

DIN ISO/TR 1281-1

ICS 21.100.20

Ersatz für
DIN SPEC 1281-1
(DIN-Fachbericht ISO/TR
1281-1):2010-05

**Wälzlager –
Erläuternde Anmerkungen zur ISO 281 –
Teil 1: Dynamische Tragzahlen und nominelle Lebensdauer
(ISO/TR 1281-1:2021)**

Rolling bearings –
Explanatory notes on ISO 281 –
Part 1: Basic dynamic load rating and basic rating life (ISO/TR 1281-1:2021)

Roulements –
Notes explicatives sur l'ISO 281 –
Partie 1: Charges dynamiques de base et durée nominale de base (ISO/TR 1281-1:2021)

Gesamtumfang 49 Seiten

DIN-Normenausschuss Wälz- und Gleitlager (NAWGL)

Inhalt

	Seite
Nationales Vorwort	4
Nationaler Anhang NA (informativ) Literaturhinweise	5
Vorwort	6
Einleitung	7
1 Anwendungsbereich	9
2 Normative Verweisungen	9
3 Begriffe	9
4 Symbole und Abkürzungen	9
5 Allgemeines	11
6 Dynamische Tragzahl	11
6.1 Allgemeines	11
6.2 Dynamische radiale Tragzahl C_R für Radial-Kugellager	12
6.3 Dynamische axiale Tragzahl C_a für einreihige Axial-Kugellager	15
6.3.1 Axial-Kugellager mit einem Berührungswinkel $\alpha \neq 90^\circ$	15
6.3.2 Axial-Kugellager mit einem Berührungswinkel von $\alpha = 90^\circ$	16
6.4 Dynamische axiale Tragzahl C_a für zwei- oder mehrreihige Axial-Kugellager	17
6.5 Dynamische radiale Tragzahl C_R für Radial-Rollenlager	18
6.6 Dynamische axiale Tragzahl C_a für einreihige Axial-Rollenlager	19
6.6.1 Axial-Rollenlager mit einem Berührungswinkel $\alpha \neq 90^\circ$	19
6.6.2 Axial-Rollenlager mit einem Berührungswinkel $\alpha = 90^\circ$	20
6.7 Dynamische axiale Tragzahl C_a für zwei- oder mehrreihige Axial-Rollenlager	20
7 Dynamisch äquivalente Belastung	22
7.1 Gleichungen für die dynamisch äquivalente Belastung	22
7.1.1 Theoretische dynamisch äquivalente Radialbelastung P_R für einreihige Radiallager	22
7.1.2 Theoretische dynamisch äquivalente Radialbelastung P_R für zweireihige Radiallager	26
7.1.3 Theoretische dynamisch äquivalente Radialbelastung P_R für Radial-Schräggugellager	28
7.1.4 Vereinfachte Gleichungen für die dynamisch äquivalente Belastung P_R für Radiallager mit konstantem Berührungswinkel	29
7.1.5 Angewandte Gleichungen für die dynamisch äquivalente Radialbelastung P_R für Radial-Kugellager	32
7.1.6 Angewandte Gleichungen für die dynamisch äquivalente Axialbelastung P_a für Axiallager	33
7.2 Faktoren X , Y , und e	35
7.2.1 Radial-Kugellager	35
7.2.2 Werte für X , Y , und e für alle Arten von Radial-Kugellagern	36
7.2.3 Zusammengefasste tabellarische Darstellung der Faktoren X , Y und e für Radial-Kugellager	42
7.2.4 Berechnete Werte Y und e , abweichend von der Norm	44
7.2.5 Axial-Kugellager	44
7.2.6 Radial-Rollenlager	45
7.2.7 Axial-Rollenlager	46
8 Nominelle Lebensdauer	47
Literaturhinweise	49

Bilder

Bild 1 — Dynamisch äquivalente Radialbelastung P_R für einreihige Radiallager mit konstantem Berührungswinkel α	26
Bild 2 — Dynamisch äquivalente Radialbelastung P_{RI} für zweireihige Radiallager mit konstantem Berührungswinkel α	28

Bild 3 — Dynamisch äquivalente Radialbelastung P_r für Radial-Schräggugellager	29
Bild 4 — Dynamisch äquivalente Radialbelastung P_{rI} für Radiallager mit konstantem Berührungswinkel α	30
Bild 5 — Dynamisch äquivalente Radialbelastung P_r für Radial-Schräggugellager	33
Bild 6 — Angepasste Y_1-Werte für Radial-Rillenkugellager und Schräggugellager	38

Tabellen

Tabelle 1 — Rillenradien und Minderungsfaktoren für Kugellager	21
Tabelle 2 — Minderungsfaktoren für Rollenlager	22
Tabelle 3 — Werte für $J_r(0,5)$, $J_a(0,5)$, $J_1(0,5)$, $J_2(0,5)$ und w	24
Tabelle 4 — Gleichung für die dynamisch äquivalente Belastung P_r und die Lastfaktoren X und Y von Radiallagern mit konstantem Berührungswinkel α	31
Tabelle 5 — Gleichungen für die dynamisch äquivalente Axialbelastung P_a und die Faktoren X_a und Y_a von Axiallagern	34
Tabelle 6 — Werte für den Berührungswinkel α' für Radial-Rillenkugellager und Schräggugellager ($\alpha = 5^\circ$, $\alpha = 10^\circ$ und $\alpha = 15^\circ$)	36
Tabelle 7 — Werte von X_1 für Schräggugellager mit $\alpha = 20^\circ$ bis $\alpha = 45^\circ$	40
Tabelle 8 — Werte von Y_1	40
Tabelle 9 — Werte von α'	41
Tabelle 10 — Zusammengefasste tabellarische Darstellung der Gleichungen für die Faktoren X, Y und e für Radial-Kugellager	43
Tabelle 11 — Berechnete Werte Y und e abweichend von ISO 281:2007, Tabelle 2 ($\alpha \leq 15^\circ$)	44
Tabelle 12 — Grundgleichungen für die Faktoren X, Y und e	44
Tabelle 13 — Berechnete Werte von X, Y und e für verschiedene Fälle des Berührungskontaktes a) Punktkontakt, b) Linienkontakt und c) Linien- und Punktkontakt für Lager	46

Nationales Vorwort

Dieses Dokument enthält die deutsche Übersetzung des Internationalen Dokuments ISO/TR 1281-1:2021, die vom Technischen Komitee ISO/TC 4 „Rolling bearings“, Subkomitee SC 8 „Load ratings and life“ erarbeitet wurde, dessen Sekretariat von DIN (Deutschland) gehalten wird.

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

Technische Reports 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 <http://www.din.de/de/mitwirken/entwuerfe> abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Wälz- und Gleitlager (NAWGL), 10772 Berlin (Hausanschrift: Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin).

Für die in diesem Dokument zitierten Dokumente wird im Folgenden auf die entsprechenden deutschen Dokumente hingewiesen:

ISO 281:2007	siehe	DIN ISO 281:2010-10
ISO/TR 8646:1985	siehe	DIN ISO 281 Beiblatt 2:1994-09

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 SPEC 1281-1 (DIN-Fachbericht ISO/TR 1281-1):2010-05 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Abschnitt 7 wurde entfernt;
- b) Herleitung der früheren Gleichung (29) und Gleichung (46) [Gleichung (28) und Gleichung (45) in dieser Ausgabe] wurde korrigiert;
- c) Tippfehler wurden in Gleichung (30) und Gleichung (31) sowie in der Ableitung des Faktors Y_3 korrigiert;
- d) Dokument wurde redaktionell überarbeitet.

Frühere Ausgaben

DIN ISO 281 Beiblatt 2: 1994-09
DIN SPEC 1281-1 (DIN-Fachbericht ISO/TR 1281-1): 2010-05

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN ISO 281:2010-10, *Wälzlager — Dynamische Tragzahlen und nominelle Lebensdauer (ISO 281:2007)*

DIN ISO 281 Beiblatt 2:1994-09, *Wälzlager — Dynamische Tragzahlen und nominelle Lebensdauer — Erklärungen zu ISO 281/1:1977; Identisch mit ISO/TR 8646:1985*

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-Direktiven, 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-Direktiven, 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*, erstellt.

Diese zweite Ausgabe annulliert und ersetzt die Technische Berichtigung 1 (ISO/TR 1281-1:2008/Cor 1:2009) und die erste Ausgabe (ISO/TR 1281-1:2008), die technisch überarbeitet wurde.

Die wichtigsten Änderungen gegenüber der vorherigen Ausgabe sind wie folgt:

- Der alte Abschnitt 7 „Life Adjustment Factor for Reliability“ von ISO/TR 1281-1:2008 wurde gestrichen, dieses Thema wird in ISO/TR 1281-2 behandelt (siehe ISO/TR 1281-1:2008/Cor 1: 2009).
- Die Herleitung der alten Gleichung (29) und Gleichung (46) [Gleichung (28) und Gleichung (45) in dieser Ausgabe] wurde korrigiert.
- Tippfehler wurden in Gleichung (30) und Gleichung (31) sowie bei der Ableitung des Faktors Y_3 korrigiert.

Eine Liste aller Teile der ISO/TR 1281-Reihe finden Sie auf der ISO-Website.

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

ISO/R 281:1962

Eine erste Diskussion auf Internationaler Ebene über die Frage der Normung des Berechnungsverfahrens für die Tragzahlen von Wälzlagern fand im Jahr 1934 auf der Konferenz der „International Federation of the National Standardizing Associations“ (ISA) statt. Als ISA ihre letzte Konferenz 1939 abhielt, war noch kein Fortschritt erzielt worden. Im Bericht des Jahres 1945 über den Stand der Wälzlagnormung schloss das Sekretariat von ISA 4 jedoch Vorschläge für die Festlegung von Konzepten ein, die grundlegend für die Normung der Tragzahl und Lebensdauerberechnung waren. Die darin enthaltenen Definitionen sind im wesentlichen die in ISO 281:2007 für die Begriffe „Lebensdauer“ und „Dynamische Tragzahl“ (nun unterteilt in „radiale dynamische Tragzahl“ und „axiale dynamische Tragzahl“) angegebenen.

Im Jahre 1946 wurde, auf Initiative der Anti-Friction Bearing Manufacturers Association (AFBMA), New York, die Diskussion über die Normung der Tragzahl- und Lebensdauerberechnung zwischen den Wälzlagerindustrien der USA und Schwedens aufgenommen. Auf der Basis der Ergebnisse in Referenz [5] wurde eine AFBMA-Norm *Method of Evaluating Load Ratings of Annular Ball Bearings* [3] (*Verfahren zur Berechnung der Tragzahlen von ringförmigen Kugellagern*) ausgearbeitet und 1949 veröffentlicht. Auf derselben Basis präsentierte Schweden im Februar 1950 einen ersten Vorschlag an ISO: „Load Ratings of Ball Bearings“ (Tragzahlen von Kugellagern).

Im Hinblick auf die Ergebnisse weiterer Forschungen, einer Modifikation der AFBMA-Norm im Jahre 1950 und auch im Interesse der Normung der Tragzahlen von Rollenlagern, unterbreitete Schweden 1951 einen modifizierten Vorschlag für die Tragfähigkeit von Kugellagern sowie einen Vorschlag für die Tragfähigkeit von Rollenlagern.

Anschließend wurden die Methoden zur Berechnung der Tragzahl und der Lebensdauer untersucht. Von großem Nutzen war damals die Referenz [6], die als wesentliche Grundlage für die Abschnitte zur Tragfähigkeit von Rollenlagern diente.

ISO 281-1:1977

Im Jahr 1964 war es angesichts der Entwicklung verbesserter Wälzlagerstähle an der Zeit, die ISO/R281 zu überprüfen und einen Vorschlag vorzulegen.

Auf der anderen Seite folgte 1969 das TC 4 einem Vorschlag des japanischen Mitglieds und setzte die WG 3 wieder mit der Aufgabe ein, die ISO/R 281 zu überarbeiten. Gleichzeitig begann die AFBMA-Arbeitsgruppe „Tragzahlen“ mit einer Überarbeitung der Norm.

Der wesentliche Teil von ISO 281-1:1977 bestand aus der Neuausgabe von ISO/R 281 mit ausschließlich geringfügigen Modifikationen. Hauptsächlich auf amerikanischen Forschungen aus den 1960er Jahren beruhend, wurde jedoch eine neue Bestimmung hinzugefügt, welche die nominelle Lebensdauer für Erlebenswahrscheinlichkeiten ungleich 90 % und die Werkstoff- und Betriebsbedingungen berücksichtigt.

Darüber hinaus wurden, ergänzende Hintergrundinformationen über die Herleitung von Gleichungen und Faktoren in ISO 281-1:1977 als ISO/TR 8646:1985 veröffentlicht.

ISO 281:1990

ISO 281:1990 wurde als „Erste Ausgabe“ mit dem Titel „Dynamic load ratings and rating life“ veröffentlicht. Sie wird als „technische Überarbeitung“ von ISO 281-1:1977 bezeichnet. Der neue Tragzahlenbeiwert b_m für „heute üblich verwendetem, hochwertigem, gehärtetem Wälzlagerstahl nach bewährten Herstellverfahren, deren Werte von der Lagerart und -ausführung abhängig sind“, wurde als Beiwert zu den dynamischen Tragzahlen eingeführt.

ISO 281:2007 (second edition)

Seit der Veröffentlichung von ISO 281:1990 wurden weitere Erkenntnisse gewonnen, wie sich der Einfluss von Verunreinigungen, Schmierung, inneren Spannungen durch den Einbau, Spannungen durch die Wärmebehandlung, Ermüdungsgrenzbelastung des Werkstoffs auf die Lagerlebensdauer auswirken.

In ISO 281:1990/Amd.2:2000 wurde ein allgemeines Verfahren angegeben, um diese Einflussgrößen bei der Berechnung einer erweiterten Lebensdauer für ein Lager zu berücksichtigen. Diese Änderung wurde in die zweite Ausgabe eingearbeitet, zudem ist auch ein praktisches Verfahren angegeben, wie der Einfluss von Schmierungsbedingungen, Schmierstoffverunreinigungen und Ermüdung des Lagerwerkstoffes auf die Lagerlebensdauer zu berücksichtigen sind. Der Lebensdauerbeiwert a_1 für die Zuverlässigkeit wurde geringfügig geändert und auf eine Erlebenswahrscheinlichkeit von 99,95 % erweitert.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument gibt ergänzende Hintergrundinformationen bezüglich der Herleitung von Gleichungen und Faktoren, die in ISO 281:2007 angegeben sind.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

DIN ISO 281:2010-10, *Wälzlager— Dynamische Tragzahlen und nominelle Lebensdauer*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach ISO 281:2007 und die folgenden Begriffe.

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 <http://www.electropedia.org/>

4 Symbole und Abkürzungen

A	Proportionalitätskonstante
A_1	experimentell bestimmte Proportionalitätskonstante
B_1	experimentell bestimmte Proportionalitätskonstante
C_1	dynamische radiale Tragzahl eines rotierenden Ringes
C_2	dynamische radiale Tragzahl eines stillstehenden Ringes
C_a	dynamische axiale Tragzahl des gesamten Axial-Kugellagers oder Axial-Rollenlagers
C_{a1}	dynamische axiale Tragzahl, für den rotierenden Ring des gesamten Axial-Kugellagers oder Axial-Rollenlagers
C_{a2}	dynamische axiale Tragzahl, für den stillstehenden Ring des gesamten Axial-Kugellagers oder Axial-Rollenlagers
C_{ak}	dynamische axiale Tragzahl für eine Reihe k des gesamten Axial-Kugellagers oder Axial-Rollenlagers
C_{a1k}	dynamische axiale Tragzahl für eine Reihe k des rotierenden Ringes eines Axial-Kugellagers oder Axial-Rollenlagers
C_{a2k}	dynamische axiale Tragzahl für eine Reihe k des stillstehenden Ringes eines Axial-Kugellagers oder Axial-Rollenlagers
C_e	dynamische Tragzahl des Außenrings
C_i	dynamische Tragzahl des Innenrings
C_r	dynamische radiale Tragzahl für Radial-Kugellager oder Radial-Rollenlager
D_{pw}	Teilkreisdurchmesser des Kugel- oder Rollensatzes
D_w	Kugeldurchmesser
D_{we}	mittlerer Rollendurchmesser
E_o	modifizierter Elastizitätsmodul

F_a	Axiallast des Lagers
F_r	Radiallast des Lagers
J_1	Verhältnis von dynamisch äquivalenter Wälzkörperlast zur maximaler Wälzkörperlast für relativ zur Last rotierenden Ring
J_2	Verhältnis von dynamisch äquivalenter Wälzkörperlast zur maximaler Wälzkörperlast für relativ zur Last stillstehenden Ring
J_a	axiales Lastintegral; Axiallast-Integral
J_r	radiales Lastintegral; Radiallast-Integral
L	Wälzlager-Lebensdauer
L_{10}	nominelle Lebensdauer
L_{we}	effektive Kontaktlänge der Rolle
L_{wek}	effektive Kontaktlänge der Rolle der Reihe k
N	Anzahl der Überrollungen (Lastwechsel) auf einen Punkt der Laufbahn
P_a	dynamisch äquivalente Axiallast für Axiallager
P_r	dynamisch äquivalente Radiallast für Radiallager
P_{r1}	dynamisch äquivalente Radialbelastung für den rotierenden Ring
P_{r2}	dynamisch äquivalente Radialbelastung für den stillstehenden Ring
Q	Normalkraft zwischen Wälzkörper und Laufbahn
Q_C	Wälzkörperlast für die dynamische Tragzahl des Lagers
Q_{C1}	Wälzkörperlast für die dynamische Tragzahl eines relativ zur Last rotierenden Ringes
Q_{C2}	Wälzkörperlast für die dynamische Tragzahl eines relativ zur Last stehenden Ringes
Q_{max}	maximale Wälzkörperlast
S	Überlebenswahrscheinlichkeit (Zuverlässigkeit)
V	Volumen entsprechend der Spannungskonzentration
V_f	Umlauf-Faktor
X	Radiallastfaktor für Radiallager
X_a	Radiallastfaktor für Axiallager
Y	Axiallastfaktor für Radiallager
Y_a	Axiallastfaktor für Axiallager
Z	Anzahl der Kugeln oder Rollen in einer Reihe
Z_k	Anzahl der Kugeln oder Rollen in einer Reihe k
a	große Halbachse der projizierten Kontaktellipse
a_1	Lebensdauerbeiwert für die Zuverlässigkeit
b	kleine Halbachse der projizierten Kontaktellipse
c	experimentell bestimmter Exponent
c_c	Druckkonstante
e	Maßzahl der Lebensdauerstreuung (experimentell ermittelte Weibull-Steigung)
e	Grenzwert des Verhältnisses von F_a / F_r für die Anwendbarkeit verschiedener Werte für die Faktoren X und Y in der neuen Ausgabe
f_c	Faktor, der von der Geometrie, der Herstellgenauigkeit und dem Werkstoff der Lagerteile abhängt
h	experimentell bestimmter Exponent
i	Anzahl der Kugelreihen oder Rollenreihen
l	Umfang der Laufbahn
r	Rillenradius der Laufbahn im Axialschnitt

r_e	Rillenradius des Außenringes oder der Gehäusescheibe im Axialschnitt
r_i	Rillenradius des Innenringes oder der Wellenunterlegscheibe im Axialschnitt
t	Hilfsparameter
z_o	Tiefe der maximalen Orthogonal-Schubspannung unter der Oberfläche
α	Nenn-Berührungswinkel
α'	Betriebs-Berührungswinkel
γ	$D_w \cos \alpha / D_{pw}$ für Kugellager mit $\alpha \neq 90^\circ$ D_w / D_{pw} für Kugellager mit $\alpha = 90^\circ$ $D_{we} \cos \alpha / D_{pw}$ für Rollenlager mit $\alpha \neq 90^\circ$ D_{we} / D_{pw} für Rollenlager mit $\alpha = 90^\circ$
ε	Lastparameter, der die Größe der Lastzone im Lager angibt
η	Minderungsfaktor
λ	Minderungsfaktor
μ	Hilfsgröße nach Hertz
ν	Hilfsgröße nach Hertz, oder Korrekturwert für Exponentenstreuung
$\sigma_{\max}$	maximale Druckspannung im Kontakt
$\Sigma \rho$	Summe der Krümmung
τ_o	maximale Orthogonal-Schubspannung unter der Oberfläche
φ_o	Winkel der halben Lastzone

5 Allgemeines

Die Herleitung der dynamischen Tragzahlen ist in Gleichung (1) bis Gleichung (46) beschrieben. Die dynamische äquivalente Belastung sowie die radialen und axialen Lastfaktoren werden in Gleichung (47) bis Gleichung (82) behandelt, während die nominelle Lebensdauer in Gleichung (83) bis Gleichung (89) beschrieben wird.

6 Dynamische Tragzahl

6.1 Allgemeines

Die Grundlagen der dynamischen Tragzahl von Wälzlagern nach ISO 281 stammen aus den Veröffentlichungen [5] und [6].

Der Ausdruck für die Berechnung der dynamischen Tragzahlen von Wälzlagern werden aus einer Beziehung entwickelt, die folgendermaßen lautet:

$$\ln \frac{1}{S} \propto \frac{\tau_o^c N^e V}{z_o^h} \quad (1)$$

Dabei ist

- S die Überlebenswahrscheinlichkeit;
- τ_o die maximale Orthogonal-Schubspannung unter der Oberfläche;
- N die Anzahl der Überrollungen (Lastwechsel) auf einen Punkt der Laufbahn;
- V das Volumen entsprechend der Spannungskonzentration;

z_0 die Tiefe der maximalen Orthogonal-Schubspannung unter der Oberfläche;

c, h die experimentell bestimmten Exponenten;

e das Maß für die Lebensdauerstreuung, das ist die experimentell ermittelte Weibull-Steigung.

Im Falle von Punktberührung (Kugellager) wird angenommen, dass das für die Spannungskonzentration nach Gleichung (1) maßgebende Volumen V proportional zur großen Achse der projizierten Druckellipse $2a$, dem Umfang der Laufbahn l und der Tiefe z_0 der maximalen Orthogonal-Schubspannung τ_0 unter der Oberfläche ist:

$$V \propto 2a z_0 l \quad (2)$$

Setzt man die Gleichung (2) in Gleichung (1) ein, so ergibt sich:

$$\ln \frac{1}{S} \propto \frac{\tau_0^c N^e a l}{z_0^{h-1}} \quad (3)$$

Die Linienberührung wurde in den Referenzen [5] und [6] angenähert so betrachtet, dass die Hauptachse der berechneten Hertzschen Druckellipse das 1,5fache der effektiven Rollenlänge beträgt:

$$2a = 1,5L_{we} \quad (4)$$

Zusätzlich sollte b/a klein genug sein, um die Einführung des Grenzwertes von ab^2 für $b/a \rightarrow 0$ zu erlauben:

$$ab^2 = \frac{2}{\pi} \frac{3Q}{E_0 \sum \rho} \quad (5)$$

(Bezeichnungen der Variablen siehe 6.2).

6.2 Dynamische radiale Tragzahl C_r für Radial-Kugellager

Aus der Hertzschen Theorie kann die maximale Orthogonal-Schubspannung τ_0 und die Tiefe z_0 unter der Oberfläche durch die radiale Belastung F_r ausgedrückt werden, d. h., durch eine maximale Wälzkörperlast $Q_{\max}$ oder durch eine maximale Druckspannung im Kontakt $\sigma_{\max}$ und die Abmessungen der Druckfläche zwischen Wälzkörper und Laufbahn. Es gelten die folgenden Beziehungen:

$$\tau_0 = T \sigma_{\max}$$

$$z_0 = \zeta b$$

$$T = \frac{(2t-1)^{1/2}}{2t(t+1)}$$

$$\zeta = \frac{1}{(t+1)(2t-1)^{1/2}}$$

$$a = \mu \left(\frac{3Q}{E_0 \sum \rho} \right)^{1/3}$$

$$b = v \left(\frac{3Q}{E_0 \sum \rho} \right)^{1/3}$$

Dabei ist

- $\sigma_{\max}$ die maximale Druckspannung im Kontakt;
 t ein Hilfsparameter;
 a die große Halbachse der projizierten Kontaktellipse;
 b die kleine Halbachse der projizierten Kontaktellipse;
 Q die Normalkraft zwischen Wälzkörper und Laufbahn;
 E_0 das Elastizitätsmodul;
 $\Sigma\rho$ die Summe der Krümmungen;
 μ, ν die Hilfsgrößen nach Hertz.

Für ein gegebenes Wälzlager können folglich τ_0 , a , l und z_0 durch Größen der Lagergeometrie, der Belastung und der Umdrehungen ausgedrückt werden. Die Gleichung (3) wird durch Einführung einer Proportionalitätskonstante in eine Gleichung umgewandelt. Führt man eine bestimmte Anzahl von Umdrehungen (z. B. 10^6) und eine bestimmte Zuverlässigkeit (z. B. 0,9) ein, wird die Gleichung unter Einführung einer Proportionalitätskonstante A_1 nach einer Wälzkörperkraft für eine dynamische Tragzahl aufgelöst, die bestimmend ist für Punkt-Kontakt-Wälzlager:

$$Q_C = \frac{1,3}{4^{(2c+h-2)/(c-h+2)} 0,5^{\frac{3e}{c-h+2}}} A_1 \left(\frac{2r}{2r - D_w} \right)^{0,41} \times \frac{(1 \mp \gamma)^{(1,59c+1,41h-5,82)/(c-h+2)}}{(1 \pm \gamma)^{3e/(c-h+2)}} \times \left(\frac{\gamma}{\cos \alpha} \right)^{3/(c-h+2)} D_w^{(2c+h-5)/(c-h+2)} Z^{-3e/(c-h+2)} \quad (6)$$

Dabei ist

- Q_C die Wälzkörperlast für die dynamische Tragzahl des Lagers;
 D_w der Kugeldurchmesser;
 γ ist $D_w \cos \alpha / D_{pw}$;

in welcher

- D_{pw} der Teilkreisdurchmesser des Kugelsatzes ist;
 α der Nenn-Berührungswinkel ist;
 Z die Anzahl der Kugeln in einer Reihe ist.

Die dynamische radiale Tragzahl C_1 eines rotierenden Ringes ergibt sich aus:

$$C_1 = Q_{C_1} Z \cos \alpha \frac{J_r}{J_1} = 0,407 Q_{C_1} Z \cos \alpha \quad (7)$$

Die dynamische radiale Tragzahl C_2 für einen stillstehenden Ring ergibt sich aus:

$$C_2 = Q_{C_2} Z \cos \alpha \frac{J_r}{J_2} = 0,389 Q_{C_2} Z \cos \alpha \quad (8)$$

Dabei ist

Q_{C1} Wälzkörperlast für die dynamische Tragzahl eines relativ zur Last rotierenden Ringes;

Q_{C2} Wälzkörperlast für die dynamische Tragzahl eines relativ zur Last stehenden Ringes;

$J_r = J_r(0,5)$ ist das radiale Lastintegral für spielfreies Lager (siehe Tabelle 3);

$J_1 = J_1(0,5)$ das Verhältnis von dynamisch äquivalenter Wälzkörperlast zur maximaler Wälzkörperlast für einen relativ zur Last rotierenden Ring (siehe Tabelle 3);

$J_2 = J_2(0,5)$ das Verhältnis von dynamisch äquivalenter Wälzkörperlast zur maximaler Wälzkörperlast für einen relativ zur Last stillstehenden Ring (siehe Tabelle 3).

Die Beziehung zwischen C_r für ein ganzes Radial-Kugellager und C_1 und C_2 wird durch die Produktregel der Wahrscheinlichkeit wie folgt ausgedrückt:

$$C_r = C_1 \left[1 + \left(\frac{C_1}{C_2} \right)^{(c-h+2)/3} \right]^{-3/(c-h+2)} \quad (9)$$

Durch Einsetzen der Gleichung (6), Gleichung (7) und Gleichung (8) in Gleichung (9) wird die dynamische radiale Tragzahl C_r für ein komplettes Radial-Kugellager wie folgt ausgedrückt:

$$\begin{aligned} C_r = & 0,41 \frac{1,3}{4(2c+h-2)/(c-h+2) 0,5 \frac{3e}{(c-h+2)}} A_1 \left[\frac{2r_i}{2r_i - D_W} \right]^{0,41} \\ & \times \frac{(1-\gamma)^{(1,59c+1,41h-5,82)/(c-h+2)}}{(1+\gamma)^{3e/(c-h+2)}} \gamma^{3/(c-h+2)} \\ & \times \left[1 + \left\{ 1,04 \left[\frac{r_i}{r_e} \left(\frac{2r_e - D_W}{2r_i - D_W} \right) \right]^{0,41} \left(\frac{1-\gamma}{1+\gamma} \right)^{(1,59c+1,41h+3e-5,82)/(c-h+2)} \right\}^{(c-h+2)/3} \right]^{-3/(c-h+2)} \\ & \times (i \cos \alpha)^{(c-h-1)/(c-h+2)} Z^{(c-h-3e+2)/(c-h+2)} D_W^{(2c+h-5)/(c-h+2)} \end{aligned} \quad (10)$$

Dabei ist

A_1 die experimentell bestimmte Proportionalitätskonstante;

r_i der Rillenradius des Innenringes im Axialschnitt;

r_e der Rillenradius des Außenringes im Axialschnitt;

i die Anzahl der Kugelreihen.

Dabei hängen der Berührungswinkel α , die Anzahl der Wälzkörper (Kugeln) Z und der Wälzkörperdurchmesser D_W von der Lagerkonstruktion ab. Da andererseits die Verhältnisse der Rillenradien r_i und r_e bezogen auf den halben Durchmesser der Wälzkörper (Kugeln) $D_W/2$ und $\gamma = D_W \cos \alpha / D_{pw}$ dimensionslos sind, bietet es sich für die Praxis an, die ersten zwei Zeilen der rechten Seite von Gleichung (10) zu einem Faktor f_c zusammenzufassen:

$$C_r = f_c (i \cos \alpha)^{(c-h-1)/(c-h+2)} Z^{(c-h-3e+2)/(c-h+2)} D_W^{(2c+h-5)/(c-h+2)} \quad (11)$$

Um bei Radial-Kugellagern aus der Fertigung resultierende Fehler zu berücksichtigen, wird ein Minderungsfaktor λ eingeführt, der den theoretischen Wert der dynamischen Tragzahl für Radial-Kugellager reduziert. Es bietet sich an, diesen in den Faktor f_c zu integrieren. Der Wert des Faktors λ wird experimentell bestimmt.

$$\begin{aligned}
f_c &= 0,41 \lambda \frac{1,3}{4^{(2c+h-2)/(c-h+2)} 0,5^{\frac{3e}{(c-h+2)}}} A_1 \left(\frac{2r_i}{2r_i - D_W} \right)^{0,41} \\
&\times \frac{(1-\gamma)^{(1,59c+1,41h-5,82)/(c-h+2)}}{(1+\gamma)^{\frac{3e}{(c-h+2)}}} \gamma^{3/(c-h+2)} \\
&\times \left[1 + \left\{ 1,04 \left[\frac{r_i}{r_e} \left(\frac{2r_e - D_W}{2r_i - D_W} \right) \right]^{0,41} \left(\frac{1-\gamma}{1+\gamma} \right)^{(1,59c+1,41h+3e-5,82)/(c-h+2)} \right\}^{(c-h+2)/3} \right]^{-3/(c-h+2)} \quad (12)
\end{aligned}$$

Nach den Versuchen in den Referenzen [5] und [6] können die folgenden experimentellen Konstanten in die Tragzahlgleichung für Kugellager eingesetzt werden:

$$e = 10/9$$

$$c = 31/3$$

$$h = 7/3$$

Nach Einsetzen der Werte in Gleichung (11) ergibt sich das folgende, wobei eine ausreichende Anzahl von Testergebnissen nur für kleinere Kugeldurchmesser, d.h. bis zu einem Durchmesser von 25,4 mm (1 Zoll) vorlag, dass die Tragzahl proportional zu $D_W^{1,8}$ ist. Für größere Kugeldurchmesser scheint die Tragzahl in Abhängigkeit vom Kugeldurchmesser geringer zu steigen, wobei $D_W^{1,4}$ für Kugeldurchmesser $D_W > 25,4$ mm angenommen werden kann:

$$C_r = f_c (i \cos \alpha)^{0,7} Z^{2/3} D_W^{1,8} \text{ für } D_W \leq 25,4 \text{ mm} \quad (13)$$

$$C_r = 3,647 f_c (i \cos \alpha)^{0,7} Z^{2/3} D_W^{1,4} \text{ für } D_W > 25,4 \text{ mm} \quad (14)$$

$$\begin{aligned}
f_c &= 0,089 A_1 0,41 \lambda \left(\frac{2r_i}{2r_i - D_W} \right)^{0,41} \frac{\gamma^{0,3(1-\gamma)^{1,39}}}{(1+\gamma)^{1/3}} \\
&\times \left[1 + \left\{ 1,04 \left[\frac{r_i}{r_e} \left(\frac{2r_e - D_W}{2r_i - D_W} \right) \right]^{0,41} \left(\frac{1-\gamma}{1+\gamma} \right)^{1,72} \right\}^{10/3} \right]^{-3/10} \quad (15)
\end{aligned}$$

Die Werte für f_c in ISO 281:2007, Tabelle 2, sind mit Werten für Rillenradien und Minderungsfaktoren nach Tabelle 1 unter Benutzung von Gleichung (15) berechnet worden.

Der Wert für $0,089 \cdot A_1$ beträgt 98,066 5, wenn C_r in Newton ausgedrückt wird.

6.3 Dynamische axiale Tragzahl C_a für einreihige Axial-Kugellager

6.3.1 Axial-Kugellager mit einem Berührungswinkel $\alpha \neq 90^\circ$

Wie in Abschnitt 6.2 ist für Axial-Kugellager mit einem Berührungswinkel von $\alpha \neq 90^\circ$:

$$C_a = f_c (\cos \alpha)^{(c-h-1)/(c-h+2)} \tan \alpha Z^{(c-h-3e+2)/(c-h+2)} D_W^{(2c+h-5)/(c-h+2)} \quad (16)$$

Für die meisten Axial-Kugellager muss der theoretische Wert für die dynamische axiale Tragzahl reduziert werden und zwar aufgrund der ungleichen Lastverteilung unter den Wälzkörpern, zusätzlich zum Minderungs-