

DB Systemtechnik

auswerten



berichten



Bericht

Untersuchung zu Lager- und Dämpferschäden an den Fahrzeugen IC2 und IC4 der DSB

Dokument: 14-17462-DSB-140312-01 Version 1.10
Datum: 04.07.2014

Fachabteilung: I.TVI 11, Bremstechnik
I.TVI 21, Fahrwerke
I.TVI 22, Radsätze



Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die im Bericht beschriebenen Sachverhalte. Dieser Bericht darf nicht ohne schriftliche Genehmigung des Auftraggebers veröffentlicht werden. Eine auszugsweise Vervielfältigung bedarf zusätzlich der Zustimmung des im Bericht genannten Auftragnehmers

Inhaltsverzeichnis

Seite

1	Angaben zum Auftrag	5
2	Beschreibung der Tätigkeit	5
2.1	Hypothesenbaum	6
2.2	Beanspruchung	6
2.2.1	Primärdämpfersystem	6
2.2.1.1	Auslegung / Belastung	6
2.2.1.2	Betriebsmessungen	8
2.2.1.3	Empfehlungen / Maßnahmen	8
2.2.2	Kräfte aus Radschäden	9
2.2.2.1	Trassierung	9
2.2.2.2	Unzulässiger Verschleiß	9
2.2.2.3	Einfluss der Bremse	10
2.2.2.3.1	Gleitschutz	10
2.3	Beanspruchbarkeit Radsatzlagergehäuse	10
2.3.1	Konstruktion/Auslegung	10
2.3.1.1	Konstruktion/Passungstoleranzen	12
2.3.1.2	Material	13
2.3.1.2.1	Material geeignet?	13
2.3.1.2.2	Material richtig geliefert?	13
2.4	Laufflächenschäden	13
2.4.1	Treib- und Laufradsatz	13
2.4.2	Bremsscheiben	13
2.4.3	Radverschleiß / Laufflächenschäden	13
2.4.3.1	Sachstand	14
2.4.3.2	Radmaterial	16
2.4.3.3	Durchgeführte Instandhaltungsmaßnahmen	16
2.4.3.4	Zuordnung der Ereignisse, Ursachen und Maßnahmen	17
2.4.4	Empfehlung - Kurzfristige Maßnahmen zur Durchführung einer sicheren Betriebsdurchführung	17
2.4.5	Erforderliche Untersuchungen zur Reduzierung der auftretenden Laufflächenschäden	18
3	Ergebnisse	18
3.1	Zusammenfassung	18
3.2	Empfehlungen	19
4	Unterschriften	20

Verzeichnis der Abkürzungen

HB		Härte nach Brinell
F	-	Kraft
F_{ges}	-	Gesamtkraft
F_a	-	Beschleunigungskraft
FFT	-	Fast Fourier Transformation
k	-	Geometriefaktor
K_t		Kerbzahl
S_h		Spurkranzhöhe
σ_{max}	-	maximale Spannung
σ_{mG}		Spannung mit Gussnaht
σ_{oG}		Spannung ohne Gussnaht
$\sigma_{zulässig}$	-	zulässige Spannung
v_{max}	-	maximale Geschwindigkeit

Änderungsnachweis

Nr.	Datum	Beschreibung
00	26.06.2014	Erstausgabe
01	04.07.2014	Anpassung Kapitel 3.1

Quellenverzeichnis/Literaturverzeichnis

- /1/ DSB: "Summary of wheel reprofile", Excel-Tabelle mit Reprofilierungsdaten von IC4-Zügen
- /2/ Knorr-Bremse: Bremsberechnung „TA27304/74, Rev.04“, 02.03.2005
- /3/ LUCCHINI RS: Report "DSB IC4 wheel with wear damages", Rev. 0, 14.04.2014
- /4/ LUCCHINI RS: 3.1 Zeugnis Qualität der Radsätze - Order 100638 - „IC2-IC4 E1002002.pdf“, 22.10.2012
- /5/ DSB: Instandhaltungshandbuch Rad "Hjulmanual - 2.002", Rev. 2, 03.09.2013
- /6/ Force Technology: Examination of fractured Axle Box „114-23061 HPN/mal“, 25.02.2014
- /7/ Investigation Report: IBT-R/U021321, Subject: Axlebox GHK.176466 (V.v. 24.04.02) Stress Analysis, AnsaldoBreda Pistoia Italien, Date:30-Apr-02
- /8/ Investigation Report Enclosures: IBT-R/U021321 - Enclosures, Subject: Axlebox GHK.176466 (V.v. 24.04.02) Stress Analysis, AnsaldoBreda Pistoia Italien, Date:30-Apr-02
- /9/ Investigation report: IBT-R/U031302, Axlebox GHK.176466 (V.v. 01.02.02) Stress Analysis with Bearing removed AnsaldoBreda Pistoia Italy, Date of report 23.01.03
- /10/ SCHAEFFLER GROUP INDUSTRIAL, Lower Part of Axlebox Z-176466 (040803) - Stress Analysis for Lower Part under Damper Loads - Project IC4 - DSB, AnsaldoBreda, Date 11.03.2011
- /11/ FKM-Richtlinie, Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen, 6., überarbeitete Ausgabe 2012
- /12/ Force Technology, Fractured arm from the primary suspension damper, 110-23322 HPN/mal, Date 09.03.2010

- /13/ EN 13749:2011, Bahnanwendungen - Radsätze und Drehgestelle - Festlegungsverfahren für Festigkeitsanforderungen an Drehgestellrahmen
- /14/ EN 13103: Bahnanwendungen - Radsätze und Drehgestelle - Laufradsatzwellen - Konstruktions- und Berechnungsrichtlinie
- /15/ EN 13104: Bahnanwendungen - Radsätze und Drehgestelle - Treibradsatzwellen - Konstruktionsverfahren
- /16/ EN 13749 (2005): Bahnanwendungen - Radsätze und Drehgestelle - Spezifikationsverfahren für Festigkeitsanforderungen an Drehgestellrahmen
- /17/ EN 13260: Bahnanwendungen - Radsätze und Drehgestelle - Radsätze - Produktanforderungen
- /18/ EN 13261: Bahnanwendungen - Radsätze und Drehgestelle - Radsatzwellen - Produktanforderungen
- /19/ EN 13262: Bahnanwendungen - Radsätze und Drehgestelle - Räder - Produktanforderungen
- /20/ EN 15313: Bahnanwendungen - Im Betrieb befindliche Radsätze - Instandhaltung der Radsätze im eingebauten oder ausgebauten Zustand
- /21/ UIC 812-3: Technische Lieferbedingungen für Vollräder aus gewalztem unlegiertem Stahl für Triebfahrzeuge und Wagen

1 Angaben zum Auftrag

Aufgabenstellung

Seit 2010 kam es an IC2 und IC4 Triebzügen der DSB zu mehreren Rissen bzw. Brüchen an Radsatzlagergehäusen sowie zu beschädigten Dämpfern.

Der Hersteller der Fahrzeuge (AnsaldoBreda) hat den Konstrukteur und Hersteller der Lager (FAG) beauftragt, die Lagerschäden zu untersuchen. Dabei wurde lediglich auf die Komponenten Radsatzlager und Dämpfer eingegangen. Gemäß deren Bericht konnte keine schädigende Ursache festgestellt werden.

Bisher wurden die Komponenten unabhängig voneinander betrachtet. Um die Gegenseitigen Einflüsse und die Gesamtzusammenhänge im Fahrzeug zu untersuchen, wurde die DB Systemtechnik beauftragt.

Die Untersuchung der DB Systemtechnik gründet sich auf die möglichen schädigenden Einflüsse auf Grund der übergebenen Dokumente und der eigenen Erfahrungen in diesen Fachgebieten.

Im ersten Schritt werden Lösungswege bzw. das weitere Vorgehen aufgezeigt und ein Versuchsprogramm abgeleitet, um die Ursache eindeutig zu ermitteln und es werden erste Abhilfemaßnahmen vorgeschlagen.

Auftraggeber: DSB (Danske Statsbaner)
Telegade 2
2630 Taastrup
Dänemark

Ansprechpartner: Bo Simonsen
E-Mail: bsim@dsb.dk

Auftragnehmer: DB Systemtechnik GmbH
Weserglaci 2
32423 Minden
Deutschland

Michael Gerstner
E-Mail: michael.gerstner@deutschebahn.com

Verteiler des Berichtes:

DSB	(2x)
I.TVE 1, Projekte	(1x)
I.TVI 11, Bremstechnik	(1x)
I.TVI 21, Fahrwerke	(1x)
I.TVI 22, Radsätze	(1x)

2 Beschreibung der Tätigkeit

In einem ersten Schritt wurde ein Hypothesenbaum erarbeitet, welcher die wesentlichen Punkte bzw. Einflussgrößen der Beanspruchung und Beanspruchbarkeit des Radsatzlagergehäuses beinhaltet. Anschließend wurden, soweit möglich, die einzelnen denkbaren Ursachen gesondert untersucht und bewertet. Des Weiteren wurden die einzelnen Punkte in Zusammenhang gebracht, weiterführende Untersuchungen vorgeschlagen und erste Lösungswege aufgezeigt.

2.1 Hypothesenbaum

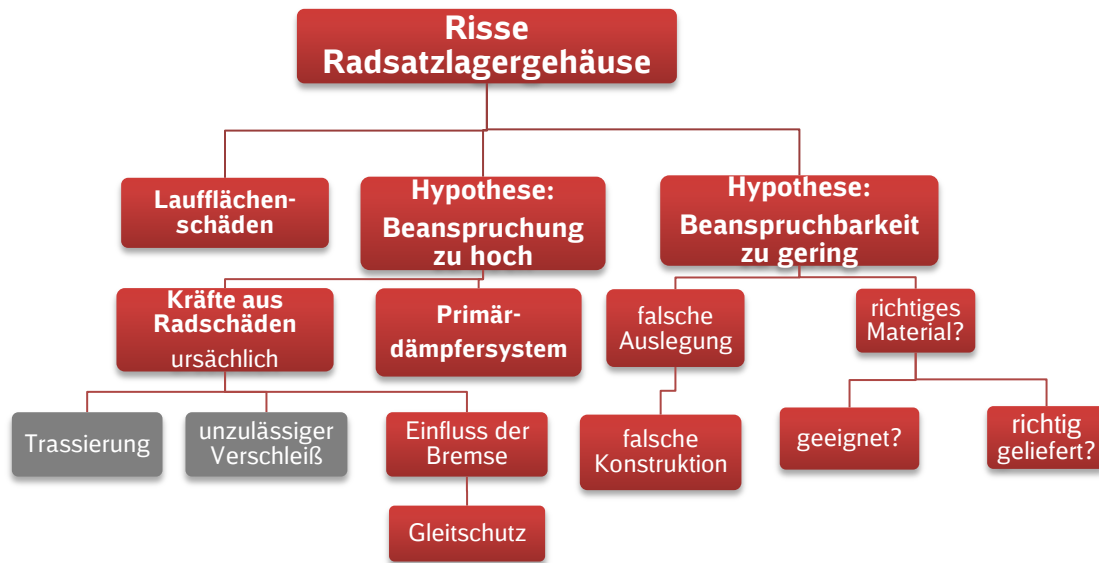


Abbildung 1: Hypothesenbaum (eigene Darstellung)

2.2 Beanspruchung

Zunächst wurde untersucht bzw. geklärt, ob Beanspruchungen, welche auf die geschädigten Bauteile wirken zu gering angesetzt bzw. spezifiziert wurden. Wenn die realen Beanspruchungen deutlich über der Spezifikation liegen, wirkt sich das negativ auf die Lebensdauer aus und kann zum Bauteilversagen führen. Im ersten Schritt wurde dazu die Konsistenz der Unterlagen geprüft. Im zweiten Schritt können Betriebsmessungen zur Aufnahme der realen Belastungen durchgeführt werden.

2.2.1 Primärdämpfersystem

2.2.1.1 Auslegung / Belastung

Im Betrieb wurden Dämpfer mit gerissenen Schweißnähten gefunden. Es ist davon auszugehen, dass die Konstruktion den tatsächlich im Betrieb auftretenden Lasten nicht standhält.

In der EN 13749:2005 wird eine übliche Primärdämpfergeschwindigkeit von mindestens 300 mm/s am Radsatzlagergehäuse zum Drehgestellrahmen genannt. Auf Grund der Bauteilgeometrie des Lenkers erhöht sich beim IC4 dieser Wert um folgenden Faktor k :

$$k = \frac{0,5 \times 16\text{mm} + 355\text{mm} + 400\text{mm}}{400\text{mm}} = 1,9075$$

Formel 1: Berechnung Geometriefaktor

Die verwendeten Werte in der Formel 1 sind den Zeichnungen P110126 und 051-5000000006480 entnommen:

Breite Dämpferlager	16 mm
Abstand Mitte Radsatzlager bis Kontaktfläche Dämpferlager	355 mm
Abstand Mitte Radsatzlager bis Radsatzführungsbuchse	400 mm

Unter Berücksichtigung des Geometriefaktors nach Formel 2 ergeben sich am Primärdämpfer Geschwindigkeiten von mindestens 572 mm/s.

$$v_{max,Dämpfer} = v_{max,Radsatz} * k = 300 \frac{mm}{s} * 1,9075 = 572 mm/s$$

Formel 2: Berechnung maximale Dämpfergeschwindigkeit

Im Folgenden werden 600 mm/s angesetzt.

Auf der vorliegenden Zeichnung (P110126) ist eine Primärdämpfermasse von 7,5 kg angegeben. Gemäß Aussage des Dämpferherstellers MSA beträgt der ungefederte Teil am Radsatzlager (unteres Auge, Behälterboden, Behälter, Stangenführung,...) ca. 4,5 kg und der primär gefederte Teil am Drehgestellrahmen (oberes Auge, Deckel, Kolbenstange, Kolben, Schutzrohr, ...) ca. 3,0 kg.

Laut EN 13749:2011 kann mit einer dauernden Vertikalbeschleunigung von 25 g am Radsatzlager gerechnet werden. Die außergewöhnliche Vertikalbeschleunigung ist mit 70 g angegeben.

Unter der Annahme, dass das Ende des Lenkers weitere 0,5 kg Masse liefert, können unter Berücksichtigung des Geometriefaktors k somit folgende vertikalen Beschleunigungskräfte angesetzt werden:

$$\text{Betriebslast: } F_{a,Betrieb} = (4,5kg + 0,5kg) \times 25 \times 9,81 \frac{m}{s^2} \times 1,9075 = 2.339N$$

$$\text{Außergewöhnliche Belastung: } F_{a,max} = (4,5kg + 0,5kg) \times 70 \times 9,81 \frac{m}{s^2} \times 1,9075 = 6.549N$$

Derzeit weist die Kraft-Geschwindigkeits-Kennlinie eine ungewöhnlich starke Progressivität ab Geschwindigkeiten von 400 mm/s auf. Bei großen Dämpfergeschwindigkeiten entstehen dadurch hohe Kräfte. Auf Basis dieser durch MSA an einem Primärdämpfer gemessenen Kennlinie lässt sich die Dämpfungskraft bei einer Geschwindigkeit von 600 mm/s zu 3.355 N interpolieren. Mit den üblichen Toleranzen im Neubau, der Änderung im Betrieb sowie des Temperatureinflusses kann man erfahrungsgemäß eine maximale Primärdämpferkraft von 5.033 N ansetzen. Als außergewöhnliche Primärdämpferkraft kann gemäß EN 13749:2005 mit dem doppelten Nennwert von 6.710 N gerechnet werden.

Aus Dämpfer- und Beschleunigungskräften ergeben sich folgende Belastungen:

$$F_{ges,Betrieb} = 5.033N + 2.339N = 7.372N$$

Formel 3: Betriebslast, gesamt

$$F_{ges,max} = 6.710N + 6.549N = 13.259N$$

Formel 4: Außergewöhnliche Last, gesamt

2.2.1.2 Betriebsmessungen

Nach Aussage der DSB vom 02. Mai 2014 werden in der Kalenderwoche 20 durch AnsaldoBreda Betriebsmessungen durchgeführt, mit dem Ziel die realen Belastungen am Radsatzlagergehäuse zu ermitteln. Die DSB hat der DB Systemtechnik die Versuchsspezifikation zur Bewertung übergeben.

Um eine belastbare Aussage zu erhalten, sollte folgende Punkte bei der Betriebsmessung berücksichtigt werden:

- Kleben der DMS im Bereich der höchsten Belastung (Rissebene). Hierzu ist ein geschädigtes Radsatzlagergehäuse zu vermessen.
- Messung der Kräfte am Dämpfer, z.B. durch DMS oben an der Kolbenstange. Hierzu muss das Schutzrohr entfernt werden.
- Vertikalbeschleunigung am Arm des Radsatzlagergehäuses in der Wirkebene des Primärdämpfers.
- Primärdämpferweg in guter Datenqualität, sodass sich hieraus die Dämpfergeschwindigkeiten ableiten lassen.
- Aufzeichnung des Dämpferkennfeldes (Kennlinien bis 1.000 mm/s bei Amplituden von ± 25 mm und ± 2 mm) der im Versuch erfassten Primärdämpfer.
- Aufzeichnung der Radprofile / Unrundheiten als Funktion über dem Radumfang.

Für die Auswertung sollten alle Messgrößen als Häufigkeitsverteilung dargestellt werden. Des Weiteren sollte jeweils eine Frequenzanalyse (FFT) durchgeführt werden.

Die Abtastrate sollte 1.000 Hz und die Filterfrequenz mind. 200 Hz betragen, um sicherzustellen, dass alle auftretenden Lasten ermittelt werden können.

2.2.1.3 Empfehlungen / Maßnahmen

Es wird empfohlen, den Primärdämpfer wie folgt zu optimieren:

1. Optimierung der Kennlinie: Nach Aussage des Dämpferherstellers MSA sollte es möglich sein, eine neue Kennlinie zu entwickeln, die bei Geschwindigkeiten über 400 mm/s nicht mehr eine derart starke Progression zeigt. Die aktuellen Prüfpunkte bei 100 mm/s und 300 mm/s sollten hierbei möglichst konstant gehalten werden. Nach Auswertung der von AnsaldoBreda durchgeführten Messungen und unter Berücksichtigung der sich daraus ergebenden Ergebnisse sollte das weitere Vorgehen hierzu mit dem Dämpferhersteller abgestimmt werden.
2. Optimierung der Schweißnähte: Die aktuelle 2 mm-Schweißnaht zwischen Deckel und Distanzstück an der oberen Befestigung hat nach Aussage des Dämpferherstellers MSA bei 10.000 Schwingspielen eine zulässige Belastung von 15.000 bis 16.000 N.

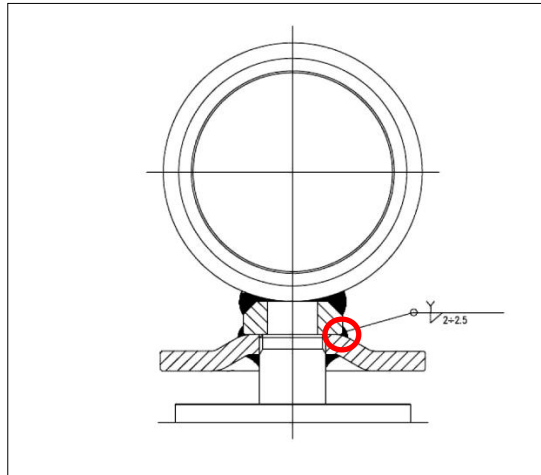


Abbildung 2: Position der zu optimierenden Schweißnaht

Hier wird empfohlen, die Dimensionierung des Dämpfers auf Grundlage der ermittelten Geschwindigkeiten und der ggf. neu festgelegten Dämpferkennlinie zu überprüfen.

Es wird empfohlen bei Revision den aktuellen Dämpfer gegen einen entsprechend den oben genannten Punkten optimierten Dämpfer zu tauschen.

2.2.2 Kräfte aus Radschäden

Radunrundheiten können, abhängig von ihrer Form und Größe, zu hohen Belastungsspitzen an allen ungefederten Komponenten des Fahrwerks, also auch des Radsatzlagers, führen. Grund dafür ist, dass sich beim Lauf eines unrunder Rades der Mittelpunkt des Vollrades (und damit auch die Radsatzwelle) sich nicht mehr exakt parallel zum Schienenkopf bewegt, sondern eine Wellenlinie beschreibt. Das damit verbundene Auf- und Abspringen der Welle in z-Richtung ist mit Beschleunigungen in derselben Richtung verbunden, dessen Amplitude von der Form und der Höhe der Unrundheit sowie der Fahrgeschwindigkeit abhängt.

Bei entsprechenden Untersuchungen an anderen Zügen mit unrunder Rädern sind Beschleunigungen in z-Richtung von mehr als 100 g (d.h. größer 1000 m/s²) gemessen worden.

Mögliche Ursachen für Radunrundheiten sind:

- Flachstellen, die durch blockierte Räder beim Bremsen verursacht werden
- Thermische Überbeanspruchung durch hohen Schlupf und daraus folgende Ausbröckelungen
- inhomogene Materialqualität (Härte, ...) über den Umfang
- Rollkontaktermüdung

2.2.2.1 Trassierung

Ein trassenabhängiger Einfluss auf Schäden konnte nicht ausgewertet werden, da hierzu die Laufrichtung der Züge über die bisherige Nutzungsdauer bekannt sein muss.

Da die Auswertung der Zugläufe sehr umfangreich wäre und nicht von einem bestimmenden Schadeinfluss ausgegangen werden muss, wurde diese Untersuchung zurückgestellt.

2.2.2.2 Unzulässiger Verschleiß

Auf Grund fehlender Daten über die Entwicklung der Radprofile und Lauflächen (Spurkranzdicken, Spurkranzhöhe, Messkreisdurchmesser, Messkreisdurchmesserdifferenz, etc.) über

die Nutzungsdauer kann zum Verschleißverhalten der Radsätze derzeit keine Aussage getroffen werden.

Um hier Erkenntnisse gewinnen zu können und Belastungen aus Laufflächenschäden zu reduzieren, wird empfohlen eine regelmäßige Kontrolle und Dokumentation der Radprofile und der Laufflächen durchzuführen. Das Intervall sollte hierbei 30.000 Laufkilometer betragen.

2.2.2.3 Einfluss der Bremse

Ein zu hohes Bremsmoment kann dazu führen, dass das durch den Rad-Schiene-Kontakt vermittelte Gegenmoment nicht mehr ausreicht, das Rad während des Bremsvorgangs in einer rollenden Bewegung zu halten. In der Folge sinkt die Rollgeschwindigkeit des Rades schneller als die Geschwindigkeit des Zuges, was zu Gleitvorgängen bis zum vollständigen Blockieren des Radsatzes führen kann, während der Zug sich weiter bewegt. Dies sorgt für einen stark erhöhten Energieeintrag in die Radlauffläche, welcher zu erhöhtem Verschleiß und im Falle des vollständig blockierten Rades zu Flachstellen führt. Beide Phänomene führen zu Unrundheiten der Räder. Das Bremsmoment der IC2/IC4 Züge ist, verglichen mit anderen Triebzügen, nicht außergewöhnlich hoch.¹ Dennoch können Gleitvorgänge grundsätzlich nicht verhindert werden, wenn der Kraftschluss zwischen Rad und Schiene vermindert ist. Derartige Situationen treten im Allgemeinen bei feuchten oder verschmutzten Schienen auf, insbesondere im Herbst, wenn die Hauptverschmutzung aus Laubresten besteht.

Um Gleitvorgänge zwischen Rad und Schiene in tolerablen Grenzen zu halten und das Blockieren von Rädern nach Möglichkeit vollständig zu vermeiden, sind moderne Triebzüge mit Gleitschutzsystemen ausgerüstet, welche das Bremsmoment vermindern, wenn dieses zu hoch ist.

2.2.2.3.1 Gleitschutz

Der Gleitschutz der IC4 ist bei sehr niedrigen Haftwerten nicht in der Lage das Blockieren der Räder zu verhindern. Dieses Thema wird in einer DSB internen Task Force bereits behandelt und deshalb in diesem Bericht nicht weiter betrachtet.

2.3 Beanspruchbarkeit Radsatzlagergehäuse

In diesem Abschnitt wurde geklärt bzw. untersucht, ob Material und Konstruktion den spezifizierten Anforderungen genügt oder schon bei der Berechnung und Auslegung Versäumnisse stattgefunden haben.

2.3.1 Konstruktion/Auslegung

Die folgenden Aussagen zur Auslegung des Radsatzlagergehäuses wurden auf Grundlage der Berichte der Firma FAG /7/, /8/, /9/ und /10/ getroffen, welche vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt wurden.

Insbesondere wurde der neueste Dokument /10/ (Stand: 11.03.2011) betrachtet. Dieses Dokument beinhaltet zusätzliche Betrachtungen des Unterteils des Radsatzlagergehäuses.

An der Schnittstelle zum Primärdämpfer wurden Lasten von ± 2 kN und ± 4 kN angesetzt. Daraus ergeben sich die in Tabelle 1 aufgeführten Spannungen und Auslastungen. Auf Basis der errechneten Werte wurden zusätzlich die Kräfte bei 100%iger Auslastung abgeschätzt.

¹ Die Kraftschlussausnutzung der IC4-Züge bei Schnellbremsungen liegt laut Bremsberechnung /2/ zwischen 12 und 15 %, und 15 %. Dies sind typische Werte für vergleichbare Triebzüge.

Lastfall	N	-2.000	-4.000	2.000	4.000
$\sigma_{\max}$ Oberseite Konsole	MPa	36,8	69,5	-21,5	-48,3
$\sigma_{\max}$ Unterseite Konsole	MPa	-57,2	-111,1	51,1	105,3
$\sigma_{\text{zulässig}}$	MPa	139,5	139,5	139,5	139,5
Auslastung Oberseite Konsole		26,38%	49,82%	15,41%	34,62%
Auslastung Unterseite Konsole		41,00%	79,64%	36,63%	75,48%
zulässige Belastung bei 100% Auslastung an der Oberseite der Konsole	N	-7.582	-8.029	12.977	11.553
zulässige Belastung bei 100% Auslastung an der Unterseite der Konsole	N	-4.878	-5.023	5.460	5.299

Tabelle 1: Auswertung und Bewertung Festigkeit Radsatzlagergehäuse

Im Vergleich zu den in Absatz 2.2.1.1 abgeschätzten Belastungen zeigt sich, dass insbesondere an der Unterseite des Radsatzlagergehäuses die möglichen maximalen Belastungen über den zulässigen Belastungen liegen können.

Des Weiteren kann die Berücksichtigung der Oberschale als Fläche sowie die fixen Randbedingungen zu einer verfälschten Steifigkeit des Gesamtsystems führen, da sich insbesondere bei einer Druckkraft (nach unten; negativ) die Lagerhalbschale nicht aufweiten kann.

Aus den Berechnungen mit und ohne Gussnaht ergibt sich eine hohe Kerbzahl nach der Formel 5 von ca. 1,42, welche durch die Gussnaht verursacht wird. Das entspricht einer lokalen Spannungserhöhung entlang der Gussnaht auf 142 % (vgl. /10/ S. 11 und S. 18), welche genau im hoch ausgelasteten Bereich liegt, in dem die Risse bzw. Brüche der Radsatzlagergehäuse aufgetreten sind.

$$K_t = \frac{\sigma_{mG}}{\sigma_{oG}} = \frac{48,3 \text{ MPa}}{33,9 \text{ MPa}} = 1,42$$

Formel 5: Kerbzahl

Empfehlungen:

- Es wird empfohlen die abgeschätzte Dämpferkraft für betriebliche und außergewöhnliche Belastungen nach Kapitel 2.2.1.1 unter Beachtung der im Betrieb gemessenen Kräfte bei zukünftigen Berechnungen zu implementieren.
- Das Berechnungsmodell sollte um die obere Lagerhalbschale sowie den Gehäuse-ring ergänzt werden um die Steifigkeit des Gesamtsystems genauer abbilden zu können. Die Toleranzen der Passungen zum Gehäuse-ring sollten hierbei unter Verwendung von Kontaktelementen berücksichtigt werden.
- Die Kerbwirkung der Gussnaht kann durch einen Planschliff dieser nach der Fertigung reduziert werden.
- Auf der Grundlage von neu ermittelten Lasten können zu einem späteren Zeitpunkt weitere Empfehlungen abgeleitet werden.



Abbildung 3: Unteres RSL-Gehäuse mit Riss (Quelle: /12/)



Abbildung 4: Detailansicht der Rissstelle (Quelle: /12/)

2.3.1.1 Konstruktion/Passungstoleranzen

Die Überprüfung der Passungstoleranzen auf den zur Verfügung stehenden Zeichnungen ergab keine Auffälligkeiten.

Bei der Passung Welle/Lagerinnenring handelt es sich um eine Übermaßpassung mit einem minimalen Übermaß von 0,051 mm und einem maximalen Übermaß von 0,101 mm. Diese

Werte ergeben sich aus der Toleranz der Welle 150 p6 (+0,068 mm/+0,043 mm) und der Toleranz des Lagerinnenringes 150 mm (-0,008 mm/-0,033 mm).

Bei der Passung Lageraußenring/Gehäusering handelt es sich um eine Spielpassung mit kaum merklichem Passungsspiel. Das minimale Spiel beträgt 0,000 mm und das maximale Spiel 0,146 mm. Diese Werte ergeben sich aus der Toleranz des Lageraußenringes 250 mm (0,000 mm/-0,100 mm) und der Toleranz des Gehäuseringes 250 H7 (+0,046 mm/0,000 mm).

Aufgrund nicht zur Verfügung stehender Einzelteilzeichnungen konnten keine weiteren Betrachtungen, zum Beispiel zur Passung zwischen Gehäusering und unterer bzw. oberer Lagerschale, durchgeführt werden.

Die betrachteten Passungstoleranzen liegen im üblichen Bereich. Es wird daher davon ausgegangen, dass diese keine Auswirkung auf die Rissbildung am Radsatzlagergehäuse haben.

2.3.1.2 Material

2.3.1.2.1 Material geeignet?

Bei dem verwendeten Werkstoff handelt es sich um den Gusswerkstoff EN GJS 400-18 LT, welcher auch bei vielen anderen Radsatzlagergehäusekonstruktionen zum Einsatz kommt und sich bei diesen bewährt hat.

2.3.1.2.2 Material richtig geliefert?

Die Firma FORCE TECHNOLOGY wurde damit beauftragt ein gebrochenes Radsatzlagergehäuse eines IC4 zu untersuchen und die Ursache des Schadens festzustellen. Daraufhin wurden die Bruchflächen visuell untersucht, werkstofftechnische Untersuchungen (Gefügeuntersuchungen und Härtemessungen) durchgeführt und im Bericht /6/ dokumentiert.

Bei den Untersuchungen wurden keine Materialfehler festgestellt. Auch die ermittelten Härtewerte und Gefügeuntersuchungen entsprechen dem eines EN GJS 400-18 LT. Somit kann falsch geliefertes Material als Ursache der Schäden ausgeschlossen werden.

2.4 Laufflächenschäden

2.4.1 Treib- und Laufradsatz

Die Radsätze des IC2 und IC4 sind mit Vollrädern ausgestattet, die im Neuzustand einen Messkreisdurchmesser von 860 mm besitzen. Die Vollräder sind mit einem Verschleißvorrat von 30 mm im Radius versehen. Bei den Rädern wird der Radwerkstoff ER 7 eingesetzt.

Die Auslegung der Radsatzwelle erfolgt nach EN 13103 für Laufradsatzwellen und EN 13104 für Treibradsatzwellen. Die Radsätze entsprechen den Vorschriften nach EN 13260 bis 13262. Die Laufflächen sind nach DSB 97-1 (entspricht S1002 nach EN 13715) profiliert.

2.4.2 Bremsscheiben

Die Radsätze des IC2 und IC4 sind mit Wellenbremsscheiben ausgerüstet.

- Treibradsatzwelle mit 2 Wellenbremsscheiben
- Laufradsatzwelle mit 3 Wellenbremsscheiben

2.4.3 Radverschleiß / Laufflächenschäden

An Fahrzeugen der DSB der Baureihe IC2 und IC4 wurden gravierende Schäden im Bereich der Laufflächen festgestellt. Die Schäden traten sowohl bei den Treib- doch wesentlich intensiver bei den Laufradsätzen und hier an den Positionen 1 und 10 auf, teilweise wurden sie bereits nach einer Laufleistung von 50.000 km festgestellt.

Es handelte sich dabei um:

- Flachstellen,
- Materialausbröckelungen/-zerrüttungen

Bei der Besichtigung des Radsatzes 4 des Fahrzeugs Nr. 5707 waren an den Laufflächen Fischgrätenmuster erkennbar. Dies war vor allem an der dem Lagerschaden gegenüber liegenden Seite der Fall. Diese feinen Oberflächenschädigungen treten am Übergang Spurranz zur Hohlkehle sowie im Abstand von ca. 90 bis 120 mm zur inneren Stirnfläche auf - vorzugsweise in einem Winkel von 45°. Im weiteren Schadverlauf wachsen die Fischgräten unterhalb der Lauffläche zusammen und es kommt zu der Bildung von Materialausbröckelungen, welche auf der Seite mit Lagerschaden deutlich zu erkennen waren. Diese Schädigungen lassen auf eine hohe Materialbeanspruchung schließen, welche auf eine hohe thermische Belastung der Räder und/oder hohen Längs- bzw. Querschlupf hin deutet.

2.4.3.1 Sachstand

An sechs Laufradsätzen und einem Treibradsatz wurden bisher Beschädigungen am Radsatzlagergehäuse und/oder Dämpfer festgestellt, die bei unterschiedlichen Laufleistungen aufgetreten sind.

Fahrzeug- typ	Fahr- zeug- nummer	Ein- bauort Radsatz	Rad	Radsatzla- gergehäu- se	Dämpfer	Datum Ereignis	Laufleistung [km]
IC4	5608	1	links	gebrochen	gebrochen	22.02.2010	50.000
IC4	5618	1	links	gebrochen	-	03.12.2010	100.000
IC4	5650	10	links	gebrochen	gebrochen	03.02.2014	150.000
IC2	5707	4	links	Riss	gebrochen	27.03.2014	55.000
IC4	5630	3	links	Riss	gebrochen	08.04.2014	170.000
IC4	5651	4	rechts	Riss	gebrochen	07.04.2014	165.000
IC4	5671	6	links	-	gebrochen	22.04.2014	70.700

Tabelle 2: Aufgetretene Schäden an Radsatzlagergehäusen bzw. Dämpfer

Alle Laufflächen der betroffenen Radsätze wiesen gravierende Laufflächenschäden auf. Risse an den Radsatzlagergehäusen, sowie die in Abbildung 5 dargestellten Laufflächenschäden, traten immer - mit Ausnahme bei Fahrzeug 5651 - am linken Vollrad auf. Hier ist ein Riss am rechten Radsatzlagergehäuse festgestellt wurden. Nach unseren Erfahrungen kann man davon ausgehen, dass auch an den gegenüberliegend auf dem Radsatz befindlichen Rädern bereits Materialschädigungen vorliegen, jedoch mit einem geringeren Schädigungsgrad.



Abbildung 5: Lauffläschenschäden (Quelle: DSB: Lauffläschenschaden am IC4, Triebzug 5618)

Von einem Schadradsatz, bei dem ein Riss am Radsatzlagergehäuse festgestellt wurde, wurde die in Tabelle 3 aufgeführten Profil- und Spurmaße dokumentiert.

Radsatz		
	Links [mm]	Rechts [mm]
Raddurchmesser	856,39	860,34
SR	1418,83	
AR	1359,18	
Rundlauf	3,27	0,14
Planlauf	0,20	0,27
Spurkranzhöhe	31,34	29,08
Spurkranzdicke	30,77	28,89
qR	12,57	9,71

Tabelle 3: Profil- und Spurmaße des 4. Radsatzes Triebzug 5707

Die Räder, von dem in Tabelle 3 dokumentierten Radsatz, hatten eine Durchmesserdifférenz von 3,95 mm. Am Rad links wurde eine Unrundheit von 3,27 mm gemessen. Nicht erfasst wurde, ob es sich um eine klassische Unrundheit (Polygonbildung) oder um eine singuläre Abplattung handelte.

Bei laufftechnischen Untersuchungen von Rädern mit singulären Abplattungen von > 3 mm wurden axiale Beschleunigungen von > 100 g gemessen.

Die Spurkranzdickendifferenz vom linken Vollrad (30,77 mm) zum rechten Vollrad (28,89 mm) beträgt 1,88 mm. Damit muss das Rad rechts verstärkt angelaufen sein. Ein weiteres Indiz dafür ist das unterschiedliche Spurkranzflankenmaß qR rechts 9,71 mm zu qR links 12,57 mm. Bei Bogenfahrten tritt am bogenäußeren Rad durch die Rollkontaktermüdung ein verstärkter Verschleiß durch Rissbildung auf. Das widerspricht dem vorliegenden Schadbild, weil das linke Rad einen höheren Schädigungsgrad aufweist.

Die Spurkranzhöhendifferenz von $s_{h,links}$ (31,34 mm) zu $s_{h,rechts}$ (29,08 mm) beträgt 2,26 mm. Das entspricht in etwa der Durchmesserdifférenz beider Räder.

Die massiven Laufflächenschäden am untersuchten Rad, wie in den Bildern 68237 und 68238 des Untersuchungsberichtes /3/ dargestellt, führten zu einer völligen Zerrüttung des Radmaterials im Bereich der Lauffläche. Dadurch wurde Radmaterial vom Laufflächenbereich nach außen verschoben. Das Ergebnis ist der typische Hohllauf sowie die unterschiedliche Entwicklung der Profilmaße.

In /1/ sind die durchgeführten Reprofilierungen von den Radsätzen der IC4 Züge erfasst. Auffällig ist, dass bei den Radsätzen 1 und 10 der Raddurchmesser gegenüber den anderen Radsätzen mindestens um den Faktor 2 mehr reduziert werden musste, um vorhandene Laufflächenschäden zu beseitigen. Dies deutet darauf hin, dass hier die Belastung der Radlaufflächen entsprechend höher sein muss.

2.4.3.2 Radmaterial

Von LUCCHINI wurde ein geschädigtes Rad vom IC4 werkstofftechnisch untersucht. Die Prüfungen wurden entsprechend den Vorgaben der UIC 812-3 durchgeführt. Die im Untersuchungsbericht /3/ dokumentierten Werkstoffkennwerte entsprechen den Vorgaben der UIC 812-3. Die Zugfestigkeit mit 857 MPa liegt im unteren Toleranzbereich.

In der übergebenen Fertigungsdokumentation /4/ für die Vollräder Radmaterial ER7 - EN 13262 Kategorie 1 werden die zu erreichenden Mindestwerte für die Härteeigenschaften am Radkranz teilweise unterschritten. Die EN 13262 fordert eine Mindesthärte von 245 HB in der Kategorie 1. Angegeben sind die ermittelten Härten am Radkranz im Bereich von 236 bis 266 HB. Die Forderung in der EN 13262, dass die größte Härteendifferenz der Räder eines Loses max. 30 HB betragen darf, wird gerade noch eingehalten.

2.4.3.3 Durchgeführte Instandhaltungsmaßnahmen

Der vom Hersteller vorgegebene Fristabstand beträgt 180.000 km.

Auf Grund der bisherigen Vorkommnisse hat die nationale Aufsichtsbehörde angewiesen, die Laufflächen und Radsatzlagergehäuse nach einer Laufleistung von 7 Betriebstagen visuell zu untersuchen.

Grundlage für die Radsatzinstandhaltung ist das Dokument /5/. Hier werden Grenzwerte vorgegeben, die im Rahmen der betrieblichen Instandhaltung einzuhalten sind.

Das Dokument basiert auf der Instandhaltung von Güterwagenradsätzen mit Klotzbremse. Eine Übertragung auf die Instandhaltung der scheibengebremsen Radsätze der IC2 bzw. IC4 ist daher nur bedingt möglich.

2.4.3.4 Zuordnung der Ereignisse, Ursachen und Maßnahmen

Mögliche Ursachen für die massiven Laufflächenschäden sind:

1. Die ermittelten Härtewerte im Bereich der Radkränze sowie die Zugfestigkeit liegen im unteren Toleranzbereich. Sie sind Regelkonform, wirken sich aber begünstigend auf die negative Verschleißentwicklung aus.
2. Ein nicht paralleler Einbau der Radsätze im Drehgestell bewirkt einen Spießlauf im Drehgestell. Die Einbauzustände der Radsätze im Drehgestell sind momentan nicht bekannt. Die Folgen eines Spießlaufes sind erhöhter Schlupf und ein ständiges Anlaufen des Rades.
3. Gleit- und Schleudervorgänge am Rad führen zu Radverschleiß und lokalem Wärmeeintrag, wodurch eine Gefügeumwandlung in der Lauffläche erfolgt. Dieses spröde Material (Martensit) kann bei weiterer Überrollung ausbröckeln.
4. Ein nicht optimal eingestelltes Bremsblending und ein nicht optimal eingestellter Gleitschutz könnte zu Blockierungen und damit zu einem höheren Wärmeeintrag im Rad-Schiene-Kontakt führen.

2.4.4 Empfehlung - Kurzfristige Maßnahmen zur Durchführung einer sicheren Betriebsdurchführung

Kurzfristige Maßnahmen zur Reduzierung der Laufflächenschäden sind:

1. Maßnahmen für den Bereich Instandhaltung
 - 1.1. Beibehaltung der visuellen Prüfung nach einer Laufleistung von 7 Betriebstagen.
 - 1.2. Rundlaufprüfung in einem noch zu entwickelndem Fristintervall.

Durchführung der Rundlaufprüfung:

 - Den Radsatz bzw. das Drehgestell soweit anheben, dass der Radsatz für die Rundlaufprüfung durchdrehbar ist.
 - Die Laufflächen der Räder sind vor der Rundlaufprüfung zu reinigen.
 - Die Messuhr (nach Möglichkeit digital mit Speicherfunktion und Rad am Tastkopf) ist mit einem magnetischen Messuhrhalter auf dem Gleis zu befestigen.
 - Die Messkreisebene (70 mm von der inneren Radkranzstirnfläche) ist auf der Lauffläche zu ermitteln und anzuzeichnen.
 - Der Messuhrhalter mit eingespannter Messuhr ist auf die Messkreisebene der Lauffläche auszurichten und zu positionieren.
 - Der Beginn der Messung ist durch eine Kreidemarkierung an der Radstirnseite zu kennzeichnen.
 - Für die Rundlaufprüfung ist der Radsatz von Hand langsam einmal durchzudrehen.
 - Nach Abschluss der Rundlaufprüfung wird der Messwert mit Datum der Prüfung und Laufleistung des Radsatzes in einem Protokoll dokumentiert.
 - 1.3. Bei einer Unrundheit von $\geq 0,5$ mm ist der Radsatz zu reprofilieren.
 - 1.4. Überprüfung der zulässigen Durchmesserdivergenz der Räder im Drehgestell bzw. in der Antriebseinheit.
 - 1.5. Reprofilierung der Radsätze mit einem Schlichtspan nach einer Laufleistung, die auf der Grundlage einer Schadstatistik zu erarbeiten ist.

2. Instandhaltungsunterlagen
Es wird empfohlen die Instandhaltungsunterlagen für die Radsätze der IC2 / IC4 auf der Grundlage der EN 15313 – Instandhaltung der Radsätze im eingebauten oder ausgebauten Zustand - zu erarbeiten bzw. zu überarbeiten.
3. Radwerkstoff
Einsatz des härtesten Radwerkstoffes ER 8. Der von LUCCHINI vorgeschlagene SUPERLOS entspricht dem ER 9. Durch den höheren Kohlenstoffgehalt beim ER 9 wird dieser Radwerkstoff eher zur Rissbildung neigen. Ein noch höherer Radverschleiß durch Reprofilierung wäre die Folge. Vor einer generellen Änderung des Radmaterials sollte eine betriebliche Erprobung in Erwägung gezogen werden.

2.4.5 Erforderliche Untersuchungen zur Reduzierung der auftretenden Laufflächenschäden

Um nachhaltig den auftretenden Schäden bei den Radsatzlagergehäusen und Laufflächen der Radsätze entgegen zu wirken, werden nachstehende Untersuchungen empfohlen:

1. Erarbeitung einer detaillierten Schadensstatistik: Erfassung des Schadumfanges unter Berücksichtigung der Laufleistung und der Einsatzrelationen.
2. Lauf- und bremstechnische Untersuchungen
 - 2.1. Erfassung der Geschwindigkeit aller Treib- und Laufradsätze
 - 2.2. Erfassung und Bewertung des Gleit- und Schleudersignals; Gleitschutzversuche; Bremsblending (komplettes Fahrzeug)
 - 2.3. Aussagen zur Bremskraftverteilung im Zug und zum Gleitschutz. Überprüfung der Schlupfbelastung der Räder durch den Retarder und der pneumatischen Bremse
 - 2.4. Erfassung der Drücke der pneumatischen Bremse
 - 2.5. Beschleunigungen (X-,Y- und Z-Richtung) der Treibradsätze
 - 2.6. Bewegung (Z-Richtung) der Treibradsätze gegenüber dem Drehgestell
 - 2.7. Untersuchung der Wirkungsweise der Retarderbremse
 - 2.8. Beschleunigungsfahrten des IC mit und ohne Last
 - 2.9. Verzögerungsfahrten mit und ohne Ballast und Anhängelast
3. Eigenspannungsmessung und zerstörungsfreie Prüfungen der geschädigten Räder
4. Überprüfung der Einbaustände der Radsätze im Drehgestell um eine Aussage zum Zeichnungskonformen Einbau treffen zu können.

3 Ergebnisse

3.1 Zusammenfassung

Die Schäden an den Radsatzlagergehäusen und Primärdämpfern lassen sich nicht auf einen einzelnen Sachverhalt zurückführen. Es ist das Zusammenwirken unterschiedlicher Einflüsse, welche zum Versagen der Bauteile führen und näher untersucht werden müssen.

Es existieren folgende Haupthandlungsfelder:

- Im Betrieb wurden Dämpfer mit gerissenen Schweißnähten gefunden. Es ist davon auszugehen, dass die Konstruktion den tatsächlich im Betrieb auftretenden Lasten nicht standhält. Derzeit weist die Kraft-Geschwindigkeits-Kennlinie eine ungewöhnlich starke Progressivität ab Geschwindigkeiten von 400 mm/s auf. Bei großen Dämpfergeschwindigkeiten entstehen dadurch hohe Kräfte.

- Im Vergleich zu den in Absatz 2.2.1.1 abgeschätzten Belastungen zeigt sich, dass insbesondere an der Unterseite des Radsatzsattelagergehäuses die möglichen maximalen Belastungen über den zulässigen Belastungen liegen können. Des Weiteren kann die Berücksichtigung der Oberschale als Fläche sowie die fixen Randbedingungen zu einer verfälschten Steifigkeit im Rechenmodell des Radsatzlagergehäuses und somit zu ungenauen Rechenergebnissen führen. Die Gussnaht befindet sich in einem äußerst ungünstigen Bereich.
- Die betrachteten Passungstoleranzen liegen im üblichen Bereich. Es wird daher davon ausgegangen, dass diese keine Auswirkung auf die Rissbildung am Radsatzlagergehäuse haben.
- Der verwendete Werkstoff kommt bei vielen anderen Radsatzlagergehäusekonstruktionen zum Einsatz und hat sich bewährt. Es konnte kein falsches Material nachgewiesen werden.
- Es existiert keine detaillierte Instandhaltungsvorschrift.
- Die ermittelten Härtewerte im Bereich der Radkränze sowie die Zugfestigkeit liegen im unteren Toleranzbereich bzw. werden teilweise unterschritten. Sie wirken sich somit begünstigend auf die negative Verschleißentwicklung aus.
- Gleit- und Schleudervorgänge am Rad führen zu Radverschleiß und lokalem Wärmeeintrag, wodurch eine Gefügeumwandlung in der Lauffläche erfolgt. Dieses spröde Material (Martensit) kann bei weiterer Überrollung ausbröckeln.
- Ein nicht optimal eingestelltes Bremsblending und ein nicht optimal eingestellter Gleitschutz können zu Blockierungen und damit zu einem höheren Wärmeeintrag im Rad-Schiene-Kontakt führen.

3.2 Empfehlungen

Folgende Empfehlungen können gegeben werden:

- Es wird empfohlen, bei der nächsten Revision eine optimierte Variante der Dämpfer einzubauen: Die Dämpferkennlinie sollte dahingehend optimiert werden, dass der Verlauf oberhalb von Geschwindigkeiten von 400 mm/s nicht mehr so stark ansteigt. Des Weiteren sollte die Auslegung der mechanischen Komponenten (zum Beispiel Schweißnähte,...) überprüft werden.
- Es gilt das Gleitschutzsystem des IC4 zu überarbeiten/optimieren, insofern dies möglich ist, um Laufflächenschäden und die damit verbundenen Vertikaldynamik zu reduzieren.
- Der Gleitschutz des IC2 sollte analog des Gleitschutzsystems des IC4 ebenfalls näher untersucht werden, um die möglichen Einflüsse auf die Radschäden zu ergründen.
- Es wird empfohlen eine neue Festigkeitsberechnung des Radsatzlagergehäuses bzw. einer optimierten Variante, unter Berücksichtigung der korrekten Dämpferkraft sowie der Ergebnisse aus den von AnsaldoBreda realisierten Betriebsmessungen, durchzuführen. Um die Kerbwirkung durch die Gussnaht zu reduzieren sollte entweder die Gussform modifiziert oder zumindest die Naht nach der Fertigung plan geschliffen werden.
- Weiterhin wird es als erforderlich erachtet eine umfangreichere Instandhaltungsvorschrift für die Radsätze und Radsatzlager für die IC2/IC4 Züge zu erarbeiten.
- Maßnahmen für den Bereich Instandhaltung:
 - visuelle Prüfung nach einer Laufleistung von 7 Betriebstagen.

- Rundlaufprüfung in einem noch zu entwickelndem Fristintervall.
- Reprofilierung bei Unrundheiten von $\geq 0,5$ mm
- Überprüfung der zulässigen Durchmesserdivergenz
- Reprofilierung der Radsätze mit einem Schlichtspan
- Eine Erprobung des höherfesten Radwerkstoffes ER 8 wird empfohlen.
- Erarbeitung einer detaillierten Schadensstatistik
- Lauf- und bremstechnische Untersuchungen
- Eigenspannungsmessung und zerstörungsfreie Prüfungen der geschädigten Räder

4 Unterschriften

gez. Gerstner

Gerstner
L I.TVI 22

gez. Schöppe

Schöppe
I.TVI 22