

Simulation von mechanisierten Eisenbahnschienenprüfungen mit Ultraschall

Thomas HECKEL¹, Yannick WACK¹,
Gerhard MOOK²

¹ BAM, Berlin

² Otto von Guericke Universität, Magdeburg

Kontakt E-Mail: thomas.heckel@bam.de; gerhard.mook@ovgu.de

Kurzfassung. Bei der mechanisierten Prüfung von verlegten Eisenbahnschienen mit Schienenprüfzügen werden große Prüfdatenmengen mit einer komplexen Prüfkopfpanordnung in kurzer Zeit bei hohen Prüfgeschwindigkeiten aufgenommen. Der Typ und der Zustand des Gleises kann während der Prüfung in schnellem Wechsel streckenabhängig variieren, z.B. unterschiedliche Schientypen oder Abnutzung sowie beim Durchfahren von Weichenstraßen. Der logistische Aufwand diese Prüfung insgesamt durchzuführen ist dabei sehr hoch und eine Wiederholung der Prüfung in einem kurzen Zeitintervall nicht möglich.

Es werden während der Prüfdatenaufnahme bereits Datenreduktionsverfahren, Rekonstruktionsverfahren und Online-Parametervariationen eingesetzt, um die Ergebnisdaten zum einen in Ihrer Menge zu begrenzen zum anderen auf die lokalen Geometrie- und Zustandsänderungen des Prüfobjektes Schiene zu reagieren.

Im Regelwerk EN 16729-1 „Zerstörungsfreie Prüfung an Schienen im Gleis -Teil 1: Anforderungen an Ultraschallprüfungen und Bewertungsgrundlagen“ werden Bezugsreflektoren definiert, um die Leistung automatisierter Ultraschallsysteme für die Schienenprüfung zu verifizieren.

Um die Einflüsse der komplexen Randbedingungen der mechanisierten Schienenprüfung auf das Prüfergebnis evaluieren zu können, wurde ein Softwarewerkzeug erarbeitet, mit dem eine Prüffahrt auf einer Schiene simuliert werden kann. Basierend auf der Datenaufnahme mit dem Glassy-Rail-Diagramm können alle relevanten Prüfparameter und Artefakte in Schienen sowie Störeinflüsse bei der Simulation berücksichtigt werden.

Einführung

Gleisanlagen sind komplexe technische Anlagen, die aus einer Aneinanderreihung verschiedener Schientypen und verschiedener Funktionsbaugruppen wie zum Beispiel Weichenstraßen, Gleisbögen, Brücken und Bahnübergänge bestehen. Der Abnutzungszustand der Gleisanlagen gestaltet sich streckenabhängig sehr unterschiedlich aufgrund verschiedener Nutzungsarten wie zum Beispiel Hochgeschwindigkeitspersonenverkehr, Güterverkehr oder Mischbetrieb.



Verlegte Eisenbahnschienen unterliegen im Betrieb starken Wechselbeanspruchungen durch Fahrbetrieb, Rollkontakt und Witterung. Da Eisenbahnschienen heutzutage vorwiegend nahtlos verschweißt verlegt werden, treten aufgrund der witterungsbedingten Temperaturunterschiede Zug- und Druckspannungen zyklisch mit sehr niedrigen Frequenzen auf. Durch die schwellenbasierte Befestigung der Eisenbahnschienen kommt es beim Überrollvorgang zu einer Wechselbiegebeanspruchung mit höheren Frequenzen. Der direkte Rollkontakt zwischen Schiene und Rad stellt eine weitere wesentliche Beanspruchung der Schiene im Bereich der Fahrfläche bzw. des Fahrspiegels vor allem im oberflächennahen Bereich dar. Dementsprechend können sich im Laufe des Betriebes komplexe Schädigungen in den Gleisanlagen ausbilden.

Im Rahmen der Regelinspektionen sind in Deutschland etwa 40.000 km Gleis zu prüfen. Abhängig von der Streckennutzung hat die Prüfung der Schienen in unterschiedlichen Zeitintervallen zu erfolgen. Die Prüfleistung eines Schienenprüfzuges beträgt einige 100 km Gleis pro Tag. Im Verlauf einer Prüfung sind hierbei in unregelmäßiger schneller Abfolge typischerweise unterschiedliche Schientypen mit wechselnden Abnutzungszuständen und verschiedenen Funktionsbaugruppen zu prüfen. Der zu prüfende Streckenabschnitt ist bekannt, jedoch sind selten alle benötigten Detailinformationen vorhanden, die es ermöglichen, das Prüfsystem im Vorfeld der Prüfung optimal einzustellen. Dabei stellt insbesondere die zeitnahe Bewertung der aufgenommenen Prüfdaten interaktiv am Bildschirm sehr hohe Anforderungen an das Fachpersonal.

Signalverarbeitungsalgorithmen, die die aufgenommenen Prüfdaten auf definierte Merkmale untersuchen, können das Fachpersonal bei der Auswertung der Prüfung unterstützen. Hierdurch kann sowohl die Effizienz der Bewertung als auch die Nachweiswahrscheinlichkeit von Fehlstellen erhöht werden.

Bei der zerstörungsfreien Prüfung von verlegten Eisenbahnschienen mit Schienenprüfzügen handelt es sich bei Einbeziehung aller Randbedingungen um einen Prozess, der durch viele Parameter mit entsprechend vielen Variationsmöglichkeiten und Freiheitsgraden beeinflusst wird.

1. Möglichkeiten der Generierung von Prüfdatensätzen

Für ein detailliertes Verständnis der Abhängigkeiten der aufgenommenen Prüfdaten von den Einflussgrößen ist es notwendig, die einzelnen Prozesse zu analysieren. Für Parameteroptimierung und die Entwicklung von Signalverarbeitungsalgorithmen werden insbesondere validierte Datensätze benötigt. Hierbei ist eine hohe Qualität der Datensätze in Bezug auf die Dokumentation der Variablen und Freiheitsgrade notwendig, um mögliche Abhängigkeiten bei der Entwicklung zu berücksichtigen. Für den Prozess sollen möglichst alle Prozessparameter der Prüfung sowie möglichst alle Artefakte in der geprüften Schiene im Detail bekannt sein. Entsprechende Datensätze können entweder im Labormaßstab durch Messungen an Testschienen generiert werden oder aus realen Prüfdatensätzen aus dem Regelbetrieb eines Schienenprüfzuges entwickelt werden.

Mit Untersuchungen im Labormaßstab an Testschienen kann das grundsätzliche Verhalten der einzelnen Ultraschallprüfköpfe auf definierte Reflektorgeometrien evaluiert werden. Die Möglichkeiten im Labormaßstab die Randbedingung einer realen Schienenprüfung mit allen relevanten Einflussparameter abzubilden, wie sie bei einer Prüffahrt mit dem Schienenprüfzug auftreten, ist begrenzt (z.B. Länge, Geschwindigkeit, etc.).

Im Gegensatz zu Untersuchungen im Labormaßstab können Prüfdatensätze realer Prüffahrten die komplette Bandbreite der Einflussparameter abbilden. Aufgrund der Randbedingungen einer solchen Prüffahrt ist es jedoch nicht sicher möglich, alle Artefakte

in der Schiene im geprüften Bereich mit ausreichender Genauigkeit in Position, Orientierung und Größe zu ermitteln und referenziert zu erfassen. Auch ein Wiederholen einer Prüffahrt unter identischen Bedingungen ist unmöglich. Im Regelfall ist es nicht möglich, eine Referenzstrecke mit allen Artefakten in allen Ausprägungen bereitzuhalten, die unter realen Prüfbedingungen und Systemeinstellungen geprüft werden kann.

Aus den Ergebnissen der Laboruntersuchungen und den Datensätzen aus Feldversuchen können grundsätzlich Signalverarbeitungsalgorithmen abgeleitet werden. Eine Validierung der Algorithmen kann auf einer entsprechenden Datenbasis nur begrenzt erfolgen, da nur unzureichende Angaben über die Artefakte der in den in den Feldversuchen geprüften Schienen vorliegen.

Die in dem Regelwerk EN 16729-1 [1] benannten Bezugsreflektoren erlauben, die Leistung mechanisierter Ultraschallsysteme für die Schienenprüfung vergleichbar zu evaluieren. Die in diesem Regelwerk definierten Artefakte können jedoch nur bedingt direkt für eine Klassifikation von Schienenfehlern auf Basis von Signalverarbeitungsalgorithmen herangezogen werden.

Alternativ bietet es sich an, mit Hilfe von Simulationen der Prüfanordnung entsprechende synthetische Datensätze zu erzeugen. Um die Lücke zwischen Untersuchungen im Labormaßstab und Feldversuchen zur Optimierung und Validierung der Signalverarbeitung schließen zu können, ist die Entwicklung einer Strategie zur Simulation einer mechanisierten Schienenprüfung mit allen relevanten Einflussparametern notwendig und von zentraler Bedeutung.

2. Relevante Parameter

Bei der Eisenbahnschienenprüfung mit Schienen Prüfzügen werden die Ultraschallprüfköpfe typischerweise durch ein mechanisiertes System auf der Lauffläche der Schiene entlangbewegt, welches an einem Laufdrehgestell befestigt ist.

Als relevante Einflussparameter, welche die Prüffahrt und die Aufnahme der Messdaten beeinflussen wurden die Folgenden identifiziert:

- Schienengeometrie:
 - o Schientyp, z.B. UIC 60
 - o reale Schienenhöhe (Reduzierung der Schienenkopfhöhe durch Bearbeitung),
 - o Oberflächenzustand
- Laterale Position der Prüfköpfe abweichend von Schienenmitte:
 - o Sinuslauf des Messdrehgestells
 - o Offset durch Kurvenfahrten
- Prüfkopfparameter:
 - o Sollparameter
 - o Veränderungen durch Abnutzung, z.B. X-Maß, Einschallwinkel, Empfindlichkeit
- Parametereinstellungen der Prüfelektronik
- Qualität der Ankopplung
 - o Kurzfristige Ankoppelstörungen/Ankoppelausfälle
 - o Transferkorrektur in Abhängigkeit von Schientyp und -zustand
- Fahrgeschwindigkeit des Prüfzuges
- Störsignale
 - o Rauschen,
 - o elektrische Störungen,
 - o Prüfkopfversatz

- Artefakte und deren Geometrien
 - o Bohrungen
 - o Schweißnähte
 - o Schienenstöße
- Schienenfehler

Um den gesamten Prüfprozess und sein Verhalten bezüglich der wesentlichen relevanten Einflussfaktoren nachzubilden, sind umfangreiche Parameterstudien notwendig. Da eine Durchführung auf rein experimenteller Ebene sowohl im Feld als auch im Labormaßstab nicht zielführend ist, wurde die Untersuchung auf Basis von Simulationen durchgeführt.

3. Durchführung

Es wurden umfangreiche Simulationen auf semianalytischer Basis mit der Simulationssoftware CIVA und auf Basis finiter Elemente Methoden (FEM) mit der Software ANSYS durchgeführt. Diese hatten zum Ziel, das Verhalten der Ultraschallprüfköpfe und die Schallausbreitung in der Schiene abzubilden. Insbesondere stand hierbei das Amplituden- und Echodynamikverhalten der verschiedenen Reflektorgeometrien von Form- und Fehleranzeigen im Vordergrund. Je nach Teilaufgabe wurde hier entweder semianalytisch oder FEM-basiert jeweils in 2-D oder 3D berechnet.

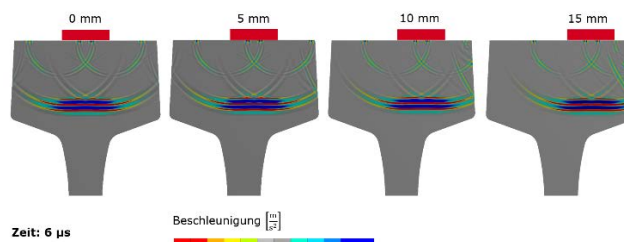


Abb. 1a. Schallausbreitung im Schienenkopf nach 6 μs bei lateralem Prüfkopfversatz

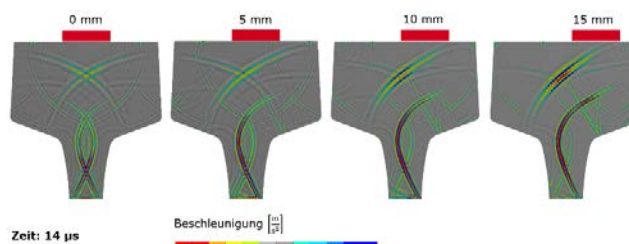


Abb. 1b. Schallausbreitung im Schienenkopf nach 14 μs bei lateralem Prüfkopfversatz

Abb. 1 zeigt beispielhaft die Auswirkung der lateralen Fehlpositionierung eines Senkrechtprüfkopfes außerhalb der Stegmitte. Die Querschnittsübergänge von Kopf- zu Stegbereich erzeugen relevante Echosignale und Wellenumwandlungen, die Phantomanzeigen im Laufzeitbereich des Schienensteges erzeugen. Die Simulation wurde mit ANSYS mit einem 2D-Modell durchgeführt [2]. Bild 1a zeigt die auf die jeweiligen Querschnittsübergänge einlaufenden longitudinalen Wellenfronten für unterschiedliche Prüfkopfpositionen für den Zeitpunkt 6 μs . In Abbildung 1b sind alle an den Querschnittsübergängen reflektierten longitudinalen und transversalen Wellenfronten zum Zeitpunkt 14 μs abgebildet. Die Erzeugung ausgeprägter gerichteter Echosignale mit zunehmendem lateralem Prüfkopfversatz ist deutlich sichtbar.

Für die messtechnische Untersuchung im Labormaßstab und zur Validierung der Simulationsergebnisse wurde eine 1 m lange Testschiene mit verschiedenen künstlichen

Reflektoren aus einer UIC-60 Schiene hergestellt. Die Testschiene ist in Abbildung 2 dargestellt.



Abb. 2. Testschiene

Die Testschiene enthält fünf Querbohrungen mit 5 mm Durchmesser in verschiedenen Tiefen sowie je eine Stegbohrung mit 33 mm und 16 mm Durchmesser. An der Fahrfläche sind 2 mm tiefe sichelförmige Sägeschnitte eingebracht. Im Schienenfuß befinden sich ebenfalls ein sichelförmige Sägeschnitt und eine Flachbodenbohrung von 5 mm Durchmesser und 5 mm Tiefe. An einer Stirnseite befinden sich fünf senkrecht zur Oberfläche orientierte Flachbodenbohrungen in unterschiedlicher Tiefe. Zur Ermittlung der Schallschwächung ist ein Ende des Kopfbereiches seitlich planparallel bearbeitet. Die Fahrfläche ist auf einer Breite von ca. 30 mm mittig über dem Steg plan bearbeitet, um im Labormaßstab konstante Ankopplungsbedingungen zu erzeugen.

Um die im Labormaßstab an der Testschiene und in den Simulationen ermittelten Daten mit während einer Prüffahrt aufgenommenen Daten zu vergleichen, lag ein anonymisierter Datensatz mit realen Prüfdaten vor.

Für jede mögliche Prüfkopf-Reflektor-Geometrie wurden entsprechende Simulationsrechnungen durchgeführt. Als Referenzreflektor zur Ermittlung der absoluten Signalamplituden aller Reflektoren wurde die sogenannte Laschenkammerbohrung im Schienensteg mit einem Durchmesser von 33 mm herangezogen. Die durchgeführten Simulationsrechnungen wurden soweit möglich und sinnvoll im Labormaßstab an der Testschiene überprüft.

Um die Einflussfaktoren zu parametrisieren wurde entweder für jeden Einflussfaktor angepasste Simulationsrechnungen durchgeführt oder eine Abhängigkeit der Signalamplitude vom Einflussfaktor ermittelt. Die Struktur von Störsignalen wurde aus den realen Daten extrahiert und entsprechende Algorithmen zur synthetischen Generation der Störsignale erstellt.

Unter Verwendung der Skriptsprache Python werden die simulierten Ergebnisse für jede Prüfkopf-Reflektor-Geometrie unter Berücksichtigung der parametrisierten Einflussfaktoren zu einem Prüfdatensatz verrechnet. In dem Skript können für jeden Meter simulierte Schiene die Parameter verändert werden. Die Länge eines typischen Prüfdatensatzes beträgt bis zu 1000 m.

4. Ergebnisdarstellung

Für die Ergebnisdarstellung wird in diesem Beitrag auf die Darstellungsform der gläsernen Schiene [3] bzw. des „Glassy-Rail-Diagramms“ (GRD) fokussiert, wie sie zum Beispiel in den Prüfvügen der Deutschen Bahn AG zum Einsatz kommt (Quelle/Heckel). Es wird ein

Betrieb mit konventionellen Prüfköpfen im Parallelbetrieb nachgebildet. Für die Schienenprüfung werden insgesamt fünf Ultraschallprüfköpfe je ein 70°, 55°- und 35°-Winkelprüfkopf mit einer Mittenfrequenz von 2 MHz sowie zwei 4 MHz 0°-Senkrechtprüfköpfe, von denen einer als Impuls-Echo-Prüfkopf der andere als Sende-Empfangs-Prüfkopf ausgeführt ist. Die Prüfköpfe sind auf der Fahrfläche mittig über dem Schienensteg angeordnet.

Die Dokumentation der Prüfung erfolgt mit einer Auflösung von drei Millimeter mal drei Millimeter über die gesamte Prüfstrecke. Die aufgenommenen A-Bilder werden dabei ortskorrigiert unter Berücksichtigung des realen Einschallwinkels in einem B-Bild mit in Graustufen kodierten Amplitudenwerten rekonstruiert und aufgezeichnet. Die Blendenergebnisse werden im B-Bild farbcodiert nach Prüfköpfen überlagert [4]. Die an und in der Schiene vorzufindende Strukturen liefern dabei charakteristische Signale bzw. Abbildungen, die durch Reflexion an den Grenzflächen der Strukturen entstehen. Dies sind bei der gewählten Anordnung die flächige Reflexion und der Winkelspiegel. Im Folgenden werden Muster ausgewählter Strukturen unter Berücksichtigung typischer Prüfparameter beispielhaft dargestellt, wie sie sich im Glassy-Rail-Diagramm abbilden.

Die Abbildungen 3 zeigen Anzeigen von Stegbohrungen. In der Darstellung links sind die simulierten Anzeigemuster zweier Bohrungen mit 33 mm (links) und 16 mm (mitte-rechts) Durchmesser zu erkennen. Als Parameter wurden unter anderem eine Fahrgeschwindigkeit von 60 km/h, ein Sinuslauf von 4 mm und ein Rauschsignal von 2 % gewählt. In der Darstellung rechts sind die Anzeigen zweier dicht benachbarte Bohrungen mit je 33 mm Durchmesser abgebildet, aufgenommen während einer Prüffahrt bei ca. 50 km/h. Die Abbildungsvorschrift für die blenden Ereignisse (bunte Darstellung) ist für beide Abbildungen gleich. In dem simulierten Datensatz kann man sehr gut die Formanzeigen des Querschnittsüberganges vom Kopf- zum Stegbereich als horizontales Linienmuster erkennen.

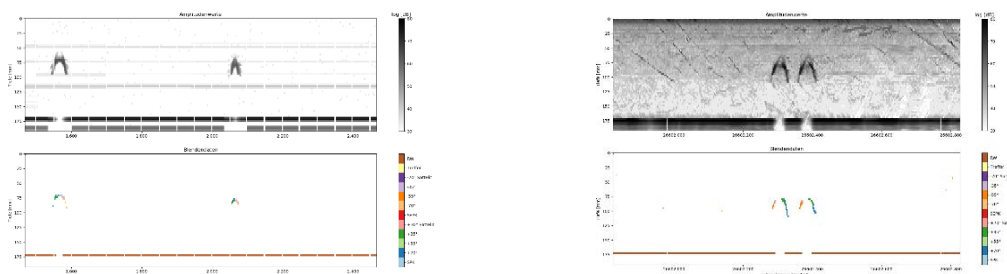


Abb. 3. Simulation (links) und Messung (rechts) von Stegbohrungen*

Die Anzeigen des Querschnittsüberganges sind im Datensatz der Prüffahrt ansatzweise zu erkennen werden hier aber durch ein deutlich höheres Rauschsignal nahezu verdeckt. Die Anzeigen der Stegbohrungen und der dazugehörige Rückwandechoschwächung bilden sich in Simulation und Prüfdaten sehr ähnlich ab. Bei der kleineren Bohrung mit 16 mm Durchmesser erkennt man einen deutlich geringeren Wert der Rückwandechoschwächung. (*Die umgekehrte Farbkodierung der Winkelfunktionen von Simulation zu Messung resultiert aus der fehlenden Berücksichtigung der Fahrtrichtung des Prüfzuges in der Darstellung)

In den Abbildungen 4 und 5 sind Anzeigen von ausgewählten Testreflektoren bzw. Schienenfehlern dargestellt. Die Anzeigen wurden durch entsprechende Simulation erzeugt. Die hier untersuchten Schienenfehler entsprechen Bezugsreflektoren, die im Regelwerk EN 16729-1 [1] prinzipiell definiert sind. Gleichzeitig stellen die hier simulierten Reflektoren Fehlstellen dar, wie sie auch im Schienenfehlerkatalog der Deutschen Bahn [5] abgebildet sind.

Abbildung 4 zeigt zur Oberfläche der Schiene geöffnete rissartige Strukturen, die quer zur Fahrtrichtung verlaufen und senkrecht in die Schiene einlaufen. Im Bild links ist die Anzeige eines 10 mm tiefen Schienenkopffehlers abgebildet, im Bild rechts die Anzeige eines 5 mm tiefen Schienenfußfehlers. Die jeweiligen Anzeigen sind sowohl im Graustufen kodierten Amplitudenbild als auch im blenden Bild zu erkennen. Hier bilden sich die Anzeigen für den zur Fahrfläche geöffneten Fehler vorwiegend mit Signalen von 70° und 55° Prüfköpfen ab. Die Anzeige des Fußfehlers erscheint als Kreuzungspunkt der Signale der 35° Prüfköpfe.

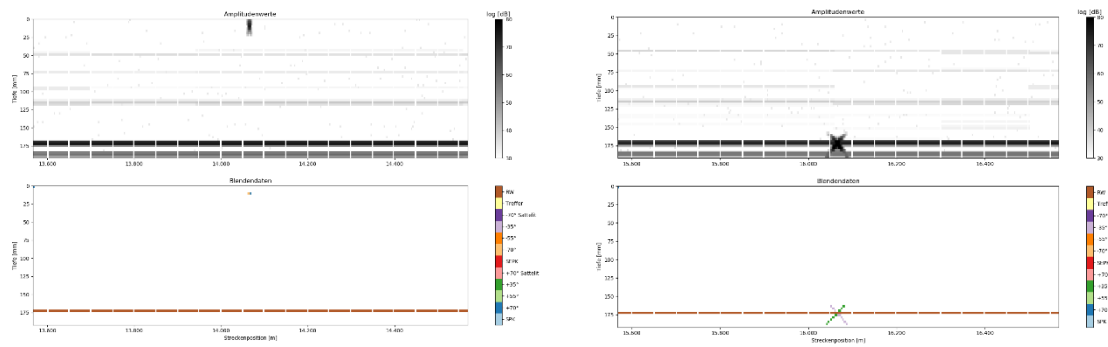


Abb. 4. Simulation von 10 mm tiefen Schienenkopffehler (links) und 5 mm tiefen Schienenfußfehler (rechts)

Neben den Formanzeigen der Rückwand und den Anzeigen der Fehler bilden sich auch hier zusätzliche Anzeigen durch den Querschnittsübergang Kopf- zu Stegbereich und Rauschsignale in den Amplitudendaten ab.

Einen typischen oberflächennahen Defekt stellen Schienenfehler vom Typ SQUAT dar. Dabei handelt es sich um ovale flächige Materialtrennungen dicht unter dem Fahrspiegel. Die Anzeige eines entsprechenden simulierten Reflektors ist in Abbildung 5 auf der linken Seite dargestellt. Man erkennt den direkten Nachweis des Reflektors oberflächennah durch die Signale der Senkrechtprüfköpfe. Als weiteres Merkmal bildet sich eine deutliche Rückwandeoschwächung aus.

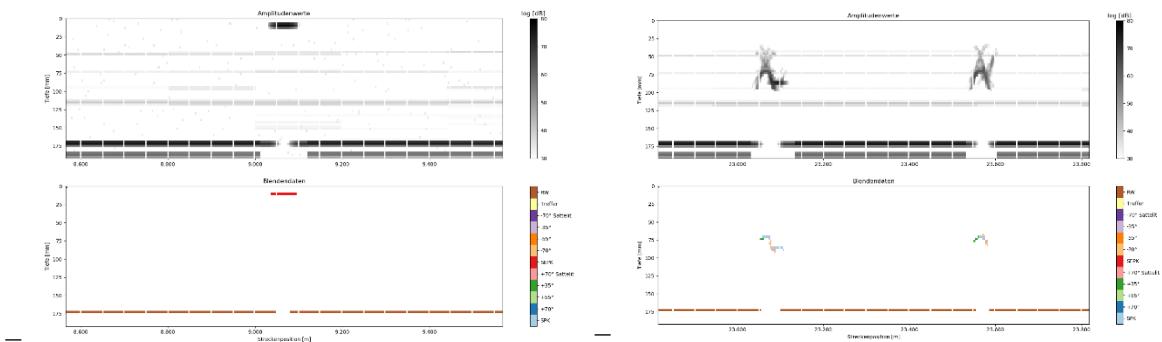


Abb. 5. Simulation eines 50 mm SQUAT (links) und Bohrungsanrissen 90° und 45° (rechts)

Prüfergebnisse an Anrissen an Stegbohrungen wie sie im Regelwerk [1] gefordert sind, sind in Abbildung 5 im rechten Bild dargestellt. Von den Bohrungen gehen jeweils 10 mm lange flächenhafte quer zur Fahrtrichtung verlaufende rissartige Strukturen unter einem Winkel von 90° bzw. 45° aus. In den Amplitudendaten bilden sich beide Bohrungsanrisse ab, während sich in den Blendendaten die Anzeige der unter 45° orientierten Fläche nicht abbildet.

5. Zusammenfassung

Bei der mechanisierten Eisenbahnschienenprüfung mit Ultraschall handelt es sich um einen komplexen Prozess mit vielen das Prüfergebnis beeinflussenden Variablen. Um ein tieferes Verständnis für die Abhängigkeit des Prüfergebnisses von den einzelnen Einflussgrößen zu erlangen, wurde ein Modell entwickelt, welches die wesentlichen Einflussgrößen berücksichtigt und welches es erlaubt, mit simulierten Signalen virtuelle Prüffahrten in Datensätzen abzubilden

Die eingesetzten Simulationsverfahren zur Schallausbreitung basieren auf semianalytischen Modellen (Anwendung von CIVA) und finite Elemente Methoden (Anwendung von ANSYS). Die Zusammenstellung eines Prüfdatensatzes mit örtlich wechselnden Einflussgrößen erfolgt aus den simulierten Daten mithilfe der skriptbasierten Programmierumgebung Python. Es können neben Schienenfehlern und den typischen Formanzeigen (z.B. Stegbohrung, Schweißnaht, Schienenstoß) unter anderem die reale Schienenhöhe, die Fahrgeschwindigkeit, der laterale Versatz der Prüfköpfe durch den Sinuslauf, Ankoppelschwankungen und Rauschsignale variabel berücksichtigt.

Die durch Simulation erzeugten Datensätze liefern im Vergleich mit im Feld aufgenommenen Datensätze vergleichbare Ergebnisse bei der Darstellung im Format des Glassy-Rail-Diagramms. Durch den Vergleich von simulierten Daten an der Testschiene mit im Labormaßstab ermittelten Messergebnissen an der Testschiene ist eine Validierung der Simulation möglich.

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass mithilfe der Simulation Messfahrten von Prüfzügen virtuell abgebildet werden können. Auf Basis dieser Daten können Kataloge mit Musteranzeigen erstellt werden, die definierte Einflussparameter explizit berücksichtigen. Veränderte Randbedingungen können durch Parametervariation in der Simulation zügig berücksichtigt werden. Mit diesem Hilfsmittel ist es nun in einem nächsten Schritt möglich, Signalverarbeitungsalgorithmen für die Klassifikation von Anzeigen zu optimieren.

Referenzen

- [1] EN 16729-1 „Zerstörungsfreie Prüfung an Schienen im Gleis -Teil 1: Anforderungen an Ultraschallprüfungen und Bewertungsgrundlagen“, Beuth Verlag, 2016
- [2] Y. Wack, T. Heckel, R. Boehm, D. Brackrock, „Simulation der Schallausbreitung in Eisenbahnschienen mit FEM und SAM“, DGZfP Jahrestagung, Leipzig, 2018
- [3] R. Armbruster, T. Heckel, S.Fenger, „Die gläserne Schiene“, ZfP Zeitung 121, 2010
- [4] T. Heckel, R. Casperson, S. Rühle, G. Mook, “Signal processing for non-destructive testing of railway tracks”, AIP Conference Proceedings 1949,030005 (2018)
- [5] R. Heyder, “The new UIC catalogue of rail defects”, *Der Eisenbahningenieur*, 52:9, 94-109, 2001