



**WERKSTOFFSERVICE**

MATERIAL ENGINEERING COMPETENCE

MATERIAL ENGINEERING COMPETENCE

# Prinzipien der Rissentwicklung in Rädern

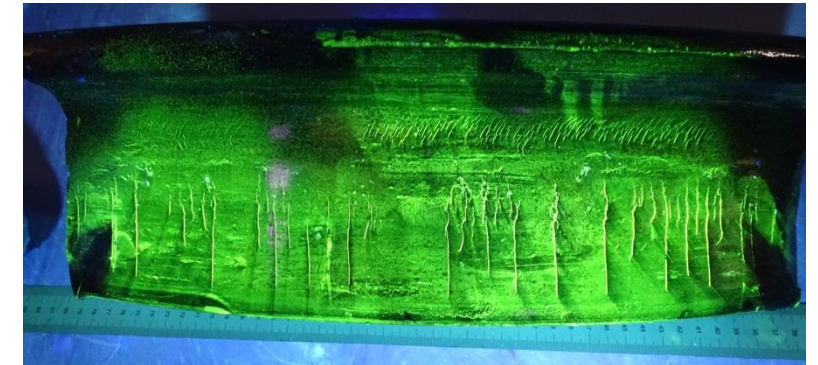
I. Poschmann, W.S. Werkstoff Service, Essen



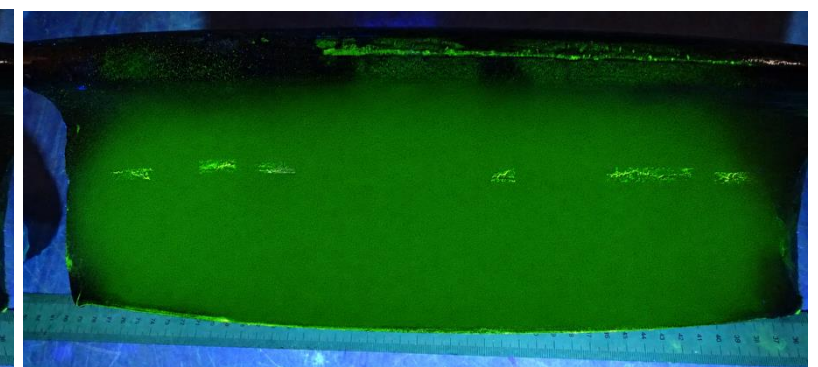
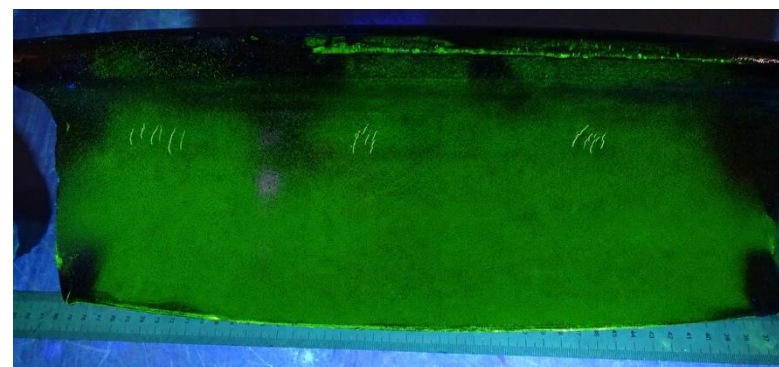
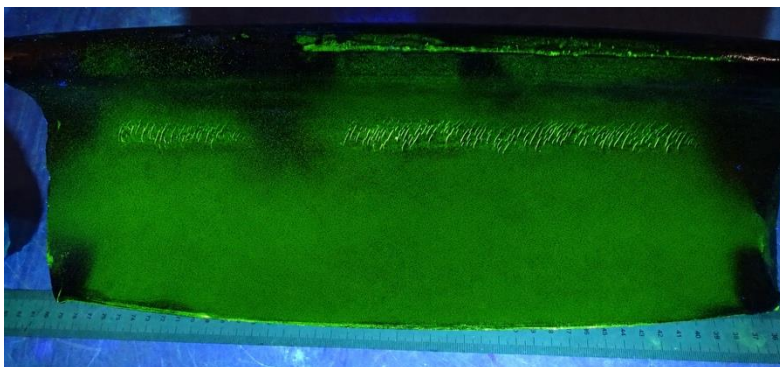
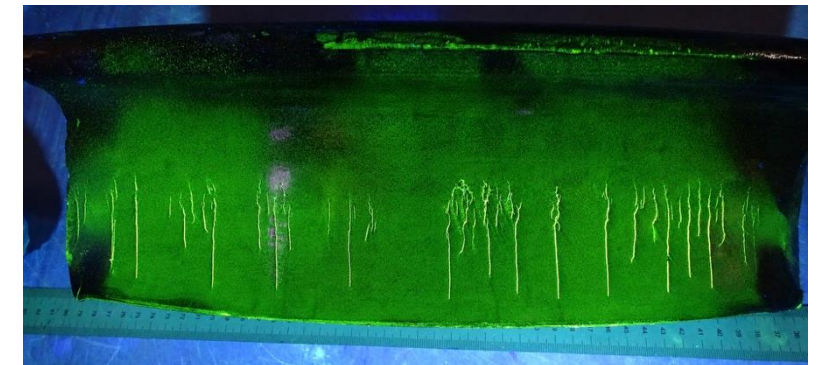
# Fahrplan:

- Anforderungen an Eisenbahnräder
- Bemerkungen zur Ermüdungsfestigkeit und Thermostabilität
- Einige Grundlagen der Bruchmechanik und Rissbildung
- Vier Rissbildungsmechanismen in Laufflächen / Radkränzen
- Bemerkungen zum Einsatz von KI für Eisenbahn-Wissensmanagement
- Fazit

- Warum gibt es vier unterschiedliche Rissmuster auf der Lauffläche?
- Warum haben alle vier Rissmuster unterschiedliche Positionen auf der Lauffläche?
- Warum haben alle vier Rissmuster unterschiedliche Orientierungen?
- Warum sind die vier Rissmuster unterschiedlich stark ausgeprägt?
- Welche Rissfortschrittsgeschwindigkeiten haben die vier Rissbildungsprozesse?



Fluoreszierende Magnetpulverprüfung einer Lauffläche,  
Quelle: W.S.



## Die Wunschliste:

- Einfaches Legierungskonzept (ER7 ist kein Spezialstahl!)
- Einfache Verarbeitung (Schmieden, Wärmebehandlung, Drehen)
- Hohe Festigkeit (hohe Dauerfestigkeit)
- Hohe Zähigkeit (ausreichende Verformbarkeit)
- Hohe Bruchzähigkeit (Risswiderstand)
- Optimierter Verschleißwiderstand im Rad-Schiene-Kontakt
- Umwandlungsträgheit (keine Martensitbildung)
- Hohe Warmfestigkeit (Klotzbremse)
- Hoher Reinheitsgrad (Edelstahl)
- Hohe Wärmeleitfähigkeit (Klotzbremse)
- Geringe thermische Ausdehnung (Klotzbremse)
- Optimierte Druckeigenstressungen
- Preiswert (Massenprodukt)



Zahlreiche dieser Anforderungen widersprechen einander!

## Ziel der Nachweisführung (EN 13979-1):

- keine Ermüdungsrisse im Radsteg (Radscheibe) und in den Übergängen zu Radkranz und Nabe über die gesamte Lebensdauer
- Zusätzlich: keine bleibende Verformung bei außergewöhnlicher Belastung
- Nicht Gegenstand des Ermüdungsnachweises: Nabe inkl. Ölabbpressbohrung, Radkranz inkl. Lauffläche
- Berechnungsgrundlage: Rad an der Verschleißgrenze = ungünstigster mechanischer Fall

## Vorgehen (zweistufig):

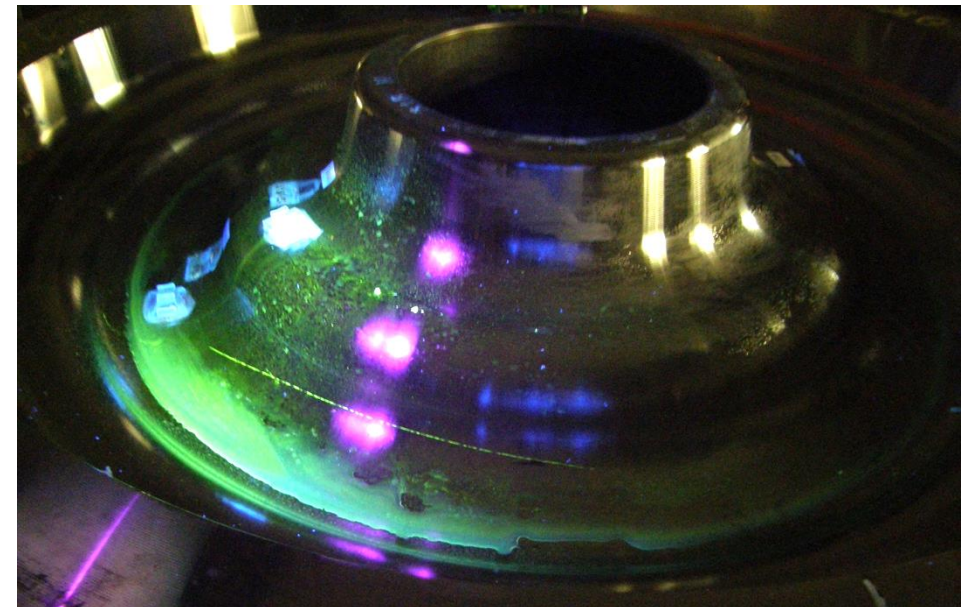
- FEM-Berechnung
- Prüfstandsversuch (wenn FEM-Nachweis nicht vollständig gelingt)

## Betrachtete Lastfälle:

- Außergewöhnliche Belastung
- Ermüdungslastfälle: i) Gerade Strecke, ii) Gleisbogen, iii) Weiche/Kreuzung

## Zulässigkeitskriterien auf dem Prüfstand:

- Verfahren 1: Lastkollektiv aus realen Streckenmessungen
- Verfahren 2: Einstufen-Ermüdungsschwingversuch
- Kriterium: kein Riss  $\geq 1$  mm



Eisenbahnrad mit einer sehr langen MT-Anzeige im Blatt.  
Rissbildung bei einem Zulassungstest auf einem Prüfstand. Quelle: W.S.

### Ziel der Nachweisführung (EN 13979-1):

- Nur für laufflächengebremste Räder
- Bewerteter Bereich: Radkranz (seitliche Verformung und Eigenspannungen)

### Vorgehen (dreistufig):

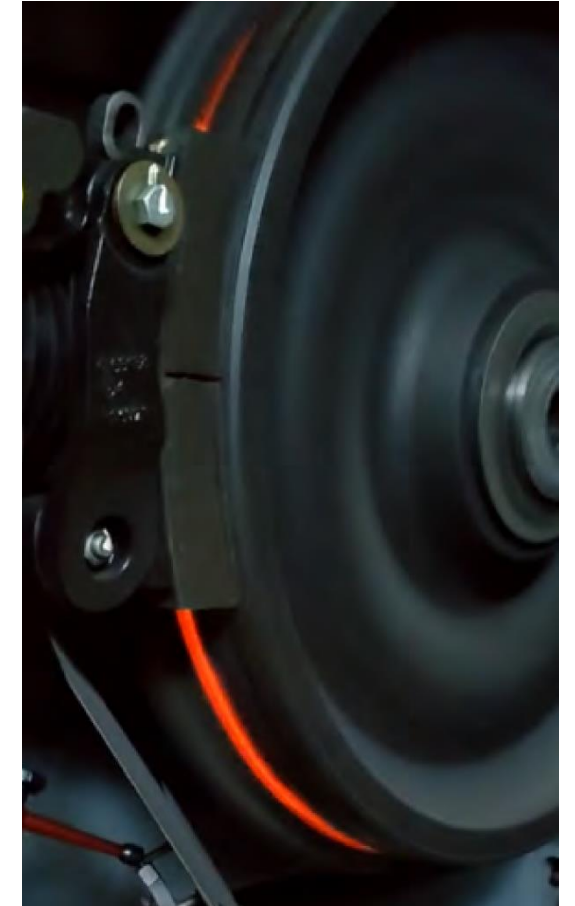
- Prüfung für: neuer Radkranz (Nenndurchmesser) und minimaler Radkranz (Verschleißgrenze)
- Stufe 1 – Bremsversuch auf dem Prüfstand: Dauer-/Haltebremsung
- Stufe 2 – Bruchversuch auf dem Prüfstand: wenn Eigenspannungen aus Stufe 1 n.i.O. sind
- Stufe 3 – Bremsversuch auf der Strecke: wenn Stufe 1 nicht erfüllt, Rad in Stufe 2 aber nicht abgelehnt

### Zulässigkeitskriterien auf dem Prüfstand:

- Seitliche Verformung während der Bremsung im warmen Zustand
- Seitliche Verformung nach der Bremsung und nach Abkühlung
- Eigenspannungen im Radkranz nach Abkühlung

### Wann ist ein Rad thermostabil?

- Wenn es die entsprechenden Anforderungen der EN 13979-1 erfüllt!
  - Zulässige Verformung, zulässige Eigenspannungen, keine Risse



Quelle: Thermomechanics of tread braking Braking capacity of railway wheels, Eric Voortman Landström, Chalmers University, 2024

### Rissbeanspruchung Mode I

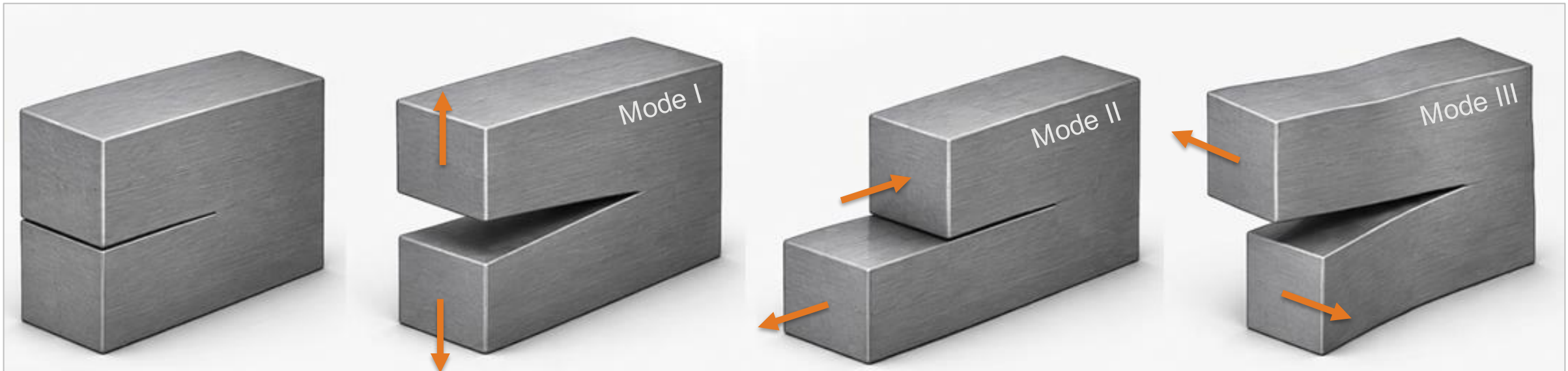
- Aktiv bei Zug und Biegung
- Spannung senkrecht zur Rissebene
- Sehr hohe Rissfortschrittsgeschwindigkeit
- Etablierte Rissfortschrittsgesetze

### Rissbeanspruchung Mode II

- Aktiv bei ebenen Schubspannungen
- Spannung in der Rissebene
- Deutlich geringere Rissfortschrittsgeschwindigkeit als bei Mode I
- Keine etablierten Rissfortschrittsgesetze

### Rissbeanspruchung Mode III

- Aktiv bei nicht-ebenen Schubspannungen
- Spannung in der Rissebene
- Rissfortschrittsgeschwindigkeit kleiner als bei Mode II und viel kleiner als Mode I
- Keine etablierten Rissfortschrittsgesetze



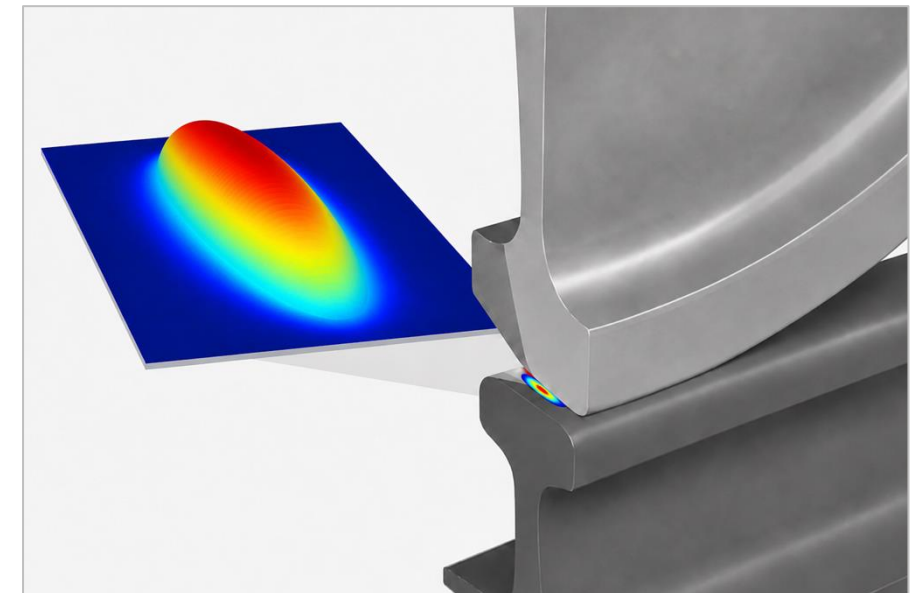
## Hertz'scher Kontakt – der Ort, wo alles unter allen Spannungen steht ...

### Bemerkungen zu den Kontaktspannungen:

- Kontaktbereich hoch-dynamisch → Position, Größe, Geometrie, ändern sich ständig
- Spannung hochgradig dreidimensional
- Ertragbare Kontaktspannung (1000 – 1200 MPa) ist deutlich höher als Streckgrenze des Werkstoffs (520 MPa für R7)
- Schädigungsprozesse (RCF) werden durch Schubspannungen hervorgerufen
  - Folgerung: Riss-Moden II und III dominieren im Hertz'schen Kontakt
- Rollkontaktermüdungsschäden (RCF) in der Lauffläche basieren auf:
  - Plastischer Shakedown → zyklisches „Durchwalken“ des Materials ab ca. 1200 – 1500 MPa
  - Ratcheting → Verformungsakkumulation ab ca. 1500 MPa

### Schubspannungen:

- Schubspannungsmaxima liegen einige mm unter der Lauffläche
- Schubspannungsmaximum wandert zur Oberfläche, bei Schlupf und Traktion
- Schubspannungsmaximum wird größer bei Schlupf und Traktion
- Spannungsniveaus für plastischen Shakedown (ab ca. 1200 – 1500 MPa) und Ratcheting (ca. ab 1500 MPa) sind deutlich geringer bei Schlupf und Traktion



Schematische Darstellung der Spannungsverteilung im Radaufstandspunkt beim Rad-Schiene-Kontakt

## Ursachen

- Zyklische Schubspannungen unter Traktion = Rollkontaktermüdung (RCF)
- Belastung oberhalb der Shakedown-Grenze → plastischer Shakedown und Ratcheting
- Hohe Flächenpressung, ungeeignete Profil-/Werkstoffpaarung

## Rissentstehung und Rissverlauf

- Orte der Rissentstehung abhängig von der Kontaktgeometrie
- Initiierung unter flachem Winkel 5–15° zur Lauffläche (Schiene ca. 10–30°)
- Rissentwicklung mehrstufig:
  - Langsam
  - Dann schnell (bei ~5–10 mm Länge und ~1–3 mm Tiefe)
  - dann wieder langsam
  - Ausbruch eines flachen Spans zur Oberfläche
- Schädigungen bleiben oberflächennah
- Schadensprozess führt üblicherweise nicht zum Bruch des Rades



1) Feine Risse



2) Erste kleine Ausbröckelungen

Quelle: R. Deuce, Schäden an  
Radlaufflächen

## Unterstützende Prozesse

- Hertz'sche Kontaktspannung
- Traktion und Schlupf als Treiber
- Bogenlauf erzeugt schräge, rissöffnende Resultierende
- Fluideinpressung (Wasser) treibt Riss in die Tiefe

## Dominanter Modus & Rissfortschrittsgeschwindigkeit

- Mixed-Mode II–III mit Mode-II-Dominanz
- Mode I nur bei eingepresstem Wasser relevant
- Vergleichsweise geringe Rissfortschritts-Geschwindigkeit

## Die magische Verschleißformel (MWR)

- $MWR = \text{Adhäsive und abrasive Verschleißraten können das Risswachstum ausgleichen}$   
(Risse werden im Betrieb „weggeschliffen“)

## Rissfortschritt rechentechnisch berechenbar?

- Nein, es existieren keine entsprechenden mathematischen Rissfortschrittsgesetze



3) Deutliche Ausbröckelungen



4) Tiefe Ausbröckelungen

Quelle: R. Deuce, Schäden an  
Radlaufflächen

## Ursachen

- Hohe zyklische tangentielle thermische Spannungen durch Klotzbremsung
- Begünstigend:
  - lange Bremsfahrten (Hot Spots), hohe Bremslasten
  - LL-Verbundsohlen, Radkranz-Restvolumina

## Schadensmechanismus

- Transversale (radial-axiale) Querrisse an der Lauffläche
- Niedrigzyklische Ermüdung des erwärmten Randbereichs
- Laufflächenschäden (RCF) können als Rissstarter wirken

## Rissverlauf

- Radial von der Oberfläche in den Radkranz
- Übergang in mechanischen Ermüdungsbruch
- Richtungsumkehr im Blatt (tangentialer Verlauf)
- Bruch



Radbruch durch thermisch induzierte Ermüdung, Quelle: W.S.

## Unterstützende Prozesse

- tangentielle Zug-Eigenstressungen aus Bremswärme
- Spannungen im Hertz'schen Kontakt
- Temperatur senkt Streckgrenze und E-Modul
- Kaltverfestigung erhöht Rissfortschrittsraten

## Dominanter Modus & Rissfortschrittsgeschwindigkeit

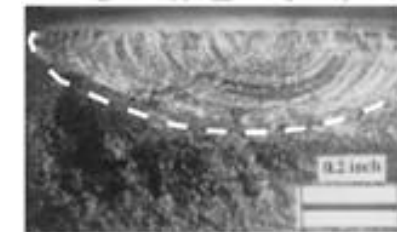
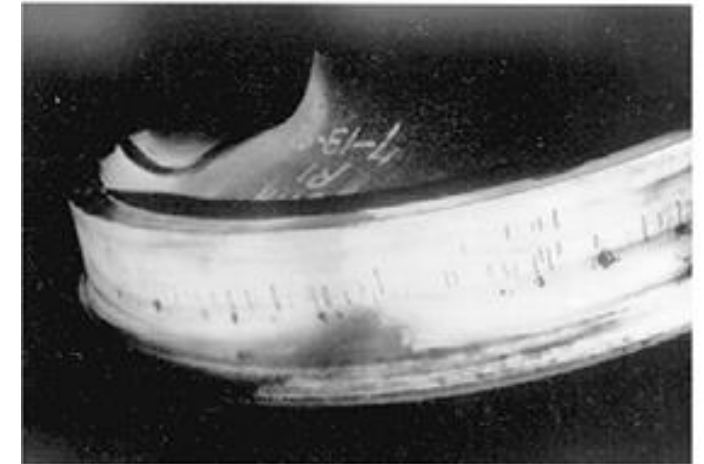
- Mode I dominiert (Öffnung/Zug)
- Sehr schnelles Risswachstum

## Magische Verschleißformel anwendbar?

- Beschreibt das Optimum zwischen Verschleiß und oberflächennahem langsamen RCF
- Thermisch induzierte Ermüdungsrisse sind viel zu schnell ...

## Rissfortschritt rechtechnisch berechenbar?

- Nein, es existieren keine entsprechenden mathematischen Rissfortschrittsgesetze



Thermisch induzierter Riss aus der amerikanischen Literatur, Quelle: DOT-VNTSC-FRA-02-02

## Ursachen

- Nichtmetallische Einschlüsse von einigen Hundert  $\mu\text{m}$  Größe (Al-Oxide, Silikate, ...)
- Initiierung, wenn Hertz'sche Kontaktspannung den Defekt „erreicht“

## Schadensmechanismus

- Ermüdung in 12–20 mm Tiefe – an der Lauffläche nicht sichtbar
- Schubgetriebenes Wachstum parallel zur Lauffläche (tangential-axiale Ebene)
- Schubspannungsmaximum liegt einige mm unter der Lauffläche

## Rissverlauf

- Tangentiale Ausbreitung parallel zur Lauffläche
- Dann „irgendwann“ Richtungsänderung in Richtung Lauffläche
- Großvolumiger Laufflächenablöser



Ermüdungsriss unter der Lauffläche (ca. 10 mm) eines Eisenbahnrades. Quelle: W.S.

## Unterstützende Prozesse

- Druck-Eigenstressungen halten die Rissflanken zusammen → unterdrücken Mode-I-Öffnung
- Dynamische Impaktlasten erhöhen die in die Tiefe reichende Schubbeanspruchung
- Verschleiß/Schlupf wirken nur oberflächennah – kein Schutzeffekt in dieser Tiefe

## Dominanter Modus & Rissfortschrittsgeschwindigkeit

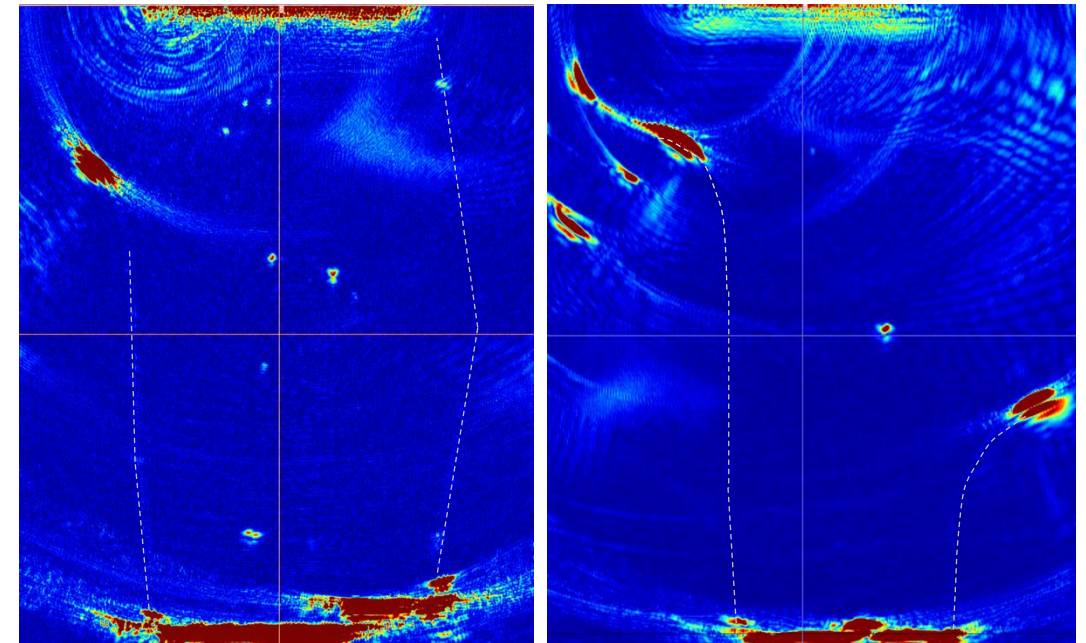
- Mode II dominiert (Schubspannungs-getrieben)
- Druck-Eigenstressungen halten die Rissflanken zusammen (unterdrücken Mode-I-Öffnung)
- Vergleichsweise sehr langsames Risswachstum

## Magische Verschleißformel anwendbar?

- Nein, dieser Ermüdungsprozess hat keine Beziehung zum Verschleiß

## Rissfortschritt rechenstechnisch berechenbar?

- Nein, es existieren keine entsprechenden mathematischen Rissfortschrittsgesetze



Nicht-metallische Einschlüsse in einem Radreifen (links) und in einem Vollrad (rechts) – Dargestellt mit hochauflösenden bildgebenden Ultraschallprüfverfahren. Quelle: W.S.

## Vorbemerkung

- Vertikale Ermüdungsrisse kennen wir in Europa nicht.
- Kann dieser Ermüdungsprozess für uns relevant werden?
- Informationsquelle: KI-gestützte Dokumentenanalyse!

## Ursachen

- Axiale Zug-Eigenspannung und betriebliche Kaltverfestigung im Bereich der äußeren Radkranzstirnfläche
- Horizontaler Vorläuferferriss (RCF)

## Schadensmechanismus

- Initiierung: horizontaler Riss (RCF)
- Horizontales Wachstum parallel zur Lauffläche
  - schubgetrieben, langsam
- Vertikales Abbiegen in die Zug-Eigenspannungszone
- Vertikaler Ermüdungsriss entlang des Umfangs
- Äußerer Bereich des Radkranzes bricht ab



Vertikaler Ermüdungsriss im Radkranz eines Eisenbahnrades. Quelle: DOT/FRA/ORD-21/36

## Unterstützende Prozesse

- Dünner Radkranz und Hohlverschleiß
- Hohe Impaktlasten
- thermische Belastung (Klotzbremse)

## Dominanter Modus & Rissfortschrittsgeschwindigkeit

- Horizontaler Riss: Mode II/III (schubgetrieben, Druck unterdrückt Mode I)
- Vertikaler Riss: Mode I dominiert → hohe Rissfortschrittsgeschwindigkeit

## Magische Verschleißformel anwendbar?

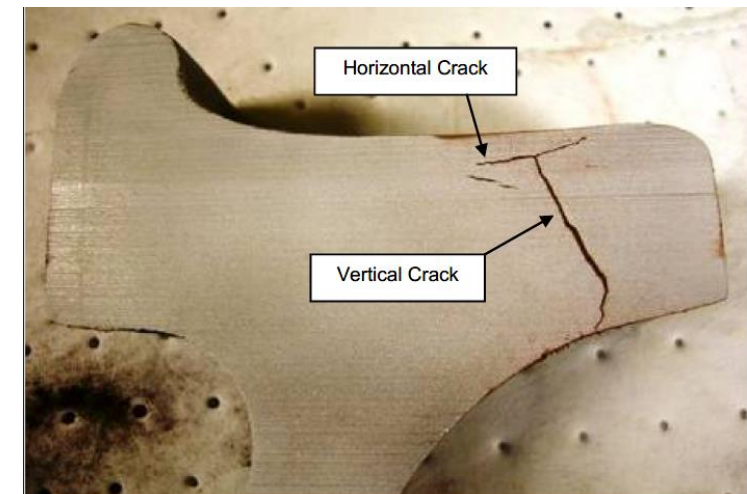
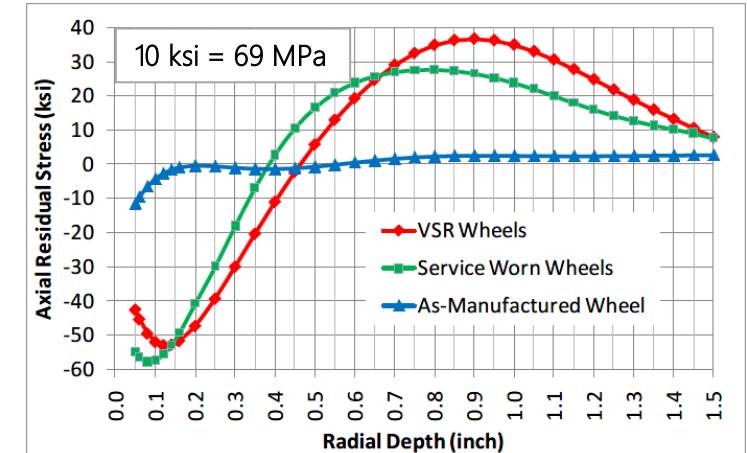
- Ja, für den Vorläuferprozess (RCF)
- Nein, für den vertikalen Ermüdungsriss

## Rissfortschritt rechenstechnisch berechenbar?

- Nein, es existieren keine entsprechenden mathematischen Rissfortschrittsgesetze

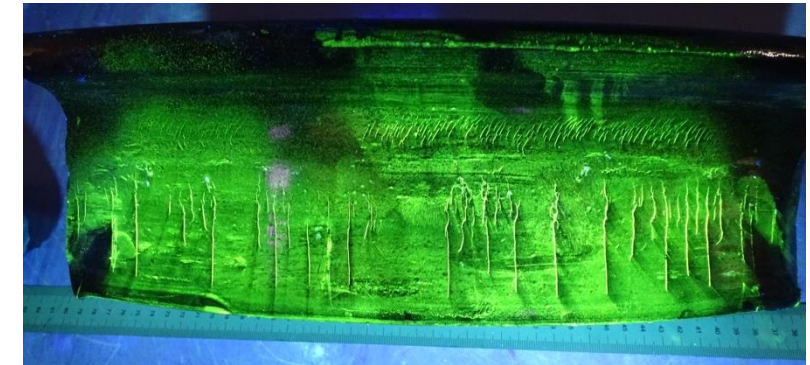
## Bemerkenswert

- Simulation des Schädigungsprozesses auf dem Prüfstand bis heute erfolglos
- Ursachen für den Schadensprozess bis heute nicht vollständig geklärt



Eigenstressungsverlauf (oben) und Rissverlauf (unten) von vertikalen Ermüdungsrissen, Quelle: DOT/FRA/ORD-14/41

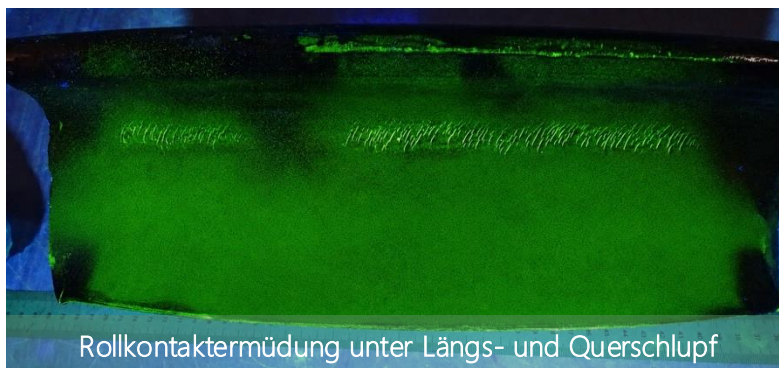
- Warum gibt es vier unterschiedliche Rissmuster auf der Lauffläche?
  - Weil vier unterschiedliche Ermüdungsprozesse aktiv sind.
- Warum haben alle vier Rissmuster unterschiedliche Positionen auf der Lauffläche?
  - Das ist eine Frage der Kontaktsituation Rad-Schiene und der jeweiligen Stellung des Radsatzes im Gleis.
- Warum haben alle vier Rissmuster unterschiedliche Orientierungen?
  - Wegen der lokal unterschiedlichen Kombination von Längs- und Querschleppf.
- Warum sind die vier Rissmuster unterschiedlich stark ausgeprägt?
  - Weil die wirkenden lokalen Normal- und Schubspannungen und die Rissfortschritts-Moden (I, II, III) unterschiedlich groß sind.
- Welche Rissfortschrittsgeschwindigkeiten haben die vier Ermüdungsprozesse?
  - Drei sind langsam (RCF). Einer ist schnell und gefährlich (thermische Ermüdung).



Fluoreszierende Magnetpulverprüfung einer Lauffläche,  
Quelle: W.S.



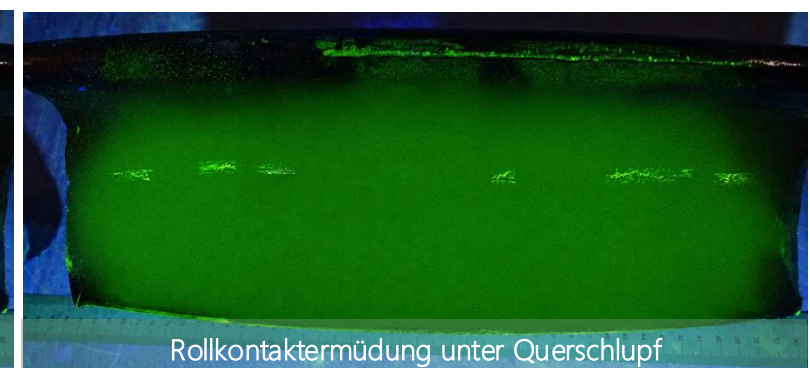
Thermisch induzierte Ermüdung



Rollkontaktermüdung unter Längs- und Querschleppf



Rollkontaktermüdung unter Längsschleppf



Rollkontaktermüdung unter Querschleppf

## Unser Wissen z. B. über thermisch induzierte Risse:

- Thermisch induzierte Risse durch Klotzbremmung sind nichts Unbekanntes:
- In Nordamerika gab es thermische Risse bei Klotzbremmung schon vor Jahren in großer Zahl
- Dort wurden umfassende Untersuchungen durchgeführt
  - Es gibt exzellente und praxisnahe FRA-Berichte ...
- Europäisches Wissen ist fragmentiert und muss aufwendig recherchiert werden
- Nicht-Europäisches Wissen wird wenig genutzt
- Das Problem ist nicht fehlendes Wissen, sondern verstreutes Wissen
- Es fehlt eine umfassende, strukturierte und einfach zugängliche Datenbasis
- KI kann helfen,
  - Informationen zu sammeln, zu strukturieren, zu komprimieren
  - bei komplexen Fragen schnelle und quellenbasierte Antworten zu liefern



Quelle: KI-generiert

## IRKA-Lösung für den Eisenbahnsektor als Ganzes

- Verstreutes Know-how aus europäischen und außereuropäischen Quellen konsolidieren und sektorweit nutzen
- Erkennen von Zusammenhängen aus großen Informationsmengen
- Schnelle, quellenbasierte Antworten bei zeitkritischen Verfahren
- Sprachübergreifende Dokumentensuche, Antworten erfolgen in der Sprache des Anfragenden
- Wissen wird dauerhaft bewahrt – unabhängig von der Verfügbarkeit einzelner Fachleute.
- Kumulativer Mehrwert: Was heute für ein Thema aufgebaut wird, beschleunigt morgen die Bearbeitung anderer Themen
- Statistische Daten und Erfahrungswissen können umfassend und effizient ausgewertet werden

\* Basis: Retrieval Augmented Generation (RAG)



IRKA ist ein Kooperationsprojekt von [www.werkstoff-service.de](http://www.werkstoff-service.de) und [www.citech-ai.de](http://www.citech-ai.de), Bild KI-generiert

## IRKA-Lösung für ein einzelnes Unternehmen

- Datensouveränität und Datenschutz: Betrieb vollständig lokal
- Interne Informationen verlassen die eigene IT-Umgebung nicht
- Copyrights werden geschützt
- Wettbewerbsvorteil durch eigenes, individuelles Wissen
- Rollenbasierte Daten und Lösungen für Werkstätten, RU, ECM, NSA ...
- Auditierbarkeit und Nachvollziehbarkeit:
  - Datenquellen werden gepflegt
  - Versionsstände sind bekannt
- Individuelle und unabhängige Skalierbarkeit:
  - Datenbank
  - RAG-Pipeline
  - LLM-Modell
  - Hardware



IRKA ist ein Kooperationsprojekt von [www.werkstoff-service.de](http://www.werkstoff-service.de) und [www.citech-ai.de](http://www.citech-ai.de), Bild KI-generiert

- Das Rad ist ein Kompromiss-Bauteil
- Vier Mechanismen, ein wiederkehrendes Muster → Ermüdung
- Der Riss-Modus (I, II oder III) entscheidet über Geschwindigkeit und Gefährlichkeit
- Risse im Radkranz bzw. in der Lauffläche sind rechnerisch praktisch nicht „fassbar“
- Das Bahn-Wissen ist bemerkenswert umfangreich und bemerkenswert fragmentiert
- IRKA kann helfen, dieses verstreute Wissen zu konzentrieren und nutzbar zu machen

Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!





**WERKSTOFFSERVICE**

MATERIAL ENGINEERING COMPETENCE



W.S. Werkstoff Service GmbH

Katernberger Str. 107 | 45327 Essen

T. +49 201 316844-0 | F. +49 201 316844-29

info@werkstoff-service.de | [www.werkstoff-service.de](http://www.werkstoff-service.de)