

Virtuelle Referenzschienen nach DIN EN 16729-1 für die Ultraschallprüfung von verlegten Eisenbahnschienen

Tianyun ZHANG¹, Thomas HECKEL¹

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

Kontakt E-Mail: tianyun.zhang@bam.de

Kurzfassung. Im Rahmen des Forschungsvorhabens AIFRI „Artificial Intelligence for Rail Inspection“ wird der Prozess der mechanisierten Schienenprüfung in einem digitalen Zwilling abgebildet, um in einem zweiten Schritt mit KI-Algorithmen eine automatisierte Defekterkennung und -klassifizierung trainieren zu können. Hierzu werden relevante Schienenschädigungen und in der Schiene vorhandene Artefakte analysiert und in skalierbare Modelle übertragen.

Die Norm DIN EN 16729-1 „Bahnanwendungen - Infrastruktur - Zerstörungsfreie Prüfung an Schienen im Gleis - Teil 1: Anforderungen an Ultraschallprüfungen und Bewertungsgrundlagen“^[1] gilt für die Prüfausrüstung von Schienenprüffahrzeugen und handgeführten Rollgeräten und legt die Anforderungen an die Prüfgrundsätze und -systeme bei der Prüfung verlegter Eisenbahnschienen fest, um vergleichbare Ergebnisse in Bezug auf Lage, Art und Größe der Unregelmäßigkeiten in den Schienen zu erhalten.

Um die Performance von Prüfsystemen in der Simulation zu evaluieren, wurden die in den Anhängen der DIN EN 16729-1 angegebenen Bezugsreflektoren als künstliche Reflektoren (nach Anhang A) und simulierte Reflektoren (nach Anhang B) in einem digitalen Zwilling mit einem Schienenprofil 54E4 nach DIN EN 13674-1^[2] sowie mit vereinfachter Geometrie als virtuelle Testschienen abgebildet.

Die Simulationen wurden mit den in den Tabellen 3 und 4 nach DIN EN 16729-1 definierten Prüfkopfwinkeln durchgeführt. Die Rechnungen wurden im Labormaßstab an Testkörpern verifiziert und die Signal-Rausch-Abstände für Untersuchungen im Feld ermittelt.

Ergebnisse der Untersuchungen und Möglichkeiten der Anwendung werden vorgestellt.

Das Forschungsvorhaben wird durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) im Rahmen von mFund unter dem Förderkennzeichen 19FS2014 gefördert.

Einführung

Die Schiene stellt eine wesentliche Komponente des Rad-Schiene-Systems dar. Sie steht in direktem Kontakt mit dem Rad und überträgt über die Schwellen die Verkehrslasten auf den

^[1] DIN EN 16729-1: Bahnanwendungen - Infrastruktur - Zerstörungsfreie Prüfung an Schienen im Gleis - Teil 1: Anforderungen an Ultraschallprüfungen und Bewertungsgrundlagen, Beuth Verlag, 2016.

^[2] DIN EN 13674-1: Bahnanwendungen - Oberbau - Schienen - Teil 1: Vignolschienen ab 46 kg/m, Beuth Verlag, 2017.



Schotter. Dabei muss das gesamte System neben den horizontalen und vertikalen Belastungen auch Ermüdungs- und Biegemomente aufnehmen. Die zerstörungsfreie Prüfung von Eisenbahnschienen mit Schienenprüfzügen ist bei allen Randbedingungen ein Verfahren, das von vielen Parametern beeinflusst wird und somit eine große Anzahl von Variationsmöglichkeiten und Freiheitsgraden aufweist.

Die Sicherheit des Eisenbahnbetriebs kann durch das Auftreten von betriebsbedingten Schienenfehlern beeinträchtigt werden, insbesondere durch das Auftreten von Schienenbrüchen. Um zu objektiven Kriterien für die Bewertung geschädigter Schienen zu gelangen, ist es erforderlich, die auftretenden Defekte zu katalogisieren, unterschiedliche Fehlertypen zu definieren und diese voneinander abzugrenzen. Es kann zu Abnutzungserscheinungen, irreversiblen Verformungen, Rissen, Brüchen sowie anderen Arten von Schäden kommen. Die Klassifizierung der Schienenfehler dient der systematischen Charakterisierung der Schädigungen, die den Ausbau und die Reparatur der geschädigten Schienenbereiche zur Folge haben. Die Untersuchung und Auswertung der aufgetretenen Schädigungen in Verbindung mit der systematischen Charakterisierung lässt Rückschlüsse auf die Ursache und Randbedingung ihres Auftretens zu. Weiterhin können die Größen der Schädigungen ermittelt, entsprechende Beseitigungsmaßnahmen eingeleitet und die Wirksamkeit der getroffenen Maßnahmen bewertet werden. Im Rahmen des Projektes AIFRI sollen diese Prozesse in einem digitalen Zwilling abgebildet werden. Hierzu ist es notwendig, den aktuellen Stand bei der Erkennung und Behebung von Schienenfehlern zu erheben, dokumentieren und überprüfen.

Die Norm DIN EN 16729-1 „Bahnanwendungen - Infrastruktur - Zerstörungsfreie Prüfung an Schienen im Gleis - Teil 1: Anforderungen an Ultraschallprüfungen und Bewertungsgrundlagen“ wird zu der Verifizierung der Wirksamkeit von automatisierten Ultraschall-Schienenprüfsystemen verwendet. Um vergleichbare Aussagen über Ort, Art und Größe von Reflektoren in den Schienen zu erhalten, werden in dem Regelwerk die Anforderungen an Prüfkonzepte und -systeme definiert. Schienenabnutzung, Querprofilabweichungen, Fahrflächenschädigungen sowie äußere und innere Schienenschädigungen werden in diesem Zusammenhang als Schienenfehler betrachtet. Das Prüfkonzept für innere Schienenfehler ist in dem Regelwerk festgelegt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die im Regelwerk beschriebenen Bezugsreflektoren und die Prüfsysteme mit Hilfe der Software CIVA vollständig abgebildet und entsprechend simuliert.

1. Fehlerklasse

Schienenfehler sind Materialveränderungen, -schwächungen oder -trennungen, die je nach Situation zu einer Verschlechterung des Zustands der Schiene bis hin zum Schienenbruch führen können. Die zugehörigen Beurteilungsmaßstäbe über die Art, Lage und Größe der Schienenfehler sind festgelegt, um die Beseitigung besser zu organisieren. Um die Sicherheit des Eisenbahnbetriebes zu gewährleisten, werden detektierte Schienenfehler je nach ihrer Ausprägung bezogen auf Schädigungstiefe und -länge Fehlergruppen zugeordnet und entsprechend nachbearbeitet. Für die allgemeinen Fehlerklassen der Schienenfehler gilt^[3]:

- Die in F3 eingestuften Fehler haben in der Regel eine Länge von kleiner als 10 mm oder eine Tiefe von kleiner als 10 mm.
- Die in F2 eingestuften Fehler haben in der Regel eine Länge von größer als 10 mm und kleiner als oder gleich 30 mm oder eine Tiefe von größer als 10 mm und kleiner als oder gleich 20 mm.
- Die in F1 eingestuften Fehler haben in der Regel eine Länge von größer als 30 mm oder eine Tiefe von größer als 20 mm.

^[3] Richtlinie 821.2007A02 Schienenfehlerkatalog und Beurteilungsmaßstäbe, Deutsche Bahn, 2022.

Die Schiene wird in verschiedene Bereiche unterteilt (Abb. 1). Fehler in dem jeweiligen Bereich werden auch in Hinblick auf die Beseitigungsmaßnahme unterschiedlich bewertet.

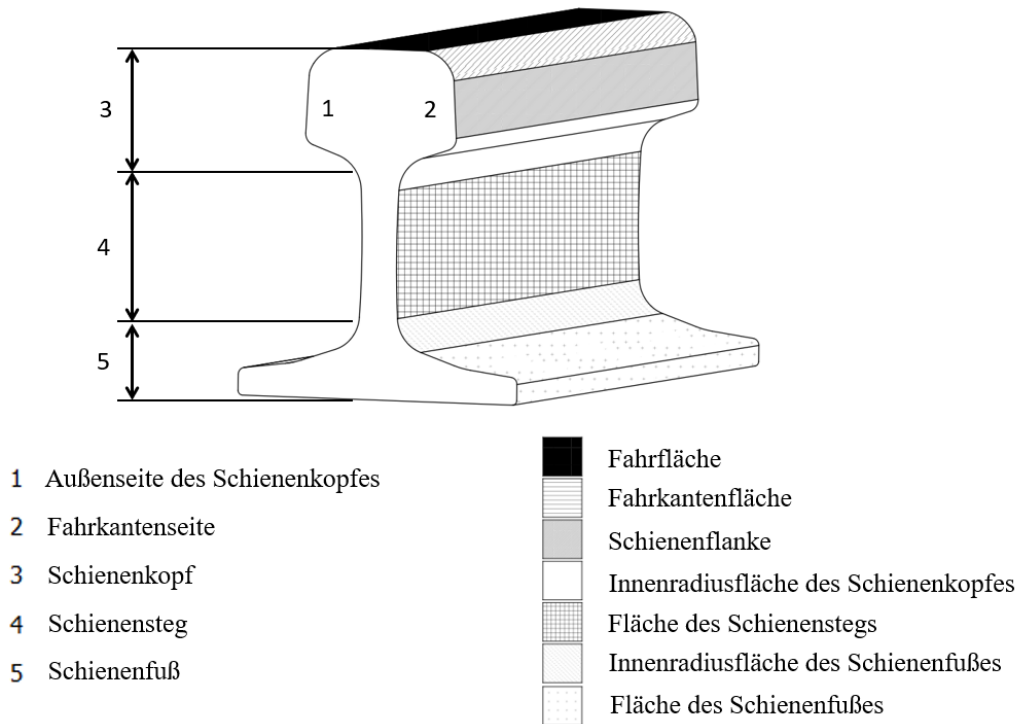


Abbildung 1. Schienenbereich nach DIN EN 16729-1

2. Prüfkopf

Die Frage über die Fahrgeschwindigkeit der Prüfzuges, die Überdeckung des Prüfvolumens und über die Nachweisgrenze steht bei der automatisierten Ultraschallprüfung im Vordergrund. Dafür sollte ein passendes Prüfkonzept entwickelt werden, um eine optimale Prüfempfindlichkeit mit Hilfe von angemessenen Prüfköpfen und Prüftechniken zu erreichen.

In Schienenprüfzügen der DB-Netz AG werden insgesamt acht Prüfköpfe pro Schiene eingesetzt, sechs Winkelprüfköpfe mit 35°, 55° und 70° sowie zwei unterschiedliche Senkrechtprüfköpfe (Abb. 2).

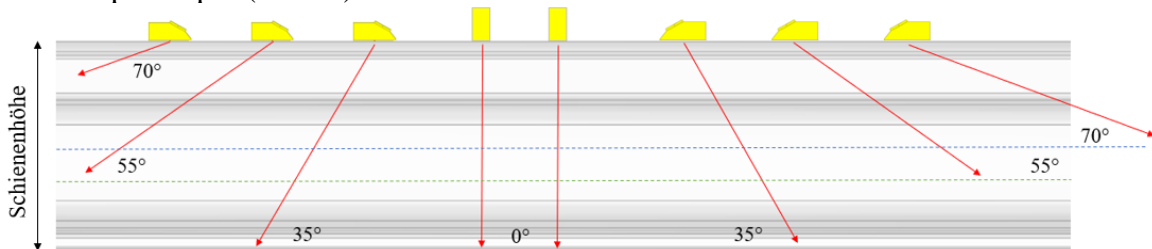


Abbildung 2. Prüfkopfanzordnung mit definierter Reichweite

Abhängig von der vermuteten Fehlerorientierung werden verschiedene Einschallwinkel angewandt. Der Winkelprüfkopf mit einem Winkel von 35° deckt die ganze Schienenhöhe vom Schienenkopf bis zum Schienenfuß ab. Der Winkelprüfkopf mit einem Winkel von 55° wird vom Schienenkopf bis ca. 2/3 der Schienenhöhe für den Nachweis von Schädigungen im Kopf und im Steg eingesetzt. Der Winkelprüfkopf mit einem Winkel von 70° deckt den Bereich vom Schienenkopf bis zur Mitte der Schiene ab. Dies sollte berücksichtigt werden, insbesondere im Hinblick auf die Fehler in den Schienenköpfen.

Die Prüfköpfe haben bei der Schienenprüfung folgende Aufgaben:

- Senkrechtprüfkopf, Schwingerdurchmesser 25 mm mit einer 4 MHz Mittenfrequenz. Dieser Prüfkopf wird für die Suche nach waagerechten Fehlern und (An-)Rissen an Bohrungen in der gesamten Schiene eingesetzt. Darüber hinaus wird die Amplitude des Rückwandechos zur Überprüfung der korrekten Kopplung und des Kopffehlers herangezogen.
- SE-Senkrechtprüfkopf, Schwingerabmessungen 6 mm mal 20 mm mit einer Mittenfrequenz von 4 MHz. Dieser Prüfkopf wird für die Suche nach waagerechten Fehlern und (An-)Rissen an Bohrungen in der gesamten Schiene eingesetzt. Die richtige Positionierung der Prüfköpfe auf der Schiene lässt sich ebenfalls mit ihm überprüfen.
- 35° Winkelprüfkopf, Schwingerabmessungen 22 mm mal 20 mm mit einer Mittenfrequenz von 2 MHz. Dieser Prüfkopf ist für die Suche nach Fehlern mit einer nicht-waagerechten Orientierung und (An-)Rissen an Bohrungen im Steg- und Fußbereich einzusetzen.
- 55° Winkelprüfkopf, Schwingerabmessung 14 mm mal 14 mm mit einer 2 MHz Mittenfrequenz. Dieser Prüfkopf ist für die Suche nach nicht-waagerechten Fehlern im Kopf- und Stegbereich einzusetzen.
- 70° Winkelprüfkopf, Schwingerabmessungen 22 mm mal 20 mm mit einer Mittenfrequenz von 2 MHz. Dieser Prüfkopf ist für die Suche nach nicht-waagerechten Fehlern und (An-)Rissen an Bohrungen im Kopf- und Stegbereich einzusetzen.

3. Durchführung der Simulation

Bei einer realen Prüffahrt werden mehrere Schientypen mit unterschiedlichen Verschleißzuständen und integrierten Funktionskomponenten in unregelmäßiger und unbekannter Reihenfolge geprüft.

Für die Abbildung der virtuellen Testschiene und mit den Bezugsreflektoren wird in der Simulation das Schienenprofil 54E4 verwendet. Für jeden in der DIN EN 16729-1 definierten Reflektor wurde eine Simulation an einem Schienenabschnitt abgebildet und das grundsätzliche Verhalten jedes Prüfkopfes ermittelt. Die Prüfobjekte wurden je nach Reflektorgeometrie und Schienenbereich detailliert oder vereinfacht durch parametrisierbare CAD- und CIVA-Modelle im Mischbetrieb mit 2D- und 3D-Modellen dargestellt (Abb. 3). Die wesentlichen relevanten Einflussfaktoren wurden nachgebildet und für die Bezugsreflektoren sowohl in der Simulation als auch bei der Laboruntersuchung berücksichtigt. Die in Abschnitt 2 beschriebenen Prüfköpfe wurden sowohl virtuell in den Simulationen als auch real in den Laborversuchen verwendet.

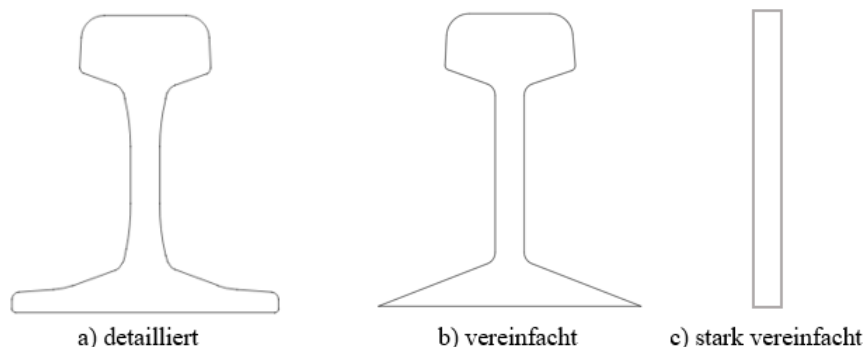


Abbildung 3. Darstellung eines Testkörpers mit einer a) detaillierten, b) vereinfachten, c) stark vereinfachten Geometrie

Bei der Simulation in CIVA wurde für die Winkelprüfköpfe bei den Untersuchungen der Prüfkopf-Reflektor-Geometrie nur die transversale Welle betrachtet. Für die Senkrechtprüfköpfe wurden sowohl die longitudinale als auch die transversale Welle betrachtet. Hierdurch werden zusätzliche geometriebedingte Echos wie z. B. Nebenechos begrenzt berücksichtigt.

Bei der Simulation wurden alle in dem Regelwerk vorgegebenen Parameter zu Größe und Lage der Bezugsreflektoren berücksichtigt und entsprechend variiert. Für alle Simulationen wurde eine Stegbohrung mit einem Durchmesser von 33 mm als Referenzreflektor definiert. Bei auf der Fahrkantenseite angeordneten Bezugsreflektoren wurden die Prüfköpfe entsprechend in Richtung der Fahrkante verschoben.

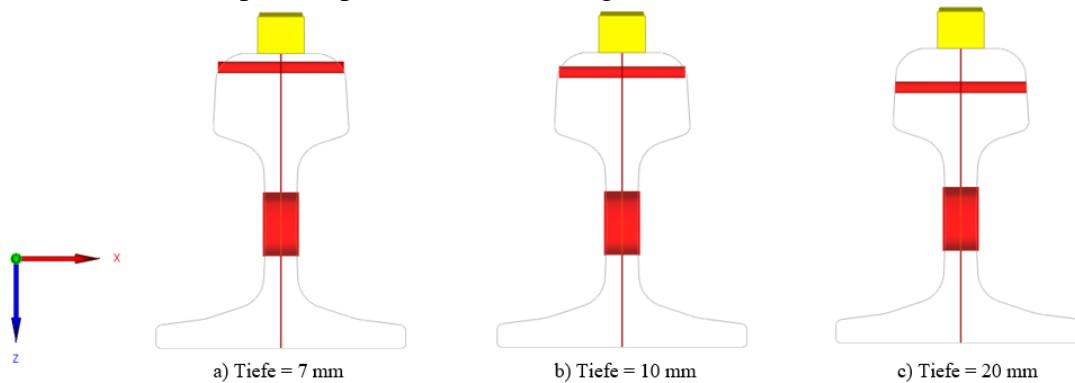


Abbildung 4. Reflektor A1 nach DIN EN 16729-1 mit unterschiedlichen Tiefenanlagen

Die Abbildung 4 zeigt beispielhaft die Umsetzung der Simulation für den Reflektor A1. Die Variation des Reflektors A1 ist für drei Tiefenlagen definiert, der Durchmesser der Querbohrung beträgt in dem Fall 6 mm. Die Mittelpunkte liegen in Abb. 4a 7 mm, in Abb. 4b 10 mm und in Abb. 4c 20 mm von der Lauffläche der Schiene entfernt. Als Referenzreflektor dient die Stegbohrung.

4. Ergebnis

Die Nachweisfähigkeit der Bezugsreflektoren mit den nach DIN EN 16729-1 verbindlich vorgeschriebenen Prüfkopfwinkeln wird in der Tabelle 1 gezeigt.

Folgende Symbole werden verwendet:

- Wird ein Reflektor von dem Prüfkopf durch eine eindeutige Anzeige in der Simulation abgebildet, so wird in der Tabelle diese Kombination mit dem Symbol „✓“ gekennzeichnet.
- Wird in der Simulation für diese Kombination der beste Nachweis erzielt, so wird diese mit dem Symbol „Δ“ gekennzeichnet (Bei der Simulation mit Winkelprüfköpfen wurde die höchste Amplitude als beste Erkennung angesehen, bei der Simulation mit Senkrechtprüfköpfen wurde auch der Rückwandechoausfall in Betracht gezogen).
- Die in der Norm vorgeschriebenen Winkel, die zur Überprüfung der Referenzreflektoren verwendet werden müssen, sind in der Tabelle mit dem Symbol „M“ gekennzeichnet.
- Die optional zu verwendenden Kombinationen sind mit dem Symbol „O“ gekennzeichnet.

Die durchgeführten Simulationen haben gezeigt, dass sich ein optimaler Reflektornachweis nicht in allen Fällen durch die in der Tabelle vorgeschlagenen Prüfkopfwinkel ergibt:

1. Am Beispiel der Reflektoren A11 bis A14 (Riss an der Stegbohrung mit unterschiedlicher Ausdehnungsrichtung), die mit einem geforderten Prüfkopfwinkel von 35° zu prüfen sind, zeigt die Simulation die größte Nachweisempfindlichkeit für einen Prüfkopfwinkel von 55°.
2. Für Reflektor A15 (Bohrung am Übergang zwischen Kopf und Steg) beträgt der vorgeschriebene Prüfkopfwinkel 35°. Die Simulation mit einem Prüfkopfwinkel von 70° weist die größte Nachweisempfindlichkeit auf.
3. Für die Reflektoren B2 bis B4 (horizontaler Reflektor im Schienenkopf oder am Übergang zwischen Kopf und Steg) ist der Prüfkopfwinkel von 70° nicht vorgesehen, aber in der Simulation konnten die Reflektoren damit gut erkannt werden.

Tabelle 1. Prüfempfindlichkeit der vorgeschriebenen Prüfkopfwinkel im Vergleich zu den Simulationsergebnissen

Nr.	Reflektor	Prüfkopfwinkel				Verschieben in Richtung der Fahrkante
		0°	35°	55°	70°	70°
Anhang A						
A1	Volumetrischer Reflektor im Schienenkopf	M✓Δ	O✓	O✓	M✓Δ	M✓
A2	Querreflektor (20°) in der Mitte des Schienenkopfes		✓	✓	M✓Δ	✓
A3	Querreflektor (20°) im Schienenkopf auf der Fahrkantenseite				O✓	M ✓ Δ
A4	Durchgängiger Querreflektor (20°) im Schienenkopf	O✓	O✓	O✓	M✓Δ	M✓
A5	Durchgängiger Querreflektor (35°) im Schienenkopf	O✓	O✓	M✓Δ	M✓	M✓
A6	Durchgängiger Querreflektor (53°) im Schienenkopf	O✓	M✓Δ	O✓	✓	✓
A7	Volumetrischer Reflektor im Schienenkopf auf der Fahrkantenseite		✓	O✓	O✓	M✓Δ
A8	Volumetrischer Reflektor an der Außenseite des Schienenkopfes		✓	O✓	O✓	M✓Δ
A9	Horizontaler Reflektor im Schienenkopf	M✓Δ				
A10	Horizontale Bohrungsnut	M✓Δ				
A11	Bohrungsnut, Position A	O✓Δ	M✓	O✓Δ	O✓	
A12	Bohrungsnut, Position B	O✓Δ	M✓	✓Δ	✓	
A13	Bohrungsnut, Position C	O✓Δ	M✓	O✓Δ	O✓	
A14	Bohrungsnut, Position D	O✓Δ	M✓	✓Δ	✓	
A15	Volumetrischer Reflektor am Radius des Übergangs zwischen Kopf und Steg	M✓Δ	M✓	O✓	✓Δ	
A16	Volumetrischer Reflektor in der Stegmitte	M✓Δ	M✓Δ	✓	✓	

A17	Volumetrischer Reflektor am Radius des Übergangs zwischen Fuß und Steg	O✓Δ	M✓Δ	✓	✓	
A18	Querreflektor (35°) am Radius des Übergangs zwischen Kopf und Steg	O✓	✓	M✓Δ	✓	
A19	Querreflektor (53°) am Radius des Übergangs zwischen Fuß und Steg	✓Δ	M✓Δ	✓	✓	
A20	Vertikaler Längsreflektor	O✓		M✓Δ		
A21	Vertikaler Längsreflektor	O✓		M✓Δ		
A22	Änderung in der Fußstärke	M✓Δ				
A23	5 mm Nut im Schienenfuß		M✓Δ	✓	✓	
A24	10 mm Nut im Schienenfuß		M✓Δ	✓	✓	
A25	Mehrfach wiederholter Reflektor	O✓Δ	O✓	O✓	M✓Δ	O✓
A26	Reflektor zur Überprüfung des Auflösungsvermögens	O✓Δ	O✓	O✓	M✓Δ	O✓
Anhang B						
B1	Künstlicher Reflektor in der Fahrkante				O✓	M✓Δ
B2	Horizontaler Reflektor im Schienenkopf	M✓Δ	✓	✓	✓Δ	
B3	Horizontaler Reflektor vom Kopf in den Steg (Schienenmitte)	M✓Δ	✓	✓	✓Δ	
B4	Horizontaler Reflektor vom Kopf in den Steg (Schienenende)	M✓Δ	O✓	✓	✓Δ	
B6	5 mm Nut im Schienenfuß		M✓Δ	✓	✓	
B7	10 mm Nut im Schienenfuß		M✓Δ	✓	✓	

Abbildung 5 zeigt Beispiele für zusätzliche geometriebedingte Anzeigen. In der Simulation wurden hier folgende Anzeigen abgebildet:

- Abbildung 5a zeigt die Formangaben am Übergang zwischen Kopf und Steg, verursacht durch den Querschnittsübergang (Simulation mit Senkrechtprüfkopf).
- Abbildung 5b zeigt einen Sekundäreffekt an der Bohrung aufgrund des in der Bohrung umlaufenden Echos.

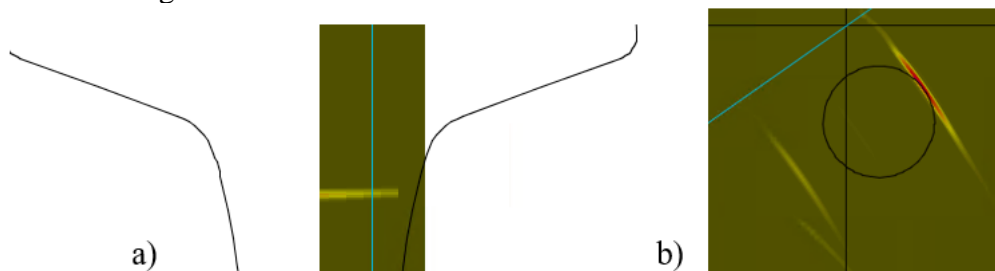


Abbildung 5. a) Querschnittsübergang, b) Sekundäreffekt an Bohrung

In der Abbildung 6 zeigt eine Gegenüberstellung von der Simulation und dem Laborversuch an dem Schienentestkörper UT-1. Für den Vergleich wurde der Prüfkopf mit einem 55° Einschallwinkel sowohl für Simulation als auch für die Labormessung mittig über

dem Schienensteg positioniert. Die beiden Ergebnisse sind trotz unterschiedlicher Farbcodierung qualitativ sehr ähnlich. In der CIVA-Software werden die Ergebnisse in relativer Amplitude ausgedrückt, der Punkt mit der größten Anzeige wird als 0 dB bezeichnet und als Referenzpunkt definiert. In der Abbildung 6 sind die Simulations- und Messergebnisse dargestellt und am Beispiel einer Stegbohrung mit einem Durchmesser von 33 mm (rote markierte Stelle in Abb. 6) verglichen. Die Simulation zeigt eine Amplitude von -5.2 dB für die Bohrung und eine Amplitude von -19,5 dB für den Sekundäreffekt. Der Faktor hier beträgt 5,1. In der Messung ist an der Bohrung eine Amplitude von 53 dB entnommen und eine Amplitude von 35 dB für den Sekundäreffekt abgelesen mit einer Verstärkung von 12 dB. Der Faktor hier ist 7,9.

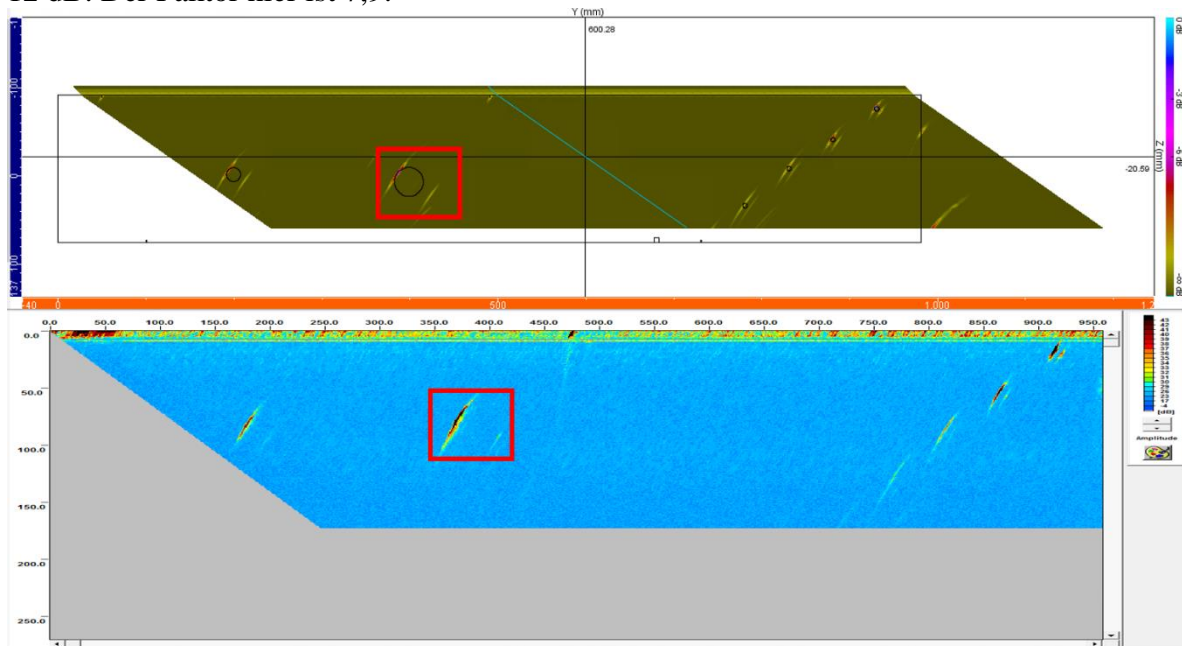


Abbildung 6. Simulationsergebnis (oben) und Messergebnis (unten) zum Vergleich

Eine Betrachtung des Signal-Rausch-Abstandes (SNR) erfolgt in einem Laborversuch, um die Prüfeempfindlichkeit und die Nachweisfähigkeit der Prüfanordnung zu ermitteln, und daraus eine Beziehung zwischen der Simulation und der realen Prüfung abzuleiten. Der SNR berechnet sich aus dem Nutzsignal und dem Rauschsignal. Die Daten wurden der Abb. 6 entnommen. Der Rauschpegel liegt bei ca. 23 dB, die maximale Amplitude bei dieser Prüfung liegt bei 60 dB für die entsprechende Geräteeinstellung. Der SNR beträgt demnach 37 dB.

6. Zusammenfassung

Bei der mechanisierten Eisenbahnschienenprüfung mit Ultraschall werden unterschiedliche Prüfkopfwinkel und -orientierungen mit dem Ziel eingesetzt, die verschiedenen Schienenschädigungen zu detektieren und Fehlerklassen zuzuordnen. Jeder Prüfkopf weist je nach Lage, Art und Orientierung der Schädigung eine individuelle Prüfeempfindlichkeit auf. Die in dem Regelwerk DIN EN 16729-1 definierten Bezugsreflektoren dienen zur Überprüfung der Nachweiseempfindlichkeit der Prüfanordnungen bei Prüffahrten auf einer Testschiene.

Für die Schienenprüfung wurde ein digitaler Zwilling auf semianalytischer Basis in der Simulation mit der Software CIVA abgebildet. Es wurden für das Schienenprofil 54E4 die Prüfkopf-Reflektor-Geometrien für alle Bezugsreflektoren und Prüfköpfe untersucht. Die Simulationsergebnisse wurden tabellarisch analog zu den Tabellen 3 und 4 der DIN EN

16729-1 zusammengestellt. Eine Verschiebung der Prüfköpfe in Richtung der Fahrkante wurde untersucht. Als Referenzreflektor wurde eine Stegbohrung verwendet. Die zusätzlichen Anzeigen durch Wellenumwandlung wurden untersucht.

Eine erste Validierung der Simulation erfolgte durch die Gegenüberstellung der Ergebnisse von Messungen im Labormaßstab an ausgewählten Testkörpern. Dabei ermöglicht die Erfassung des Signal-Rausch-Abstandes im realen Laborversuch dessen Berücksichtigung in der Simulation.

Die Simulationsergebnisse bestätigen weitgehend die in dem Regelwerk vorgeschlagenen Prüfkopf-Reflektor-Geometrien. Es konnten einige zusätzliche sinnvolle Kombinationen identifiziert werden.

Referenzen

[1] DIN EN 16729-1: Bahnanwendungen - Infrastruktur - Zerstörungsfreie Prüfung an Schienen im Gleis - Teil 1: Anforderungen an Ultraschallprüfungen und Bewertungsgrundlagen, Beuth Verlag, 2016.

[2] DIN EN 13674-1: Bahnanwendungen - Oberbau - Schienen - Teil 1: Vignolschienen ab 46 kg/m, Beuth Verlag, 2017.

[3] Richtlinie 821.2007A02 Schienenfehlerkatalog und Beurteilungsmaßstäbe, Deutsche Bahn, 2022.