

# Erfahrungen mit der Wirbelstromprüfung beim Einsatz an unterschiedlichen Schienenstahlsorten

Anika DEY\*, Ralf CASPERSON\*, Rainer POHL\*, Hans-Martin THOMAS\*  
René HEYDER\*\*

\* BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung  
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin  
anika.dey@bam.de  
\*\* DB Systemtechnik  
Bahntechnikerring 74, 14774 Brandenburg-Kirchmöser

**Kurzfassung.** Die steigenden Anforderungen im Schienenverkehr haben u. a. wachsende Betriebsbeanspruchungen für das Führungselement Schiene zur Folge. Auf Strecken mit hohen Belastungen wird dadurch die Entstehung von Rollkontaktermüdungsrissen, den sog. Head Checks, begünstigt. Für die Quantifizierung von Schäden im Hinblick auf eine optimierte Instandhaltung, setzt die DB AG daher seit einigen Jahren die Wirbelstromprüfung an Schienen ein. Es wurde ein Wirbelstromprüfsystem speziell für die Detektion und Bewertung von Head Checks auf der Schienenstahlsorte R260 entwickelt. Um den Instandhaltungsaufwand möglichst gering zu halten, unterliegen Eisenbahnschienen einer ständigen technologischen Weiterentwicklung durch die Hersteller. Durch Verbesserung der Schienenstahlsorten soll ein größerer Widerstand gegen die Bildung von Rollkontaktermüdungsrissen erreicht werden. Anhand von Streckenversuchen der DB AG in den letzten Jahren konnte festgestellt werden, dass tatsächlich eine Verminderung der Risswachstumsgeschwindigkeit erzielt wurde. Dafür zeigten sich im Vergleich zur Stahlsorte R260 abweichende Rissgeometrien, geringere Abstände zwischen den Ermüdungsrissen und somit eine größere Dichte des Rissfeldes. Die daraus resultierenden Folgen für die Ergebnisse der Wirbelstromprüfung werden hier erläutert. Praktische Prüferfahrungen an Schienenstahlsorten mit höherer Festigkeit werden vorgestellt.

## Einführung

Eisenbahnschienen erreichen im Betrieb durch hohe Geschwindigkeiten, schwere Achslasten, mangelhafte Instandhaltung des darunter liegenden Oberbaus etc. oft die Grenzen ihrer Belastbarkeit. Die Folgen sind starke Verschleißerscheinungen und Materialermüdung. Für eine maximale Beständigkeit gegen die Betriebsbelastung werden seit vielen Jahren von den Schienenherstellern höherwertigere Stahlsorten entwickelt. Um eine Gefährdung des Fahrbetriebes durch Unfälle auszuschließen, werden regelmäßige Inspektionen durch zerstörungsfreie Prüfverfahren wie dem Ultraschallverfahren und der Wirbelstromprüfung durchgeführt. Im Folgenden werden die praktischen Erfahrungen mit der Wirbelstromprüfung beim Einsatz an verlegten Schienen mit verschiedenen Werkstoffeigenschaften vorgestellt.

## **1. Beispiele für Schienenstahlsorten**

In der europäischen Norm für Vignolschienen mit einer längenbezogenen Masse ab 46 kg/m sind neun perlitische Stahlsorten aufgeführt. [1]

Für diesen Beitrag wurden zur näheren Betrachtung der Ergebnisse mit dem Wirbelstromverfahren drei unterschiedliche Stahlsorten ausgewählt.

### *1.1 Stahlsorte R260*

Die Stahlsorte R260 wird seit Jahrzehnten im deutschen Streckennetz als Standardschiene verwendet. Dieser Schienenstahl besteht aus einem vollperlitischem Gefüge, ist unlegiert (C-Mn) und wird nicht wärmebehandelt. Der Kohlenstoffmassenanteil liegt zwischen 0,6 und 0,8 %. Der Härtebereich im Schienenkopf liegt zwischen 260 und 300 HBW. [1]

### *1.2 Stahlsorte R350HT*

Für eine ausreichende Ermüdungsfestigkeit und hohen Verschleißwiderstand wird seit einigen Jahren die Stahlsorte R350HT, auch bezeichnet als kopfgehärtete Schiene, hergestellt. Diese Stahlsorte wird wärmebehandelt und durchläuft eine Gefügeumwandlung mittels einer beschleunigten Abkühlung aus dem Austenitisierungsbereich, wodurch ein feinperlitisches Gefüge mit hoher Härte und Festigkeit entsteht. Die R350HT Schiene ist unlegiert und der Härtebereich im Schienenkopf liegt zwischen 350 und 390 HBW. Der Kohlenstoffmassenanteil liegt zwischen 0,7 und 0,8 %. Dieser Werkstoff wird vor allem in sehr intensiv belasteten Bögen mit engen Radien eingebaut. [1, 2]

### *1.3 Stahlsorte R370CrHT*

Die Stahlsorte R370CrHT wird ebenfalls für besseren Widerstand gegen Ermüdungsschäden und Verschleiß auf hoch belasteten Strecken mit Mischverkehr oder in engen Bögen hergestellt, kommt jedoch in Deutschland bisher eher auf Versuchsstrecken zum Einsatz. [2] Dieser Stahl ist wärmebehandelt und leicht legiert und enthält einen Chrom-Anteil von 0,4 bis 0,6 % und einen Kohlenstoffmassenanteil von 0,7 bis 0,8 %. Durch die leichte Legierung erhöht sich die Festigkeit und der Härtebereich im Schienenkopf liegt zwischen 370 und 410 HBW. [1]

## **2. Rollkontaktermüdung und Bewertung der Schädigung**

### *2.1 Rollkontaktermüdung*

Das Ziel der Verwendung von wärmebehandelten Schienenstahlsorten ist die Verminderung von Verschleiß und die Erhöhung des Widerstands gegen Rollkontaktermüdung. Damit kann für den Betreiber durch eine Verlängerung der Schienenliegedauer und eine Reduzierung der Instandhaltungsaufwendungen die Wirtschaftlichkeit der Strecke und die Sicherheit des Fahrbetriebs gesteigert werden. Ein seit einigen Jahren häufig auftretendes Schadensbild ist die Entstehung von Rollkontaktermüdrissen in Bögen. Die Kontaktfläche der Schienenfahrkante ist insbesondere im Bogen erheblichen Beanspruchungen ausgesetzt. Auf eine Berührungsfläche von nur wenigen Millimetern wirken enorme Wechselkräfte. Eine Folge dieser Belastungssituation ist die Ermüdung der Oberflächenschicht im Rad-Schiene-Kontaktbereich und die Ausbildung eines feinen Rissmusters. Diese Risse erstrecken sich in einigermaßen regelmäßigen Abständen über größere Bereiche und werden als Head

Checks bezeichnet. Bei der Betrachtung des äußeren Erscheinungsbildes lässt sich, wie in Abbildung 2.1 dargestellt, nur die Risshäufigkeit, der Rissabstand und die Risslänge auf der Schienenoberfläche erkennen. Anhand der Oberfläche ist keine Aussage über die in Abbildung 2.2 gezeigten Größen, wie die Risstiefe, der Eindringwinkel oder die Schädigungstiefe möglich.

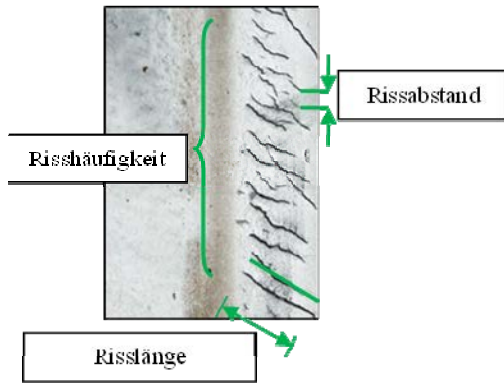


Abb. 2.1. Draufsicht Head Checks

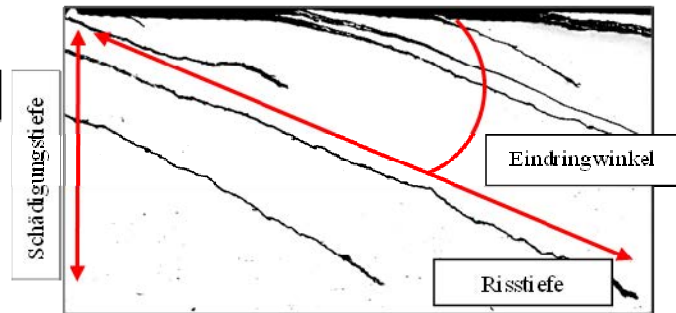


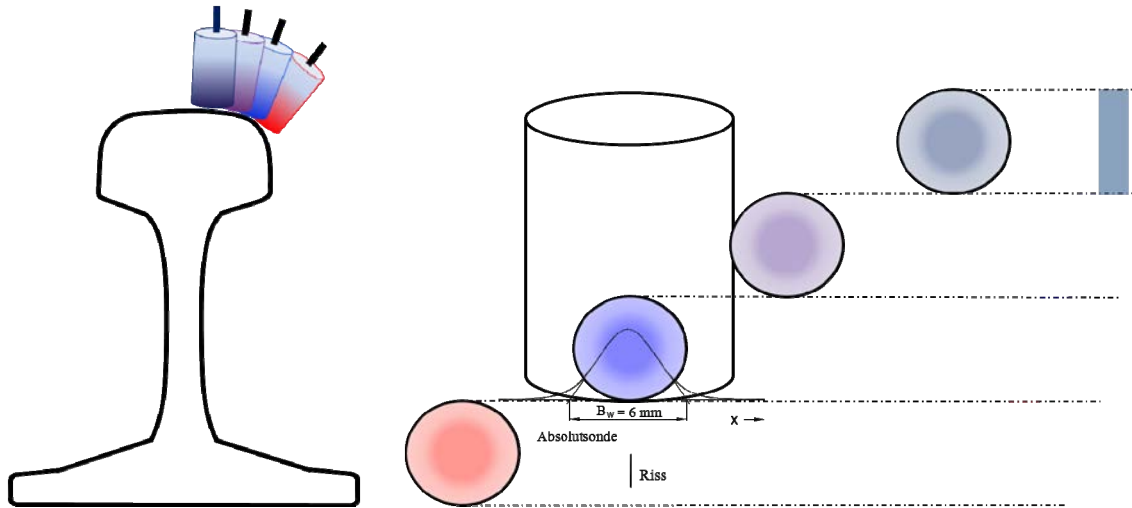
Abb. 2.2. Querschliff Head Checks

Für die quantitative Erfassung der Risstiefe wird das Wirbelstromprüfverfahren angewendet. [3]

## 2.2 Rahmenbedingungen für die Schienenprüfung mit dem Wirbelstromverfahren

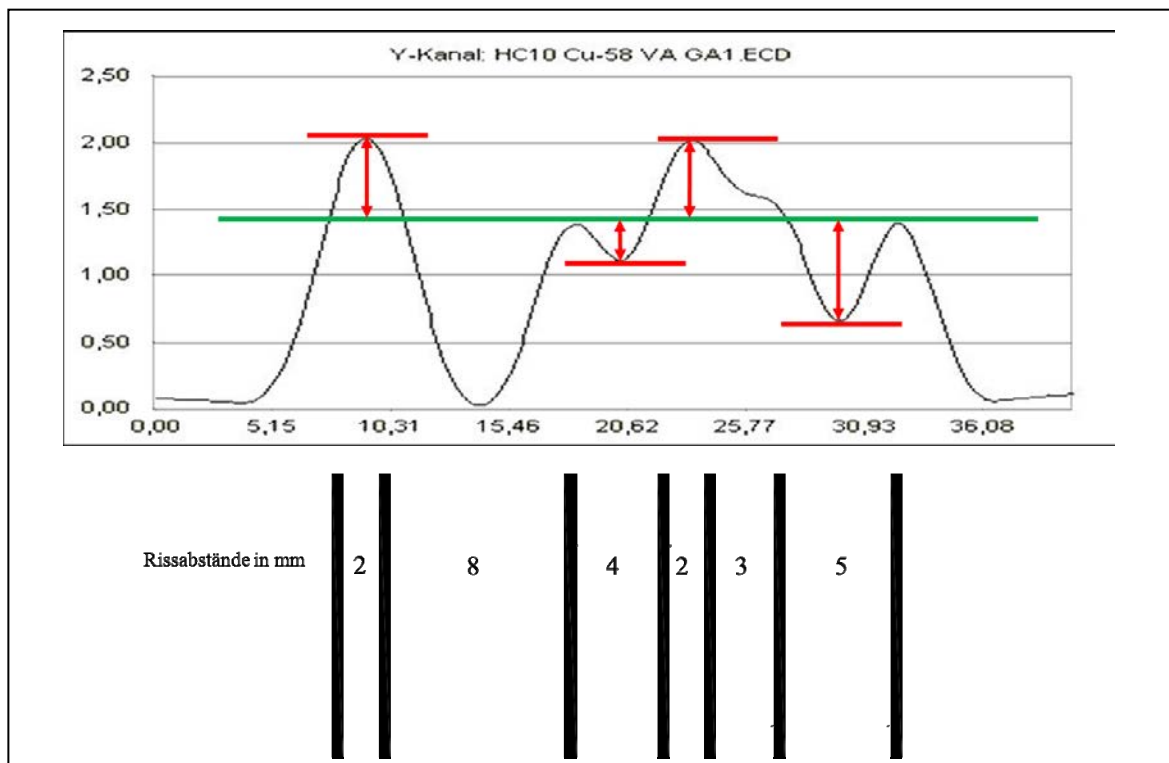
Die Veränderung des Wirbelstromsignals durch eine rissartige Fehlstelle beruht auf der Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit. Da die Schiene ferromagnetisch ist, dringen die Wirbelströme nicht in den Werkstoff ein, sondern bewegen sich an der Oberfläche. Tritt ein Riss auf, fließen die Wirbelströme an den Rissflanken entlang. Durch diese Eigenschaft kann mit der Wirbelstromprüfung die Risstiefe (Abb.2.2) bestimmt werden. Der Eindringwinkel ist nicht bekannt, daher wird aufgrund von statistischen Untersuchungen an Schlifffildern ein mittlerer Winkel von  $25^\circ$  angenommen. Mit Hilfe dieses Winkels und der Risstiefe, wird daraus die entsprechende Schädigungstiefe errechnet.

Bei der Wirbelstromprüfung an Schienen wird ein Absolutsensor mit einer Wirkbreite von 6 mm eingesetzt. Von der Fahrkante bis in Richtung Schienenmitte laufen vier Wirbelstromsonden (Abb. 2.3 links) mit einem Versatz von 6 mm an der Schiene entlang. [3] Beim Abtasten eines Risses mit einem Absolutsensor ergibt sich durch die Wirkbreite des Sensors ein Signalverlauf der wesentlich breiter ist, als der Riss selbst. Dieser Signalverlauf und die Wirkbreite sind in Abbildung 2.3 rechts als  $B_w$  dargestellt. Darüber ist die Breite vom Sondengehäuse aufgezeichnet. Die farbigen Kreise stellen den Wirkbreitenbereich als Fläche dar, wobei zu bedenken ist, dass das Signal, welches der Sensor erkennt, nach außen hin immer schwächer wird (gewichtete Mittelwertbildung).



**Abb. 2.3.** Schematische Darstellung der Sondenpositionen an der Schiene und Wirkbreitenbereich

Befinden sich innerhalb des Wirkbreitenbereiches mehrere Risse, überlagern sich die Prüfsignale. Wie in Abbildung 2.4 zu sehen, wird das Rohsignal mit der y-Komponente über den Weg dargestellt. Der Signalverlauf in dieser Abbildung ist an einem Testkörper mit erodierten Rissen gleicher Tiefe, jedoch mit unterschiedlichen Abständen entstanden. Treten Rissabstände unter 4 mm auf, erhöht sich das Signal durch Überlagerung. Sind die Abstände kleiner als 2 mm, ist nicht mehr abzulesen, wie viele Risse zur Signalerzeugung beigetragen haben. Liegen die Rissabstände unter 7 mm, geht das Signal nicht zurück bis zur Nulllinie. Diese Einflüsse erschweren die Auswertung der Prüfdaten. [4]



**Abb. 2.4.** Wirbelstromsignale am Testkörper mit Rissen gleicher Tiefe

### 3. Ergebnisse mit der Schienenprüfung an verschiedenen Schienenstahlsorten

Die Wirbelstromprüfung bietet die Möglichkeit über den gesamten, geprüften Streckenbereich den Zustand der Schienenoberfläche abzuschätzen und soll eine Hilfestellung für Instandsetzungsmaßnahmen des Fahrwegs geben. Im Folgenden werden die ausgewerteten Ergebnisse an verschiedenen Schienenstahlsorten vorgestellt. Es wird gezeigt, welche Auswirkungen es auf die Auswertung hat, wenn der Zustand in der Praxis nicht mit den unter 2.4 genannten Rahmenbedingungen übereinstimmt.

#### 3.1 Schienenstahlsorte R260

##### 3.1.1 Erstes Beispiel – R260

In der Abbildung 3.1 links wird ein mit Wirbelstrom geprüfter und dann ausgewerteter Ausschnitt mit einer Länge von 22 m gezeigt. In den vier Spuren kann die maximale Schädigungstiefe in mm abgelesen werden, die jeweils für einen Meter von der entsprechenden Sonde ausgewertet wurde. Über den Ergebnissen der Schädigungstiefen, wird die Anzahl der Risse pro Meter dargestellt (Risshäufigkeit).

Die Abbildung 3.1 rechts zeigt einen Ausschnitt der Wirbelstromrohnsignale von einem Meter aus dem geprüften Abschnitt. Daraus wird mit einer entsprechenden Software die Schädigungstiefe errechnet. In dem Prüfausschnitt sind gut die charakteristischen Signale für Head Checks zu erkennen. Es existiert an ausreichend vielen Positionen eine Nulllinie als Referenz für die Tiefenbestimmung. Dieses Beispiel erfüllt die Anforderungen für die Risstiefenbestimmung sehr gut.

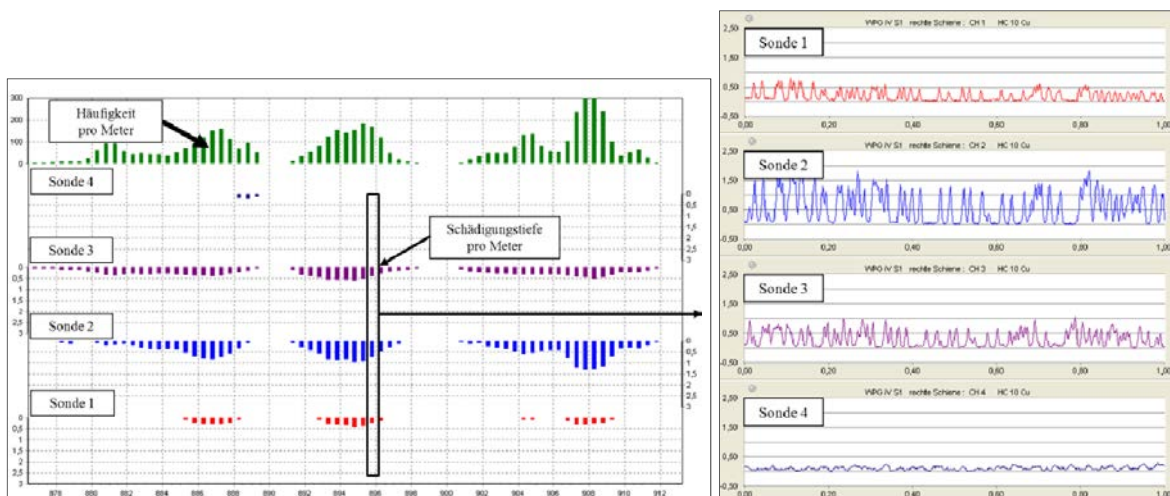


Abb. 3.1. Auswertung erstes Beispiel Stahlsorte R260 über 22 m und Wirbelstromsignale aus einem Meter

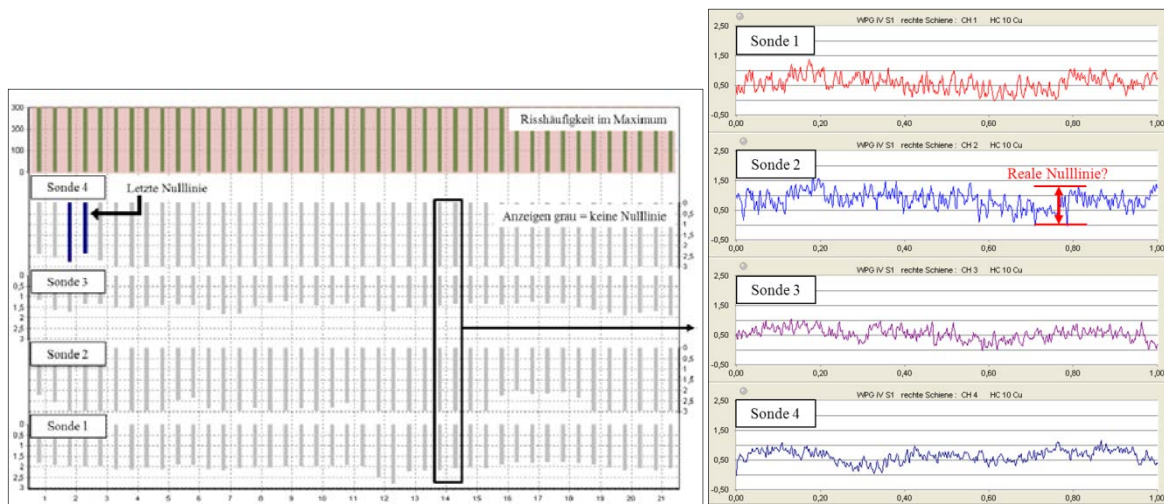
##### 3.1.2 Zweites Beispiel – R260

Ein zweites Beispiel für die Prüfergebnisse an einer R260 Schiene zeigt die Abbildung 3.2 links. Für die ausgewerteten Schädigungstiefen werden so gut wie alle Anzeigebalken grau abgebildet. In diesem Fall wurde in den Prüfdaten keine zuverlässige Nulllinie gefunden, da die Rissabstände zu eng sind. Das Programm verwendet für die Auswertung die letzte Nulllinie die gefunden wurde als Referenz. Es ist nicht gesichert, dass die letzte Nulllinie in diesem Beispiel zehn Meter weiter noch dem Materialzustand entspricht. Daher werden in solchen Situationen die Balken der Schädigungstiefe in grauer Farbe dargestellt. Die Zuverlässigkeit einer genauen Tiefenaussage ist fraglich. In diesem Beispiel reichen die



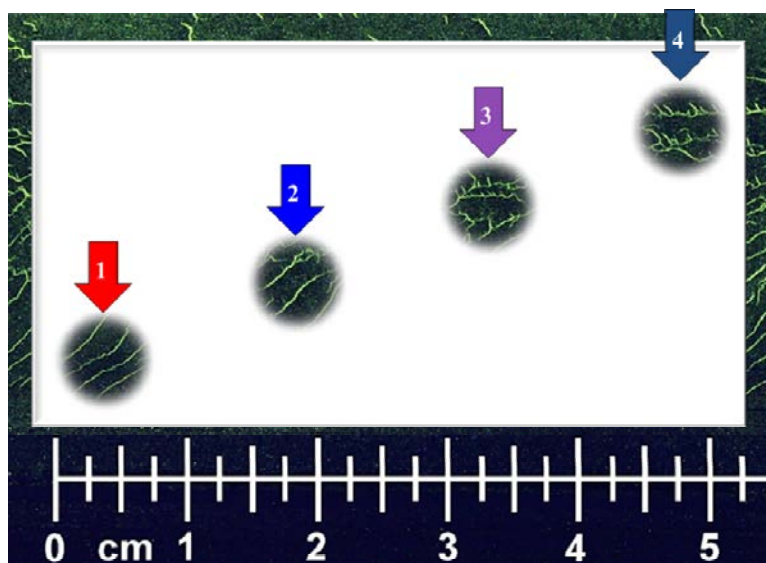
Tiefenaussagen an den maximal auswertbaren Bereich von 3 mm heran. In der obersten Balkenanzeige sieht man, dass auch die Risshäufigkeiten im maximalen Skalenbereich von 300 Rissen pro Meter liegen. Man kann häufig beobachten, dass die Nulllinie nicht mehr sicher bewertet werden kann, wenn die Rissanzahl das Skalenmaximum erreicht, da in diesem Fall die Risse zu eng liegen.

Auf der rechten Seite von Abbildung 3.2 ist der Ausschnitt der Wirbelstromsignale über einen Meter aus diesem Prüfabschnitt dargestellt. Im Vergleich zum Beispiel 1 gibt es hier häufige Signalüberlagerungen. Es ist nicht garantiert, dass die niedrigste Signalposition der realen Nulllinie entspricht.



**Abb. 3.2.** Auswertung zweites Beispiel Stahlsorte R260 über 22 m und Wirbelstromsignale aus einem Meter

Abbildung 3.3 zeigt eine Schablone der Sondenwirkbreiten (vergl. Abb.2.3) die über das Foto einer Magnetpulverprüfung von der Schiene aus diesem Prüfabschnitt gelegt wurde. Die engen Abstände in dem Bereich der Wirkbreite in Sonde 1 und Sonde 2 erschweren die Auflösung der Rissabstände. Sonde 3 und Sonde 4 können überhaupt nicht mehr sicher ausgewertet werden, denn es handelt sich hier um sehr verzweigte Längsrisse, die nicht mehr klassischen Head Checks gleichen. Hier wird deutlich aus welchem Grund die Auswertung problematisch war und die Ergebnisse grau dargestellt wurden.

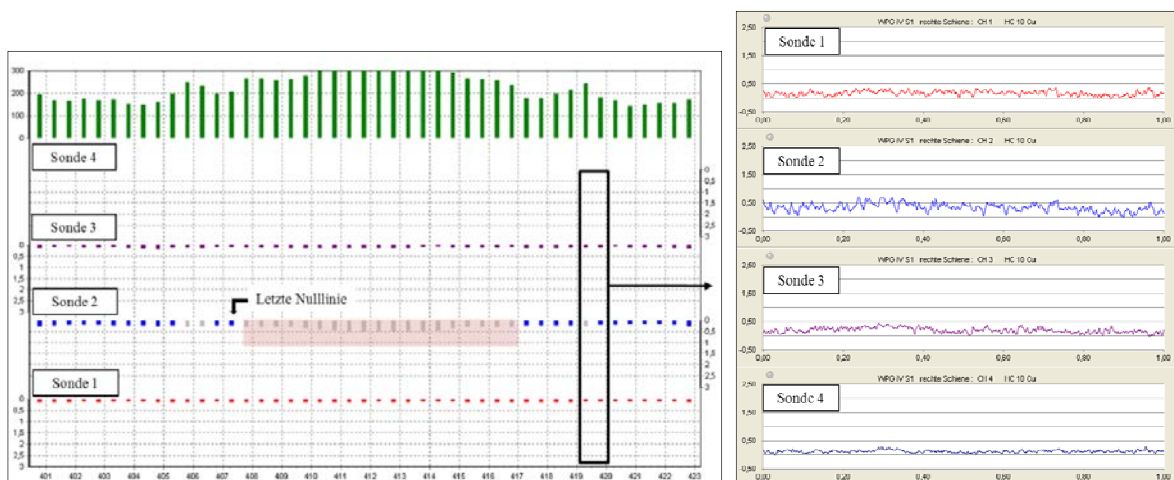


**Abb. 3.3.** Magnetpulverprüfung an dem Prüfabschnitt mit den Sondenwirkbreiten

### 3.2 Schienenstahlsorte R350HT

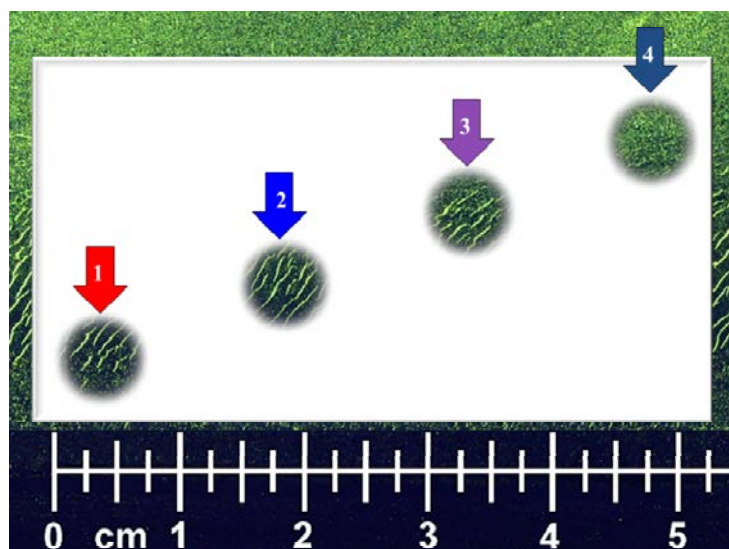
#### 3.2.1 Beispiel 1 – R350HT

Im folgenden Beispiel werden die Prüfergebnisse eines Schienenabschnittes der Stahlsorte R350HT vorgestellt. In der Auswertung aus Abbildung 3.4 links lassen sich noch relativ kleine Schädigungstiefen von 0,3 bis 0,5 m ablesen. Die tiefsten Ergebnisse liegen jedoch auch hier schon im grauen Bereich, was darauf hinweist, dass keine Nulllinie gefunden wurde. In Abbildung 3.4 rechts sind die Wirbelstromsignale aus einem Meter abgebildet. In dieser Signalstruktur lässt sich nur noch schwer ein charakteristisches Muster für Head Checks erkennen. Die Schädigung scheint noch sehr gering zu sein, aber ob hier die gefundene Nulllinie wirklich zutrifft ist nicht gesichert. In dieser Signalstruktur können sich auch tiefere Risse mit sehr engen Abständen verbergen.



**Abb. 3.4.** Auswertung erstes Beispiel Stahlsorte R350HT über 22 m und Wirbelstromsignale aus einem Meter

Bei der Betrachtung von Abbildung 3.5 ist zu erkennen, dass die Rissabstände hier sehr viel enger liegen, als bei der Stahlsorte R260. Im Bereich von Sonde 2 zeigt sich ein Rissabstand von ca. 1 mm. Damit sind die Rahmenbedingungen für die Auflösung der Rissabstände nicht mehr erfüllt. Zerstörende Untersuchungen an diesem Abschnitt haben jedoch Schädigungstiefen von ca. 0,5 mm ergeben, womit die Ergebnisse aus diesem Beispiel richtig liegen.



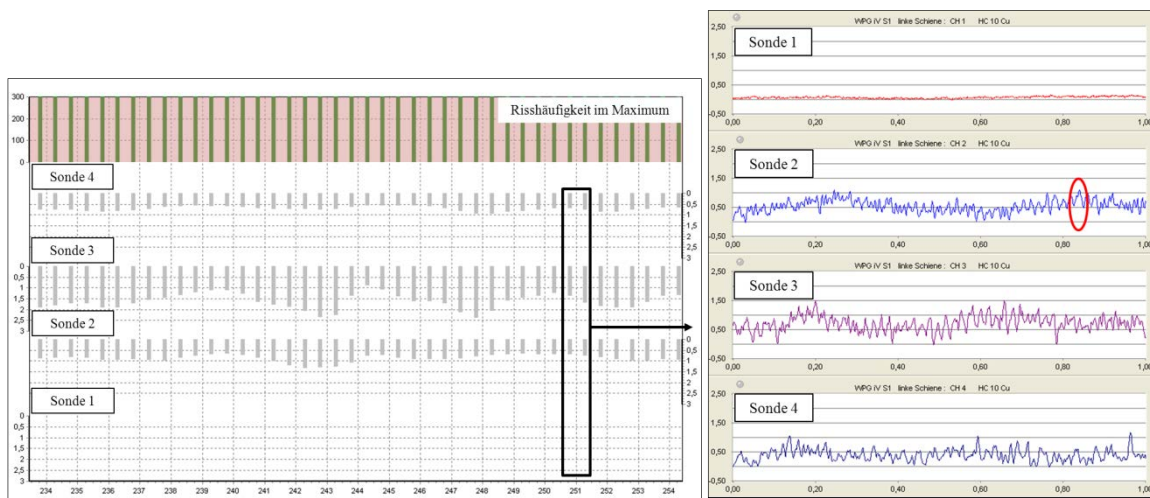
**Abb. 3.5.** Magnetpulverprüfung an dem Prüfabschnitt mit den Sondenwirkbreiten

### 3.2.2 Beispiel 2 – R350HT

In der Abbildung 3.6 wird ein zweites Beispiel für Prüfergebnisse an einer Schiene der Stahlorte R350HT vorgestellt. Es wurden alle Schädigungstiefen in Grau wiedergegeben. Für die Auswertung wurde keine Position mit plausibler Nulllinie ermittelt. Die Häufigkeiten der Risse liegen im Maximum.

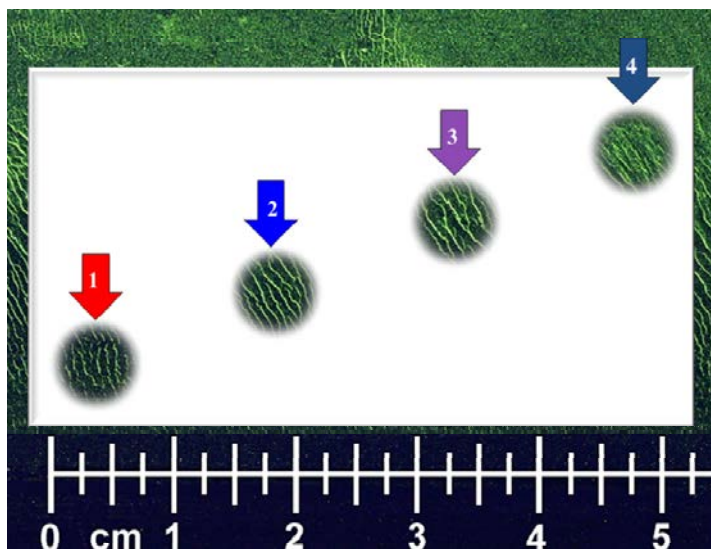
Abbildung 3.6 rechts zeigt die Wirbelstromsignale aus diesem Abschnitt für einen Meter. Es lässt sich keine sichere Nulllinie erkennen und die Signale überlagern sich. Die Markierung in Abbildung 3.6 rechts zeigt eine symptomatische Signalspitze, wie sie durch eng nebeneinander liegende Risse entsteht. Sie ist breiter als klassische Rissanzeigen und neben dem Maximum lassen sich weitere Risspitzen erkennen.

Dieser Fall ist ein gutes Beispiel für die Notwendigkeit, mit dem Prüfvorgang immer auf einem ungeschädigten Streckenbereich anzufangen. Dies ist erforderlich, um für den gesamten Prüfvorgang wenigstens bei Prüfbeginn mit einer realen Nulllinie zu starten.



**Abb. 3.6.** Auswertung zweites Beispiel Stahlorte R350HT über 22 m und Wirbelstromsignale aus einem Meter

Auf dem Foto der Magnetpulverprüfung (Abb. 3.7) lassen sich die vorher beobachteten Anzeichen aus der Auswertung bestätigen. Im Bereich von Sonde 2 erkennt man bis zu acht Risse und Abstände von ca. 0,7 mm. Die Rahmenbedingungen für die Auflösung des Rissfeldes sind hier nicht mehr erfüllt.

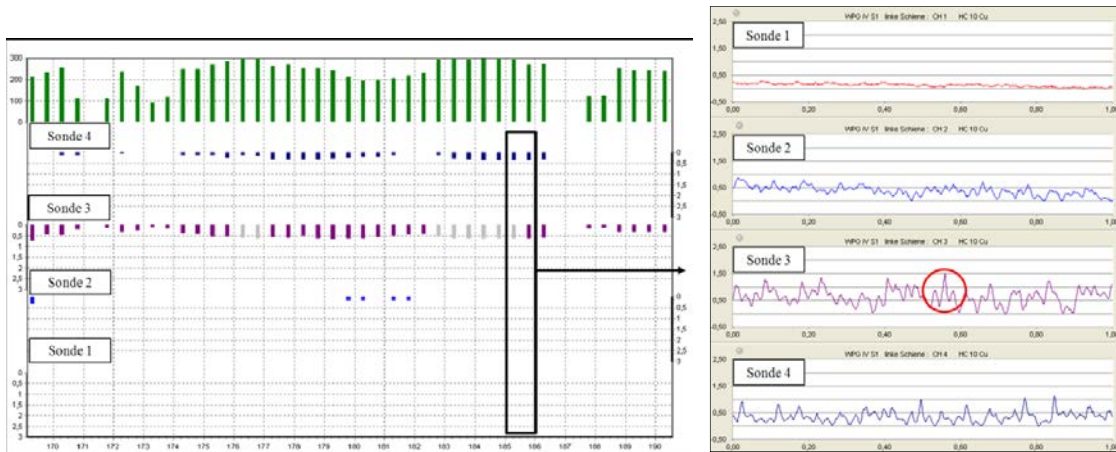


**Abb. 3.7.** Magnetpulverprüfung an dem Prüfabschnitt mit den Sondenwirkbreiten



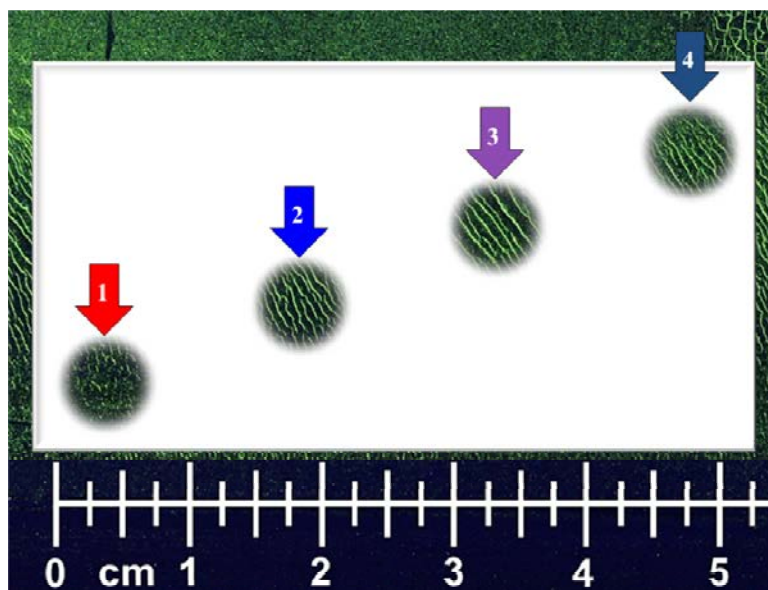
### 3.3 Schienenstahlsorte R370CrHT

Das letzte Beispiel in Abbildung 3.8 präsentiert Prüfergebnisse der Stahlsorte R370CrHT, dem Werkstoff mit der größten Oberflächenhärte in diesem Beitrag. Bei der Betrachtung der Auswertung Abb. 3.8 links liegen die Schädigungstiefen bei ca. 0,6 mm und aufgrund weniger grauer Diagrammbalken scheint es in den Rohdaten häufig eine Nulllinie zu geben. Die Wirbelstromsignale aus einem Meter in Abbildung 3.8 rechts zeigen ein etwas abweichendes Muster im Vergleich zu den vorherigen Ergebnissen. Die Amplituden sind auffällig hoch und breit, höchstwahrscheinlich hervorgerufen durch Überlagerungen aufgrund eines höchst engen Rissfeldes.



**Abb. 3.8.** Auswertung der Stahlsorte R370CrHT über 22 m und Wirbelstromsignale aus einem Meter

Die Bestätigung für den geringen Rissabstand bringt das Foto der Magnetpulverprüfung in Abbildung 3.9 hervor. Unter Spur 2 liegen bis zu zehn Risse mit Rissabständen von ca. 0,5 mm. Dieses enge Rissfeld sicher zu bewerten ist beim derzeitigen technischen Stand nicht möglich. Bei dieser Stahlsorte handelt es sich um eine andere Gefügestruktur mit höherer Grundhärte, als bei der Standardsorte R260, für die das Wirbelstromprüfsystem entwickelt wurde. Für diese Stahlsorte sind mehr Erfahrungswerte über die Entwicklung der Schädigungstiefe und Prüfergebnisse mit der Wirbelstromprüfung notwendig.



**Abb. 3.9.** Magnetpulverprüfung an dem Prüfabschnitt mit den Sondenwirkbreiten

#### 4. Fazit

Bei der Ausbildung der Schädigung durch Head Checks lassen sich vor allem auf den wärmebehandelten Stahlsorten signifikante Unterschiede zur Stahlsorte R260 beobachten. Je härter der Werkstoff, desto enger bildet sich das Rissfeld aus. Die Schädigungstiefen dagegen waren bei den härteren Werkstoffen geringer, als bei der Standardstahlsorte. Diese Aussagen stehen im Einklang mit einem derzeit laufenden Versuchsprogramm der Deutschen Bahn AG. [2] Streckenversuche über mehrere Jahre haben gezeigt, dass die Schädigungstiefen bei der Stahlsorte R350HT zwei- bis dreimal geringer sind als bei der Stahlsorte R260. Dies korrespondiert mit den Schädigungstiefen die in diesem Beitrag für die beiden Stahlsorten dargestellt wurden. Trotzdem muss bedacht werden, dass das Rissfeld mit steigender Härte des Werkstoffes enger wird und sich deshalb immer schwieriger auflösen lässt. Bei höherfesten, wärmebehandelten Schienenstahlsorten können daher im schlechtesten Fall die Schädigungstiefen der Wirbelstromprüfergebnisse verfälscht werden. Vor allem ohne Nulllinie kann das Prüfergebnis nicht zuverlässig ausgewertet werden. Es ist wichtig den Prüfvorgang in einem schädigungsfreien Bereich zu starten.

Für die Prüfbarkeit von wärmebehandelten, höherfesten Schienenstählen müssen in Zukunft noch weitere detaillierte Untersuchungen stattfinden. Durch ständige Weiterentwicklung der Auswertungsalgorithmen und Verbesserungen an den Prüfsystemen kann die Lösung dieses Problems voran getrieben werden.

#### Referenzen

- [1] DIN EN 13674-1:2011(D)  
Bahnanwendungen–Oberbau–Schienen–Teil 1: Vignolschienen ab 46 kg/m
- [2] Einsatz neuer Werkstoffe für die Schiene / Weiche – Erfahrungen aus der Sicht des Anwenders.  
R. Heyder, A. Zoll; Deutsche Bahn AG, DB Systemtechnik, Brandenburg-Kirchmöser  
DVM-Tag 2010 „Die Eisenbahn und ihre Werkstoffe – Neue Entwicklungen in der Bahntechnik“, Berlin, 28.-30. April 2010, S. 35 - 44
- [3] Die Klassifizierung von Oberflächenfehlern in Schienen mit der Wirbelstromprüfung  
A. Dey, R. Casperson, R. Pohl, H.-M. Thomas; BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung  
DGZfP-Jahrestagung 2009, Münster 18.-20.05.2009
- [4] Mögliche Fehlerquellen und deren Einflüsse bei der Risstiefenbestimmung mit Wirbelstrom  
R. Pohl, H.-M. Thomas, R. Casperson; BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung  
DGZfP-Jahrestagung 2009, Münster, 18.-20.05.2009