

Das SKF Verfahren zur Berechnung des Reibungsmoments

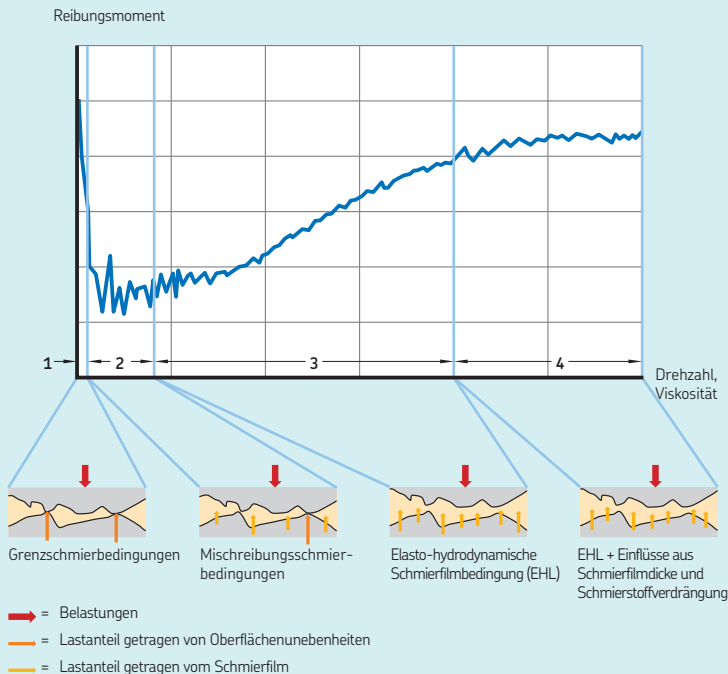
Die Reibung in einem Lager variiert und hängt von schmierfilmbedingten tribologischen Phänomenen ab, die an den Berührungsstellen zwischen den Wälzkörpern, Laufbahnen und Käfigen auftreten.

Eine lagerspezifische Reibungsmomentenkennlinie in Abhängigkeit von Drehzahl und Schmierstoffviskosität zeigt **Diagramm 1**. Diese ist in vier Zonen unterteilt:

- **Zone 1** – In diesem Bereich herrschen Grenzschmierbedingungen, in denen allein die Oberflächenunebenheiten die Last tragen, weshalb die Reibung zwischen den sich bewegenden Oberflächen hoch ist.
- **Zone 2** – Mischreibungsschmierbedingungen, in denen ein trennender Schmierfilm einen Teil der Last trägt und weniger Oberflächenunebenheiten sich berühren, wodurch die Reibung abnimmt.
- **Zone 3** – Elasto-hydrodynamische Schmierfilmbedingungen (EHL), in denen allein der Schmierfilm die Last trägt, allerdings mit erhöhten viskosen Verlusten, was die Reibung weiter ansteigen lässt.

Diagramm 1

Lagerreibungsmoment als Funktion von Drehzahl und Schmierstoffviskosität



Reibung

- **Zone 4** – Elasto-hydrodynamische Schmierfilmbedingungen (EHL) einschließlich schmierfilmreduzierenden und schmierstoffverdrängenden Einflüssen, die die Reibung nicht weiter ansteigen lassen und sogar mindern.

Um das Gesamtreibungsmoment in einem Lager berechnen zu können, sind die folgenden Betriebsbedingungen und die damit verbundenen Auswirkungen zu berücksichtigen:

- das Rollreibungsmoment und die möglichen Auswirkungen durch Schmierstoffverdrängung und Schmierfilmdicke
- das Gleitreibungsmoment und die möglichen grenzschmierbedingten Auswirkungen
- das Reibungsmoment der Berührungsdichtungen
- das Reibungsmoment aus Strömungs-, Plansch- und Spritzverlusten.

Das SKF Verfahren zur Berechnung des Reibungsmoments erfasst wesentlich genauer die tatsächlichen Vorgänge in einem Lager, da es alle lagerspezifischen Merkmale der SKF Lager und alle lagerungsbedingten Einflüsse berücksichtigt.

Das SKF Verfahren benutzt hierzu die Gleichung:

$$M = M_{rr} + M_{sl} + M_{seal} + M_{drag}$$

Hierin sind:

- M das Gesamtreibmoment [Nmm]
- M_{rr} das Rollreibungsmoment [Nmm]
- M_{sl} das Gleitreibungsmoment [Nmm] (→ Seite 5)
- M_{seal} das Reibungsmoment der Berührungsdichtungen [Nmm] (→ Seite 11)
- M_{drag} das Reibungsmoment bedingt durch Strömungs-, Plansch- oder Spritzverluste [Nmm] (→ Seite 12)

Das SKF Berechnungsverfahren beruht auf weiterentwickelten computergestützten Berechnungsmodellen. Es gilt für fett- und ölgeschmierte Lager und ermöglicht die Ermittlung von Näherungswerten für das Reibungsmoment unter folgenden Betriebsbedingungen:

- Bei Fettschmierung:

- stabiler Betriebszustand nach einigen Stunden Einlaufzeit
- ein Lithiumseifenfett auf Mineralölbasis
- ein Füllgrad von 30 % im Freiraum des Lagers
- Umgebungstemperaturen gleich/größer 20 °C
- Bei Ölschmierung:
 - Ölbad, Öl-Luft- oder Öleinspritz-Verfahren
 - Viskositäten im Bereich von 2 bis 500 mm²/s
- Belastungen gleich/größer der Mindestbelastung
- die Belastungen sind in Größe und Richtung unveränderlich
- normales Betriebsspiel
- Drehzahlen in Größe unveränderlich und nicht höher als die zulässigen Schiefstellungen innerhalb der zulässigen Richtwerte

Bei Lagerpaaren ist das Reibungsmoment getrennt zu berechnen und dann zu addieren. Dabei ist die Radialbelastung gleichmäßig auf die beiden Lager aufgeteilt anzunehmen und die Axialbelastung so anzusetzen, wie sie in der Lagerung tatsächlich wirkt.

HINWEIS: Die Berechnung des Reibungsmoments anhand der hier aufgeführten Formeln ist relativ komplex. SKF empfiehlt daher dringend zur Berechnung des Reibungsmoments das online unter skf.com/bearingcalculator hinterlegte Rechenprogramm zu nutzen.

Rollreibungsmoment

Das Rollreibungsmoment kann näherungsweise bestimmt werden aus:

$$M_{rr} = \phi_{ish} \phi_{rs} G_{rr} (\nu n)^{0,6}$$

Hierin sind:

M_{rr} = das Rollreibungsmoment [Nmm]

Φ_{ish} = der Schmierfilmdickenfaktor

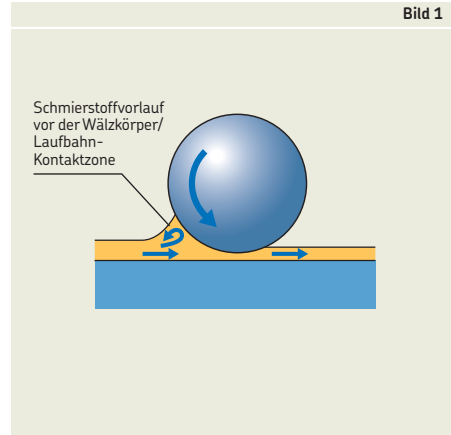
Φ_{rs} = der Schmierstoffverdrängungsfaktor
(→ Seite 4)

G_{rr} = der Rollreibungsgrundwert
(→ Tabelle 1, Seite 6), abhängig von:

- der Lagerart
- dem mittleren Lagerdurchmesser d_m [mm] = $0,5 (d + D)$
- der Radialbelastung F_r [N]
- der Axialbelastung F_a [N]

n = die Drehzahl [min⁻¹]

ν = die kinematische Viskosität bei Betriebstemperatur des Öls bzw. des Grundöls bei Schmierfetten [mm²/s]



Schmierfilmdickenfaktor

Im Wälzkontakt wird nur eine Teilmenge der in das Lager eingebrachten Schmierstoffmenge überrollt; zum Aufbau des Schmierfilms wird lediglich eine kleine Menge Schmierstoff genutzt. Ein Teil des Schmierstoffs wird weggespritzt, ein anderer Teil formiert sich zu einem Schmierstoffvorlauf vor der Wälzkörper/Laufbahn-Kontaktzone (→ Bild 1). Dieser Vorlauf beansprucht den Schmierstoff auf Schub und erzeugt Wärme, die die Viskosität und die Schmierfilmdicke und damit letztendlich das Rollreibungsmoment herabsetzt.

Der Schmierfilmdickenfaktor, der die zuvor genannten Betriebsbedingungen berücksichtigt, kann angenähert ermittelt werden aus:

$$\Phi_{ish} = \frac{1}{1 + 1,84 \times 10^{-9} (n d_m)^{1,28} \nu^{0,64}}$$

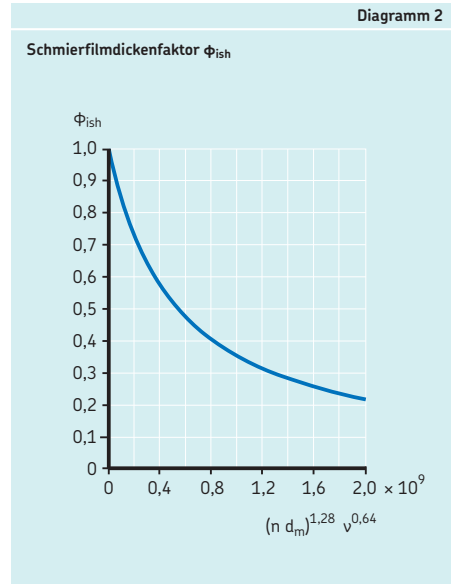
Hierin sind:

Φ_{ish} = der Schmierfilmdickenfaktor
(→ Diagramm 2)

n = die Betriebsdrehzahl [min⁻¹]

d_m = dem mittleren Lagerdurchmesser d_m [mm] = $0,5 (d + D)$

ν = die kinematische Viskosität bei Betriebstemperatur des Öls bzw. des Grundöls bei Schmierfetten [mm²/s]



Reibung

Schmierstoffverdrängungsfaktor

Bei Ölluft- und Öleinspritzspritzschmierung, bei Ölbadschmierung mit einem Ölstand unterhalb der Mitte des untersten Wälzkörpers und bei Fettschmierung wird durch ständiges Überrollen der überschüssige Schmierstoff aus der Wälzkontaktzone verdrängt. Bei Lagerungen, in denen die Drehzahlen oder die Schmierstoffviskosität hoch sind, kann der in die Endbereiche des Wälzkontakts abgedrängte Schmierstoff nicht schnell genug wieder in die Mitte zurückfließen. Dieser als „kinematische Verdrängung“ bezeichnete Effekt mindert die Schmierfilmdicke (und infolge dessen auch κ) und setzt damit auch das Rollreibungsmoment herab.

Wie hoch die Minderung des Rollreibungsmoments in solchen Fällen ausfällt, kann angenähert ermittelt werden aus:

$$\Phi_{rs} = \frac{1}{e^{\left[K_{rs} \cdot v \cdot n \cdot (d + D) \cdot \sqrt{\frac{K_z}{2(D-d)}} \right]}}$$

Hierin sind:

- Φ_{rs} = der kinematische Schmierstoffverdrängungsfaktor
- e = die Basis des natürlichen Logarithmus
≈ 2,718
- K_{rs} = ein Beiwert für die Art der Schmierung:
= 3×10^{-8} bei Ölbadschmierung mit niedrigem Ölstand und Öleinspritzschmierung
= 6×10^{-8} bei Öl-Luft- und Fettschmierung
- K_z = ein von der Lagerart abhängiger Designbeiwert (→ **Tabelle 4, Seite 14**)
- v = die kinematische Viskosität des Öls bzw. des Grundöls bei Schmierfetten bei Betriebstemperatur [mm^2/s]
- n = die Betriebsdrehzahl [min^{-1}]
- d = der Lagerbohrungsdurchmesser [mm]
- D = der Lagerausendurchmesser [mm]

Gleitreibungsmoment

Für SKF Lager kann das Gleitreibungsmoment bestimmt werden aus:

$$M_{sl} = G_{sl} \mu_{sl}$$

Hierin sind:

M_{sl} = das Gleitreibungsmoment [Nmm]

G_{sl} = der Gleitreibungsgrundwert
(→ **Tabelle 1, Seite 6**), abhängig von:

- der Lagerart
- dem mittleren Lagerdurchmesser d_m [mm] = $0,5 (d + D)$
- der Radialbelastung F_r [N]
- der Axialbelastung F_a [N]

μ_{sl} die Gleitreibungszahl

Einflüsse auf die Gleitreibungszahl

Bei Vollfilm- bzw. Grenzschmierungsbedingungen kann die Gleitreibungszahl angenähert ermittelt werden aus:

$$\mu_{sl} = \phi_{bl} \mu_{bl} + (1 - \phi_{bl}) \mu_{EHL}$$

Hierin sind:

μ_{sl} = die Gleitreibungszahl

ϕ_{bl} = der Gewichtungsfaktor für
Gleitreibungszahl

$$= \frac{1}{e^{2,6 \times 10^{-8} (n \nu)^{1,4} d_m}}$$

(→ **Diagramm 3**).

e = die Basis des natürlichen Logarithmus
≈ 2,718

n = die Betriebsdrehzahl [min^{-1}]

ν = die kinematische Viskosität des Öls bzw.
des Grundöls bei Schmierfetten bei
Betriebstemperatur [mm^2/s]

d_m = der mittleren Lagerdurchmesser
 d_m [mm] = $0,5 (d + D)$

μ_{bl} = ein Drehzahlbeiwert
= 0,12 bei $n \neq 0$
= 0,15 bei $n = 0$

(Anlaufreibungsmoment-Berechnung)

μ_{EHL} = die Reibungszahl eines ausreichend
tragfähigen Schmierfilms

Es gelten die folgenden Werte für μ_{EHL} :

- 0,02 bei Zylinderrollenlagern
 - 0,002 bei Kegelrollenlagern
- ansonsten gilt:
- 0,05 bei Schmierung mit Mineralölen
 - 0,04 bei Schmierung mit Syntheseölen
 - 0,1 bei Schmierung mit Traktionsfluid

Eine Abschätzung der Größe des Gewichtungsfaktors für die Gleitreibungszahl kann auch anhand der in Diagramm 3 dargestellten Kurve vorgenommen werden:

- Bei voll ausgebildetem Schmierfilm (d. h. bei großen κ -Werten) geht der Wert ϕ_{bl} gegen null.
- Bei Grenzschmierung (z. B. bei niedriger Schmierstoffviskosität oder niedrigen Drehzahlen) geht der Gewichtungsfaktor für die Gleitreibungszahl ϕ_{bl} gegen 1, da es zu gelegentlicher unmittelbarer metallischer Berührung kommen kann, was die Reibung im Lager erhöht.

Diagramm 3

Grenzschmierungs-Gewichtungsfaktor ϕ_{bl}

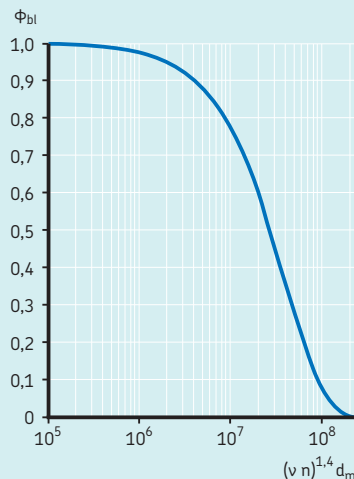


Tabelle 1a

Konstruktions- und lastabhängige Roll- und Gleitreibungsgrundwerte für Radiallager

Lagerart	Rollreibungsgrundwerte G_{rr}	Gleitreibungsgrundwerte G_{sl}
Rillenkugellager	wenn $F_a = 0$ $G_{rr} = R_1 d_m^{1,96} F_r^{0,54}$	wenn $F_a = 0$ $G_{sl} = S_1 d_m^{-0,26} F_r^{5/3}$
	wenn $F_a > 0$ $G_{rr} = R_1 d_m^{1,96} \left(F_r + \frac{R_2}{\sin \alpha_f} F_a \right)^{0,54}$	wenn $F_a > 0$ $G_{sl} = S_1 d_m^{-0,145} \left(F_r^5 + \frac{S_2 d_m^{1,5}}{\sin \alpha_f} F_a^4 \right)^{1/3}$
	Hierin ist $\alpha_f = 24,6 (F_a/C_0)^{0,24} [^\circ]$	
Schrägkugellager ¹	$G_{rr} = R_1 d_m^{1,97} [F_r + F_g + R_2 F_a]^{0,54}$ $F_g = R_3 d_m^4 n^2$	$G_{sl} = S_1 d_m^{0,26} [(F_r + F_g)^{4/3} + S_2 F_a^{4/3}]$ $F_g = S_3 d_m^4 n^2$
Vierpunktlager	$G_{rr} = R_1 d_m^{1,97} [F_r + F_g + R_2 F_a]^{0,54}$ $F_g = R_3 d_m^4 n^2$	$G_{sl} = S_1 d_m^{0,26} [(F_r + F_g)^{4/3} + S_2 F_a^{4/3}]$ $F_g = S_3 d_m^4 n^2$
Pendelkugellager	$G_{rr} = R_1 d_m^2 [F_r + F_g + R_2 F_a]^{0,54}$ $F_g = R_3 d_m^{3,5} n^2$	$G_{sl} = S_1 d_m^{-0,12} [(F_r + F_g)^{4/3} + S_2 F_a^{4/3}]$ $F_g = S_3 d_m^{3,5} n^2$
Zylinderrollenlager	$G_{rr} = R_1 d_m^{2,41} F_r^{0,31}$	$G_{sl} = S_1 d_m^{0,9} F_a + S_2 d_m F_r$
Kegelrollenlager ¹	$G_{rr} = R_1 d_m^{2,38} (F_r + R_2 Y F_a)^{0,31}$	$G_{sl} = S_1 d_m^{0,82} (F_r + S_2 Y F_a)$
Der lagerabhängige Faktor Y ist in den Produkttabellen angegeben → Produkttabellen		
Pendelrollenlager	$G_{rr,e} = R_1 d_m^{1,85} (F_r + R_2 F_a)^{0,54}$	$G_{sl,e} = S_1 d_m^{0,25} (F_r^4 + S_2 F_a^4)^{1/3}$
	$G_{rr,l} = R_3 d_m^{2,3} (F_r + R_4 F_a)^{0,31}$	$G_{sl,l} = S_3 d_m^{0,94} (F_r^3 + S_4 F_a^3)^{1/3}$
	wenn $G_{rr,e} < G_{rr,l}$	wenn $G_{sl,e} < G_{sl,l}$
	$G_{rr} = G_{rr,e}$ ansonsten $G_{rr} = G_{rr,l}$	$G_{sl} = G_{sl,e}$ ansonsten $G_{sl} = G_{sl,l}$
CARB Toroidalrollenlager	wenn $F_r < (R_2^{1,85} d_m^{0,78}/R_1^{1,85})^{2,35}$	wenn $F_r < (S_2 d_m^{1,24}/S_1)^{1,5}$
	$G_{rr} = R_1 d_m^{1,97} F_r^{0,54}$ ansonsten	$G_{sl} = S_1 d_m^{-0,19} F_r^{5/3}$ ansonsten
	$G_{rr} = R_2 d_m^{2,37} F_r^{0,31}$	$G_{sl} = S_2 d_m^{1,05} F_r$

Die Designbeiwerte R und S sind in **Tabelle 2** ab **Seite 8** angegeben.

Die beiden Belastungen F_r und F_a gelten immer als positiv.

¹ Für F_a ist die äußere auf die Welle oder das Gehäuse wirkende Axialkraft einzusetzen.

Tabelle 1b

Konstruktions- und lastabhängige Roll- und Gleitreibungsrundwerte für Axiallager		
Lagerart	Rollreibungsrundwerte G_{rr}	Gleitreibungsrundwerte G_{sl}
Axial-Rillenkugellager	$G_{rr} = R_1 d_m^{1,83} F_a^{0,54}$	$G_{sl} = S_1 d_m^{0,05} F_a^{4/3}$
Axial-Zylinderrollenlager	$G_{rr} = R_1 d_m^{2,38} F_a^{0,31}$	$G_{sl} = S_1 d_m^{0,62} F_a$
Axial-Pendelrollenlager	$G_{rr,e} = R_1 d_m^{1,96} (F_r + R_2 F_a)^{0,54}$ $G_{rr,l} = R_3 d_m^{2,39} (F_r + R_4 F_a)^{0,31}$ wenn $G_{rr,e} < G_{rr,l}$ $G_{rr} = G_{rr,e}$ ansonsten $G_{rr} = G_{rr,l}$	$G_{sl,e} = S_1 d_m^{-0,35} (F_r^{5/3} + S_2 F_a^{5/3})$ $G_{sl,l} = S_3 d_m^{0,89} (F_r + F_a)$ wenn $G_{sl,e} < G_{sl,l}$ $G_{sl} = G_{sl,e}$ ansonsten $G_{sl} = G_{sl,l}$ $G_f = S_4 d_m^{0,76} (F_r + S_5 F_a)$ $G_{sl} = G_{sl} + \frac{G_f}{e^{10^{-6}} (n v)^{1,4} d_m}$

Tabelle 2

Lagerart	Designbeiwerte zur Bestimmung des Rollreibungsmoments			Gleitreibungsmoments		
	R_1	R_2	R_3	S_1	S_2	S_3
Rillenkugellager	siehe → Tabelle 2a			siehe → Tabelle 2a		
Schrägkugellager						
– Einreihig 40°						
Reihe 72 B(E)	$4,33 \times 10^{-7}$	2,02	$2,44 \times 10^{-12}$	$1,82 \times 10^{-2}$	0,71	$2,44 \times 10^{-12}$
Reihe 73 B(E)	$4,54 \times 10^{-7}$	2,02	$1,84 \times 10^{-12}$	$1,64 \times 10^{-2}$	0,71	$1,84 \times 10^{-12}$
– Einreihig 25°						
Reihe 72 AC	$3,58 \times 10^{-7}$	3,64	$3,55 \times 10^{-12}$	$1,14 \times 10^{-2}$	1,55	$3,55 \times 10^{-12}$
Reihe 73 AC	$3,48 \times 10^{-7}$	3,64	$1,66 \times 10^{-12}$	$9,85 \times 10^{-3}$	1,55	$1,66 \times 10^{-12}$
– Sonstige einreihige Lager	$5,03 \times 10^{-7}$	1,97	$1,90 \times 10^{-12}$	$1,30 \times 10^{-2}$	0,68	$1,91 \times 10^{-12}$
– Zweireihig 30°						
Reihe 32 A	$5,18 \times 10^{-7}$	1,63	$4,18 \times 10^{-12}$	$1,08 \times 10^{-2}$	1,47	$4,18 \times 10^{-12}$
Reihe 33 A	$5,31 \times 10^{-7}$	1,63	$8,83 \times 10^{-13}$	$5,48 \times 10^{-3}$	1,47	$8,83 \times 10^{-13}$
– Sonstige zweireihige Lager	$6,34 \times 10^{-7}$	1,41	$7,83 \times 10^{-13}$	$7,56 \times 10^{-3}$	1,21	$7,83 \times 10^{-13}$
– Vierpunktlager	$4,78 \times 10^{-7}$	2,42	$1,40 \times 10^{-12}$	$1,20 \times 10^{-2}$	0,9	$1,40 \times 10^{-12}$
Pendelkugellager	(→ Tabelle 2b)			(→ Tabelle 2b)		
Zylinderrollenlager	(→ Tabelle 2c)			(→ Tabelle 2c)		
Kegelrollenlager	(→ Tabelle 2d)			(→ Tabelle 2d)		
Pendelrollenlager	(→ Tabelle 2e)			(→ Tabelle 2e)		
CARB Toroidrollenlager	(→ Tabelle 2f)			(→ Tabelle 2f)		
Axial-Rillenkugellager	$1,03 \times 10^{-6}$			$1,6 \times 10^{-2}$		
Axial-Zylinderrollenlager	$2,25 \times 10^{-6}$			0.154		
Axial-Pendelrollenlager	(→ Tabelle 2g)			(→ Tabelle 2g)		

Tabelle 2a

Designbeiwerte zur Bestimmung der Roll- und Gleitreibungsmomente in Rillenkugellagern				
Lagerreihen	Designbeiwerte zur Bestimmung des Rollreibungsmoments		Gleitreibungsmoments	
	R ₁	R ₂	S ₁	S ₂
2, 3	$4,4 \times 10^{-7}$	1,7	$2,00 \times 10^{-3}$	100
42, 43	$5,4 \times 10^{-7}$	0,96	$3,00 \times 10^{-3}$	40
60, 630	$4,1 \times 10^{-7}$	1,7	$3,73 \times 10^{-3}$	14,6
62, 622	$3,9 \times 10^{-7}$	1,7	$3,23 \times 10^{-3}$	36,5
63, 623	$3,7 \times 10^{-7}$	1,7	$2,84 \times 10^{-3}$	92,8
64	$3,6 \times 10^{-7}$	1,7	$2,43 \times 10^{-3}$	198
160, 161	$4,3 \times 10^{-7}$	1,7	$4,63 \times 10^{-3}$	4,25
617, 618, 628, 637, 638	$4,7 \times 10^{-7}$	1,7	$6,50 \times 10^{-3}$	0,78
619, 639	$4,3 \times 10^{-7}$	1,7	$4,75 \times 10^{-3}$	3,6

Tabelle 2b

Designbeiwerte zur Bestimmung der Roll- und Gleitreibungsmomente in Pendelkugellagern						
Lagerreihe	Designbeiwerte zur Bestimmung des Rollreibungsmoments			Gleitreibungsmoments		
	R ₁	R ₂	R ₃	S ₁	S ₂	S ₃
12	$3,25 \times 10^{-7}$	6,51	$2,43 \times 10^{-12}$	$4,36 \times 10^{-3}$	9,33	$2,43 \times 10^{-12}$
13	$3,11 \times 10^{-7}$	5,76	$3,52 \times 10^{-12}$	$5,76 \times 10^{-3}$	8,03	$3,52 \times 10^{-12}$
22	$3,13 \times 10^{-7}$	5,54	$3,12 \times 10^{-12}$	$5,84 \times 10^{-3}$	6,60	$3,12 \times 10^{-12}$
23	$3,11 \times 10^{-7}$	3,87	$5,41 \times 10^{-12}$	0,01	4,35	$5,41 \times 10^{-12}$
112	$3,25 \times 10^{-7}$	6,16	$2,48 \times 10^{-12}$	$4,33 \times 10^{-3}$	8,44	$2,48 \times 10^{-12}$
130	$2,39 \times 10^{-7}$	5,81	$1,10 \times 10^{-12}$	$7,25 \times 10^{-3}$	7,98	$1,10 \times 10^{-12}$
139	$2,44 \times 10^{-7}$	7,96	$5,63 \times 10^{-13}$	$4,51 \times 10^{-3}$	12,11	$5,63 \times 10^{-13}$

Tabelle 2c

Designbeiwerte zur Bestimmung der Roll- und Gleitreibungsmomente in Zylinderrollenlagern				
Lagerreihen	Designbeiwerte zur Bestimmung des Rollreibungsmoments		Gleitreibungsmoments	
	R_1		S_1	S_2
Lager mit Käfig der Bauformen N, NU, NJ oder NUP				
2, 3	$1,09 \times 10^{-6}$		0,16	0,0015
4	$1,00 \times 10^{-6}$		0,16	0,0015
10	$1,12 \times 10^{-6}$		0,17	0,0015
12, 20	$1,23 \times 10^{-6}$		0,16	0,0015
22	$1,40 \times 10^{-6}$		0,16	0,0015
23	$1,48 \times 10^{-6}$		0,16	0,0015
Hochleistungslager mit Käfig der Reihen NCF .. ECJB, RN .. ECJB, NJF .. ECJA, RNU .. ECJA oder NUH .. ECMH				
22	$1,54 \times 10^{-6}$		0,16	0,0015
23	$1,63 \times 10^{-6}$		0,16	0,0015
Vollrollige Lager der Bauformen NCF, NJG, NNCL, NNCF, NNC und NNF				
Alle Lagerreihen	$2,13 \times 10^{-6}$		0,16	0,0015

Tabelle 2d

Designbeiwerte zur Bestimmung der Roll- und Gleitreibungsmomente in Kegelrollenlagern				
Lagerreihen	Designbeiwerte zur Bestimmung des Rollreibungsmoments		Gleitreibungsmoments	
	R_1	R_2	S_1	S_2
302	$1,76 \times 10^{-6}$	10,9	0,017	2
303	$1,69 \times 10^{-6}$	10,9	0,017	2
313 (X)	$1,84 \times 10^{-6}$	10,9	0,048	2
320 X	$2,38 \times 10^{-6}$	10,9	0,014	2
322	$2,27 \times 10^{-6}$	10,9	0,018	2
322 B	$2,38 \times 10^{-6}$	10,9	0,026	2
323	$2,38 \times 10^{-6}$	10,9	0,019	2
323 B	$2,79 \times 10^{-6}$	10,9	0,030	2
329	$2,31 \times 10^{-6}$	10,9	0,009	2
330	$2,71 \times 10^{-6}$	11,3	0,010	2
331	$2,71 \times 10^{-6}$	10,9	0,015	2
332	$2,71 \times 10^{-6}$	10,9	0,018	2
LL	$1,72 \times 10^{-6}$	10,9	0,0057	2
L	$2,19 \times 10^{-6}$	10,9	0,0093	2
LM	$2,25 \times 10^{-6}$	10,9	0,011	2
M	$2,48 \times 10^{-6}$	10,9	0,015	2
HM	$2,60 \times 10^{-6}$	10,9	0,020	2
H	$2,66 \times 10^{-6}$	10,9	0,025	2
HH	$2,51 \times 10^{-6}$	10,9	0,027	2
Übrige	$2,31 \times 10^{-6}$	10,9	0,019	2

Tabelle 2e

Designbeiwerte zur Bestimmung der Roll- und Gleitreibungsmomente in Pendelrollenlagern								
Lagerreihen	Designbeiwerte zur Bestimmung des Rollreibungsmoments				Gleitreibungsmoments			
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
213 E, 222 E	1,6 × 10 ⁻⁶	5,84	2,81 × 10 ⁻⁶	5,8	3,62 × 10 ⁻³	508	8,8 × 10 ⁻³	117
222	2,0 × 10 ⁻⁶	5,54	2,92 × 10 ⁻⁶	5,5	5,10 × 10 ⁻³	414	9,7 × 10 ⁻³	100
223	1,7 × 10 ⁻⁶	4,1	3,13 × 10 ⁻⁶	4,05	6,92 × 10 ⁻³	124	1,7 × 10 ⁻²	41
223 E	1,6 × 10 ⁻⁶	4,1	3,14 × 10 ⁻⁶	4,05	6,23 × 10 ⁻³	124	1,7 × 10 ⁻²	41
230	2,4 × 10 ⁻⁶	6,44	3,76 × 10 ⁻⁶	6,4	4,13 × 10 ⁻³	755	1,1 × 10 ⁻²	160
231	2,4 × 10 ⁻⁶	4,7	4,04 × 10 ⁻⁶	4,72	6,70 × 10 ⁻³	231	1,7 × 10 ⁻²	65
232	2,3 × 10 ⁻⁶	4,1	4,00 × 10 ⁻⁶	4,05	8,66 × 10 ⁻³	126	2,1 × 10 ⁻²	41
238	3,1 × 10 ⁻⁶	12,1	3,82 × 10 ⁻⁶	12	1,74 × 10 ⁻³	9 495	5,9 × 10 ⁻³	1 057
239	2,7 × 10 ⁻⁶	8,53	3,87 × 10 ⁻⁶	8,47	2,77 × 10 ⁻³	2 330	8,5 × 10 ⁻³	371
240	2,9 × 10 ⁻⁶	4,87	4,78 × 10 ⁻⁶	4,84	6,95 × 10 ⁻³	240	2,1 × 10 ⁻²	68
241	2,6 × 10 ⁻⁶	3,8	4,79 × 10 ⁻⁶	3,7	1,00 × 10 ⁻²	86,7	2,9 × 10 ⁻²	31
248	3,8 × 10 ⁻⁶	9,4	5,09 × 10 ⁻⁶	9,3	2,80 × 10 ⁻³	3 415	1,2 × 10 ⁻²	486
249	3,0 × 10 ⁻⁶	6,67	5,09 × 10 ⁻⁶	6,62	3,90 × 10 ⁻³	887	1,7 × 10 ⁻²	180

Tabelle 2f

Designbeiwerte zur Bestimmung der Roll- und Gleitreibungsmomente in CARB Toroidalrollenlagern mit Käfig				
Lagerreihen	Designbeiwerte zur Bestimmung des Rollreibungsmoments		Gleitreibungsmoments	
	R ₁	R ₂	S ₁	S ₂
C 22	1,17 × 10 ⁻⁶	2,08 × 10 ⁻⁶	1,32 × 10 ⁻³	0,8 × 10 ⁻²
C 23	1,20 × 10 ⁻⁶	2,28 × 10 ⁻⁶	1,24 × 10 ⁻³	0,9 × 10 ⁻²
C 30	1,40 × 10 ⁻⁶	2,59 × 10 ⁻⁶	1,58 × 10 ⁻³	1,0 × 10 ⁻²
C 31	1,37 × 10 ⁻⁶	2,77 × 10 ⁻⁶	1,30 × 10 ⁻³	1,1 × 10 ⁻²
C 32	1,33 × 10 ⁻⁶	2,63 × 10 ⁻⁶	1,31 × 10 ⁻³	1,1 × 10 ⁻²
C 39	1,45 × 10 ⁻⁶	2,55 × 10 ⁻⁶	1,84 × 10 ⁻³	1,0 × 10 ⁻²
C 40	1,53 × 10 ⁻⁶	3,15 × 10 ⁻⁶	1,50 × 10 ⁻³	1,3 × 10 ⁻²
C 41	1,49 × 10 ⁻⁶	3,11 × 10 ⁻⁶	1,32 × 10 ⁻³	1,3 × 10 ⁻²
C 49	1,49 × 10 ⁻⁶	3,24 × 10 ⁻⁶	1,39 × 10 ⁻³	1,5 × 10 ⁻²
C 59	1,77 × 10 ⁻⁶	3,81 × 10 ⁻⁶	1,80 × 10 ⁻³	1,8 × 10 ⁻²
C 60	1,83 × 10 ⁻⁶	5,22 × 10 ⁻⁶	1,17 × 10 ⁻³	2,8 × 10 ⁻²
C 69	1,85 × 10 ⁻⁶	4,53 × 10 ⁻⁶	1,61 × 10 ⁻³	2,3 × 10 ⁻²

Tabelle 2g

Designbeiwerte zur Bestimmung der Roll- und Gleitreibungsmomente in Axial-Pendelrollenlagern									
Lagerreihen	Designbeiwerte zur Bestimmung des Rollreibungsmoments				Gleitreibungsmoments				
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
292	1,32 × 10 ⁻⁶	1,57	1,97 × 10 ⁻⁶	3,21	4,53 × 10 ⁻³	0,26	0,02	0,1	0,6
292 E	1,32 × 10 ⁻⁶	1,65	2,09 × 10 ⁻⁶	2,92	5,98 × 10 ⁻³	0,23	0,03	0,17	0,56
293	1,39 × 10 ⁻⁶	1,66	1,96 × 10 ⁻⁶	3,23	5,52 × 10 ⁻³	0,25	0,02	0,1	0,6
293 E	1,16 × 10 ⁻⁶	1,64	2,00 × 10 ⁻⁶	3,04	4,26 × 10 ⁻³	0,23	0,025	0,15	0,58
294 E	1,25 × 10 ⁻⁶	1,67	2,15 × 10 ⁻⁶	2,86	6,42 × 10 ⁻³	0,21	0,04	0,2	0,54

Reibungsmoment von Berührungsdichtungen

Bei Lagern mit Berührungsdichtungen sind die durch die Dichtung bedingten Reibungsverluste unter Umständen höher als die Reibungsverluste im Lager selbst. Das Reibungsmoment der Dichtung bei einem beidseitig mit Berührungsdichtungen abgedichtete Lager ergibt sich annähernd aus:

$$M_{\text{seal}} = K_{S1} d_s^\beta + K_{S2}$$

Hierin sind:

M_{seal} = das Reibungsmoment von Berührungsdichtungen [Nmm]

K_{S1} = ein Beiwert (→ **Tabelle 3**), in Abhängigkeit von:

- der Dichtungsausführung
- der Lagerart und -größe

d_s = der Durchmesser der Dichtlippen-Gegenauflfläche [mm] (→ **Tabelle 3**)

β = ein Exponent (→ **Tabelle 3**), in Abhängigkeit von:

- der Dichtungsausführung
- Lagerart

K_{S2} = ein Beiwert (→ **Tabelle 3**), in Abhängigkeit von:

- der Dichtungsausführung
- der Lagerart und -größe

Bei einseitig abgedichteten Lagern gilt für das Reibungsmoment: $0,5 M_{\text{seal}}$.

Bei Rillenkugellagern mit den reibungsarmen Dichtungen der Ausführung RSL und Außen-durchmesser $D > 25$ mm gilt der für M_{seal} ermittelte Wert sowohl für die ein- wie auch beidseitig abgedichteten Lager.

Tabelle 3

Reibungsmoment von Berührungsdichtungen: Exponent und Beiwerte

Dichtungsausführung Lagerart	Lageraußen- durchmesser, mm		Exponent und Beiwerte			Durchmesser der Gegenauflfläche d_s^1
	D über	bis	β	K_{S1}	K_{S2}	
RSL Dichtscheiben Rillenkugellager	–	25	0	0	0	d_2
	25	52	2,25	0,0018	0	d_2
RSH Dichtscheiben Rillenkugellager	–	52	2,25	0,028	2	d_2
	–	62	2,25	0,023	2	d_1, d_2
RSS Dichtscheiben Rillenkugellager	62	80	2,25	0,018	20	d_1, d_2
	80	100	2,25	0,018	15	d_1, d_2
	100	–	2,25	0,018	0	d_1, d_2
	Schräggugellager	30	120	2	0,014	10
Pendelkugellager	30	125	2	0,014	10	d_2
LS Dichtscheiben Zylinderrollenlager	42	360	2	0,032	50	E
	CS, CS2 und CS5 Dichtscheiben Pendelrollenlager	62	300	2	0,057	50
CARB Toroidalrollenlager	42	340	2	0,057	50	d_2

¹⁾ Symbol des Durchmessers in der Produktabelle

Strömungsverluste

Bei Ölbad Schmierung ist das Lager zu einem gewissen Teil und in Sonderfällen auch ganz von Öl umspült. Die Strömungsverluste, die beim Umlaufen der Lager im Ölbad entstehen, erhöhen das Gesamtdrehmoment und müssen berücksichtigt werden. Die Ölstandshöhe, die Ölviskosität, die Lagerdrehzahl, wie auch die Größe und Beschaffenheit des Ölbeckens können einen bedeutenden Einfluss auf die Strömungsverluste haben. Einflüsse anderer Schmier-systeme, z. B. von benachbarten Zahnrädern oder Kurventrieben, sind ebenfalls zu berücksichtigen.

Strömungsverluste bei Ölbad Schmierung

Das SKF Verfahren zur Berechnung der Strömungsverluste bei Ölbad Schmierung berücksichtigt den Widerstand, den das Öl den im Lager umlaufenden Wälzkörpern entgegengesetzt, aber auch die Ölviskosität. Die Berechnung ergibt ausreichend genaue Richtwerte, vorausgesetzt:

- Das Ölbecken in der Lagerung ist groß. Die Größe und Beschaffenheit des Ölbeckens sowie die Einflüsse von anderen Schmier-systemen, z. B. der von Zahnrädern, bleiben unberücksichtigt.
- Die Welle ist waagrecht angeordnet.

- Der Innenring läuft mit unveränderlicher Drehzahl um. Die Betriebsdrehzahl ist kleiner/gleich der zulässigen Referenzdrehzahl.
- die Ölviskosität liegt innerhalb der Grenzwerte:
 - $\leq 500 \text{ mm}^2/\text{s}$, wenn das Lager bis einschließlich zur Hälfte seines Außendurchmessers in das Ölbad eintaucht (Ölstand $H \leq D/2$)
 - $\leq 250 \text{ mm}^2/\text{s}$, wenn das Lager tiefer als die Hälfte seines Außendurchmessers in das Ölbad eintaucht (Ölstand $H > D/2$)

Der Ölstand H wird vom niedrigsten Kontaktpunkt zwischen Außenringlaufbahn und Wälzkörper gemessen (→ **Bild 2, Seite 14**). Für den niedrigsten Kontaktpunkt können angesetzt werden:

- bei Kegelrollenlagern der Außendurchmesser D [mm]
- bei allen anderen Radial-Wälzlager der mittlere Außenringdurchmesser [mm]
 $= 0,5 (D + D_1)$

Ermittlung der Strömungsverluste

Das strömungsverlustabhängige Reibungsmoment kann angenähert ermittelt werden für Kugellager aus:

$$M_{\text{drag}} = 0,4 V_M K_{\text{ball}} d_m^5 n^2 + 1,093 \times 10^{-7} n^2 d_m^3 \left(\frac{n d_m^2 f_t}{v} \right)^{-1,379} R_s$$

Das strömungsverlustabhängige Reibungsmoment kann angenähert ermittelt werden für Rollenlager aus:

$$M_{\text{drag}} = 4 V_M K_{\text{roll}} C_w B d_m^4 n^2 + 1,093 \times 10^{-7} n^2 d_m^3 \left(\frac{n d_m^2 f_t}{v} \right)^{-1,379} R_s$$

Die wälzkörperabhängigen Beiwerte erhält man aus:

$$K_{\text{ball}} = \frac{i_{rw} K_z (d + D)}{D - d} 10^{-12}$$

$$K_{\text{roll}} = \frac{K_L K_Z (d + D)}{D - d} 10^{-12}$$

Beiwerte und Variable, die zur Ermittlung des strömungsverlustabhängigen Reibungsmoments benötigt werden:

$$C_w = 2,789 \times 10^{-10} l_D^3 - 2,786 \times 10^{-4} l_D^2 + 0,0195 l_D + 0,6439$$

$$l_D = 5 \frac{K_L B}{d_m}$$

$$f_t = \begin{cases} \sin(0,5 t), & \text{wenn } 0 \leq t \leq \pi \\ 1, & \text{wenn } \pi < t < 2\pi \end{cases}$$

$$R_s = 0,36 d_m^2 (t - \sin t) f_A$$

$$t = 2 \cos^{-1} \left(\frac{0,6 d_m - H}{0,6 d_m} \right) \quad \text{Wenn } H \geq 1,2 d_m, \text{ gilt } H = 1,2 d_m$$

$$f_A = 0,05 \frac{K_Z (D + d)}{D - d}$$

Hierin sind:

M_{drag} = das strömungsverlustabhängige Reibungsmoment [Nmm]

V_M = Reibungsmoment [Nmm] die Ölbadwiderstandsvariable entsprechend (→ **Diagramm 4, Seite 14**)

B = die Lagerbreite [mm]

- bei Kegelrollenlagern
→ Gesamtbreite T
- bei Axiallagern → Höhe H

d_m = der mittlere Durchmesser des Lagers

$$d_m [\text{mm}] = 0,5 (d + D)$$

d = die Lagerbohrung [mm]

D = der Lagerausendurchmesser [mm]

H = der Ölstand (→ **Bild 2, Seite 14**) [mm]

$i_{r,w}$ = die Anzahl Kugelreihen

K_Z = ein von der Lagerart abhängiger Designbeiwert (→ **Tabelle 4, Seite 14**)

K_L = ein von der Rollenlagerart abhängiger Designbeiwert (→ **Tabelle 4, Seite 14**)

n = die Betriebsdrehzahl [min^{-1}]

ν = die kinematische Viskosität des Öls bzw. des Grundöls bei Schmierfetten bei Betriebstemperatur [mm^2/s]

Reibung

Strömungsverluste bei vertikaler Wellenanordnung

Das strömungsverlustabhängige Reibungsmoment ist in diesem Fall entsprechend den Festlegungen für völlig in Öl eingetauchte Lager auf waagerechter Welle zu bestimmen. Der ermittelte Wert für M_{drag} ist jedoch um den Faktor zu reduzieren, der sich aus dem Verhältnis „in Öl eingetauchte Lagerbreite/-höhe“ zu „Gesamtlagerbreite/-höhe“ ergibt.

Strömungsverluste bei Ölspritzschmierung

Das strömungsverlustabhängige Reibungsmoment ist in diesem Fall entsprechend den Festlegungen für Ölschmierung bei Ölstand bis zur Mitte des untersten Wälzkörpers zu bestimmen. Der so ermittelte Wert von M_{drag} ist jedoch mit dem Faktor 2 zu multiplizieren. Daraus ergibt sich allerdings ebenfalls nur ein Näherungswert, der noch von Menge und Fließrichtung des Öls beeinflusst werden kann. Wenn jedoch die Höhe H des Öldurchflusses am stillstehenden Lager bekannt ist, kann dieser Wert direkt in die Gleichung für das strömungsverlustabhängige Rei-

Bild 2

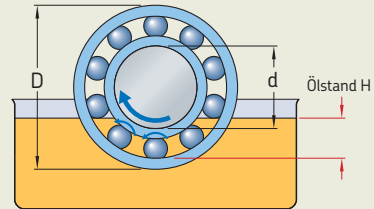


Diagramm 4

Ölbadwiderstandsvariable V_M

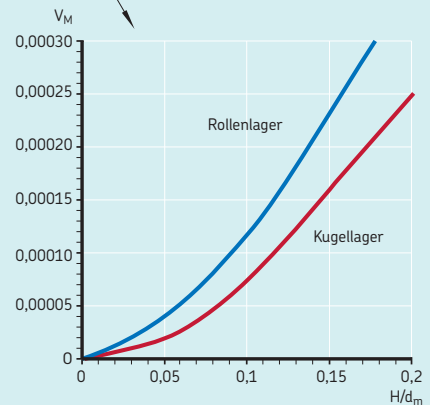
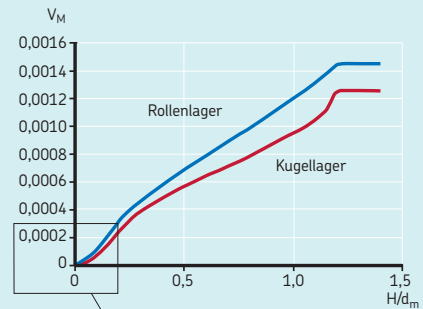


Tabelle 4

Designbeiwerte K_Z und K_L

Lagerart	Designbeiwerte	
	K_Z	K_L
Rillenkugellager – ein- und zweireihige Lager	3,1	–
Schräggugellager – einreihige Lager – zweireihig – Vierpunktlager	4,4 3,1 3,1	– – –
Pendelkugellager	4,8	–
Zylinderrollenlager – Lager mit Käfig – vollrollige Lager	5,1 6,2	0,65 0,7
Kegelrollenlager	6	0,7
Pendelrollenlager	5,5	0,8
CARB Toroidatrollenlager – Lager mit Käfig – vollrollige Lager	5,3 6	0,8 0,75
Axial-Rillenkugellager	3,8	–
Axial-Zylinderrollenlager	4,4	0,43
Axial-Pendelrollenlager	5,6	0,58 ¹⁾

¹⁾ Gilt für einzeln eingebaute Lager

bungsmoment eingesetzt werden, um einen genaueren Näherungswert zu erhalten.

Zusätzliche Einflüsse auf das Lagerreibungsmoment

Einfluss des Betriebsspiels und der Fluchtungsfehler

Veränderungen des Betriebsspiels oder Fluchtungsfehler beeinflussen das Reibungsmoment. Das zuvor beschriebene SKF Verfahren beruht auf der Annahme eines normalen Betriebsspiels und nicht gegeneinander schiefgestellter Lagerringe. Hohe Betriebstemperaturen, verursacht z.B. durch hohe Drehzahlen, können zur Verringerung des Betriebsspiels führen und eine Erhöhung des Reibungsmomentes zur Folge haben. Schiefstellung der Lagerringe erhöht in jedem Fall die Lagerreibung. Bei den winkelbeweglichen Pendelkugellagern, Pendelrollenlagern, CARB Toroidalrollenlagern und Axial-Pendelrollenlagern ist die Erhöhung der Lagerreibung sehr gering und kann unberücksichtigt bleiben.

Der Einfluss des Schmierfettfüllgrades

Mit der erforderlichen Menge Schmierfett frisch befüllte Lager weisen anfänglich ein Reibungsmoment auf, das deutlich über dem ermittelten Wert liegt. Dies zeigt sich in erhöhten Betriebstemperaturen. Die Ursache hierfür liegt in der drehzahlabhängigen Zeit, die erforderlich ist, bis das im Lager vorhandene überschüssige Fett weitgehend aus dem umlaufenden Wälzkörperbereich verdrängt ist.

Um diesen Vorgang überschlägig abschätzen zu können, ist das ermittelte Reibungsmoment bei den Lagern der leichten (schmalen) Reihen mit dem Faktor 2 und bei den Lagern der schweren Reihen mit dem Faktor 4 zu multiplizieren.

Am Ende der Einlaufphase wird jedoch das Lagerreibungsmoment auf die bei Ölschmierung üblichen Werte absinken; vielfach werden sogar noch niedrigere Werte erreicht. Für den Fall, dass der freie Raum im Lager zu einem großen Teil oder ganz mit Fett gefüllt ist, muss mit relativ hohen Reibungsmomenten gerechnet werden.

Zusätzliche lagerartspezifische Einflüsse

Hybridlager

Das wesentlich höhere Elastizitätsmodul der keramischen Wälzkörper aus Siliziumnitrid führt zu Verkleinerung der Berührungsflächen im Wälzkontakt und verringert dadurch die Roll- und Gleitreibungsanteile. Außerdem verursachen die wesentlich leichteren Wälzkörper aus Keramik aufgrund ihrer geringeren Massenträgheit geringere Fliehkräfte was die Reibung, insbesondere bei hohen Drehzahlen, reduziert.

Standard-Hybridkugellager

Bei einreihigen Schrägkugellagern können die Designbeiwerte R_3 und S_3 der Ganzstahllager auch zur Ermittlung der Roll- und Gleitreibungsmomente von einreihigen Hybrid-Schrägkugellagern herangezogen werden. Vorher sind diese Beiwerte jedoch mit dem Faktor 0,41 zu multiplizieren; es gilt also $0,41 R_3$ und $0,41 S_3$.

Schnell laufende Lagerungen mit Hybrid-Rillenkugellagern werden normalerweise axial vorgespannt. Unter solchen Betriebsbedingungen verhalten sich Hybrid-Rillenkugellager wie Schrägkugellager, was durch eine gewisse Verringerung der Reibung deutlich wird.