

DIN ISO/TR 10657

ICS 21.100.20

Ersatz für
DIN ISO 76 Beiblatt 1:1994-09**Erklärungen zu ISO 76 (ISO/TR 10657:2021)**

Explanatory notes on ISO 76 (ISO/TR 10657:2021)

Notes explicatives sur l'ISO 76 (ISO/TR 10657:2021)

Gesamtumfang 45 Seiten

DIN-Normenausschuss Wälz- und Gleitlager (NAWGL)

Inhalt

	Seite
Nationales Vorwort	4
Nationaler Anhang NA (informativ) Literaturhinweise	5
Vorwort	6
Einleitung	7
0.1 ISO/R 76:1958	7
0.2 ISO 76:1978	7
0.3 ISO 76:1987	7
0.4 ISO 76:2006	8
0.5 ISO 76:2006/Amd.1:2017	8
1 Anwendungsbereich	9
2 Normative Verweisungen	9
3 Begriffe und Symbole	9
3.1 Begriffe	9
3.2 Symbole	9
4 Statische Tragzahlen	11
4.1 Allgemeines	11
4.1.1 Grundgleichung für Punktberührung	11
4.1.2 Grundgleichung für Linienberührung	12
4.2 Statische radiale Tragzahl C_{0r} für Radial-Kugellager	13
4.2.1 Radial-Rillenkugellager und Schrägkugellager	13
4.2.2 Pendelkugellager	14
4.3 Statische axiale Tragzahl C_{0a} für Axial-Kugellager	15
4.4 Statische radiale Tragzahl C_{0r} für Radial-Rollenlager	16
4.5 Statische axiale Tragzahl C_{0a} für Axial-Rollenlager	17
5 Statische äquivalente Belastung	17
5.1 Theoretische äquivalente radiale Belastung P_{0r} für Radiallager	17
5.1.1 Einreihige Radiallager und Radial-Rillenkugellager (Nenn-Berührungswinkel $\alpha = 0^\circ$)	17
5.1.2 Zweireihige Radiallager	23
5.2 Theoretische statische äquivalente axiale Belastung P_{0a} für Axiallager	25
5.2.1 Einseitig wirkende Axiallager	25
5.2.2 Zweiseitig wirkende Axiallager	28
5.3 Näherungsgleichungen für die theoretische statische äquivalente Belastung	30
5.3.1 Radiallager	30
5.3.2 Axiallager	31
5.4 Praktische Gleichungen für die statische äquivalente Belastung	31
5.4.1 Radiallager	31
5.4.2 Axiallager	35
5.5 Statischer Radialfaktor X_0 und statischer Axialfaktor Y_0	36
5.5.1 Radiallager	36
5.5.2 Axiallager	40
Anhang A (normativ) Werte für γ , κ und $E(\kappa)$	42
Literaturhinweise	45

Bilder

Bild 1 — Theoretische Beziehung zwischen radialer und axialer Belastung bezogen auf die statische äquivalente Belastung für einreihige Radiallager	19
Bild 2 — Theoretische Beziehung zwischen radialer und axialer Belastung bezogen auf die statische äquivalente Belastung für Radial-Rillenkugellager	22

Bild 3 — Theoretische Beziehung zwischen radialer und axialer Belastung bezogen auf die statische äquivalente Belastung für zweireihige Radiallager	25
Bild 4 — Theoretische Beziehung zwischen der axialen und radialen Belastung bezogen auf die statische äquivalente Belastung für einseitig wirkende Axiallager	27
Bild 5 — Theoretische Beziehung zwischen der axialen und radialen Belastung bezogen auf die statische äquivalente Belastung für zweiseitig wirkende Axiallager	29
Bild 6 — Wälzkörperbelastung in einem einreihigen Radiallager	33
Bild 7 — Beziehung zwischen radialen und axialen Belastungen bezogen auf die statische äquivalente Belastung für Radiallager	34
Bild 8 — Beziehung zwischen den radialen und axialen Belastungen bezogen auf die statische äquivalente Belastung für Radial-Rillenkugellager	36

Tabellen

Tabelle 1 — Werte für F_r/P_{0r} und $F_a \cot \alpha/P_{0r}$ in Abhängigkeit von $F_r \tan \alpha/F_a$ für einreihige Radiallager	18
Tabelle 2 — Werte für c und $c/(2r/D_W - 1)$	20
Tabelle 3 — Beispiele für Werte von $\cot \alpha'$ für Schräg-Kugellager	20
Tabelle 4 — Werte für F_r/P_{0r} und $F_a \cot \alpha'/P_{0r}$ in Abhängigkeit von $F_r \tan \alpha'/F_a$ für Radial-Rillenkugellager	21
Tabelle 5 — Beispiel für Berührungswinkel-Werte von Radial-Rillenkugellagern	21
Tabelle 6 — Werte für F_r/P_{0r} und $F_a \cot \alpha/P_{0r}$ in Abhängigkeit von $F_r \tan \alpha/F_a$ für zweireihige Radiallager	23
Tabelle 7 — Werte für F_a/P_{0a} und $F_r \tan \alpha/P_{0a}$ in Abhängigkeit von $F_r \tan \alpha/F_a$ für einseitig wirkende Axiallager	28
Tabelle 8 — Werte für F_a/P_{0r} und $F_r \tan \alpha/P_{0a}$ in Abhängigkeit von $F_r \tan \alpha/F_a$ für zweiseitig wirkende Axiallager	29
Tabelle 9 — Näherungsgleichungen für theoretische statische äquivalente radiale Belastungen von einreihigen Radiallagern (Teillinien AB und BC in Bild 1)	30
Tabelle 10 — Näherungsgleichungen für theoretische statische äquivalente radiale Belastungen von zweireihigen Radiallagern (Linie AC in Bild 3)	30
Tabelle 11 — Näherungsgleichungen für theoretische statische äquivalente radiale Belastungen von Radial-Rillenkugellagern (Teillinien AB und BC in Bild 2)	31
Tabelle 12 — Näherungsgleichung für theoretische statische äquivalente axiale Belastungen von einseitig wirkenden Axiallagern (Teillinie BC in Bild 4)	31
Tabelle 13 — Näherungsgleichung für theoretische statische äquivalente axiale Belastungen von zweiseitig wirkenden Axiallagern (Teillinie AC in Bild 5)	31
Tabelle 14 — Werte für den Faktor Y_0 von Radial-Rillenkugellagern	37
Tabelle 15 — Y_0-Werte für Schrägkugellager	38
Tabelle 16 — X_0- und Y_0-Werte für einreihige Schrägkugellager	39
Tabelle 17 — Vergleich der Werte für α' aus der Näherungsgleichung (67) und der Gleichung (42)	39
Tabelle 18 — Werte für X_0- und Y_0-Faktoren von einreihigen Schrägkugellagern	39
Tabelle 19 — Y_0-Werte für Radiallager mit konstantem Berührungswinkel	40
Tabelle A.1 — Radial- und Schrägkugellager mit $f_i = 0,52$ und $f_e = 0,53$	42
Tabelle A.2 — Axial-Kugellager mit $f = 0,54$	43

Nationales Vorwort

Dieses Dokument enthält die deutsche Übersetzung des internationalen Dokuments ISO/TR 10657:2021, die vom Technischen Komitee ISO/TC 4 „Rolling bearings“ erarbeitet wurde, dessen Sekretariat von SIS (Schweden) gehalten wird.

Das zuständige deutsche Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 118-01-08 AA „Tragzahlen und Lebensdauer“ im DIN-Normenausschuss Wälz- und Gleitlager (NAWGL).

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. DIN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Dieses Dokument enthält Informationen zu DIN ISO 76:2019, jedoch keine zusätzlichen genormten Festlegungen.

Das vorliegende Dokument entspricht dem Internationalen Technischen Report ISO/TR 10657:2021. Es gibt die Hintergrundinformationen hinsichtlich der Herleitung von Gleichungen und Faktoren und erklärt die Berechnungsverfahren der statischen Tragzahlen nach ISO 76:2006.

Technische Reporte sind nicht Bestandteil des Deutschen Normenwerks.

Erfahrungen mit diesem Technischen Report sind erbeten:

- vorzugsweise als Datei per E-Mail an nawgl@din.de in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Wälz- und Gleitlager (NAWGL), 10772 Berlin (Hausanschrift: Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin).

Für das in diesem Dokument zitierte Dokument wird im Folgenden auf das entsprechende deutsche Dokument hingewiesen:

ISO 76:2006 siehe DIN ISO 76:2019-04

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Änderungen

Gegenüber DIN ISO 76 Beiblatt 1:1994-09 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) neue Unterabschnitte 0.4 und 0.5 mit Erläuterungen zur Ausgabe 2006 von ISO 76:2006 und ISO 76:2006/Amd.1:2017 aufgenommen;
- b) Symbolliste in Abschnitt 3 aufgenommen;
- c) Aufnahme von zusätzlichen Werten aus ISO 76:2006 (Werte von X_0 und Y_0 bei Berührungswinkeln von 5° und 10° von Schrägkugellagern) in Tabelle 16 und Tabelle 18.

Frühere Ausgaben

DIN ISO 76 Beiblatt 1: 1994-09

Nationaler Anhang NA
(informativ)

Literaturhinweise

DIN ISO 76:2019-04, *Wälzlager — Statische Tragzahlen (ISO 76:2006 + Amd.1:2017)*

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung nationaler Normungsinstitute (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird üblicherweise von Technischen Komitees von ISO durchgeführt. Jede Mitgliedsorganisation, die Interesse an einem Thema hat, für welches ein Technisches Komitee gegründet wurde, hat das Recht, in diesem Komitee vertreten zu sein. Internationale staatliche und nichtstaatliche Organisationen, die in engem Kontakt mit ISO stehen, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet bei allen elektrotechnischen Normungsthemen eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) zusammen.

Die Verfahren, die bei der Entwicklung dieses Dokuments angewendet wurden und die für die weitere Pflege vorgesehen sind, werden in den ISO/IEC Directives, Teil 1, beschrieben. Es sollten insbesondere die unterschiedlichen Annahmekriterien für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten beachtet werden. Dieses Dokument wurde in Übereinstimmung mit den Gestaltungsregeln der ISO/IEC Directives, Teil 2, erarbeitet (siehe www.iso.org/directives).

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren. Details zu allen während der Entwicklung des Dokuments identifizierten Patentrechten finden sich in der Einleitung und/oder in der ISO-Liste der erhaltenen Patenterklärungen (siehe www.iso.org/patents).

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname dient nur zur Unterrichtung der Anwender und bedeutet keine Anerkennung.

Für eine Erläuterung des freiwilligen Charakters von Normen, der Bedeutung ISO-spezifischer Begriffe und Ausdrücke in Bezug auf Konformitätsbewertungen sowie Informationen darüber, wie ISO die Grundsätze der Welthandelsorganisation (WTO, en: World Trade Organization) hinsichtlich technischer Handelshemmnisse (TBT, en: Technical Barriers to Trade) berücksichtigt, siehe www.iso.org/iso/foreword.html.

Dieses Dokument wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 4, *Rolling bearings*, Unterkomitee SC 8, *Load ratings and life*, erarbeitet.

Diese zweite Ausgabe ersetzt die erste Ausgabe (ISO 10657:1991), die technisch überarbeitet wurde.

Die wesentlichen Änderungen im Vergleich zur Vorgängerausgabe sind folgende:

- neue Unterabschnitte 0.4 und 0.5 mit Erläuterungen zur Ausgabe 2006 von ISO 76:2006 und ISO 76/Amd.1:2017 aufgenommen;
- Symbolliste in Abschnitt 3 aufgenommen;
- Aufnahme von zusätzlichen Werten aus ISO 76:2006 (Werte von X_0 und Y_0 bei Berührungswinkeln von 5° und 10° von Schrägkugellagern) in Tabelle 16 und Tabelle 18.

Rückmeldungen oder Fragen zu diesem Dokument sollten an das jeweilige nationale Normungsinstitut des Anwenders gerichtet werden. Eine vollständige Auflistung dieser Institute ist unter www.iso.org/members.html zu finden.

Einleitung

0.1 ISO/R 76:1958

Die ISO-Empfehlung R 76, *Ball and Roller Bearings — Methods of Evaluating Static Load Ratings*, wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 4, *Ball and Roller Bearings*, erarbeitet.

ISO/R 76 basierte auf den Studien von A. Palmgren et al. [2] [3]. Die statische Tragzahl wurden so definiert, dass sie einer bleibenden Gesamtverformung von Wälzkörper und Laufbahn am höchstbelasteten Wälzkörper/Laufbahn Kontakt von 0,000 1 des Wälzkörperdurchmessers entsprechen. Anschließend wurden die Normwerte der statischen Tragzahlen abhängig von der Innenkonstruktion der Wälzlager festgelegt.

ISO/R 76:1958 wurde von 28 (von insgesamt 38) Mitgliedsorganisationen genehmigt und dann dem ISO Council vorgelegt, der im Dezember 1958 beschloss, sie als ISO-Empfehlung anzunehmen.

0.2 ISO 76:1978

ISO/TC 4 beschloss, die Überarbeitung von ISO/R 76 in sein Arbeitsprogramm aufzunehmen und das ISO/TC 4/SC 8-Sekretariat wurde beauftragt einen Entwurf auszuarbeiten. Als Ergebnis legte das Sekretariat einen Entwurf [3] im Januar 1976 vor.

Der Entwurf wurde von 6 der 8 Mitglieder des ISO/TC 4/SC 8 angenommen. Von den beiden anderen Mitgliedern schlug Japan eine weitere Studie vor, während USA einen Gegenvorschlag [4] unterbreitete (Dokument ISO/TC 4/SC 8 N 64). Der Entwurf wurde dann dem ISO-Zentralsekretariat vorgelegt. Nach der Zustimmung des Entwurfes durch die ISO-Mitgliedsländer wurde der Entwurf vom ISO Council im Juni 1978 als Internationale Norm angenommen.

ISO 76:1978 übernahm die SI-Einheit Newton und wurde überarbeitet, aber ohne wesentliche Änderung des Inhaltes. Allerdings wurden X_0 - und Y_0 -Werte für Nenn-Berührungswinkel von 15° und 45° für Schrägkugellager in die Tabelle zur Berechnung der statischen äquivalenten Radialbelastung für Radial-Kugellager aufgenommen (siehe ISO 76:1978, Tabelle 2).

0.3 ISO 76:1987

Während der Überarbeitung der ISO/R 76:1958 hatte USA im Jahre 1975 einen Gegenvorschlag [4] für die statische Tragzahl, beruhend auf der berechneten Berührungsspannung, unterbreitet.

Das Sekretariat beantragte eine Abstimmung über die Überarbeitung einer auf der HERTZschen Flächenpressung beruhenden statischen Tragzahl im Januar 1978. Im Juni 1978 wurde das Abstimmungsergebnis bekanntgegeben. Die Überarbeitung wurde als Referenznummer 157 in das Arbeitsprogramm des TC 4 übernommen.

Unter Berücksichtigung der Vorschläge aus den Dokumenten TC 4/SC 8 N 75 [5] und TC 4 N 865 [6], sowie der Kommentare von TC 4-Mitgliedern und das Ausdrücken mehrerer SC 8-Mitglieder einer Notwendigkeit zur Aktualisierung von ISO 76, beschloss das ISO/TC 4/SC 8 die Fortsetzung seiner Studien über die Möglichkeit, entweder die bleibende Verformung oder die Spannungshöhe als Basis für statische Tragzahlen zu verwenden. ISO/TC 4/SC 8 ersuchte sein Sekretariat, einen neuen Vorschlag zu erstellen. Im neuen Vorschlag sollten die Grundsätze und Gleichungen des Dokumentes TC 4/SC 8 N 75 berücksichtigt werden und die Größe der Hertzchen Flächenpressung für verschiedene Wälzkörperkontakte in Beziehung zu einer bleibenden Verformung von 0,000 1-fachen des Wälzkörperdurchmessers im Zentrum der höchstbelasteten Berührungsstelle Wälzkörper/Laufbahn gesetzt werden. Für Rollenlager wurde einer Flächenpressung von 4 000 MPa vereinbart und dann beschloss ISO/TC 4/SC 8 durch Mehrheitsbeschluss, dass die statischen Tragzahlen den folgenden berechneten Flächenpressung entsprechen sollten

- 4 000 MPa für Rollenlager,
- 4 600 MPa für Pendelkugellager und

— 4 200 MPa für alle anderen Kugellager, auf die die Norm anwendbar ist.

Für diese rechnerischen Flächenpressungen ergibt sich eine bleibende Verformung im Zentrum der höchstbelasteten Berührungsstelle Wälzkörper/Laufbahn, deren Größe annähernd dem 0,000 1-Fachen des Wälzkörperdurchmessers entspricht.

ISO 76 wurde dem ISO-Zentralsekretariat im Jahre 1985 vorgelegt, und nach der Zustimmung der ISO-Mitglieder entschied sich das ISO Council im Februar 1987 für eine Internationale Norm.

Ferner beschloss ISO/TC 4/SC 8, dass ergänzende Hintergrundinformationen bezüglich der Ableitung von Gleichungen und Faktoren, die in ISO 76 angegeben sind, als Technischer Report veröffentlicht werden sollten. Dieser Technische Report wurde als ISO/TR 10657:1991 veröffentlicht.

Eine Änderung zu ISO 76:1987, die die Unstetigkeit in den Tragzahlen zwischen Radial- und Axiallagern erklärt, wurde als ISO 76:1987/Amd.1:1999 veröffentlicht.

0.4 ISO 76:2006

Eine systematische Überprüfung von ISO 76:1987 wurde 2003 vereinbart, basierend auf dem zuvor durchgeführten Abstimmungsprozess und den Dokumenten TC 4/SC 8 N 233 und N 235.

ISO 76:2006 enthält redaktionelle Anpassungen und Aktualisierungen sowie eine Erweiterung um den statischen Sicherheitsfaktor S_0 . Weiterhin wurde die ISO 76:1987/Amd.1:1999 integriert und zum informativen Anhang A „Unstetigkeit bei der Berechnung statischer Tragzahlen“.

0.5 ISO 76:2006/Amd.1:2017

ISO 76:2006/Amd.1:2017 umfasst die folgenden Punkte:

- Diagramme für die Faktoren f_0 , X_0 und Y_0 aus dem Entwurf ÖNORM M 6320 zur Aufnahme in einen informativen Anhang;
- Gleichungen zur Berechnung des Faktors der statischen Tragzahl f_0 aus ISO/TR 10657 sollen in den normativen Teil der Norm aufgenommen werden;
- die Tabellen für den Faktor zur Berechnung der statischen Tragzahl f_0 bleiben im normativen Teil der Norm, es wird jedoch ein Satz eingefügt, dass die aus Gleichungen berechneten Ergebnisse bevorzugt werden.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument gibt ergänzende Hintergrundinformationen bezüglich der Herleitung von Gleichungen und Faktoren, die in ISO 76:2006 angegeben sind.

2 Normative Verweisungen

Es gibt keine normativen Verweisungen in diesem Dokument.

3 Begriffe und Symbole

3.1 Begriffe

In diesem Dokument werden keine Begriffe aufgeführt.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <https://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: verfügbar unter <https://www.electropedia.org/>

3.2 Symbole

C_{0a}	statische axiale Tragzahl für Axial-Kugel- oder Rollenlager, in Newton
C_{0r}	statische radiale Tragzahl für Radial-Kugel- oder Rollenlager, in Newton
D_{pw}	Teilkreisdurchmesser des Wälzkörpersatzes, in Millimeter
D_w	Durchmesser des Wälzkörpers, in Millimeter
D_{we}	der in die Tragzahlberechnung einzusetzende Rollendurchmesser, in Millimeter
E	Elastizitätsmodul, in Megapascal
E_1, E_2	Elastizitätsmodul von Körper 1 (Wälzkörper) und Körper 2 (Laufbahn), in Megapascal
$E(\kappa)$	vollständiges elliptisches Integral der 2. Art
E_0	$E / (1 - \nu^2)$
F_a	axiale Lagerbelastung bzw. axiale Komponente der tatsächlichen Lagerbelastung, in Newton
F_r	radiale Lagerbelastung bzw. radiale Komponente der tatsächlichen Lagerbelastung, in Newton
$F(\rho)$	Krümmungsdifferenz (HERTZscher Hilfswert $\cos$)
$J_a(\varepsilon)$	Axiallast-Integral
$J_r(\varepsilon)$	Radiallast-Integral
$K(\kappa)$	vollständiges elliptisches Integral der 1. Art
L_{we}	die in die Tragzahlberechnung einzusetzende Rollenlänge, in Millimeter
P_{0a}	theoretische statische äquivalente axiale Belastung, kurz: statische äquivalente axiale Belastung, in Newton
P_{0r}	theoretische statische äquivalente radiale Belastung, kurz: statische äquivalente radiale Belastung, in Newton
Q	Normalkraft zwischen Wälzkörper und Laufbahn, in Newton
$Q_{\max}$	größte Normalkraft zwischen Wälzkörper und Laufbahn, in Newton
S	Stribeck-Zahl

X_0	statischer Radialfaktor		
Y_0	statischer Axialfaktor		
Z	Anzahl der Wälzkörper in einem einreihigen Lager bzw. Anzahl der Wälzkörper je Wälzkörperreihe in einem mehrreihigen Lager mit gleicher Anzahl von Wälzkörpern je Reihe		
a	große Halbachse der projizierten Berührungsellipse, Halblänge der Berührungsfläche		
b	kleine Halbachse der projizierten Berührungsellipse, Halbbreite der Berührungsfläche		
c	Druckkonstante, in $1/\text{Megapascal}^{2/3}$		
f	Schmiegung r/D_w		
f_e	Schmiegung am Aussenring r_e/D_w		
f_i	Schmiegung am Innenring r_i/D_w		
f_0	Faktor, der von der Geometrie und der zulässigen spezifischen Beanspruchung der Lagerteile abhängt		
i	Anzahl der Wälzkörperreihen im Lager		
k_0	Beiwert im Minderungsfaktor		
r	Rillenradius der Gehäusescheibe, in Millimeter		
r_e	Rillenradius des Außenringes, in Millimeter		
r_i	Rillenradius des Innenringes, in Millimeter		
t	Exponent für die Belastung in Funktion der Einfederung		
x	Abstand in Richtung der großen Halbachse, in Millimeter		
y	Abstand in Richtung der kleinen Halbachse, in Millimeter		
α	Nenn-Berührungswinkel, in Grad		
α'	tatsächlicher Berührungswinkel, in Grad		
γ	Hilfsparameter	$\gamma = D_w \cos \alpha / D_{pw}$	für Kugellager mit $\alpha \neq 90^\circ$
		$\gamma = D_w / D_{pw}$	für Kugellager mit $\alpha = 90^\circ$
		$\gamma = D_{we} \cos \alpha / D_{pw}$	für Rollenlager mit $\alpha \neq 90^\circ$
		$\gamma = D_{we} / D_{pw}$	für Rollenlager mit $\alpha = 90^\circ$
ε	Lastzonenparameter, der den Bereich der Lastzone im Lager angibt		
κ	Verhältnis der großen Halbachse zur kleinen Halbachse a/b		
ν	Poissonsche Zahl		
ν_1	Poissonsche Zahl von Körper 1 (Wälzkörper)		
ν_2	Poissonsche Zahl von Körper 2 (Laufbahn)		
$\sum \rho$	Krümmungssumme		
ρ_{11}, ρ_{12}	Hauptkrümmungen des Körpers 1 im Berührungspunkt (Wälzkörper)		
ρ_{21}, ρ_{22}	Hauptkrümmungen des Körpers 2 im Berührungspunkt (Laufbahn)		
σ	berechnete Berührungsspannung, in Megapascal		
$\sigma_{\max}$	größte berechnete Berührungsspannung, in Megapascal		
ϕ	Hilfswinkel, in Radiant		
ψ_0	Hälfte des belasteten Bogens		

4 Statische Tragzahlen

4.1 Allgemeines

4.1.1 Grundgleichung für Punktberührung

Die Beziehung zwischen einer berechneten Berührungsspannung innerhalb einer elliptischen Berührungsfläche und einer Wälzkörperbelastung ist in Referenz [8] als Gleichung (1) angegeben.

$$\sigma = \frac{3Q}{2\pi ab} \left[1 - \left(\frac{x}{a} \right)^2 - \left(\frac{y}{b} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Daraus folgt, dass die größte berechnete Berührungsspannung ($\sigma_{\max}$) am Punkt $x = 0$ und $y = 0$ auftritt:

$$\sigma_{\max} = \frac{3Q}{2\pi ab} \text{ oder } Q = \frac{2\pi ab}{3} \sigma_{\max} \quad (2)$$

Nach der HERTZschen Theorie ist

$$a = \left(\frac{2\kappa^2 E(\kappa)}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \left[\frac{3Q}{2\sum \rho} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

$$b = \left(\frac{2E(\kappa)}{\pi \kappa} \right)^{\frac{1}{3}} \left[\frac{3Q}{2\sum \rho} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

Dabei ist

$$\kappa = \frac{a}{b}$$

$$E(\kappa) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[1 - \left(1 - \frac{1}{\kappa^2} \right) \sin^2 \phi \right]^{\frac{1}{2}} d\phi$$

$$\sum \rho = \rho_{11} + \rho_{12} + \rho_{21} + \rho_{22}$$

$$\rho_{11} = \rho_{12} = \frac{2}{D_w}$$

Durch Einsetzen der Gleichung (3) und Gleichung (4) in die Gleichung (2) und für den Fall, dass $E_1 = E_2 = E$ und $\nu_1 = \nu_2 = \nu$ ist, erhält man

$$Q = \sigma_{\max}^3 \frac{32\pi}{3E_0^2} \kappa \left(\frac{E(\kappa)}{\sum \rho} \right)^2 \quad (5)$$

und

$$1 - \frac{2}{\kappa^2 - 1} \left(\frac{K(\kappa)}{E(\kappa)} - 1 \right) - F(\rho) = 0 \quad (6)$$

Dabei ist

$$E_0 = \frac{E}{1-\nu^2}$$

$$E = 2,07 \cdot 10^5 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0,3$$

$$K(\kappa) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[1 - \left(1 - \frac{1}{\kappa^2} \right) \sin^2 \phi \right]^{-\frac{1}{2}} d\phi$$

$$F(\rho) = \frac{\rho_{11} - \rho_{12} + \rho_{21} - \rho_{22}}{\rho_{11} + \rho_{12} + \rho_{21} + \rho_{22}}$$

Folglich gilt aus Gleichung (5)

$$Q = 6,476\,206\,5 \cdot 10^{-10} \kappa \left(\frac{E(\kappa)}{\sum \rho} \right)^2 \sigma_{\max}^3 \quad (7)$$

4.1.2 Grundgleichung für Linienberührung

Die Beziehung zwischen einer berechneten Berührungsspannung und der Wälzkörperbelastung ist für Linienberührung nach [9] wie folgt gegeben:

$$\sigma = \frac{2Q}{\pi L_{\text{we}} b} \left[1 - \left(\frac{y}{b} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Daraus folgt, dass die größte berechnete Berührungsspannung ($\sigma_{\max}$) aus Gleichung (8) an der Linie für $y = 0$ auftritt

$$\sigma_{\max} = \frac{2Q}{\pi L_{\text{we}} b} \text{ oder } Q = \frac{\pi L_{\text{we}} b}{2} \sigma_{\max} \quad (9)$$

Weiterhin gilt für b die folgende Gleichung:

$$b = \left[\frac{4Q}{\pi L_{\text{we}} \sum \rho} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

Dabei ist

$$\sum \rho = \rho_{11} + \rho_{12} + \rho_{21} + \rho_{22}$$

$$\rho_{11} = \frac{2}{D_{\text{we}}}$$

$$\rho_{21} = \pm \frac{2}{D_{\text{we}}} \cdot \frac{\gamma}{1 \mp \gamma}; \text{ das obere Vorzeichen gilt für Innenringkontakt und das untere für Außenringkontakt.}$$

$$\rho_{12} = 0$$

$$\rho_{22} = 0$$

$$\gamma = \frac{D_{\text{we}} \cos \alpha}{D_{\text{pw}}}$$

Durch Einsetzen der Gleichung (10) in die Gleichung (9) und für den Fall, dass $E_1 = E_2 = E$ und $\nu_1 = \nu_2 = \nu$ ist, erhält man

$$Q = 2\pi \sigma_{\max}^2 \frac{L_{\text{we}}}{E_0 \sum \rho}$$

Dabei ist

$$E_0 = \frac{E}{1-\nu^2}$$

$$E = 2,07 \cdot 10^5 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0,3$$

Folglich ergibt sich

$$Q = 2,762\,173\,2 \cdot 10^{-5} \frac{L_{we}}{\sum \rho} \sigma_{\max}^2 \quad (11)$$

4.2 Statische radiale Tragzahl C_{0r} für Radial-Kugellager

4.2.1 Radial-Rillenkugellager und Schrägkugellager

Die Krümmungssumme $\sum \rho$ und Krümmungsdifferenz $F(\rho)$ für Radial-Rillenkugellager und Schrägkugellager sind durch folgende Gleichungen gegeben,

$$\sum \rho = \frac{2}{D_w} \left(2 \pm \frac{\gamma}{1 \mp \gamma} - \frac{1}{2f_{i(e)}} \right) \quad (12)$$

$$F(\rho) = \frac{\pm \frac{\gamma}{1 \mp \gamma} + \frac{1}{2f_{i(e)}}}{2 \pm \frac{\gamma}{1 \mp \gamma} - \frac{1}{2f_{i(e)}}} \quad (13)$$

wobei

das obere Vorzeichen gilt für Innenringkontakt und das untere für Außenringkontakt

$$\gamma = \frac{D_w \cos \alpha}{D_{pw}}$$

$f_{i(e)}$ bezeichnet

$$f_i = \frac{r_i}{D_w} \text{ für Innenringkontakt; und}$$

$$f_e = \frac{r_e}{D_w} \text{ für Außenringkontakt.}$$

Wird Gleichung (12) in die Gleichung (7) eingesetzt, so ist

$$Q = 6,476\,206\,5 \cdot 10^{-10} \kappa \left(\frac{D_w}{2} \cdot \frac{E(\kappa)}{2 \pm \frac{\gamma}{1 \mp \gamma} - \frac{1}{2f_{i(e)}}} \right)^2 \sigma_{\max}^3 \quad (14)$$

Durch Einsetzen der Gleichung (12) und Gleichung (14) in die folgende Gleichung (15) (siehe Referenz [10]) und darüber hinaus Ersetzen von Q durch $Q_{\max}$ ergibt sich

$$C_{0r} = \frac{1}{S} Z Q_{\max} \cos \alpha \quad (15)$$

wobei S eine Funktion des Lastzonenparameters ε ist. Wenn die Hälfte der Kugeln belastet ist, gilt $S = 4,37$. Ein üblicher Wert in normalen Lagerberechnungen ist $S = 5$, was zu einer überschlägigen Abschätzung der größten Kugelbelastung führt

$$C_{0r} = 0,2 \cdot ZQ_{\max} \cos \alpha \quad (16)$$

Daraus folgt

$$C_{0r} = 0,2 \cdot 6,476\,206\,5 \cdot 10^{-10} \cdot (4\,000)^3 \left(\frac{\sigma_{\max}}{4\,000} \right)^3 \kappa \cdot \frac{1}{4} \left(\frac{E(\kappa)}{2 \pm \frac{\gamma}{1 \mp \gamma} - \frac{1}{2f_{i(e)}}} \right)^2 ZD_w^2 \cos \alpha$$

worin das obere Vorzeichen sich auf den Innenring und das untere Vorzeichen sich auf den Außenring bezieht. Mit der Einführung der Anzahl i der Kugelreihen lautet die Gleichung (17):

$$C_{0r} = f_0 i ZD_w^2 \cos \alpha \quad (17)$$

wobei der Faktor f_0 von der Geometrie und der zulässigen spezifischen Beanspruchung der Lagerteile abhängt

$$f_0 = 2,072 \left(\frac{\sigma_{\max}}{4\,000} \right)^3 \kappa \left(\frac{E(\kappa)}{2 \pm \frac{\gamma}{1 \mp \gamma} - \frac{1}{2f_{i(e)}}} \right)^2 \quad (18)$$

Für einen Innenring mit $f_i = 0,52$ wird die Gleichung (18) zu

$$f_0 = 2,072 \cdot \left(\frac{\sigma_{\max}}{4\,000} \right)^3 \kappa \left(\frac{E(\kappa)}{2 + \frac{\gamma}{1 - \gamma} - \frac{1}{1,04}} \right)^2 \quad (19)$$

und für einen Außenring mit $f_e = 0,53$

$$f_0 = 2,072 \cdot \left(\frac{\sigma_{\max}}{4\,000} \right)^3 \kappa \left(\frac{E(\kappa)}{2 - \frac{\gamma}{1 + \gamma} - \frac{1}{1,06}} \right)^2 \quad (20)$$

Es wird der kleinere f_0 -Wert aus Gleichung (19) bzw. Gleichung (20) für die Berechnung der statischen Tragzahl verwendet.

Die f_0 -Werte in ISO 76:2006, Tabelle 1, sind durch Einsetzen der Werte für κ , $E(\kappa)$ und $\gamma = D_w \cos \alpha / D_{pw}$ aus der Tabelle A.1, und $\sigma_{\max} = 4\,200$ MPa in die vorstehenden Gleichungen berechnet worden.

Diese Werte gelten für Lager mit einem Rillenradius nicht größer als $0,52 \cdot D_w$ an Innenringen von Radial- und Schrägkugellagern und $0,53 \cdot D_w$ in Außenringen von Radial- und Schrägkugellagern sowie Innenringen von Pendelkugellagern.

Die Tragfähigkeit eines Lagers erhöht sich nicht zwangsläufig durch Verkleinerung des Rillenradius, sie verringert sich jedoch durch Vergrößerung desselben. Im letzteren Fall ist eine Verringerung des f_0 -Wertes vorzunehmen.

4.2.2 Pendelkugellager

Die Krümmungssumme $\sum \rho$ von Pendelkugellagern ist durch folgende Gleichung für den Außenring gegeben

$$\sum \rho = \frac{4}{D_w} \left(\frac{1}{1 + \gamma} \right) \quad (21)$$