

Die Wirbelstromprüfung als Hilfsmittel für die Schieneninstandhaltung

Anika DEY, Ralf CASPERSON, Rainer POHL, Hans-Martin THOMAS,
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Unter den Eichen 87,
12205 Berlin

Kurzfassung. Die zerstörungsfreie Oberflächenprüfung an verlegten Eisenbahnschienen mit Wirbelstrom hat in den letzten Jahren durch ständige Weiterentwicklung und Verifizierung enorm an Bedeutung gewonnen. Es wurde u.a. angestrebt zuverlässige Planungsgrößen für den Einsatz von Instandhaltungsmaßnahmen zu erhalten, durch deren gezielten Einsatz Risswachstum unterbunden werden kann. Die Ursache für das Wachstum von Rissen in der Schiene liegt in der Materialermüdung des Werkstoffes infolge der Betriebsbelastungen im Rad-Schiene-Kontakt. Nach einer gewissen Beanspruchungsdauer kommt es an den Kontaktflächen der Fahrkante zu einer Kaltverfestigung des Schienenstahls. Durch fortschreitende Verfestigung des kontaktbeanspruchten Oberflächenbereichs der gehärteten Schicht wird der Werkstoff spröde und es bilden sich feine Risse aus. Die Risse wachsen anfangs unter einem flachen Winkel in das Schieneninnere hinein, neigen dann aber ab einem gewissen Stadium dazu in das Innere des Schienenkopfes abzukippen, was im Extremfall zu einem Schienenbruch führen kann. Diese Rollkontaktermüdungsrisse, auch genannt Head Checks, entstehen bevorzugt in der Fahrkante von bogenäußeren Schienen. Die Anwendung der Wirbelstromprüfung an der Schiene wurde bisher zur Ermittlung der Schädigungstiefe dieser Rollkontaktermüdungsrisse eingesetzt. Das Wirbelstromverfahren besitzt die Eigenschaft, sehr empfindlich auf alle Veränderungen der Materialeigenschaften an der Oberfläche zu reagieren. Daher wurde festgestellt, dass sich neben der Detektion von Rissen auch Fehler wie Eindrückungen oder Schlupfwellen, bis hin zu Materialveränderungen durch Schweißen oder Aufhärtungen in der Schienenoberfläche bestimmen lassen. Die Wirbelstromprüfung besitzt daher das Potenzial, mögliche Orte der Entstehung von Ermüdungsrisse in einem extrem frühzeitigen Stadium nachzuweisen. Ziel ist es, die rissgefährdeten Zonen schon im Zustand der Kaltverfestigung zu identifizieren. Dadurch können sich neue Aspekte für die präventive Schieneninstandhaltung ergeben.

Einführung

Für die zerstörungsfreie Prüfung der Schienenoberfläche hat sich seit einigen Jahren das Wirbelstromverfahren etabliert. Die Anzahl der mit Wirbelstromgeräten ausgerüsteten Prüfsysteme für verlegte Eisenbahnschienen wächst stetig. Eine enorme Bedeutung liegt daher bei der Sicherung der Qualität und Genauigkeit der Prüfergebnisse.

Die Schienenoberfläche unterliegt hohen Beanspruchungen, deren Auswirkungen auf die Schädigungsmechanismen sich je nach Bauart, Schienengüte und Streckenklasse stark unterscheiden können. Daher sind auch in Zukunft weitere Erfahrungen im Gleis unabdingbar, um die Prüftechnik weiter zu entwickeln, zu optimieren und auf dem neusten Stand zu halten. Im Folgenden werden die Eigenschaften der Wirbelstromprüfung an Schienen und Planungsziele für die Zukunft kurz vorgestellt.

1. Allgemeines zur Wirbelstromprüfung an der Schiene

Die Schienenprüfung mit Wirbelstrom ist ein komplexer, anspruchsvoller Vorgang, der nicht nur höchste Ansprüche an die Prüfsysteme, sondern auch an die Prüfer und die Umsetzung der Auswertung stellt. Im Folgenden wird das Verfahren und die damit zu prüfenden Risschädigungen kurz vorgestellt.

Ein Sensor, der als Spulensystem dient, wird mit einem Wechselstrom beaufschlagt, wodurch ein magnetisches Wechselfeld entsteht. Nähert sich der Sensor dem Prüfgegenstand, bilden sich in der Oberfläche durch magnetische Induktion Wirbelströme, die ihrerseits ein sekundäres Magnetfeld erzeugen, welches sich mit dem Primärfeld überlagert. Tritt in der Oberfläche ein Defekt auf, verändern sich die Wirbelströme und somit das sekundäre Magnetfeld, welches wiederum als Messgröße dient. Die Wirbelstromprüfung an der Schiene wurde für die Bestimmung der Schädigungstiefe von offenen Rissen an der Schienenoberfläche entwickelt. Diese Risse entstehen aufgrund der, durch ständigen Rollkontakt verursachten, Ermüdung der Materialoberfläche und tragen die Bezeichnung Head Checks. Head Checks treten hauptsächlich in Außenbögen auf, denn vor allem dort kommt es durch die nach außen gerichteten Zentrifugalkräfte zum verstärkten Anlaufen des Spurranzes an die bogenäußere Fahrkante. Die nur wenige Quadratmillimeter große Kontaktfläche wird in diesem Moment enormen Belastungen ausgesetzt, die auf Dauer zu Werkstoffschädigungen in Form von Oberflächenrissen führen.

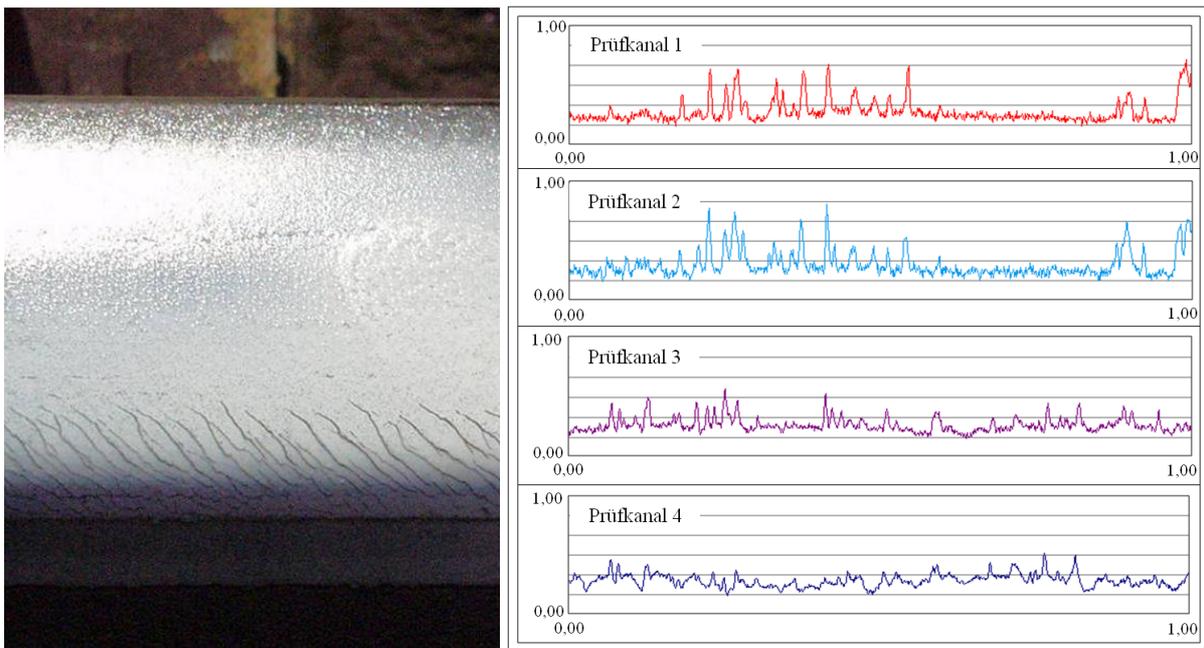


Abb. 1: Foto einer Magnetpulverprüfung von Head Checks und die charakteristischen Wirbelstromsignale von Head Checks auf einer R260 Schiene

Abbildung 1 zeigt ein Foto einer Magnetpulverprüfung von Head Checks in der Draufsicht und die charakteristischen Wirbelstromsignale von Head Checks auf einer R260 Schiene. Zu sehen sind die Signale von vier nebeneinanderliegenden, versetzten Prüfsonden, beginnend mit der Fahrkantensonde (rotes Signalmuster) bis zur Fahrflächensonde (dunkelblaues Signalmuster). Der Verlauf und die Form eines Risses haben einen hohen Einfluss auf die Wirbelstromsignale und sind ausschlaggebend für das Ergebnis. (Die Rahmenbedingungen für die Ergebnisse und mögliche Fehlerquellen sind nachzulesen in Referenz [1].)

2. Der Einfluss des Materialzustandes der Oberfläche auf die Wirbelstromsignale

Die Ausbildung der Wirbelströme wird stark vom Gefügestand des Materials beeinflusst. Um zu zeigen welchen Effekt materialbedingte Oberflächenveränderungen auf die Wirbelstromergebnisse haben können, werden im Folgenden drei Beispiele von vorkommenden Prüfsituationen in der Praxis vorgestellt.

2.1 Gefügeveränderungen durch Schweißungen

Das folgende Beispiel zeigt, dass der Amplitudenverlauf des Wirbelstromsignals sich beim Vorkommen einer Thermitschweißnaht auffallend verändert. In Abbildung 2 (unten) zeigt sich deutlich rechts und links der Schweißnaht ein kleiner Abfall des Signalverlaufs, der durch die Härteunterschiede in der Wärmeeinflusszone verursacht wird. Im Übergangsbereich der Schweißnaht steigen die Härtewerte gegenüber der Schienengüte etwas an. Diese Eigenschaften führen zu einem sehr symptomatischem Signalverlauf, der begünstigt, dass sich Thermitschweißnähte mit der Wirbelstromprüfung sehr gut identifizieren lassen. Anhand von Laboruntersuchungen hat sich gezeigt, dass der Materialhärteverlauf, geprüft nach Brinell (Abbildung 2, oben), im Vergleich zum Wirbelstromsignal qualitativ die gleichen Merkmale aufweist. Dieses Beispiel soll zeigen, dass der Härtezustand der Oberfläche mit dem Amplitudenverlauf der Wirbelstromsignale korreliert. [2]

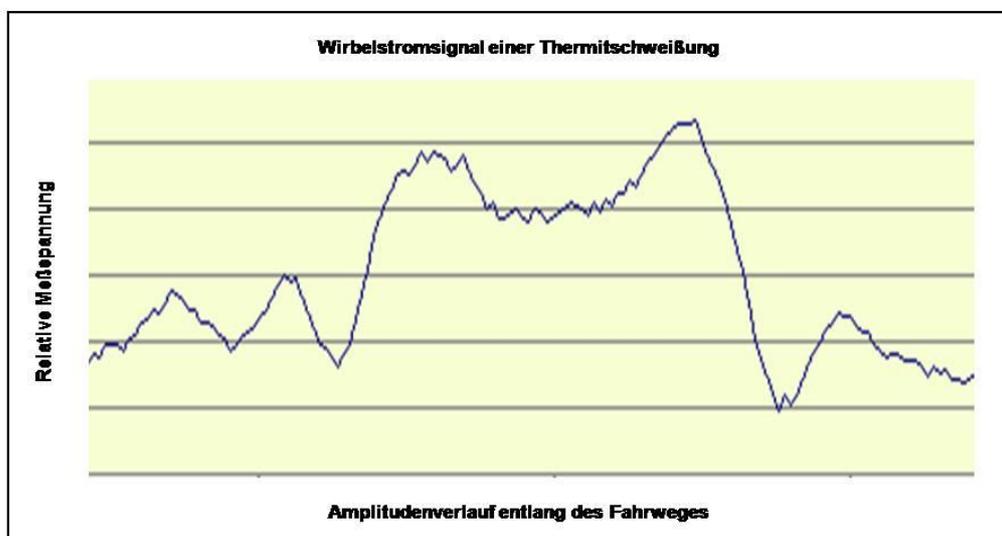
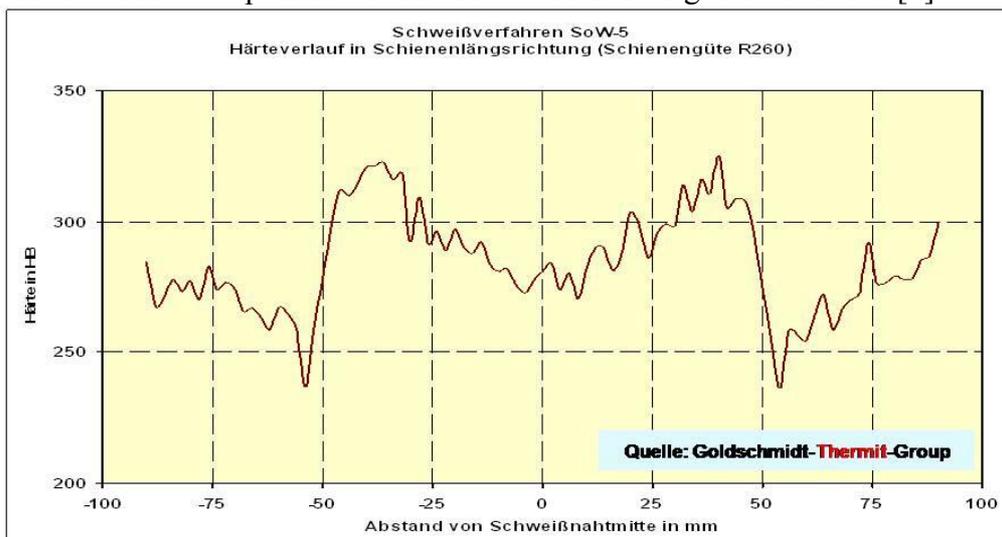


Abb. 2: Härteverlauf (oben) und Wirbelstromsignal (unten) einer Thermitschweißnaht

2.2 Gefügeveränderungen durch Kaltverfestigung

In Kapitel 2.1 konnte am Beispiel einer Schweißnaht gezeigt werden, dass die Wirbelstromprüfung Härteveränderungen in der Schienenoberfläche erfasst. Auch die Kaltverfestigung der Oberflächenschichten beeinflusst dementsprechend den Amplitudenverlauf des Wirbelstromsignals.

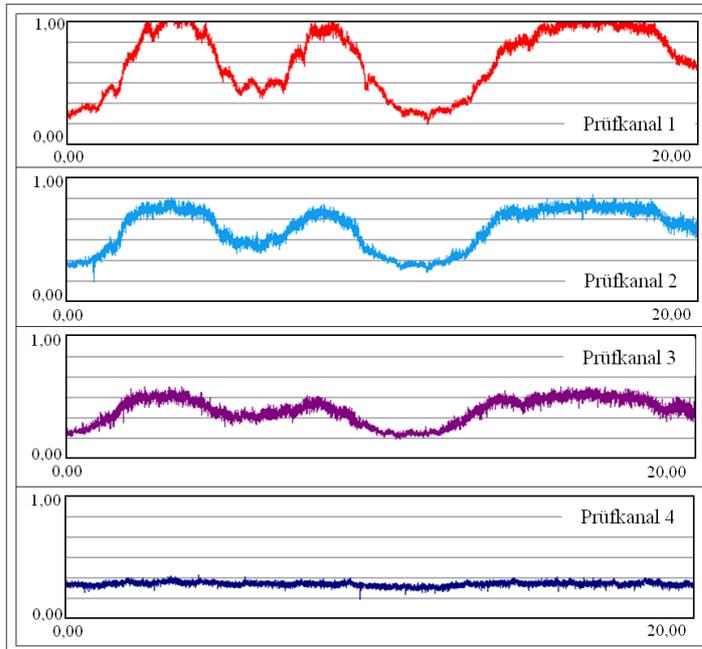


Abbildung 3 zeigt die Wirbelstromsignale eines 20 m langen Abschnitts mit zu- und abnehmendem Härteverlauf. Die Signalberge resultieren aus einer ansteigenden Oberflächenhärte an dieser Position. In den Signal-tälern entspricht der Materialzustand ungefähr dem Grundwerkstoff. Vor allem in der hoch beanspruchten Fahrkante (Prüfkanal 1 und 2) bilden sich die stärksten Signalberge aus. Wohingegen im Prüfkanal 4 keine Signalberge vorhanden sind, was darauf schließen lässt, dass die Materialoberfläche dort dem Grundwerkstoff entspricht.

Abb. 3: Wirbelstromsignale eines 20 m-Abschnitts mit zu- und abnehmendem Härteverlauf

Dieses Beispiel zeigt, dass es grundsätzlich möglich ist, die Gefügeveränderung durch Kaltverfestigung schon in einem frühen Zustand mit der Wirbelstromprüfung zu erfassen. Es ist bekannt, dass sich vor allem auf den Signalbergen, also an den Positionen mit erhöhten Härtewerten, als erstes die Ermüdungsrisse bilden. Daher besteht das Potenzial, schon vor der Ermüdungsrissbildung mit der Wirbelstromprüfung die Orte späterer Head Check-Bildung zu prognostizieren. [2]

Anhand der folgenden Illustration (Abb. 4) soll dargestellt werden, wie Früherkennung mit Wirbelstrom und präventive Schienenpflege zusammenwirken können. Die heutigen Instandhaltungsstrategien bezüglich der Beseitigung von Rollkontaktermüdungsrissen sind unterschiedlich vielfältig. Üblicherweise wird frühestens im Stadium der Rissbildung (Zeitabschnitt gelb), jedoch noch eher im Zeitraum des Risswachstums (Zeitabschnitt rot) mit schleiftechnischen Maßnahmen eingegriffen. Eine Bewertung mit der Wirbelstromprüfung über die Schädigungstiefe beginnt gewöhnlich in dem Zeitraum, in dem das Risswachstum (Zeitabschnitt rot) bereits begonnen hat. Wenn es möglich wird, den Zustand der Kaltverfestigung (Zeitabschnitt blau) als eine feste Instandhaltungsgröße anzugeben, könnten die Wirbelstromergebnisse dazu beitragen den Einsatz des Präventivschleifens frühzeitig in zu Gang setzen, mit dem Ziel die Rissbildung hinauszuzögern.

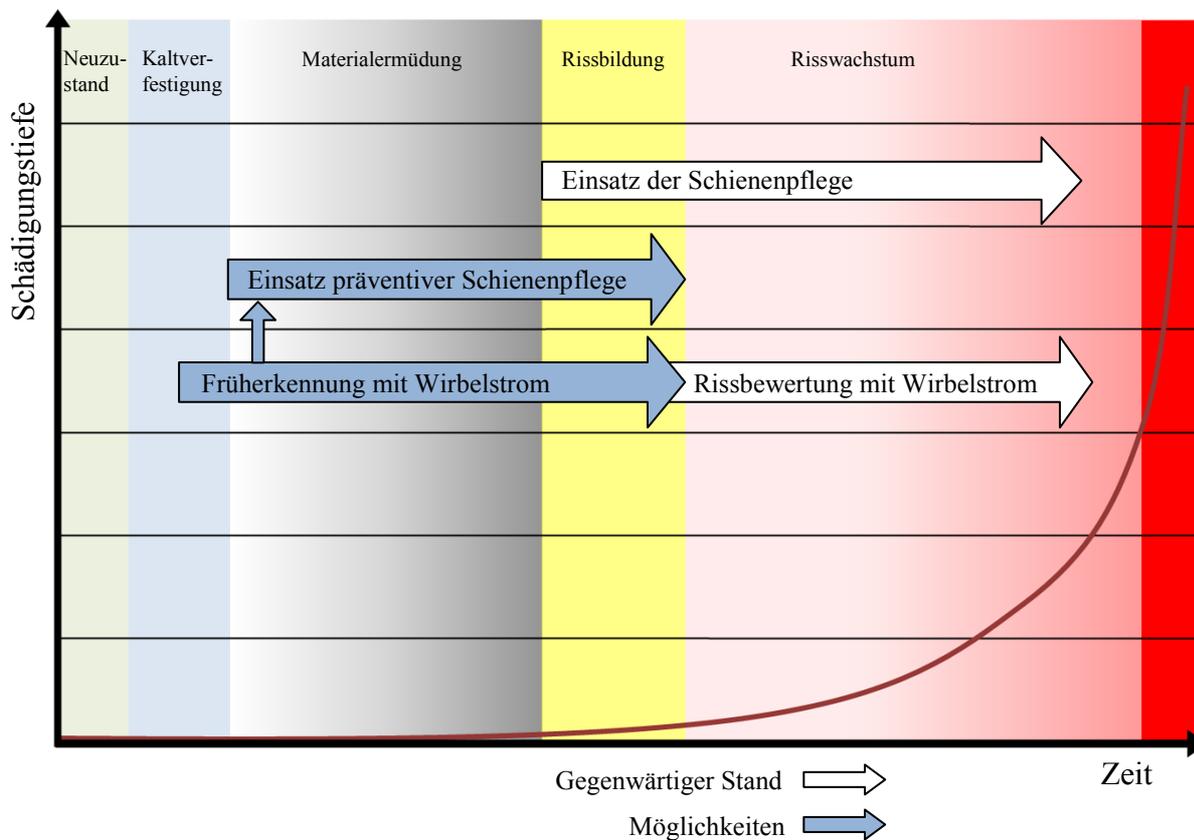


Abb. 4: Prognosemodell der Rissbildungsphasen

2.3 Rissprüfung an hochfesten Schienengüten

Hochfeste Schienengüten unterliegen nicht nur anderen Herstellungsprozessen als die Normalgüte R260, sondern können außerdem aus einer anderen Materialzusammensetzung bestehen. Das aktuelle Wirbelstromprüfsystem wurde für die Normalgüte R260 entwickelt und anhand von Referenzkörpern auf die elektromagnetischen Eigenschaften dieses Werkstoffes optimiert. Der Einfluss anderer Schienenwerkstoffe ist noch nicht vollständig untersucht. Es werden jedoch gegenwärtig verschiedene Prüfeinsätze und Tests vorgenommen, um festzustellen, welche Auswirkungen andere Schienengüten auf die Aussagesicherheit der Wirbelstromergebnisse haben.

In den letzten Jahren kam, vor allem in Bögen, die Schienengüte R350 HT immer häufiger zum Einsatz. Dabei handelt es sich, wie bei der Güte R260, um einen Kohlenstoff-Mangan-Stahl, der einer speziellen Wärmebehandlung unterzogen wird. Die Schienenoberfläche

wird in einem Temperaturzustand von 850-950° C gezielt auf 650-500° C abgekühlt. Dadurch kann die Grundhärte an der Oberfläche bis auf 380 HV gesteigert werden. Die dadurch erzielte höhere Härte, Zähigkeit und der verbesserte Widerstand gegen Rollkontaktermüdung sollen eine längere Lebensdauer bewirken, als es bei der Regelgüte R260 der Fall ist. [3]

Die Gefügeveränderungen durch die erhöhte Oberflächenhärte in R350 HT Schienen können zu bisher noch nicht vollständig untersuchten Veränderungen der Signalamplituden führen. Ein Problem stellen vor allem die sehr eng nebeneinanderliegenden Risse dar, die für diese Schienengüte charakteristisch sind. Diese Umstände können zu einer Verfälschung der Tiefenaussage führen. Um festzustellen, ob die Auswertung der Schädigungstiefe im Falle von Head Checks in R350 HT Schienen noch stimmig ist, wird versucht mit Hilfe von unterschiedlichen Einsätzen die Ergebnisse zu verifizieren. An einem ausgesuchten Bogen wurde dafür ein Schleifeinsatz mit kombinierten Wirbelstrom- und Abtragsmessungen durchgeführt. Abbildung 5 (links) zeigt einen 1 m langen Ausschnitt von Wirbelstromsignalen aus einem Streckenabschnitt mit kopfgehärteten Schienen der Head Check-Schädigungen aufweist. Anhand von metallurgischen Untersuchungen wurde in der Vergangenheit festgestellt, dass im Gegensatz zu Schädigungen in R260 Schienen, Head Checks in kopfgehärteten Schienen rund 0,50 mm tief wachsen. Auch im Beispiel von Abbildung 5 (links) sind die Signalamplituden der Head Checks wesentlich kleiner, als in dem oben gezeigten Beispiel der R260 Schiene (Kapitel 1, Abb.1). Der gesamte Prüfabschnitt wies eine durchschnittliche Schädigungstiefe von 0,40 mm auf. Das Maximum lag bei 0,90 mm. Da bei der R350 HT Güte die Risse jedoch wesentlich enger wachsen, als es bei der Normalgüte der Fall ist und deshalb das Ergebnis verfälschen können, hat sich die Frage gestellt, ob die Schädigungstiefen von 0,40 mm zutreffend sind.

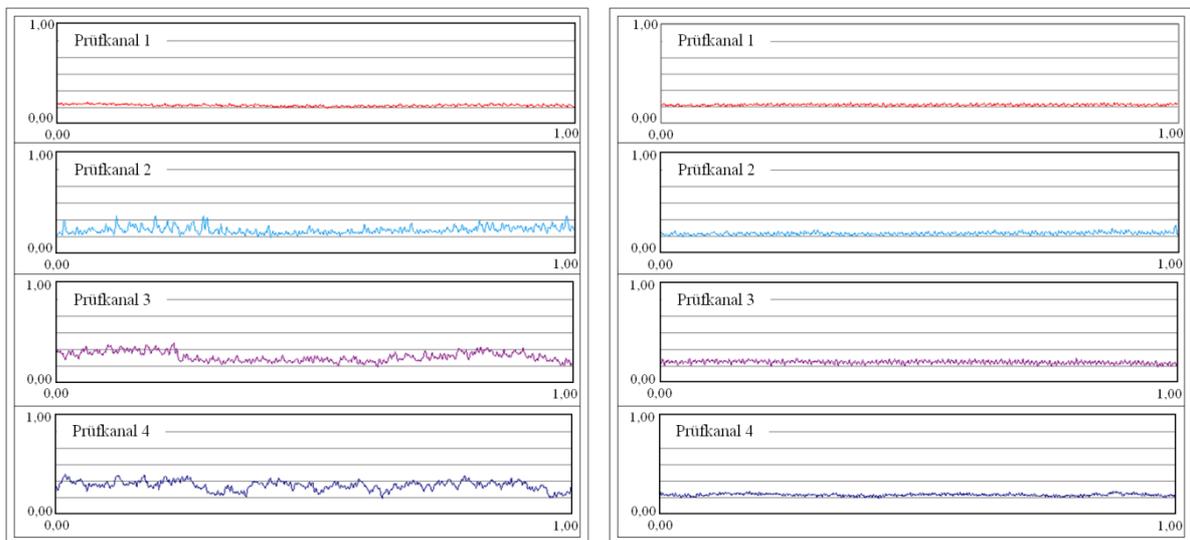


Abb. 5: Kopfgehärtete Schiene mit Head Checks (links) und nach fünf Schleifabträgen (rechts)

In Abbildung 5 (rechts) ist der gleiche 1 m lange Streckenausschnitt wie auf der linken Seite, nach mehreren Schleifabträgen, dargestellt. Es sind keine Signalamplituden aufgrund von Head Checks mehr vorhanden. Es wurde zu diesem Zeitpunkt fünfmal geschliffen mit einem Abtrag von ca. 1 mm. Bei der Betrachtung des gesamten Abschnitts hat sich gezeigt, dass alle Schädigungen, auch die Maximalanzeigen von 0,90 mm, beseitigt wurden.

Es konnte in diesem Beispiel davon ausgegangen werden, dass die Schädigungstiefen, trotz des engen Abstands der Risse nicht unterbewertet wurden und dass unter den relativ kleinen Signalen keine tieferen Risse versteckt lagen, die durch die Überlagerungen verfälscht bewertet wurden. Trotzdem sollte in Zukunft anhand von weiteren Untersuchungen

noch exakter festgestellt werden, wie genau die durchschnittliche Schädigungstiefe in kopfgehärteten Schienen mit den realen Risstiefen übereinstimmt.

3. Fazit

Für die Planung und Qualitätssicherung der Schieneninstandhaltung mithilfe der ZfP ist die Einhaltung der Rahmenbedingungen und eine hohe Genauigkeit der Auswertung unverzichtbar. Die o.g. Beispiele sollen eine kleine Übersicht darüber geben, welche Möglichkeiten die Wirbelstromprüfung bieten kann. Es soll aber auch gezeigt werden, an welche Grenzen das Verfahren stoßen kann, bzw. aufgrund welcher Situationen noch weitere Untersuchungen und Verifizierungen notwendig sind. Durch den großen Einfluss des Materialzustands der Oberfläche auf die Qualität der Prüfaussage ist es wichtig in Zukunft weiterhin zu prüfen, welche Ungenauigkeiten sich durch eine Änderung der Schienengüte ergeben. Die Risstiefenbestimmung im Falle der immer enger beieinanderliegenden Head Checks bei hochfesten Schienen soll weiterhin verfolgt und die Genauigkeit der Auswertung noch verbessert werden. Eine Weiterverfolgung der Thematik „Früherkennung von Rollkontaktermüdung“ kann zu optimierten Präventivmaßnahmen beitragen, die ein Risswachstum von vornherein unterbinden.

Referenzen

- [1] R. Pohl, R. Casperson, H.-M. Thomas
Mögliche Fehlerquellen und deren Einflüsse auf das Ergebnis bei der Risstiefenbestimmung mit Wirbelstrom
DGZfP Jahrestagung 2009
Münster 18.-20.05.2009
- [2] H.-M. Thomas, A. Dey, R. Pohl, R. Heyder, R. Krull, K. Dilz
Früherkennung von Rollkontaktermüdung (RCF) in Eisenbahnschienen
DGZfP DACH-Tagung 2008,
St. Gallen 28.-30.04.2008
- [3] Lothar Fendrich (Hrsg.)
Handbuch Eisenbahninfrastruktur;
Kapitel 6: Schienen und Schienenschweißen; Heinrich Köstermann und Klaus Meißner
S.310-313, Eigenschaften des Schienenstahls
Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007