

---

# Inhalt

<b>1 Anwendung feststoffgeschmierter Wälzlager</b>	<b>1</b>
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
<b>2 Die Tribologie von Festschmierstoffen</b>	<b>15</b>
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
<b>3. Theorie der Lebensdauer feststoffgeschmierter Gleit- und Wälzkontakte ...</b>	<b>55</b>
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
<b>4 Lebensdauerprüfverfahren für feststoffgeschmierte Gleit- und Wälzkontakte .....</b>	<b>91</b>
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
<b>5 Wälzlager und Lagerkomponenten .....</b>	<b>129</b>
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 Normen 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
<b>6</b>	<b>Mechanik und Thermodynamik feststoffgeschmierter Wälzlager .....</b>	<b>153</b>
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
<b>7</b>	<b>Theorie der Gebrauchsdauer feststoffgeschmierter Wälzlager .....</b>	<b>189</b>
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	Nutzbare Schmierstoffvolumen bei beschichteten Umlaufkugeln mit Kugeldrehachsenänderung .....	199
7.3.2	Nutzbare Schmierstoffvolumen bei beschichteten Umlaufkugeln ohne Kugeldrehachsenänderung .....	200
7.3.3	Nutzbare Schmierstoffvolumen bei beschichteten Antriebs- und Gegenkörpern und unbeschichteten Umlaufkugeln ohne Kugeldrehachsenänderung .....	200
7.3.4	Nutzbare 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
<b>8</b>	<b>Lebensdauerprüfverfahren für feststoffgeschmierte Wälzlager .....</b>	<b>217</b>
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	<b>Lebensdauerauslegung und Gebrauchsdauer-bestimmung für feststoffgeschmierte Wälzlager</b> .....	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 <sub>2</sub> -Schmierung .....	245
9.2.1	Argumentationslinie des Gebrauchsdauermodells .....	245
9.2.2	Gültigkeitsbereich der Gebrauchsdauerprognose .....	246
9.2.3	Anleitung zur Auslegung MoS <sub>2</sub> geschmierter Wälzlager .....	247
9.3	Hinweise für Lagerhersteller zur Optimierung der Wälzlagergeometrie im Hinblick auf ihren Einsatz mit Festschmierstoffen .....	255
9.4	Zusammenfassung .....	257
	<b>Sachverzeichnis</b> .....	259