



Allianz Risk Consulting GmbH
- Allianz Zentrum für Technik -

AKTUELLE SCHADENERFAHRUNG MIT DAMPFTURBINEN

Th. Gellermann, H. Pecher,
Dr. J. Stoiber, St. Thumm
Würzburg / 10.10.2018

VDI Tagung „Schadenanalyse in der
Energietechnik“



ALLIANZ ZENTRUM FÜR TECHNIK

AGENDA

- AZT Engineering Service “Life-Cycle-Support”
- Schadensschwerpunkte bei Dampfturbinen
- Beispiele zu:
 - Transportschäden und Fertigungsmängel
 - Schwingungsproblem während IBN
 - Zeitstandsschaden
- Lessons Learned

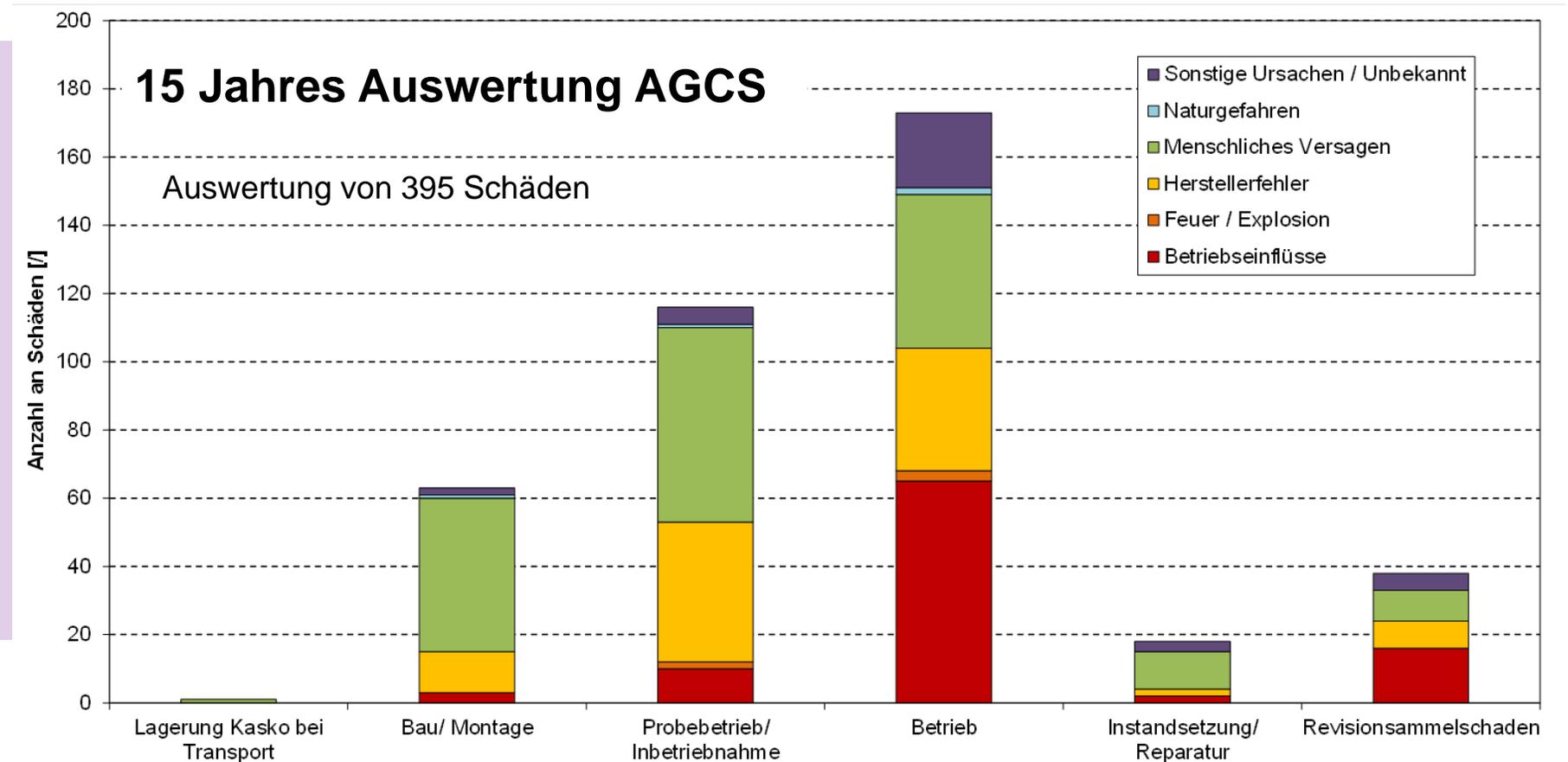


www.azt.allianz.com

01



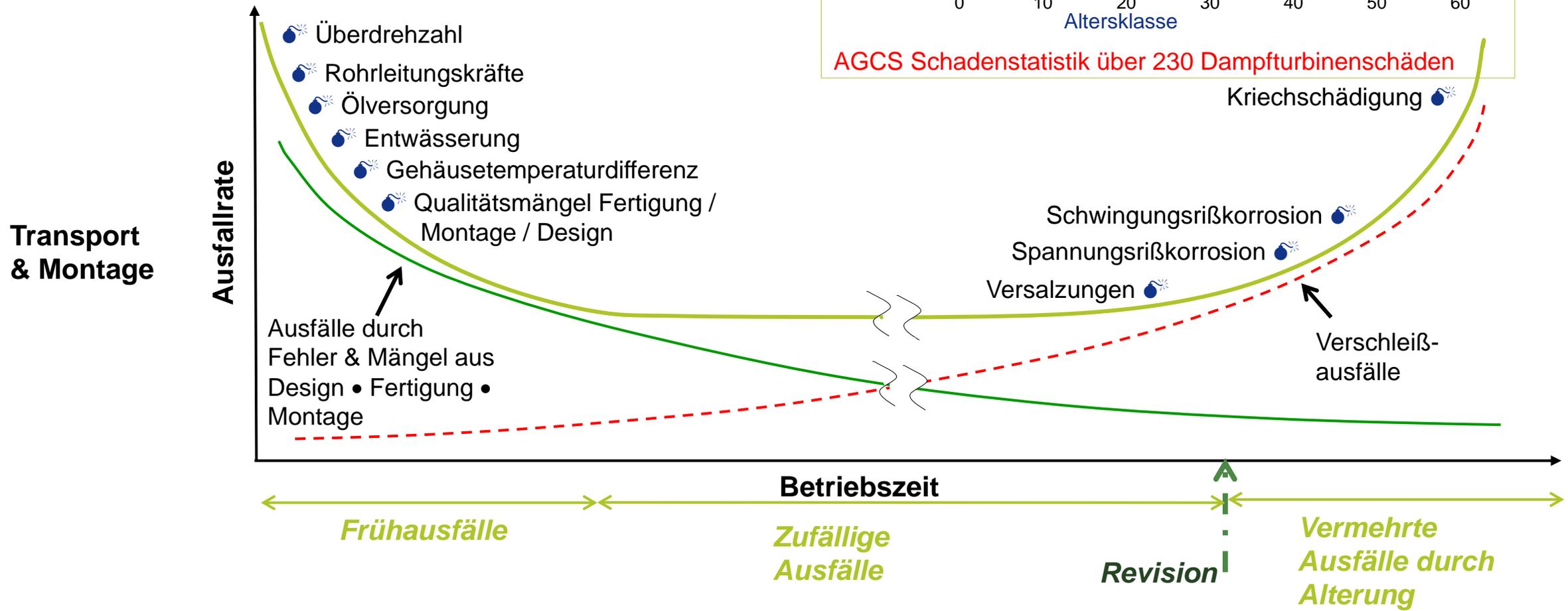
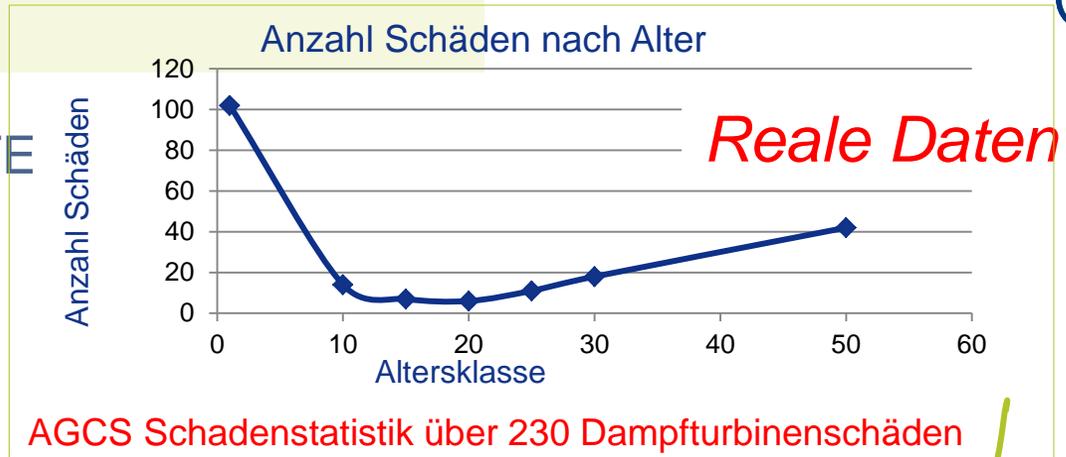
SCHADENSTATISTIKEN DAMPFTURBINEN





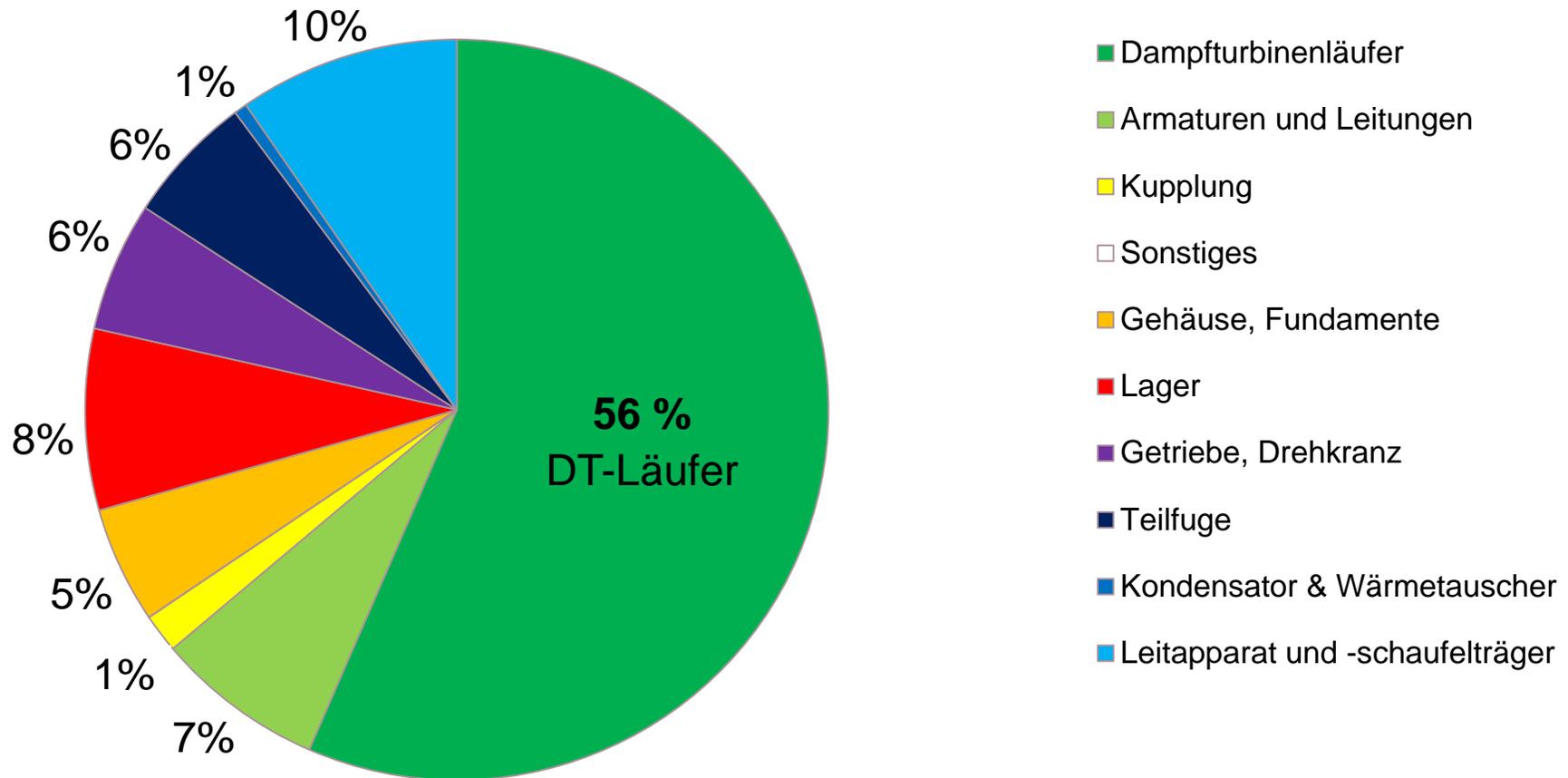
“BADEWANNENKURVE”

QUALITATIVE DARSTELLUNG DER AUSFALLRATE



AZT – SCHADENSTATISTIK DAMPFTURBINEN

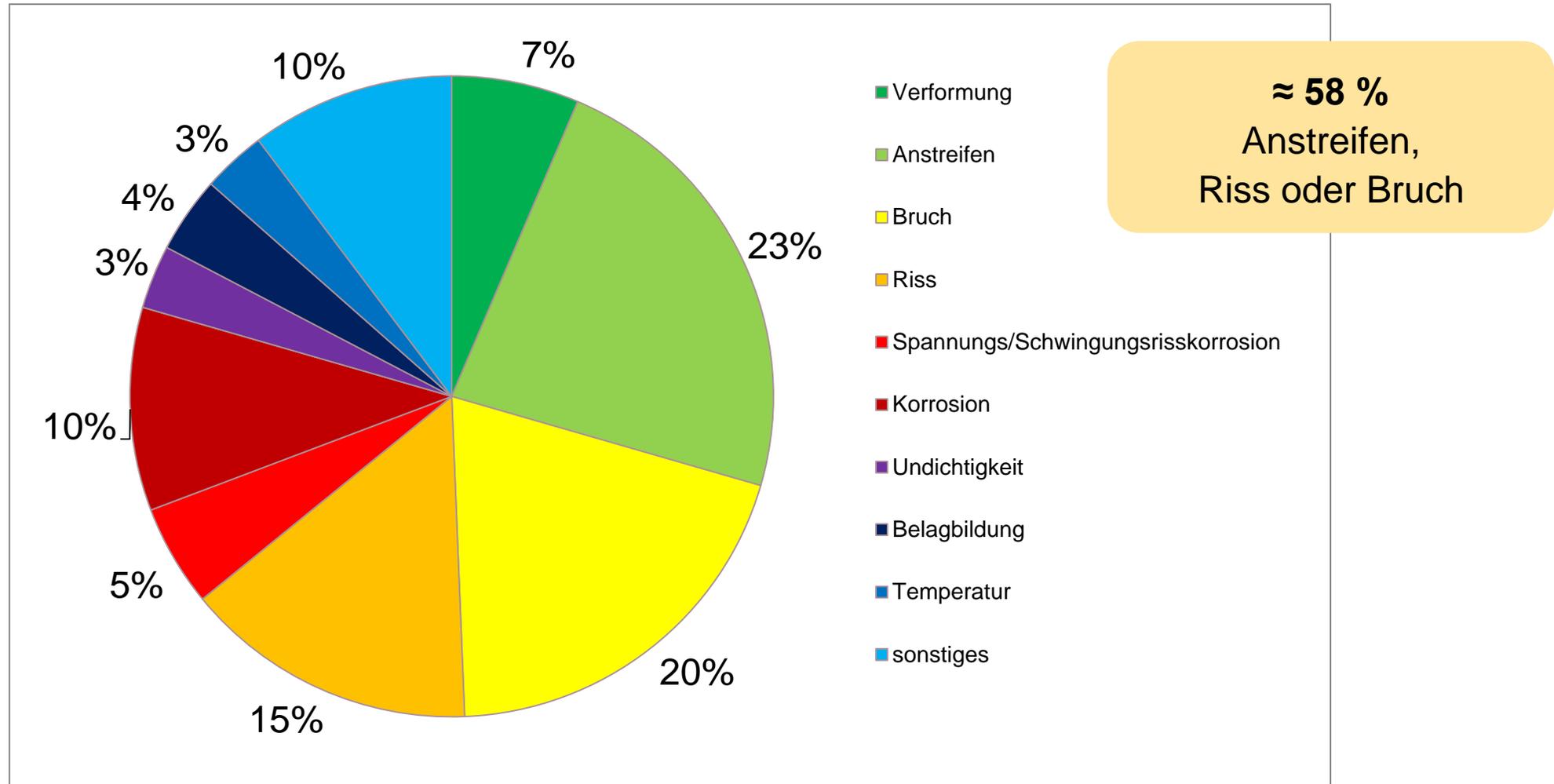
URSACHENANALYSE: KOMPONENTEN



AZT-Auswertung von 177 Schäden

AZT – SCHADENSTATISTIK DAMPFTURBINEN

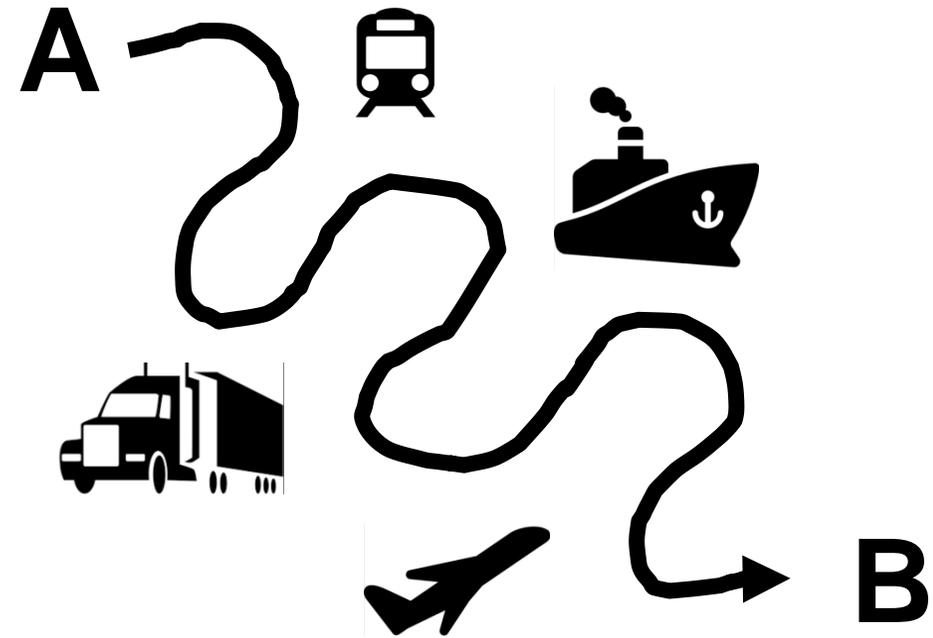
URSACHENANALYSE: SCHADENURSACHE



04

TRANSPORTSCHÄDEN

- Luftfracht
- Schwertransport
- Schiffspassagen



TRANSPORTSCHÄDEN

Schwerer Seegang („Xaver“) in Verbindung mit unzureichender Ladungssicherung



Glück im Unglück:

Turbine blieb unbeschädigt, Ausgleichsleitungen am Gehäuse mussten erneuert werden

➔ **Projektverzögerung: „nur“ 4 Wochen**

Tragisches Ende eines Straßentransportes aufgrund „menschlichen Versagens“



Unfall fordert ein Todesopfer und Sachschäden in Millionenhöhe

Getriebe - / Generatorpackage erleidet Totalschaden

➔ **Projektverzögerung: 6 Monate**

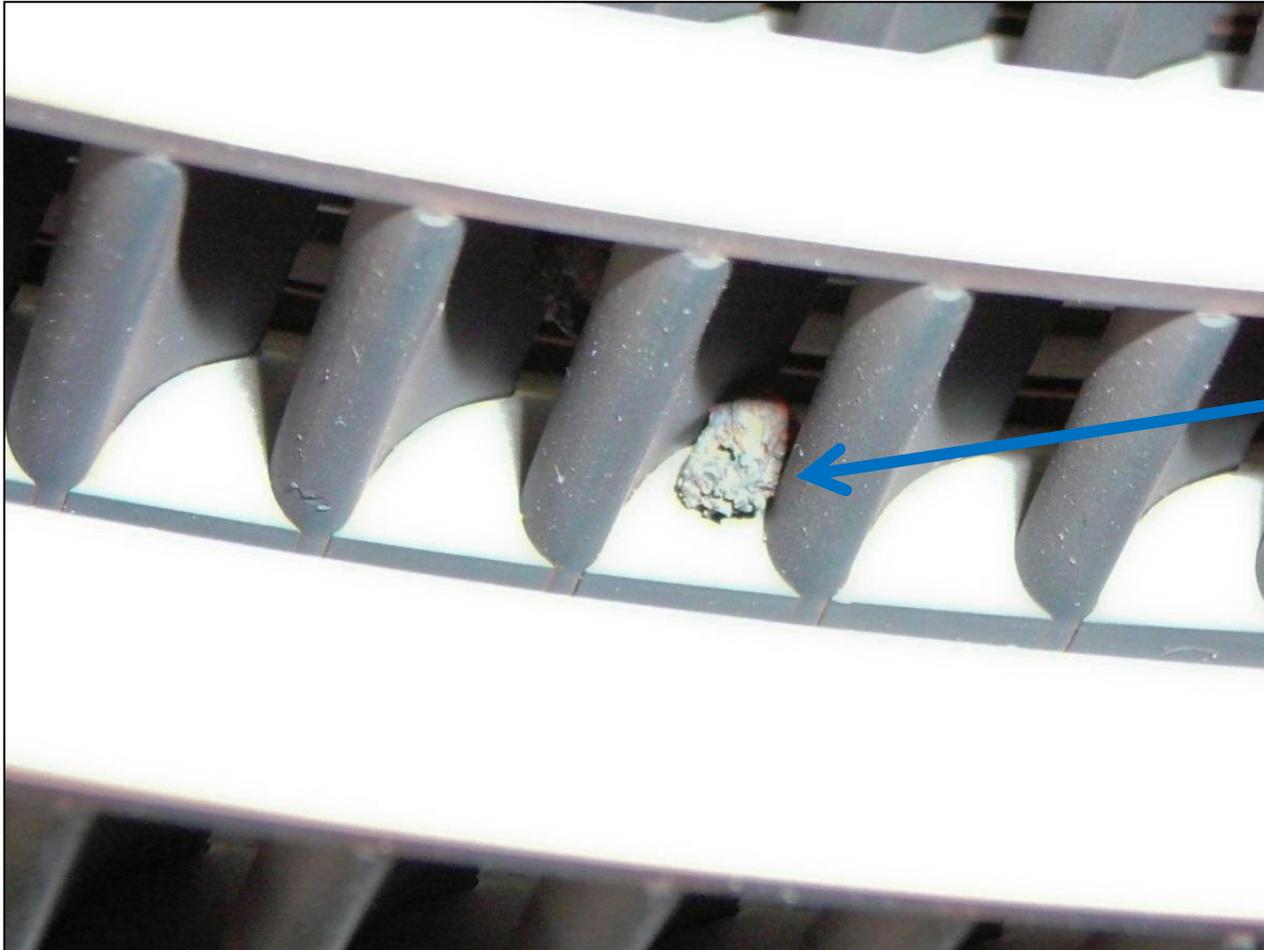
05

FERTIGUNG/ QUALITÄTSMÄNGEL

- Fremdkörper aus Gussprozess



FREMDKÖRPER IN DER BESCHAUFELUNG



Bei einer Routine-Endoskopie ca. 12 Monate nach IBN werden zahlreiche Fremdkörper lokalisiert

Befunde:

- Partikel sind deutlich größer als die Maschenweite des FD-Siebes
- Metallische und keramische Fremdkörper
- Einschlagspuren mit abnehmender Intensität bis zur Stufe 8 der Industrieturbine

URSACHE DER FREMDKÖRPER



Keramischer Ablagerungen im Düsenkanal



Keramischer Fremdkörper zwischen Leitschaufeln

- Umstellungen im Fertigungsprozess führten dazu, dass ein abschließender Reinigungsschritt der Düsenkanäle nicht ordnungsgemäß durchgeführt werden konnte (fehlende Zugänglichkeit).
- Qualitätskontrolle der Reinigungsgüte wurde bei der Prozessumstellung nicht berücksichtigt.



„Schülpfen“ (Gussrückstände) im Düsenkanal

06

SCHADEN WÄHREND IBN

- Turbinentrip wegen hoher Schwingungen



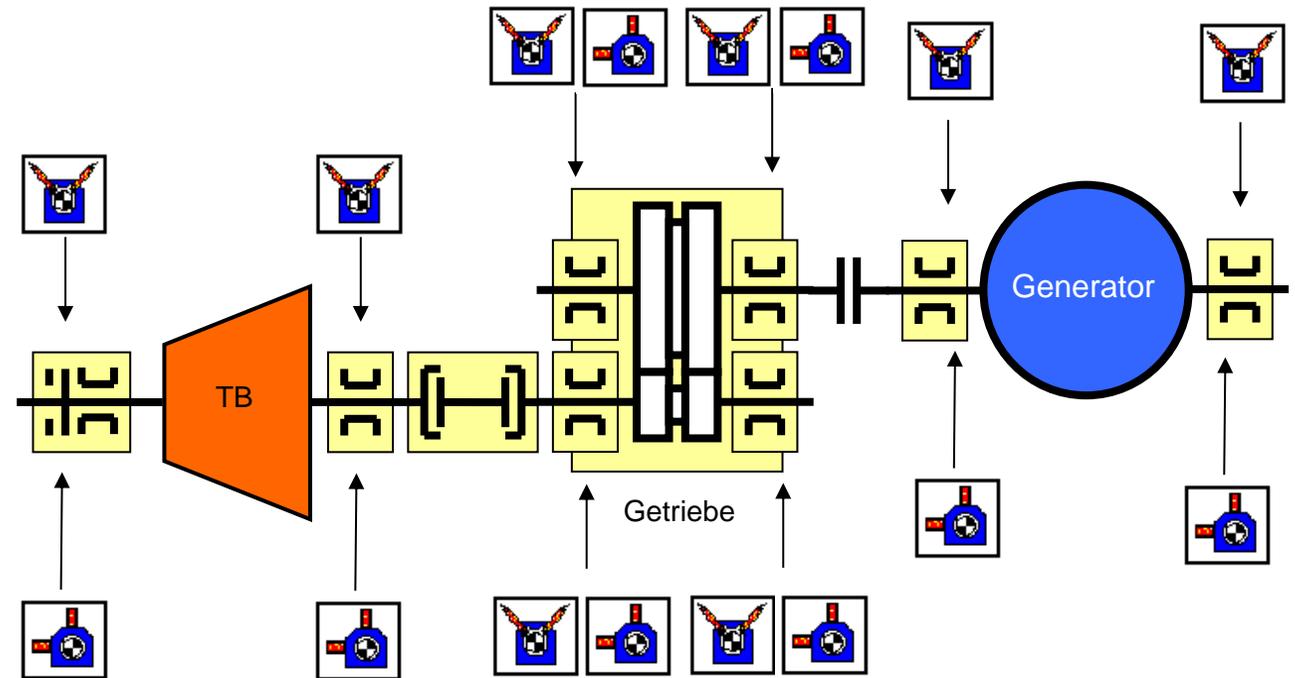
TRIP DURCH SCHWINGUNGEN WÄHREND IBN

Turbine fiel jedes Mal während der ersten Drehzahlhochfahrten über hohe Ritzelwellenschwingungen aus.

RCA mittels Einsatz der AZT-Schwingungsdiagnose



7MW Dampfturbine in BHKW



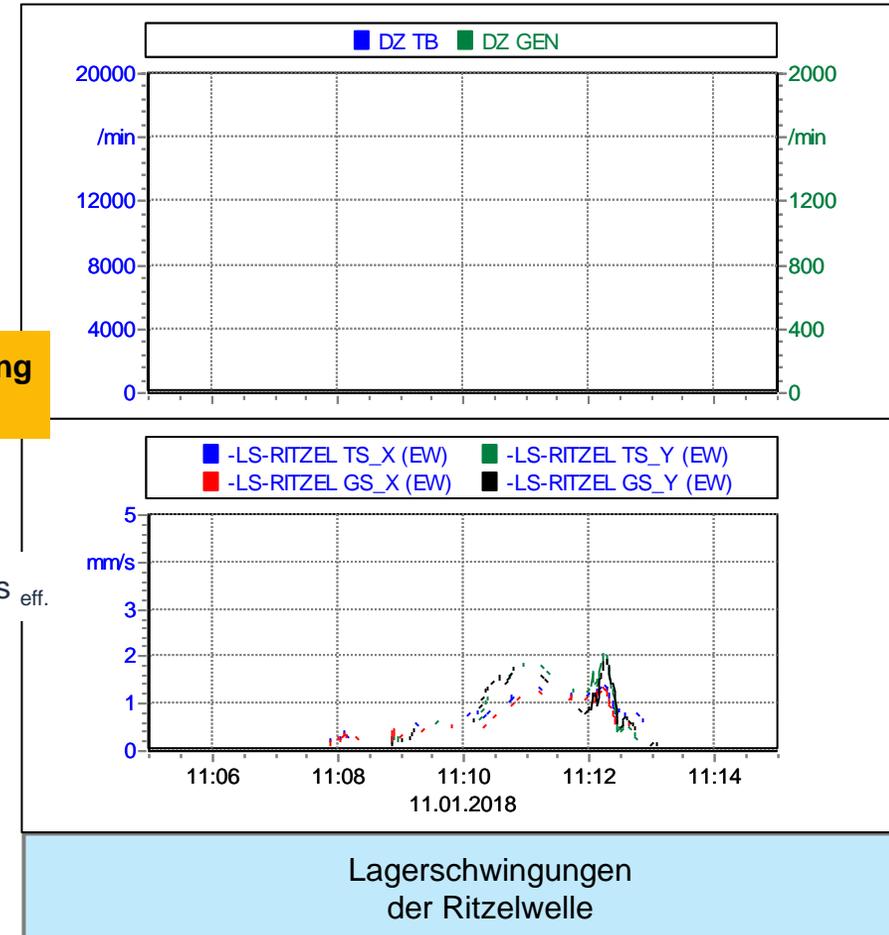
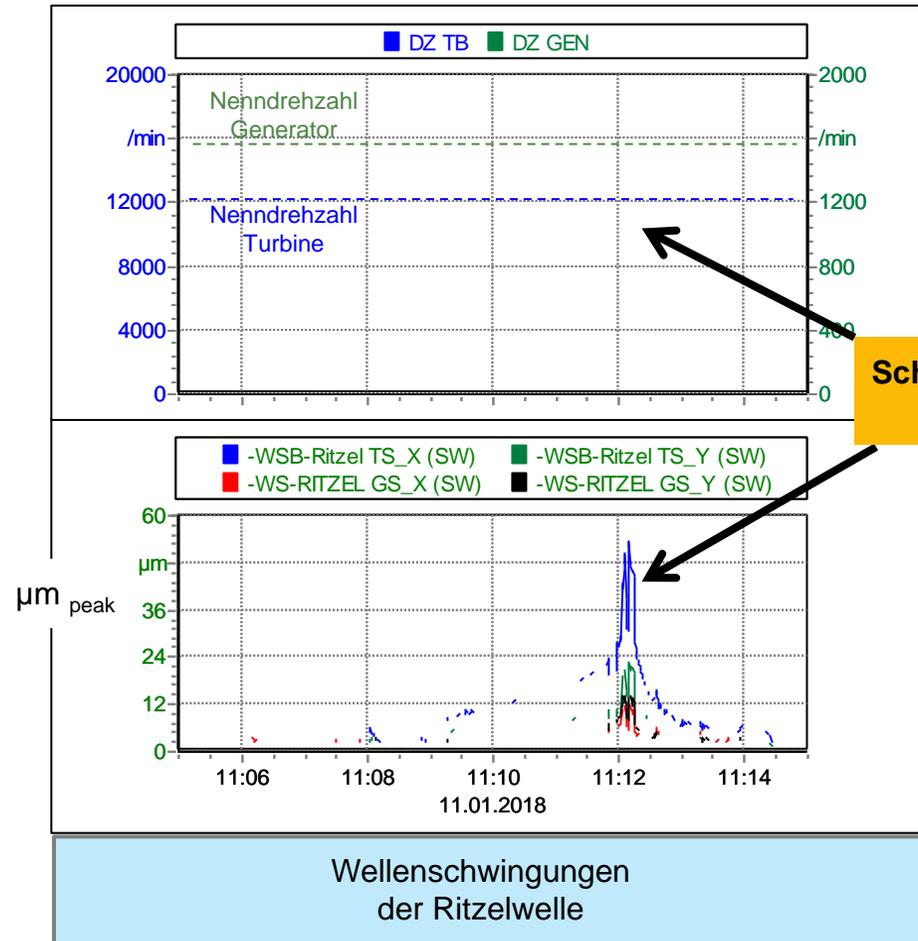
Betriebliche Wellenschwingungsmessstellen und AZT-Komplettierung



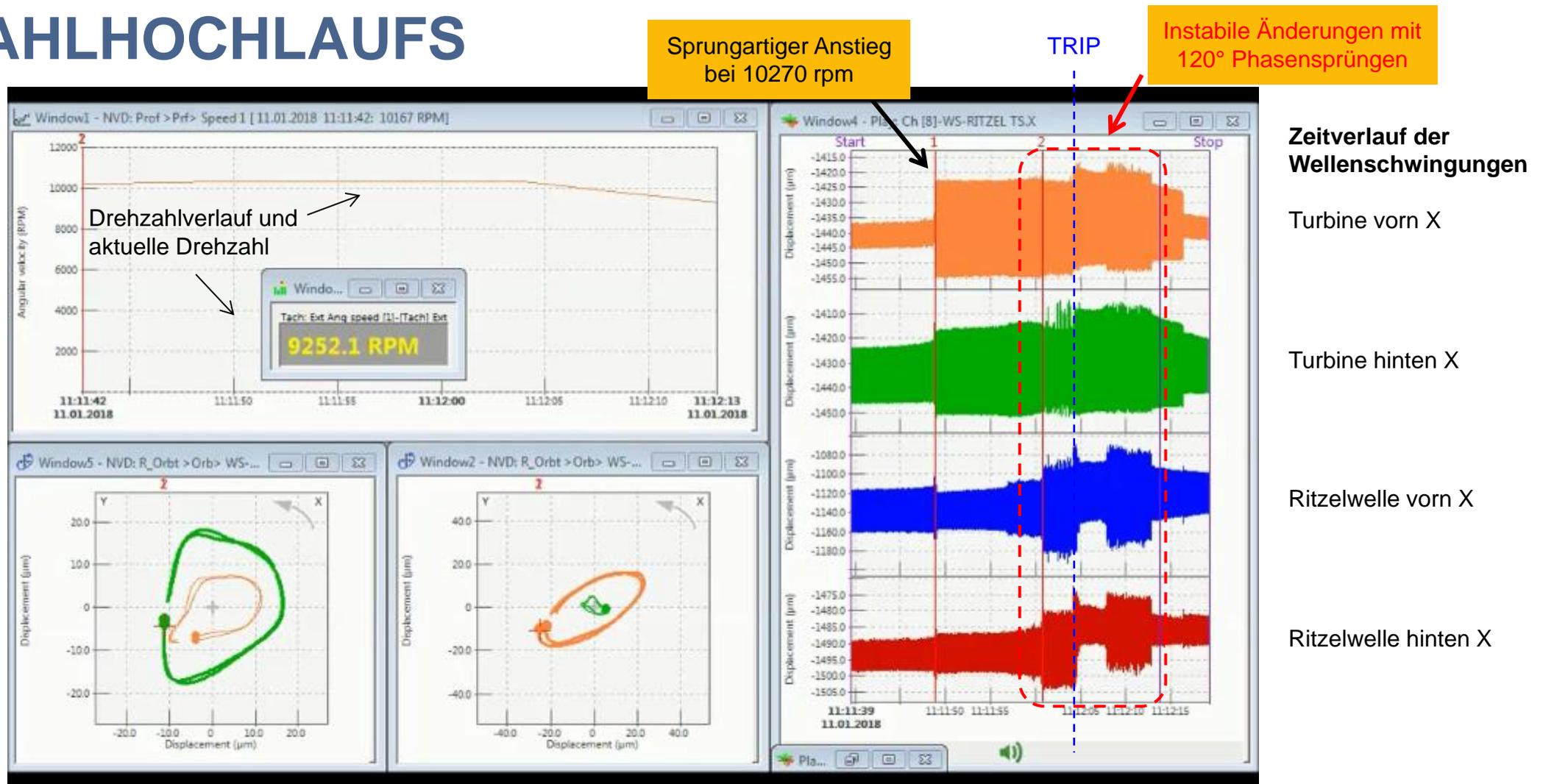
Lagerschwingungsmessstellen (kalibrierte AZT-Aufnehmer)



ANALYSE: SCHWINGUNGEN DER RITZELWELLE WÄHREND DREHZAHLHOCHLAUF



ANALYSE: WELLENSCHWINGUNGEN WÄHREND DES DREHZAHLHOCHLAUFS



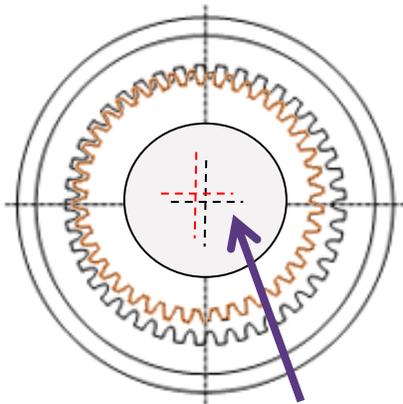
Orbit Turbinenwelle vorn und hinten

Orbit Ritzelwelle vorn und hinten

URSACHENANALYSE - ERLÄUTERUNG

Schwingungsdiagnostische Analyse:

- instabile Schwingungsanregung mit 1. Drehzahlordnung am Ritzel (veränderliche Unwuchtlage und Intensität)
- beide Zahnkränze der Bogenzahnkupplung zwischen Turbinen- und Ritzelwelle wechseln spontan ihre radiale Position



Exzentrizität zwischen Kupplungsverzahnung und Kupplungsadapter, dadurch unzureichende Auswuchtqualität

(Während instabilem Schwingungsverhalten bewegt sich der Kupplungsstern radial in der Innenverzahnung)

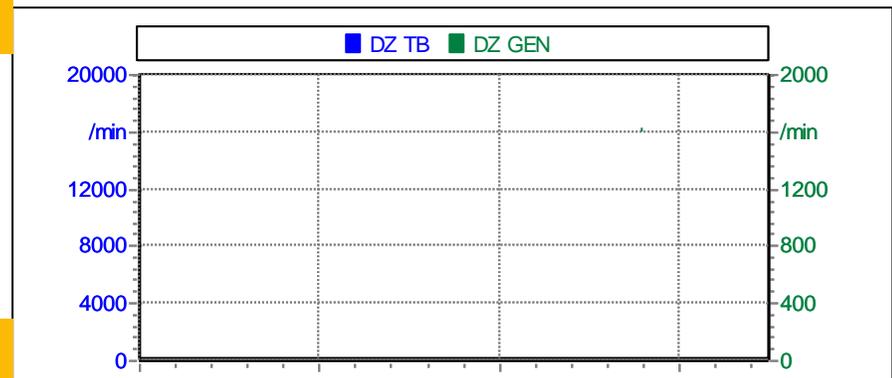
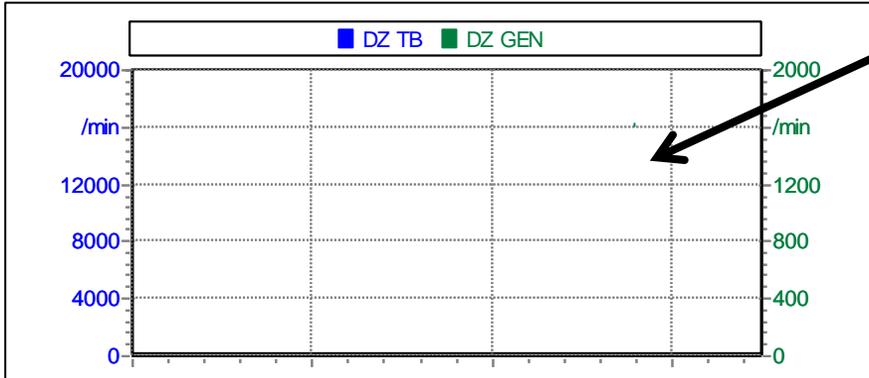
Visuelle Befundung des Ritzels bestätigt:
ungleichmäßiges Tragbild am Umfang mit ausgeprägten Reibkontaktstellen an den Zähnen



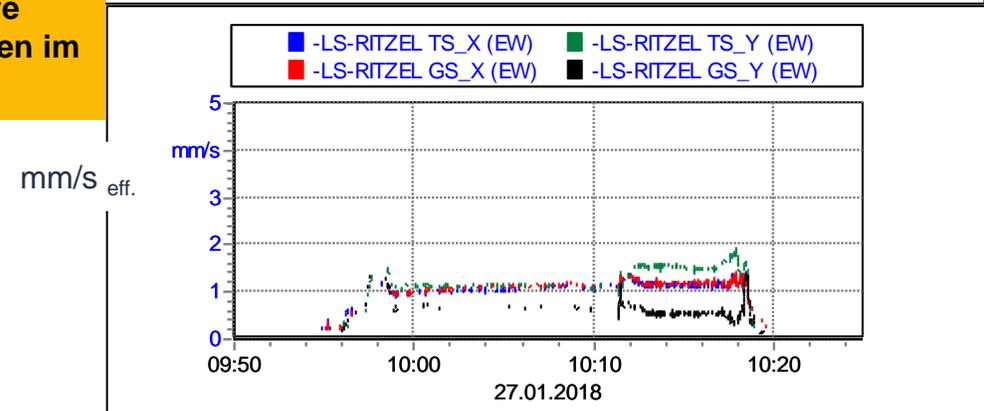
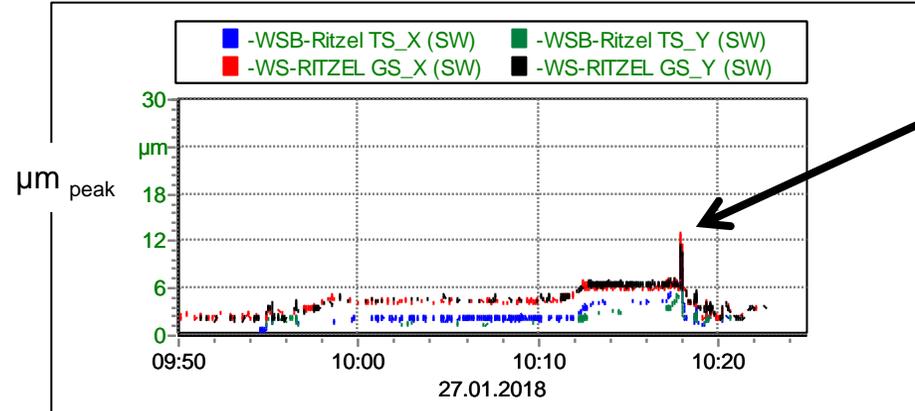
Ursache: Die Kupplung wies eine sehr große Unwucht auf, weil die Verzahnung exzentrisch zum Kupplungsadapter ausgeführt war.

TESTLAUF NACH DER KUPPLUNGSREPARATUR

**Erfolgreicher
Überdrehzahltest**



**Niedrige,
stationäre
Schwingungen im
Betrieb**



Wellenschwingungen
der Ritzelwelle

Lagerschwingungen
der Ritzelwelle

07

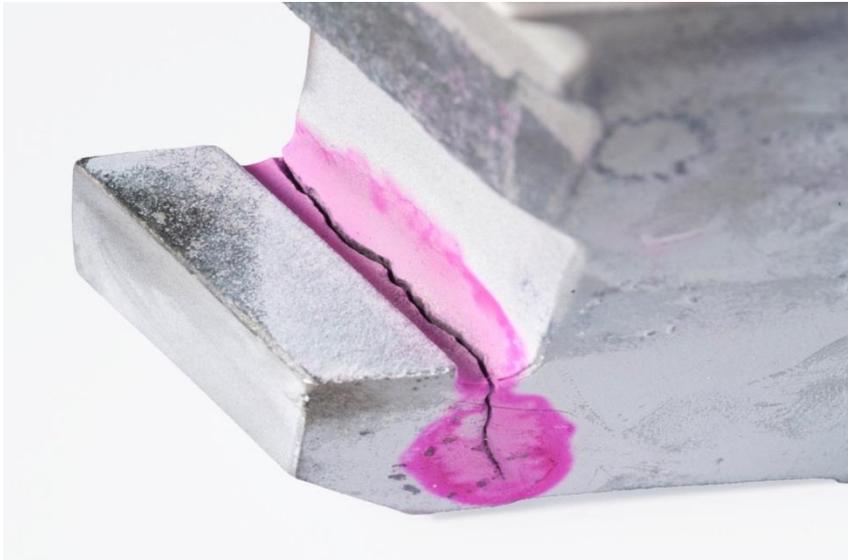
SCHÄDEN IM BETRIEB

- Schaufelbruch nach etwa 5-jähriger Betriebszeit



SCHADEN NACH ETWA 5 JÄHRIGER BETRIEBSZEIT

Dampfturbosatz	> 800 MW
Dampfparameter	MD Teil-Turbine ZÜ Temperatur > 600 °C
Schaufelwerkstoff	Hochwarmfester austenitischer Cr-Ni-Stahl



- Mehrere Schaufelfüße zeigten einen Riss bzw. Bruch im Übergangsradius zum Tragzacken

DURCHGEFÜHRTE RCA

ÜBERSICHT DER WESENTLICHEN UNTERSUCHUNGEN

Untersuchungen

- Chemische Zusammensetzung
- Fraktographie
- Mechanische Eigenschaften
- Metallographie
- Computertomographie
- Spannungsberechnung durch Hersteller

Ergebnis / Ziel

i.O. ✓

→ *Bruchflächenuntersuchung*

→ *Vergleichende Analyse (Alt ↔ Neu)*

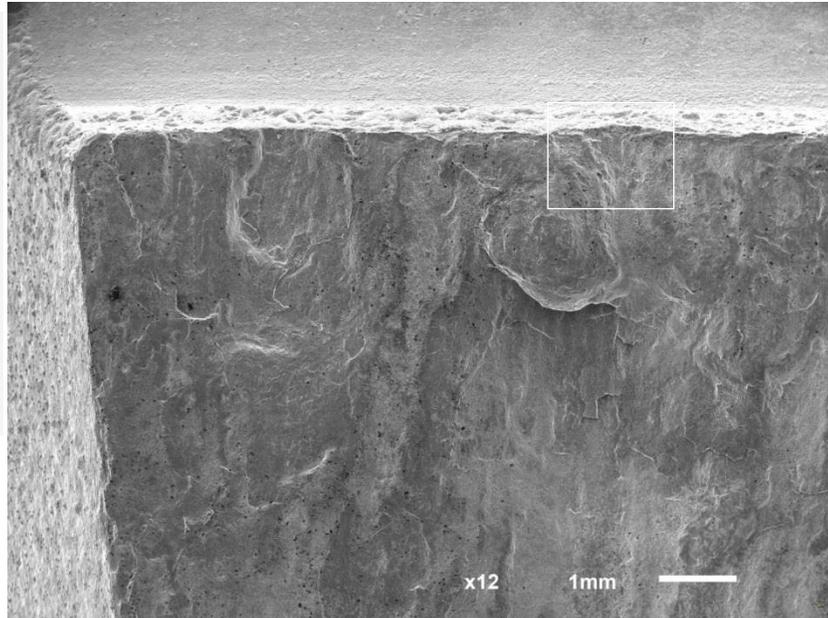
→ *Vergleichende Analyse (Alt ↔ Neu)*

→ *Rissverästelung*

(Festigkeitsnachweis)



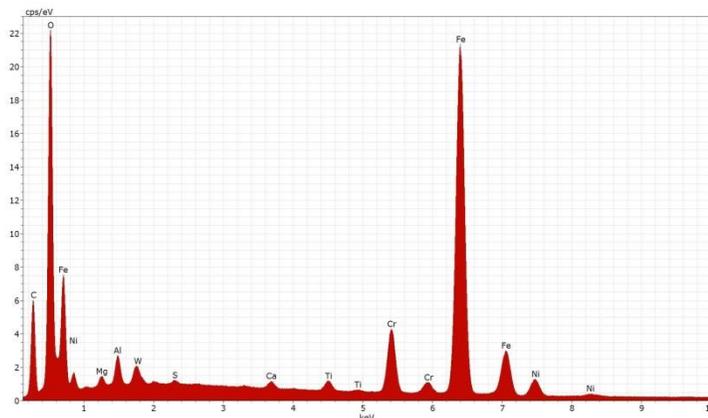
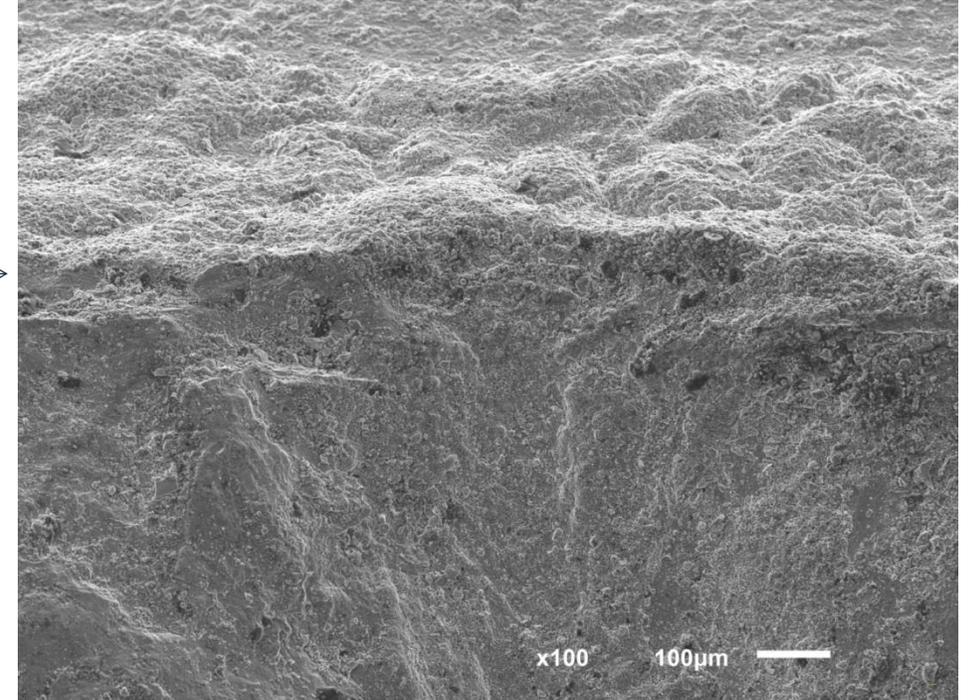
FRAKTOGRAPHIE – REM (UNGEREINIGTE BRUCHFLÄCHE)



Radius mit wulstigem Belag

Bruchkante →

Bruchfläche stark verzundert

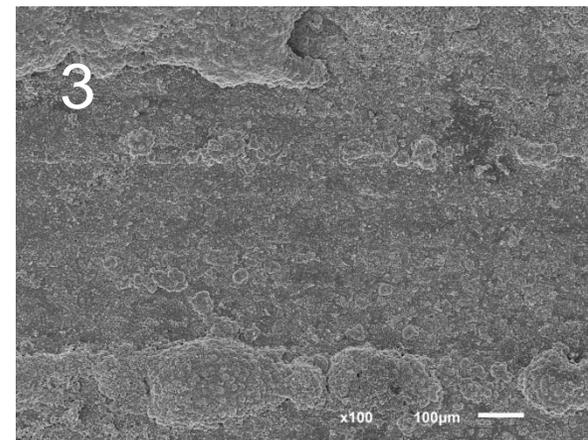
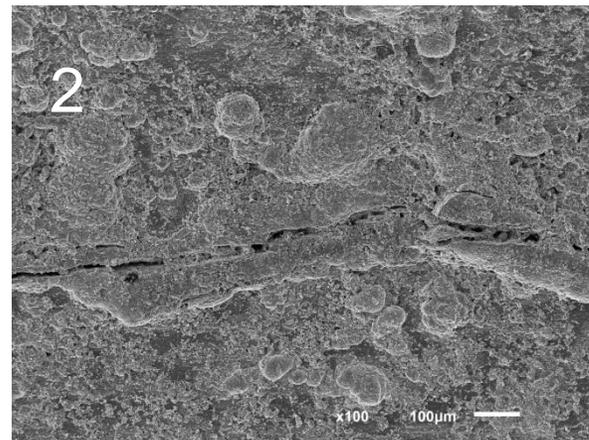
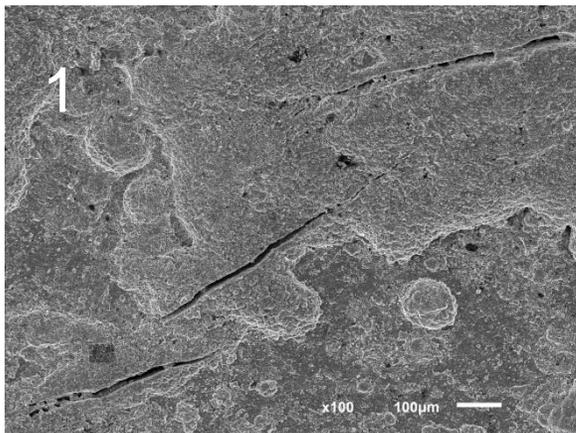
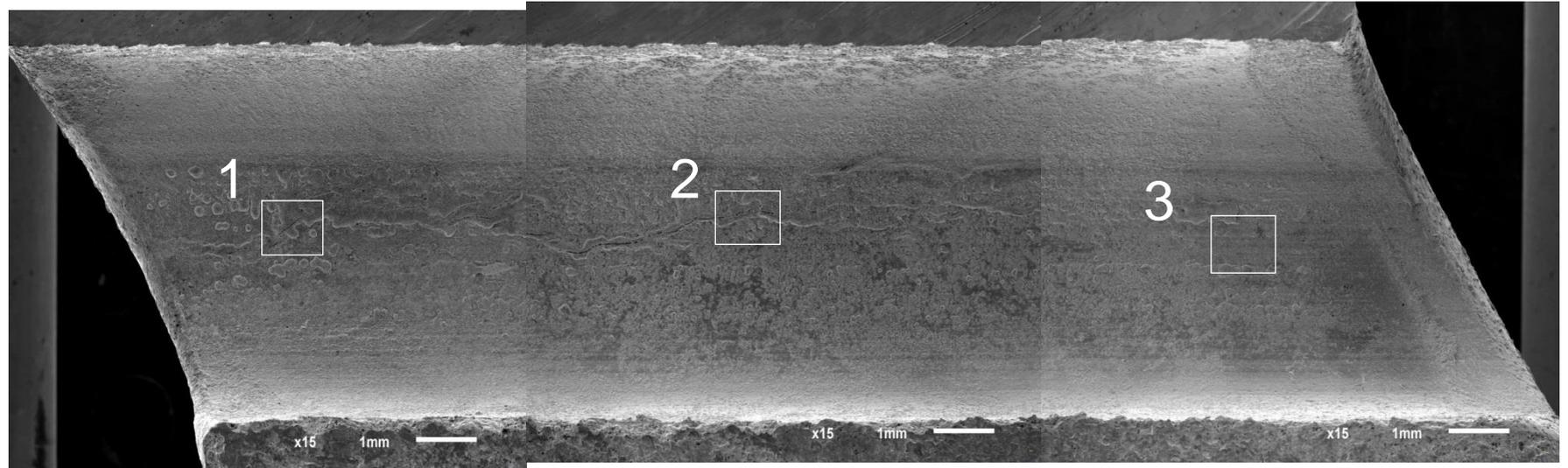


➤ Die EDX Elementspektren zeigten keinen Hinweis auf die Anwesenheit korrosionsauslösender Verbindungen

FRAKTOGRAPHIE – RISS IM FUßRADIUS

MAKROSKOPIE

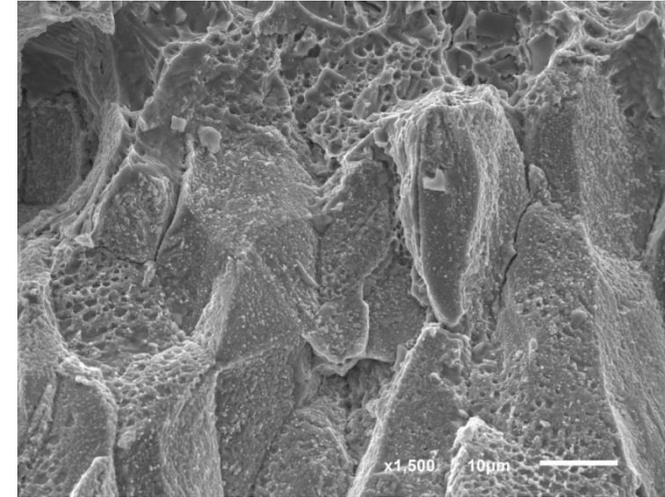
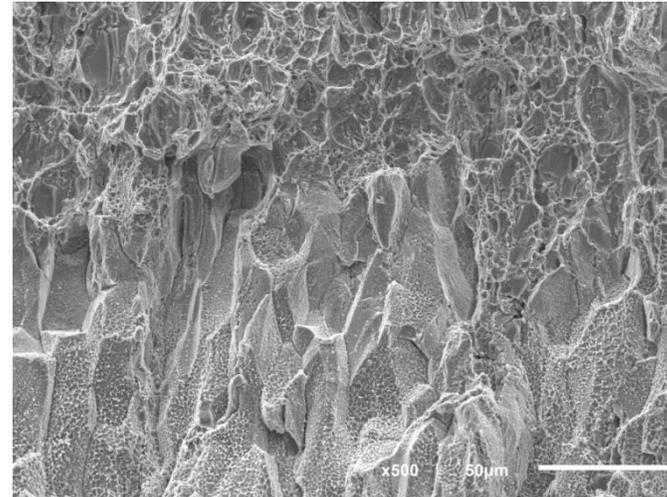
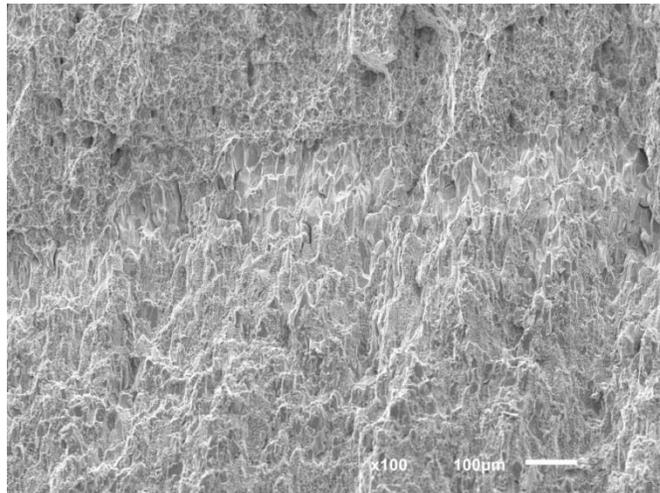
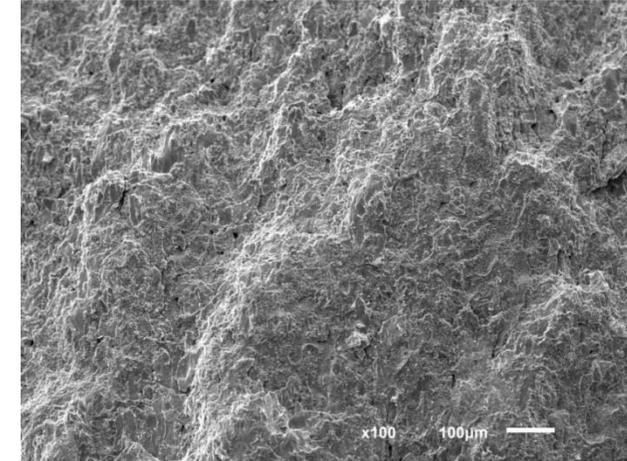
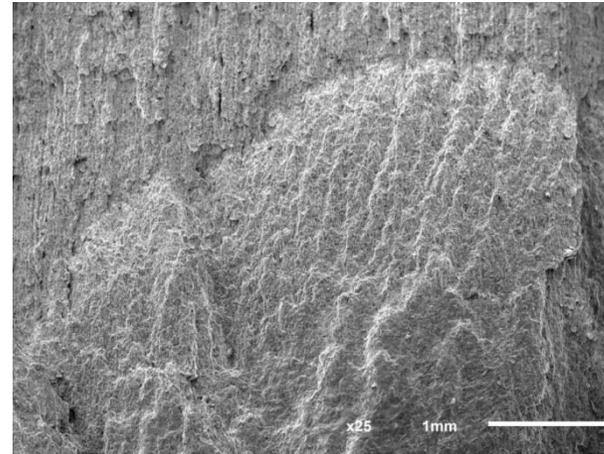
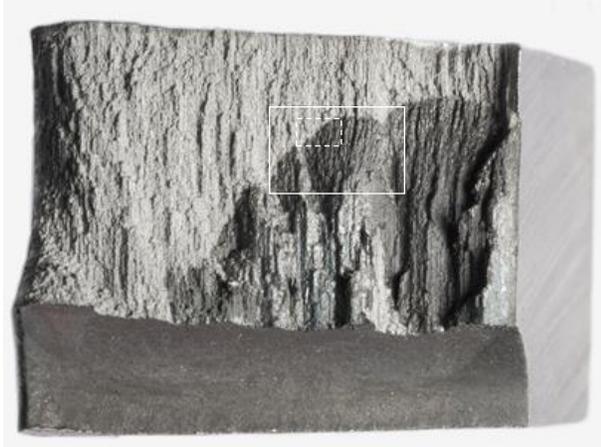
Versetzter
Oberflächenrissverlauf



- Versetzte Rissabschnitte mit wulstigem Belag
- Offene Rissflanken sind stark verzundert

FRAKTOGRAPHIE – AUFGEBROCHENER RISS

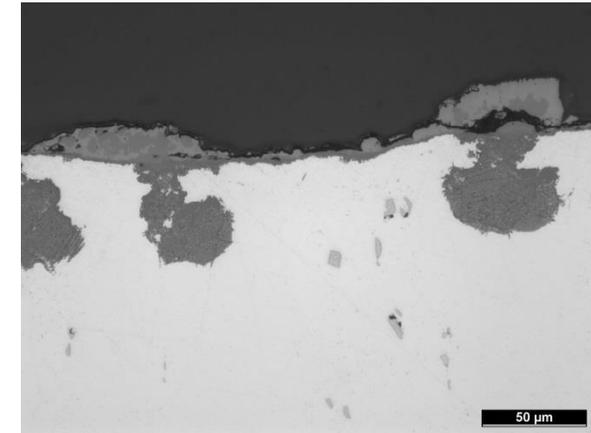
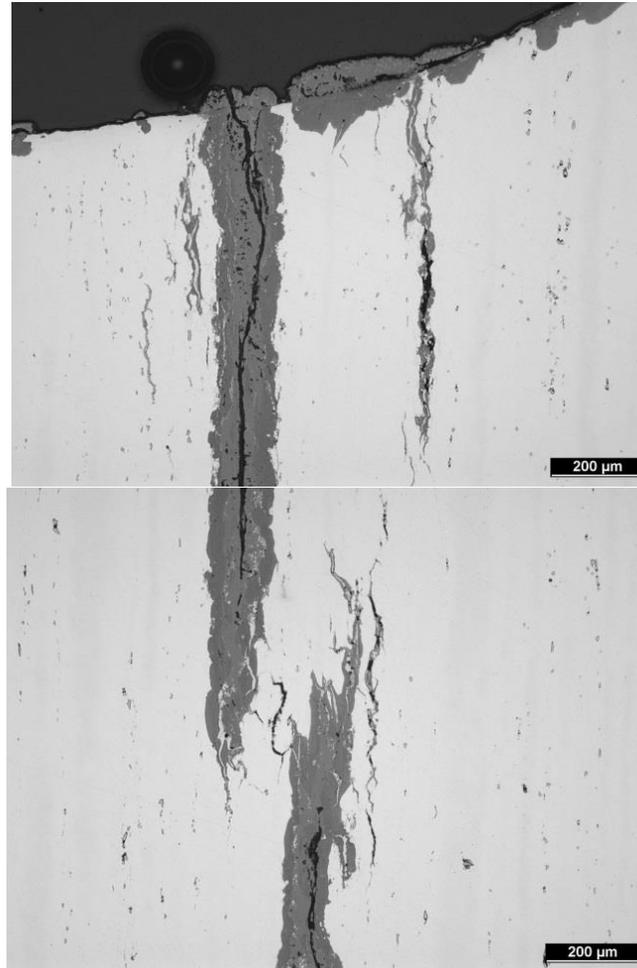
MAKRO - RISSENDE IM ÜBERGANG ZUM RESTGEWALTBRUCH



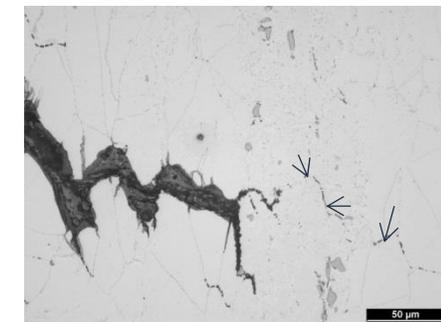
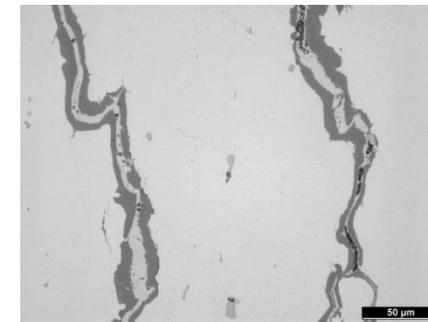
➤ Interkristalliner Bruch mit starker Karbidbelegung der Korngrenzen

METALLOGRAPHIE – QUERSCHLIFF

RISSVERLAUF IM ÜBERGANGSRADIUS

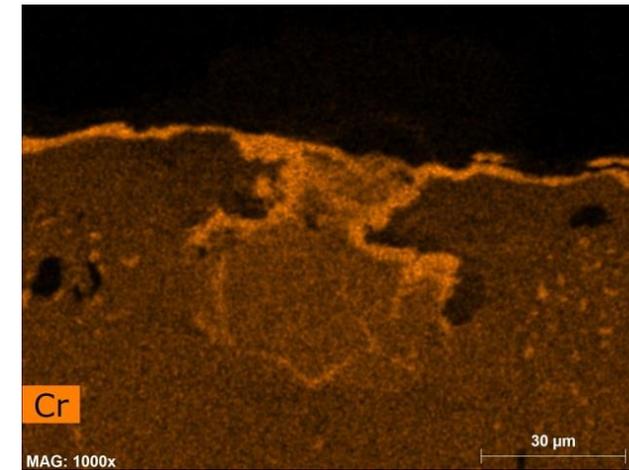
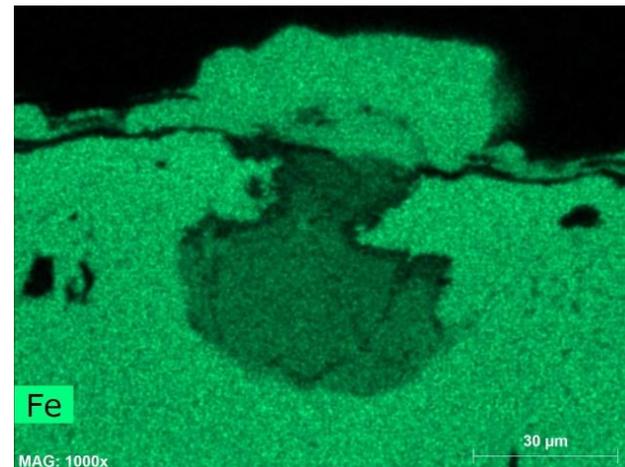
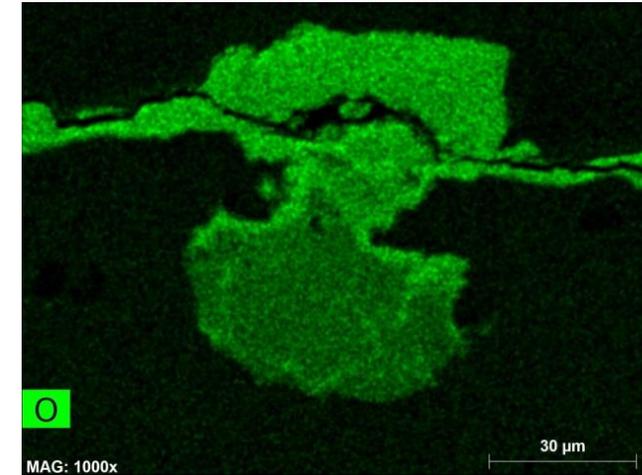
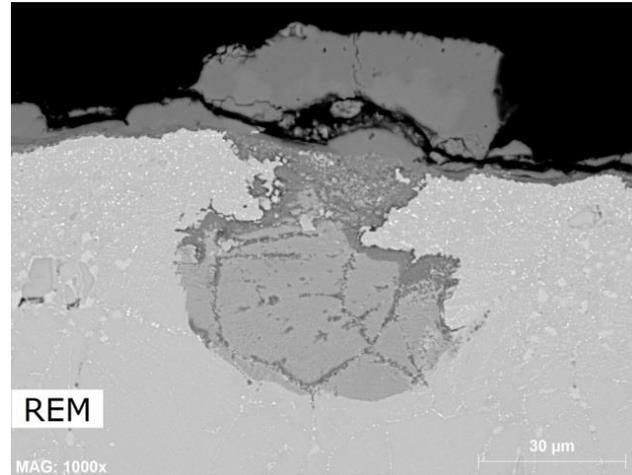
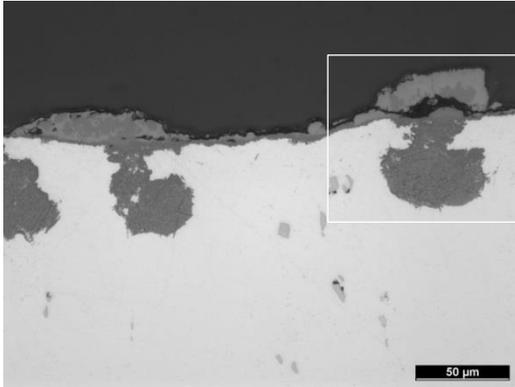


- Oxidation und Rissverläufe vom Radius ausgehend
- Lokaler, isolierter Oxidationsangriff im Radius



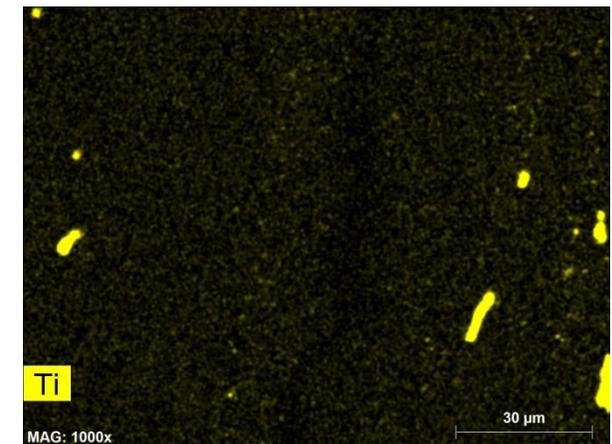
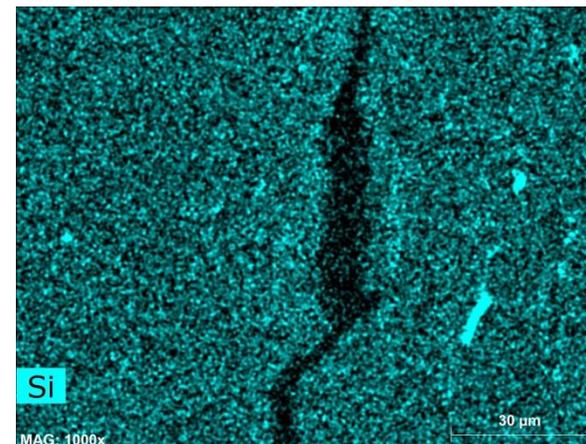
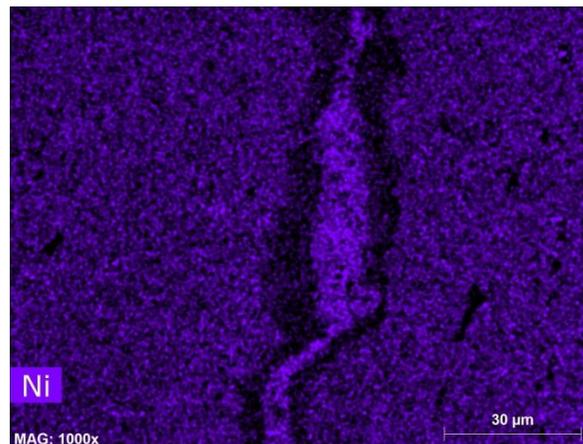
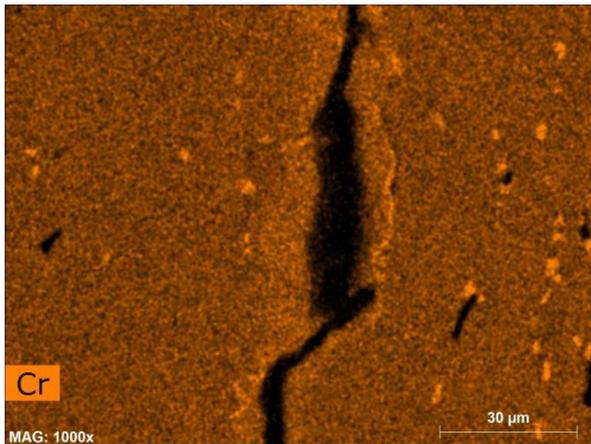
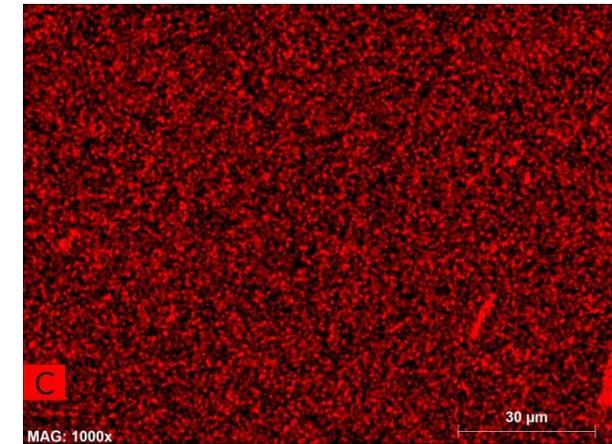
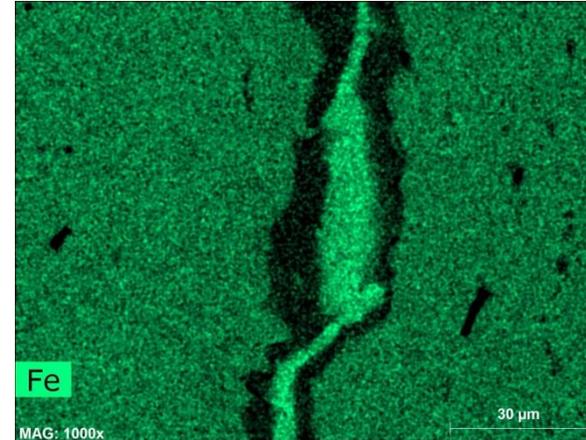
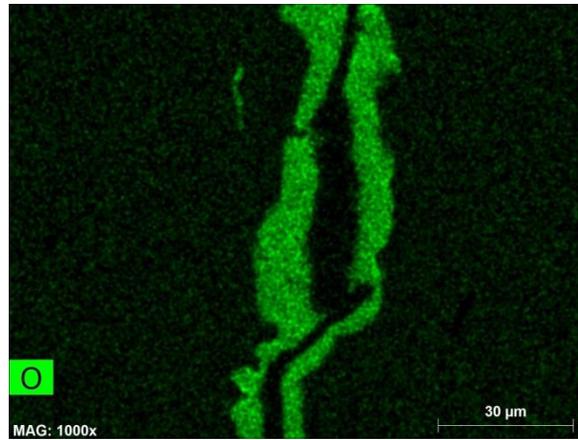
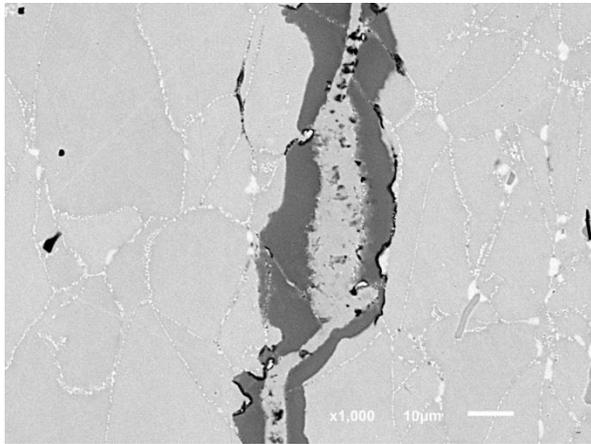
- Interkristalliner Rissverlauf mit Korngrenzenporen

METALLOGRAPHIE – EDX OBERFLÄCHLICHE OXIDATION ELEMENTVERTEILUNG



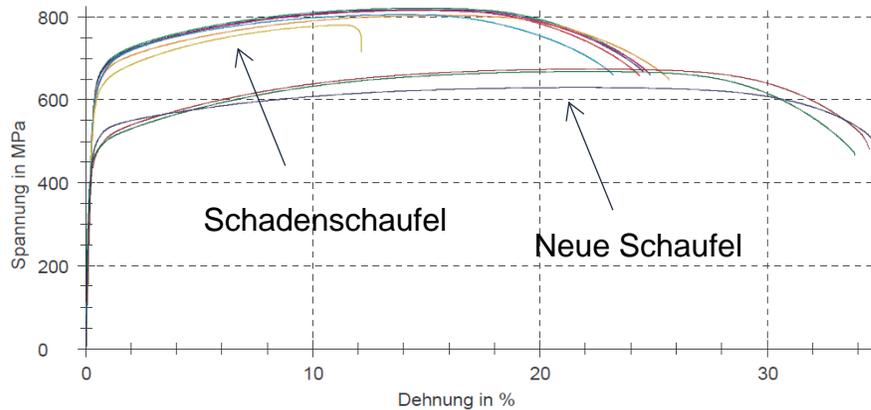
METALLOGRAPHIE – EDX OFFENER RISS

ELEMENTVERTEILUNG



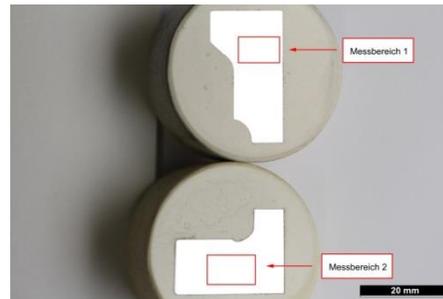
MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN

ZUGVERSUCH

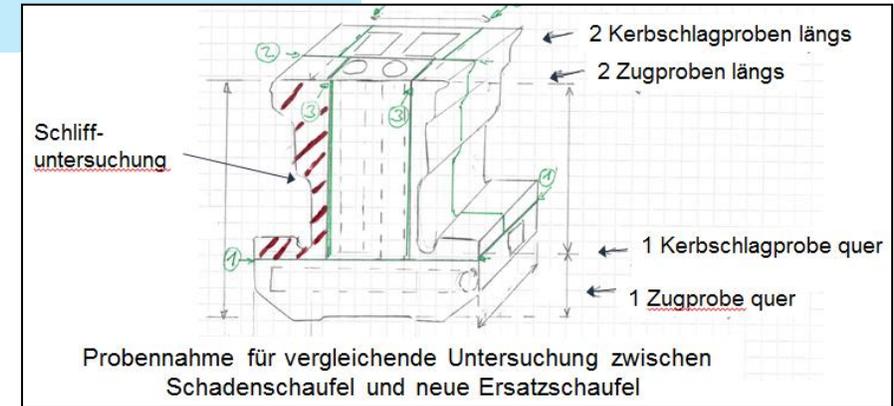


- Proben aus Schadenschaufeln zeigten eine erhöhte 0,2 % Dehngrenze und Zugfestigkeit sowie geringere Bruchdehnung A5
- Bei der Querprobe war die Bruchdehnung A5 und insbesondere die Brucheinschnürung Z sehr klein

HÄRTEMESSUNG IM SCHLIFF



- Schadenschaufel wies mit 268 HV1 eine um etwa 50 HV1 höhere Härte als die neue Schaufel auf



KERBSCHLAGBIEGEVERSUCH

	Proben-Nr.	KV in Joule
Schadenschaufel KA	KA1 Quer	17
	KA1 Längs	65
	KA2 Längs	48
Neue Schaufel KN	KN1 Quer	45
	KN1 Längs	131,5
	KN2 Längs	139

- Schadenschaufel zeigte signifikant niedrigere Kerbschlagarbeit
- In Querrichtung war der Wert besonders klein

- Insgesamt zeigten die Kennwerte der Schadenschaufeln ein auffälliges Verhalten (erhöhte Zugfestigkeit, geringe Bruchdehnung und Kerbschlagzähigkeit).
- Die Kennwerte der neuen Schaufel lagen innerhalb der Spezifikation.

METALLOGRAPHIE – VERGL. NEUE + SCHADENSCHAUFEL

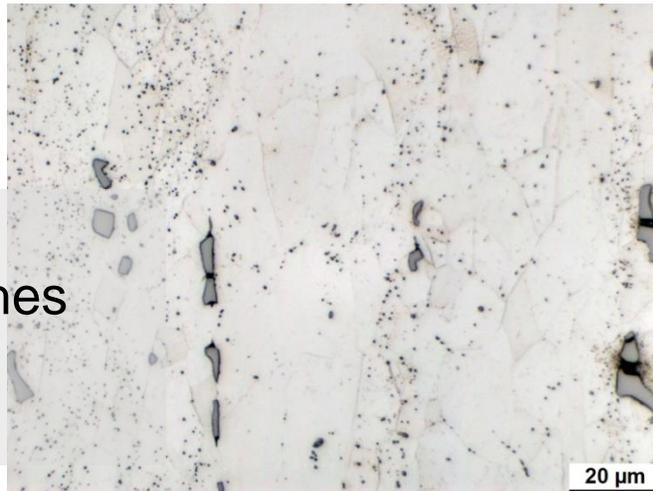
GEÄTZT MIT V2A BEIZE

Neue Schaufel

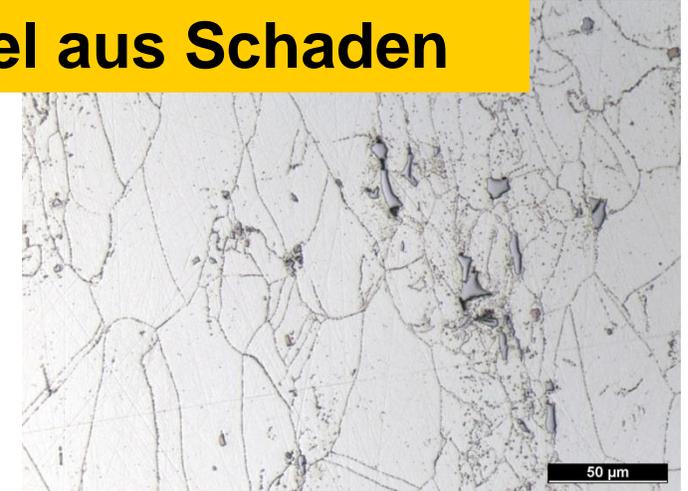
Bereich von schmalen Texturzeilen im Wechsel mit und ohne punktförmige Karbidausscheidungen



Gleichmäßiges und feinkörniges austenitisches Zeilengefüge mit Karbidausscheidungen



Schaufel aus Schaden



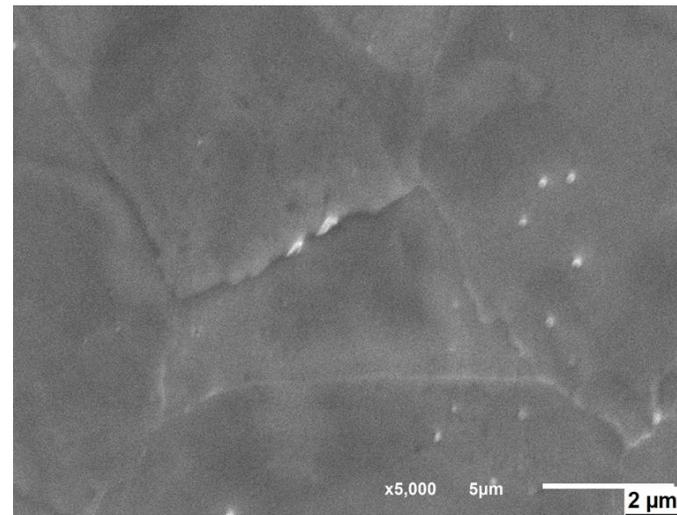
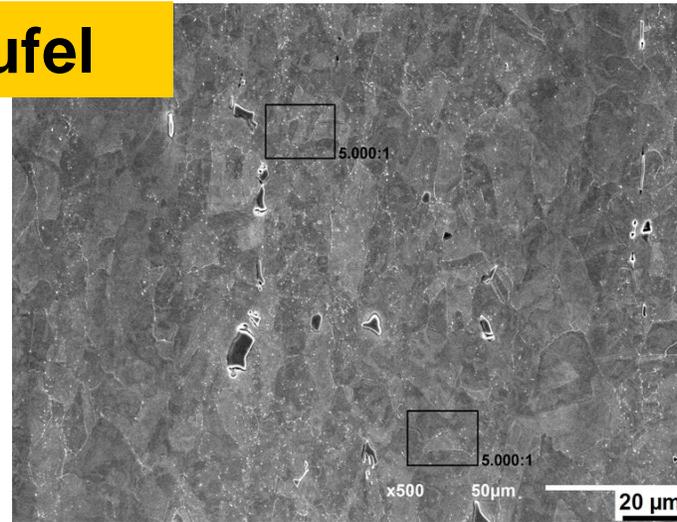
Korngrenzen sind stark mit Karbidausscheidungen belegt



METALLOGRAPHIE – REM

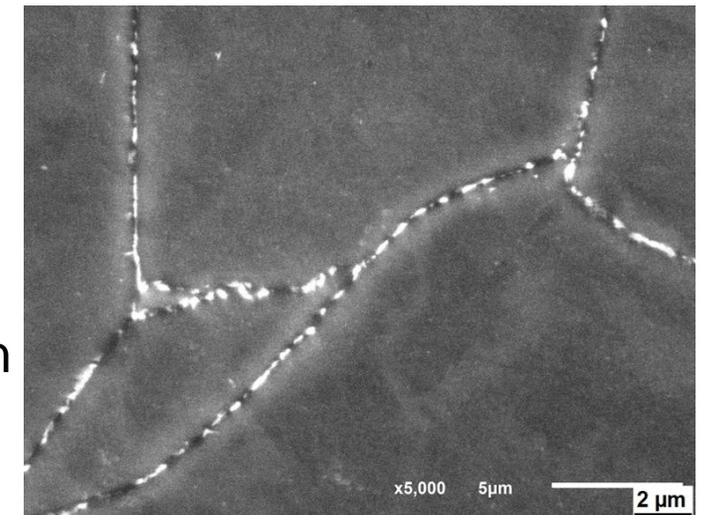
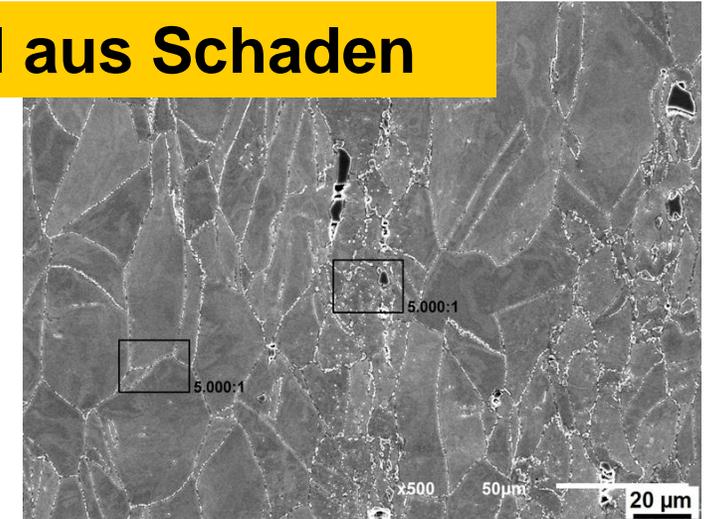
GEÄTZT MIT V2A BEIZE

Neue Schaufel



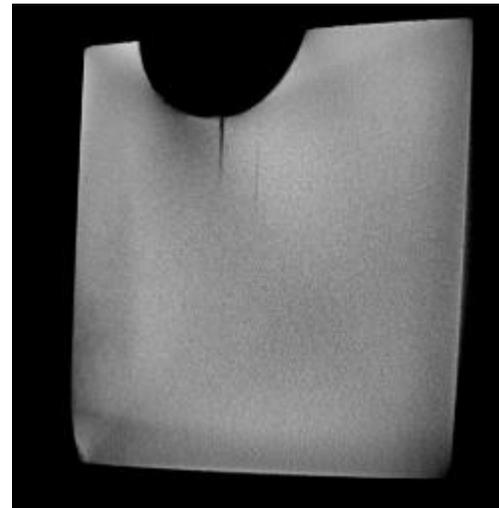
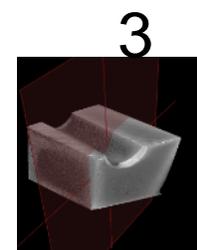
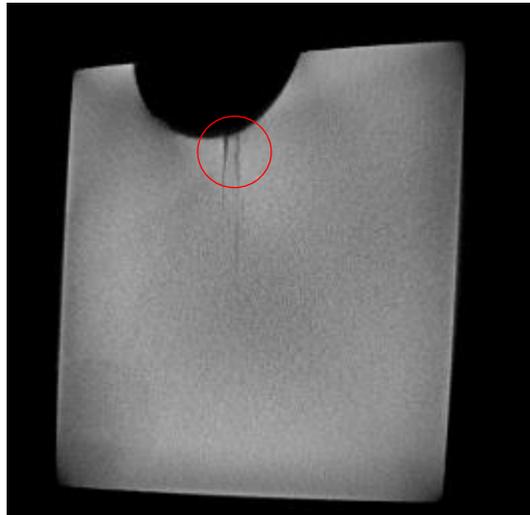
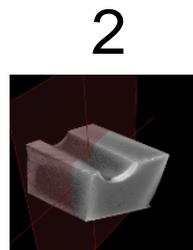
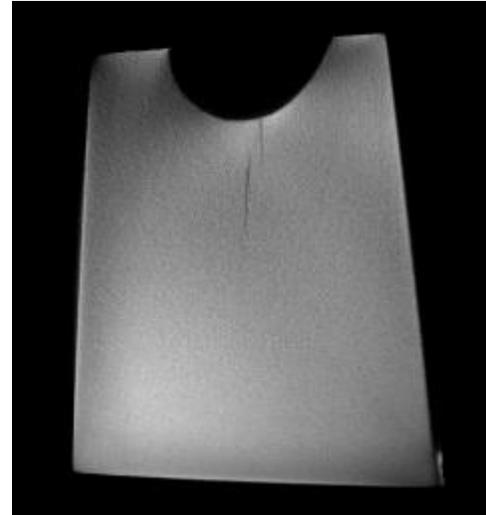
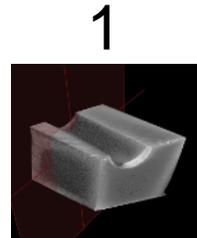
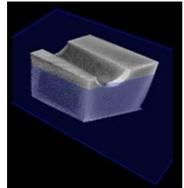
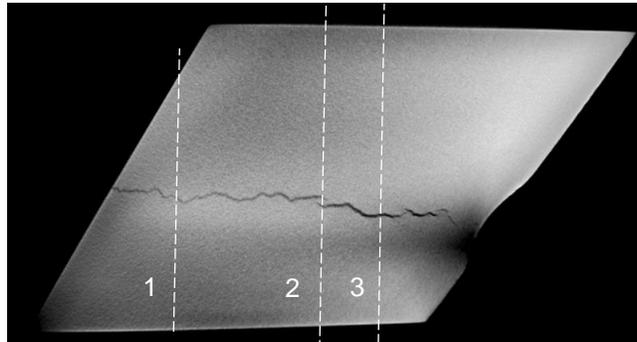
Sehr wenig weiße punktförmige Karbide im Korn und nur sehr vereinzelt auf den Korngrenzen

Schaufel aus Schaden



Weiße punktförmige Karbide nur auf den Korngrenzen (Perlschnurartig)

COMPUTERTOMOGRAPHIE – RISS SEITENANSICHT

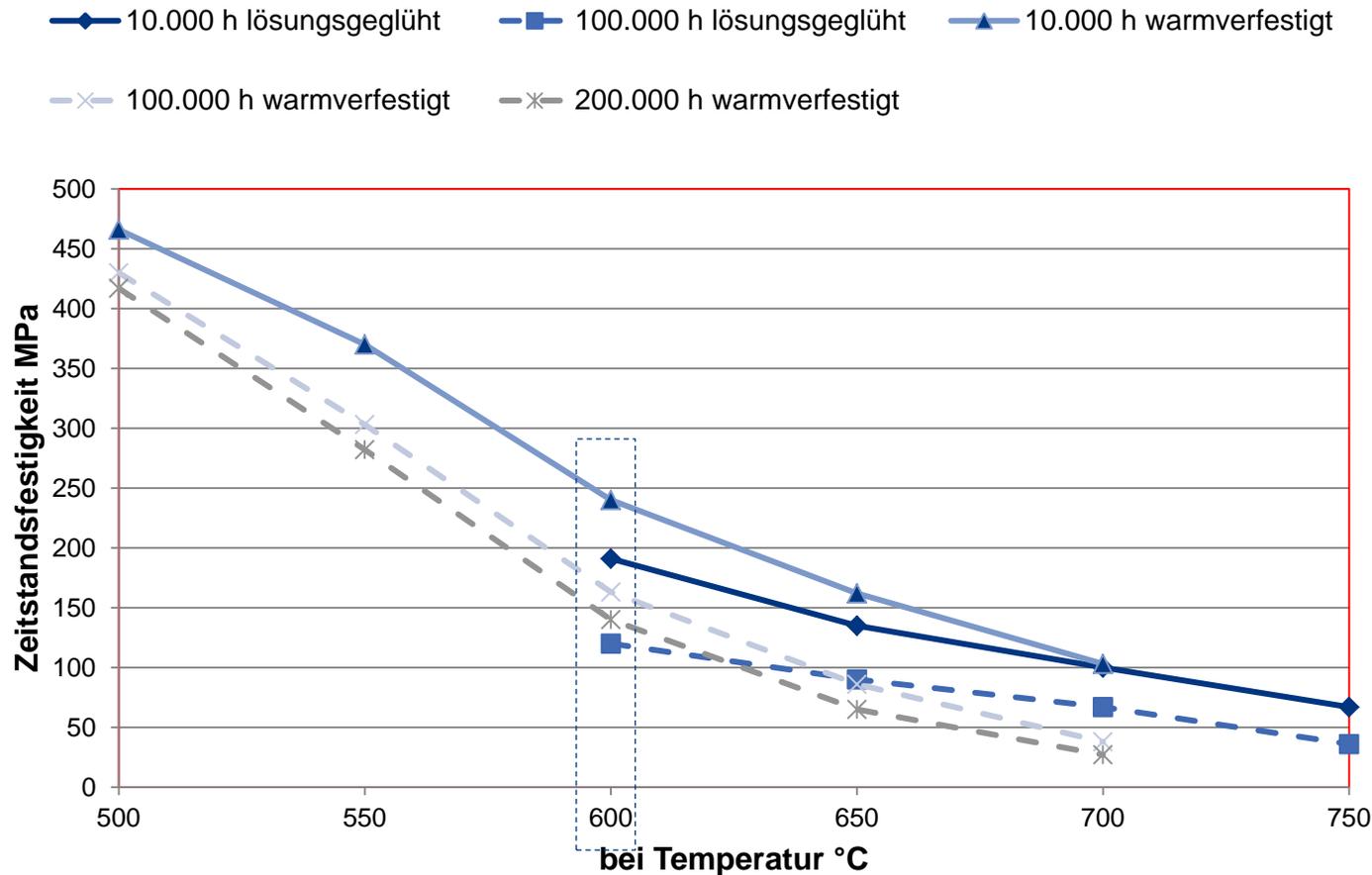


Seitenansicht auf Kerbradius:

- Risse laufen alle vom Kerbradius nach unten ins Volumen.
- Im Bereich versetzter Risse erscheinen manche Risse nicht mit dem Kerbradius verbunden zu sein. Diese treten aber im benachbarten Schnitt an die Oberfläche.

Die Auflösung dieser CT-Untersuchung beträgt 14 μm

ZEITSTANDSFESTIGKEIT DES WERKSTOFFS GEMÄß DIN EN 10302 (06/2008)



- Die Zeitstandsfestigkeit des Werkstoffs nimmt bei Temperaturen im Bereich von 600 °C deutlich ab.
- Die Spannungsberechnungen des Herstellers haben gezeigt, dass die Beanspruchung bei diesem Anwendungsfall für diesen Werkstoff zu hoch war.

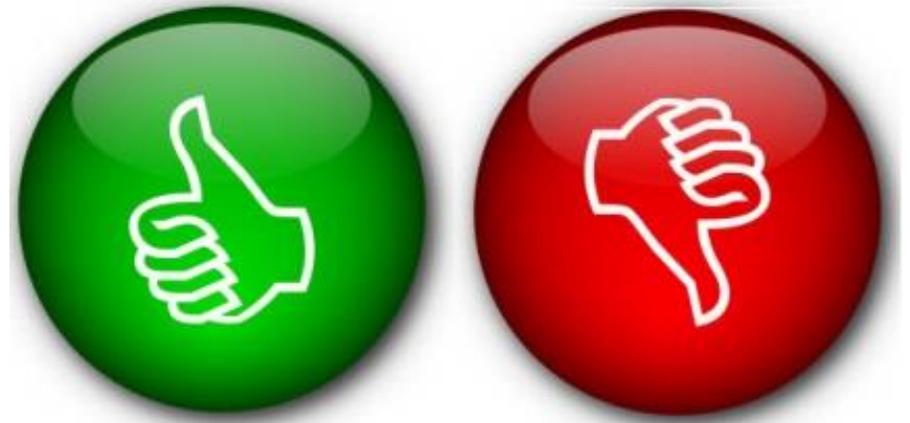
SCHLUSSFOLGERUNGEN

- Die geringe Bruchdehnung der Schadenschaufel im Vergleich zur neuen Schaufel weist auf eine Erschöpfung des Dehnungsvermögens durch eine hohe Kriechbeanspruchung während der Betriebszeit hin.
- Die Schadenschaufeln zeigen Gefügeveränderungen, d.h. durch die Bildung von Korngrenzenausscheidungen werden Kriechmechanismen, wie Korngrenzengleiten und Leerstellendiffusion begünstigt, und andererseits Versetzungsbewegungen eingeschränkt.
- Durch die hohen Festigkeiten der Schadenschaufel im Korninneren erfolgen die Kriechverformungen über die Korngrenzen und führen bei erschöpften Dehnungsvermögen zu interkristallinen Rissen.
- Die erhöhte Zugfestigkeit und Härtewerte der Schadenschaufel sind wahrscheinlich auf verspannte, feine Karbide im Korninneren zurückzuführen, die sich während der Beanspruchungsdauer ausgeschieden haben. Diese kohärenten Sekundärkarbide konnten jedoch im REM wegen der bekanntlich geringen Teilchengröße (ca. 50nm, vgl. H. Van Wortel*) nicht beobachtet werden.
- Gemäß der metallurgischen Untersuchung ist davon auszugehen, dass sowohl die erhöhte Zugfestigkeit und Härte als auch die verminderte Bruchdehnung und Brucheinschnürung der Schadenschaufeln auf Alterungsvorgänge während der Betriebsdauer zurückzuführen sind.
- Die Untersuchung hat keine Anzeichen für ein nicht spezifikationsgerechtes Material geliefert. Daher ist davon auszugehen, dass die aufgetretene Zeitstandsbelastung der Schaufel in diesem speziellen Fall (hoher Auslastungsgrad der Schaufel) zu hoch war.

*) H. Van Wortel (TNO) „Control of Relaxation Cracking in austenitic high temperature components“, Minutes of EFC WP15, 26.04.2017

08

LESSONS LEARNED





LESSONS LEARNED AUS DAMPFTURBINENSCHÄDEN

Transport:

- Unvollständige Transportvorgaben und teils fehlende Qualitätskontrollen können zu substantiellen Schäden führen.
- Frühzeitige Rücksprache und Workshops mit dem Versicherer helfen das Schadenrisiko zu mindern.

Fertigung / Endmontage:

- Umstellungen im Fertigungsablauf sind meist kostengetrieben. Technische Aspekte bleiben z. T. unberücksichtigt.
- Nacharbeiten rund um die Dampfturbine in der IBN-Phase erfolgen teilweise in Abwesenheit des OEM. Rücksprache zum Vorgehen auf der Baustelle mit dem OEM im Vorfeld führen, ggfs. Kontroll-Endoskopien durchführen.
- Durchgehende herstellungsbegleitende Qualitätskontrolle ggfs. durch unabhängig Dritte sicherstellen.

Schnittstellenthematik (IBN / Betrieb):

- Anschlussleitungen zu Entwässerungen, Anzapfungen und Entnahmen können zur Sammlung von Kondensat führen. Bei einem Trip können diese Rückstände schlagartig in die Turbine gelangen und zu massiven Schäden an der Beschaufelung führen.
- Fehlende und/oder fehlerhaft montierte Kompensatoren in Abdampfleitungen können z. T. schwere Anstreifschäden nach sich ziehen.

Lebensdauer (Langzeitbetrieb)

- Die stark veränderliche Betriebsweise (häufigere Start- /Stoppzyklen, Lastgradienten, Niedriglast) führt zu höheren Beanspruchungen (LCF, Schwingungen, Korrosion etc.). Abhängig von der Betriebsweise können zusätzliche Inspektionen, Konservierungsmaßnahmen, verkürzte Revisionszyklen notwendig werden.
- Leistungs- und Wirkungsgradsteigernde Maßnahmen können sich auf die Lebensdauer/ Zuverlässigkeit negativ auswirken. Bei Neuprojekten kann ein frühzeitiger Dialog mit dem OEM und eine unabhängige Beurteilung neuer Konstruktionsmerkmale und Konstruktionsanforderungen helfen, mögliche Schwachstellen aufzudecken.



Thomas Gellermann

Turbomachinery, Vibration Diagnostics
Allianz Risk Consulting GmbH
Allianz Zentrum für Technik
Phone +49.89.3800 – 6236
Email: thomas.gellermann@allianz.com



Harald Pecher

Turbomachinery, Vibration Diagnostics
Allianz Risk Consulting GmbH
Allianz Zentrum für Technik
Phone +49.89.3800 – 7194
Email: harald.pecher@allianz.com



Dr. Johannes Stoiber

Managing Director
Allianz Risk Consulting GmbH
Allianz Zentrum für Technik
Phone +49.89.3800 – 6329
Email: johannes.stoiber@allianz.com



Stefan Thumm

Operational Manager
Allianz Risk Consulting GmbH
Allianz Zentrum für Technik
Phone +49.89.3800 – 6643
Email: stefan.thumm@allianz.com

VIELEN DANK FÜR IHRE AUFMERKSAMKEIT!

www.azt.allianz.com