



White Etching Cracks

**Positionspapier
der Gesellschaft für Tribologie e.V.**

Schadensbilder, Entstehungshypothesen,
Einflussfaktoren, Risikoabschätzung und
Handlungsempfehlungen

Tribologie in Deutschland

White Etching Cracks

Positionspapier
der Gesellschaft für Tribologie e.V.

Schadensbilder, Entstehungshypothesen,
Einflussfaktoren, Risikoabschätzung und
Handlungsempfehlungen

IMPRESSUM

Herausgeber und Vertrieb:

Gesellschaft für Tribologie e.V.
Adolf-Fischer-Str. 34, D-52428 Jülich, Deutschland
E-Mail: tribologie@gft-ev.de – Internet: www.gft-ev.de

Gestaltung und Satz:

pulcinello
Marcus Depenbusch
Kamper Str. 20 – 52064 Aachen
Telefon: (0241) 400 87 46 – Telefax: (0241) 400 87 54
E-Mail: info@pulcinello.de – www.pulcinello.de

Das Urheberrecht an diesem Positionspapier verbleibt bei der Gesellschaft für Tribologie e.V.. Vorstände und Mitglieder der Gesellschaft für Tribologie haben dieses Positionspapier erstellt. Alle Angaben und Daten sind sorgfältig recherchiert. Allerdings geben weder die Gesellschaft für Tribologie noch die Autoren irgendeine ausdrückliche oder implizierte Garantie oder übernehmen irgendeine rechtliche oder sonstige Verantwortung für die Korrektheit, Vollständigkeit oder Nutzbarkeit irgendeiner Information, eines Produktes oder eines enthaltenen Prozesses, oder versichert, dass deren Nutzung private Rechte nicht verletzen würden.

Ohne schriftliche Genehmigung der Gesellschaft für Tribologie e.V. darf dieses Positionspapier auch nicht in Auszügen weder übersetzt, kopiert, noch vervielfältigt oder in Portalen, Netzwerken und digitalen Medien gepostet werden.

© Januar 2024

Initiator:

Prof. Dr.-Ing. Tim Hosenfeldt,
Schaeffler Technologies AG & Co KG

Autoren aus der Industrie:

Dr.-Ing. Christoph Bugiel,
Flender GmbH

Prof. Dr.-Ing. Tim Hosenfeldt,
Schaeffler Technologies AG & Co KG

Dipl.-Ing. Thorsten Klähn,
The Timken Company

Dipl.-Ing. Dirk-Olaf Leimann

Dr.-Ing. Jörg Loos,
Schaeffler Technologies AG & Co KG

Dipl.-Phys. Rolf Luther,
Fuchs Lubricants Germany GmbH

Dipl.-Ing. Daniel Merk,
Schaeffler Technologies AG & Co KG

Dr. rer. nat. Christian Seyfert,
Fuchs Lubricants Germany GmbH

Dr.-Ing. Dmitry Shakhvorostov,
Evonik Industries AG

Dr.-Ing. Kenred Stadler,
SKF GmbH

PhD Balasubramaniam Vengudusamy,
Klüber Lubrication München GmbH & Co. KG

Dr.-Ing. Petra Wiersch,
Flender GmbH

Dr.-Ing. Christoph Wincierz,
Evonik Industries AG

Anne Woestmann,
RWE Power AG

Autoren aus Forschungseinrichtungen:

Prof. Dr. rer. nat. Angelika Brückner-Foit,
Universität Kassel iaf-mt

Dr. rer. nat. Thomas Gradt,
GfT e.V. & BAM

Dr.-Ing. Francisco Gutiérrez Guzmán,
RWTH Aachen MSE

Prof. Dr.-Ing. Georg Jacobs,
RWTH Aachen MSE

Dr. rer. nat. Andreas Kailer,
Fraunhofer IWM Freiburg

Dr.-Ing. Dominik Kürten,
Fraunhofer IWM Freiburg

M.Sc. Benjamin Lehmann,
RWTH Aachen MSE

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Poll,
Leibniz Universität Hannover IMKT

Moderation, Redaktion:

Dr.-Ing. Gerald Ochse,
Universität Kassel iaf-mt

Prof. Dr.-Ing. Adrian Rienäcker,
Universität Kassel iaf-mt

INHALT

1. Einleitung.....	8
2. Schadensbilder	9
3. Entstehung von White Etching Cracks (WEC)	11
3.1. Beanspruchung	11
3.2. Beanspruchbarkeit	12
3.3. Einfluss von Wasserstoff	13
3.4. Rissentstehung und weiße Bereiche	14
4. Einflussfaktoren	15
4.1. Werkstoff	15
4.2. Schmierstoff	16
4.2.1. Schmierstoffchemie/Additivierung/Bildung von Reaktionsschichten	16
4.3. Stromdurchgang	18
4.4. Wasserkontamination	19
4.5. Wasserstoff	19
4.6. Zusatzlasten	19
4.7. Vibrationen	20
4.8. Reibung	20
5. Methoden zur Schadensanalyse und Risikoabschätzung.....	21
5.1. Schadensanalyse	21
5.2. Risikoabschätzung	23
6. Abhilfemaßnahmen	24
7. Zusammenfassung	26
8. Literaturverzeichnis.....	27

1. EINLEITUNG

Unter White Etching Cracks (WEC) wird ein Schadensbild metallischer Wälzpaarungen verstanden, welches vermehrt in Wälzlagern beobachtet wird. Charakteristisch für White Etching Cracks sind Rissnetzwerke, die im metallografischen Schliff durch weiß anätzende Bereiche flankiert werden (Abb. 1.1). Diese Bereiche erscheinen unter dem Lichtmikroskop weiß, da sie nur wenig auf das Ätzmittel reagieren und das Licht reflektieren.

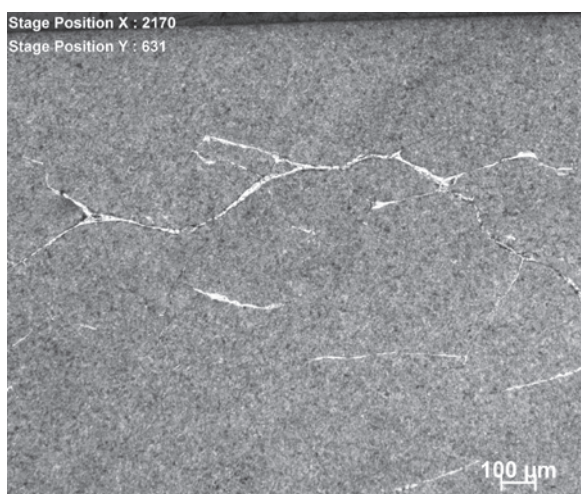


Abb. 1.1: Typisches Beispiel für einen WEC im Querschnitt des Innenrings eines Wälzagers (Stadler et al. 2018)

Die Abb. 1.2 zeigt 3D Rekonstruktionen wiederholter Schliffe der gleichen Probe, wobei ausgeprägt dreidimensionale Strukturen sichtbar werden.

Die mit WEC verbundenen Schäden an Wälzlagern können bei allen Wälzlagertypen und -größen und in ganz unterschiedlichen Anwendungen auftreten.

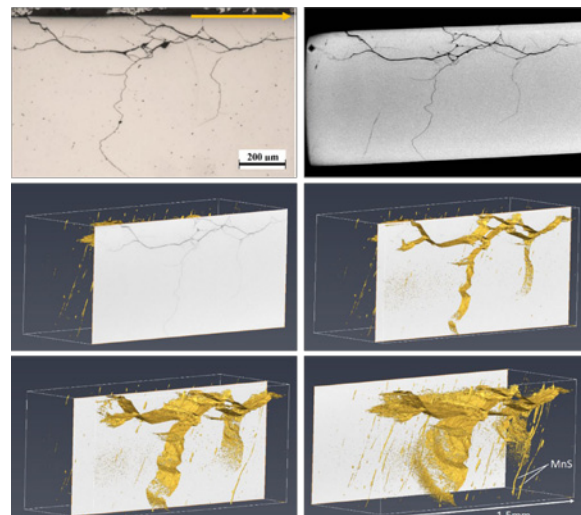


Abb. 1.2: Dreidimensionale Struktur eines WEC (Danielsen et al. 2019)

Über die zahlreichen Forschungsarbeiten und Publikationen zum Thema hinaus hat sich die Notwendigkeit manifestiert, das Wissen um WEC zusammenzutragen und Lagerherstellern, -anwendern und Forschungseinrichtungen verfügbar zu machen. Die Gesellschaft für Tribologie (GfT) hat dazu einen Arbeitskreis eingesetzt und diesen beauftragt ein Positionspapier „White Etching Cracks“ zu erstellen.

In diesem Positionspapier wird angestrebt, die Verbindung zwischen dem mikroskopischen Befund und den praktischen Gegebenheiten im Wälzlager herzustellen. Ziel ist es, unparteiisch und umfassend den sicheren Stand der Wissenschaft und Technik der WEC zu beschreiben. Es sollen die Einflüsse dargestellt werden, die WEC begünstigen und Maßnahmen herausgearbeitet werden, um das Risiko von WEC zu reduzieren oder zu eliminieren. Das Dokument soll unterschiedliche Positionen darstellen, ein hohes Maß an Glaubwürdigkeit durch Einbindung aller Interessengruppen in den Arbeitskreis erreichen und darüber hinaus Impulse für weitere Forschungsansätze geben.

2. SCHADENSBILDER

Wälzlagerschäden im Kontext der White Etching Cracks sind in der Regel frühzeitige Lagerausfälle, die weit vor der rechnerischen L₁₀ (Ermüdungs-) Lebensdauer und bei Lagerlasten deutlich unterhalb der Ermüdungsgrenzbelastung P_u (ISO 281 Anhang B) eintreten. Die Auslegung nach ISO 281 und ISO/TS 16281 berücksichtigt WEC als Schadensmechanismus nicht.

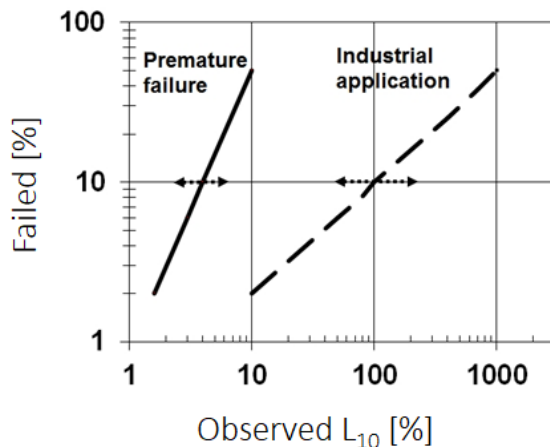


Abb. 2.1: Frühausfälle von Wälzlagern durch WEC (Stadler et al. 2015b; Stadler et al. 2018)

Typisch für WEC-Schäden sind Schadenshäufungen bei einer geringen Streuung (Abb. 2.1), dies lässt sich an der der Weibullverteilung erkennen.

In der ISO 15243 sind die bekannten Wälzlagerschadensfälle zusammengetragen und ausführlich dokumentiert, allerdings ist der WEC-Schaden noch nicht in die Norm eingeflossen. Das makroskopische Erscheinungsbild von WEC kann sehr vielfältig sein. Es treten Materialausbrüche oder Axialrisse an vielen Stellen ausgehend von getrennten Orten auf. Mit fortgeschrittener Schädigung ist die Zuordnung als WEC schwieriger. Die Abb. 2.2 zeigt makroskopische Schadensbilder, wie sie bei einer visuellen Inspektion aufgenommen werden. Auf der rechten Seite der Abbildung („Axialrisse“) findet sich ein Schadensbild mit zugehörigem Schlibbild, das eine Schädigung im Zusammenhang mit WEC zeigt. Die Ausbrüche in der Mitte der Abbildung können von WEC, aber auch von anderen Ursachen herrühren. Das Schlibbild darunter ist ein eindeutiger WEC-Befund. Die Ursache für die Abschälungen („spalls“) auf der linken Seite der Abbildung ist ebenfalls nicht eindeutig zu bestimmen. Die eindeutige Klärung, ob ein gegebener Schadensfall auf ein WEC zurückzuführen ist, kann nur durch eine metallografische Untersuchung erfolgen.

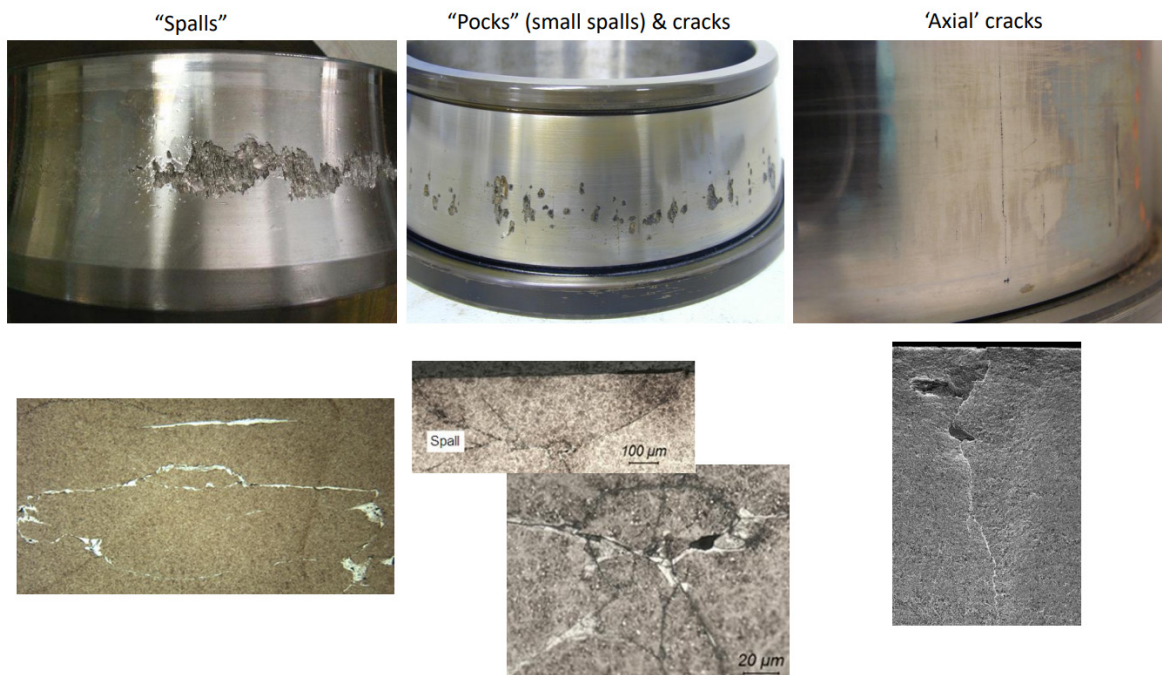


Abb. 2.2: Lagerschäden und Bezug zu WEC (Quelle: SKF)

Bei einer strukturierten Schadensuntersuchung werden nach der visuellen Inspektion meist Schnitte durch das Bauteil vorgenommen. Damit der Primärschaden nicht durch Sekundärschäden überdeckt wird, werden oft Bereiche ohne großen Makroschaden ausgewählt und kurz vor oder nach dem Schaden geschnitten. Bei der Vermutung eines WEC erfolgt zunächst ein Schnitt in Umfangsrichtung und anschließend in axiale Richtung (Abb. 2.3, Abb. 2.4). Um die Bereiche sichtbar zu machen, wird die Schnittfläche zunächst geschliffen und im Anschluss mit Nital oder Pikral angeätzt. In einem ersten Schritt der Analyse wird ein Überblick über eine große belastete Fläche gewonnen. Im Folgenden wird dann gezielt nach weiß angeätzten Bereichen mit angrenzenden Rissnetzwerken gesucht. Diese befinden sich in der Regel im Bereich der maximalen Hertzschen Vergleichsspannung.

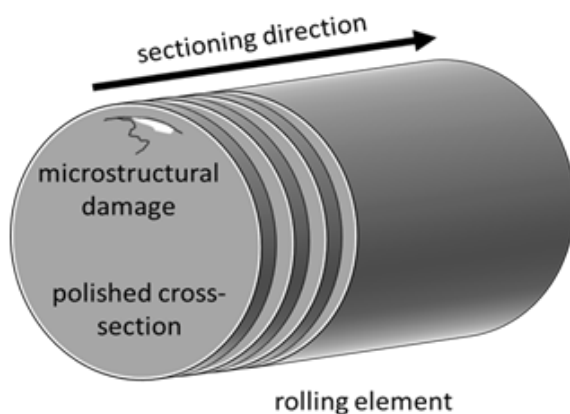


Abb. 2.3: Skizze der Schnitttrichtung am Beispiel einer Zylinderrolle

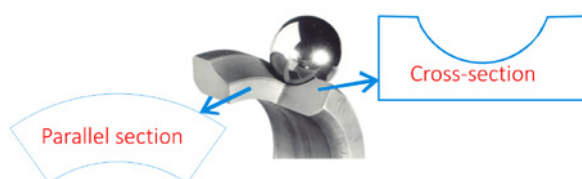


Abb. 2.4: Schnitte am Lagerinnenring in Umfangsrichtung (cross-section) und axialer Richtung (parallel-section)

Die Abb. 2.5 zeigt verschiedene Schadensbilder mit Rissen und weiß anätzungen im Vergleich. In der klassischen Ermüdung zeigen sich Risse ohne weiß anätzende Bereiche (Abb. 2.5: 1, 8). White Etching Areas (weiß anätzende Bereiche, WEA) gibt es in verschiedenen Ausprägungen (Abb. 2.5: rechts). Regelmäßig angeordnete weiße Bänder mit flachen (low angle bands – LAB) bzw. steilen Winkeln (high angle bands (HAB) (Abb. 2.5: 2, 3) werden nicht zu den WEC gezählt, sie entstehen bei hohen Pressungen nach langen Laufzeiten (Voskamp 1997). Auch die sogenannten „butterflies“ (Abb. 2.5: 4) in typischer Ausprägung, die sich an Mikroeinschlüssen schon bei moderaten Pressungen um 1,3 GPa symmetrisch ausbilden, gehören nicht zu den WEC. Im Schliiff erscheinen sie zweidimensional mit Abmessungen von Spitze zu Spitze bis maximal 250 µm. In Abb. 2.5: 6 und 11 sind große Butterfly-ähnliche Strukturen mit Abmessungen von deutlich über 250 µm, hier als WEC identifiziert, zu sehen. Charakteristisch für WEC sind Rissnetzwerke, die durch weiß anätzende Bereiche flankiert werden (Abb. 2.5: 5, 6, 7, 9, 10, 11). Die Risse sind dreidimensional ausgedehnt (s. Abb. 1.2) mit Längen von ca. 10 µm bis zu einigen Millimetern. Sie treten primär unterhalb der Oberfläche in Bereichen der maximalen Hertzschen Vergleichsspannung ($0,6 \cdot \text{Kontaktbreite}$ der kleinen Halbachse) und oft noch in deutlich tieferen Bereichen auf. Die weit verzweigten unregelmäßigen Rissnetzwerke bestehen aus ultrafeinem, nanokristallinem und karbidfreiem Ferrit oder Ferrit mit einer sehr feinen Verteilung von Karbidpartikeln. Die weiß anätzenden Bereiche befinden sich an den Rissflanken und in unmittelbarer Umgebung der Risse. Diese Bereiche erscheinen weiß, da sie nur wenig auf das Ätzmittel reagieren und das Licht reflektieren. Die Härte ist etwa 10 % bis 50 % höher als im ungeschädigten Gefüge.

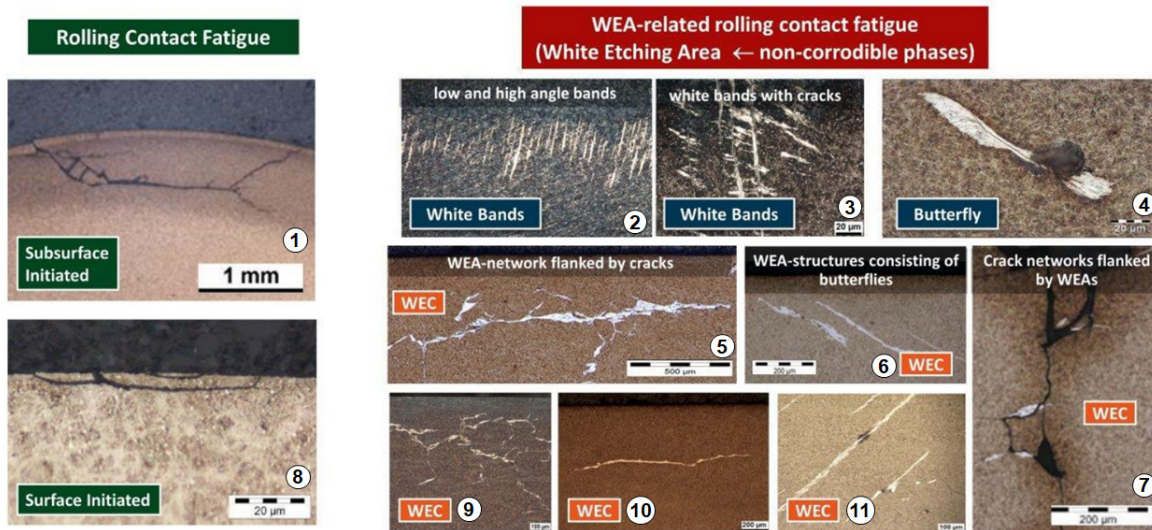


Abb. 2.5: Vergleich der Schädigungen der Mikrostruktur (Loos et al. 2019a)

3. ENTSTEHUNG VON WHITE ETCHING CRACKS (WEC)

WEC können sich in Lagern unter bestimmten Bedingungen bilden, wobei in der Praxis sehr unterschiedliche Szenarien festgestellt wurden. Die Vielzahl der Einflussfaktoren belegt, dass der Schadensprozess, der zur Bildung und Ausbreitung von WEC führt, eher als eine Systemantwort zu betrachten ist, als der eines singulären Schädigungsvorgangs, der auf eine einzige grundlegende Ursache („root cause“) zurückgeführt werden kann. Trotzdem soll in diesem Abschnitt versucht werden, in der Literatur vorgeschlagene Entstehungshypothesen zu bündeln. Bei allen angeführten Erklärungsversuchen muss aber berücksichtigt werden, dass die Entstehung von WEC Gegenstand aktueller nationaler und internationaler Forschungsarbeiten ist. Im folgenden Abschnitt wird zunächst der Kenntnisstand der für die WEC-Bildung relevanten Beanspruchungen zusammengefasst und dann die zugehörigen Beanspruchbarkeiten diskutiert.

Auf die Rolle des Wasserstoffs wird im Abschnitt 3.3 eingegangen. Abschließend werden die unterschiedlichen Ansätze zur Entstehung von WEC vorgestellt.

3.1. BEANSPRUCHUNG

WEC können grundsätzlich unterhalb der Oberfläche in Stahlwälzlagern entstehen. Typischerweise fällt der Ursprung der beobachteten Risse etwa mit dem Maximum der Beanspruchung gemäß der Hertzschen Theorie zusammen. Dieser Bereich ist gleichzeitig ein Ort hoher potenzieller Wasserstoffkonzentration (s. Abb. 3.1) (vgl. Kap.3.3).

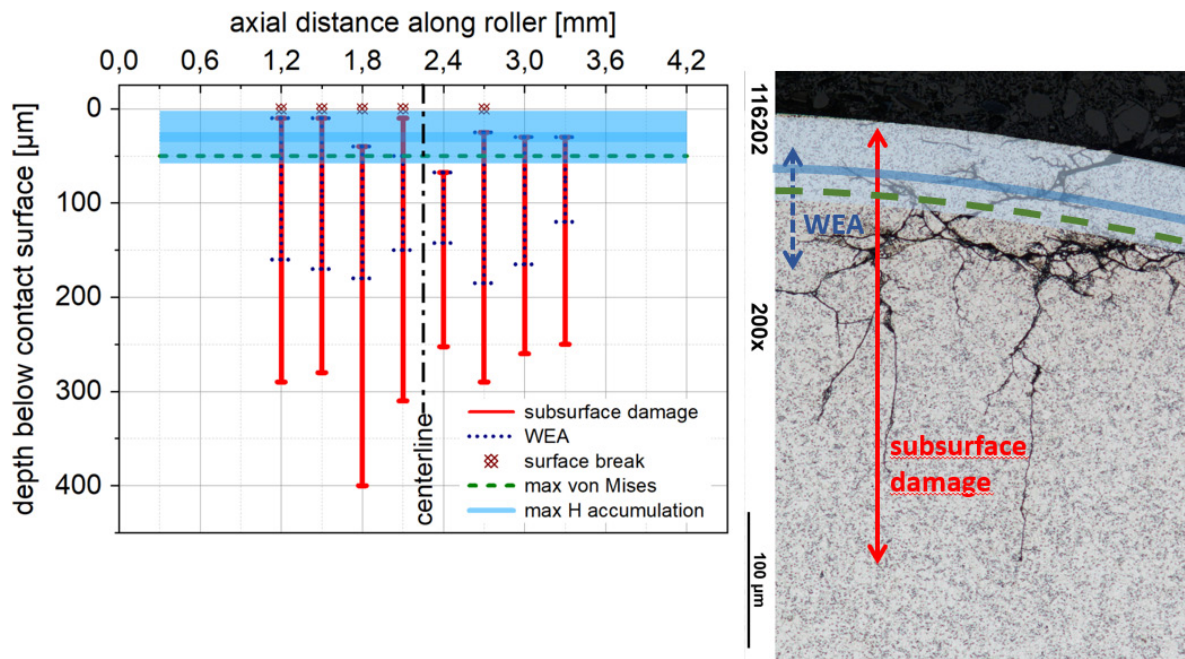


Abb. 3.1: Links: Verteilung von WEC-Schäden unter der Oberfläche in axialer Richtung (Khader et al. 2019) (subsurface damage: Risslängen; WEA: Bereich mit weißer Anätzung der Risse; surface break: Oberflächen-schaden; max von Mises: Bereich der maximalen Vgl-Spannung; max H accumulation: Bereich der maximalen Wasserstoffakkumulation) – Rechts: Schliffbild der Sektion einer Zylinderrolle (s. Abb. 2.3)

Die entstandenen Risse breiten sich einerseits bis zum möglichen finalen Schaden an der Oberfläche der Laufbahn, andererseits bis in eine hier beobachtete Tiefe von 400 µm aus. Dies zeigt, dass die Wälzbeanspruchung eine entscheidende Rolle spielt.

Werden der Wälzbeanspruchung durch konstruktive Gegebenheiten - jenseits der Empfehlung der Lagerhersteller - strukturelle Zugspannungen überlagert (z.B. durch Formabweichung im Lagersitz oder entsprechende Passungswahl), erhöht sich die Wahrscheinlichkeit lebensdauerbestimmender WEC und Ringbrüche (Lai und Stadler 2016). Die Risse entstehen dabei unter der Oberfläche und haben wahrscheinlich einen rein mechanischen Ursprung. Zeitlich kommt es vermutlich zunächst zur Bildung von Rissen und erst anschließend zur Entstehung von den weiß anätzenden Bereichen.

Ausführungen zu Zusatzlasten und Spannungsspitzen sind in Kap. 4.6 zu finden.

3.2. BEANSPRUCHBARKEIT

Die Beanspruchbarkeit von Wälzlagern gegenüber klassischer Wälzermüdung korreliert stark mit der Reinheit der verwendeten Werkstoffe. Bei WEC Bildung ist das nicht der Fall s. Abb. 3.2 (Blass et al. 2020; Loos et al. 2019a). WEC können sich auch an kleinen, aus Sicht der Stahlreinheit (z.B.: ASTM E45, DIN50602) zulässigen, Einschlüssen im Werkstoff bilden.

Unter Wälzbeanspruchung bilden sich bei reiner Ermüdung und bei WEC-Risse an Einschlüssen und Ausscheidungen unter der Oberfläche. Bei der Stahlreinheit werden Makroeinschlüsse (> ca. 250 µm) und Mikroinschlüsse (ca. 15 µm bis ca. 250 µm) betrachtet. Im Fall von WEC liegt der relevante Bereich für Einschlüsse und Ausscheidungen unter ca. 50 µm (z.B. MnS (Bruce 2016), (Gould et al. 2017a)(Holweger et al. 2015), und damit im Bereich der natürlich vorhandenen Gefügebestandteile. Derartige Einschlüsse oder Ausscheidungen sind auch in hochreinen Stählen immer vorhanden, so dass eine sehr hohe technische Stahlreinheit die WEC-Bildung nicht verhindern kann.

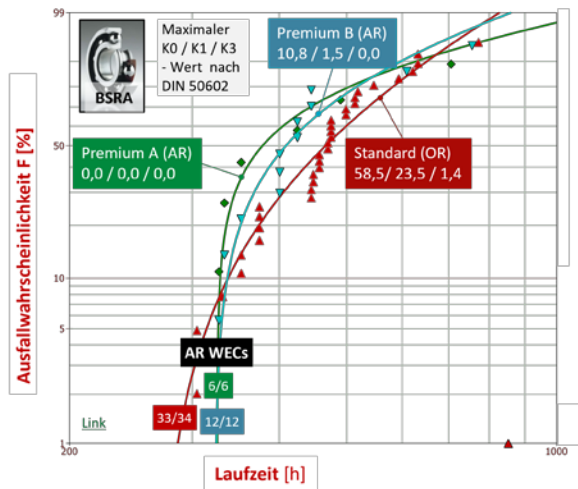


Abb. 3.2: Einfluss der Stahlreinheit auf die Ausfallwahrscheinlichkeit eines Kugellagers im WEC Test (Loos et al. 2019a)

Die Beanspruchbarkeit wird von einer Reihe von Einflussfaktoren positiv bzw. negativ verändert, welche in Kapitel 4 aufgeführt sind.

3.3. EINFLUSS VON WASSERSTOFF

Mit thermischer Desorptionsanalyse messen (Richardson et al. 2018a) die Konzentration diffusiblen Wasserstoffs im Lagerstahl 100Cr6 und finden eine große Korrelation zwischen WEC und Wasserstoffdiffusion. Sie legen analog zu (Ruellan et al. 2015) nahe, dass der Wasserstoff durch sich infolge Verschleiß neu bildende Oberflächen oder einen nicht geschlossenen Tribofilm in den Werkstoff eindiffundiert.

Es bleibt die Frage, welche Mechanismen im Werkstoff aktiviert werden müssen, um einen WEC-Schaden hervorzurufen. In der noch anhaltenden Diskussion darüber, ob es einen grundlegenden Aktivierungsprozess für WEC-Bildung gibt, spielt Wasserstoff eine wesentliche Rolle.

Der atomare oder ionische Wasserstoff muss allerdings in einer ausreichenden Konzentration vorhanden sein, die heute noch nicht quantifizierbar ist. Die bekannten, allgemein akzeptierten Einflussfaktoren wie Stromdurchgang (Loos et al. 2021; Evans 2016), Wasserkontamination (Cantley 1977; Haque et al. 2018) und aggressive Medien (z.B. Sauer gas (Kahlman 2018)) gehen mit einem verstärkten Angebot an Wasserstoff

einher. Darüber hinaus kann bei reibendem Kontakt zweier Oberflächen aus dem Umgebungsmedium Wasserstoff freigesetzt werden (Han et al. 2016; Tanaka et al. 2017).

Dem Eindringen von Wasserstoff in das Lager kann durch eine Diffusionsbarriere entgegengewirkt werden. Diejenigen Veränderungen der Randzone, die für die WEC-Bildung relevant sind, ändern auch die Diffusionsbarriere für von außen eindringende Elemente wie z.B. Wasserstoff. Ein Beispiel ist Brünieren, das der Bildung einer Konversionsschicht dient und zur Reduzierung von WEC-Schäden eingesetzt werden kann. Neben weiteren tribologisch positiven Eigenschaften fungiert die Oxidschicht als eine Art Diffusionsbarriere (Ooi et al. 2019; Stadler et al. 2015a). Blanke nicht oxidierte Oberflächen (frische Bruchflächen, verschleißbehaftete Reibflächen), bei denen eine solche Diffusionsbarriere nicht besteht, befördern dagegen die WEC-Bildung.

Zwei der gängigen Hypothesen für die WEC-Entstehung fassen diese Beobachtungen zusammen, indem postuliert wird, dass der Wasserstoff sich am Ort der maximalen Belastung konzentriert. Damit wird die Beanspruchbarkeit des Gefüges lokal herabgesetzt (HEDE (Hydrogen Enhanced DEcohesion) (Katzarov und Paxton 2017) und HELP (Hydrogen Enhanced Local Plasticity (Birnbauer und Sofronis 1994)) und es kommt zur WEC-Bildung. Diese Hypothesen werden gestützt von experimentellen Untersuchungen, bei denen Wälzlager, die initial mit Wasserstoffionen beladen wurden, durch WEC-Bildung vorzeitig versagten (Ruellan et al. 2014).

Die hier vorgestellten Hypothesen sind allerdings mit Einschränkungen zu betrachten. Es gibt Untersuchungen, in denen das Wasserstoffangebot reduziert wurde (Vakuum, fluoriertes Schmiermittel) und bei denen trotzdem WEC-Bildung beobachtet wurde (Diederichs et al. 2016). Die Schwierigkeit in diesem Zusammenhang ist, dass eine erhöhte Konzentration von Wasserstoff im Werkstoff nur schwer nachgewiesen werden kann. Darüber hinaus ist bei Schadensfällen, bei denen üblicherweise zwischen WEC-Bildung und Analyse ein längerer Zeitraum liegt, die ursprüngliche Wasserstoffbelastung nicht mehr feststellbar, da Wasserstoff ein allgegenwärtiges, extrem mobiles und flüchtiges Element ist (Ruellan et al. 2017).

3.4. RISSENTSTEHUNG UND WEISSE BEREICHE

Charakteristisch für WEC ist der weiß anätzende Bereich (WEA) entlang der Rissflanken. Da es auch andere Materialveränderungen gibt, in denen sich WEA bilden (s. Kapitel 2) und bei Kontaktmüdung Risse ohne derartige Bereiche entstehen, stellt sich die Frage, ob sich zuerst Risse (Manieri et al. 2019), (Gould und Greco 2016; Gould et al. 2017b) (Gould et al. 2017a; Bruce 2016) oder zuerst WEA FVA 707 II / III (FVA 2017a, 2021), (Özel 2018; Li et al. 2017) bilden. Für beide Hypothesen gibt es unterstützende Nachweise, weshalb beide Hypothesen in Abb. 3.3 gegenübergestellt werden.

Im HELP-Modell wird eine Wasserstoffanlagerung als ursächlich für eine erhöhte Versetzungsmobilität angesehen (Hölzel 2004). Diese führt schließlich zu lokalem, plastischen Versagen, was eine Versprödung des Werkstoffes bedeutet. Das HELP-Modell korreliert als Mechanismus mit der Entstehungshypothese „Gefügeveränderung vor Rissentstehung“. Demgegenüber wird im HEDE-Modell davon ausgegangen, dass eine verringerte Kohäsion zwischen Metallmatrix und Einschlüssen infolge einer Wasserstoffansammlung zu Rissbildung führt (Hölzel 2004). Der Mechanismus des HEDE-Modells kommt für die Hypothese der „Rissentstehung vor Gefügeveränderung“ in Frage. (FVA 2022b)

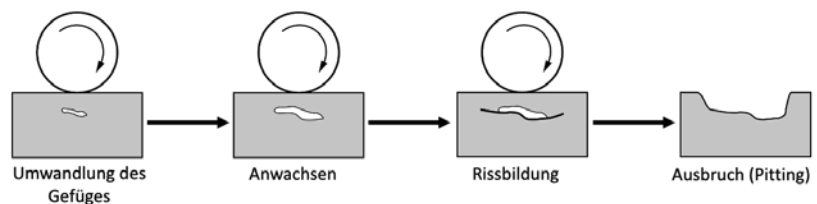
Beiden Theorien ist gemein, dass ein Wasserstoffeintrag und eine lokale Ansammlung atomaren Wasserstoffes begünstigend für WEC-Entstehung angesehen werden.

Fest steht, dass die WEA aus nanokristallinem karbidreichem Ferrit bestehen (Grabulov et al. 2010; Grabulov et al. 2007) und gegenüber dem übrigen Gefüge eine höhere Härte aufweisen.

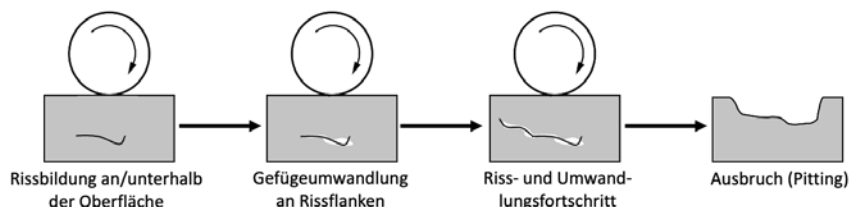
Mayweg et al. (2021) untersuchen die für das Auftreten von WEC typischen Stähle mit hohem Kohlenstoffgehalt. Sie erklären die nano-kristallinen ferritischen Bereiche, die die weiß anätzenden Flächen bilden, durch Reiben der Rissflächen aufeinander, wodurch die Mikrostruktur durch erhebliche plastische Deformationen zersetzt wird. Große Bereiche der WEA sind verarmt an Kohlenstoff, der sich in nanoskaligen Ablagerungen an den Rissflächen sammelt. Die geringere Reibung des Kohlenstoffs an den Rissflächen reduziert die Abschirmung der Rissspitze, verstärkt die Verschiebungen dort und lässt die Risse schneller voranschreiten, als mit konventionellen Methoden der Rissfortschrittsanalyse vorhergesagt würde.

Möglicher Schadenshergang:

- Gefügeveränderung vor Rissbildung



- Rissbildung vor Gefügeveränderung



→ Nicht final geklärt!

Abb. 3.3: Möglicher Schadenshergang bei WEC-Schäden (MSE, RWTH Aachen)

4. EINFLUSSFAKTOREN

Neben der rein mechanischen Beanspruchung durch die Hertzsche Pressung gibt es eine Reihe von Einflussfaktoren, die die Beanspruchung in Bezug auf WEC-Bildung erhöhen oder die Beanspruchbarkeit herabsetzen. Es muss in der Regel ein kritischer Zustand erreicht werden (Schwellenwert), bevor WEC-Bildung einsetzt.

Es gibt eine Reihe von Belegen, die darauf hinweisen, dass die im folgenden Kapitel genannten Einflussfaktoren nur kurzzeitig wirken müssen, um eine WEC-Bildung zu triggern (Loos et al. 2019b), (Seyfert et al. 2017), (Stadler et al. 2017).

4.1. WERKSTOFF

Gängige Lagerstähle unterscheiden sich in der WEC-Empfindlichkeit, Abb. 4.1 zeigt die Tenden-

zen (rot: sehr empfindlich, grün: weitgehend unempfindlich). Bei WEC-empfindlichen Werkstoffen kann die Neigung zur WEC-Bildung durch Brünieren oder Carbonitrieren deutlich herabgesetzt werden. Die Wirksamkeit der „Behandlung“ hängt von den vorliegenden Einflussgrößen wie z. B. Schlupf, Stromdurchgang, Umgebungsmedium etc. und der Anwendung ab. Die Rolle der Legierungselemente auf die WEC-Bildung ist nicht hinreichend geklärt (FVA 2022d). Der Anwender muss entscheiden, ob eine Brünierung oder ein WEC unempfindlicher Werkstoff gewählt werden soll.

Diskutierte Faktoren, die durch die Wärmebehandlung im Hinblick auf die WEC-Resistenz zu beeinflussen sind, sind Restaustenit-Gehalt (Blass et al. 2016) und Mischkristallverfestigung (Paladugu und Scott Hyde 2020).

Durchhärtende Stähle, e.g. 100Cr6 Geringe WEC Beständigkeit	+ Brünierung	+ Carbonitrieren
Einsatzhärtende Stähle, e.g. 20MnCr5, 18NiCrMo14-6 Lebensdauersteigerungen unter bestimmten Betriebsbedingungen und für bestimmte Ausführungsformen		
Induktionshärtende Stähle, C56E2, 43CrMo4, 50CrMo4mod Lebensdauersteigerungen unter bestimmten Betriebsbedingungen für randschichtgehärtete 43CrMo4mod		
Korrosionsbeständige Stähle, X65Cr13, 440C für bestimmte Zusatzbelastungen hohe WEC Beständigkeit bis Resistenz		
Warmharte Wälzlagerstähle, 33CrMoV12-9, M50 teilweise hohe WEC Beständigkeit bis Resistenz für nitrierte Stähle aufgezeigt, potentiell generell höhere WEC Beständigkeit dieser Werkstoffklasse – wenig Daten vorhanden, da nicht für „Massenanwendungen“ berücksichtigt		

Abb. 4.1: Mögliche WEC Neigung gängiger Lagerstähle (GfT Arbeitskreis WEC)

4.2. SCHMIERSTOFF

Während bei der klassischen Wälzermüdung der Schmierstoff mit seiner Viskosität, Additivierung und Reinheit (feste Verunreinigungen, Partikel) einen klar definierten Einfluss besitzt (s. Abb. 4.2), ist das Bild bei der WEC-Bildung weniger einheitlich.

Eine Erhöhung der Betriebsviskosität (Erhöhung Viskositätsgrad und/oder Absenkung Temperatur) kann sich im Fall schwerer Mischreibung positiv auswirken – nach (Haque et al. 2018) kann eine höhere Viskosität die WEC-Bildung verzögern, jedoch nicht verhindern – aber auch die WEC-Beanspruchung durch z.B. Fluidreibung ($\lambda > 4$) oder höhere EDM-Ströme infolge größerer Schmierpaltweiten erhöhen.

In einigen Fällen (FVA 2017b) war eine Erhöhung des Öldurchflusses hilfreich, wobei ein Überangebot auch zu einer unerwünschten / schädlichen Schlupferhöhung führen kann.

	"classical" rolling contact fatigue	WEC induced rolling contact fatigue
		
Viscosity	higher viscosity ↑ lubrication film thickness -> increased lifetime [ISO 281 9.3.3.4]	different, depends on additional load ^{①,②}
Additivation	positive at mixed friction conditions, if proven effective [ISO 281 9.3.3.4]	negative, if critical ^① in other cases fuzzy / unknown ^② ?
Oil cleanliness	positive [ISO 281 Annex A]	no effects reported

Abb. 4.2: Schmierstoffeinfluss auf klassische Wälzermüdung vs. WEC-Neigung (Franke et al. 2020)

4.2.1. SCHMIERSTOFFCHEMIE/ADDITIVIERUNG/BILDUNG VON REAKTIONSSCHICHTEN

Während eine geeignete Additivierung bei klassischer Wälzermüdung im Mischreibungsbereich eine Lebensdauererlängerung bewirkt (ISO 281), muss dies im WEC-Fall neu betrachtet werden. Es kann aber auch bei gewissen Beanspruchungen die WEC-Bildung durch diese Additivierung ausgelöst und/oder gesteigert werden. Der Einfluss der Temperatur auf die Wirkung der Additive hinsichtlich der WEC-Bildung ist nicht ausreichend untersucht. (Surborg 2014) zeigt, dass Wälzlagerausfälle infolge von WEC unter Verwendung von unadditivierten Schmierstoffen, hier

Hydrocracköle und synthetische Öle auf Basis von PAO, bei den ausgewählten Betriebsbedingungen nicht stattfinden. Ergänzende Untersuchungen von (Gutiérrez Guzmán 2020) zeigen, dass dies auch für Mineralöle und PFPE gilt.

Der Einfluss spezifischer Additivkombinationen auf die Bildung von WEC wurde ab 2010 von (Surborg et al. 2010), (Franke et al. 2014; Franke et al. 2023), (Franke et al. 2014), (FVA 2022b) und anderen Autoren (Ruellan et al. 2021) aufgegriffen. Diese Arbeiten zeigten, dass sich in FE8-Untersuchungen einige Kombinationen aus bestimmten metallhaltigen Additiven als besonders WEC kritisch darstellten (Haque et al. 2018). Metallhaltige Additive erzeugten in diesen Untersuchungen vergleichsweise dicke Tribofilme (≈ 120 nm), verbunden mit hoher Reibung. Haque argumentiert, dass die hygroskopischen Metalladditive Wasser einlagern, welches unter hoher Reibung dissoziiert und dem freien Wasserstoff ermöglicht, unter die Oberfläche zu diffundieren.

Eine Kombination aus Calcium-Sulfonaten in Verbindung mit Zinkdithiophosphat (ZnDTP) gilt als Beispiel für negativen Additiveinfluss (Gould et al. 2019a), was in der Folge auch Fragen zur Verträglichkeit des Schmieröls mit dem Korrosionsschutzmittel aufwarf (FVA 2022c), das in vielen Fällen Calcium-Sulfonate enthält. Die Untersuchungen in (Luther et al. 2014) zeigen, dass ein Einfluss der Lagerkonservierung auf die WEC Bildung bei CLP Getriebeölen, auch bei hohen Konzentrationen, nicht beobachtet werden konnte.

Auf Grund ihrer Vielfalt und auf Grund der Wechselwirkung mit den anderen Bestandteilen der Schmierstoffformulierung sind pauschale Aussagen hinsichtlich des Einflusses von bestimmten Additiven z.B. Calciumsulfonat und Zinkdithiophosphat auf WEC nicht möglich.

Sulfonate in Schmierstoffen unterscheiden sich sowohl hinsichtlich der Basizität (neutral bis überbasisch) als auch in der chemischen Struktur (Typ der Sulfonsäuren) und der Art und Partikelgröße der anorganischen alkalischen Zusätze. Letztere werden zumeist aus der Gruppe der Carbonate, Hydroxide oder Oxide von Alkali- und Erdalkali-Metallen gewählt. Besonders verbreitet sind Calciumsulfonate mit stark unterschiedlichem Metallgehalt und damit Basizität. Sulfonate werden

u.a. für Korrosionsschutz, die Beeinflussung der Reibung und zur Vermeidung von Ablagerungen eingesetzt und sind daher in vielen Anwendungen im Einsatz.

Zink-Dialkyl-di-Thio-Phosphate (ZnDTP) sind die bekannteste Additivgruppe der Schwefel-Phosphor-Verbindungen. Neben Verschleißschutz- (AW) und Extremdruckeigenschaften (EP) wirken ZnDTPs auch als Antioxidantien und Metallpassivatoren.

Diese multifunktionalen Eigenschaften machen sie zu einer weit verbreiteten Additivgruppe z.B. in Motorölen, Stoßdämpferölen und Hydraulikflüssigkeiten.

Sie werden durch Reaktion unterschiedlicher Alkohole und Phenole mit Phosphorsulfid und anschließender Neutralisation mit Zinkoxid synthetisiert. Aufgrund dieser Komponentenvielfalt handelt es sich bei ZnDTPs um eine sehr differenzierte Additiv-Familie mit unterschiedlichen Anwendungseigenschaften.

(Dresel und Mang 2017)

(Richardson et al. 2019) berichten von 100Cr6 Ermüdungstests (FE8-Test und Mikropitting-Rig (MPR)) mit wälzendem Kontakt und überbasischen Calciumsulfonat (OB_{Ca}Sul) Öladditiven, die zum Korrosionsschutz eingesetzt werden. In Rollen des FE8-Tests korreliert der Anstieg an WEC mit dem OB_{Ca}Sul Gehalt im Öl. Im MPR-Test hingegen zeigte nur ein OB_{Ca}Sul Gehalt von 1,4 % (im Bereich von 0 % in der Grundformulierung mit ZnDTP bis 5,6 %) erhöhte WEC. Thermische Desorptionsanalysen (TDA) zeigen für die OB_{Ca}Sul-Öle und Öle, die ausschließlich mit ZnDTP formuliert sind, dass Wasserstoff in die Rollen diffundiert. Die TDA zeigt auch eine positive Korrelation zwischen OB_{Ca}Sul-Gehalt und Konzentration von Wasserstoff, der für Diffusion zur Verfügung steht.

(Ruellan et al. 2021) zeigten, dass WEC und frühzeitige Lagerausfälle zuverlässig mit einem Öl reproduziert werden konnten, während ein anders Öl, das sich in drei Additiven unterschied (ein Additiv zur Änderung der Reibung und zwei Additive für extrem hohe Drücke (EP)), keine WEC und frühzeitigen Lagerausfälle zeigte, obwohl die me-

chanischen Beanspruchungen und die Gehalte von ZnDTP und OB_{Ca}Sul gleich waren. Für das Öl, welches WEC Schäden begünstigt hat, wurde ein erhöhter Wasserstoffgehalt im Lager nachgewiesen (Gutiérrez Guzmán 2020; Ruellan et al. 2021).

Im Forschungsvorhaben FVA 707-VI „Einfluss praxisrelevanter Schmierstoffformulierungen auf die Entstehung von White Etching Areas und White Etching Cracks“ (FVA 2022b) wird gezeigt, dass unter den gewählten WEC fördernden Mischreibungsbedingungen beim FE8-Axiallager-test mit den verwendeten aktuellen Schmierstoffformulierungen keine WEC Schäden erzeugt werden konnten, hingegen andere Schäden auftraten. Bei Verunreinigung des Öls mit Wasser (50 % bzw. 90 % Sättigung) traten dagegen WEC auf. An einem Radiallager-Prüfstand mit elektrischer Zusatzbeanspruchung zeigten sich unter Vollschmierung WEC-, aber auch andere Ermüdungsschäden.

Auch am Vierscheibenprüfstand traten WEC bei einer kombinierten mechanischen und Strombelastung auf. Der Stromfluss förderte, so vermuten die Autoren, den Eintrag von diffusiblem Wasserstoff in den Werkstoff und die Bildung von WEC (FVA 2022b). Ein einheitliches Bild zum Additiveinfluss ergab sich in diesen Untersuchungen nicht.

(Kürten et al. 2022) haben in Laborversuchen gezeigt, dass die Verwendung leitender ionischer Flüssigkeiten die WEC-Toleranz bei Stromdurchgang verbessern kann. Eine Steigerung der Lagerlebensdauer um 50 % konnte in ersten Versuchen gezeigt werden.

Pauschal ließ sich der negative Einfluss metallhaltiger Additive jedoch nicht bestätigen: Diverse Untersuchungen dokumentieren, dass es auf die Gesamtformulierung des Schmierstoffs (genaue Additivtypen und jeweilige Einsatzkonzentrationen) und andere, nicht schmierstoffbezogene Parameter ankommt. Auch in Hinsicht auf Schmierstoffe zeigt sich also, dass es sich bei WEC um einen multifaktoriellen Systemschaden handelt.

Zur Bewertung der Additivierung hinsichtlich der WEC-Neigung wurden bisher meist FE8-Tests mit Axialzylinderrollenlagern durchgeführt, z.B. nach (FVA 2019b).

Der Einfluss der Schmierstoffformulierung auf die WEC-Neigung ist aber stark abhängig von den Betriebsbedingungen bzw. dem WEC-Trigger (siehe Abb. 4.3). In den bekannten WEC-Prüfungen auf dem Schmierstoffprüfgerät FE8 mit Axialzylinderrollenlagern („High-speed mixed friction“: Mischreibung bei relativ hoher Drehzahl von 150 U/min) kommt es erfahrungsgemäß entweder zu frühen Ausfällen (< 100 h z.B. mit dem Öl „FE8 Low 320“) oder langen Laufzeiten ohne WEC-Ausfall (> 500 h mit Öl „R4G Low 320“). Im so genannten R4G-Test der Fa. Schaeffler (WEC-Ausfall bei Oberflächentrennung und hohem Wälzkörperschlupf infolge Planschens) ist der Schmierstoffeinfluss wesentlich geringer, und das Schmierstoffranking dreht sich um. Die WEC-Lebensdauer des Prüflagers NU222 ist mit dem Öl „FE8 Low 320“ sogar größer als mit dem Öl „R4G Low 320“. Auch bei strominduzierten WEC-Schäden gibt es diese beiden Fälle. Bis auf das Öl „FE8 Low 68“, das sich gegenüber dem „FE8 Low 320“ hauptsächlich in der Viskosität (ISO VG 320 vs. 68) unterscheidet, wurden die gleichen Schmierstoffe wie bei den WEC-Versuchen ohne Lagerstrom verwendet. Bei sehr kleinen Gleichströmen (< 100 µA, „E-Statics“), wie sie für elektrostatische Aufladungen (z. B. Riementrieb) typisch sind, hat die Schmierstoffformulierung entscheidenden Einfluss, wogegen dieser bei hohen Lagerströmen (> 100 mA „high currents“) für Ermüdungslebensdaueruntersuchungen eher gering ausfällt. Die Versuche wurden hierbei mit der gleichen Lagertypen NU205 auf dem gleichen Prüfstand (R4NN) durchgeführt.

4.3. STROMDURCHGANG

Elektrostatische Aufladungen z. B. zwischen Walzen von Papiermaschinen, in Riementrieben oder auch an Rotoren von Windkraftanlagen können nachweislich WEC-Schäden an Lagern verursachen. Die dabei nach dem Prinzip des Bandgenerators entstehenden Feldstärken im mit einem flüssigen Isolator gefüllten Schmier-spalt sind teilweise sehr hoch (> 10 kV/mm), die dabei auftretenden Gleichströme jedoch äußerst klein (< 1 mA). Für WEC-Ausfälle, die dabei immer nur an der Kathode (Minuspol) entstehen, scheint somit die elektrische Feldstärke treibend und damit eher die Lagerspannung eine Beanspruchungskenngröße zu sein (Loos et al. 2016).

Die Quelle von Lagerströmen können auch Wechselrichter sein, die in drehzahlvariablen Antrieben vermehrt eingesetzt werden. Die verursachten Rotor-Erd-, EDM- (Electric-Discharge-Machining) (Tischmacher 2017) oder Zirkularströme in den elektrischen Maschinen oder auch angrenzenden Aggregaten können ebenfalls WEC auslösen. Bei den dann relativ hohen Strömen (meist > 100 mA) kommt es häufig auch zu Stromdurchgangsmerkmalen in der Laufbahn infolge Blitzentladungen. Die Lagerspannung ist dabei teilweise deutlich kleiner als beim WEC-Schaden durch sehr hohe Feldstärken. Eine sinnvolle Beanspruchungskenngröße ist somit in diesem Fall eher die Stromstärke. Im Gegensatz zu WEC-Schäden durch hohe Feldstärken (Elektrostatik) können WEC hier an der Anode und der Kathode

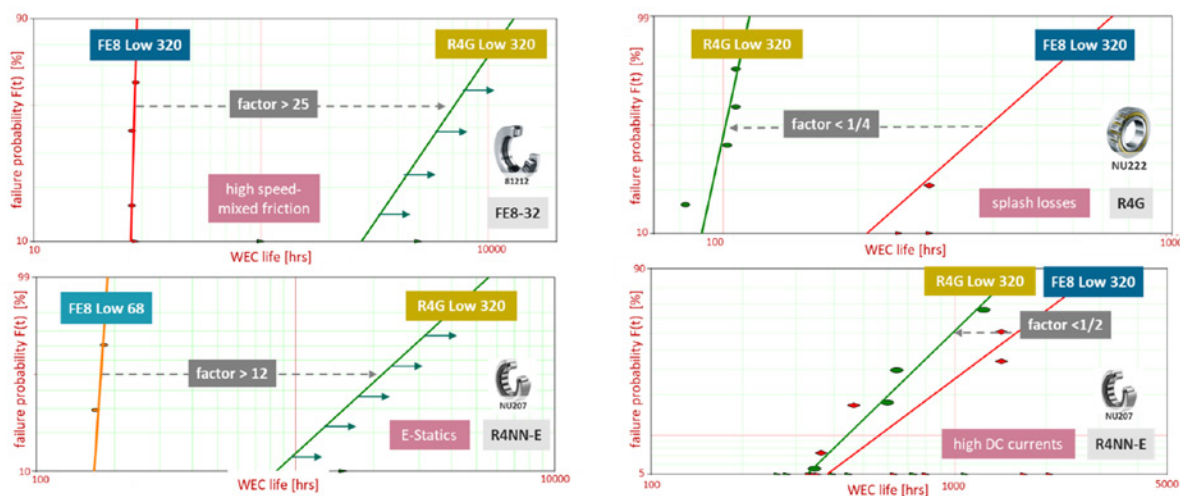


Abb. 4.3: Laufzeit bis zum WEC-Ausfall in Abhängigkeit von Schmierstoff und Betriebsbedingungen (Loos et al. 2022) (Low: Öle mit bestimmten Additivierungen, die in dem (im Ölnamen genannten) Testverfahren WEC fördernd waren)

(Loos et al. 2016) auftreten. Die Anode ist tendenziell sogar kritischer (FVA 2022b; Loos et al. 2016).

Die Ergebnisse im Forschungsvorhaben FVA 707-VI (FVA 2022b) zeigen, dass bei einer der mechanischen Belastung überlagerten Strombelastung im Wälzkontakt WEC Schäden unabhängig von den untersuchten Schmierstoffvarianten erzeugt werden konnten. Dabei zeigte sich eine tendenzielle Zunahme des atomaren Wasserstoffs im Werkstoff bei einer elektrischen Zusatzbeanspruchung. Demnach fördert der elektrische Stromfluss unabhängig von der Ölformulierung den Eintrag von diffusiblem Wasserstoff in den Werkstoff und die Bildung von WEC.

(Özel 2018) betrachtet schon moderate Pressungen von 1,05 GPa in Kombination mit entweder Stromdichten von 0,1 A/mm² oder einem Gehalt an diffusiblem Wasserstoff 1-2 ppm als WEC auslösend.

4.4. WASSERKONTAMINATION

Wasserkontamination kann unter Umständen die Bildung von WEC fördern und setzt wahrscheinlich die Beanspruchbarkeit gegen WEC herab. Dabei spielen laut (Richardson et al. 2018b) tribochemische Reaktionen eine wichtige Rolle. Diese treten besonders dann auf, wenn bereits eine geringfügige Vorschädigung durch Verschleiß vorhanden ist.

Eine Kontamination des Schmierstoffs mit Wasser kann hinsichtlich WEC-Bildung sehr problematisch sein; auch schwer entflammbare, wasserhaltige Hydraulikflüssigkeiten (HFC-Öle) können die WEC-Bildung befördern (Ruellan et al. 2014), (Iso et al. 2005), (Peter Kohl 2015).

Im Vortrag von (Strandell et al. 2010) wird gezeigt, dass Stillstandkorrosion, befördert durch Zugabe geringer Mengen an Wasser, die Lagerlebensdauer auf 1 % der nominellen L10 Lebensdauer reduzieren kann. Die Autoren berichten von ähnlichen Ergebnissen wasserstoffbeladener Lager in Komponententests und sehen die Testergebnisse als Unterstützung der Theorie diffusiblen Wasserstoffs mit einhergehender erheblicher Reduktion der Ermüdungslebensdauer von Lagern an.

Bereits (Cantley 1977) zeigt eindeutig, dass Wasser in Konzentrationen von 25ppm, 100ppm und 400ppm in einem SAE 20 Öl einen schädlichen Einfluss auf die Lagerlebensdauer von Kegelrollenlagern hat und korreliert diese Ergebnisse zur Additivierung des Öls. Bei synthetischen Ölen liegen die Grenzen deutlich höher.

(Haque et al. 2018) zeigen, dass metallhaltige Additive die WEC-Neigung durch Bildung von Tribofilmen mit hohen Reibwerten und Erhöhung des Wassergehalts im Schmiermittel stark fördern. Weiter zeigen sie, dass Wasser hier eine signifikante Quelle für den zur WEC-Bildung beitragenden Wasserstoff ist. Unter Verwendung von schwerem Wasser (D₂O) im Öl konnte Wasserkontamination als eine Ursache für Wasserstoffentstehung im Wälzkontakt identifiziert werden. Als Hypothese zur Wasserstoffentstehung wird eine „Wasserdissoziierung“ durch Reibkräfte im Tribofilm bzw. in der Reaktionsschicht gebundenes Wasser vorgeschlagen.

4.5. WASSERSTOFF

Für Lageranwendungen in wasserstoffreicher Atmosphäre gibt es Lösungen. (Kahlman 2018) zeigt, dass Hybridlager mit Keramik-Wälzkörpern, PEEK-Käfigen und Lagerringen aus sehr zähem rostfreien Lagerstahl (X30CrMoN15-1) erfolgreich bei Betrieb mit korrosivem Sauerstoff mit hohem H₂S-Gehalt eingesetzt werden können.

4.6. ZUSATZLASTEN

Eine diskutierte mechanische Beanspruchungsgröße sind Spannungsspitzen (bis hin zu plastischer Verformung) im Wälzkontakt, die aber nicht über die gesamte Betriebsdauer anliegen müssen (Manieri et al. 2019; Stadler et al. 2017). Sie können durch extreme Betriebsbedingungen oder durch ungleichmäßige Lastverteilung im Lager (Kantenträgern) entstehen.

In (Manieri et al. 2019) wurden die Prüfkörper im Micropitting Test Rig (MPR) dauerhaft mit 1,9 GPa belastet. Bei dieser Prüfgeometrie führte dies bewusst zu anfänglich sehr hohen Belastungen an den Rollenkanten (plastische Verformung möglich), welche sich durch Verschleiß abbauen. Bei (Stadler et al. 2017) wurden Pendelrollenlager kurzfristig im Minutenbereich sehr hoch be-

lastet, was aufgrund der rein axialen Belastung des Radiallagers auch zu einer lokalen plastischen Verformung führte. Nach anschließender „normaler“ radialer Belastung (Laufzeit > 1000h) der Lager wurden in beiden Fällen in den zuvor überbelasteten Bereichen unterhalb der Oberfläche am Außenring (auch ohne Schälungen an der Oberfläche) extrem große WEC-Netzwerke gefunden.

Nach (Franke et al. 2020) lag in den beiden oben genannten Quellen neben den hohen Spannungsspitzen gleichzeitig eine hohe Reibenergie-dichte vor, die ebenfalls schadigungsrelevant ist.

Zur Klärung, ob eine kurzzeitige Überlast (unter 4 GPa) die Wälzlagerlebensdauer reduzieren kann, gab es eine Reihe von Wälzlagertests. In den FVA Vorhaben 541-I Wälzlagerlebensdauer-Windgetriebe (FVA 2011) und 866-I Kurzfristige Überlasten (FVA 2022a) wurden eine Vielzahl von Ermüdungsversuchen mit unterschiedlich großen Zylinderrollenlagern durchgeführt, die zeigen, dass anfänglich hohe Überlasten von 1 bis 10 h Dauer bis 3800 MPa Hertzscher Pressung keine vorzeitigen Ausfälle verursachten.

Tritt gleichzeitig erhöhter Schlupf auf, kann eine beschleunigte WEA-Bildung durch hohe Pressungen beobachtet werden wie (Bruce et al. 2018) in Tribometerversuchen (2-Scheibenversuch $p_H > 2,4$ GPa und Schlupf > 5 %) zeigt.

In (Lai und Stadler 2016) wurden durch bewusstes Einbringen von Welligkeit des Lagerinnenringsitzes lokale Zugspannungen provoziert. Sehr hohe Zugspannungen führten dabei zu einer Axialrisseinleitung mit stark beschleunigter Ausbreitung ohne WEA-Dekoration. Geringere Zugspannungen führten zu einer Axialrisseinleitung, jedoch nicht sofort zu einem Ausfall. Das heißt, die

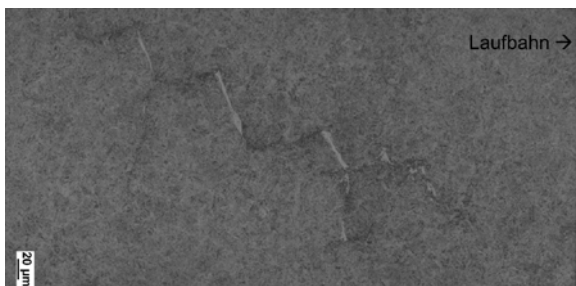


Abb. 4.4: Treppenförmige Rissausbreitung (Quelle SKF)

Rissausbreitung mit einhergehender Rissflankenreibung führte zu den typischen treppenlaufförmigen Rissen (s. Abb. 4.4) mit WEA-Dekoration. Beide Fälle führen jedoch zu einem vorzeitigen Ausfall des Lagerinnenrings.

In den Erklärungsansätzen für die oben genannte Arbeiten ist sich die Fachwelt noch nicht vollständig einig, ob Spannungsspitzen allein oder die Kombination mit Reibung/Schlupf für die WEC-Bildung ausschlaggebend sind.

4.7. VIBRATIONEN

Es gibt viele Indizien, dass Drehschwingungen und Vibrationen, wie sie z.B. in Riementrieben (Tamada und Tanaka 1996) oder CVT-Getrieben auftreten können, eine kritische WEC-Zusatzbeanspruchung darstellen. (Tamada und Tanaka 1996) konnten z. B. über eine hohe erzwungene Drehdynamik WEC an Kugellagern erzeugen. (Holweger et al. 2015; Loos et al. 2015) konnten WEC am Außenring von Umlenkrollen infolge hochfrequenter Schwingungen (Vibrationen) erzeugen. Die Anregung erfolgte hierbei über einen Zahnriemen, der mit seiner Rückseite auf der Umlenkrolle auflag. Die WEC-Lebensdauer der Prüflager hing sehr stark vom verwendeten Riemen ab und korrelierte mit der an der Anschraubung der Umlenkrolle gemessenen Beschleunigung (Vibration).

4.8. REIBUNG

Eine Reihe von Publikationen berichtet, dass WEC verstärkt unter Bereichen erhöhten Schlupfs entstehen (Ruellan et al. 2015) und damit das Produkt aus Pressung und (Relativ-)Geschwindigkeit (der $p*v$ -Wert) als mechanischer Treiber der WEC Bildung angesehen werden kann. (Bruce et al. 2018) berichten, dass in ihren detailliert ausgewerteten Versuchen WEC unter der Oberfläche ab einer Hertzschen Belastung von 2,42 GPa und einem Slide to Roll Ratio (SRR) von 5 % beobachtet wurden. Die Abb. 4.5 (Richardson et al. 2018b) zeigt, dass WEC in Bereichen hoher Gleitenergie ($p*v$) in der Mischreibung auftreten, wobei Bereiche negativen Schlupfs (außen) signifikant mehr WEC zeigen, möglicherweise durch das verstärkte Reiben der Rissflanken unter Druckbelastung. (Gutiérrez Guzmán 2020)

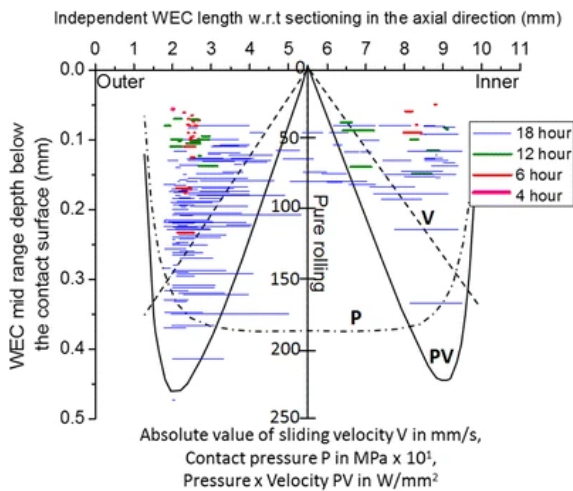


Abb. 4.5: The Evolution of White Etching Cracks (WEC) in Rolling Contact Fatigue-Tested 100Cr6 Steel Cylindrical Roller Thrust Bearings (CRTBs). (Richardson et al. 2018b)

(Kruhöffner und Loos 2017) entwickeln aus diesem Ansatz ein Kriterium der akkumulierten Reibungsenergie für die Bewertung der WEC-Risiken. Dieser Ansatz berücksichtigt den lokalen $p \cdot v$ -Wert, die relative Schmierfilmdicke λ für die Berechnung des lokalen Festkörperkontakt-drucks und die Regenerationszeit zwischen Kontaktvorgängen auf Rauheitsebene. Mit diesem Ansatz gelingt es unter anderem, die WEC Lebensdauer als Funktion der Drehzahl und den Ort der höheren WEC Neigung (s. Abb. 4.5) in den getesteten Axialzylinderrollenlagern zu erklären.

Allerdings zeigen mehrere experimentelle Untersuchungen (Seyfert et al. 2017; FVA 2022b), dass keine Korrelation zwischen der für verschiedene Schmierstoffe gemessener Gesamtreibung und Ausfall im FE8-Test gefunden wurde. Der Reibwert im FE8-Test ist kein Maß für die WEC-Kritikalität der Schmierstoffformulierung.

5. METHODEN ZUR SCHADENSANALYSE UND RISIKOABSCHÄTZUNG

Motivation für eine Risikoabschätzung können grundsätzlich zwei Szenarien sein. Einerseits kann ein Schaden in einem ausgeführten Lager aus der Serie Anlass für eine Untersuchung sein, andererseits kann die Frage nach dem Risiko für das Auftreten von WEC bei einer Neuentwicklung auftreten.

5.1. SCHADENSANALYSE

In Anlehnung an den Entwurf der VDI 3822 „Grundlagen und Durchführung einer Schadensanalyse, August 2020“ führt das erste Szenario auf ein Arbeitsprogramm, das schrittweise, sorgfältig und vollständig bearbeitet werden sollte.

Arbeitsprogramm in Stichpunkten:

1. Bestandsaufnahme
 - Dokumentation der Betriebs-/ Systembedingungen
 - Visuelle Begutachtung
2. Instrumentelle Analyse
 - Ultraschalluntersuchung
 - Metallografische Untersuchung
3. Ermittlung Schadensursache
 - Systemanalyse („Fishbone“)
 - Risikobewertung

Dabei sollten die betroffenen Lager zunächst in eingebautem Zustand in der Maschine bzw. Anlage unter Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen dokumentiert werden. Die Laufzeithistorie (Laufzeit, Überrollung, Schmierstoffe) einschließlich etwaiger außergewöhnlicher Ereignisse und Messwerte sollte festgehalten werden. Wenn möglich sollten Schmierstoffproben an mehreren Orten entnommen werden und anschließend analysiert werden. Bruchstücke, Verschleiß- oder Schmutzpartikel sind zu dokumentieren. Nach dem Ausbau sind die Lager zu begutachten (komplettes Lager, Innenring, Außenring, Wälzkörper, Käfig) und zu dokumentieren. Erste Hinweise auf mögliche WEC-Schäden können Axialrisse über der Lagerbreite oder ‚kleine‘ Axialrisse mit vielen kleinen verteilten Ausbrüchen sein (vgl. Abb. 2.2 und Abb. 2.5).

Eine Ultraschallprüfung (Frequenz > 20MHz, hochauflösende Verfahren sind notwendig) kann helfen, Bereiche mit Rissnetzwerken zu detektieren oder Bereiche für das Schneiden der Ringe zu identifizieren. Anschließend sind im Labor Schlitze axial und in Umfangsrichtung (Abb. 2.3 und Abb. 2.4) sowohl im Schaden als auch in dessen Nähe anzufertigen und das Gefüge zu analysieren. Zur Detektierung der weiß anätzenden Bereiche (WEA) ist eine Ätzung (Nital, Pikral) erforderlich.

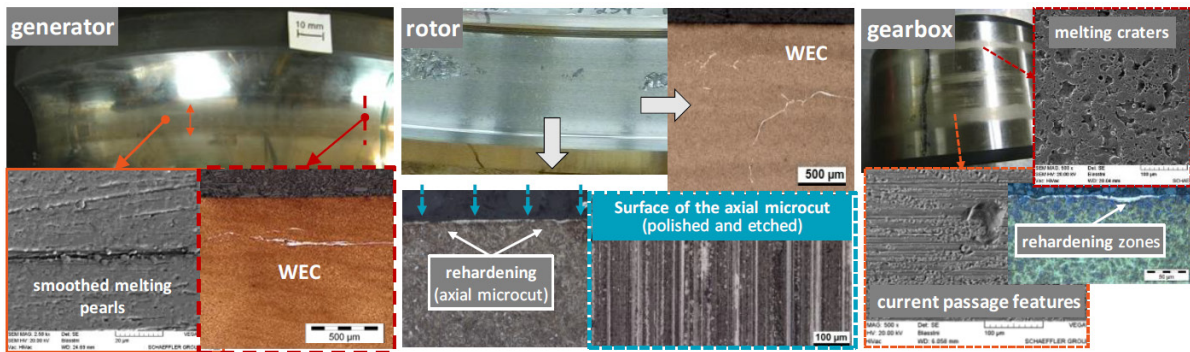


Abb. 5.1: Windturbinenlager mit Stromdurchgang (Loos et al. 2019b)

Eine solche Ätzung kann auch helfen, Stromdurchgang im Lager sichtbar zu machen (Neuhärtung Abb. 5.1, White-Layer & Stromdurchgang ISO 15243). Bei WEC infolge großer Feldstärken (Loos et al. 2016) oder in Anwendungen mit größeren Mischreibungsanteilen (Loos et al. 2019b) konnten die klassischen Schmelzstrukturen nicht nachgewiesen werden.

Die Bestimmung des für die Schädigung relevanten Wasserstoffgehalts für Lager, die im Betrieb waren, ist ausgesprochen schwierig. Eine sinnvolle Ergänzung zum Ausschluss anderer Scha-

densursachen kann die Bestimmung der Werkstoffqualität (z.B. chemische Zusammensetzung, Reinheitsgrad, Härte, Mikrohärtigkeit) sein. Mit diesen Informationen kann begonnen werden, eine Einflussanalyse auf Systemebene (z.B. Fishbone s. Abb. 5.2) zu erstellen, Schadenshypothesen aufzustellen und wenn möglich zu überprüfen. Treten Schäden in der Serie auf, so ist eine statistische Auswertung der Laufzeiten und die Analyse weiterer (auch schadensfreier) Lager zu empfehlen. Auf dieser Basis kann dann eine quantitative Risikoabschätzung erstellt werden.

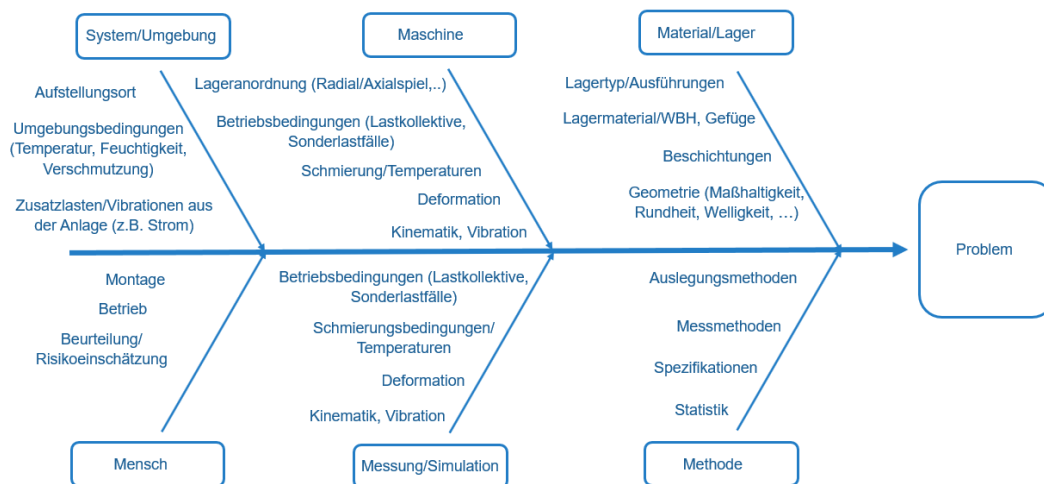


Abb. 5.2: „Allgemeines Fishbone“ zu Bauteil—Schäden (WBH – Wärmebehandlung)

5.2. RISIKOABSCHÄTZUNG

Zur allgemeinen Abschätzung der WEC-Risiken empfiehlt es sich, gemäß Kapitel 4 die relevanten Einflussgrößen zu überprüfen.

Es ist zu prüfen, ob es Auffälligkeiten im Tragbild gibt. Die verfügbaren Informationen zum Schmierstoff (Datenblatt) und zur Schmierstoffhistorie sind zu sichten, wobei auf die Betriebs- und Einsatzbedingungen (Temperatur, Füllmenge, Mischreibung, Wassergehalt, ...) zu achten ist. Der Vergleich mit Lagern ähnlicher Maschinen oder auch Testerfahrung kann wichtige Hinweise geben.

Die Ausfallstatistik und Erfahrungswissen zu vergleichbaren Anlagen oder auch den anderen La-

gern in der gleichen Maschine sollte für eine Beurteilung herangezogen werden.

Es sollte überprüft werden, ob ein WEC-empfindlicher Werkstoff, (Zusammensetzung, Wärmebehandlung, Oberflächenbehandlung, s. Abb. 4.1) eingesetzt wird.

Weiter ist die Möglichkeit auftretender Lagerströme (Strompfad?) zu überprüfen; ggfs. sind Messungen zu veranlassen.

Analog sind mögliche hohe Gleitreibung (Schlupf), verursacht z.B. durch Planschverluste im Lager zu bewerten und die Möglichkeit hoher Vibrationen (z.B. Riementrieb) einzubeziehen.

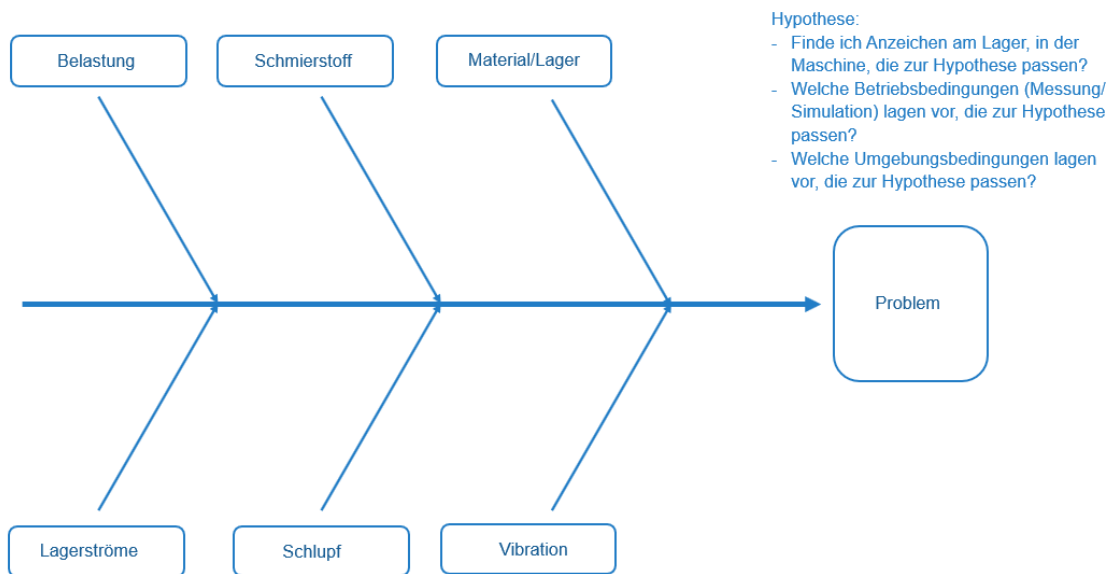


Abb. 5.3: „WEC Fishbone“ (Blaupause)

6. ABHILFEMASSNAHMEN

Aus der Literatur sind unterschiedliche Abhilfemaßnahmen gegen die Entstehung von WEC bekannt. Im Folgenden werden die Abhilfemaßnahmen in Bezug auf die Faktoren Werkstoff, Wärmebehandlung, Beschichtung und Schmierstoff gegliedert und die wirkenden Mechanismen beschrieben (vgl. Abb. 6.1).

Werkstoff

Der verwendete Werkstoff spielt bei der Entstehung von WEC in Wälzlagern eine entscheidende Rolle. Etwaige instabile Gefügestrukturen begünstigen die Bildung von weiß anätzenden nanokristallinen Mikrostrukturen und beschleunigen die Gefügeumwandlung während des Ermüdungsprozesses. Um diesen Effekten entgegenzuwirken, zielen Legierungen als Gegenmaßnahmen auf die Beeinflussung der Gefügestruktur (Stabilisierung und Stärkung der Matrix, Vermeidung von nanokristallinem Gefüge), auf die Reduzierung der Rissbildung durch Senkung der Versprödungsneigung und auf die Passivierung der Oberfläche ab.

In Bezug auf die WEC-Lebensdauer besitzen verschiedene Legierungskonzepte das Potential, die Versprödungsneigung zu senken und somit unter Wasserstoffeinfluss längere Lebensdauern bis zum WEC-Ausfall zu bewirken. Dies wurde beispielsweise durch Untersuchungen von (Yamada und Uyama 2015) bestätigt. Dabei wurde bei verschiedenen Lagerstählen die Elemente Mangan, Silizium, Chrom und Molybdän hinzulegiert.

Durch die Reduktion des Kohlenstoffgehaltes kann die Bildung von weiß anätzendem nanokristallinen Gefüge vermieden werden. (Blass et al. 2017a) konnten durch die Verwendung von kohlenstoffreduzierten Stählen (SAE 4320 und 50CrMo4) eine erhöhte Lebensdauer erzielen. Zuverlässig kann nanokristallines Gefüge zudem durch die Anreicherung mit Carbonitriden vermieden werden (FVA 2022d).

Die Verwendung der Legierungselemente Stickstoff, Silizium und Nickel ermöglicht eine Stärkung der Korngrenzen und damit der Matrix (Evans 2012; Matsumoto et al. 2002). So bewirkt die erhöhte Resistenz des Stahls M50NiL gegen Plastifizierung (im Vergleich zu 100Cr6) eine Verzögerung der Bildung von WEC (Braza et al. 1993).

Die Passivierung der Oberflächen, und damit ein geringer Eintrag von Wasserstoff, kann nach (Evans 2016) durch die Verwendung von Stählen mit erhöhtem Chromgehalt erreicht werden. In (Evans 2016) und (NSK Ltd. 2004) wird ein erhöhter Anteil an homogen verteilten Chromkarbiden (z.B. in SHJ5 und ES1) als effektive Gegenmaßnahme gegenüber der Wasserstofffreisetzung genannt, wodurch eine Senkung des WEC-Risikos erzielt wird (NSK Ltd. 2004).

Ergänzend zu den hier aufgeführten werkstoffspezifischen Abhilfemaßnahmen sind gängige Lagerstähle und deren Neigung zu WEC in Abb. 4.1 genannt.



Werkstoff

Legierung mit Cr

- Passivierung der Oberfläche
- Feinere Verteilung von Karbiden

Legierung mit N, Si und Ni

- Stärkung der Korngrenzen und der Matrix

Reduktion des Kohlenstoffgehaltes

- Vermeidung von nanokristallinem Gefüge

Legierung mit Mn, Si, Cr und Mo

- Verringerung der Versprödungsneigung



Oberflächenbehandlung

Aufbringen von Brünierungen

- Schaffung einer Diffusionsbarriere
- Verringerung des Reibungskoeffizienten



Wärmebehandlung

Einsatzhärten

- Einbringen von Druckeigenstressungen
- Erhöhung des Restaustenitgehalts

Carbonitrieren

- Stärkung der Matrix
- Verringerung der Korrosion
- Reduzierung der Wasserstoffdiffusion



Schmierstoff

Schmierstoffkomposition

- Wechsel zu WEC ‚unkritischem‘ Schmierstoff

Abb. 6.1: Mögliche Abhilfemaßnahmen und ihre Wirkhypothesen zur Reduktion von WEC-Risiken angelehnt an FVA 707 VII (FVA 2022d).

Wärmebehandlung

Durch die hier beschriebenen Wärmebehandlungen der Oberfläche werden Druckeigenspannungen in das Gefüge eingebracht und der dortige Restaustenitgehalt erhöht. Auf diese Weise wird die Wasserstoffdiffusion verlangsamt, was zu einer Verlängerung der Laufzeit bis zum Eintritt des WEC-Schadens führt.

Durch das Einsatzhärten werden über die Mischkristallverfestigung vorteilhafte Druckeigenspannungen in den Werkstoff eingebracht (Gould et al. 2019b; Paladugu et al. 2019; Paladugu und Hyde 2020). Auch das Einstellen eines erhöhten Restaustenit-Anteils (Gehalt >20 %) ist dadurch möglich. Beides führt zu einer Erhöhung der Resistenz gegenüber Ermüdungsschäden und der Bildung von WEC-Schäden (Errichello et al. 2013; Roy et al. 2019). Die Verwendung von einsatzgehärteten Lagern im Vergleich zu durchgehärteten Lagern führte in Versuchen zu einer Reduktion der WEC Ausfallrate von 40 % auf 2,7 % (Luyckx 2012; Luyckx 2011).

Weitere Resistenz gegen WEC konnte mittels Carbonitrieren erzielt werden (NSK Ltd. 2004; Xiangduo et al. 2008; Tanaka et al. 2002). Dies führt neben einer Stärkung der Matrix, welche einer mechanischen Zersetzung der Mikrostruktur entgegenwirkt, zu einer verringerten Korrosion und Wasserstoffdiffusion. Von (Yamada und Uyama 2015) wird bspw. an Rillenkugellagerversuchen gezeigt, dass sowohl legierte als auch aufgekohlte (SAE5210) und carbonitrierte Stähle eine höhere WEC-Lebensdauer aufweisen als der herkömmliche 100Cr6 Stahl. In Prüfstandversuchen konnte die stabilisierende Wirkung von (Carbo-) Nitriden und ihr Einfluss auf WEC-Resistenz von carbonitriertem Stahl (X30CrMoN15-1) bestätigt werden (Blass et al. 2017b; Qin et al. 2020). Die Wälzlagerhersteller haben Lager aus unterschiedlichen Werkstoffen und mit unterschiedlichen Wärmebehandlungen im Angebot. Im Falle eines WEC-Schadens wird empfohlen, mit dem Hersteller abzustimmen, welche Kombination von Werkstoff und Wärmebehandlung für den betroffenen Lagertyp verfügbar ist.

Oberflächenbehandlung

Neben der direkten Werkstoffbeeinflussung durch Legierungselemente oder der Wärmebehandlungen kann auch eine Beschichtung zur Risikoreduktion von WEC-Bildung beitragen. Durch das Schaffen einer Oberflächenbarriere kann die Diffusion von Wasserstoff in den Lagerwerkstoff verringert werden. Eine Reibungsreduzierende Beschichtung kann darüber hinaus dazu beitragen, WEC-fördernde Schubspannungen in der Oberfläche zu reduzieren.

Ein bekanntes Beispiel für die Schaffung einer Barriere gegen die Diffusion von Wasserstoff ist die Anwendung von Brüniertechniken zur Bildung einer Schwarzoxidschicht (engl. „Black Oxide Layer“). Durch das Anbringen einer Brünie rung (Evans et al. 2015; Ooi et al. 2019; Stadler et al. 2015a) kann zudem der Reibungskoeffizient und damit die Oberflächenreibung zwischen Wälzkörper und Lauffläche reduziert werden. Dies resultiert in einer teilweisen Reduzierung der Schubspannungen im Werkstoff, welche in Zusammenhang mit der Entstehung von WEC gebracht werden (Dhanola und Garg 2020).

Schmierstoff

Bei der Bildung von WEC-Schäden handelt es sich um ein komplexes Systemphänomen, welches von mehreren Faktoren abhängt. Als ein, aber nicht alleiniger Faktor sind dabei „WEC kritische“ Schmierstoffe zu sehen.

Für einige Anwendungen (z.B. Wind- und Automobilgetriebe) konnte für die verwendeten, hochadditivierten Schmierstoffe nachgewiesen werden, dass diese durch Wechselwirkungen im Tribokontakt die Bildung von WEC fördern. In einigen Anwendungen konnte durch den Wechsel auf einen „WEC unkritischeren“ Schmierstoff, ohne weitere konstruktive Änderungen, die Bildung von WEC-Schäden vermieden werden. Dabei ist jedoch zu bedenken, dass bei dem Wechsel des Schmierstoffs die Gesamtfunktionalität in der Anwendung berücksichtigt wird, um nicht andere Schadensbilder (z.B. Graufleckigkeit) zu provozieren. Wichtig ist anzumerken, dass etwaige Lager-Vorschädigungen durch einen Schmierstoffwechsel nicht behoben werden.

„WEC unkritischerer“ Schmierstoffe sind im Markt für nahezu alle Einsatzzwecke verfügbar. Dabei ist nach aktuellem Stand der Forschung keine eindeutige Zuordnung zur chemischen Komposition möglich. Eine Verifizierung kann entsprechend nur durch Prüfergebnisse erfolgen. Zu den Prüfverfahren zählen beispielsweise das FE8-Prüfverfahren nach FVA 707-V (FVA 2019a) bzw. der VW-Pittingtest (PV1483) oder der ZF-Pittingtest (0000 702 232).

Konstruktive Maßnahmen

Aufgrund der vielen Einflussfaktoren und deren Wechselwirkung können keine allgemeingültigen Empfehlungen für konstruktive Abhilfemaßnahmen gegeben werden. Diese sind immer im Einzelfall zu prüfen; dabei sind die möglichen Risiken durch konstruktive Änderungen zu bewerten.

Wie in Kapitel 4 diskutiert, führt eine hohe Oberflächenreibung z.B. durch erhöhte Schlupfbeträge oder unzureichende hydrodynamische Oberflächentrennung, z.B. in transienten Betriebszuständen, zu einer zusätzlichen Schubbeanspruchung im Werkstoff. Hier kann eine Änderung des Lagertyps bzw. der Lageranordnung die Änderung der Betriebsviskosität oder der Wechsel

des Schmierstoffs zu einer Verbesserung führen, hierzu wird empfohlen die jeweiligen Hersteller zu konsultieren.

Besteht der Verdacht von Stromdurchgang durch das Lager, sollte das Erdungskonzept und die Möglichkeit einer Isolierung geprüft und ggf. angepasst werden.

Resümee

Das Auftreten von WEC-Schäden ist auf eine Vielzahl von Schadenseinflüssen zurückzuführen. Der Einsatz einer universellen Abwehrmaßnahme ist aufgrund der Vielzahl von Einflussfaktoren und der aktuell andauernden Erforschung nicht möglich. Besonders zielführend und in der industriellen Praxis bereits umgesetzt sind jedoch das Aufbringen von Brünierungen auf die Lauffläche der Wälzlager, die Verwendung von einsatzgehärteten oder carbonitrierten Lagern und der Wechsel zu „WEC unkritischeren“ Schmierstoffen. Neben den aufgezeigten Abhilfemaßnahmen werden im FVA Vorhaben 707 VII „WEC: Wärmebehandlung und Werkstoffe Gegenmaßnahmen“ (FVA 2022d) weitere Handlungsmöglichkeiten zur WEC-Risikominimierung diskutiert.

7. ZUSAMMENFASSUNG

White Etching Cracks (WEC) sind Rissnetzwerke, vorzugsweise in Wälzlagern nachgewiesen, die im metallographischen Schliff von weiß anätzenden Bereichen flankiert werden und zu Frühausfällen führen. WEC treten im Bereich der maximalen Vergleichsspannungen unterhalb der Oberfläche im Wälzkontakt auf, in dem potenziell auch hohe Wasserstoffkonzentrationen anzutreffen sind. Die Risse gehen oft von sehr kleinen nichtmetallischen Einschlüssen aus, die auch im Kontext einer hohen Stahlreinheit zulässig und technisch nicht vermeidbar sind. Es ist davon auszugehen, dass in den betroffenen Anwendungen mit WEC-Lagerschäden entweder die WEC-Beanspruchung unerwartet höher war als in der dazugehörigen Auslegung, und/oder die WEC-Beanspruchbarkeit der Lager wurde aufgrund verschiedener Einflüsse herabgesetzt. In der nicht abgeschlossenen Diskussion möglicher Ursachen für WEC spielt der flüchtige und schwer nachweisbare Wasserstoff

eine wichtige Rolle. Stromdurchgang, hohe Reibung, Wasserkontamination und aggressive Medien können das Wasserstoffangebot erhöhen, eine Diffusionsbarriere (z.B. Brünieren) das Angebot mindern. Für bestimmte Stähle und Oberflächenbehandlungen ist die WEC-Neigung ausgeprägter als für andere. Zu den akzeptierten Einflussgrößen auf WEC gehören Zusatzlasten, Schlupf, Stromdurchgang, Vibrationen und Wasser im Schmierstoff. Abhängig von den Betriebsbedingungen kann die Öladditivierung ebenfalls eine große Rolle spielen.

WEC sind ein Systemphänomen mit komplexen, nicht vollständig verstandenen Ursache-Wirkungs-Beziehungen und können daher nicht eindeutig einem einzelnen „Root Cause“ zugeordnet werden.

8. LITERATURVERZEICHNIS

- » Birnbaum, H. K.; Sofronis, P. (1994): Hydrogen-enhanced localized plasticity—a mechanism for hydrogen-related fracture. In: *Materials Science and Engineering: A* 176 (1-2), S. 191–202. DOI: 10.1016/0921-5093(94)90975-X.
- » Blass, T.; Dinkel, M.; Trojahn, W. (2016): Bearing performance as a function of structure and heat treatment. In: *Materials Science and Technology* 32 (11), S. 1079–1085. DOI: 10.1080/02670836.2015.1120999.
- » Blass, T.; Trojahn, W.; Merk, D. (2017a): Influence of Material and Heat Treatment on the Formation of WECs on Test Rig FE8. In: 11th International Symposium on Rolling Bearing Steels: Progress in Bearing Steel Technologies and Bearing Steel Quality Assurance: ASTM International, S. 129–150. Online verfügbar unter <https://www.astm.org/stp160020160139.html>.
- » Blass, T.; Trojahn, W.; Merk, D.; Beswick J.M. (2017b): Influence of material and heat treatment on the formation of WECs on Test Rig FE8. In: *ROLLING ELEMENT BEARINGS, 9TH VOL STP 1600*. DOI: 10.1520/STP160020760139.
- » Blass, T.; Xu, X.; Wunder, K.; Trojahn, W.; Geng, K.; Li, F. (2020): Influence of Steel Cleanliness on RCF and WEC Formation. In: Beswick (Hg.): *Bearing Steel Technologies: 12th Volume, Progress in Bearing Steel Metallurgical Testing and Quality Assurance*. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International, S. 26–49.
- » Braza, J. F.; Pearson, P. K.; Hannigan, C. J. (1993): The Performance of 52100, M-50, and M-50 NiL Steels in Radial Bearings. In: *International Off-Highway & Powerplant Congress & Exposition*: SAE International.
- » Bruce, T. (2016): Analysis of the premature failure of wind turbine gearbox bearings. Dissertation. University of Sheffield, Sheffield. Faculty of Engineering; Mechanical Engineering. Online verfügbar unter <https://etheses.whiterose.ac.uk/13903/>.
- » Bruce, T.; Long, H.; Dwyer-Joyce, R. S. (2018): Threshold Maps for Inclusion-Initiated Micro-Cracks and White Etching Areas in Bearing Steel: The Role of Impact Loading and Surface Sliding. In: *Tribol Lett* 66 (3), S. 111. DOI: 10.1007/s11249-018-1068-0.
- » Cantley, R. E. (1977): The Effect of Water in Lubricating Oil on Bearing Fatigue Life. In: *A S L E Transactions* 20 (3), S. 244–248. DOI: 10.1080/05698197708982838.
- » Danielsen, H. K.; Carrasco, A. J.; Fæster, S.; Dahl, K. V.; Guzmán, F. Gutiérrez; Sauvage, P.; Jacobs, G. (2019): 3D X-ray computerized tomography of White Etching Cracks (WEC). In: *MATERIALS CHARACTERIZATION* 150, S. 78–87. DOI: 10.1016/j.matchar.2019.01.032.
- » Dhanola, Anil; Garg, H. C. (2020): Tribological challenges and advancements in wind turbine bearings: A review. In: *ENGINEERING FAILURE ANALYSIS* 118. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104885.
- » Diederichs, A. M.; Schwedt, A.; Mayer, J.; Dreifert, T. (2016): Electron microscopy analysis of structural changes within white etching areas. In: *Materials Science and Technology* 32 (16), S. 1683–1693. DOI: 10.1080/02670836.2016.1139030.
- » Dresel, W.; Mang, T. (2017): *Lubricants and lubrication*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- » Errichello, R.; Budny, R.; Eckert, R. (2013): Investigations of Bearing Failures Associated with White Etching Areas (WEAs) in Wind Turbine Gearboxes. In: *Tribology Transactions* 56 (6), S. 1069–1076. DOI: 10.1080/10402004.2013.823531.
- » Evans, M.-H. (2016): An updated review: white etching cracks (WECs) and axial cracks in wind turbine gearbox bearings. In: *Materials Science and Technology* 32 (11), S. 1133–1169. DOI: 10.1080/02670836.2015.1133022.

- » Evans, M-H (2012): White structure flaking (WSF) in wind turbine gearbox bearings: effects of 'butterflies' and white etching cracks (WECs). In: *Materials Science and Technology* 28 (1), S. 3–22. DOI: 10.1179/026708311X13135950699254.
- » Evans, R. D.; Hager, C. H.; Kang, Y. S.; Doll, G. L. (2015): Comparison of Black Oxide and Tungsten Carbide–Reinforced Diamond-Like Carbon (WC/a-C:H) Surface Treatments for Rolling Element Bearings. In: *Tribology Transactions* 58 (3), S. 444–453. DOI: 10.1080/10402004.2014.983253.
- » Franke, J.; Fritz, J.; Koenig, T.; Merk, D. (2023): Influence of Tribolayer on Rolling Bearing Fatigue Performed on an FE8 Test Rig—A Follow-up. In: *Lubricants* 11 (3), S. 123. DOI: 10.3390/lubricants11030123.
- » Franke, J.; Holweger, W.; Surborg, H.; Blass, T.; Fahl, J.; Elfrath, T.; Merk, D. (2014): Influence of tribolayer on rolling bearing fatigue performed on a FE8 test rig. Hg. v. TAE Technische Akademie Esslingen. Esslingen (TAE 19th international colloquium tribology (p. 13)).
- » Franke, J.; Loos, J.; Kruhoeffer, W.; Merk, D.; Blass, T. (2020): Influence of Oil Formulation on White Etching Crack Formation Depending on WEC Main Mechanism. Hg. v. TAE Technische Akademie Esslingen. Esslingen.
- » FVA (2011): Wälzlagerlebensdauer-Windgetriebe; Berücksichtigung von Betriebszuständen, Sonderereignissen und Überlasten bei der Berechnung der Wälzlager-Lebensdauer in Windenergieanlagen und Großgetrieben. Vorhaben Nr. 541-I. Abschlussbericht. Unter Mitarbeit von Brit Hacke (IMKT), Benjamin Radnai (MEGET) und Karsten Hinkelmann (IMAB). Hg. v. FVA. Frankfurt am Main (Heft 967).
- » FVA (2017a): Risse auf Lagerringen - Gefügeveränderungen in Wälzlagererringen mit Rissen als Folgeschaden. Vorhaben Nr. 707-II. Abschlussbericht. Unter Mitarbeit von Dipl.-Ing. Francisco Gutiérrez Guzmán, (IME RWTH Aachen), Dipl.-Ing. Mehmet Özel, (RWTH Aachen IWM) und M. Eng. Philippe Pinard, (RWTH Aachen GFE). Hg. v. FVA. Frankfurt am Main (1229).
- » FVA (2017b): Prüfmethode Öle, Wälzlagerermüdung. Vorhaben Nr. 643-I Entwicklung einer FVA-Prüfmethode zur Beurteilung von Ölen für Getriebe im Hinblick auf Ermüdung von Wälzlagern. Abschlussbericht. Unter Mitarbeit von Dipl.-Ing. Carsten Fenske & Dipl.-Ing. Richard Thies (Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und Institut für Maschinenkonstruktion (IMK)). Hg. v. FVA. Frankfurt am Main (Abschlussbericht, 1214).
- » FVA (2019a): Risse auf Lagerringen - Ringversuch Ringversuch zur reproduzierbaren Erzeugung von Gefügeveränderungen in Wälzlagern mit Rissen als Folgeschaden. Vorhaben Nr. 707-V. Abschlussbericht. Unter Mitarbeit von Martin Linzmayer (MSE RWTH Aachen). Hg. v. FVA. Frankfurt am Main (1357).
- » FVA (2019b): Risse auf Lagerringen - Wasserstoffdetektion Detektion von diffusiblem Wasserstoff im Hinblick auf Gefügeänderungen in Wälzlagern mit Rissen als Folgeschaden. Vorhaben Nr. 707-IV. Abschlussbericht. Unter Mitarbeit von Martin Linzmayer (MSE RWTH Aachen), Francisco Gutierrez Guzman (MSE RWTH Aachen), Florian Steinweg (IWM RWTH Aachen), IWM RWTH Aachen (Mehmet Özel), Adrian Mikitisin (GFE RWTH Aachen) und WP RUB Bochum (Gregor Manke). Hg. v. FVA. Frankfurt am Main (1356).
- » FVA (2021): Risse auf Lagerringen - Gefügeveränderungen in Wälzlagererringen mit Rissen als Folgeschaden. Vorhaben Nr. 707-III. Abschlussbericht. Unter Mitarbeit von Dr.-Ing. Francisco Gutiérrez Guzmán, (RWTH Aachen, MSE), Daniel Cornel M.Sc., (RWTH Aachen, MSE), Florian Steinweg M.Sc., (RWTH Aachen, IWM) und Adrian Mikitisin M.Sc., (RWTH Aachen, GFE). Hg. v. FVA. Frankfurt am Main (1444).
- » FVA (2022a): Kurzfristige Überlasten; Einfluss kurzfristiger Überlasten auf die Lebensdauer von Wälzlagern. Vorhaben Nr. 866-I. Abschlussbericht. Unter Mitarbeit von Simon Dechant (IMKT), Lukas Rüth (MEGET), Flavien Foko Foko (MEGET) und Genadi Dimov (MEGET). Hg. v. FVA. Frankfurt am Main (Heft Vorläufiger_Abschlussbericht).

- » FVA (2022b): Risse auf Lagerringen - Einfluss praxisrelevanter Schmierstoffformulierungen auf die Entstehung von White Etching Areas und White Etching Cracks. Vorhaben Nr. 707-VI. Abschlussbericht vorläufig. Unter Mitarbeit von MSE RWTH Aachen (Daniel Cornel), Florian Steinweg (IWM RWTH Aachen) und Adrian Mikitisin (GFE RWTH Aachen). Hg. v. FVA. Frankfurt am Main (AB vorläufig).
- » FVA (2022c): Tribologische Eignung von unterschiedlichen Kombinationen von Konservierungsmitteln und Betriebsölen in Wälzlagern. Vorhaben Nr. 820-I. Abschlussbericht vorläufig. Unter Mitarbeit von Patrick Sapich (IMK Magdeburg), IFOS Kaiserslautern (Stefan Emrich) und Norbert Bader (IMKT Hannover). Hg. v. FVA. Frankfurt am Main (Heft Vorläufiger_Abschlussbericht).
- » FVA (2022d): WEC: Wärmebehandlung und Werkstoffe Gegenmaßnahmen. Vorhaben Nr. 707-VII. Abschlussbericht. Unter Mitarbeit von Christian Habermehl (MSE RWTH Aachen), Florian Steinweg (IWM RWTH Aachen) und Adrian Mikitisin (GFE RWTH Aachen). Hg. v. FVA. Frankfurt am Main (1485).
- » Gould, B.; Demas, N. G.; Pollard, G.; Rydel, J. J.; Ingram, M.; Greco, A. C. (2019a): The Effect of Lubricant Composition on White Etching Crack Failures. In: Tribol Lett 67 (1), S. 1–14. DOI: 10.1007/s11249-018-1106-y.
- » Gould, B.; Greco, A. (2016): Investigating the Process of White Etching Crack Initiation in Bearing Steel. In: Tribol Lett 62 (2). DOI: 10.1007/s11249-016-0673-z.
- » Gould, B.; Greco, A.; Stadler, K.; Vegter, E.; Xiao, X. (2017a): Using advanced tomography techniques to investigate the development of White Etching Cracks in a prematurely failed field bearing. In: Tribology International 116, S. 362–370. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.07.028.
- » Gould, B.; Greco, A.; Stadler, K.; Xiao, X. (2017b): An analysis of premature cracking associated with microstructural alterations in an AISI 52100 failed wind turbine bearing using X-ray tomography. In: Materials & Design 117, S. 417–429. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.12.089.
- » Gould, Benjamin; Paladugu, Mohanchand; Demas, Nicholas G.; Greco, Aaron C.; Hyde, R. Scott (2019b): Figure the impact of steel microstructure and heat treatment on the formation of white etching cracks. In: Tribology International 134, S. 232–239. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.02.003.
- » Grabulov, A.; Petrov, R.; Zandbergen, H. W. (2010): EBSD investigation of the crack initiation and TEM/FIB analyses of the microstructural changes around the cracks formed under Rolling Contact Fatigue (RCF). In: International Journal of Fatigue 32 (3), S. 576–583. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2009.07.002.
- » Grabulov, A.; Ziese, U.; Zandbergen, H. W. (2007): TEM/SEM investigation of microstructural changes within the white etching area under rolling contact fatigue and 3-D crack reconstruction by focused ion beam. In: Scripta Materialia 57 (7), S. 635–638. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2007.06.024.
- » Gutiérrez Guzmán, Francisco (2020): White Etching Cracks (WEC) in ölgeschmierten Wälzkontakten. White Etching Cracks (WEC) in oil-lubricated rolling contacts. Dissertation. 1. Auflage. Aachen: Verlagsgruppe Mainz.
- » Han, B.; Binns, J.; Nedelcu, I. (2016): In Situ Detection of Hydrogen Uptake from Lubricated Rubbing Contacts. In: Tribology Online 11 (2), S. 450–454. DOI: 10.2474/trol.11.450.
- » Haque, T.; Korres, S.; Carey, J. T.; Jacobs, P. W.; Loos, J.; Franke, J. (2018): Lubricant Effects on White Etching Cracking Failures in Thrust Bearing Rig Tests. In: Tribology Transactions 61 (6), S. 979–990. DOI: 10.1080/10402004.2018.1453571.
- » Holweger, W.; Wolf, M.; Merk, D.; Blass, T.; Goss, M.; Loos, J. et al. (2015): White Etching Crack Root Cause Investigations. In: Tribology Transactions 58 (1), S. 59–69. DOI: 10.1080/10402004.2014.942938.

- » Hölzel, M. (2004): Struktur und Gitterdynamik wasserstoffbeladener austenitischer Edelstähle. Technische Universität Darmstadt. Fachbereich Material- und Geowissenschaften; FG Strukturformforschung. Online verfügbar unter <https://portal.dnb.de/opac.htm?method=simpleSearch&cqlMode=true&query=idn%3D971580669>.
- » Iso, K.; Yokouchi, A.; Takemura, H. (2005): Research Work for Clarifying the Mechanism of White Structure Flaking and Extending the Life of Bearings. In: SAE Technical Paper. Online verfügbar unter <https://trid.trb.org/view/1803008>.
- » Kahlman, L. (2018): New Rolling Bearing Technologies for LNG Pumps and Vapour Recovery Units. Proceedings of 18th International Conference & Exhibition on Liquefied Natural Gas (LNG 18. Perth Australia (LNG, 18)).
- » Katzarov, I. H.; Paxton, A. T. (2017): Hydrogen embrittlement II. Analysis of hydrogen-enhanced decohesion across (111) planes in α -Fe. In: Phys. Rev. Materials 1 (3), S. 33603. DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.1.033603.
- » Khader, I.; Kürten, D.; Raga, R.; Winzer, N.; Kailer, A. (2019): Modeling hydrogen diffusion in a tribological scenario: A failure analysis of a thrust bearing. In: Wear 438-439, S. 203054. DOI: 10.1016/j.wear.2019.203054.
- » Kruhöffner, W.; Loos, J. (2017): WEC Formation in Rolling Bearings under Mixed Friction: Influences and Friction Energy Accumulation" as Indicator. In: Tribology Transactions 60 (3), S. 516–529. DOI: 0.1080/10402004.2016.1183250.
- » Kürten, D.; Kailer, A.; Grundei, S.; Panagiotidou, N.; Franken, M.; Plebst, S. et al. (2022): Alternative Lubricants In Wind Turbines To Avoid WEC Formation. Vortrag - Präsentation - Tagungsbeitrag. TAE Technische Akademie Esslingen (TAE WTC).
- » Lai, Junbiao; Stadler, Kenred (2016): Investigation on the mechanisms of white etching crack (WEC) formation in rolling contact fatigue and identification of a root cause for bearing premature failure. In: Wear 364-365, S. 244–256. DOI: 10.1016/j.wear.2016.08.001.
- » Li, Shu-Xin; Su, Yun-Shuai; Shu, Xue-Dao; Chen, Jian-Jun (2017): Microstructural evolution in bearing steel under rolling contact fatigue. In: Wear 380-381, S. 146–153. DOI: 10.1016/j.wear.2017.03.018.
- » Loos, J.; Blass, T.; Binderszewsky, J.; Kruhöffner, W.; Merk, D. (2019a): WEC-Bildung, einer von mehreren Wälzlager-Ermüdungsmechanismen. In: VDI (Hg.): Gleit und Wälzlagerung, Bd. 2348 (VDI Berichte, 2348), S. 245–256.
- » Loos, J.; Franke, J.; Kruhöffner, W.; Merk, D. (2022): Differences between cathodic and energetic WEC fatigue. Influences on Cathodic and Energetic WEC Fatigue. Hg. v. Bearing World. FVA.
- » Loos, Joerg; Bergmann, Iris; Goss, Matthias (2016): Influence of Currents from Electrostatic Charges on WEC Formation in Rolling Bearings. In: Tribology Transactions 59 (5), S. 865–875. DOI: 10.1080/10402004.2015.1118582.
- » Loos, Joerg; Bergmann, Iris; Goss, Matthias (2021): Influence of High Electrical Currents on WEC Formation in Rolling Bearings. In: Tribology Transactions 64 (4), S. 708–720. DOI: 10.1080/10402004.2021.1909789.
- » Loos, Jörg; Blass, Toni; Franke, Jörg; Kruhöffner, Wolfram; Bergmann, Iris (2015): Einflüsse auf die WEC-Bildung in Wälzlagern. Hg. v. VDI (VDI-Fachtagung: Gleit- und Wälzlager).
- » Loos, Jörg; Mangold, Andreas; Blass, Toni; Reiners, Harald; Suckfüll, Tino; Goss, Matthias (2019b): Bearing Currents as WEC-Trigger in Wind Turbines. Unter Mitarbeit von Jörg Loos, Andreas Mangold, Toni Blass, Harald Reiners, Tino Suckfüll und Matthias Goss (CWD).
- » Luther, R.; Seyfert, C.; Braun, J.; Kraft, G.; Losch, A. (2014): Aktuelle Erkenntnisse zu Ermüdungsfrühausfällen von geschmierten Wälzlagern. Vortrag - Präsentation - Tagungsbeitrag. Schadensmechanismen an Lagern. Aachen (VDI-Fachkonferenz).
- » Luyckx, J. (2011): Hammering wear impact fatigue hypothesis WEC/irWEA failure mode on roller bearings. In: Wind Turbine Tribology Seminar, Renaissance Boulder Flatiron Hotel Broomfield, CO, USA.

- » Luyckx, Johan (2012): White etching crack failure mode in roller bearings: From observation via analysis to understanding and an industrial solution. Versagensart in Rollenlagern infolge weiß anätzender Risse: Von Beobachtung über Analyse zur Erkenntnis und einer industriellen Lösung. In: ASTM International Symposium on Rolling Element Bearings, 2011, Bd. 1542. West Conshohocken, PA, US: American Society for Testing and Materials (ASTM) (ASTM STP), S. 1–25.
- » Manieri, Francesco; Stadler, Kenred; Morales-Espejel, Guillermo E.; Kadiric, Amir (2019): The origins of white etching cracks and their significance to rolling bearing failures. In: International Journal of Fatigue 120, S. 107–133. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.10.023.
- » Matsumoto, Y.; Murakami, Y.; Oohori, M. (2002): Rolling Contact Fatigue Under Water-Infiltrated Lubrication, 226-226-18. DOI: 10.1520/STP10857S.
- » Mayweg, D.; Morsdorf, L.; Wu, X.; Herbig, M. (2021): The role of carbon in the white etching crack phenomenon in bearing steels. In: Acta Materialia 203, S. 116480. DOI: 10.1016/j.actamat.2020.11.022.
- » NSK Ltd. (2004): Long-Life Bearings for Engine Accessories.
- » Ooi, S. W.; Yan, P.; Vegter, R. H. (2019): Black oxide coating and its effectiveness on prevention of hydrogen uptake. In: Materials Science and Technology 35 (1), S. 12–25. DOI: 10.1080/02670836.2018.1530425.
- » Özel, Mehmet Ozan (2018): Entstehung von White Etching Areas und White Etching Cracks als Folge der Wälzbeanspruchung im Stahl 100Cr6. Dissertation. Shaker Verlag, Aachen.
- » Paladugu, M.; Scott Hyde, R. (2020): Material composition and heat treatment related influences in resisting rolling contact fatigue under WEC damage conditions. In: International Journal of Fatigue 134, S. 105476. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105476.
- » Paladugu, Mohanchand; Hyde, R. Scott (2020): Material composition and heat treatment related influences in resisting rolling contact fatigue under WEC damage conditions. In: International Journal of Fatigue 134. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105476.
- » Paladugu, Mohanchand; Lucas, Douglas R.; Hyde, R. Scott (2019): Influence of raceway surface finish on white etching crack generation in WEC critical oil under rolling-sliding conditions. In: Wear 422, S. 81–93. DOI: 10.1016/j.wear.2019.01.051.
- » Peter Kohl (2015): Robust gegen weiße Strukturen. Neuer Wälzlager-Werkstoff trotz „White Structure Flaking“. In: antriebstechnik 29 (7), S. 12–13.
- » Qin, Yu; Li, Juan; Herbig, Michael (2020): Microstructural origin of the outstanding durability of the high nitrogen bearing steel X30Cr-MoN15-1. In: MATERIALS CHARACTERIZATION 159. DOI: 10.1016/j.matchar.2019.110049.
- » Richardson, A. D.; Evans, M.-H.; Wang, L.; Ingram, M.; Rowland, Z.; Llanos, G.; Wood, R.J.K. (2019): The effect of over-based calcium sulfonate detergent additives on white etching crack (WEC) formation in rolling contact fatigue tested 100Cr6 steel. In: Tribology International 133, S. 246–262. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.01.005.
- » Richardson, A. D.; Evans, M-H; Wang, L.; Wood, R. J. K.; Ingram, M. (2018a): Thermal Desorption Analysis of Hydrogen in Non-hydrogen-Charged Rolling Contact Fatigue-Tested 100Cr6 Steel. In: Tribol Lett 66 (1), S. 4. DOI: 10.1007/s11249-017-0947-0.
- » Richardson, A. D.; Evans, M-H; Wang, L.; Wood, R. J. K.; Ingram, M.; Meuth, B. (2018b): The Evolution of White Etching Cracks (WECs) in Rolling Contact Fatigue-Tested 100Cr6 Steel. In: Tribol Lett 66 (1), S. 6. DOI: 10.1007/s11249-017-0946-1.
- » Roy, S.; Gould, B.; Zhou, Y.; Demas, N. G.; Greco, A. C.; Sundararajan, S. (2019): Effect of Retained Austenite on White Etching Crack Behavior of Carburized AISI 8620 Steel Under Boundary Lubrication. In: Tribol Lett 67 (2), S. 1–9. DOI: 10.1007/s11249-019-1153-z.

- » Ruellan, Arnaud; Cavoret, Jérôme; Ville, Fabrice; Kleber, Xavier; Liatard, Bernard (2017): Understanding white etching cracks in rolling element bearings: State of art and multiple driver transposition on a twin-disc machine. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology 231 (2), S. 203–220. DOI: 10.1177/1350650116648058.
- » Ruellan, Arnaud; Kleber, Xavier; Ville, Fabrice; Cavoret, Jérôme; Liatard, Bernard (2015): Understanding white etching cracks in rolling element bearings: Formation mechanisms and influent tribochemical drivers. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology 229 (8), S. 886–901. DOI: 10.1177/1350650114557710.
- » Ruellan, Arnaud; Stadler, Kenred; Jelita Rydel, Jakub; Ryan, Helen (2021): The influence of lubricant formulation on early thrust and radial bearing damage associated with white etching cracks. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology 235 (5), S. 1047–1059. DOI: 10.1177/1350650120940196.
- » Ruellan, Arnaud; Ville, Fabrice; Kleber, Xavier; Arnaudon, Aurélien; Girodin, Daniel (2014): Understanding white etching cracks in rolling element bearings: The effect of hydrogen charging on the formation mechanisms. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology 228 (11), S. 1252–1265. DOI: 10.1177/1350650114522452.
- » Seyfert, Christian; M. Marquart; G. Kraft; J. Braun; R. Luther; J. Rausch; T. Schürmann (2017): Schmierstoffeinfluss WEC – Erkenntnisse aus Reibungsuntersuchungen, Schadensbildern und Oberflächenanalytik Lubricant Impact on WEC – Observations from Friction, Testing, Failures and Surface Analytics. Antriebstechnisches Kolloquium Aachen ATK. Hg. v. ATK (Antriebstechnisches Kolloquium).
- » Stadler, K.; Andreen, M.; Errson, M. (2017): Short term heavy loads One cause for premature bearing failures and white etching cracks. GfT: Tribologie Fachtagung.
- » Stadler, K.; Han, B.; Brizmer, V.; Pasaribu, R. (2015a): Benefits of Using Black Oxidized Bearings in Wind Applications. The ever-increasing size of wind turbines to generate more power is placing higher demands on the drivetrains. SKF Industries, Inc (Evolution, #2 2015).
- » Stadler, K.; Lai, J.; Vegter, R. H. (2015b): A Review: The Dilemma With Premature White Etching Crack (WEC) Bearing Failures. In: John M. Beswick (Hg.): Bearing steel technologies. 10th volume : advances in steel technologies for rolling bearings. West Conshohocken, PA: ASTM International (Selected technical papers, STP 1580), S. 1–22.
- » Stadler, K.; Vegter, R. H.; Vaes, D. (2018): „White Etching Cracks“ – Eine Folge, keine Ursache von Wälzlagerschäden. SKF Industries, Inc (Evolution, #1 2018).
- » Strandell, I.; C. Fajers; T. Lund (2010): Corrosion - one root cause for premature failures. Vortrag - Präsentation - Tagungsbeitrag. Leeds Trinity University. Leeds (Proceedings of the Leeds-Lyon Symposium on Tribology, 37th).
- » Surborg, H. (2014): Einfluss von Grundölen und Additiven auf die Bildung von WEC in Wälzlagern. Zugl.: Magdeburg, Univ., Fak. für Maschinenbau, Diss., 2014 u.d.T.: Einfluss von Grundölen und Additiven auf die Bildung von White Etching Cracks (WEC) in Wälzlagern. Aachen: Shaker (Fortschritte in der Maschinenkonstruktion, Bd. 2014,5).
- » Surborg, H.; Elfrath, T.; Fahl, J.; Göbbels, H.; Deters, L. (2010): Einfluss von Grundölen und Additiven auf die Lebensdauer von Wälzlagern. Hg. v. GfT Gesellschaft für Tribologie. Göttingen (Tribologie Fachtagung).
- » Tamada, K.; Tanaka, H. (1996): Occurrence of brittle flaking on bearings used for automotive electrical instruments and auxiliary devices. In: Wear 199 (2), S. 245–252. DOI: 10.1016/0043-1648(96)06990-6.
- » Tanaka, H.; Niste, V. B.; Abe, Y.; Sugimura, J. (2017): The Effect of Lubricant Additives on Hydrogen Permeation Under Rolling Contact. In: Tribol Lett 65 (3), S. 1–8. DOI: 10.1007/s11249-017-0877-x.

- » Tanaka, S.; Yamamura, K.; Oohori, M. (2002): The Development of Bearing Steels with Long Life and High Corrosion Resistance, 414-414-11. DOI: 10.1520/STP10870S.
- » Tischmacher, H. (2017): Systemanalysen zur elektrischen Belastung von Wälzlagern bei umrichter gespeisten Elektromotoren. Dissertation. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, Hannover. Online verfügbar unter <https://www.repo.uni-hannover.de/handle/123456789/9136>.
- » Voskamp, A. P. (1997): Microstructural changes during rolling contact fatigue: Metal fatigue in the subsurface region of deep groove ball bearing inner rings. Online verfügbar unter <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A783a0a39-6062-4326-b493-a4dee0efef92>.
- » Xiangduo, Peng; Shimizu, Yasuyuki; Mitamura, Nobuaki (2008): Long Life Bearing Technologies on Material Aspect, S. 932–933. DOI: 10.1007/978-3-642-03653-8_319.
- » Yamada, H.; Uyama, H. (2015): The effects of alloy elements and heat treatments on white structure flaking in rolling bearings. In: Society of Tribologists and Lubrication Engineers Annual Meeting and Exhibition 2015. Online verfügbar unter <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84962016140&partnerID=40&md5=a133ccbd326370462823c6604061a607>.

