

# Lebensdauerberechnung

Auch wenn die Betriebsbedingungen angemessen sind und die Hochpräzisions-Wälzlager korrekt montiert wurden, kann es zum Ausfall kommen. Die Gebrauchsdauer von Hochpräzisions-Wälzlagern ist durch die unterschiedlichsten Einflüsse begrenzt.

Der Zeitraum, in dem das Hochpräzisions-Wälzlager seine Aufgabe zufriedenstellend erfüllt, wird als Lebensdauer bezeichnet. Innerhalb dieses Zeitraums kann es zu Materialermüdung, Vibration, Verunreinigung oder Schmierstoffausfall kommen. Nicht berücksichtigt werden hierbei Ursachen, die ohne nennenswerte Vorankündigung den Ausfall des Hochpräzisions-Wälzlagers bewirken können. Hierzu zählen beispielsweise Konstruktionsfehler, unzureichende Wartung, Einbaufehler sowie eine falsche Wälzlagerauslegung.

## Ermüdung

Ursächlich für die Ermüdung des Hochpräzisions-Wälzlagerwerkstoffs ist die schwellende Beanspruchung des Materials, wenn Hochpräzisions-Wälzlager unter Last umlaufen. Am Ende der Laufzeit treten in den Laufflächen oder auf den Wälzkörpern „Pittings“ auf, eine fortschreitende Abschälung oder Grübchenbildung im Werkstoff kann die Folge sein.

Zahlreiche Faktoren gehen in die Ermüdung des Werkstoffes ein, sodass diese nur statistisch zu erfassen sind. Die Definition eines theoretischen Vergleichswertes „Ermüdungslebensdauer“ bezieht sich daher auf eine sehr große Zahl gleichartiger Wälzlager, die unter gleichen Bedingungen laufen. Die Ermüdungslebensdauer ist erreicht, wenn 10% der Wälzlager ausgefallen sind. Sie kann auf die Anzahl der Umdrehungen oder auf die Laufzeit in Stunden bezogen werden.

Neben der Ermüdungslebensdauer ist für das Hochpräzisions-Wälzlager auch die Lebensdauer des Schmierstoffs entscheidend. Hierfür gelten eigene Berechnungsvorschriften. Für permanent überwachte Hochpräzisions-Wälzlager können noch andere Parameter lebensdauerentscheidend sein. Dazu gehören beispielsweise die Temperatur, das Lagergeräusch oder Vibrationen.

## Nominelle Lebensdauer

Rein definitorisch können innerhalb der nominellen Lebensdauer  $L_{10}$  unter gleichartigen Betriebsbedingungen 10% einer großen Anzahl gleichartiger Hochpräzisions-Wälzlager ausfallen. Bei konstanter Drehzahl kann die nominelle Lebensdauer auch als Zeitangabe  $L_{10,h}$  erfolgen.

$$L_{10,h} = \left( \frac{C}{P} \right)^p \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n} \quad [h] \quad [5.1]$$

$L_{10,h}$	nominelle Lebensdauer	[h]
$n$	Betriebsdrehzahl	[min <sup>-1</sup> ]
$C$	dynamische Tragzahl	[N]
$P$	äquivalente dynamische Lagerbelastung	[N]
$p$	Lebensdauerexponent	
	für Kugellager $p = 3$	
	für Rollenlager $p = 10/3$	

## Dynamische Tragzahl

Die dynamische Tragzahl ist die konstante Beanspruchung eines Hochpräzisions-Wälzlagers mit drehendem Innenring, bei der 1 Million Umdrehungen mit 90%iger Wahrscheinlichkeit erreicht werden. Sie gilt als zentrische nach Größe und Richtung konstante Radialbeanspruchung. Auf der Basis zahlreicher Versuche ist sie eine nach empirischen Regeln rechnerisch zugängliche Kennzahl.

## Statische Tragzahl

Die statische Tragfähigkeit eines Hochpräzisions-Wälzlagers ist durch die statische Tragzahl  $C_0$  beschrieben. Sie ist die Beanspruchung, die das ruhende Hochpräzisions-Wälzlager mit einer bleibenden plastischen Verformung von maximal 1/10.000 des Wälzkörperdurchmessers erträgt.



### Äquivalente dynamische Lagerbelastung

Oftmals wirken auf Hochpräzisions-Wälzlager kombinierte Beanspruchungen ein, die sich aus axialen und radialen Komponenten zusammensetzen. Um die tatsächlich wirkenden Kräfte an einem Hochpräzisions-Wälzlager mit der dynamischen Tragzahl in Beziehung zu setzen, wird aus den wirksamen Kraftkomponenten die äquivalente dynamische Lagerbelastung  $P$  errechnet. Diese Beanspruchung ist hypothetisch und entspricht in ihrem Angriffspunkt und der Wirkrichtung der dynamischen Tragzahl.

$$P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a \quad [N] \quad [5.2]$$

$P$	äquivalente dynamische Lagerbelastung	[N]
$F_r$	Radialkraft	[N]
$F_a$	Axialkraft	[N]
$X$	Radialfaktor, siehe Tabelle 5.1	
$Y$	Axialfaktor, siehe Tabelle 5.1	

Erst die gerechnete, äquivalente dynamische Lagerbelastung kann mit der dynamischen Tragzahl rechnerisch in Beziehung gesetzt werden, um daraus die Lebensdauer zu bestimmen.

### Statische äquivalente Lagerbelastung

Die erforderliche statische Tragzahl  $C_0$  berechnet sich aus der äquivalenten statischen Lagerbelastung  $P_0$ , die noch mit der statischen Tragsicherheit  $s_0$  gewichtet wird.

$$C_0 = P_0 \cdot s_0 \quad [5.3]$$

$C_0$	statische Tragzahl	[N]
$P_0$	äquivalente statische Lagerbelastung	[N]
$s_0$	statische Tragsicherheit	

Eine ausreichende statische Tragsicherheit ist von der Betriebsweise der Wälzlager und von der Anforderung an deren Laufruhe abhängig. Hochpräzisions-Schräggugellager erfordern mindestens eine einfache statische Sicherheit und Hochpräzisions-Rollenlager mindestens eine 1,5-fache statische Sicherheit.

Bei hohen Anforderungen an die Laufruhe der Wälzlagerung sind die vorgenannten Werte der statischen Tragsicherheit zu verdoppeln. Stoßartige Beanspruchungen der Wälzlagerung erfordern eine zusätzliche Erhöhung der statischen Tragsicherheit um den Faktor 1,5.

### Statische Tragfähigkeit dynamisch ausgelegter Wälzlager

Ist die statische Beanspruchung bekannt, sollte für die Wälzlagerung, die nach der Berechnung der dynamischen Tragfähigkeit ausgewählt wurde, die statisch äquivalente Lagerbelastung berechnet werden und anhand der vorgenannten statischen Tragsicherheit überprüft werden.

Der Vergleich der wirksamen statischen Wälzlagerbeanspruchung mit der statischen Tragzahl macht ebenfalls die Berechnung der äquivalenten statischen Lagerbelastung  $P_0$  erforderlich. Die Berechnung erfolgt analog zu der der äquivalenten dynamischen Lagerbelastung.

$$P_0 = X_0 \cdot F_r + Y_0 \cdot F_a \quad [N] \quad [5.4]$$

$P_0$	äquivalente statische Lagerbelastung	[N]
$F_r$	Radialkraft	[N]
$F_a$	Axialkraft	[N]
$X_0$	Radialfaktor, siehe Tabelle 5.1	
$Y_0$	Axialfaktor, siehe Tabelle 5.1	



### Bestimmung der Axial- und Radialfaktoren

Für Schrägkugellager, die eine kombinierte Beanspruchung zulassen, werden zunächst die Axial- und Radialfaktoren aus Tabelle 5.1 bestimmt. Im ersten Schritt wird für Schrägkugellager mit 15° Berührungswinkel das Verhältnis  $F_a / i \cdot C_0$  gerechnet.

Dabei steht  $i$  für die Anzahl der Hochpräzisions-Wälzlager in einem Satz. Die Ablesung des lagerabhängigen Faktors  $e$  erfolgt bei Einzellagern oder Lagersätzen mit gleichartiger Ausrichtung in der Tabelle 5.1a bzw. bei gegeneinander gestellten Hochpräzisions-Wälzlager in der Tabelle 5.1b neben dem Wert, der dem Ergebnis der Rechnung  $F_a / i \cdot C_0$  am nächsten kommt oder  $e$  wird entsprechend interpoliert. Im folgenden Schritt wird das Verhältnis der von außen einwirkenden Kraftkomponenten  $F_a / F_r$  berechnet und mit dem abgelesenen Wert des lagerabhängigen Faktors  $e$  verglichen.

Ist das Verhältnis kleiner  $e$ , dann entfällt die Axialkomponente und nur der Radialfaktor  $X = 1$  bleibt erhalten. Bei größerem Verhältnis als  $e$  werden die Faktoren  $X$  und  $Y$  in gleicher Zeile wie das zugehörige  $e$  abgelesen. Für Schrägkugellager mit 25° Berührungswinkel hat  $e$  stets den Wert 0,68 und das Verhältnis  $F_a / i \cdot C_0$  wird nicht berechnet. Der statische Radialfaktor  $X_0$  und der statische Axialfaktor  $Y_0$  können für die unterschiedlichen Berührungswinkel und Lageranordnungen direkt aus den Tabellen 5.1a und 5.1b entnommen werden und benötigen keine Berechnungen.

Berührungswinkel $\alpha$	$\frac{F_a}{i \cdot C_0}$	lagerabhängiger Faktor $e$	Einzellager und Tandemanordnungen					
			< ; << ; <<< ; <<<<					
			$F_a / F_r \leq e$		$F_a / F_r > e$		$X_0$	$Y_0$
X	Y	X	Y					
15°	0,011	0,38	1	0	0,44	1,47	0,5	0,46
	0,022	0,40				1,40		
	0,045	0,43				1,30		
	0,067	0,46				1,23		
	0,089	0,47				1,19		
	0,134	0,50				1,12		
	0,223	0,55				1,02		
	0,334	0,56				1,00		
	0,446	0,56				1,00		
25°		0,68	1	0	0,41	0,87	0,5	0,38

Tabelle 5.1a: Faktoren zur Berechnung der äquivalenten Lagerbeanspruchung für Einzelwälzlager und Tandemanordnungen

Berührungswinkel $\alpha$	$\frac{F_a}{i \cdot C_0}$	lagerabhängiger Faktor $e$	Schrägkugellager in X- oder O-Anordnung oder zweireihige Hochpräzisions-Wälzlager					
			<> ; ><					
			$F_a / F_r \leq e$		$F_a / F_r > e$		$X_0$	$Y_0$
X	Y	X	Y					
15°	0,011	0,38	1	1,65	0,72	2,39	1	0,92
	0,022	0,40		1,57		2,28		
	0,045	0,43		1,46		2,11		
	0,067	0,46		1,38		2,00		
	0,089	0,47		1,34		1,93		
	0,134	0,50		1,26		1,82		
	0,223	0,55		1,14		1,66		
	0,334	0,56		1,12		1,63		
	0,446	0,56		1,12		1,63		
25°		0,68	1	0,92	0,67	1,41	1	0,76

Tabelle 5.1b: Faktoren zur Berechnung der äquivalenten Lagerbeanspruchung für Wälzlageranordnungen bei symmetrisch einwirkender Last

Zwei entfernt voneinander angeordnete Schrägkugellager in O- oder X-Anordnung gelten bei symmetrischer Lasteinleitung als System, dessen Faktoren zur Berechnung der äquivalenten Lagerbeanspruchung aus Tabelle 5.1b abgelesen werden. Anderenfalls werden die individuellen Lagerkräfte berechnet und die Faktoren aus Tabelle 5.1a abgelesen.

Nach der Anwendung der Formeln 5.2 und 5.3 sind die äquivalente dynamische Lagerbelastung  $P$  und die äquivalente statische Lagerbelastung  $P_0$  bekannt.

Überschreitet die äquivalente statische Lagerbelastung nicht die statische Tragzahl multipliziert mit der statischen Tragsicherheit  $s_0$ , dann ist das Einzellager statisch ausreichend dimensioniert. Die Auswertung der äquivalenten dynamischen Lagerbelastung für ein Einzellager führt über die Lebensdauerberechnung nach Gleichung 5.1.

Die dafür notwendige dynamische Tragzahl ist für Hochpräzisions-Wälzlager in Kapitel 2 (IBC Hochpräzisions-Schrägkugellager) und Kapitel 3 (IBC Hochpräzisions-Zylinderrollenlager) tabelliert.

## Lagerkombinationen

In dem Fall, dass mehrere gleichartige, einreihige Präzisions-Schrägkugellager in gleicher Anordnung nebeneinander stehen, ergibt sich die statische Gesamttragzahl der Kombination aus den einzelnen statischen Tragzahlen, wie im Folgenden dargestellt:

$$C_{0,\text{Satz}} = i \cdot C_{0,\text{Einzellager}} \quad [\text{N}] \quad [5.5]$$

$C_{0,\text{Satz}}$	statische Tragzahl des Lagersatzes	[N]
$i$	Anzahl der Lager	
$C_{0,\text{Einzellager}}$	statische Tragzahl des Einzellagers	[N]

Die dynamische Tragzahl eines Satzes errechnet sich wie folgt:

$$C_{\text{Satz}} = i^{0,7} \cdot C_{\text{Einzellager}} \quad [\text{N}] \quad [5.6]$$

$C_{\text{Satz}}$	dynamische Tragzahl des Lagersatzes	[N]
$i$	Anzahl der Lager	
$C_{\text{Einzellager}}$	dynamische Tragzahl des Einzellagers	[N]

Die generelle Reduktion der dynamischen Satz-Tragzahl nach DIN ISO 281 um den Wert  $i^{0,7}$  ist an die Annahme geknüpft, dass Lager mit Normaltoleranzen im Satz voneinander abweichende Bohrungs- und Außendurchmesser haben und somit ungleichmäßig Lastanteile tragen.

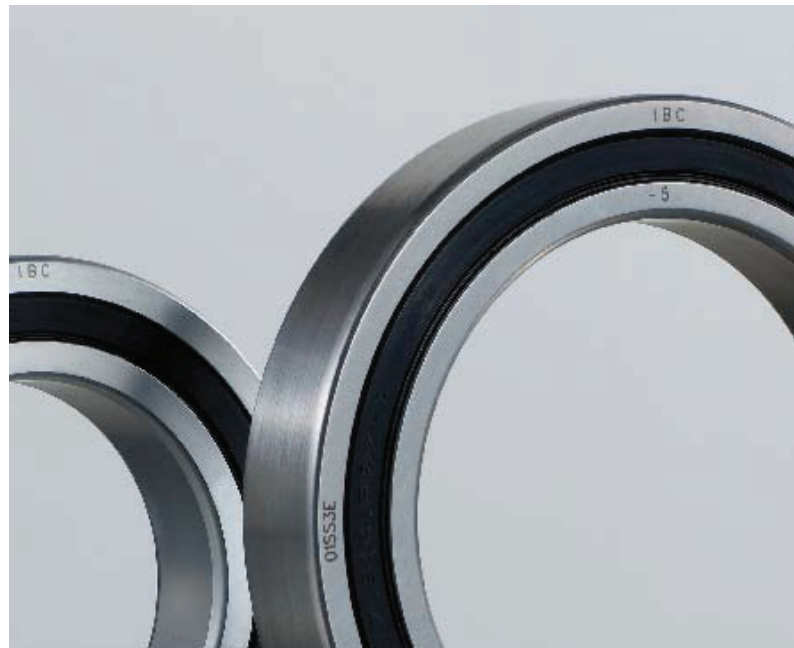
Sortierte und markierte Hochpräzisions-Schrägkugellager mit engeren Toleranzen tragen wesentlich gleichmäßiger und ergeben eine höhere Betriebssicherheit.

Die Lebensdauer eines Satzes von Hochpräzisions-Wälzlager kann berechnet werden, wenn die wirkenden Kräfte an jedem Einzellager bekannt sind. Bereits der Ausfall auch nur eines sich im System befindlichen Hochpräzisions-Wälzlagers bedeutet den Ausfall des gesamten Systems.

Da jedes einzelne Hochpräzisions-Wälzlager seine Lebensdauer mit einer Wahrscheinlichkeit von 90% erreicht, ist die Ausfallwahrscheinlichkeit des Gesamtsystems das Produkt der Ausfallwahrscheinlichkeiten der Einzelhochpräzisions-Wälzlager.

Damit ist die Lebensdauer des Gesamtsystems kürzer als die kürzeste Lebensdauer eines beteiligten Hochpräzisions-Wälzlagers. Bezogen auf die Lebensdauern der Einzelhochpräzisions-Wälzlager ergibt sich eine Lebensdauer  $L_{10h,\text{ges}}$  für das System gemäß Gleichung 5.7.

$$L_{10h,\text{ges}} = \frac{1}{\left( \frac{1}{L_{10h,1}^{1,1}} + \frac{1}{L_{10h,2}^{1,1}} + \dots + \frac{1}{L_{10h,n}^{1,1}} \right)^{1,1}} \quad [\text{h}] \quad [5.7]$$



### Hinweis zu Lagersätzen mit innerer Vorspannung

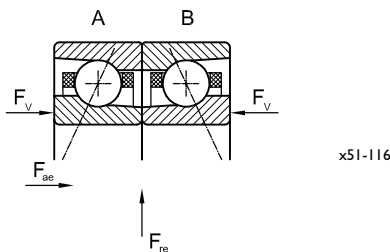
Die zuvor beschriebene Vorgehensweise gilt nicht für vorgespannte Hochpräzisions-Wälzlager, wie sie oftmals in Lagersätzen gegeneinander gestellt werden. Die Vorspannung dieser Hochpräzisions-Wälzlager beansprucht die Wälzlager zusätzlich zu den von außen einwirkenden Kräften. Zur Berechnung der Lebensdauer eines vorgespannten Hochpräzisions-Wälzlagersatzes ist die Betrachtung der Kräfte jedes einzelnen Lagers notwendig. Eine Berechnung mit Berücksichtigung der Vorspannung ist auf den folgenden Seiten dargestellt.



# Detaillierte Berechnung der Wälzlagerkräfte

Zur Bestimmung der radialen und axialen Beanspruchungskomponenten  $F_r$  und  $F_a$  jedes Lagers in einer Anordnung vorgespannter Schrägkugellager müssen die externen Radialbeanspruchungen  $F_{re}$ , die externen Axialbeanspruchungen  $F_{ae}$ , die axiale Vorspannung  $F_v$  und deren Beanspruchungsverteilung berücksichtigt werden. Die Beanspruchungsverteilung ergibt sich aus der Einfederung der Wälzkörper, die einem Potenzgesetz mit dem Exponenten  $2/3$  folgt und unter der Annahme, dass die Radialkraft gleichmäßig auf die einzelnen Wälzlager verteilt ist.

## Lagersatz mit zwei Hochpräzisions-Schrägkugellagern



Eine externe Radialbeanspruchung  $F_{re}$  verändert aufgrund der Keilwirkung durch den Berührungswinkel  $\alpha$  die gesamte Vorspannung  $F_v$  wie folgt:

$$F_{v,ges} = \frac{F_{re} \cdot 1,2 \cdot \tan \alpha + F_v}{2} \quad [N] \quad [5.8]$$

wenn  $F_{v,ges} < F_v$ , dann gilt korrigierend  $F_{v,ges} = F_v$

Mit der korrigierten Vorspannung  $F_{v,ges}$  werden nun die Axialbeanspruchungen auf die einzelnen Lager A und B berechnet:

$$F_{a,A} = \frac{2}{3} \cdot F_{ae} + F_{v,ges} \quad [N] \quad [5.9]$$

$$F_{a,B} = F_{v,ges} - \frac{1}{3} \cdot F_{ae} \quad [N] \quad [5.10]$$

Ergibt sich  $F_{a,A}$  oder  $F_{a,B} < 0$ , ist das jeweilige Hochpräzisions-Wälzlager entlastet. Die Axialbeanspruchung ist dann Null und die Axialbeanspruchung des anderen Lagers entspricht der externen axialen Beanspruchung  $F_{ae}$ .

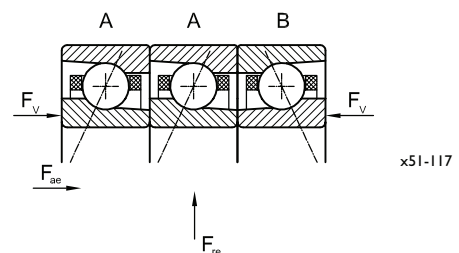
Die externe Radialbeanspruchung  $F_{re}$  wird nun, unter Berücksichtigung der Verteilung der axialen Beanspruchungen, für die Einzellager gemäß dem o. g. Potenzgesetz der Einfederung aufgeteilt:

$$F_{r,A} = \frac{F_{a,A}^{2/3}}{F_{a,A}^{2/3} + F_{a,B}^{2/3}} \cdot F_{re} \quad [N] \quad [5.11]$$

$$F_{r,B} = \frac{F_{a,B}^{2/3}}{F_{a,A}^{2/3} + F_{a,B}^{2/3}} \cdot F_{re} \quad [N] \quad [5.12]$$

Aus den so erhaltenen axialen Beanspruchungen  $F_{a,A}$  und  $F_{a,B}$  sowie den radialen Beanspruchungen  $F_{r,A}$  und  $F_{r,B}$  ist nun die äquivalente dynamische Lagerbelastung für jedes Hochpräzisions-Wälzlager gemäß Gleichung 5.2 zu bestimmen. Die Faktoren X und Y werden aus Tabelle 5.1a entnommen. Gleichung 5.1 ergibt für jedes Hochpräzisions-Wälzlager eine individuelle Lebensdauer, die dann nach Gleichung 5.7 zur Systemlebensdauer zusammengeführt wird.

## Lagersatz mit drei Hochpräzisions-Schrägkugellagern



Unter Berücksichtigung einer externen radialen Beanspruchung ergibt sich für die Vorspannung der einzelnen Hochpräzisions-Wälzlager:

$$F_{v,A} = \frac{F_{re} \cdot 1,2 \cdot \tan \alpha + F_v}{4} \quad [N] \quad [5.13]$$

$$F_{v,B} = \frac{F_{re} \cdot 1,2 \cdot \tan \alpha + F_v}{2} \quad [N] \quad [5.14]$$

wenn  $F_{v,A} < F_v / 2$ , dann gilt korrigierend  $F_{v,A} = F_v / 2$   
und  $F_{v,B} < F_v$ , dann gilt korrigierend  $F_{v,B} = F_v$

Damit ergeben sich für die axialen Beanspruchungen der einzelnen Hochpräzisions-Wälzlager:

$$F_{a,A} = 0,4 \cdot F_{ae} + F_{v,A} \quad [N] \quad [5.15]$$

$$F_{a,B} = F_{v,B} - 0,2 \cdot F_{ae} \quad [N] \quad [5.16]$$

Ist  $F_{a,B} < 0$ , liegt keine Vorspannung mehr vor. Die Axialbeanspruchung von Hochpräzisions-Wälzlager B ist Null und die beiden Hochpräzisions-Wälzlager A tragen jeweils die halbe externe Axialbeanspruchung. Im umgekehrten Fall sind die beiden Hochpräzisions-Wälzlager A entlastet und unterliegen keiner axialen Beanspruchung mehr. Hochpräzisions-Wälzlager B trägt jetzt die volle externe Axialbeanspruchung  $F_{ae}$ .

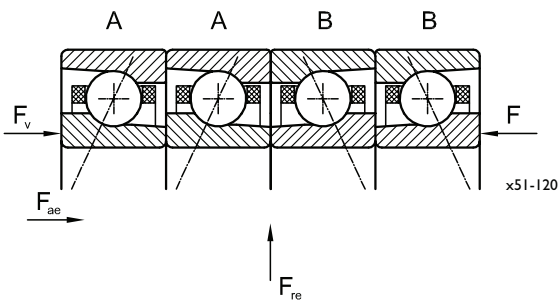
Der Radialbeanspruchungsanteil jedes Hochpräzisions-Wälzlagers aus der externen Radialkraft ist:

$$F_{r,A} = \frac{F_{a,A}^{2/3}}{2 \cdot F_{a,A}^{2/3} + F_{a,B}^{2/3}} \cdot F_{re} \quad [\text{N}] \quad [5.17]$$

$$F_{r,B} = \frac{F_{a,B}^{2/3}}{2 \cdot F_{a,A}^{2/3} + F_{a,B}^{2/3}} \cdot F_{re} \quad [\text{N}] \quad [5.18]$$

Wie im vorangegangenen Fall führt die weitere Rechnung über die Gleichung 5.2 mit Tabelle 5.1a zu den Axial- und Radialfaktoren zur äquivalenten dynamischen Lagerbelastung und weiter mit Gleichung 5.1 zur Lebensdauer der Einzellager und mit Gleichung 5.7 zur Lebensdauer des Gesamtlagerungssystems.

### Lagersatz mit vier Hochpräzisions-Schrägkugellagern



Die radiale Beanspruchung beeinflusst, aufgrund des Berührungswinkels für Schrägkugellager, die Vorspannung der einzelnen Hochpräzisions-Wälzlager:

$$F_{v,ges} = \frac{F_{re} \cdot 1,2 \cdot \tan \alpha + F_v}{4} \quad [\text{N}] \quad [5.19]$$

wenn  $F_{v,ges} < F_v / 2$ , dann gilt korrigierend  $F_{v,ges} = F_v / 2$

Damit ergeben sich für die axialen Beanspruchungen der einzelnen Hochpräzisions-Wälzlager:

$$F_{a,A} = \frac{1}{3} \cdot F_{ae} + F_{v,ges} \quad [\text{N}] \quad [5.20]$$

$$F_{a,B} = F_{v,ges} - \frac{1}{6} \cdot F_{ae} \quad [\text{N}] \quad [5.21]$$

Ist  $F_{a,B} < 0$ , liegt keine Vorspannung mehr vor. Die Axialbeanspruchung der Hochpräzisions-Wälzlager B ist Null und die beiden Hochpräzisions-Wälzlager A tragen jeweils die halbe externe Axialbeanspruchung. Im umgekehrten Fall sind die beiden Hochpräzisions-Wälzlager A entlastet und unterliegen keiner axialen Beanspruchung mehr. Die Hochpräzisions-Wälzlager B tragen jeweils die halbe axiale Beanspruchung  $F_{ae}$ .

Der Radialbeanspruchungsanteil jedes Hochpräzisions-Wälzlagers aus der externen Radialkraft ist:

$$F_{r,A} = \frac{F_{a,A}^{2/3}}{F_{a,A}^{2/3} + F_{a,B}^{2/3}} \cdot \frac{F_{re}}{2} \quad [\text{N}] \quad [5.22]$$

$$F_{r,B} = \frac{F_{a,B}^{2/3}}{F_{a,A}^{2/3} + F_{a,B}^{2/3}} \cdot \frac{F_{re}}{2} \quad [\text{N}] \quad [5.23]$$

In der weiteren Rechnung kommen die Gleichung 5.2 mit Tabelle 5.1a sowie die Gleichung 5.1 und 5.7 zur Anwendung und ergeben die Lebensdauer des Gesamtlagerungssystems.

### Weitere Kombinationen von Schrägkugellagern

Abweichend von der vorhergehenden Berechnung bei überwiegend axialer Beanspruchung und unter Berücksichtigung einer Ungleichverteilung der Beanspruchung nach Gleichung 5.24 kann die Berechnung der Lebensdauer mit vorbereiteten Lastparametern nach Tabelle 5.2 durchgeführt werden.

Zur Bestimmung der resultierenden axialen Lagerbeanspruchung ist neben der äußeren Last  $F_{ae}$  die Lagervorspannung  $F_v$  zu berücksichtigen. Bei Lageranordnungen mit unterschiedlicher Lagerzahl pro Lastrichtung ergibt sich eine unterschiedliche axiale Steifigkeit, axiale Tragzahl und Lebensdauer entsprechend der Anzahl der Lager je Richtung. Zu welchen Anteilen die Vorspannung und die äußere Beanspruchung dann pro Lager zu berücksichtigen sind, geht aus der Tabelle 5.2 hervor.

Bei Lagersätzen von Universallagern mit einer Lageranzahl größer zwei und einer nicht zu vernachlässigenden starren Vorspannung  $F_v$  sollte die Lebensdauer pro Einzellager wie folgt berechnet werden:

Die radiale Beanspruchung wird auf alle Hochpräzisions-Wälzlager im Satz verteilt:

$$F_{r, \text{Einzellager}} = \frac{F_r}{i_{ges}^{0,7}} \quad [\text{N}] \quad [5.24]$$

Anzahl der Lager im Satz						
i	1	2	3	4	5	6
$i^{0,7}$	1	1,62	2,12	2,64	3,09	3,51

Die axiale Beanspruchung  $F_{a, \text{Einzellager}}$  ergibt sich aus den Formeln nach Tabelle 5.2. Die Hochpräzisions-Wälzlager in Lastrichtung sind am höchsten beansprucht. Die Hochpräzisions-Wälzlager in Gegenlastrichtung tragen nur noch einen Teil der Vorspannung oder sind vollständig entlastet.

Mit den resultierenden Wälzlagerbelastungen  $F_{r, \text{Einzellager}}$  und  $F_{a, \text{Einzellager}}$  werden jeweils die äquivalenten Lagerbelastungen  $P$  nach der Formel 5.2 bestimmt.

Wenn statt starrer Vorspannung mit variabler Federvorspannung gearbeitet wird, gilt für das stärker beanspruchte Hochpräzisions-Wälzlager (-paket):

$$F_a = F_{\text{Feder}} + F_{ae} \quad [\text{N}] \quad [5.25]$$

$$F_{a,\text{Einzellager}} = \frac{1}{i_{0,7}} \cdot (F_{\text{Feder}} + F_{ae}) \quad [\text{N}] \quad [5.26]$$

### Lastspektren

Bei einem Lastspektrum von zeitlich sich ändernden Kräften und eventuell unterschiedlicher Drehzahl wird eine mittlere äquivalente Lagerbelastung nach Gleichung 5.27 berechnet.

Die mittlere Drehzahl selbst wird ebenfalls aus prozentualen Zeitanteilen der jeweiligen Drehzahlen zusammengesetzt.

$$P_m = \sqrt[3]{\frac{P_1^3 \cdot t_1 \cdot n_1 + \dots + P_n^3 \cdot t_n \cdot n_n}{n_m \cdot 100}} \quad [\text{N}] \quad [5.27]$$

$$n_m = \frac{t_1 \cdot n_1 + \dots + t_n \cdot n_n}{100} \quad [\text{min}^{-1}]$$

$P_m$	mittlere Lagerbelastung	[N]
$P_1 \dots P_n$	äquivalente Belastung pro Lastfall	[N]
$t_1 \dots t_n$	Zeitanteil der Lagerbelastung	[%]
$n_1 \dots n_n$	Betriebsdrehzahlen	[min <sup>-1</sup> ]
$n_m$	mittlere Betriebsdrehzahl	[min <sup>-1</sup> ]

### Bestimmung der Lagergröße

Nach Vorabauswahl einer möglichen Anordnung von Hochpräzisions-Schrägkugellagern und nach Anwendung der erläuterten Gleichungen auf die gegebenen äußeren Lagerbeanspruchungen und auf die angenommene Vorspannung der Wälzlager sind alle individuellen, äquivalenten dynamischen Lagerbelastungen  $P$  bekannt.

Nach Umstellung von Gleichung 5.1 zu

$$C = P \cdot \sqrt[3]{\frac{L_{10,h} \cdot 60 \cdot n}{10^6}} \quad [\text{N}] \quad [5.28]$$

$C$	dynamische Tragzahl	[N]
$P$	äquivalente dynamische Belastung	[N]
$p$	Lebensdauerexponent	
$L_{10,h}$	nominelle Lebensdauer	[h]
$n$	Betriebsdrehzahl	[min <sup>-1</sup> ]

kann die erforderliche, dynamische Tragzahl unter Annahme einer Lebensdauer bei gegebener Drehzahl bestimmt und zu Vergleichszwecken im Tabellenteil herangezogen werden.

Last- richtung	Anordnung Lagerstelle		Last- richtung	Entlastung ab $F_{ae} > X \cdot F_v$	Lastverteilung bezogen auf das einzelne Lager ( $F_a$ , Einzellager) nach Berücksichtigung der Vorspannung $F_v$ und der externen Last $F_{ae}$			
					bis zur Entlastung durch externe Last $F_{ae} < X \cdot F_v$		nach Entlastung bei $F_{ae} > X \cdot F_v$	
					A	B	A	B
$F_{ae} \rightarrow$	<	>		X	$F_v + 0,67 F_{ae}$	$F_v - 0,33 F_{ae}$	$F_{ae}$	
$F_{ae} \rightarrow$	<<	>		5,66	$0,84 F_v + 0,47 F_{ae}$	$1,36 F_v - 0,24 F_{ae}$	$0,617 F_{ae}$	0
	<<	>	$\leftarrow F_{ae}$	2,83	$0,84 F_v - 0,30 F_{ae}$	$1,36 F_v + 0,52 F_{ae}$	0	$F_{ae}$
$F_{ae} \rightarrow$	<<<	>		8,49	$0,73 F_v + 0,38 F_{ae}$	$1,57 F_v - 0,18 F_{ae}$	$0,463 F_{ae}$	
	<<<	>	$\leftarrow F_{ae}$	2,83	$0,73 F_v - 0,26 F_{ae}$	$1,57 F_v + 0,45 F_{ae}$	0	$F_{ae}$
$F_{ae} \rightarrow$	<<<<	>		11,3	$0,65 F_v + 0,32 F_{ae}$	$1,71 F_v - 0,15 F_{ae}$	$0,379 F_{ae}$	
	<<<<	>	$\leftarrow F_{ae}$	2,83	$0,65 F_v - 0,23 F_{ae}$	$1,71 F_v + 0,45 F_{ae}$	0	$F_{ae}$
$F_{ae} \rightarrow$	<<	>>		5,66	$0,84 F_v + 0,40 F_{ae}$	$0,84 F_v - 0,22 F_{ae}$	$0,617 F_{ae}$	0
$F_{ae} \rightarrow$	<<<	>>		8,49	$1,12 F_v + 0,33 F_{ae}$	$1,49 F_v - 0,18 F_{ae}$	$0,463 F_{ae}$	0
	<<<	>>	$\leftarrow F_{ae}$	5,66	$1,12 F_v - 0,20 F_{ae}$	$1,49 F_v + 0,35 F_{ae}$	0	$0,617 F_{ae}$
$F_{ae} \rightarrow$	<<<<	>>		11,3	$1,03 F_v + 0,29 F_{ae}$	$1,68 F_v - 0,15 F_{ae}$	$0,379 F_{ae}$	0
	<<<<	>>	$\leftarrow F_{ae}$	8,49	$1,03 F_v - 0,18 F_{ae}$	$1,68 F_v + 0,33 F_{ae}$	0	$0,617 F_{ae}$

Tabelle 5.2: Resultierende axiale Last  $F_a$  des Einzellagers

# Erweiterte modifizierte Lebensdauerberechnung

Die Berechnung der Lebensdauer von Hochpräzisions-Wälzlager wurde im Laufe der Zeit durch Aufnahme neuer Kriterien verfeinert. Während dies ursprünglich nur eine Funktion der Tragzahl C, der äquivalenten dynamischen Lagerbelastung P und der mittleren Betriebsdrehzahl  $n_m$  war, wurden später verschiedene Lebensdauerbeiwerte eingefügt.

## Erweiterte modifizierte Lebensdauerberechnung

Die ehemals übliche, sogenannte modifizierte Lebensdauer  $L_{na}$  mit den Faktoren  $a_1$ ,  $a_2$  und  $a_3$  wurde ab 1993 durch die erweiterte modifizierte Lebensdauerberechnung  $L_{10, nm}$  nach DIN ISO 281 ersetzt.

$$L_{10, nm} = a_1 \cdot a_{DIN} \cdot L_{10} \quad [h] \quad [5.29]$$

$L_{10, nm}$	Erweiterte modifizierte Lebensdauer	[h]
$a_1$	Erlebenswahrscheinlichkeit	
$a_{DIN}$	Lebensdauerbeiwert nach Glg. 5.37 bis 5.42	
$L_{10}$	Lebensdauer nach Glg. 5.1	[h]

Erlebenswahrscheinlichkeit $a_1$		
Erlebenswahrscheinlichkeit %	$L_{na}$	$a_1$
90	$L_{10a}$	1,00
95	$L_{5a}$	0,62
96	$L_{4a}$	0,53
97	$L_{3a}$	0,44
98	$L_{2a}$	0,33
99	$L_{1a}$	0,21

Tabelle 5.3: Beiwerte  $a_1$

Der Wahrscheinlichkeitsfaktor  $a_1$  bleibt erhalten. Durch diesen lässt sich die Erlebenswahrscheinlichkeit von 90% oder die Ausfallrate von 10% auf andere, höhere Erlebenswahrscheinlichkeiten umrechnen. Der eingeführte  $a_{DIN}$ -Faktor erfasst nun verschiedene nachfolgend aufgeführte Einflussgrößen.

Neben der Beanspruchung gehen folgende Einflussgrößen ein, die wiederum auf mehrere Faktoren zurückzuführen sind:

Einfluss	bedingt
Schmierung	Lagergröße, Drehzahl, Viskosität und Art des Schmierstoffes, Additive
Werkstoff	Oberfläche, Reinheit, Härte, Temperaturbeständigkeit, Ermüdungsgrenze
Lagerbauart	Reibungsverhältnisse, innere Lastverteilung
Spannung	Fertigung, Wärmebehandlung, Presssitz
Umgebung	Feuchtigkeit, Verunreinigungen des Schmierstoffes
Montage	Versatz, Beschädigungen

Tabelle 5.4: Einflussgrößen

Die erweiterte, modifizierte Lebensdauer basiert auf der nominalen Lebensdauer  $L_{10}$  nach Gleichung 5.10, die mit dem Erlebenswahrscheinlichkeitsfaktor  $a_1$  nach Tabelle 5.3 und dem Lebensdauerbeiwert  $a_{DIN}$  gewichtet wird.

## Bestimmung des Lebensdauerbeiwertes

Der Lebensdauerbeiwert  $a_{DIN}$  wird nach der Bestimmung der Parameter  $e_c \cdot P_u / P$  und  $\kappa$  aus den Diagrammen 5.3 und 5.4 abgelesen oder nach Gleichung 5.37 bis 5.42 berechnet.

$$a_{DIN} = f \left( \frac{e_c \cdot P_u}{P}, \kappa \right) \quad [5.30]$$

$a_{DIN}$	Lebensdauerbeiwert	
$e_c$	Verunreinigungsbeiwert (Tabelle 5.5)	
$P_u$	Ermüdungsgrenzbelastung	[N]
$P$	äquivalente dynamische Lagerbelastung	[N]
$\kappa$	Viskositätsverhältnis	

## Ermüdungsgrenzbelastung

Sie berücksichtigt die Ermüdungsgrenze des Laufbahnwerkstoffes. Ohne in die Einzelheiten zu gehen, ist diese für Wälzlager bis zu einem mittleren Lagerdurchmesser  $d_m$  von 150 mm etwa mit folgenden Formeln definiert:

$P_u \cong C_0 / 27$	Kugellager	[N]	[5.31]
$P_u \cong C_0 / 8,2$	Rollenlager	[N]	[5.32]
$P_u$	Ermüdungsgrenzbelastung	[N]	





## Verunreinigungsbeiwert

Im Schmierstoff befindliche harte, feste Verunreinigungen können beim Überrollen bleibende Eindrücke in den Laufbahnen verursachen. Hierdurch hervorgerufene örtliche Spannungsüberhöhungen verringern die Lebensdauer des Hochpräzisions-Wälzlagers. Diese Lebensdauererminderung durch feste Partikel ist abhängig von der Lagergröße, der Schmierfilmhöhe (Viskositätsverhältnis  $\kappa$ ), der Größe, Art, Härte und Menge der Partikel. Andere Verunreinigungen, etwa durch Eintritt von Flüssigkeiten, können hierbei nicht gewürdigt werden.

Bei starker Kontamination ( $e_c \rightarrow 0$ ) sind Ausfälle durch Verschleiß wahrscheinlich. Die Gebrauchsdauer liegt dann weit unter der errechneten Lebensdauer.

Grad der Verunreinigung	Beiwert $e_c$	
	$D_{pw} < 100$ mm	$D_{pw} > 100$ mm
<b>Extreme Sauberkeit</b> Partikelgröße wie Schmierfilmhöhe, Laborbedingungen	1	1
<b>Hohe Sauberkeit</b> Feinstfilterung der Ölzufuhr, abgedichtete, gefettete Lager	0,8...0,6	0,9...0,8
<b>Normale Sauberkeit</b> Feinstfilterung der Ölzufuhr, gefettete Lager mit Deckscheiben	0,6...0,5	0,8...0,6
<b>Leichte Verunreinigung</b> Leichte Verunreinigungen in der Ölzufuhr	0,5...0,3	0,6...0,4
<b>Mäßige Verunreinigung</b> Lager mit Abrieb anderer Maschinenelemente kontaminiert	0,3...0,1	0,4...0,2
<b>Starke Verunreinigung</b> Stark verschmutzte Lagerumgebung, unzureichende Abdichtung	0,1...0	0,1...0
<b>Sehr starke Verunreinigung</b>	0	0

Tabelle 5.5: Verunreinigungsbeiwerte  $e_c$

## Viskositätsverhältnis

$\kappa$  dient als Maß der Güte der Schmierfilmbildung. Es ist das Verhältnis der Schmierstoffviskosität  $\nu$  bei Betriebstemperatur zur Bezugsviskosität  $\nu_1$ .

Mit  $\kappa = 1$  wird der trennende Schmierfilm gerade erreicht. Vorgehensweise: Zunächst wird die Bezugsviskosität  $\nu_1$  aus dem Diagramm 5.1 in Abhängigkeit vom Teilkreisdurchmesser  $D_{pw}$  und der Drehzahl  $n$  bestimmt.

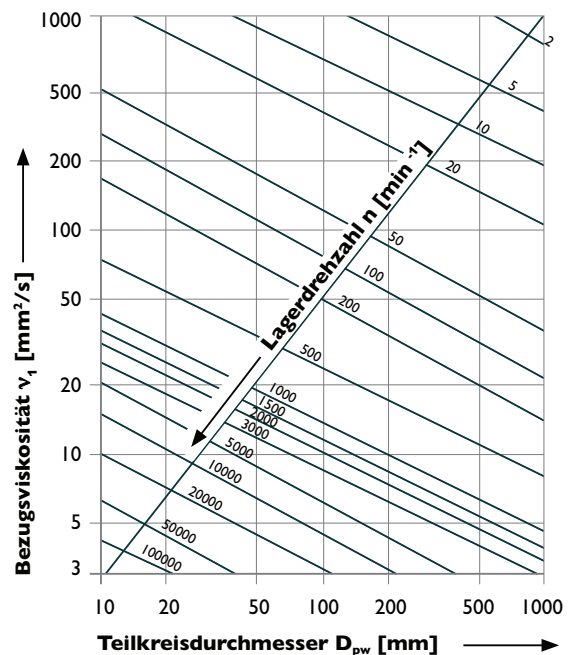


Diagramm 5.1: Erforderliche kinematische Viskosität  $\nu_1$

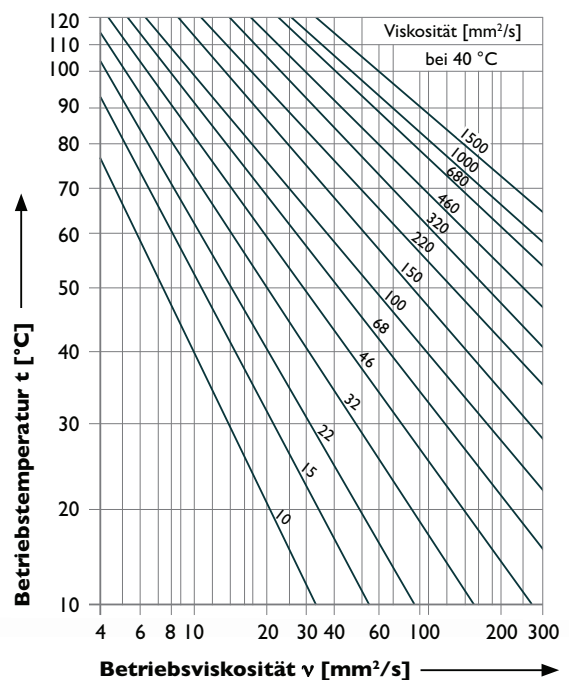


Diagramm 5.2: Viskosität bei Betriebstemperatur für Mineralöle

Die Betriebsviskosität  $\nu$  wird dann im Viskositäts-Temperatur-Diagramm 5.2 unter dem Schnittpunkt der erwarteten Betriebstemperatur  $t$  mit dem schräg verlaufenden Graphen der Bezugsviskositäten bezogen auf 40 °C abgelesen.

Hieraus wird das Viskositätsverhältnis  $\kappa$  gebildet:

$$\kappa = \frac{\nu}{\nu_1} \quad [5.33]$$

$\kappa$	Viskositätsverhältnis	
$\nu$	Betriebsviskosität	[mm <sup>2</sup> /s]
$\nu_1$	Bezugsviskosität	[mm <sup>2</sup> /s]

Höhere Werte können durch geeignete Additive im Mischreibungsbereich  $\kappa < 1$  erzielt werden: Durch besondere Zusätze wie Feststoffe, polare oder/und polymere Wirkstoffe wird der Verschleiß reduziert, der Korrosion entgegengewirkt, die Reibung gemindert und die Adhäsion des Schmierstoffs in den Schmierpalten verbessert.

Additive sollten eingesetzt werden, wenn Betriebsviskositäten bei Kugellagern  $< 13 \text{ mm}^2/\text{s}$  und bei Rollenlagern  $< 20 \text{ mm}^2/\text{s}$  vorliegen und wenn der Drehzahlkennwert mit  $d_m \cdot n < 10.000$  relativ niedrig ist.

Das Viskositätsverhältnis  $\kappa$  nach Gleichung 5.33 ist aus den Diagrammen 5.1 und 5.2 zu bestimmen oder ist auch rechnerisch zugänglich.

Für die Bezugsviskosität  $\nu_1$  gilt:

$$\nu_1 = 45000 \cdot n^{-0,83} \cdot D_{pw}^{-0,5} \quad \text{für } n < 1000 \text{ min}^{-1} \quad [5.34]$$

$$\nu_1 = 4500 \cdot n^{-0,5} \cdot D_{pw}^{-0,5} \quad \text{für } n > 1000 \text{ min}^{-1} \quad [5.35]$$

$D_{pw}$  Teilkreisdurchmesser des Hochpräzisions-Wälzlagers  
 $= d_m = (d + D) / 2$  [mm]

Bei Schmierstoffen mit abweichender Dichte zur Bezugsdichte von  $\rho_1 = 0,89 \text{ g/cm}^3$  bei 20 °C gilt die folgende Formel:

$$\kappa = \frac{\nu}{\nu_1} \cdot \left( \frac{\rho}{\rho_1} \right)^{0,83} \quad [5.36]$$

$\rho$	Dichte des verwendeten Schmierstoffes	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_1$	Bezugsdichte	[g/cm <sup>3</sup> ]

Bei einem Viskositätsverhältnis  $\kappa < 1$  und einem Verunreinigungsbeiwert  $e_c > 0,2$  kann durch Nutzung eines Schmierstoffes mit wirksamen EP-Additiven mit dem Wert  $\kappa = 1$  gerechnet werden. Der Lebensdauerbeiwert ist dann aber auf  $a_{DIN} < 3$  zu begrenzen. Bei starker Verschmutzung ( $e_c < 0,2$ ) ist die Effektivität der Additivierung nachzuweisen.

Auf der folgenden Seite ist die grafische bzw. die rechnerische Ermittlung des Wertes  $a_{DIN}$  für IBC Hochpräzisions-Schräggugellager und für IBC Hochpräzisions-Zylinderrollenlager zusammengefasst.



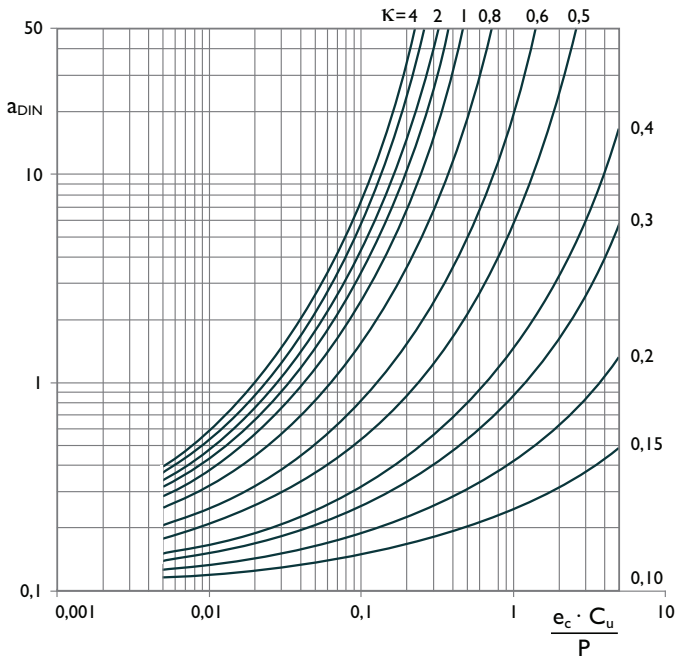


Diagramm 5.3: Lebensdauerbeiwert  $a_{DIN}$  für IBC Hochpräzisions-Schrägkugellager

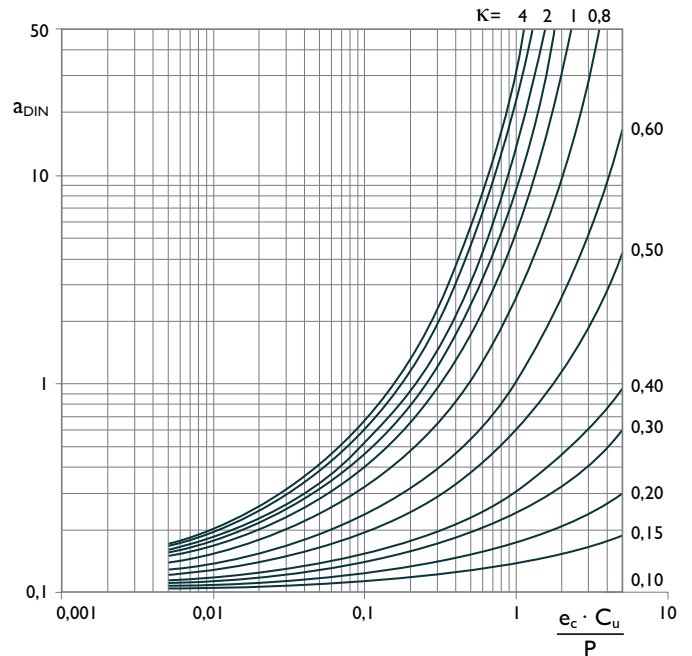


Diagramm 5.4: Lebensdauerbeiwert  $a_{DIN}$  für IBC Hochpräzisions-Zylinderrollenlager

### Rechenvorschrift für $a_{DIN}$ für IBC Hochpräzisions-Schrägkugellager:

$$a_{DIN} = 0,1 \cdot \left[ 1 - \left( 2,56705 - \frac{2,26492}{\kappa^{0,0543806}} \right)^{0,83} \cdot \left( \frac{e_c \cdot C_u}{P} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-9,3} \quad \text{für } 0,1 \leq \kappa < 0,4 \quad [5.37]$$

$$a_{DIN} = 0,1 \cdot \left[ 1 - \left( 2,56705 - \frac{1,99866}{\kappa^{0,190870}} \right)^{0,83} \cdot \left( \frac{e_c \cdot C_u}{P} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-9,3} \quad \text{für } 0,4 \leq \kappa < 1 \quad [5.38]$$

$$a_{DIN} = 0,1 \cdot \left[ 1 - \left( 2,56705 - \frac{1,99866}{\kappa^{0,0717391}} \right)^{0,83} \cdot \left( \frac{e_c \cdot C_u}{P} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-9,3} \quad \text{für } 1 \leq \kappa \leq 4 \quad [5.39]$$

### Rechenvorschrift für $a_{DIN}$ für IBC Hochpräzisions-Zylinderrollenlager:

$$a_{DIN} = 0,1 \cdot \left[ 1 - \left( 1,58592 - \frac{1,39926}{\kappa^{0,0543806}} \right)^{0,83} \cdot \left( \frac{e_c \cdot C_u}{P} \right)^{0,4} \right]^{-9,185} \quad \text{für } 0,1 \leq \kappa < 0,4 \quad [5.40]$$

$$a_{DIN} = 0,1 \cdot \left[ 1 - \left( 1,58592 - \frac{1,23477}{\kappa^{0,190870}} \right)^{0,83} \cdot \left( \frac{e_c \cdot C_u}{P} \right)^{0,4} \right]^{-9,185} \quad \text{für } 0,4 \leq \kappa < 1 \quad [5.41]$$

$$a_{DIN} = 0,1 \cdot \left[ 1 - \left( 1,58592 - \frac{1,23477}{\kappa^{0,0717391}} \right)^{0,83} \cdot \left( \frac{e_c \cdot C_u}{P} \right)^{0,4} \right]^{-9,185} \quad \text{für } 1 \leq \kappa \leq 4 \quad [5.42]$$

# IBC-spezifische Faktoren

Für die nach der erweiterten Lebensdauerberechnung gemäß DIN ISO 281 hinausgehenden Möglichkeiten hat IBC weitere lebensdauerverändernde Faktoren festgelegt, die fakultativ berücksichtigt werden. Diese sind unter werkstoffbedingte Faktoren  $a_{lb}$  und  $a_{wk}$  zusammengefasst.

Mit dem Faktor  $a_{lb}$  werden die positiven Eigenschaften der ATCoat-Beschichtung gewürdigt, wenn sie in den Laufbahnen aufgebracht ist. Darüber hinaus kann sie auch nur auf der Mantelfläche zur Vermeidung von Passungsrost am Wälzlager genutzt werden. Siehe Kapitel 9 (Werkstoffe).

Der Faktor  $a_{wk}$  für den Wälzkörperwerkstoff berücksichtigt die wesentlich längere Standzeit von keramischen Wälzkörpern, die sich aus mehreren Gründen ergeben.

Werkstoffbedingte Faktoren			
Laufbahnwerkstoff	$a_{lb}$	Wälzkörperwerkstoff	$a_{wk}$
unbeschichtet	1,00	100Cr6	1,0
IR ATCoat	1,15	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	2,0
AR ATCoat	1,05		
IR & AR ATCoat	1,20		

Tabelle 5.6: Beiwerte  $a_{lb}$ ,  $a_{wk}$

Bei Einsatz von thermisch höher behandelten Wälzlagern müssen alle verwendeten Komponenten auf die Dauereinsatztemperatur abgestimmt sein.

Die IBC-spezifischen Faktoren gehen multiplikativ in die Berechnung der erweiterten Lebensdauer ein:

$$L_{10,erw.,IBC} = a_{lb} \cdot a_{wk} \cdot L_{10,nm} \quad [h] \quad [5.43]$$

$L_{10,erw.,IBC}$  spezifische modif. Lebensdauer IBC [h]

$a_{lb}$ ,  $a_{wk}$  werkstoffbedingte Faktoren

$L_{10,nm}$  modifizierte Lebensdauer [h]

Weiterhin sollte die Fettlebensdauer mit der errechneten Lebensdauer der Hochpräzisions-Wälzlager verglichen werden, um die Möglichkeit einer Dauerschmierung festzustellen oder um Strategien für eine kontinuierliche oder zyklische Nachschmierung zu entwickeln.

