

Markus Grebe

False-Brinelling und Stillstands- markierungen bei Wälzlagern

Schäden bei Vibrationsbelastung
oder kleinen Schwenkwinkeln

Markus Grebe

False-Brinelling
und Stillstandsmarkierungen
bei Wälzlagern

False-Brinelling und Stillstandsmarkierungen bei Wälzlagern

Schäden bei Vibrationsbelastung oder kleinen Schwenkwinkeln

Dr. Markus Grebe

Mit 161 Bildern und 5 Tabellen



Kontakt & Studium
Band 703

Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Wilfried J. Bartz
Dipl.-Ing. Hans-Joachim Mesenholl
Dipl.-Ing. Elmar Wippler

expert  **verlag**®

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<http://www.dnb.de> abrufbar.

Bibliographic Information published by Die Deutsche Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek lists this publication
in the Deutsche Nationalbibliografie;
detailed bibliographic data are available on the internet at
<http://www.dnb.de>

ISBN 978-3-8385-5160-9

Bei der Erstellung des Buches wurde mit großer Sorgfalt vorgegangen; trotzdem lassen sich Fehler
nie vollständig ausschließen. Verlag und Autoren können für fehlerhafte Angaben und deren Folgen
weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen.
Für Verbesserungsvorschläge und Hinweise auf Fehler sind Verlag und Autoren dankbar.

© 2017 by expert verlag, Wankelstr. 13, D-71272 Renningen
Tel.: +49 (0) 71 59-92 65-0, Fax: +49 (0) 71 59-92 65-20
E-Mail: expert@expertverlag.de, Internet: www.expertverlag.de
Alle Rechte vorbehalten
Printed in Germany

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb
der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und
strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die
Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Vorwort

Dieses Buch soll dem interessierten Leser aufzeigen, welche Verschleißmechanismen bei Wälzlagern auftreten können, wenn diese nicht im Normalbetrieb, sondern unter kleinen Schwenkwinkeln betrieben werden oder wenn diese komplett stillstehen und einer Vibrationsbelastung oder wechselnden Normalkräften ausgesetzt sind.

Der Autor beschäftigt sich nun seit dem Jahr 2005 intensiv mit diesem Spezialthema. Damals betreute ich ein von der Karl-Völker-Stiftung an der Hochschule Mannheim gefördertes Forschungsprojekt mit dem Titel „Entwicklung eines standardisierten Simulationsprüfverfahrens zur Untersuchung von Stillstandsschäden an Wälzlagerungen“, in dem der erforderliche Prüfstand aufgebaut und erste Untersuchungsserien durchgeführt wurden. In den Folgejahren wurde das Wissen durch zahlreiche Industrieprojekte zu dieser Fragestellung vertieft. Das Thema bekam eine so große Bedeutung, dass der Autor im Anschluss an einen Vortrag auf der ELGI-Tagung 2008 in Lissabon von Professor Dr. Bartz ermuntert wurde, das Thema als Dissertation weiterzubearbeiten.

Eine ausführliche Literaturrecherche zu Beginn des Projektes zeigte sehr schnell, dass viele Thesen im Zusammenhang mit dem Thema False-Brinelling nur auf Annahmen und nicht auf systematischen experimentellen Untersuchungen aufbauen. Außerdem wurde das Thema nach sehr guten Ansätzen in den 1960-er Jahren viele Jahre lang nahezu nicht weiterverfolgt.

Dieses Buch zeigt, welche Einzelmechanismen im schwingungsbelasteten Kontakt zusammenkommen und beleuchtet diese Einzelaspekte anhand des aktuellen Standes der Wissenschaft.

Der Hauptschwerpunkt dieses Buches liegt somit auf den folgenden Punkten:

- Erläuterung der Kinematik in einem Wälzkontakt und der ablaufenden lokalen Effekte
- Untersuchung der Verschleißmechanismen und chemisch-physikalischen Ursachen, die zu Stillstandsmarkierungen oder Verschleißschäden führen
- Einfluss der Größen des tribologischen Beanspruchungskollektivs
- Einfluss des Zwischenstoffs und dessen Bestandteile
- Einfluss von Werkstoffen, Wärmebehandlung und Beschichtung
- Abschätzung des Einflusses von Stillstandsmarkierungen auf die Lebensdauer von Wälzlagerungen
- Möglichkeiten zur Vermeidung von Stillstandsmarkierungen und False-Brinelling-Schäden

Dieses Buch ist somit sehr anwendungsnah. Die Ergebnisse können direkt zur Verbesserung bzw. Vermeidung von False-Brinelling-Schäden oder Stillstandsmarkierungen in der Praxis verwendet werden. Ein praktischer Schwerpunkt liegt auf den Blattlagerungen von Windkraftanlagen, da es hier immer wieder zu typischen False-Brinelling- und Stillstandsschäden kommt. Hier möchte ich Herrn Dr.-Ing. Mathias Stammler vom Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) danken, der sein umfangreiches Fachwissen auf diesem Gebiet in einem Extra-Kapitel mit eingebracht hat.

Mannheim, Juli 2017

Markus Grebe

Abkürzungen

ARKL	Axialrillenkugellager
C	Tragfähigkeit
C ₀	Statische Tragfähigkeit
C _{dyn}	Dynamische Tragfähigkeit
DLC	Diamond Like Carbon – diamantähnlicher Kohlenstoff
EBSD	Electron backscatter diffraction
EDX	Energiedispersive Röntgenanalyse
FBP	False-Brinelling-Prüfstand
FIB	Focused Ion Beam = fokussierter Ionenstrahl
GfT	Gesellschaft für Tribologie
IP	Individual Pitch
IPC	Individual Pitch Control
KRL	Kegelrollenlager
MWh	Mega-Watt-Stunden
OF	Oberfläche
P	Äquivalente Lagerlast
QSST	Quasi-Stillstandstest (Standardtest am Kompetenzzentrum Tribologie mit +/- 0,5° Schwenkwinkel, 750 N/Kugel, 25 Hz)
QSSB	Quasi-Stillstandsbedingungen
REM	Rasterelektronenmikroskop
TAE	Technische Akademie Esslingen
TWh	Terra-Watt-Stunden
WLI	Weißlicht-Interferometrie
WEA	Windenergieanlage
μ	Reibwert (Reibkraft / Normalkraft)
ANSI	American National Standards Institute
ASTM	American Society for Testing Materials
DIN	Deutsche Industrie Norm
ISO	International Standardization Organisation

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

1	Einleitung.....	1
1.1	Schäden an Wälzlagern durch kleine Schwenkwinkel und Vibration	1
1.2	Wälzlagerschäden und Ausfallursachen	2
1.2.1	Hauptausfallarten von Wälzlagern (nach ISO 15243)	2
1.2.1.1	Werkstoffermüdung	3
1.2.1.2	Verschleiß	3
1.2.1.3	Korrosion	4
1.2.1.4	Elektroerosion	4
1.2.1.5	Plastische Verformung	4
1.2.1.6	Bruch und Rissbildung	5
1.3	Praxisbezug	5
2	Grundlagen und Begriffsdefinitionen	7
2.1	Entstehung des Begriffs „False-Brinelling“	8
2.2	False-Brinelling oder Stillstandsmarkierung?	9
2.3	Abgrenzung zu verschiedenen ähnlichen Schadensbildern	11
2.3.1	Riefenbildung	11
2.3.2	Eindrücke; plastische Verformungen	12
2.3.3	Riffel- oder Muldenbildung	13
2.3.3.1	Riffelbildung infolge elektrolytischer Kontaktkorrosion	13
2.3.3.2	Riffelbildung infolge Stromdurchgang	13
2.3.3.3	Riffelbildung, hervorgerufen durch Stillstandserschütterungen	14
3	Systemanalyse betroffener realer Systeme (Praxisbeispiele).....	16
3.1	Windenergieanlagen und Pitchsysteme (von Matthias Stammler; IWES Fraunhofer)	17
3.1.1	Individual Pitch Control (IPC)	20
3.1.2	Rotorblattlager	22
3.1.3	Belastungen in Blattlagern	23
3.1.4	Schadensmechanismen	26
3.1.5	Zusammenfassung und Ausblick	29
3.2	Stoßdämpfer-Domlager	30
3.3	Pkw-Radlager (Hub-Units)	31

4	Überblick über den Stand der Wissenschaft und Technik	34
4.1	Stand der Wissenschaft auf dem Gebiet der Stillstandsmarkierungen und des False-Brinellings	34
4.2	Zusammenhang zwischen Stillstandsmarkierungen und tribochemischer Reaktion	38
4.2.1	Stand der Wissenschaft zum Thema Schwingreibverschleiß (Passungsrost, engl. „fretting corrosion“)	39
4.2.2	Theorien zur Rissentstehung und –ausbreitung bei Schwingbelastung	49
4.2.2.1	Ansätze basierend auf experimentellen Untersuchungen	49
4.2.2.2	Mathematisch-theoretische Ansätze auf Basis der Kontaktmechanik	50
4.3	Zusammenfassung des Standes der Wissenschaft	51
4.3.1	Zusammenfassung des Standes der Wissenschaft bezüglich Schwingreibverschleiß (Fretting)	52
5	Grundlagen zur Kontaktmechanik	54
5.1	Kontaktmodelle	54
5.1.1	Statischer Fall (Hertzsche Beanspruchung) unter reiner Normalkraft	55
5.1.2	Statischer Fall – Konstante Flächenlast mit konstanter Tangentialkraft	56
5.1.3	Statischer Fall – Punkt- bzw. Linienkontakt mit konstanter Normalkraft und konstanter Tangentialkraft	57
5.1.4	Dynamischer Fall – Punkt- bzw. Linienkontakt mit konstanter Normalkraft und sich verändernder Tangentialkraft	58
5.1.5	Dynamischer Fall - Rollen	59
5.1.6	Einflussfaktoren auf die entstehenden Spannungen	63
5.1.6.1	Elastisch-plastisches Verhalten	63
5.1.6.2	Einlaufeffekte	64
5.1.6.3	Bewertung der für die Rollreibung verantwortlichen Effekte	64
5.1.6.4	Schmierung	65
5.1.6.5	Thermo-elastische Effekte	65
5.1.6.6	Adhäsion	66
5.1.6.7	Rauheit	66
5.1.7	Zusammenfassung der im False-Brinelling-Kontakt wirkenden Spannungen	68
6	Lebensdauerberechnung, FEM-Berechnung, Computersimulation	69
7	Beschreibung der Vorgänge im Kontaktbereich bei der Entstehung von Stillstandsmarkierungen	72
7.1	Übergang von theoretischen Kontaktmodellen zu experimentellen Ergebnissen und zur tribologischen Schädigung	72
7.2	Anschauliche Darstellung der Wirkung der Spannungen in der Kontaktzone	75

8	Laborprüftechnik.....	77
8.1	Übersicht über die weltweit eingesetzten Laborprüfmethode im Zusammenhang mit Stillstandsmarkierungen und False-Brinelling.....	77
8.1.1	Fafnir Fretting-Test (ASTM D4170).....	77
8.1.2	SNR-FEB2-Test	78
8.1.3	SKF-Schwingprüfer	79
8.1.4	HRE-IME-Riffeltest und Pulsationsprüfstände.....	79
8.1.5	Sonstige bekannte False-Brinelling-Prüfstände	79
8.2	Prüftechnik an der Hochschule Mannheim.....	81
8.2.1	Versuche unter dynamischer Axiallast auf der servo-hydraulischen Prüfmaschine „Isotron Sinus Hydropuls“.....	82
8.2.2	Versuche unter dynamischer, rotatorischer Schwingbewegung (False-Brinelling-Prüfstand).....	83
8.2.3	Versuche auf dem Schwing-Reibverschleiß-Prüfstand (SRV®).....	85
8.3	Festlegung von Standardprüfbedingungen	86
8.4	Festlegung von Referenz- und Musterschmierstoffen.....	86
8.5	Festlegung geeigneter Messgrößen.....	88
8.6	Statistik	90
9	Schadensentwicklung – Wirkende Verschleißarten und -mechanismen	91
9.1	Typische Schadensbilder	91
9.2	Schadensentwicklung bei kleinen Schwenkwinkeln (Quasi-Stillstandsmarkierungen).....	93
9.3	Schadensentwicklung bei größeren Schwenkwinkeln (False-Brinelling-Bedingungen / SNR-FEB2-Test).....	97
9.4	Lokal unterschiedliche Verschleißerscheinungen	101
9.4.1	Haftzone.....	101
9.4.2	Zone partiellen Gleitens	102
9.4.3	Mittlere Ellipsenkontur.....	105
9.4.4	Wälzbereich bei größeren Schwenkwinkeln.....	105
9.4.5	Kreisförmige Kratzer in der Stillstandsmarkierung (Spin der Kugel).....	107
9.5	Wirkende Verschleißmechanismen.....	110
9.5.1	Tribochemische Reaktion.....	110
9.5.2	Oberflächenzerrüttung	110
9.5.3	Adhäsion	113
9.5.4	Wälzverschleiß.....	114
10	Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss der Größen des Beanspruchungskollektivs	115
10.1	Einfluss der Belastungsform: axial-pulsend oder rotatorisch-oszillierend...	115
10.2	Einfluss der Schwingzyklenzahl	117
10.3	Einfluss der Normalkraft.....	118

10.4	Einfluss der Lastfrequenz bei axialer Pulsation	122
10.5	Einfluss der Schwingfrequenz	122
10.6	Einfluss der Luftfeuchtigkeit und von Wasser im Schmierstoff	125
10.7	Einfluss der Temperatur	127
10.8	Einfluss des Schwenkwinkels	130
11	Einfluss des Zwischenstoffs (Grundöl, Verdicker, Additive)	137
11.1	Einfluss der Schmierstoffart (Öl / Fett).....	137
11.2	Einfluss des Grundöls	139
11.2.1	Poly-Alpha-Olefin (PAO).....	139
11.2.2	Trimethylolpropan Ester (TMP).....	140
11.2.3	Polyglykol (PG).....	140
11.2.4	Polyfluorierter Polyether (PFPE).....	141
11.2.5	Paraffinbasisches Mineralöl.....	141
11.2.6	Naphthenbasisches Mineralöl.....	142
11.2.7	Silikonöl	142
11.2.8	Übersicht	143
11.3	Einfluss des Verdickers	145
11.4	Einfluss der Konsistenz und Viskosität	148
11.5	Einfluss von Additiven.....	151
11.6	Einfluss von Festschmierstoffen	153
11.7	Sonstige Erkenntnisse zum Schmierstoffeinfluss	155
11.7.1	Veröffentlichte Daten aus der Schmierstoffindustrie	155
11.7.2	Fettmischungen	156
12	Einfluss des Werkstoffs, der Härte und Oberflächenbehandlung und Nutzen von Beschichtungen	158
12.1	Einfluss der Laufbahnhärte	159
12.2	Einfluss des Kugelwerkstoffs	160
12.2.1	Wirkung von keramischen Wälzkörpern	160
12.3	Einfluss von Beschichtungen und Oberflächenbehandlungen	164
12.3.1	Nitrocarburieren	164
12.3.2	Brünieren	165
12.3.3	DLC-Schichten.....	165
12.4	Einfluss des Einlaufvorgangs und der Kaltverfestigung	167
13	Einfluss geometrischer und topografischer Parameter	168

14	Einfluss konstruktiver Parameter	172
14.1	Einfluss der Lagerart (Axial-, Radiallager / Kugel-, Rollenlager)	172
14.2	Einfluss der Vorspannung bzw. des Lagerspiels	174
14.3	Einfluss der Schmiegun g	175
14.4	Einfluss der Einbaulage	176
15	Untersuchung der Verschleißpartikel und Oxidationsprodukte	177
16	Einfluss von Stillstandsmarkierungen auf die Lebensdauer im Normalbetrieb	178
17	Effektive Möglichkeiten zur Vermeidung von Stillstandsmarkierungen und False-Brinelling-Schäden.....	179
17.1	Bekannte Lösungsansätze unter Quasi-Stillstandsbedingungen	179
17.1.1	Mechanisches Trennen von Grund- und Gegenkörper	179
17.1.2	Pressung erhöhen; Lagerluft reduzieren	179
17.1.3	Schwingungen reduzieren.....	179
17.1.4	Stillstand vermeiden.....	180
17.1.5	Geeignete Schmierstoffe.....	181
17.1.6	Beschichtungen.....	182
17.1.7	Geeignete Prüftechnik.....	182
17.1.8	Geeignete Prüftechnik für das Praxisbeispiel Blattlagerung Windkraftanlage	182
18	Zusammenfassung	184
19	Ausblick	187
20	Literaturhinweise und Quellenangaben	188
20.1	Internet.....	193
20.2	Patente.....	194
20.3	Normen	194
21	Stichwortverzeichnis	195

1 Einleitung

1.1 Schäden an Wälzlager durch kleine Schwenkwinkel und Vibration

Wälzlager werden im Maschinenbau immer dann eingesetzt, wenn rotierende oder oszillierende Bewegungen realisiert werden sollen und gleichzeitig niedrige Reibung gefordert ist. Im Normalbetrieb bewegen sich die Wälzkörper hierbei deutlich innerhalb der Laufbahnen. Standard-Auslegungsprogramme der großen Wälzlagerhersteller wie z.B. *medias*® der Firma Schaeffler oder der *SKF Bearing Calculator* fordern für einen sicheren Betrieb Schwenkamplituden von mindestens dem Teilungswinkel der Wälzkörper. Bei einem typischen Axialrillenkugellager sind das Winkel von circa $\pm 30^\circ$. Wird ein Lager bei kleineren Schwenkwinkeln betrieben oder ist es nur Vibrationen oder schwellenden Normalkräften ausgesetzt, ist die Lebensdauer der Lager nicht mehr berechenbar. Bei diesen Betriebsbedingungen kann es bereits nach kurzen Laufzeiten zu False-Brinelling-Schäden oder zu Stillstandsmarkierungen in den Laufflächen kommen. Beim weiteren Betrieb werden diese Markierungen überrollt und führen dabei zu einem unruhigen Lauf und später zu vorzeitigen Ausfällen. Die Mikrobewegungen können neben geplanten kleinen Stellbewegungen auch durch Maschinen- und Aggregatschwingungen oder aber auch beim Transport durch fahrdynamische Effekte straßen- und schienengebundener Beförderungsmittel initiiert werden. Dieses Buch beschäftigt sich mit diesen ganz speziellen Betriebsbedingungen und den typischen Schadenserscheinungen. Neben der Beschreibung der im Kontakt ablaufenden Vorgänge werden zahlreiche experimentelle Ergebnisse präsentiert, die die Wirkung einzelner Einflussfaktoren des Beanspruchungskollektivs und der Bestandteile des Schmierstoffs aufzeigen. So kann für den jeweiligen eigenen Anwendungsfall eine Lösungsstrategie gefunden werden.

Axial-Rillenkugellager 51206

Hauptabmessungen nach DIN 711/ISO 104, einseitig wirkend, zerlegbar

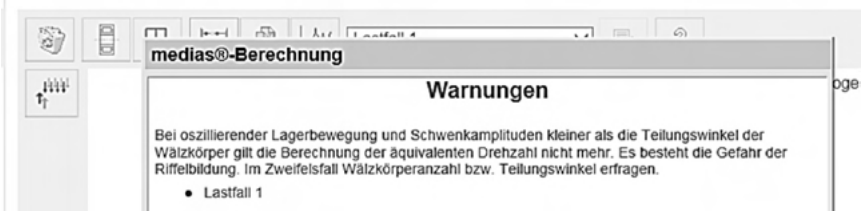


Abbildung 1: Warnhinweis bei der Berechnung von Lagern mit kleinem Schwenkwinkel mittels medias®

Obwohl in diesem Buch immer nur von Wälzlager gesprochen wird, kann der gleiche Effekt auch bei linearen Bewegungen auftreten, zum Beispiel bei Linearführungen mit Kugel- oder Rollenumlaufsystemen, Kugelbuchsen oder Kugelgewindetrieben.

1.2 Wälzlagerschäden und Ausfallursachen

Jedes Jahr werden mehr als 10 Milliarden Wälzlager hergestellt. Etwa 90% dieser Lager „überleben“ die Maschinen, in denen sie eingesetzt werden. Ca. 9,5% werden bei geplanten Wartungsarbeiten ersetzt. Nur 0,5% fallen während des Betriebes aus [SKF2015]. Diese Zahl klingt erst einmal beruhigend - allerdings handelt es sich dabei immer noch um 500 Mio. Stück. Außerdem sind bei einem Lagerschaden in aller Regel sehr hohe Folgekosten zu befürchten. Wenn beispielsweise ein Lager einer Offshore-Windturbine ausfällt, können die Produktionsausfall- und Reparaturkosten schnell einige Millionen Euro betragen.

Es ist daher wichtig, das Wissen hinsichtlich möglicher Ausfallursachen und deren Vermeidung kontinuierlich zu verbessern. Neben Fortschritten in der Computersimulation und verbesserter Lebensdauerberechnung stellt die Schadensanalyse ein wichtiges Hilfsmittel dar, um Fehler in der Zukunft vermeiden zu können. Mit einer sorgfältigen Schadensanalyse lässt sich meist die primäre Ursache eines Lagerschadens feststellen. Durch geeignete Abhilfemaßnahmen kann ein erneutes Auftreten vermieden werden. Bei der Schadensanalyse versucht man anhand des Erscheinungsbildes der Laufbahnen und Wälzkörper Rückschlüsse auf die Ursachen zu ziehen. Wenn das Lager nicht schon zu stark geschädigt ist, gelingt dies in aller Regel recht gut. Allerdings schreitet ein massiver Lagerschaden schnell fort und führt zu Sekundärschäden beispielsweise durch lose Partikel oder thermische Schädigung. Dann ist eine wissenschaftliche Beurteilung kaum noch möglich. Ein weiteres Problem ist, dass für eine erfolgreiche Schadensanalyse sehr viel Erfahrung notwendig ist, die nur relativ wenige Fachleute haben.

1.2.1 Hauptausfallarten von Wälzlagern (nach ISO 15243)

Die Internationale Organisation für Normung (ISO) hat im Jahr 2004 die ISO-Norm 15243 veröffentlicht, deren Inhalt die Bestimmung und Klassifizierung der unterschiedlichen Wälzlager-Ausfallarten ist. Insgesamt werden sechs Hauptausfallarten definiert, die dann noch einmal in verschiedene Unterarten eingeteilt werden können.

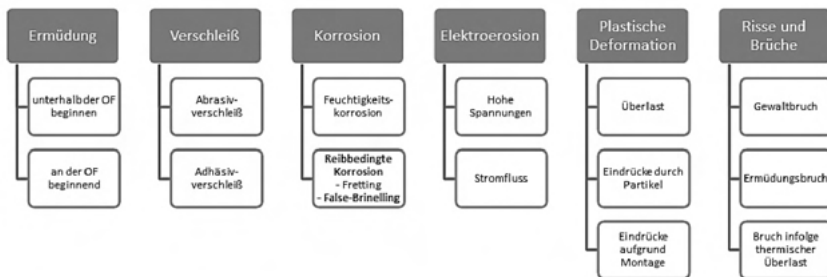


Abbildung 2: Schadensklassifikation nach ISO 15243

Obwohl sich dieses Buch ganz konkret mit einem speziellen Schadensfall beschäftigt, sollen diese sechs Hauptausfallarten der Vollständigkeit halber hier aufgelistet werden. Eine gute allgemeine Übersicht mit vielen Beispielsbildern von Lagerschäden hat die Firma SKF veröffentlicht [SKF2012].

1.2.1.1 Werkstoffermüdung

Durch zyklische Beanspruchung infolge der Wälzbeanspruchung kommt es zu einer Veränderung und schließlich Ermüdung des oberflächennahen Werkstoffgefüges. Ermüdung zeigt sich in aller Regel durch Risse und Ausbrüche in der Oberfläche. Bei hohen Reibkräften beginnen die Risse typischerweise an der Oberfläche und sind fast immer ein Zeichen für mangelhafte Schmierung, da in einem gut geschmierten Lager nie so hohe Reibungszahlen auftreten können. Bei niedrigen Reibwerten ($< 0,3$) liegt das Spannungsmaximum in der Tiefe. Es entstehen Risse, die unterhalb der Oberfläche fortschreiten, ein Rissnetzwerk ausbilden und bei Erreichen der Oberfläche zu Schälungen und Ausbrüchen (Pittings) führen. In der Tribologie zählt dieser Schaden zu den vier Hauptverschleißmechanismen und wird dort als Oberflächenzerrüttung bezeichnet [GfT7]. Dieser Schaden wird vorwiegend durch die Materialeigenschaften (Wechseldauerfestigkeit) beeinflusst und tritt typischerweise eher am Ende der rechnerischen Lebensdauer auf. Hohe lokale Spannungen z.B. durch harte Partikel oder Beschädigungen der Wälzkörper oder Laufflächen sowie Werkstofffehler können aber dazu führen, dass Zerrüttung auch schon deutlich früher auftritt.

1.2.1.2 Verschleiß

Verschleiß lässt sich bei tribologischen Systemen nahezu nie vermeiden, da diese fast immer - zumindest zeitweise - unter Grenz- und Mischreibungsbedingungen laufen und somit die Rauheitsspitzen von Grund- und Gegenkörper in Kontakt kommen. Kritisch wird es erst, wenn überdurchschnittlich hoher Verschleiß bereits in einem frühen Stadium auftritt. Der Materialabtrag hat typischerweise zwei Komponenten; den „abrasiven“ (spanenden) und „adhäsiver“ Verschleiß. Im Wälzlager tritt dieser Verschleiß häufig aufgrund von Geschwindigkeitsunterschieden der Wälzkontaktflächen auf. Die Ursache dieser Geschwindigkeitsunterschiede können kinematische Bedingungen (z.B. hoher Schlupf in Axialrollenlagern) sowie hohe Beschleunigungen und/oder Verzögerungen sein.

Die Ursache für abrasiven Verschleiß im Wälzlager sind meistens harte Teilchen, die entweder von außen ins Lager eingetreten sind oder es handelt sich um Verschleißteilchen, welche schon auf einen anderen Primärschaden hindeuten (z. B. Pitting). Sind die Partikel relativ klein wirkt die verschlissene Oberfläche eher wie poliert, bei größeren Teilchen erkennt man Riefen. Problematisch ist, dass der Schadensverlauf progressiv ist, da immer mehr Verschleißteilchen entstehen, die sich dann zunehmen negativ auf den Schmierstoff und die Schmierung auswirken.

Adhäsiver Verschleiß tritt hauptsächlich aufgrund schlechter Schmierbedingungen und großen Geschwindigkeitsunterschieden zwischen Grund- und Gegenkörper auf. Ein Beispiel dafür ist der Übergang eines Wälzkörpers aus der unbelasteten Zone in die belastete Zone. Aufgrund der hohen Energieumsätze im Fall von adhäsivem Verschleiß kommt es meistens auch zu tiefer gehenden Werkstoffveränderungen (Anlasseeffekte, lokale Aufhärtungen).

1.2.1.3 Korrosion

Korrosion entsteht in Gegenwart von Wasser, aggressiven Medien und Feuchtigkeit. Auch eine hohe Luftfeuchtigkeit und die Berührung der Laufflächen mit den Fingern können Korrosion hervorrufen. Ein guter Korrosionsschutz sowohl beim Transport als auch im Betrieb ist daher unverzichtbar. Korrosion in den Laufbahnen tritt oft bei Stillstand auf und ist dann in Form von Korrosionsmarkierungen im Wälzkörperabstand sichtbar. Im Gegensatz zu anderen Schadensvorgängen kann Korrosion relativ plötzlich auftreten und schnell tiefe Schäden erzeugen.

Eine spezielle Form der Korrosion ist die Reibkorrosion (Passungsrost) oder wissenschaftlich korrekter, die tribochemische Reaktion. Diese Korrosionsform tritt aufgrund einer tribologischen Beanspruchung auf. Die tribochemische Reaktion zählt ebenfalls zu den vier Hauptverschleißmechanismen in der Tribologie [GfT7]. Die Hauptursache für Reibkorrosion ist die Aktivierung der Oberflächen durch Mikrogleitbewegungen welche zur Reaktion des Werkstoffs mit Bestandteilen des Umgebungsmediums oder des Schmierstoffs führt. Meistens tritt diese Art von Reibkorrosion zwischen dem Lageraußenring und dem Gehäuse und/oder zwischen der Lagerbohrung und der Welle auf. Die Mikrogleitbewegungen werden hauptsächlich durch elastische Verformungen infolge zyklischer Belastungen oder durch Wärmedehnungen verursacht. Inadäquater Lagersitz, Wellendurchbiegung und/oder Schwachstellen an den Berührungsflächen können die Ursache hierfür sein. Beim sogenannten Passungsrost entstehen Eisenoxide, die ein größeres Volumen aufweisen als reiner Stahl. Hierdurch kann es zum Klemmen, zum Verlust der Loslagerfunktion und zu hohen örtlichen Spannungen kommen.

Das Thema False-Brinelling, das Hauptbestandteil dieses Buches ist, wird in der ISO 15243 ebenfalls dem Hauptausfallmechanismus Korrosion zugeordnet. Als Grund wird auf die Reibkorrosionseffekte infolge von Mikrogleitbewegungen in der Kontaktzone verwiesen. Für sehr kleine Vibrationsbewegungen ist diese Eingruppierung korrekt. Bei etwas größeren Schwenkwinkeln kommen aber andere Mechanismen hinzu. Wie in vielen Beschreibungen und Publikationen zu diesem Thema, fehlt also auch hier die Differenzierung unterschiedlicher Randbedingungen.

1.2.1.4 Elektroerosion

Fließt elektrischer Strom durch ein Lager, kommt es an den Kontaktstellen zwischen Wälzkörper und Laufbahnen zu erosiven Schäden. Der Vorgang ist mit dem elektrischen Lichtbogenschweißen oder dem Funkenerodieren vergleichbar (hohe Stromdichte bei kleiner Wirkfläche). Der Werkstoff wird lokal stark erwärmt, was man an Anlassfarben oder kleinen Schmelzkratern in der Größenordnung von 0,1 mm bis 0,5 mm erkennt. Weitere Informationen zu dieser Schadensform folgen im Kapitel 2.3.3.2 (Riffelbildung infolge Stromdurchgang), da die Schäden teilweise mit Stillstandsmarkierungen verwechselt werden können.

1.2.1.5 Plastische Verformung

Bleibende plastische Verformungen treten auf, wenn die Streckgrenze des Werkstoffs überschritten wird. Überlast entsteht durch unvorhergesehene statische oder dynamische Belastungen. Sie zeigt sich in Form von Vertiefungen im Wälzkörperabstand weswegen eine Verwechselung mit False-Brinelling- oder Stillstandsmarkie-

rungen möglich ist. Ursache des Problems sind häufig Fehler bei der Montage, wenn zum Beispiel beim Aufpressen des Lagers Einbaukräfte über die Wälzkörper geleitet werden.

Eine andere Ursache für plastische Verformungen sind sogenannte Eindrückungen durch Fremdkörper, die in das Lager eingedrungen und durch die Wälzkörper in die Laufbahnen eingewalzt worden sind. Größe und Form der Eindrückungen hängen von der Art der Teilchen ab. Bestehen die Partikel nicht aus einem Stahlwerkstoff (z.B. Sandpartikel) lassen sie sich relativ leicht mittels energiedispersiver Röntgenanalyse (EDX) nachweisen. Aufgrund der lokal wirkenden Spannungen an den Aufwerfungen um die Eindruckstelle kommt es häufig zu frühzeitiger Werkstoffermüdung oder Abrasion.

1.2.1.6 Bruch und Rissbildung

Bruch oder Rissbildung tritt auf, wenn die Zugfestigkeit des Werkstoffs überschritten wird. Gewaltbruch wird durch Spannungskonzentrationen verursacht, die infolge örtlicher Überlastung die Zugfestigkeit des Werkstoffs überschreiten. Dies kann infolge einer unsachgemäßen Behandlung (z.B. Schläge) beim Ein- bzw. Ausbau eines Lagers verursacht werden. Eine andere Ursache ist ein zu starkes Aufpressen auf einen kegeligen Sitz oder eine Spannhülse bzw. eine zu eng gewählte Presspassung mit der Folge, dass die im Ring entstehenden Zugspannungen bei Inbetriebnahme des Lagers Risse verursachen.

Ein Ermüdungsbruch entsteht, wenn die Schwingfestigkeit unter zyklischer Beanspruchung überschritten wird. Ermüdungsbrüche können auch bei einem Presssitz mit hohen Umfangsspannungen entstehen. Die Kombination aus Hertzscher Pressung und Umfangsspannungen führen zu hohen lokalen Spannungen und damit zu einer vorzeitigen Ermüdung. Die Dauerfestigkeit des verwendeten Werkstoffs und die auftretenden Spannungen sind entscheidend, wie schnell es zu einem Ausfall kommt.

1.3 Praxisbezug

Der False-Brinelling-Effekt tritt in zahlreichen Bereichen der Technik auf, die hier kurz dargestellt werden sollen, um den Praxisbezug dieses Buches zu verdeutlichen. Detaillierter werden dann drei Beispiele im Kapitel 3 „Systemanalyse betroffener realer Systeme (Praxisbeispiele)“ behandelt.

Erstmals im großen Stil traten Stillstandsmarkierungen beim Schiffs- und Schienentransport von PKW in den 30er Jahren auf. Die Transportschäden bei den Wälzlagern in den Achsen von Kraftfahrzeugen gaben bereits 1937 den Anlass zu ersten umfangreichen Versuchen von ALMEN bei General Motors Corporation [ALME1937]. Heute ist dieses Problem durch verbesserte Fahrwege und bessere Dämpfungssysteme deutlich vermindert und tritt nur noch vereinzelt beim Transport von Fahrzeugen oder Maschinen in Schwellen- oder Dritte-Welt-Ländern auf, in denen die genannten Transportwege noch nicht dem hiesigen Standard entsprechen und häufig zudem auch noch tiefe Temperaturen herrschen (Osteuropa, Nordchina).



*Abbildung 3: Erster Spezial-Pkw-Transport der Bundesbahn 1953
(Foto: Klaus Wedde; privat)*

Heute sind neben Sonderkonstruktionen, bei denen ganz bewusst kleine Schwenkbewegungen benötigt werden, vorwiegend Hydraulikkomponenten sowie benachbarte Aggregate betroffen. Für den Laien überraschend ist, dass bei redundanten Systemen die Aggregate geschädigt werden, die nicht im Dauerbetrieb sind. In der stark saisonalen Zuckerherstellung aus Zuckerrüben ist dieses Problem bei Pumpen bekannt und gefürchtet. Weitere aktuelle Beispiele für False-Brinelling-Schäden mit denen sich das Team des Kompetenzzentrum Tribologie in den letzten Jahren beschäftigt hat sind die Pitch-Lagerungen von Windkraftanlagen (s. Abbildung 4), Motorrad-Lenkkopflager, Verstelllager an Axialkolbenmaschinen, wälzgelagerte Linearführungen von Werkzeugmaschinen oder Vakuumkammern sowie Schildverstellungen an Motorgradern (Baufahrzeuge).



Abbildung 4: Windkraftanlage (Foto: pixabay)

2 Grundlagen und Begriffsdefinitionen

Unter "Stillstandsmarkierungen" oder „False-Brinelling-Marken“ werden ganz allgemein Schäden verstanden, die an Oberflächen von Wälzpaarungen in Form von periodisch oder aperiodisch wiederkehrenden muldenförmigen Schädigungen oder Markierungen beobachtet werden und die eine tribologische Ursache haben. Damit sind sie schon einmal von plastischen Deformationen und Schäden durch Stromdurchgang abgegrenzt, die ebenfalls Markierungen im Abstand der Wälzkörper verursachen (siehe auch Kapitel 2.3 „Abgrenzung zu verschiedenen ähnlichen Schadensbildern“).

False Brinelling bei Wälzlagern ist ein Schadensfall, der zwar schon seit langem bekannt ist, für dessen generelle Vermeidung aber trotz zahlreicher Forschungsarbeiten bis heute noch kein sicherer Weg gefunden ist. Dieses Buch soll daher helfen, ein Verständnis für die wirkenden Mechanismen aufzubauen und dann für den jeweiligen Anwendungsfall geeignete Abhilfemaßnahmen zu finden.

Stillstandsmarkierungen sind einzeln oder mehrfach auftretende Beschädigungen der Laufbahnoberfläche, die sich über einen Teil oder über den ganzen Umfang erstrecken und bei Lagern auftreten, die makroskopisch keine „echte“ oder „normale“ Bewegung ausführen. Der Abstand zwischen diesen Markierungen entspricht typischerweise dem Wälzkörperabstand. Allerdings kann es sein, dass das Lager während es Betriebs in verschiedenen Positionen zum Stillstand kommt, sodass dann auch unregelmäßige Abstände möglich sind. Wie später noch nachgewiesen wird (Kapitel 9.4.5), werden auch die Wälzkörper geschädigt, was häufig vergessen wird, da die Markierungen dort deutlich schwerer zu finden sind. Die Form der Markierung ist von den Krümmungsverhältnissen und den Schwenkwinkeln abhängig. Bei Kugellagern stellen sich elliptische Kontaktflächen ein, bei Rollenlagern quasi rechteckige.

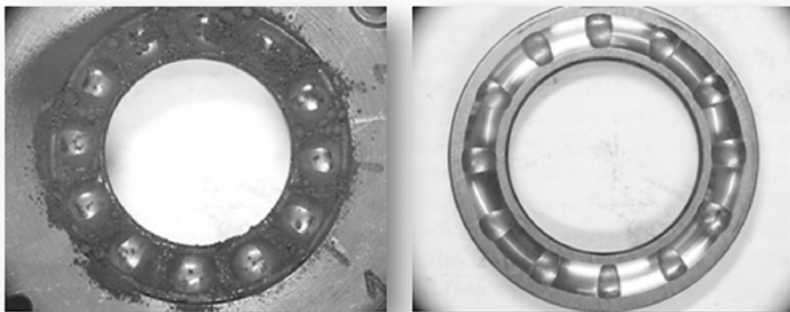


Abbildung 5: Geschädigtes Lager (links ungereinigt, rechts gereinigt)

Unabhängig von der Entstehungsursache kommt es bei durch False-Brinelling oder Stillstandsmarkierungen geschädigten Lagern immer zu einer mehr oder weniger starken Störung des dynamischen Verhaltens der Lager im Betrieb. Mulden vergrößern das Anlaufreibmoment und machen sich akustisch in einer Erhöhung des Lauf-

geräusches bemerkbar. Die Laufbahnwelligkeit bewirkt Stöße und selbst erregte Schwingungen und damit einen in seiner Wirkung sich selbst aufschaukelnden, ständig zunehmenden Schädigungsverlauf mit vorzeitiger Materialermüdung und Ausbrüchen. Selbst kleine Vertiefungen im Bereich von ca. 10 Mikrometern führen bei kleineren Lagern bereits zu einem spürbaren Einrasten.

Aus der Praxis ist bekannt, dass fettgeschmierte Lagerungen gegenüber Stillstandsmarkierungen anfälliger sind als ölgeschmierte, was die Schlussfolgerung nahe legt, dass das Nachfließverhalten einen großen Einfluss auf die Entstehung hat. Neben solchen allgemeinen Erkenntnissen gab es bisher kaum systematische Untersuchungen zu den Ursachen von Stillstandsmarkierungen sowie zu kritischen Parametern. Über den Einfluss der Schmierfettkomponenten auf das Schmierungsverhalten bei den genannten Betriebsbedingungen sind in der Literatur ebenfalls keine umfangreichen, grundlegenden Untersuchungen dokumentiert. Bis in die 60er Jahre hinein wurde das Thema noch relativ intensiv erforscht. Eine der letzten umfangreichen Arbeiten stammt von PITTROFF und ist damit auch schon über 55 Jahre alt [PITT1961]. Neuere veröffentlichte Forschungsarbeiten hierzu behandeln meistens sehr spezielle Betriebsfälle z.B. hohe Wasserkonzentrationen im Fett [SAND02] oder im Vergleich zu den Stillstandsschäden relativ große Schwenkwinkel [BART1998; FVA315].

Dieses Buch ist somit die erste allgemein zugängliche Veröffentlichung, die sich mit dem aktuellen Stand zu diesem Thema auseinandersetzt.

2.1 Entstehung des Begriffs „False-Brinelling“

Der Begriff „False-Brinelling“ wurde von ALMEN im Jahr 1937 definiert [ALME1937] und leitet sich von der bekannten Härteprüfung nach Brinell ab. Die vom schwedischen Ingenieur Johann August Brinell im Jahre 1900 entwickelte und auf der Weltausstellung in Paris präsentierte Methode der Härteprüfung kommt bei weichen bis mittelharten Metallen (DIN EN ISO 6506) wie zum Beispiel unlegiertem Baustahl oder Aluminiumlegierungen und bei Werkstoffen mit ungleichmäßigem Gefüge wie etwa Gusseisen zur Anwendung. Dabei wird eine Hartmetallkugel mit einer festgelegten Prüfkraft in die Oberfläche des zu prüfenden Werkstückes gedrückt. Es entsteht ein bleibender Eindruck, der vermessen wird. Das Verhältnis von Prüfkraft zur Eindruckoberfläche multipliziert mit dem Wert 0,102 bezeichnet man als die Brinellhärte (Einheit HB).

Um wieder auf die Wälzlager zurückzukommen versteht man also unter „echtem Brinelling“ eine über die Elastizitätsgrenze hinausgehende Überbelastung des Lagers. Diese kann beispielsweise bei einer einmaligen Stoß- oder Schlagbelastung bei der Montage oder im Betrieb entstehen.

Der Begriff des „False-Brinellings“ wurde aufgrund der häufig falschen Deutung von muldenartigen Vertiefungen in den Laufflächen von Wälzlagern kreiert. Unerfahrenes Instandhaltungspersonal hat solche Vertiefungen häufig auf eine rein mechanische Überbelastung zurückgeführt, obwohl es sich – wie wir heute wissen – um eine triboologisch indizierte Schädigung handelt.