

# Einfluss von Save Life- und Schadenstoleranzkonzepten auf die ZfP von Eisenbahnradsatzwellen

Thomas HECKEL\*, Uwe ZERBST\*

\* BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

**Kurzfassung.** Die Sicherheitsauslegung von Radsatzwellen sieht ein abgestuftes Konzept aus dauer- und betriebsfester Konstruktion und regelmäßigen zerstörungsfreien Prüfungen vor. Der Vortrag gibt einen Überblick über diese Aspekte unter Einbeziehung moderner Auslege- und Prüfverfahren. Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf potentiellen Fragen der zerstörungsfreien Prüfung nicht nur bei der Spezifizierung belastbarer Inspektionsintervalle sondern auch bei der Gewährleistung der Basissicherheit im Rahmen von Betriebsfestigkeitsbetrachtungen. Speziell angesprochen werden Fragen wie der Einfluss und Nachweis von nichtmetallischen Einschlüssen in Stahl, Korrosionsgrübchen und Steinschlagkerben aus dem Betrieb sowie die Detektionswahrscheinlichkeit von Rissen in Abhängigkeit von der Rissgröße und der Belastung auf den Rissufer unter Berücksichtigung des Funktionsumfanges von Prüfsystemen.

## Einführung

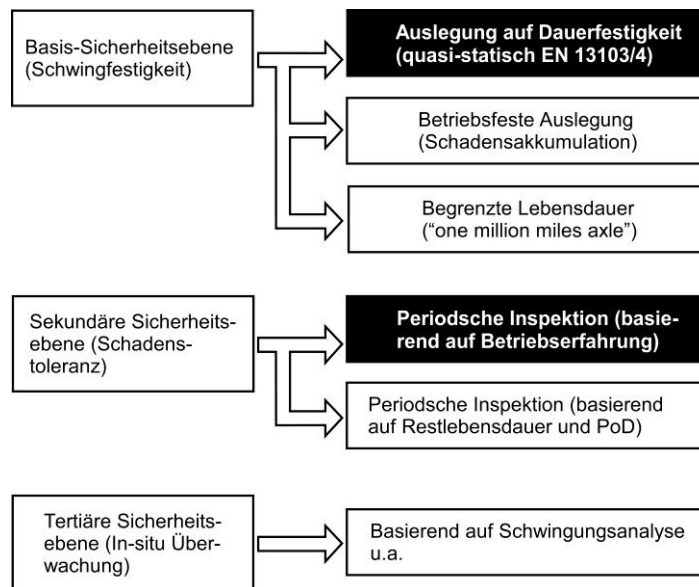
Die Sicherheit von Radsatzwellen ruht gegenwärtig auf zwei Säulen: Der Auslegung auf Schwingfestigkeit und periodischen Inspektionen mit ZfP Verfahren. Diese betreffen Fragen einer Betriebszeitbegrenzung, Veränderungen der Schwingfestigkeit während des Betriebs infolge Steinschlag und Korrosionsgrübchen, die potentielle Bedeutung von und Maßnahmen zur Vermeidung nichtmetallischer Einschlüsse, sowie Fragen der Zuverlässigkeit zerstörungsfreier Prüfverfahren.

Die Frage nach der Art der Rissinitiierung kann bei einer Schadensanalyse immer nicht definitiv beantwortet werden. Z. B. wird in [1] vermutet, dass ein nichtmetallischer Einschluss für die Entstehung eines Ermüdungsrisses verantwortlich war.

Statistisch gesehen sind schwere Schadensfälle glücklicherweise eher selten. Der *Railway Safety Performance Report* der *European Railway Agency (ERA)* von 2011 [2] beziffert die Zahl der gebrochenen Radsatzwellen in der Europäischen Union zwischen 2006 und 2009 auf 329. Bezogen auf  $1,66 \cdot 10^{10}$  Zugkilometer entspricht das einem Bruchereignis auf 50,45 Millionen Zugkilometer, oder, bei Annahme einer durchschnittlichen Zahl von 40 Radsatzwellen pro Zug einem Bruchereignis auf zwei Milliarden Achsenkilometern. Das ändert freilich nichts an der Tatsache, dass jeder Wellenbruch Personen- und Sachschäden verursachen kann. Nachfolgend sollen deshalb einige Gedanken wiedergegeben werden, durch welche Maßnahmen die Sicherheit von Radsatzwellen aus Sicht der Autoren potentiell weiter erhöht werden könnte.



Bild 1 zeigt die Kompetenzen eines abgestuften Sicherheitssystems für Radsatzwellen und fasst den gegenwärtigen Stand der Technik (schwarze Felder) zusammen und ergänzt ihn durch zusätzliche Optionen [3].



**Bild 1.** Kompetenzen eines abgestuften Sicherheitssystems für Radsatzwellen

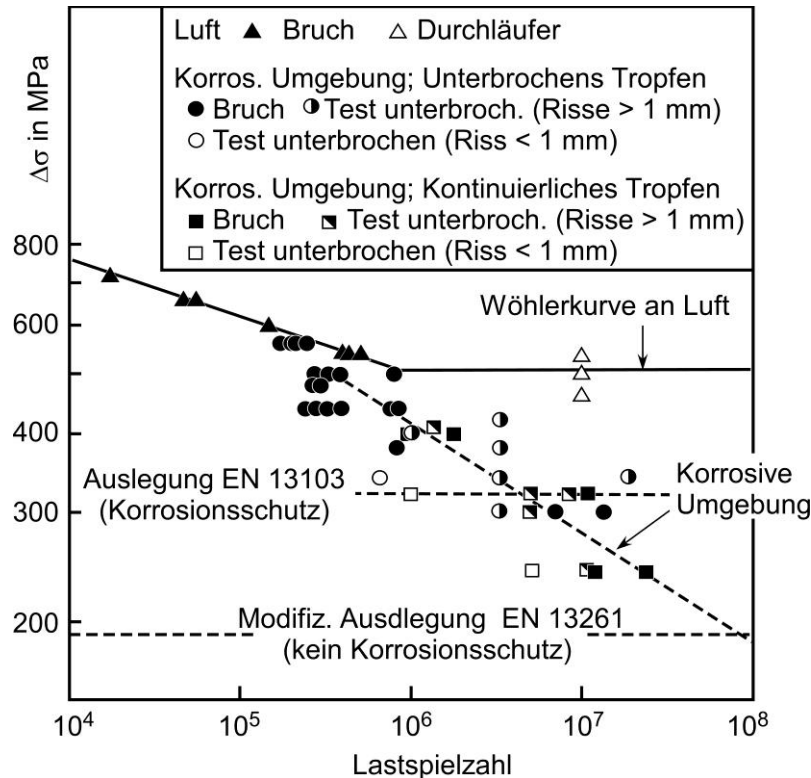
Eine Darstellung auf so engem Raum muss notwendigerweise sehr begrenzt sein. Der Leser sei daher auf die sehr ausführliche Darstellung dieser Thematik in [3] verwiesen.

## 2. Betriebszeitbegrenzung

Die gegenwärtige Auslegepraxis von Radsatzwellen nach EN 13103 und EN 13104 geht von einer maximalen Lastamplitude aus, bei der die einzelnen Lastkomponenten als simultan angreifend angenommen werden. Verglichen wird diese Maximalbeanspruchung mit einer zulässigen Spannung im Sinne einer Dauerfestigkeit. Unsicherheiten, etwa aus potentiellen VHCF-Effekten u.a. werden durch Sicherheitsbeiwerte kompensiert. Kann Korrosion nicht ausgeschlossen werden, so sind nach EN 13261 nur 60% des ansonsten zulässigen Grenzwertes anzusetzen. In den letzten Jahren wurden alternative Vorschläge für eine betriebsfeste Auslegung unter Berücksichtigung von Schadensakkumulations-hypothesen erarbeitet [4-6], deren Umsetzung allerdings reale Lastspektren erfordert. Obwohl mittlerweile eine Anzahl derartiger Spektrum ermittelt wurde, ist noch weitere Arbeit hinsichtlich allgemein akzeptierter Fallklassen für unterschiedliche Arten von Transport (Hochgeschwindigkeit, Gütertransport, etc.) und Streckenqualität (Ausbaustrecken, kurvenreiche Strecken, Bahnhöfe etc.) erforderlich. Untersuchungen unter Korrosionseinfluss [7] haben bis ca.  $10^8$  Schwingspiele bislang keine Schwingfestigkeitswerte unterhalb der erwähnten 60%-Grenze ergeben. Allerdings hat sich auch hier keine Dauerfestigkeitsgrenze abgezeichnet, weshalb diese Daten nicht ohne weiteres auf die sehr viel höheren Betriebszeiten und Lastspielzahlen von Radsatzwellen übertragen werden können. Dies, die Anwendung von Betriebsfestigkeitskonzepten sowie die erwähnten Unsicherheiten aufgrund eines VHCF-Effekts (der für Radsatzwellen bislang aber nicht nachgewiesen ist) deuten in Richtung einer Betriebszeitbegrenzung.

2003 formulierte Alan Lawton auf einem Workshop am Imperial College in London in diesem Zusammenhang den Vorschlag einer "one-million miles axle". Die Idee dahinter ist, die Betriebszeit von Radsatzwellen generell auf einen Wert geringer als  $10^9$  Schwingspiele zu begrenzen. Im Rahmen des unlängst abgeschlossenen europäischen

WIDEM-Projekts haben Beretta und Carboni eine Konkretisierung des Konzepts vorgeschlagen [5]. Danach wäre eine Radsatzwelle so zu konstruieren, dass sie bei Annahme ungünstigster Bedingungen (höchstmögliche Belastung, Korrosionsgrübchen etc.) bei drei Millionen Fahrkilometern bzw.  $10^9$  Schwingspielen nicht versagt. Der Nachweis dafür schließt bruchmechanische Rechnungen ein.



**Bild 2.** Experimentelle Wöhlerkurven für A1N Stahl in unterschiedlichen Umgebungen

### 3. Schwingfestigkeit

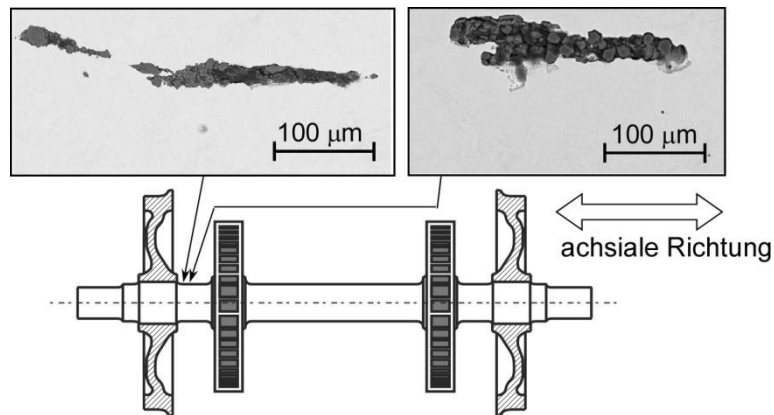
Eine Abnahme der Schwingfestigkeit während des Betriebs tritt infolge von Korrosionsgrübchen (häufige Rissausgangsstellen bei Güterzugwellen) und Kerben infolge Steinschlags aus dem Oberbau (v.a. bei Hochgeschwindigkeitsverkehr) ein. Im Rahmen eines kürzlich durchgeführten Projekts, T278, des *British Rail Safety and Standards Board* (RSSB) [8] wurden beide Schädigungsarten an ausgesonderten Wellen statistisch ausgewertet. Auf die Darstellung der Ergebnisse muss an dieser Stelle aus Platzgründen verzichtet werden (s. jedoch [3]). Wichtig ist, dass Schäden wie Korrosionsgrübchen und Steinschlagkerben eine Herabsetzung der Betriebsfestigkeit bewirken und deshalb in künftigen Regelwerken berücksichtigt werden müssen, sofern sie nicht durch geeignete Maßnahmen ausgeschlossen werden können. Letzteres geschieht v.a. durch Beschichtungen, wobei die Schichten hinreichend dick ( $> 6$  mm) und elastisch sein müssen, um Steinschlag auffangen zu können [9]. Hinsichtlich des Korrosionsschutzes ist wichtig, dass er auch an den Übergängen zu den Presssitzen gewährleistet sein muss, um ein Eindringen des Korrosionsmediums in die Spalte zu verhindern.

### 4. Nichtmetallischer Einschlüsse

Nichtmetallische Einschlüsse werden während des Fertigungsprozesses gebildet. Wird beispielsweise Aluminium bei der Stahlherstellung als Desoxidationsmittel zugesetzt, so bilden sich Aluminiumoxide; silikatische Oxide werden aus dem Gusspulver eingetragen,

usw. Die Größe der Einschlüsse beträgt einige zehn Mikrometer bis Millimeter. Einige Einschlusstypen werden bei der Umformung aufgebrochen und bilden anschließend Einschlusszeilen.

Die Lebensdauer eines Bauteils schließt im Allgemeinen verschiedene Phasen ein: die Entstehung des Risses infolge der Akkumulation mikroskopischer plastischer Deformation, das Wachstum des Mikro- bzw. Kurzrisses (bei technischen Werkstoffen bis zu einer Rissgröße von 0,5 bis 1 mm), das anschließende Langrisswachstum und schließlich der Bruch. Der Effekt der nichtmetallischen Einschlüsse besteht darin, dass sie die Phase der Rissentstehung aufgrund von zur Matrix abweichender Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften sowie lokaler Kerbwirkung erheblich verkürzen.



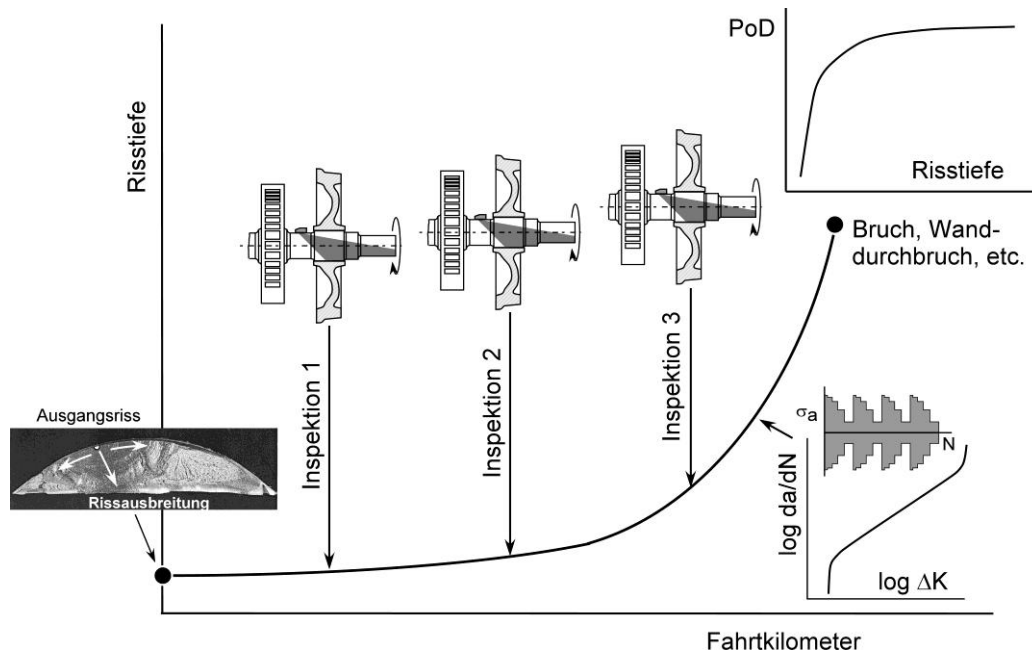
**Bild 3.** Nichtmetallische Einschlüsse in oberflächennahen Bereich einer gebrochenen Radsatzwelle

Gestützt auf ISO 4967 gibt EN 13261 abhängig vom Einschlusstyp und der zulässigen Fahrgeschwindigkeit maximale Abmessungen von Einschlüssen in der Größenordnung zwischen 0.076 und 0.436 mm vor. Dies ist durch Schlitze an Stichproben zu gewährleisten, wobei der Prüfumfang nicht vorgeschrieben ist. Das Problematische an dieser Vorgehensweise ist, dass das potentiell seltene Auftreten größerer Einschlüsse in den hochbeanspruchten Bereichen der Wellen (eine Aussage, die sich aus der statistisch geringen Anzahl an Wellenbrüchen, s. Abschn. 1, ergibt) mit einer sehr begrenzten Stichprobe nicht nachweisbar ist. In [1] schlagen die Autoren statt dessen vor, ausgehend von einer Ist-Analyse eine Grenzeinschlussgröße zu ermitteln, die mit Mitteln der zerstörungsfreien Prüfung, z.B. einer Ultraschalltauchttechnikanlage, mit hinreichender Genauigkeit in den oberflächennahen Bereichen der Wellen detektiert werden kann. Defekte unterhalb dieser Größe sollten als vorhanden angenommen und auf ihrer Grundlage eine Reduzierung der Schwingfestigkeit vorgenommen werden.

## 5. Zerstörungsfreier Prüfverfahren

Ein wissenschaftlich-basiertes Inspektionsintervall für die zerstörungsfreie Prüfung von Radsatzwellen beruht derzeit auf der bruchmechanischen Ermittlung der Restlebensdauer ausgehend von einem als vorhanden angenommenen Ausgangsriss, dessen Größe sich aus den Grenzen der zerstörungsfreien Prüfung ergibt und der Entdeckungswahrscheinlichkeit des Risses als Funktion der Rissgröße.

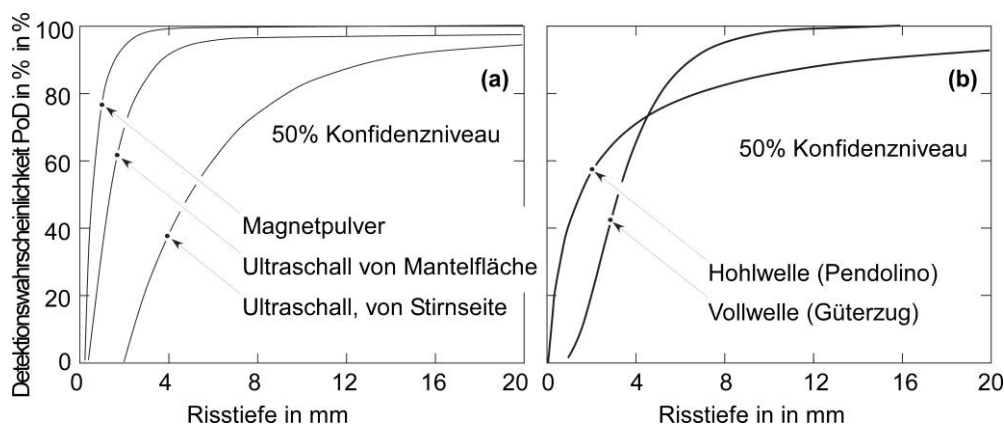
Letztere hängt vom verwendeten Prüfverfahren (z.B. MT (Magnetpulver) oder UT (Ultraschall)), vom Automatisierungsgrad der Prüfung und von den realisierten Verfahrensvarianten ab.



**Bild 4.** Eingangsinformation für die Festlegung von Inspektionsintervallen

Entscheidend ist die Optimierung der Entdeckungswahrscheinlichkeit für Risstiefen in der Größenordnung weniger Millimeter. Dabei ist zu beachten, dass jede Inspektion einen Eingriff in den Bahnbetrieb darstellt, weshalb bei der Optimierung der ZfP-Verfahren eine möglichst geringe für eine Inspektion benötigte Zeitspanne ein zweiter wichtiger Zielparame-ter sein muss.

Seitens der zerstörungsfreien Inspektion spielt die Entdeckungswahrscheinlichkeit des Risses PoD (probability of detection) eine wichtige Rolle. Beispiele, die allerdings nicht auf andere Prüfkonfigurationen als diejenigen in den Zitaten übertragen werden können, finden sich in Bild 5.



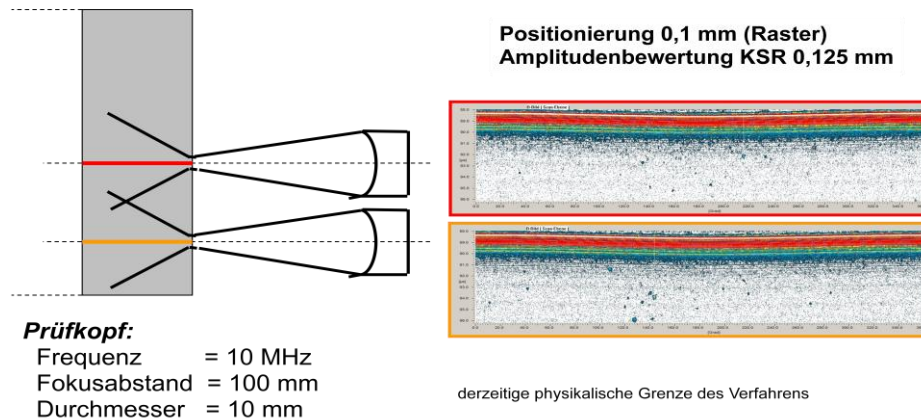
**Bild 5.** Detektionswahrscheinlichkeiten von Rissen in Radsatzwellen bei der Handprüfung

Finden während der Rissausbreitungsphase mehrere Inspektionen statt, so erhöht sich dabei von Inspektion zu Inspektion die Detektionswahrscheinlichkeit des Risses und damit die Gesamtwahrscheinlichkeit dafür, dass ein Riss entdeckt wird, bevor er seine kritische Größe erreicht. Im Ergebnis der Analyse erhält man daher eine statistische Aussage: die Wahrscheinlichkeit des rechtzeitigen Auffindens des Risses (die der Wahrscheinlichkeit für das Nichtversagen der Welle entspricht) als Funktion des



Inspektionsintervalls. Die Genauigkeit bzw. Konservativität des Ergebnisses hängt dabei sowohl von der Zuverlässigkeit der zerstörungsfreien Inspektion, sprich ihrer PoD-Rissgrößen-Kurve, als von der Qualität der bruchmechanischen Restlebensdaueranalyse ab. Die Versagenswahrscheinlichkeit einer Welle wird entweder durch eine Verkürzung des Inspektionsintervalls oder, bei dessen Beibehaltung, durch eine steilere PoD-Rissgröße-Kurve gesenkt. Hinsichtlich letzterer sei darauf hingewiesen, dass sie, sofern die Inspektion mit Ultraschall durchgeführt wird, für reale Risse und nicht für Sägeschnitte zu qualifizieren ist, da sich die beiden Fälle hinsichtlich des Reflexions- und Transmissionsverhaltens der Ultraschallwellen voneinander unterscheiden (s. die Diskussion in [3]).

Möglichkeiten zur Verbesserung der Detektionswahrscheinlichkeit von fertigungsbedingten Fehlern in Radsatzwellen bietet die hochauflösende Untersuchung in Tauchtechnik [1]. Nichtmetallische Einschlüsse können hier mittels fokussierender Prüfköpfe gut nachgewiesen werden (Bild 6). Die Prüfung kann im Rahmen der Endkontrolle eingeführt werden und ist gut automatisierbar. Im Labormaßstab konnten an Radsatzwellen Einschlüsse mit einer Ersatzreflektorgröße von KSR 0,125 mm nachgewiesen werden.



**Bild 6.** Detektionswahrscheinlichkeiten von Rissen in Radsatzwellen bei der Handprüfung

Möglichkeiten zur Verbesserung der Detektionswahrscheinlichkeit von betriebsbedingten Schädigungen, wie sie durch die ständige Wechselbelastung im Radsatz auftreten, bieten sich durch eine ausschließlich mechanisiert durchgeführte Prüfung an. Hier können alle wesentlichen Prüfparameter konstant gehalten werden. Die mechanisierte Prüfung erlaubt eine Weiterentwicklung des aktuellen Standes der Technik durch den Einsatz von Signalverarbeitungsalgorithmen, da die Prüfdaten ortsbezogen aufgenommen werden.

- Auf Basis der bestehenden Prüfanlagen mit einer zusätzlichen Auswertung des Pixel-basierten A-Bildes kann die große Anzahl von Scheinanzeigen (false-calls), die bei der Verwendung der Blendentechnik auftritt, deutlich reduziert werden.
- Der Einsatz der Phased-Array-Technik erlaubt durch die Möglichkeit der steuerbaren Einschallwinkel eine optimale Anpassung an die Wellengeometrie und kann dadurch die PoD verbessern.
- Der Einsatz der Synthetic-Aperture-Focussing-Technique (SAFT) als Rekonstruktionsverfahren ermöglicht eine hohe Ortsauflösung mit der die Risspitzenanzeige der Schädigung und damit eine Fehlertiefe bestimmt werden

kann. Aufgrund der hohen Datenmenge kann dieses Verfahren derzeit nur für Analyseuntersuchungen eingesetzt werden.

In Bild 1 wird eine ZfP-basierte tertiäre Sicherheitsebene vorgeschlagen. Hierbei handelt es sich um ein Informationssystem welches am Zug selbst Informationen über den Zustand der Radsätze im Rahmen von Condition-Monitoring liefert. Ziel dieser Sicherheitsebene ist es, ein akut auftretende Schädigung zu erkennen, zu warnen und den Zug sicher vor Versagen des Bauteils außer Betrieb zu nehmen. Hier können neben der klassischen Schwingungsanalyse auch entsprechende ZfP-Prüfsysteme adaptiert werden, die online während der Fahrt oder offline bei Stillstand des Zuges Prüfungen durchführen.

## Referenzen

- [1] Klinger, C., D. Bettge, R. Häcker, T. Heckel, D. Gohlke, D. Klingbeil (2010): Failure Analysis on a Broken ICE3 Railway Axle - Interdisciplinary Approach.- Proc. ESIS TC 24 Workshop on “Fatigue Strength and Fatigue Life of Railway Axles”, Berlin.
- [2] European Railway Agency (ERA) (2011): Railway Safety Performance in the European Union. <http://www.era.europa.eu/Document-Register/Pages/Railway-Safety-Performance-in-the-European-Union-2011.aspx>
- [3] Zerst, U., et al. (2012): Safe Life and Damage Tolerance Aspects of Railway Axles, Einreichung bei Engineering Fracture Mechanics demnächst.
- [4] Traupe; M., Meinen, H. und Zenner, H. (2004): Sichere und wirtschaftliche Auslegung von Eisenbahnfahrwerken. Final Report BMBF Projekt 19 P 0061 A-F.
- [5] Beretta, S. and Carboni, M. (2008): Endurance design procedure of wheelsets based on reliable load spectra and reliable Wöhler curves. D5.1.3: Design procedures for axles. European Project “Wheelset Integrated Design and effective Maintenance” (WIDEM), [http://www.widem.org/file.php?id=50&save\\_dialogue=1](http://www.widem.org/file.php?id=50&save_dialogue=1).
- [6] Grubisic, V. and Fischer, G. (2011): Sichere Bemessung von ICE-Radsatzwellen. ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, 01/02, 18-25.
- [7] Beretta, S., Carboni, M., Fiore, G. and Lo Conte (2010): Corrosion-fatigue of A1N railway axle steel exposed to rainwater. Int. J. Fatigue 32, 952-961.
- [8] British Rail Safety and Standards Board (RSSB): Project T728: Impact of corrosion upon the high cycle fatigue properties of GB axle steel.
- [9] Murawa, FG. (2008): Neuentwicklungen zum Schutz von Radsätzen im Hochgeschwindigkeitsverkehr. 5. Fachtagung ZfP im Eisenbahnwesen, DGZfP, Wittenberg Germany March 2008, Präsentation 07; <http://www.ndt.net/article/dgzfp-rail-2008/Inhalt/V07.pdf>