
Feststoffgeschmierte Wälzlager

Herbert Birkhofer • Timo Kümmerle

Feststoffgeschmierte Wälzlager

Einsatz, Grundlagen und Auslegung

Prof. Dr. Herbert Birkhofer
Fachgebiet Produktentwicklung
und Maschinenelemente
TU Darmstadt
Darmstadt
Deutschland

Timo Kümmerle
Fachgebiet Produktentwicklung
und Maschinenelemente
TU Darmstadt
Darmstadt
Deutschland

ISBN 978-3-642-16796-6
DOI 10.1007/978-3-642-16797-3

ISBN 978-3-642-16797-3 (eBook)

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

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE.

Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media

www.springer-vieweg.de

Vorwort

Das vorliegende Buch entstand mit dem Ziel, die Vielzahl der Ergebnisse und Erkenntnisse aus annähernd 40 Jahren Forschung auf dem Gebiet der feststoffgeschmierten Wälzlager zusammenzufassen und sie für die Praxis aufzubereiten. Dabei stand das Bemühen im Vordergrund, den Einsatz der Feststoffschmierung durch konkrete Anleitungen für die Auswahl zu unterstützen und durch eine Vielzahl von Beispielen zu illustrieren. Anwender sollen eine verlässliche Methode zur betriebssicheren Auslegung feststoffgeschmierter Wälzlager erhalten. Für Lagerhersteller und Beschichter sollen die Potentiale, aber auch die derzeitigen Grenzen der Feststoffschmierung aufgezeigt und Hinweise für weitere Optimierungen gegeben werden.

Bei der Konzeption des Buchs wurde jedoch schnell deutlich, dass eine alleinige Abhandlung zum zweckmäßigen Einsatz feststoffgeschmierter Wälzlager wenig zielführend ist. Derartige Lager stellen in ihren Wirkungszusammenhängen komplexe tribologische Systeme dar. Nur wenn die Lagerausrüstung, die Festschmierstoffeigenschaften, die Beschichtungstechnologie sowie die Betriebsbedingungen und die Lagerumgebung spezifiziert und die vielfältigen Wechselwirkungen zwischen diesen Faktoren verstanden werden, kann eine gezielte Auswahl und Auslegung erfolgen. Daher werden in diesem Buch auch die für das Verständnis der Feststoffschmierung notwendigen Grundlagen der Wälzlagertheorie und die in der Lageranwendung gebräuchlichen Festschmierstoffe und Beschichtungstechnologien mit ihren Eigenschaften detailliert behandelt. Schrittweise werden danach die vielfältigen Beziehungen zwischen den Einflussfaktoren auf Gebrauchs- und Lebensdauer modelliert, wenn möglich, mathematisch formuliert und durch Versuche evaluiert. Damit wird dieses Buch auch für Wissenschaftler, die sich mit Wälzkontakten, Wälzlager und Schmierstoffen generell befassen, interessant. Es liegt nicht nur ein Handbuch zur Wälzlagerauslegung vor, sondern eine systematische Herleitung der Zusammenhänge, die für die Lebensdauer feststoffgeschmierter Wälzkontakte bestimmend sind. Erstmals wird hier auch für die weit verbreitete Feststoffschmierung von Wälzlager mit Molybdändisulfid (MoS_2) eine fundierte und evaluierte Theorie zur Gebrauchsdauerprognose vorgestellt.

Die Forschung an feststoffgeschmierten Wälzkontakten und Wälzlager wurde am ehemaligen Fachgebiet Maschinenelemente und Konstruktionslehre (MuK) der TH Darmstadt unter Leitung von Prof. Dr. h.c. Dr.-Ing. E.h. Dr.-Ing. Gerhard Pahl ab Mitte der

sechziger Jahre des vorigen Jahrhunderts betrieben. Unter seiner Leitung entstanden die grundlegenden Dissertationen von Hübner, Holland, Rüblinger und Reinwald, in denen die Grundlagen der Feststoffschmierung erarbeitet wurden. Ab 1990 wurde die Lagerforschung unter Prof. Dr. h.c. Dr.-Ing. Herbert Birkhofer am späteren Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd) der heutigen TU Darmstadt konsequent fortgesetzt. Wichtige Meilensteine waren die Dissertationen von Schul, Heinz-Schwarzmaier, Madan, Bozkurt und Kümmerle und die Arbeiten von Li. Dabei wurde der intensiven Weiterentwicklung und Leistungssteigerung von Festschmierstoffen und Beschichtungsverfahren Rechnung getragen, aber auch die hier vorgestellten Reibenergie-, Verschleiß-, Transfer- und Gebrauchsdauermodelle erarbeitet bzw. erweitert. Neben einer Vielzahl von Veröffentlichungen und Konferenzbeiträgen liegt mit diesen Arbeiten ein Fundus an Ergebnissen und Erkenntnissen zur Feststoffschmierung vor, der die Basis dieses Buchs bildet und hier in eine zusammenhängende Lebens- und Gebrauchsdauertheorie eingebunden wird.

Die Autoren danken allen, die durch ihre inhaltliche Arbeit dieses Buch erst ermöglicht haben. Dank gebührt auch dem VDI-Verlag, dem Shaker-Verlag sowie den Herren Dr. Hübner, Dr. Holland und Dr. Rüblinger, die uns großzügig Rechte an Veröffentlichungen abgetreten haben. Nicht zuletzt soll auch Herrn Leimgruber und Herrn Matthey für ihre vielfältige fachliche Unterstützung bei Planung und Bau von Versuchseinrichtungen sowie bei der Durchführung und Auswertung einer Vielzahl von Versuchen gedankt werden. Schließlich danken die Autoren Frau Nintzel und Herrn Dr. Dohnal für die kritische Durchsicht des Manuskripts und die wertvollen Korrekturvorschläge.

Darmstadt im Januar 2012

Prof. Dr. h.c. Dr.-Ing. Herbert Birkhofer
Dr.-Ing. Timo Kümmerle

Inhalt

1 Anwendung feststoffgeschmierter Wälzlager	1
1.1 Einsatzgebiete und Anwendung von Festschmierstoffen	2
1.1.1 Einsatz bei hohen Temperaturen	2
1.1.2 Einsatz bei niedrigen Temperaturen	3
1.1.3 Einsatz im Vakuum	4
1.1.4 Einsatz bei energiereicher Strahlung	6
1.1.5 Einsatz in aggressiven Medien	7
1.1.6 Einsatz unter Reinraumbedingungen	7
1.1.7 Einsatz bei besonderen Hygieneanforderungen	7
1.1.8 Einsatz im Aussetzbetrieb	9
1.1.9 Einsatz bei anomalen Belastungen	10
1.2 Unterschiede bei der Anwendung von Festschmierstoffen und Fetten/Ölen	11
1.3 Potenziale und Grenzen der Anwendung	12
1.3.1 Potenziale der Feststoffschmierung	12
1.3.2 Grenzen der Feststoffschmierung	13
1.4 Zusammenfassung	14
Literatur	14
2 Die Tribologie von Festschmierstoffen	15
2.1 Tribologische Grundlagen	15
2.1.1 Tribosysteme	15
2.1.2 Reibungsarten	16
2.1.3 Reibungszustände	23
2.1.4 Verschleißarten	24
2.1.5 Weitere tribologische Phänomene	25
2.2 Festschmierstoffe und ihre tribologischen Eigenschaften	26
2.2.1 Grundlagen	26
2.2.2 Einteilung der Festschmierstoffe	28
2.2.3 Polymere	30
2.2.4 Schichtgitter-Festschmierstoffe	35
2.2.5 Weichmetalle	44

2.3 Zusammenfassung	51
Literatur	52
3. Theorie der Lebensdauer feststoffgeschmierter Gleit- und Wälzkontakte ...	55
3.1 Die Mechanik feststoffgeschmierter Gleit- und Wälzkontakte	55
3.1.1 Kontaktgeometrie und Kontaktkinematik	56
3.1.2 Das Belastungsmodell – äußere und innere mechanische Lasten ...	58
3.1.3 Das Beanspruchungsmodell	59
3.1.4 Das Kinematikmodell	68
3.2 Die Tribologie feststoffgeschmierter Gleit- und Wälzkontakte	77
3.2.1 Das Reibenergiemodell	77
3.2.2 Das Verschleißmodell	78
3.2.3 Das Lebensdauermodell	81
3.3 Zusammenfassung	88
Literatur	89
4 Lebensdauerprüfverfahren für feststoffgeschmierte Gleit- und Wälzkontakte	91
4.1 Grundlagen	91
4.1.1 Begriffe und Definitionen	91
4.2 Lebensdauerprüfverfahren	94
4.3 Lebensdauerprüfverfahren für feststoffgeschmierte Gleitkontakte	95
4.3.1 Stift-Scheibe-Versuche	96
4.3.2 Walze-Platte-Versuche	96
4.4 Lebensdauerprüfverfahren für feststoffgeschmierte Wälzkontakte	106
4.4.1 Modifizierter Vierkugelapparat	107
4.4.2 Mechanik der Wälzbeanspruchung im Vierkugelapparat	111
4.5 Auswertung der Lebensdauerprüfung	121
4.5.1 Versagensindikatoren	122
4.5.2 Optische Auswertung und Schäden	123
4.5.3 Makroskopische Untersuchung	123
4.5.4 Bestimmung des Verschleißvolumens	124
4.5.5 Mikroskopische Untersuchungen	125
4.6 Zusammenfassung	126
Literatur	127
5 Wälzlager und Lagerkomponenten	129
5.1 Aufbau und Normung von Wälzlagern	130
5.1.1 Aufbau von Wälzlagern	130
5.1.2 Bauformen von Wälzlagern	130
5.1.3 Normung von Wälzlagern	130
5.2 Wälzlagerkomponenten	133
5.2.1 Wälzkörper	133
5.2.2 Lagerringe	133

5.2.3	Werkstoffe für Wälzkörper und Lagerringe	134
5.2.4	Käfige	135
5.3	Wälz- und Gleitkontakte im Wälzlager	137
5.3.1	Lastübertragung	139
5.3.2	Wälzkörperführung	141
5.3.3	Käfigführung	145
5.4	Kopplungen und Freiheitsgrade im Wälzlager	147
5.4.1	Selbsthaltung	147
5.4.2	Zusammenhang Radialluft–Axialluft	147
5.4.3	Kippwinkel	149
5.5	Zusammenfassung	151
	Literatur	151
6	Mechanik und Thermodynamik feststoffgeschmierter Wälzlager	153
6.1	Statik und Elastomechanik von Wälzlagern	153
6.1.1	Druck- und Lastwinkel	153
6.1.2	Lastverteilung	157
6.1.3	Steifigkeit von Wälzlagern	160
6.2	Kinematik von Wälzlagern	161
6.2.1	Kinematik des idealen Wälzlagers	161
6.2.2	Anzahl Überrollungen	163
6.2.3	Umfangsgeschwindigkeit und Drehzahl des Käfigs	165
6.3	Dynamik feststoffgeschmierter Wälzlager	165
6.3.1	Änderung der Wälzkörper-Wirkdurchmesser in der Lastzone	166
6.3.2	Änderung der Kugelorbitalgeschwindigkeit in der Lastzone	168
6.3.3	Kugel-Käfig-Dynamik	168
6.3.4	Modellierung und Simulation der Kugel-Käfig-Dynamik	170
6.3.5	Reibenergiemodell für den Kugel-Käfig-Kontakt	174
6.4	Umgesetzte Reibenergie im Kugel-Käfig-Kontakt	174
6.4.1	Reibenergieansatz	175
6.4.2	Kontaktkräfte und Kugelposition	176
6.5	Thermodynamik feststoffgeschmierter Wälzlager	178
6.5.1	Verformungen beim Einbau des Lagers	178
6.5.2	Wärmedehnungen im Lager	179
6.5.3	Veränderungen der radialen Lagerluft	183
6.6	Zusammenfassung	186
	Literatur	186
7	Theorie der Gebrauchsdauer feststoffgeschmierter Wälzlager	189
7.1	Begründung des Reibenergiemodells als Grundlage einer Gebrauchsdauerprognose	189
7.2	Berechnung der Reibenergiebeanspruchung	192
7.2.1	Berechnung der Reibenergie für beschichtete Ringe	192

7.2.2	Berechnung der Reibenergie für beschichtete Wälzkörper	192
7.2.3	Berechnung der Summenreibenergie	194
7.3	Berechnung des nutzbaren Schmierstoffvolumens	198
7.3.1	Nutzbares Schmierstoffvolumen bei beschichteten Umlaufkugeln mit Kugeldrehachsenänderung	199
7.3.2	Nutzbares Schmierstoffvolumen bei beschichteten Umlaufkugeln ohne Kugeldrehachsenänderung	200
7.3.3	Nutzbares Schmierstoffvolumen bei beschichteten Antriebs- und Gegenkörpern und unbeschichteten Umlaufkugeln ohne Kugeldrehachsenänderung	200
7.3.4	Nutzbares Schmierstoffvolumen bei beschichteten Antriebs- und Gegenkörpern und unbeschichteten Umlaufkugeln mit Kugeldrehachsenänderung	202
7.3.5	Erkenntnisse zum nutzbaren Schmierstoffvolumen	202
7.3.6	Berechnung des nutzbaren Schmierstoffvolumens bei Transferschmierung	203
7.4	Ermittlung des Reibenergie-Verschleiß-Faktors	206
7.5	Berechnung der Gebrauchsdauer	207
7.6	Evaluation des Gebrauchsdauermodells	208
7.6.1	Evaluation des Gebrauchsdauermodells durch Variation der Geometrie der Antriebskugel	208
7.6.2	Evaluation des Gebrauchsdauermodells für die Ausgangskonfiguration	210
7.6.3	Evaluation des Gebrauchsdauermodells für eine Alternativkonfiguration	211
7.6.4	Evaluation des Gebrauchsdauermodells für eine andere Baugröße	213
7.6.5	Einführung eines temperaturabhängigen Reibenergie-Verschleiß-Faktors	214
7.7	Zusammenfassung	216
	Literatur	216
8	Lebensdauerprüfverfahren für feststoffgeschmierte Wälzlager	217
8.1	Lagerversuche und Prüfstände	217
8.1.1	Prinzip einer Lagerprüfung im Vier-Lager-Prüfstand	217
8.1.2	Aufbau eines Vier-Lager-Prüfstands	219
8.1.3	Messdatenerfassung und Regelung	220
8.1.4	Vierlagerprüfstände 6001 und 6205	222
8.1.5	Vorbereitung und Inbetriebnahme des Vier-Lager-Prüfstands	223
8.1.6	Inbetriebnahme des Prüfstands und Versuchsdurchführung	225
8.2	Indikatoren für Erreichen der Lebensdauer	226
8.2.1	Summenreibmoment	226
8.2.2	Temperaturentwicklung im Lager	227
8.2.3	Vibrationen und Geräuschentwicklung	228

8.3	Lagerschäden	230
8.3.1	Lagerschäden mit regulärer Schädigung	230
8.3.2	Lagerschäden mit irregulärer Schädigung	231
8.3.3	Käfigschäden	233
8.3.4	Tribologische Schadensanalyse der Versuchslager	234
8.4	Zusammenfassung	239
	Literatur	239
9	Lebensdauerauslegung und Gebrauchsdauer-bestimmung für feststoffgeschmierte Wälzlager	241
9.1	Hinweise für Anwender zur Lebensdauerauslegung für feststoffgeschmierte Wälzlager generell	241
9.1.1	Klären der Aufgabe und Ermitteln der Anforderungen	242
9.1.2	Ermittlung aussichtsreicher Lagerungs- und Schmierungskonzepte	243
9.2	Gebrauchsdauerprognose für Wälzlager mit MoS ₂ -Schmierung	245
9.2.1	Argumentationslinie des Gebrauchsdauermodells	245
9.2.2	Gültigkeitsbereich der Gebrauchsdauerprognose	246
9.2.3	Anleitung zur Auslegung MoS ₂ geschmierter Wälzlager	247
9.3	Hinweise für Lagerhersteller zur Optimierung der Wälzlagergeometrie im Hinblick auf ihren Einsatz mit Festschmierstoffen	255
9.4	Zusammenfassung	257
	Sachverzeichnis	259

Abkürzungsverzeichnis

Symbolverzeichnis

a (mm)	Länge der großen Druckellipsenhalbachse
A (mm ²)	Fläche
a^*, b^*	Hertz'sche Beiwerte zur Berechnung der Halbachsen
b (mm)	Länge der kleinen Druckellipsenhalbachse
B (mm)	Breite
C (N)	Dynamische Tragzahl
c (N/mm)	Steifigkeit
C_0 (N)	Statische Tragzahl
C_i	Lagerluftgruppe
d, D (mm)	Durchmesser
D_G (mm)	Durchmesser Gehäuse
D_W (mm)	Durchmesser Welle
E (N/mm ²)	Elastizitätsmodul
e (µm)	Lagerluft, Wälzlagerspiel
F (N)	Kraft
F_N (N)	Normalkraft
F_R (N)	Reibkraft
F_S (N)	Stützlast
F_V (N)	Verdrängungswiderstand
GD (U)	Gebrauchsdauer
h_s (mm)	Schichtdicke
I (kg m ²)	Massenträgheitsmoment
I_V (mm ³ /km)	Verschleißintensität
K_V (mm ³ /m)	Reibenergieverschleißfaktor
l (m)	Strecke, Länge, Axialspiel von Mittellage aus
L_0 (mm)	Abstand der Mittelpunkte der Rillennadien
LD (U bzw. h)	Lebensdauer in Umdrehungen bzw. Stunden
l_R (m)	Gleitweg
M (Nmm)	Moment

m (kg)	Masse
MP	Mittelpunkt
M_R (Nmm)	Reibmoment
N	Anzahl, Anzahl der Umdrehungen
n (1/min)	Drehzahl
N_p	Anzahl der Überrollung
p (N/mm ²)	Druck, Hertz'sche Flächenpressung
p_0, p_{max} (N/mm ²)	Maximale Hertz'sche Pressung
P_R (mW)	Reibleistung
Q (N)	Kontaktnormalkraft
\dot{Q} (Nm)	Wärme, Wärmemenge
R, r (mm)	Krümmungsradius
R_a (μm)	Arithmetischer Mittenrauwert
R_I, R_A	Rillenradius Innen, Rillenradius Außen
RP (mJ)	Reibenergiepotential
R_z (μm)	Gemittelte Rautiefe
R_{zx} (mm)	Ersatz-Krümmungsradius in der zx -Ebene
S	Radienverhältnis (Schmiegun)
s	Schlupf
T ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatur
t (s)	Zeit
u (mm/s)	Umfangsgeschwindigkeit
U (mm)	Umfang, Umfangsstrecke
\ddot{U} (μm)	Übermaß
v (mm/s)	Geschwindigkeit
V (mm ³)	Verschleißvolumen
VD	Versuchsdauer
VI	Streckenverhältnis
V_p (mm ³)	Nutzbares Schmierstoffvolumen
v_r (mm/s)	Rollgeschwindigkeit
v_{rel} (mm/s)	Relativgeschwindigkeit
W_R (mJ)	Reibarbeit, Reibenergie
W_{RP} (mJ)	Reibenergie pro Überrollung
W_{SR} (mJ)	Summenreibenergie
X	Radialfaktor des Wälzlagers
x, y, z	Kartesische Koordinaten
x_I, x_A (mm)	Rolllinien am Innen- und Außenring
Y	Axialfaktor des Wälzlagers
Z	Anzahl der Umlaufkugeln, Wälzkörper
α (rad)	Betriebsdruckwinkel
α_0 (rad)	Nennndruckwinkel
α_T (1/K)	Ausdehnungskoeffizient

β (rad)	Lastwinkel
γ	Bezogene Koordinate in x-Richtung x/a
γ_0	Bezogene Koordinate der Rolllinie in x-Richtung
δ (mm)	Abplattung
Δ	Veränderung, Differenz, Unterschied
δ^*	Hertz'scher Beiwert zur Berechnung der Abplattung
ΔV (mm ³ /U)	Verschleißrate
η	Bezogene Koordinate in y-Richtung y/b
θ (rad)	Kontaktwinkel
Θ_K (rad)	Kippwinkel
μ	Reibwert
μ_0	Haftreibwert
μ_b	Bohrreibwert
μ_r	Rollreibwert
ν	Querdehnungszahl
ξ, η, ψ	Hertz'sche Beiwerte
ρ (kg/mm ³)	Dichte
ρ_{ij} (1/mm)	Reziproker Krümmungsradius
σ (N/mm ²)	Normalspannung (Zug-/Druckspannung)
σ_{dB} (N/mm ²)	Druckfestigkeit
σ_{dF} (N/mm ²)	Druckfließgrenze
Σp (1/mm)	Summe der Krümmungen
σ_p (N/mm ²)	Flächenpressung
τ (N/mm ²)	Schubspannung
τ_s (N/mm ²)	Scherfestigkeit
φ (rad)	Winkel, Drehwinkel
φ_U (rad)	Überrollwinkel
ψ (rad)	Winkelkoordinate für Kugelposition
ψ_L (rad)	Lastzonenwinkel
ω (rad/s)	Winkelgeschwindigkeit

Indizes

0	Ursprungswert, Ausgangswert, Nennwert
A	Außen, Außenring, Außenkörper
AK	Antriebskugel, Antriebskörper
ax	Axial
b	Bohranteil, in Bohrrichtung
B	Kontaktpunkt auf Bord/Außerling im VKA
BA	Außenbord
BI	Innenbord

C	Kontaktpunkt auf Platte im VKA
D	Dichtung
E	Einlauf
g	Gleiten
I	Innen, Innenring, Innenkörper, Kontaktpunkt auf
I	Innenkörper im VKA
ij	Kontaktkörper i in der Ebene j
K	Käfig
L	Last
m, M	Mittlerer, mittel
max	Maximal
min	Minimal
p	Druck
PL	Punktlast
proj	Projiziert
R	Reibung
r, t, z	In radialer, tangentialer oder z-Richtung
r, roll	In Rollrichtung
rad	Radial
rel	Relativ
res	Resultierend
Sp	Gespeichert
stat	Stationär
t	Teilkreis
T	Torsion
u	unten
U	Umgebung
UK	Umlaufkugel
UL	Umfangslast
w	Wälzen
W	Widerstand
x, y, z	In x-, y- oder z-Richtung
zul	Zulässig
δ	Abplattung, abgeplattete Zone

Abkürzungen

CD	Compact Disc
CVD	Chemical Vapour Deposition
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft

DLC	Diamond Like Carbon
DMS	Dehnungsmessstreifen
DVD	Digital Versatile Disc
EHD	Elastohydrodynamisch
FE	Finite Elemente
HRc	Härte nach Rockwell
KKR	Kugel-Kugel-Ring
KRP	Kugel-Ring-Platte
LCD	Liquid Crystal Display
MoS ₂	Molybdädisulfid
PA	Polyamid
PEEK	Polyetheretherkethon
PI	Polyimid
PKP	Platte-Kugel-Platte
ppm	Parts per million (Teile pro Millionen)
PTFE	Polytetrafluoräthylen
PVD	Physical Vapour Deposition
REM	Raster-Elektronen-Mikroskop
RFA	Röntgen-Fluoreszenz-Analyse
RKR	Ring-Kugel-Ring-Konfiguration
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
VH	Vickershärte
VKA	Vierkugelapparat