

RAlpin AG
Herrn Dominic Felice
Leiter Asset Management
Römerstrasse 3
4600 Olten

Auftrag Nr. 2017.106 - Zwischenbericht

Bruch einer Radsatzwelle am 25.09.2017

- Welle Nr. 74 aus der Charge 43072
- Herstellung: Radsatzfabrik Ilsenburg; Sommer 2012

Untersuchung der gebrochenen Welle

- Auftragsart: Technische Untersuchung
- Umfang: 102 Seiten (18 Text / 44 Beilagen / 40 Anhänge)
- Ausführung: 06.10.2017 bis 04.12.2017
- Auftraggeber: RAlpin AG, Herr Dominic Felice
- Bestellung: Telefon vom 04.10.2017
- Verteiler: Auftraggeber: PDF-Datei gesamter Bericht; x gedruckte Gesamt-Berichte; Einzeldateien von Text, Beilagen & Anhängen für die vorgesehene Übersetzung
- Archivierung: Bericht, Daten zur Berichtserstellung und wichtige Untersuchungsunterlagen werden ab Berichtsdatum 5 Jahre archiviert und anschliessend vernichtet.
Das Untersuchungsmaterial und die daraus entnommenen Proben und Prüfkörper werden ab Berichtsdatum 1 Jahr archiviert. Nach Ablauf der Archivierungszeit wird das Material vernichtet oder zu Anschauungszwecken verwendet.
- Gültigkeit: Die Aussagen gelten nur für das untersuchte Objekt und nur im Zusammenhang mit dem vollständigen Bericht. Der vorliegende Bericht darf nicht als Basis für die gerichtliche Regelung von Auseinandersetzungen verwendet werden.

Verantwortlicher Leiter und Autor



Ernst Moor, Dr. sc. techn.

Windisch, 04.12.2017

INHALTSVERZEICHNIS

Text

Zusammenfassung

1. Untersuchungsobjekt	7
2. Ausgangslage - Grund der Untersuchung	7
3. Auftrag - Ziel der Untersuchung	8
4. Vorgehen	8
5. UntersuchungsProgramme im Detail.....	9
6. Ergebnisse der Untersuchungen.....	12
7. Beurteilung.....	16
8. Empfehlungen.....	17
9. Fachliteratur, Regelwerke & Technische Unterlagen.....	18

Beilagen

(Dokumentation der Untersuchungsergebnisse mit ausgewählten Bildern und Informationen)

Die Beilagen sind in Anlehnung an die Zuordnung zum Text nummeriert. D.h.:

- Beilage bezieht sich auf das ganze Kapitel 5: Beilagen 5.xxx
- Beilage bezieht sich auf den Abschnitt 5.3: Beilagen 5.3xx
- Beilage bezieht sich auf den Unterabschnitt 5.3.2: Beilagen 5.32x

Beilagen Kapitel 1, 5, 6

44 Seiten

Anhänge

(Prüfberichte, Abnahmezeugnisse, Dokumente)

Anhang 1:

7 Seiten

- Abnahmeprüfzeugnis der Radsatzfabrik Ilsenburg GmbH [312]

Anhang 2:

20 Seiten

- Prüfberichte der LB Materialprüfung AG zur Werkstoffcharakterisierung der gebrochenen Radsatzwelle gemäss EN 13621 [211]

Anhang 3:

13 Seiten

- Zwischen-Bericht der Mat-Tec AG „Messung und Beurteilung der Eigenspannungen in Radsatzwelle Nr. 74 aus Charge 43072“

Die Laborprüfungen und Laboruntersuchungen wurden bei der Firma LB Materialprüfung AG in 5400 Baden in Auftrag gegeben. Die Arbeiten wurden vom Autor dieses Berichtes geleitet und intensiv begleitet. Die Verantwortung für das gesamte Untersuchungskonzept liegt somit bei der MOOR SchadensManagement GmbH. Die Verantwortung dafür, dass die einzelnen Prüf- und Laborarbeiten korrekt ausgeführt wurden liegt bei LB Materialprüfung AG.

Die Eigenspannungsmessungen und deren Beurteilung wurden bei der Firma Mat-Tec AG in 8401 Winterthur in Auftrag gegeben. Das Messprogramm wurde in enger Zusammenarbeit mit Dr. H.J. Schindler erarbeitet. Die Verantwortung für die Messungen selbst und die Beurteilung der Ergebnisse liegt bei der Mat-Tec AG.

Der Bericht wird vom Auftraggeber in die italienische Sprache übersetzt. Rechtlich verbindlich ist die abgelieferte deutsche Originalversion, gedruckt von der MOOR SchadensManagement GmbH auf original Firmenpapier.

ZUSAMMENFASSUNG

Ausgang für die vorliegende Untersuchung ist der Bruch einer Radsatzwelle am 25.09.2017 bei einem Niederflur-Tragwagen auf der Fahrt von Freiburg nach Novara

- In Bezug auf die Zeichnung der Welle liegt der Bruch auf der linken Seite, d.h. auf der Seite mit den stirnseitig angebrachten Bezeichnungen.

Das Ziel der Prüfungen und Untersuchungen ist die Gewinnung von Hinweisen zur Ursache für den Bruch der Radsatzwelle. Im Detail bedeutet dies:

- Dokumentation des Schadensbildes
- Feststellung ob die gebrochene Welle die werkstofftechnischen Anforderungen, inklusive Restspannungen (Eigenspannungen), gemäss EN 13261:2009+A1:2010 [211], erfüllt
- Untersuchung der beiden Bruchflächen soweit dies noch möglich ist
- Untersuchung des Bruchausgangsbereichs auf mögliche Hinweise zu Ursachen für den Bruch

Das **Bruchbild** kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Der Bruch erfolgte im Übergangsradius zwischen dem Radscheibensitz und dem Wellenschaft.
- Der Abstand des Bruchausganges vom Radscheibensitz kann aufgrund der starken sekundären Schädigung der Bruchflächen nur geschätzt werden.
 - Abstand zur Kante Radscheibensitz: ca. 11 mm
- Aufgrund der makroskopisch mehrheitlich intakten Bruchfläche (ausgenommen die Randbereiche) auf der Seite zum Radscheibensitz mit gut erkennbaren Rastlinien und einem klar erkennbaren Restbruch liegt eindeutig ein **Schwingbruch** vor.
- Bei den mikrofraktographischen Untersuchungen in ausgewählten, mikroskopisch voll intakten Stellen im Bereich des Schwingungsrisses der Bruchfläche Seite Radscheibe, konnten **Schwingstreifen** nachgewiesen werden. Dies ist eine Bestätigung der makroskopisch bereits eindeutigen Einstufung des Bruchs als Schwingbruch.
- Der **Restbruch** kann wie folgt charakterisiert werden:
 - Sehr klein: Er trat ungefähr bei einer Risttiefe von ca. 100 µm bzw. 83% des Aussendurchmessers (120 mm) des zylindrischen Mittelteils der Welle ein.
 - Die mikrofraktographische Bruchstruktur entspricht einem transkristallinen, duktilen Gewaltbruch.

Da der **Bruchausgangsbereich vollständig sekundär geschädigt bzw. zerstört** ist, können keine direkten Aussagen zur Bruchursache (Korrosionsmulde, mechanische Verletzung aus Betrieb oder Handling, Schleifspur aus Betrieb, grosser nichtmetallischer Einschluss) gemacht werden. Dies ergibt sich sowohl aus den visuellen, den mikrofraktographischen (REM) und den metallographischen (Mikroschliffe) Untersuchungen.

Die metallographischen Untersuchungen im Bruchausgangsbereich – bisher wurde nur der Bruchausgangsbereich in der Scheibe A1 (Seite zum Radscheibensitz) untersucht – zeigen jedoch, dass im Übergangsradius hin und wieder **Riefen** mit Tiefen bis ca. 20 µm vorliegen. Ob im Übergangsradius die geforderte **Oberflächenrauheit $R_a \leq 1,6 \mu\text{m}$** vorliegt ist sehr fraglich.

Bei der **Überprüfung** ob die gebrochene Welle die **werkstofftechnischen Anforderungen** der EN 13261:2009+A1:2010 [211] erfüllt, wurde folgendes festgestellt:

- Chemischen Zusammensetzung, Gefügeausbildung, Mikrographischer Reinheitsgrad und Innere Fehlerfreiheit: die Anforderungen werden erfüllt.
- Mechanische Eigenschaften - Kerbschlagbiegeversuch: die Anforderungen werden erfüllt.
- Mechanische Eigenschaften - Zugversuch im Bereich des massgebenden grössten Wellendurchmessers (Sitz für Radscheibe):
 - Bei Zunahme der Dehnung wird eine stetige Zunahme der Spannung festgestellt, so dass der Beginn der plastischen Deformation mit der Dehngrenze $R_{p0,2}$ zu charakterisieren ist.
 - Im halben Radius wird der Sollwert für R_{eH} bzw. im vorliegenden Fall $R_{p0,2}$ (da keine ausgeprägte obere Streckgrenze vorliegt) deutlich (- 9%) unterschritten.
 - Das entsprechende Abnahmeprüfzeugnis weist einen R_{eH} -Wert aus der 21% über dem Sollwert liegt.
- Mechanische Eigenschaften - Zugversuch im zylindrischen Schaftbereich (der für erste Messungen gewählte Bereich)
 - Es wird eine ausgeprägte obere Streckgrenze festgestellt.
 - Im halben Radius wird der Sollwert für R_{eH} knapp erreicht.

Es wurden auch **Messungen der Eigenspannungen** (Restspannungen gemäss Norm) am noch intakten Übergangsradius auf der rechten Seite der Schadenswelle durchgeführt. Aufgrund der bisherigen Messungen ist davon auszugehen, dass im Bereich des Bruchausgangs in Oberflächennähe **signifikante Zugeigenspannungen** vorgelegen haben. Für die Beurteilung der Normverträglichkeit der vorliegenden Eigenspannungen sind noch Messungen im zylindrischen Bereich des Wellenschafts erforderlich. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die Eigenspannungen unterhalb dem in der Produktnorm festgelegten Maximalwert liegen. Trotzdem sind die Messergebnisse überraschend, denn publizierte Daten lassen vermuten, dass in Radsatzwellen in der Regel im Randbereich Druckeigenspannungen vorliegen und Bauteile aus niedriglegierten Baustählen tendieren im Allgemeinen zu Druckeigenspannungen in Oberflächennähe.

Beurteilung

Aufgrund der ungenügenden mechanischen Kennwerte im Zugversuch und den mit grosser Wahrscheinlichkeit unüblichen Zugeigenspannungen in Oberflächennähe muss davon ausgegangen werden, dass es sich bei der **Schadenswelle** um eine **aussergewöhnliche Welle** handelt.

Der unverzügliche Entscheid der RALpin AG, sämtliche Wellen dieser Lieferung aus dem Betrieb zurückzuziehen, zeugt von verantwortungsbewusstem Handeln. Mit dem heutigen Wissenstand und der Unsicherheit, ob diese Merkmale auch bei andern Wellen dieses Fertigungsloses vorliegen ist der Entscheid auch noch technisch abgestützt.

Ausgehend von der Beanspruchung „umlaufende Biegung“ und „niedrige Nennspannung“ schliesst man aus dem gesamten Erscheinungsbild des Schwingbruchs auf eine „**lokale Kerbwirkung oder lokale Schädigung**“ die zum Schwingbruch geführt hat.

Wegen der starken sekundären Schädigung des Bruchausgangsbereichs kann diese Schlussfolgerung jedoch nicht bewiesen werden.

Die oben beschriebenen ungenügenden mechanischen Kennwerte und die gemessenen Zugeigenspannungen werden nicht als Hauptursache des vorliegenden Bruches angesehen. Im Vergleich zu einer Welle ohne Eigenspannungen oder mit oberflächennahen Druckeigenspannungen, haben die Zugeigenspannungen den Schadensverlauf aber zweifellos stark beschleunigt und damit zum vorzeitigen Versagen beigetragen. Die vorliegenden ungenügenden mechanischen Kennwerte im Zugversuch, haben die Rissentstehung sicher begünstigt.

Weitere Untersuchungen zur Abrundung der gesamten Schadensuntersuchung

- Bruchausgangsbereich auch in der Scheibe B1 (Seite Wellenschaft) untersuchen
- Erweiterung der Eigenspannungsmessungen an der vorliegenden Schadenswelle
- Ermittlung der mechanischen Kennwerte auf der rechten Seite der Schadenswelle

Mögliche langfristige Aktivitäten

- Erarbeitung von bruchmechanisch abgestützten Anforderungen für die Beschaffung von neuen Radsatzwellen
- Erarbeitung eines bruchmechanisch abgestützten Instandhaltungskonzepts

1. UNTERSUCHUNGSOBJEKT

1.1. Untersuchungsobjekt - allgemein

Beilagen 1.1xx

- Eine Gebrochene Radsatzwelle eines Niederflur-Tragwagens
 - Zeichnung des Auftraggebers
 - Erste Eindrücke zum Bruch
- Lage des Bruches (siehe auch Kapitel 5)
Der Bruch liegt auf der Seite der stirnseitig angebrachten Bezeichnung, d.h. in der Zeichnung auf der linken Seite der Seite

Beilage 1.101

Beilagen 1.102 ÷ 1.103

Beilage 1.104

1.2. Untersuchungsobjekt Kennzeichnung – Abnahmeprüfzeugnis

Beilagen 1.2xx

Kennzeichnung auf der Stirnseite der Schadenswelle

- Db – 25
RALP A
- BTBED 43072 – 74
EA1N 07.12

Zuordnung zu Hersteller / Abnahmeprüfzeugnis

Beilage 1.201 & Anhang 1

Aufgrund der Angaben auf der Welle konnte der Auftraggeber die Schadenswelle einem Hersteller zuordnen und das massgebende Abnahmeprüfzeugnis zur Verfügung stellen.

2. AUSGANGSLAGE - GRUND DER UNTERSUCHUNG

Bruch einer Radsatzwelle am 25.09.2017 bei einem Niederflur-Tragwagen auf der Fahrt von Freiburg nach Novara.

Geschichte der gebrochenen Welle – Auszug aus den Angaben des Auftraggebers

- Herstellung: Sommer 2012
- Erster Einbau in einen Wagen
 - 28.08.2013
- Vermessung und MT-Prüfung (total)
 - 13.05.2015 bei Laufleistung von 219'892 km
- Vermessung und MT-Prüfung (partiell, d.h.: Wellenschenkel und Radscheibensitze)
 - 27.06.2017 bei Laufleistung von 444'894 km
- Bruch der Radsatzwelle
 - 25.09.2017 bei Laufleistung von 478'341 km

Der Auftraggeber geht davon aus, dass die Radsatzwellen dauerhaft ausgelegt sind und dass er über ein technisch hochstehendes Instandhaltungskonzept verfügt.

3. AUFTRAG - ZIEL DER UNTERSUCHUNG

Das Ziel der Prüfungen und Untersuchungen ist die Gewinnung von Hinweisen zur Ursache für den Bruch der Radsatzwelle. Im Detail bedeutet dies:

- Dokumentation des Schadensbildes
- Feststellung ob die gebrochene Welle die werkstofftechnischen Anforderungen, inklusive Restspannungen (Eigenspannungen), gemäss EN 13261:2009+A1:2010 [211], erfüllt
- Untersuchung der beiden Bruchflächen soweit dies noch möglich ist
- Untersuchung des Bruchausgangsbereichs auf mögliche Hinweise zu Ursachen für den Bruch

4. VORGEHEN

Die wesentlichen Schritte waren:

- Erste Sichtung des Schadenmaterials, Kennzeichnung, Begleitung der Entfernung der Radscheiben, Festlegung der Zerlegung der Schadenswelle
- Leitung der Zerlegung der gebrochenen Welle bei der LB Materialprüfung AG
- Makrountersuchung der Bruchflächen
- Werkstoffüberprüfung
- Fraktographische Untersuchung der Bruchfläche an der Scheibe A1
- Metallographische Untersuchung des Bruchausgangsbereichs in der Scheibe A1
- Messung und Beurteilung der Eigenspannungen durch die Mat-Tec AG
- Leitung und intensive Begleitung der gesamten Untersuchungen
- Erstellung der vorliegenden Zwischenberichtes

Das detaillierte Untersuchungsprogramm ist in Kapitel 5 dargestellt.

5. UNTERSUCHUNGSPROGRAMM IM DETAIL

5.1. Bei RAlpin

Beilagen 5.1xx

Dokumentation

- Angeliefertes Material
- Bezeichnung der Welle
- Schleifspuren
- Bruchflächen
 - Erste Bilder
 - Abstand zur Radnabe

Markierungen anbringen

- Markierung der Welle im Bereich Bruchausgang
- Radscheiben
 - Markierung der Welle übertragen (Links und Rechts)
 - Radscheiben stempeln & beschriften

Radscheiben entfernen

- Lager abziehen
- Radscheiben mit Öldruck entfernen

Zerlegung der Welle anzeichnen

- Scheiben mit Bruchflächen
- Abschnitt mit Schleifspuren
- Abschnitt für Werkstoffüberprüfung

Transport der gebrochenen Welle zur LB Materialprüfung AG zwecks

- Zerlegung der Welle für die Untersuchungen (siehe Abschnitt 5.2)
- Anbringen einer Zentrierbohrung im noch intakten rechten Wellenteil bestehend aus den Abschnitten B4, B5 & B6

Radscheiben untersuchen – *noch nicht ausgeführt*

- Abmessungen bestimmen
- Rundlauf bestimmen

Rundlauf bestimmen

- am noch intakten rechten Wellenteil bestehend aus den Abschnitten B4, B5 & B6

5.2. Zerlegung der gebrochenen Welle

Beilagen 5.2xx

Dargestellt sind die Zerlegung der Welle, die Bezeichnung der Scheiben und Abschnitte sowie die Festlegung der Bezeichnung für Position längs dem Umfang.

5.3. Labor 1 – Makrountersuchung der Bruchflächen

5.3.1. Abschnitte A1 & B1 (mit den Bruchflächen)

- Makrodokumentation ungereinigt
- Untersuchung mit dem Computer Tomographen (CT)
- Makrodokumentation der Bruchfläche A1 in verschiedenen Reinigungszuständen
 - gebürstet
 - Alkohol – Ultraschall
 - Aceton – Ultraschall
- Oberflächenzustand angrenzend an die Bruchfläche
 - Lack entfernen mit Aceton
 - Visuelle Untersuchung mittel Stereomikroskop
- Bruchverlauf und Bruchausgang

5.4. Labor 2 - Werkstoffüberprüfung

5.4.1. Abschnitt B3

- Lack mit Aceton entfernen
- Visuelle Untersuchung der Oberfläche
 - Delle
 - Ungänzen
- Abtrennen eines Segmentes mit den festgestellten Ungänzen
- Abtrennen von zwei Scheiben (als Reserve)
- Ausarbeitung der Proben für die Prüfungen

Werkstoffüberprüfung in Anwesenheit von Herrn G. Mezzogori, SBB Cargo Italia sri und zwei Vertretern von RFI

- Werkstoffcharakterisierung gemäss EN 13621 [211]:
 - Gefügeausbildung und Korngrösse
 - mikroskopischer Reinheitsgrad nach ISO 4967, Methode A
 - Chemische Analyse
 - Zugversuche
 - Kerbschlagbiegeproben längs & quer

5.4.2. Werkstoffüberprüfung an Abschnitt A3

- Zugversuche gemäss EN 13621 [211]

5.5. Labor 3 – Fraktographie der Bruchfläche A1

- Ausgewählte Bereiche der Bruchfläche im REM untersuchen
 - Bereich Schwingungsriß
 - Bereich Restbruch

5.6. Labor 4 – Metallographie im Bruchausgangsbereich – Scheibe A1

Abschnitte A1

- Bruchausgangsbereiche der Scheibe A1 mittels Metallographie untersuchen:
 - Aus der Scheibe 6 Proben aus dem Bruchausgangsbereich entnehmen
 - Einbetten der Proben
 - Schleifen und Polieren der Mikroschliffe
 - Untersuchung und Dokumentation im ungeätzten Zustand
 - Untersuchung und Dokumentation im geätzten Zustand

Abschnitte B1 – *noch nicht ausgeführt*

- Bruchausgangsbereiche der Scheibe B1 mittels Metallographie untersuchen:
 - Aus der Scheibe 6 Proben aus dem Bruchausgangsbereich entnehmen
 - Einbetten der Proben
 - Schleifen und Polieren der Mikroschliffe
 - Untersuchung und Dokumentation im ungeätzten Zustand
 - Untersuchung und Dokumentation im geätzten Zustand

5.7. Messung der Eigenspannungen

An Ringsegmenten aus der Scheibe A1

- Eigenspannungen bis in 2,5 mm Tiefe im Übergangsradius

An Abschnitt B5

- Eigenspannungen bis in 2,5 mm Tiefe im Übergangsradius
- Eigenspannungen bis in 2,5 mm Tiefe im zylindrischen Wellenteil
- Eigenspannungen über den gesamten Durchmesser

6. ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNGEN

6.1. Makrountersuchungen

Beilagen 6.1xx

6.1.1. Gesamterscheinungsbild

- Eindeutig ein Schwingbruch
 - Schwingungsriss mit klar erkennbaren Rastlinien
 - Restbruch

6.1.2. Schwingungsriss

- Bruchausgang längs dem Umfang: ungefähr 10 mm versetzt zur angebrachten Markierung für die Zerlegung der Welle (Beilage 6.105)
- Bruchausgang in axialer Richtung: im Abstand von ca. 11 mm zur Kante des Radscheibensitzes (Beilage 6.106)

6.1.3. Restbruch

- Der Restbruch kann wie folgt charakterisiert werden:
 - Sehr klein: Er trat ungefähr bei einer Risttiefe von ca. 100 mm bzw. 83% des Aussendurchmessers (120 mm) des zylindrischen Wellenschafts ein.
- Im Restbruchbereich ist auch eine kleine Schwingungsrissfläche erkennbar, die beim Bruch des Restquerschnittes freigelegt wurde. Es kann davon ausgegangen werden dass dieser zweite Schwingungsriss in einer späten Phase des Schwingbruches entstanden ist.

6.1.4. Zusammengefasste Darstellung der Ergebnisse

Beilagen 6.105 & 6.106

6.2. Werkstoffüberprüfung

Anhang 2 & Beilagen 6.2xx

6.2.1. Chemische Zusammensetzung

Anhang 2, Seite 1

Die Anforderungen nach 3.1 in [211] sind erfüllt.

6.2.2. Mechanische Eigenschaften - Zugversuch (3.2 in [211])

Abschnitt B3

Anhang 2, Seiten 2÷6

- Die Anforderungen sind erfüllt.
Im halben Radius liegt die obere Streckgrenze nur knapp über dem minimal festgelegten Wert

Abschnitt A3

Anhang 2, Seiten 7÷11

- Die Anforderungen sind nicht erfüllt.
Die Dehngrenze Rp0,2 liegt ca. 9% unter der minimal festgelegten Wert

Vergleich Abschnitt B3 mit Abschnitt A3

Beilagen 6.201 & 6.202

- Im Abschnitt B3 wird eine ausgeprägte obere Streckgrenze festgestellt. Als Zusatzinformation wird auch noch die Dehngrenze $R_{p0,2}$ bestimmt
- Im Abschnitt A3 wird bei Zunahme der Dehnung eine stetige Zunahme der Spannung festgestellt, so dass der Beginn der plastischen Deformation mit der Dehngrenze $R_{p0,2}$ zu charakterisieren ist.

6.2.3. Mechanische Eigenschaften - Kerbschlagbiegeversuch (3.2 in [211])

Abschnitt B3

Anhang 2, Seiten 12÷14

- Die Anforderungen sind sowohl in Längsrichtung als auch in Querrichtung erfüllt.

6.2.4. Mikrographische Gefügeeigenschaften (3.3 in [211])

Anhang 2, Seiten 15, 16

Die Gefügebildung entspricht den Anforderungen.

6.2.5. Reinheitsgrad (3.4 in [211])

Anhang 2, Seiten 15÷20

Mikrografischer Reinheitsgrad

- Der mikrographische Reinheitsgrad entspricht den Anforderungen.

Innere Fehlerfreiheit

- Die innere Fehlerfreiheit, bestimmt mittels Ultraschall-Prüfung an der in 4 Abschnitte zerlegten Welle, ohne die Scheiben A1 & B1, entspricht den Anforderungen.
- Die innere Fehlerfreiheit, bestimmt mittels Computer Tomographie (CT) an den Scheiben A1 & B1), entspricht den Anforderungen.

6.3. Fraktographische Untersuchungen der Bruchfläche A1 - mittels REM

Beilagen 6.3xx

Die makroskopisch gewonnenen Erkenntnisse als Basis für mikroskopische Untersuchungen sind in Beilage 6.301 nochmals dargestellt.

Da die gesamte Scheibe A1 für die Untersuchungen im REM zu gross ist und da die Entnahme von Proben für Mikroschliffe aus einer Scheibe umständlich ist, wurde der Kernbereich des Haupt Schwingungsrisses herausgetrennt. Damit entstehen (Beilage 6.311):

- Ein im REM gut untersuchbarer Kernbereich mit einem Aussendurchmesser von 69 mm
- Ein Ring aus dem sich Segmente und Proben für Mikroschliffe einfach entnehmen lassen.
Abmessungen des Rings: Aussendurchmesser:135 mm; Innendurchmesser: 75 mm

6.3.1. Haupt Schwingungsriss

Mittels Stereomikroskop wurden Stellen herausgesucht die makroskopisch intakt erschienen. Beim der Untersuchung im Rasterelektronenmikroskop zeigte sich jedoch, dass die mikrofraktographische Bruchstruktur mehrheitlich beschädigt war. Die Stellen 3 und 5 in Beilage 6.311 waren jedoch partiell sehr gut erhalten und werden in den Beilagen 3.11x dargestellt.

Stelle 3

Beilagen 3.312÷3.314

- Bei hoher Auflösung sind die Schwingstreifen deutlich erkennbar
 - Länge von 5 Schwingstreifen: ca. 3,33 µm
 - Rissfortschritt: 0,67 µm / Schwingstreifen

Stelle 5

Beilagen 3.315÷3.317

- Bei hoher Auflösung sind die Schwingstreifen deutlich erkennbar
 - Länge von 9 Schwingstreifen: ca. 2,75 µm
 - Rissfortschritt: 0,31 µm / Schwingstreifen

6.3.2. Restbruchbereich

Beilagen 3.32x

Der Restbruchbereich (Beilage 6.321) weist folgende Merkmale auf:

- Mehrheitlich stark sekundär geschädigt durch plastische Deformation
- Ein Bereich mit intakter Bruchstruktur
- Ein zweiter Schwingungsriß

Restbruch mit intakter Bruchstruktur

Beilagen 3.322÷3.324

- Die mikrofraktographische Bruchstruktur entspricht einem transkristallinen duktilen Gewaltbruch

Zweiter Schwingungsriß im Restbruch

Beilagen 3.325÷3.328

- Die mikrofraktographische Bruchstruktur wird als Schwingungsriß interpretiert, da Bruchbahnen und Schwingstreifen erkennbar sind. Dies gilt insbesondere für die Stelle 1, die in den Beilagen 3.325 & 3.326 dargestellt ist.

6.4. Mikroschliffe im Bruchausgangsbereich – Abschnitt A1

Beilagen 6.4xx

Die Entnahme der Proben aus dem Kreisring für die Mikroschliffe ist in Beilage 6.401 dargestellt.

Alle 6 Proben wurden jeweils in einer Schliffebene untersucht. Es wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Schliffen festgestellt. Der Mikroschliff 4 liegt im Bereich des Bruchausganges wie er aufgrund der Rastlinien des Haupt Schwingungsrisse bestimmt wurde. Daher wurden von diesem Schliff vielen Detailaufnahmen gemacht und diese werden im Bericht auch vollständig wiedergegeben.

Die sekundäre Belastung auf die Bruchfläche hat dazu geführt, dass eine Randzone von etwa 6÷8 mm stark plastisch deformiert wurde. Dabei wurde der Randbereich radial nach aussen und axial in Richtung Radscheibensitz geschoben. In Abb. 6.402A ist mittels den eingezeichneten Radien die radiale Verschiebung erkennbar. Im Gefüge ist die plastische Deformation im Detail 7 in Beilage 6.418 sehr gut erkennbar. Im Detail 1 in Beilage 6.417 ist dagegen keine nennenswerte plastische Deformation der Körner erkennbar.

Auffällig ist auch der Wulst vor der aufgespressten Radscheibe nach dem Übergang vom Radius zum Sitz der Radscheibe.

Die metallographischen Untersuchungen im Bruchausgangsbereich zeigen auch, dass im Übergangsradius hin und wieder **Riefen** mit Tiefen bis ca. 20 µm (Beilagen 6.414÷6.417) vorliegen. Ob im Übergangsradius die geforderte **Oberflächenrauheit $R_a \leq 1,6$ µm** vorliegt ist daher sehr fraglich.

6.5. Messung der Eigenspannungen

Anhang 3

Es wurden auch **Messungen der Eigenspannungen** (Restspannungen gemäss Norm) am noch intakten Übergangsradius auf der rechten Seite der Schadenswelle durchgeführt. Aufgrund der bisherigen Messungen ist davon auszugehen, dass im Bereich des Bruchausgangs in Oberflächennähe **signifikante Zugeigenspannungen** vorgelegen haben. Für die Beurteilung der Normverträglichkeit der vorliegenden Eigenspannungen sind noch Messungen im zylindrischen Bereich des Wellenschafts erforderlich. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die Eigenspannungen unterhalb dem in der Produktnorm festgelegten Maximalwert liegen. Trotzdem sind die Messergebnisse überraschend, denn publizierte Daten lassen vermuten, dass in Radsatzwellen in der Regel im Randbereich Druckeigenspannungen vorliegen und Bauteile aus niedriglegierten Baustählen tendieren im Allgemeinen zu Druckeigenspannungen in Oberflächennähe.

6.6. Geplante Erweiterung der Untersuchung

Zur Abrundung der gesamten Schadensuntersuchung sind noch folgende Untersuchungen geplant:

- Bruchausgangsbereich auch in der Scheibe B1 (Seite Wellenschaft) untersuchen
- Erweiterung der Eigenspannungsmessungen an der vorliegenden Schadenswelle
- Ermittlung der mechanischen Kennwerte auf der rechten Seite der Schadenswelle

7. BEURTEILUNG

Aufgrund der ungenügenden mechanischen Kennwerte im Zugversuch und den mit grosser Wahrscheinlichkeit unüblichen Zugeigenspannungen in Oberflächennähe muss davon ausgegangen werden, dass es sich bei der **Schadenswelle** um eine **aussergewöhnliche Welle** handelt.

Der unverzügliche Entscheid der RAIPin AG, sämtliche Wellen dieser Lieferung aus dem Betrieb zurückzuziehen, zeugt von verantwortungsbewusstem Handeln. Mit dem heutigen Wissenstand und der Unsicherheit, ob diese Merkmale auch bei andern Wellen dieses Fertigungsloses vorliegen ist der Entscheid auch noch technisch abgestützt.

Ausgehend von der Beanspruchung „umlaufende Biegung“ und „niedrige Nennspannung“ schliesst man aus dem gesamten Erscheinungsbild des Schwingbruchs auf eine „**lokale Kerbwirkung oder lokale Schädigung**“ die zum Schwingbruch geführt hat.

Wegen der starken sekundären Schädigung des Bruchausgangsbereichs kann diese Schlussfolgerung jedoch nicht bewiesen werden.

Die oben beschriebenen ungenügenden mechanischen Kennwerte und die gemessenen Zugeigenspannungen werden nicht als Hauptursache des vorliegenden Bruches angesehen. Im Vergleich zu einer Welle ohne Eigenspannungen oder mit Oberflächennahen Druckeigenspannungen, haben die Zugeigenspannungen den Schadensverlauf aber zweifellos stark beschleunigt und damit zum vorzeitigen Versagen beigetragen. Die vorliegenden ungenügenden mechanischen Kennwerte im Zugversuch, haben die Rissentstehung sicher begünstigt.

8. EMPFEHLUNGEN

Ausgehend von den bisherigen Erkenntnissen sind folgende langfristigen Aktivitäten naheliegend:

- Erarbeitung von bruchmechanisch abgestützten Anforderungen für die Beschaffung von neuen Radsatzwellen.
- Erarbeitung eines bruchmechanisch abgestützten Instandhaltungskonzepts.

9. FACHLITERATUR, REGELWERKE & TECHNISCHE UNTERLAGEN

9.1. Fachliteratur

9.1.1. Schadensanalyse

- [111] VDI-Richtlinie 3822: Schadensanalyse - Grundlagen und Durchführung einer Schadensanalyse, Verein Deutscher Ingenieure, 2011

9.1.2. Berichte zu Brüchen von Radsatzwellen

- [121] Unfalluntersuchungsstelle Bahnen und Schiffe: Schlussbericht über den Achsbruch bei Zug 73337 in Thun – Donnerstag 27. Januar 2005
- [122] Unfalluntersuchungsstelle Bahnen und Schiffe: Schlussbericht über den Achsbruch vom 01. Dezember 2005 in Aarau (-Rupperswil)
- [123] BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung: Schadensanalyse Radsatzwelle ICE-3 - Bisherige Untersuchungen, Vorläufige Ergebnisse, Stand 2008-09-22 – Vorab-Präsentation EBA, DB, 2008-09-24

9.2. Regelwerke & Normen

9.2.1. Anforderungen an Radsatzwellen

- [211] EN 13261:2009+A1:2010: Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Radsatzwellen - Produkthanforderungen

9.3. Technische Unterlagen

9.3.1. Dokumente der RAlpin AG

- [311] Zeichnung RAlpin AG: Laufradsatzwelle Db-25, D-101872.024 B, 26.01.2015
- [312] Radsatzfabrik Ilsenburg GmbH: Abnahmeprüfzeugnis 3.1 nach EN 10204 Zeugnis-Nr. 04.2012, 20.09.2012