

Zuverlässigkeitsbetrachtungen bei der Ultraschallprüfung von Radsatzwellen im Ausbildungsbetrieb

Thomas HECKEL ¹, Marija BERTOVIC ¹, Martina ROSENTHAL ¹,
Mato PAVLOVIC ², Ludwig BARTSCH ³, Volker MUHS ⁴, Ralf HOLSTEIN ⁵,

¹ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

² Advanced Remanufacturing and Technology Centre (ARTC), Singapore

³ Applied Validation of NDT, Berlin

⁴ DGZfP Ausbildung und Training GmbH, Ausbildungszentrum Wittenberge

⁵ DGZfP Ausbildung und Training GmbH, Berlin

Kontakt E-Mail: thomas.heckel@bam.de; marija.bertovic@bam.de

Kurzfassung. Im Rahmen der UT1-M1 Ausbildung im Ausbildungszentrum Wittenberge der DGZfP wurden statistische Untersuchungen am Beispiel der Radsatzwellenprüfung mit Testradsatzwellen durchgeführt. Diese Untersuchungen hatten zum Ziel, die wesentlichen Einflussparameter bei der Prüfung auf das Prüfergebnis zu evaluieren. Dabei wurde unter anderem die intrinsische Fähigkeit des Prüfverfahrens zum Auffinden verschiedener Reflektorgeometrien ermittelt. Die Ergebnisse der Handprüfung wurden mit Ergebnissen mechanisierter Prüfungen verglichen. Im Rahmen der Zuverlässigkeitsbetrachtung wurden die Probability of Detection (POD) und die Nachweisgrenzen ermittelt.

Ziel dieser Arbeit war es auch, menschliche und organisatorische Einflussfaktoren auf die Ultraschall-Handprüfung von Radsatzwellen zu identifizieren, um Empfehlungen zur Optimierung der Ausbildung auszuarbeiten. Dazu wurden prüfungsbezogene Risiken in der Praxis mittels Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA) analysiert sowie von den Prüfern empfundene Probleme während der Ausbildung und in der Praxis mittels Fragebogen identifiziert. Die Ergebnisse der FMEA haben gezeigt, dass während des gesamten Prozesses Fehler auftreten können, für die Gegenmaßnahmen getroffen und implementiert werden sollten. Aus den Hinweisen und Erkenntnissen wurden einige Empfehlungen zur Optimierung der Ausbildung erarbeitet.

1 Einleitung

Die wiederkehrende Prüfung von Eisenbahnradsatzwellen stellt eine wesentliche Komponente des Sicherheitskonzeptes des schienengebundenen Verkehrs dar. Die Leistungsfähigkeit dieser Prüfung in der Praxis hängt nicht nur vom eingesetzten Prüfsystem und den definierten Zulässigkeitsgrenzen ab, sondern auch z. B. von der Ausbildung der Prüfer und der organisatorischen Einbindung und Abwicklung der Prüfung.

Eine der am häufigsten gestellten Fragen in Bezug auf die Mechanisierung zerstörungsfreier Prüfverfahren bezieht sich auf die Vergleichbarkeit von manueller und mechanisierter Ultraschallprüfung. Die Fragestellung entstand durch den in den letzten



Jahren vermehrten und vielseitigen Einsatz von mechanisierten Prüfsystemen. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, als Forschungsthema die Zuverlässigkeit verschiedener Prüfverfahren unterschiedlicher Automatisierungsgrade zu untersuchen und zu vergleichen.

Die Gesamtzuverlässigkeit kann mit dem modularen Modell [1] beschrieben werden, welches die Interaktion zwischen technischen (intrinsic capability, IC), anwendungsspezifischen (application parameters, AP), menschlichen (human factors, HF) und organisatorischen (organisational context, OC) Einflussgrößen darstellt.

Bei der Ermittlung der minimalen Reflektorgröße, bei der ein Reflektor noch gefunden werden kann, bzw. welches der größte Reflektor ist, der bei der Prüfung unerkannt bleibt, spielt die Probability of Detection (POD) [2] eine wichtige Rolle.

Aus Praxis und Forschung ist bekannt, dass sich die Ergebnisse verschiedener Prüfer häufig unterscheiden. Dieser Unterschied kann in extremen Fällen bedeuten, dass ein Prüfer einen Reflektor findet und der andere ihn übersieht. Welche Faktoren zu diesem Unterschied führen und wie man die möglichen negativen Folgen dieses Unterschieds kontrollieren kann sind einige der Hauptfragen der Human-Factors-Forschung. Jedoch sind die menschlichen Faktoren im Schienenverkehr ein weniger erforschtes Thema, zumindest im Vergleich zum Luftverkehr. Obwohl in den letzten 10-15 Jahren diesem Gebiet mehr Aufmerksamkeit gewidmet wurde [3]–[5], bleiben im Schienenverkehr die menschlichen Faktoren bei der ZfP (und Instandhaltung) eines der relativ vernachlässigten Bereiche [5].

Die meisten Radsatzwellenprüfungen werden heutzutage mit automatisierten Systemen durchgeführt. Während erwartet wird, dass durch die Automatisierung des Inspektionsprozesses sowohl die Variabilität der Prüfergebnisse als auch die Wahrscheinlichkeit von menschlichen Fehlern verringert werden, warnen andere Forscher davor, dass viele andere erhebliche Risiken mit einer erhöhten Automatisierung verbunden sind [4], [6], [7]. Ausbildung und Training sind zweifellos einige der wichtigsten Bestandteile der sicheren und zuverlässigen Instandhaltung [8]. Daher ist es auch wichtig, die derzeitigen Praktiken und Werkzeuge kontinuierlich zu verbessern und an die sich dynamisch ändernden Bedürfnisse der Industrie, der Menschen und der Gesellschaft anzupassen. Dies kann nicht nur durch technische Inhalte, sondern auch durch die Berücksichtigung menschlicher Faktoren erreicht werden. Ziel dieser Studie war es daher, das Verständnis für mögliche mit dem Menschen im Zusammenhang stehende Risiken und leistungsbeeinflussende Faktoren bei der manuellen Ultraschallprüfung von Radsatzwellen zu vertiefen und Maßnahmen vorzuschlagen, die zur Verbesserung der Ausbildung und beim Training des ZfP-Personals verwendet werden könnten.

2 Methodik

Zur Untersuchung der wesentlichen Einflussparameter wurden auf Basis von Testradsatzwellen mit Testreflektoren im regulären Ausbildungsbetrieb des DGZfP (Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung) Schulungszentrums Wittenberge während der Ausbildung mit Hilfe von Prüfprotokollen und Human-Factors-Fragebögen Datensätze erhoben, die im Rahmen der hier vorgestellten Studie analysiert wurden. Um die Ziele der Studie zu erreichen, wurde ein Experiment geplant. Zu diesem Zweck wurden die Prüfer, die am UT Erneuerungskurs bei der DGZfP teilgenommen hatten, gebeten, eine der drei für diese Studie vorbereiteten Radsatzwellen mit Längsbohrung mittels Ultraschall-Handprüfung zu prüfen. Durch Simulationsrechnungen und Testmessungen im Labormaßstab wurde die Grenze, der den verwendeten Prüfanordnungen innewohnende Fähigkeit, zum Reflektornachweis ermittelt. Die Ergebnisse wurden anhand Simulation, Reflektorauffindwahrscheinlichkeit (Probability of Detection, POD), graphischer Darstellung sowie Korrelationen ermittelt. Auf Basis der ausgewerteten Prüfprotokolle der

dokumentierten Handprüfungen wurden die Detektionsraten und Lageauswertung zur Bestimmung der Prüfleistung ermittelt.

2.1 Versuchsaufbau

Das verwendete Prüfsystem ist in Abb. 1 dargestellt. Die Prüfkopfhalterung ermöglicht durch die Rotation des Prüfkopfes um 180° die Umkehr der Einschallrichtung, so dass mit dem gleichen Prüfkopf bezüglich der Wellenachse in zwei Richtungen geprüft werden kann: a) von der Prüfkopfhalterung weg in die Radsatzwelle hinein (innen) und b) zur Prüfkopfhalterung hin aus der Radsatzwelle heraus (außen). Die Halterung, die die Rotation des Prüfkopfes ermöglicht, ist in Abb. 2 zu sehen. Die zwei, für die Prüfung der Radsatzwellen verwendeten Prüfköpfe, haben eine Nennfrequenz von 2 MHz mit einer relativen Bandbreite von 40 % (-6 dB). Es wird je ein Prüfkopf mit 45° und 70° Transversalwelle verwendet.

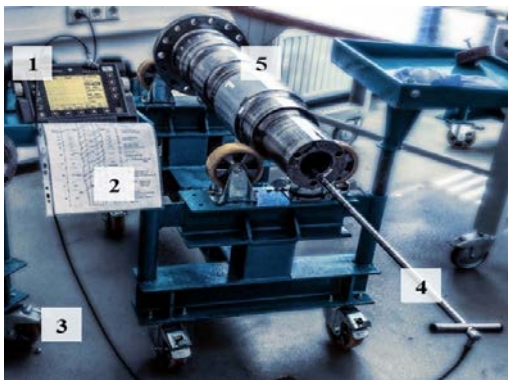


Abb. 1: Ultraschallprüfgerät (1), Prüfplan (2), Kabel (3) und Griffrohr (4) mit dem Prüfkopf (nicht sichtbar) im Radsatzwellen-Testkörper (5)



Abb. 2: Prüfkopfhalterung mit eingebautem Prüfkopf

Für die Untersuchungen wurden drei Radsatzwellen-Testkörper aus Radsatzwellenabschnitten von ca. 110 cm mit einem Längsbohrungsdurchmesser von 65 mm hergestellt. Jeder Radsatzwellentestkörper wurde mit jeweils drei Testreflektoren versehen. Die Testreflektoren liegen jeweils im Schaft (1), dem inneren Korbbogen des Radsitzes (2) und dem Korbbogen (3) des inneren Bremsscheibensitzes. Die Tiefenausdehnungen der Reflektoren variieren von 0,5 mm (C) über 1 mm (B) bis 2 mm (A), so dass insgesamt neun Testreflektoren jeweils drei Orte mit jeweils drei Tiefenausdehnungen abbilden.

An jeder der drei gewählten Positionen wird jeweils ein Reflektor als erodierte Sichelnut, in die Radsatzwelle mit halb elliptischer Form und einem Seitenverhältnis (a/c) von 0,8 mit einer der drei Reflektortiefen eingebracht. Somit existieren neun Reflektor in der Versuchsplanung. Die Positionen der Reflektoren sind in Abb. 3 vereinfacht in einem Korbbogen dargestellt.

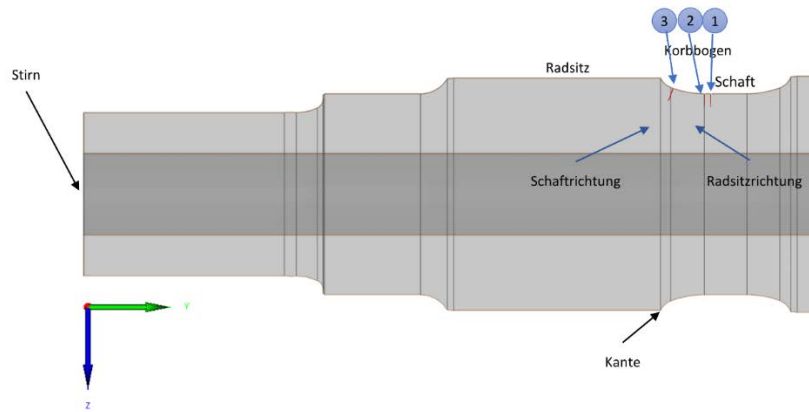


Abb. 3: Position der Reflektoren der Versuchsplanung, dargestellt in einem Korbboogen der Wellengeometrie. In den Radsatzwellen liegen die Reflektoren jedoch nicht im gleichen Korbboogen, sondern verteilen sich auf den Schaft (Position 1), den inneren Korbboogen des Radsitzes (2) und den inneren Korbboogen des Bremsscheibensitzes (3).

2.2 Human-Factors Betrachtung

Die Fehlzustandsart- und –auswirkungsanalyse (FMEA) ist ein Standardinstrument zur Risikobewertung [9]. Sie wird definiert als „*ein systematisches Vorgehen bei der Analyse eines Systems, um mögliche Fehlzustandsarten, ihre Ursachen und ihre Auswirkungen auf das Systemverhalten zu ermitteln*“ [10, p.6]. Um sich auf den Menschen zu konzentrieren und nicht auf technisches Versagen, wurde das Verfahren zur Durchführung der FMEA angepasst und bestand aus folgenden Schritten: Aufteilung der Tätigkeit in Teilaufgaben → Identifizierung der Abweichungen → Charakterisierung der Abweichungen hinsichtlich der Ursachen und Auswirkungen → Identifizierung bestehender Gegenmaßnahmen → Identifizierung möglicher Gegenmaßnahmen. Der FMEA Workshop fand im Ausbildungszentrum der DGZfP in Wittenberge mit bis zu acht Teilnehmern statt und wurde durch eine Moderatorin geleitet. Die Gruppe der Teilnehmer bestand aus zwei Lehrkräften, zwei Technikern und vier Teilnehmern aus der Praxis (Prüfaufsichten).

Der für diese Studie entwickelte Fragebogen bestand aus 22 Fragen, die in drei Kategorien unterteilt wurden: 1) Informationen zur Person, Qualifikation und Erfahrung, 2) Ausbildung, und 3) Praxis. Die Teilnehmer wurden gebeten, auf einer Skala von 1 (z. B. niedrig) bis 7 (z. B. hoch) verschiedene Aspekte der Ausbildung und ihrer täglichen Praxis zu bewerten. Im ersten Teil sollten Informationen über die Teilnehmer gesammelt werden. Mit dem zweiten Teil sollte die Qualität der in der Ausbildung verwendeten Prüfunterlagen bewertet werden, um potenzielle Mängel zu ermitteln und Korrekturmaßnahmen zu ergreifen. Im dritten Teil wurden die Teilnehmer nach ihrer Zufriedenheit mit den Arbeitsbedingungen und nach potenziellen Problemen in ihrer täglichen Praxis gefragt, um Fehler verursachende Faktoren zu identifizieren. Die Ergebnisse von 27 ZfP-Prüfern (Durchschnittsalter betrug 37 Jahre, Standardabweichung, $\sigma=10.2$ Jahre; alle waren männlich) wurden zum Zweck der HF-Bewertung analysiert. Die Erfahrung dieser Prüfer in der Instandhaltung beträgt 5 bis 37 Jahre, oder im Durchschnitt 13.4 Jahre, $\sigma=8.8$ Jahre.

3 Ergebnisse

Aus 44 Prüfprotokollen konnten 296 einzelne Messwerte den neun Testreflektoren aus der Versuchsplanung zugeordnet werden. Die mit Handprüfung ermittelten Werte sind aufgeschlüsselt nach Reflektortiefe und Prüfkonfiguration ($45^\circ/70^\circ$ und Radsitzrichtung/

Schaftrichtung) in Abb. 4 dargestellt. Grundsätzlich ist eine starke Streuung der Messwerte zu beobachten.

Reflektoren mit einer Tiefe von 2 mm bilden sich vorwiegend deutlich oberhalb der Registrierschwelle von 40 % BSH ab. Im Gegensatz dazu wurden für Reflektoren mit einer Tiefenausdehnung von 0,5 mm nur wenige Werte aufgenommen. Für die Reflektoren mit einer Tiefenausdehnung von 1 mm wurden viele Werte unterhalb der Registrierschwelle von 40 % BSH gefunden. Hieraus lässt sich schlussfolgern, dass das Prüfsystem bei den Reflektoren mit geringer Tiefenausdehnung \leq mm an seine Grenzen stößt.

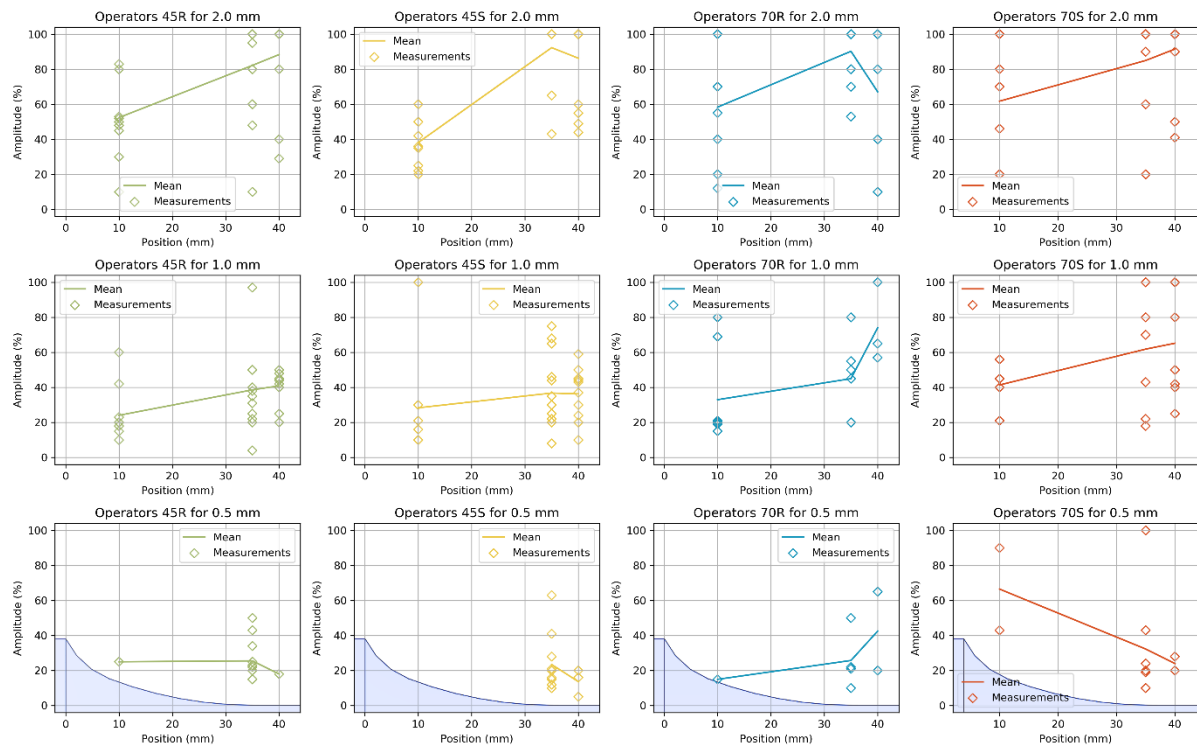


Abb. 4: Die gemessene Echohöhen (Punkte) und der Mittelwert (Linie) für Prüfkfiguration 45°R (erste Spalte), 45°S (zweite Spalte), 70°R (dritte Spalte) und 70°S (vierte Spalte) für die Reflektortiefenausdehnung 2.0 mm (erste Zeile), 1.0 mm (zweite Zeile) und 0.5 mm (dritte Zeile). Die Wellengeometrie ist als blauschattierte Fläche in die unteren Diagramme eingeblendet und verdeutlicht die Position der gemessenen Amplituden.

3.1 Simulationsergebnisse

Eine Simulation in CIVA ermöglicht die Darstellung des Amplitudenverlaufs an jedem Ort der Geometrie des Korbbogens. In Abb. 5 sind die Ergebnisse der Simulation für die Reflektorpositionen 1, 2, und 3 an den Positionen 40 mm, 35 mm und 10 mm (Kreis, Raute oder Dreieck in Abb. 5) jeweils für die drei unterschiedlichen Reflektortiefen dargestellt.

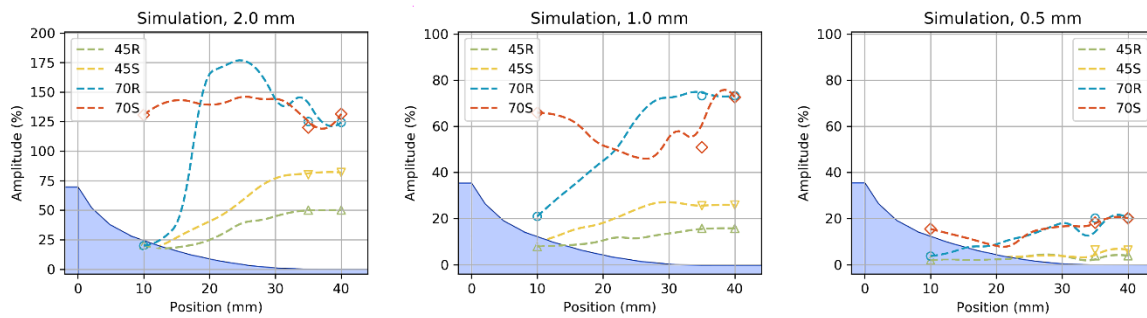


Abb. 5: Die maximale Amplitude

Da die Simulation nur bedingt die Wirklichkeit abbilden kann, sind Unterschiede zwischen den Ergebnissen zu erwarten. Der Wert der prüftechnisch ermittelten Amplitudenwerte zeigt eine ähnliche Tendenz wie die simulierten Amplitudenwerte bei den Reflektorpositionen 1, 2, und 3.

Die abgebildeten Kurvenverläufe zeigen Artefakte, hervorgerufen durch Unstetigkeitsstellen bei der numerischen Simulation aufgrund der komplexen geometrischen Anordnung.

3.2 Beispiel 45° Radsitzrichtung

Die Abb. 6 zeigt die POD Kurven für die Prüfkonfiguration mit Einschallwinkel 45° und Einschallrichtung Radsitz. In dieser Konfiguration wird ein Reflektor mit 95 % Wahrscheinlichkeit in 90 % der Fälle nur dann gefunden, wenn er 2 mm oder größer ist und nahe dem Schaft (490-500 mm) liegt. Vor allem für Reflektoren mit großer Tiefenausdehnung besteht eine Abhängigkeit der POD von seiner Lage.

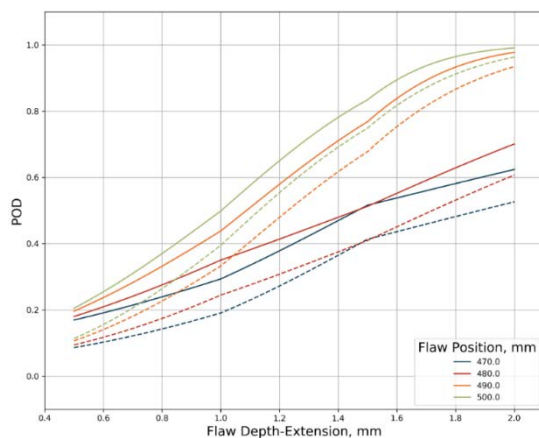


Abb. 6: POD-Kurve als Funktion der Reflektortiefenausdehnung für verschiedene Positionen bei 45° Einschallwinkel*.

*Das Konfidenzintervall ist mit gestrichelten Linien dargestellt.

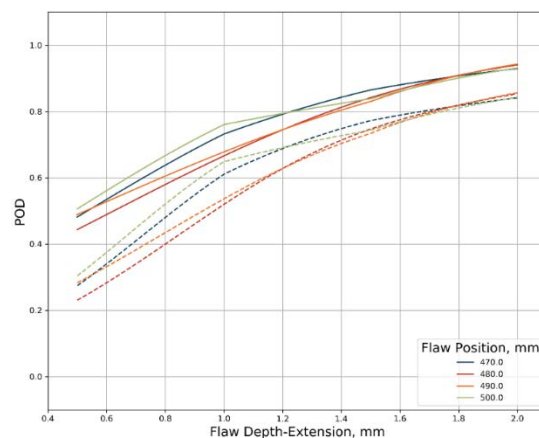


Abb. 7: POD-Kurve als Funktion der Reflektortiefenausdehnung für verschiedene Positionen bei 70° Einschallwinkel*.

3.3 Beispiel 70° Schafrichtung

Für die Prüfkonfiguration mit Einschallwinkel 70° und Einschallrichtung zum Schaft (Abb. 7) ergibt sich ebenfalls kein $a_{90/95}$ Wert für Reflektoren kleiner oder gleich 2 mm unabhängig von seiner Position. Jedoch ist die Änderung der POD in Abhängigkeit von der Position in dieser Prüfkonfiguration geringer als die Abhängigkeit von der Reflektortiefe.

3.4 Human-Factors Betrachtung

Die FMEA hat gezeigt, dass Abweichungen während des gesamten Prüfprozesses auftreten können, d. h. während der Vorbereitung, Überprüfung, Kalibrierung, Prüfung und Bewertung, Protokollierung und Abbau der Prüftechnik. Diese sind z. B. unzureichende Vorbereitung, falsche oder mangelhafte Dokumentation, falsche Empfindlichkeit für die Prüfung, fehlende Anzeigen, Fehlinterpretation der Anzeigen, unvollständige Protokollierung, fehlende Überprüfung, oder unvorsichtige Lagerung der Prüftechnik. Die Ursachen der identifizierten möglichen Fehler können bei den Menschen, der Technik und der Organisation liegen. Um möglichst schwerwiegende Folgen von Fehlern, d. h. Unfälle, sowie hohe finanzielle Verluste, zu vermeiden, sollten Maßnahmen ergriffen werden. Trotz der vielen vorhandenen Gegenmaßnahmen hat die Analyse gezeigt, dass nicht alle Fehler entdeckt werden können. Daher sollten neue präventive Maßnahmen getroffen werden, um das Auftreten dieser Fehler zu verhindern. Die vorgeschlagenen präventiven Maßnahmen können in mehrere Kategorien eingeteilt werden: Optimierung der Organisation, der Prüftechnik, der Dokumentation und Regelwerke, der Ausbildung, der Arbeitsbedingungen und des Prozesses. Ein Schwerpunkt für die Optimierung wird in der Ausbildung gesehen, insbesondere in der Ausbildung der Führungskräfte und Betreiber. So kann die Qualität des Prüfprozesses durch:

- Schulung von Führungskräften über dem Ablauf der Wellenprüfung,
- höhere Qualifikation des Prüfpersonals,
- regelmäßige Schulung und Sensibilisierung der Prüfer und Prüfaufsichten auf die Wichtigkeit der Überprüfung des Prüfsystems, und
- regelmäßige Fortbildung des Prüfpersonals bezüglich Prüfung und Bewertung der Ergebnisse

verbessert werden und bietet zudem die Möglichkeit allen Beteiligten die Anforderungen der ZfP zu verdeutlichen. Diese Achtsamkeit bezüglich der Anforderungen der ZfP hat einen starken Einfluss auf die Qualität des Prüfprozesses.

Die Auswertung der Antworten aus dem Human-Factors-Fragebogen zeigte relativ große Zufriedenheit mit den zur Ausbildung bereitgestellten Prüfunterlagen. Auf die Frage, wie die Prüfer die Prüfunterlagen tatsächlich verwendeten, deuteten die Antworten auf einige Probleme, z. B. einige Informationen, Beschreibungen oder Abbildungen fehlen, relevante Informationen sind nicht immer klar getrennt und hervorgehoben, Informationen sind nicht immer dort, wo die Prüfer sie erwarten, usw. Die Prüfer berichteten auch über Probleme mit den Prüfprotokollen, wie z. B. Schwierigkeiten mit den Abkürzungen und der Möglichkeit für Fehler beim Rechnen. Hinsichtlich der Praxis deuteten die Antworten der Prüfer auf Wünsche zur Verbesserung der Prüfunterlagen, Arbeitsbedingungen vor Ort, Arbeitsvorbereitung im Werk und Anweisung/fachlichen Einweisung durch die Prüfaufsichten.

4 Erweiterte Analyse der Einflussparameter

Durch die Anwendung der multiparameter-POD [11] wurde versucht, das Prüfsystem zu charakterisieren und Einflüsse von Position und Reflektortiefe auf die Auffindwahrscheinlichkeiten zu beschreiben. Aus den Messungen in Handprüfung und der Musterlösung der Handprüfung kann abgelesen werden, dass das Prüfsystem für das sichere Auffinden bestimmter Fehler nicht geeignet ist. Dies kann zum einen durch geringe Signalantworten und zum anderen durch große Streuung der Messwerte belegt werden.

Aus den Ergebnissen von Simulation und Messung kann geschlussfolgert werden, dass größere Reflektoren unabhängig von der Position, wahrscheinlicher zu entdecken sind.

4.1 Signal-Rausch-Abstand

Betrachtet man ein Signal-Rausch-Abstand von 6 dB als Detektionsgrenze und 12 dB als Bewertungsgrenze, so ergibt sich, dass die Prüfung über Winkelspiegeleffekte gegenüber der Prüfung mit flächenhafter Reflexion Signale mit höherer Amplitude und deutlich geringerer Schwankungsbreite ermittelt wurden.

Geht man hier von der typischen Arbeitsweise eines Ultraschallprüfers aus, so wird ein Rauschniveau von 2 % im A-Bild als gering wahrgenommen, ein Niveau von 5 % als durchschnittlich wahrgenommen und ein Rauschniveau von mehr als 10 % sicher vom Prüfer bemerkt und ggf. als Besonderheit notiert. Bei der Bewertung von Anzeigen mit mindestens 20 % Bildschirmhöhe, wie es die Prüfvorschrift verlangt, ist somit ein Signal-Rausch-Abstand von mindestens 6 dB gegeben. Unter dieser Randbedingung kann angenommen werden, dass die von den Prüfern bei der Handprüfung aufzunehmenden Werte einen Signal-Rausch-Abstand von mindestens 6 dB aufweisen.

4.2 Beschreibung der vorhandenen Daten

Insgesamt haben 56 Prüfer jeweils eine der drei Testwellen geprüft und zwei Prüfer haben jeweils zwei der Wellen geprüft. In der Tabelle 1 sind die Detektionsraten für alle aufgenommenen Anzeigen oberhalb der Registrierschwelle aufgelistet. Es ist zu erkennen, dass die Mehrzahl der Prüfer alle vier möglichen Prüfkfigurationen genutzt haben. Auffallend ist, dass, verglichen mit der Konfiguration 45°, für 70° weniger Messwerte aufgenommen wurden. In der Prüfkfiguration 70° innen, die laut Aufgabenstellung zuletzt geprüft wird, wurden durchschnittlich 25% weniger Messwerte aufgenommen als für die Konfiguration 70° außen. Eine mögliche Erklärung für diese Ungleichverteilung der Messwerte zwischen den Prüfkfigurationen, ist die zeitliche Begrenzung der Radsatzwellenprüfung.

Tabelle 1: Detektionsraten der einzelnen Prüfkfigurationen und die Gesamtaufindraten (Formel 1), für Signalamplituden über 40% BSH.

	Reflektor	$POD_{45^\circ}^{innen}$	$POD_{45^\circ}^{außen}$	$POD_{70^\circ}^{innen}$	$POD_{70^\circ}^{außen}$	POD_{gesamt}
Radsatzwelle 1	1A	0	0	0,08	0	0,08
	2B	0,58	0,29	0,3	0,4	0,87
	3C	0,35	0,88	0,69	0,47	0,99
Radsatzwelle 2	1C	0,72	0,86	0,35	0,81	1
	2A	0,14	0,14	0,10	0,09	0,39
	3B	0,04	0,09	0,25	0,19	0,47
Radsatzwelle 3	1B	0,53	0,37	0,22	0,63	0,91
	2C	0,84	0,94	0,94	0,84	1
	3A	0	0	0,11	0	0,11

In der Tabelle 1 sind nur Messwerte über 40 % BSH enthalten. Die Gesamt-POD ergibt sich aus einer ODER-Verknüpfung der Einzelwahrscheinlichkeiten, wie es Formel 1 zeigt. Die kombinierten PODs zeigen die Grenzen des Prüfsystems, da Reflektoren mit einer Tiefenausdehnung von 1 mm oder kleiner nicht zuverlässig gefunden wurden. Reflektoren, die mindestens 2 mm sind, werden unabhängig von den gewählten Positionen zuverlässig gefunden.

$$\left(1 - (1 - POD_{45^\circ}^{außen}) \times (1 - POD_{45^\circ}^{innen}) \times (1 - POD_{70^\circ}^{außen}) \times (1 - POD_{70^\circ}^{innen})\right)$$

Formel 1

Reflektoren mit einer Tiefenausdehnung von 2 mm (grün) werden hierbei mit mindestens 90 % Wahrscheinlichkeit gefunden. Reflektoren mit einer Tiefenausdehnung

von 1 mm (gelb) werden im Schaft und im Übergangsbereich mit ca. 90 % gefunden. Die Reflektoren mit 0,5 mm Tiefenausdehnung (blau) haben an allen Positionen eine sehr geringe Auffindwahrscheinlichkeit.

4.3 Durchschnittliche Lageabweichung als Bewertung der Prüfleistung

In Tabelle 2 wird die durchschnittliche Lageabweichung pro Prüfer mit statistischen Kennwerten beschrieben. Hierbei wurden für jeden Prüfer die absoluten Abweichungen von den realen Reflektorpositionen aufsummiert und durch die Anzahl der Messungen geteilt. Die höheren Kennwerte der 70° Messungen zeigen dabei, dass die Lagebestimmung in dieser Konfiguration erwartungsgemäß eine geringere Genauigkeit aufgrund der weiten Bündelöffnung bei längerem Schallweg im Vergleich zur 45° Anordnung aufweisen. Abb. 8 zeigt die Verteilung und das Histogramm der durchschnittlichen Lageabweichungen für die 58 Prüfer. Aus dieser Abbildung kann für die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Werte, eine rechtsschiefe Normalverteilung geschlussfolgert werden. Es gibt damit nur wenige Prüfer, die durchschnittlich 10 mm Abweichung oder mehr von der realen Reflektorlage ermittelt haben.

Tabelle 2: Kennwerte für die durchschnittliche Lageabweichung der Prüfer in der Handprüfung, einmal für alle Messwerte und aufgeteilt nach den genutzten Einschallwinkel. Mit Standardabweichung ist hierbei die Stichproben Standardabweichung gemeint.

Einschallwinkel	Mittelwert	Median	Standardabweichung	Minimum	Maximum	Quantil (%)		
						25	50	75
nur 45°	6	5,6	3,6	1	17,3	3	5,7	8
nur 70°	7,1	6,8	4,5	0	18	3,5	6,7	9,2
alle	6,2	5,7	3,1	1,3	15	3,6	5,7	8,7

Um die Prüfleistung, über die Anzahl der Hits der drei Radsatzwellen vergleichen zu können, wurden die gewichteten Summen berechnet.

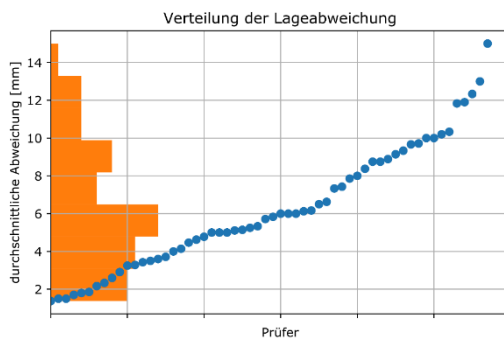


Abb. 8: Histogramm (orange) und Verteilung (blau) der durchschnittlichen Lageabweichungen für die Handprüfung.

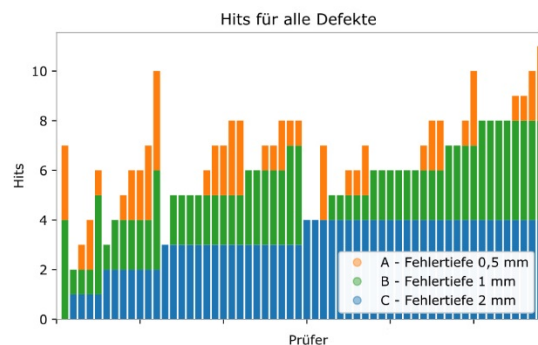


Abb. 9: Verteilung der ungewichteten Hits auf die Reflektortiefen.

Abb. 9 zeigt die ungewichteten Hits für die 58 Prüfer, aufgeschlüsselt nach den Reflektoren A, B und C. Es ist klar ersichtlich, dass ungefähr die Hälfte der Prüfer die Reflektoren mit 2 mm Tiefenausdehnung in allen Konfigurationen detektiert hat. Die Mehrzahl der Reflektoren mit 1 mm, werden in mindestens zwei Konfigurationen detektiert. Nur ein Prüfer detektierte ein Reflektor mit 0,5 mm Tiefenausdehnung in allen vier Prüfkonfigurationen. 26 Prüfer haben den Reflektor mit 0,5 mm Tiefenausdehnung gar nicht detektiert. Tabelle 3 zeigt die Kenndaten der gewichteten Hits, wie bereits oben beschrieben. Dabei wird die maximal erreichbare gewichtete Anzahl an Hits (14) nie erreicht.

Tabelle 3: Kennwerte der gewichteten Hits pro Prüfer als Merkmal für die Prüfleistung. Die Standardabweichung wurde hierbei als Stichproben Standardabweichung berechnet.

Mittelwert	Median	Standard- abweichung	Minimum*	Maximum**	Quantil (%)		
					25	50	75
5,9	6,0	2,6	1,5	13,0	4,0	6,0	7,5

*schlechtestes Ergebnis; **bestes Ergebnis

5 Zusammenfassung

Zur Untersuchung wesentlicher Einflussparameter wurden auf Basis von Testratsatzwellen mit Testreflektoren im regulären Ausbildungsbetrieb des DGZfP Schulungszentrums Wittenberge während der Ausbildung mit Hilfe von Prüfprotokollen und Fragebögen Datensätze erhoben, die im Rahmen des Vorhabens analysiert wurden. Parallel hierzu wurde durch Simulationsrechnungen und Testmessungen die Grenze, der den verwendeten Prüfanordnungen innewohnende Fähigkeit zum Reflektornachweis ermittelt. Hierbei wurde mit Hilfe der Anwendung einer multiparameter-POD die Handprüfung in der Ausbildung charakterisiert, um die Einflüsse von Position und Reflektortiefe auf die Auffindwahrscheinlichkeiten zu beschreiben.

Aus den Ergebnissen von Simulation und Messung kann mit Hilfe der Multiparameter-POD geschlussfolgert werden, dass tiefere Reflektoren mit gleichbleibendem a/c-Verhältnis unabhängig von der Position, wahrscheinlicher zu entdecken sind. Die ausgewählten Reflektortiefen von 0,5 mm, 1 mm und 2 mm sowie die drei Reflektorpositionen in Schaft, Übergang und Korbbogen geben dabei beispielhaft Auskunft über das prinzipielle Verhalten der Ultraschallprüfung an dieser Geometrie. Die Untersuchungen zeigen auf, dass im Bereich des Korbbogens durch die sich kontinuierlich verändernde Krümmung der Wellenmantelfläche eine komplexe akustische sich lokal verändernde Wechselwirkung mit den künstlichen Reflektoren auftritt, die zu einer hohen Schwankungsbreite der Echoamplitude führen kann. Die Reflexion über Winkelspiegel reagiert grundsätzlich weniger empfindlich auf Geometrieänderungen im Korbbogen als die flächige Reflexion.

Auf Basis der ausgewerteten Prüfprotokolle der dokumentierten Handprüfungen wurden die Detektionsraten und Lageauswertung zur Bestimmung der Prüfleistung ermittelt. Testreflektoren mit einer Tiefe von 2 mm wurden unabhängig von den gewählten Positionen mit mindestens 90 % Wahrscheinlichkeit von den Prüfern aufgefunden. Testreflektoren mit einer Tiefenausdehnung von 1 mm wurden im Schaft und im Übergangsbereich zu etwa 90 % aufgefunden. Die Testreflektoren mit 0,5 mm Tiefenausdehnung zeigen an allen Positionen eine sehr geringe Auffindwahrscheinlichkeit bei der Handprüfung.

Für geringe Tiefenausdehnungen ergibt sich keine eindeutige Abhängigkeit zwischen POD und Reflektorposition. Hier ist die physikalische Nachweisgrenze des Prüfverfahrens im Bereich von Reflektortiefen um 0,5 mm erreicht. Als Lageabweichung wird die summierte Länge der Abweichungen der ermittelten von der realen Reflektorposition in Millimetern definiert. Die Mehrheit der Prüfer bestimmen die Reflektorpositionen innerhalb einer der Toleranz von 10 mm für 45° und 20 mm für 70° Prüfkopfanzordnungen. Die Lageabweichung hat bei 85 % der Prüfer einen Wert kleiner 10 mm.

Die, im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen, ermittelten Ergebnisse lassen aufgrund der geringen Anzahl an Testreflektoren jedoch keine allgemeingültige Übertragung auf beliebige Korbbogengeometrien und beliebige Reflektorgeometrien zu. Hier sind in jedem Fall die konkrete Prüfkonfiguration und Wellengeometrie zu berücksichtigen.

Die Ergebnisse der Human-Factors Betrachtung haben gezeigt, dass während des gesamten Prozesses der manuellen UT-Radsatzwellenprüfung Fehler auftreten können. Um das Auftreten dieser Fehler zu verhindern sollten neue präventive Maßnahmen (z. B.

Optimierung der Organisation, Prüfung, Prüftechnik, Dokumentation und Regelwerke, der Ausbildung, Arbeitsbedingungen und des Prozesses) zum Einsatz kommen. Die FMEA und die Befragung lieferten wertvolle Hinweise zur Optimierung der Ausbildung, vor allem der Prüfunterlagen, der Kompetenzen, sowie einige Hinweise zur Optimierung des gesamten ZfP-Prozesses. Schließlich wurde empfohlen, die Qualität der Prüfunterlagen systematisch zu untersuchen und zusammen mit den Prüfern zu entwickeln, um eventuelle Fehler beim Verständnis und der Anwendung der Prüfunterlagen sowie daraus resultierende Fehler bei der Prüfung zu vermeiden. Eine weitere Empfehlung ist die Entwicklung und das Angebot neuer Ausbildungsmodule zur Weiterbildung der Prüfaufsichten und Führungskräfte sowie für die Weiterbildung über die menschlichen Faktoren. Zur Optimierung des gesamten ZfP-Prüfprozesses wird die Anwendung der Liste möglicher Gegenmaßnahmen empfohlen. Diese Maßnahmen können nach Meinung der an der FMEA teilgenommenen Experten zur Vermeidung potenziell auftretender Reflektoren beitragen und sollten den Verantwortlichen zur Verfügung gestellt werden, damit sie diese in die Praxis implementieren.

Die durchgeführte Studie zeigt, dass die Bewertung der gesamten Zuverlässigkeit der zerstörungsfreien Prüfung komplex ist und verlangt eine detaillierte Versuchsplanung und die Einbeziehung von unterschiedlichen Faktoren, d. h. von der innewohnenden Fähigkeit der Prüfsysteme, Anwendungsparameter bis hin zu den komplexen menschlichen und organisatorischen Faktoren. Mit diesem für Ausbildungszwecke gestalteten Versuch haben wir unser Wissen über die Detektierbarkeit der Reflektoren unterschiedlicher Lage und Tiefenausdehnung erweitert und unterschiedliche Bewertungsmethoden erprobt. Zukünftige Forschung könnte sich auf den Einfluss anderer Faktoren auf die POD (statt nur Geometrie und Lage) konzentrieren und Möglichkeiten finden, Anwendungsparameter und menschliche Faktoren zu integrieren, um das Wissen zu erweitern und den Prüfprozess und die etablierten Praktiken in der Ausbildung sowie in der Praxis zu optimieren.

6 Referenzen

- [1] C. Müller *et al.*, "Paradigm Shift in the Holistic Evaluation of the Reliability of NDE Systems," *Mater. Test.*, vol. 55, no. 4, pp. 261–269, 2013.
- [2] A. P. Berens, "NDE Reliability Data Analysis," in *ASM Metals Handbook, Volume 17, Nondestructive Evaluation and Quality Control*, 9th Ed., Materials Park, OH: American Society of Metals International, 1989, pp. 689–701.
- [3] H. Gibson, "Research into the effects of human factors in axle inspection. Scoping study report," Rail Safety and Standards Board, London, 2012.
- [4] M. J. Stout, W. H. Gibson, K. Timmis, and S. Mills, "Human factors in railway vehicle axle inspection," in *Rail Human Factors: supporting reliability, safety and cost reduction*, N. Dadashi, A. Scott, J. Wilson, and A. Mills, Eds. London, UK: Taylor & Francis Group, 2013, pp. 677–682.
- [5] J. R. Wilson and B. J. Norris, "Rail human factors: Past, present and future.," *Appl. Ergon.*, vol. 36, no. 6, pp. 649–660, Nov. 2005.
- [6] U. Zerbst *et al.*, "Safe life and damage tolerance aspects of railway axles – A review," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 98, pp. 214–271, 2013.
- [7] M. Bertovic, "A human factors perspective on the use of automated aids in the evaluation of NDT data," *42st Annu. Rev. Prog. Quant. Nondestruct. Eval. AIP Conf. Proc.*, vol. 1706, pp. 020003-1—020003-16, 2016.
- [8] J. Reason and A. Hobbs, *Managing maintenance error: a practical guide*. Aldershot, England: Ashgate, 2003.
- [9] IEC/ISO 31010, "Risk management - Risk assessment techniques," ISO/IEC, Geneva, Switzerland, 2009.
- [10] DIN EN 60812, "Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen – Verfahren für die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)(IEC 60812:2006); Deutsche Fassung EN 60812:2006," DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2006.
- [11] M. Pavlovic, K. Takahashi, and C. Müller, "Probability of detection as a function of multiple influencing parameters," *Insight - Non-Destructive Test. Cond. Monit.*, vol. 54, no. 11, pp. 606–611, Nov. 2012.