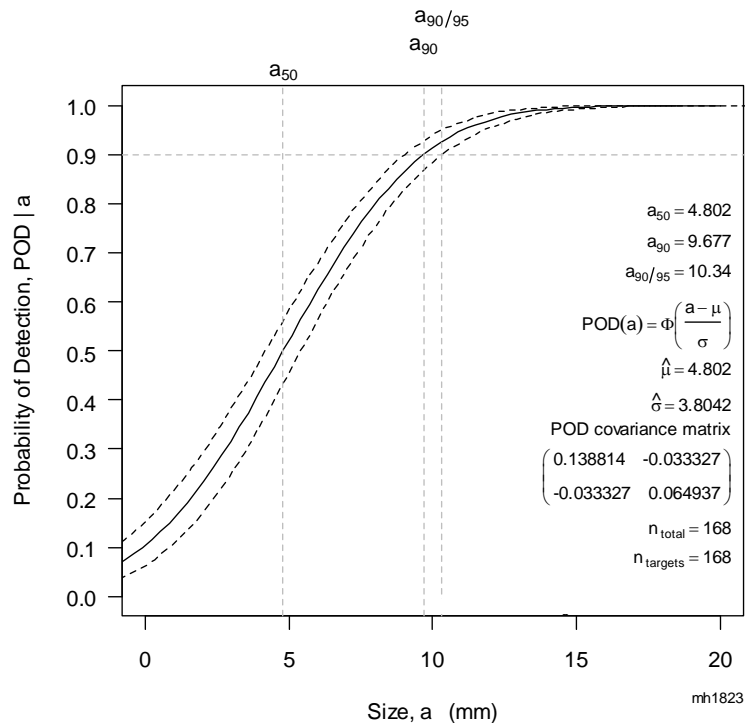


Abb. 7. POD-Kurve der Testfehlerlänge bei einer Testfehlertiefe von 3 mm und einer unteren Schwelle die dem Störhintergrund im Labor entspricht.

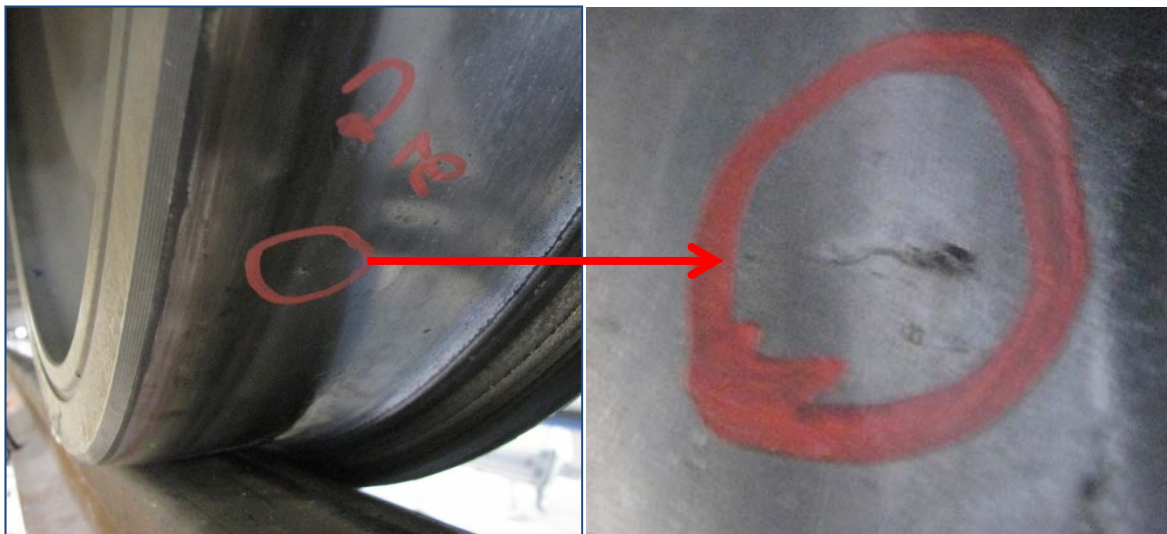


Abb. 8. Achse 2, rechtes Rad: rissartiger Fehler in der Lauffläche

Praxisbeispiele

In mehreren Messkampagnen konnte auch im Betriebswerk die Zuverlässigkeit nachgewiesen werden. Dazu passierte ein Zug mehrfach das Testgleis und die Ergebnisse wurden nebeneinandergesellt. Die Ergebnisse für die einzelnen Räder waren im hohen Maße reproduzierbar. Vereinzelt traten allerdings auch unterschiedliche Bewertungen auf. Dieses Verhalten konnte dadurch erklärt werden, dass die Fehleranzeige grenzwertig an der Bewertungsschwelle lag. Durch eine leichte Variation des Schwellwerts konnten die Anzeigen entweder sicher als Fehler detektiert werden oder als fehlerfrei gekennzeichnet werden.

Abb. 8 zeigt einen Riss in der Lauffläche der zweiten Achse auf der rechten Seite, der deutlich unter den spezifizierten Dimensionen lag. Deshalb konnte er, wie oben beschrieben, nicht bei jeder Zugüberfahrt detektiert werden. Durch eine visuelle Inspektion im Betriebswerk wurde der Fehler verifiziert.

Auf der anderen Seite trat auch das in Abb. 9 dokumentierte Fehlerbild auf. Die über den gesamten Umfang verteilten kleinen Ausbröckelungen dämpfen zum Teil im erheblichen Maße die Ausbreitung der Ultraschallsignale an der Lauffläche. Deshalb kann neben der Detektion von vereinzelt rissartigen Fehlern auch anhand der Dämpfung der Umlaufsignalfolge eine Aussage über den integralen Zustand der Lauffläche gemacht werden.



Abb. 9. Achse 24, rechtes Rad: Ausbröckelungen über gesamten Umfang der Lauffläche

Zusammenfassung

In den vergangenen Jahren durchgeführten Verbesserungsmaßnahmen haben die AUROPA zu einem zuverlässigen Messmittel für die Untersuchung der Lauffläche gemacht. Insbesondere die Arbeiten zur Signalaufbereitung (z.B. digitale Entstörung) und zur sicheren Detektion von Fehleranzeigen im A-Bild haben zu dem Ergebnis beigetragen. Durch die anschließende Validierungsprozedur wurde die Tauglichkeit als Prüfmittel nachgewiesen.

Referenzen

- [1] Salzburger, H.-J. ; Niese, F.: **Erkennung und Elimination von Störsignalen bei der Ultraschallprüfung mit EMUS-Prüfköpfen**
In: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP): DGZfP-Jahrestagung 2009. ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung : Zerstörungsfreie Materialprüfung. Berlin : Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), 2009, 9 Seiten. (DGZfP-Berichtsbände 115-CD).