

Über die Lebensdauerberechnung oszillierender Wälzlager

Schmelter, R.



Die Berechnungsmethoden für die Lebensdauer von Wälzlagern unter kontinuierlicher Rotation spiegeln mittlerweile gut die real zu erwartenden Lebensdauer eines Lagers wieder. Wird das Lager jedoch oszillierend bewegt, liefern die herkömmlichen Berechnungsverfahren unzureichend genaue Ergebnisse. Daher wurden bisher mehrere verschiedene Ansätze zur Berücksichtigung der Oszillation aufgestellt. In diesem Artikel werden dieses an einem Beispiel verglichen.

The calculation of fatigue life for rolling element bearings fits well to real experiences. But if the bearing is under oscillatory condition, the common methods will give underappreciated results. To consider oscillating rotation, some approaches were discovered. These approaches will be compared in this article by example.

1 Wälzlager und Wälzlagerlebensdauer

Typischerweise werden Wälzlager zur Abstützung von z.B. Wellen unter reiner Rotation verwendet. Jedoch existieren daneben noch Anwendungen, in denen ein Wälzlager rein oszillierend oder wechselnd oszillierend und rotierend betrieben wird. Unter solchen Bedingungen führen die herkömmlichen Berechnungsverfahren für die Lagerlebensdauer zu zu geringen Werten. Um die höhere Lagerlebensdauer eines oszillierenden Lagers genauer abschätzen zu können, wurden mehrere Ansätze entwickelt, die in ihrer Anwendung unterschiedlich komplex sind, aber auch stark unterschiedliche Ergebnisse liefern. An einer Beispielrechnung sollen diese Verfahren hier vorgestellt werden.

1.1 Lebensdauerberechnung unter reiner Rotation

Die Berechnung der Lagerlebensdauer unter reiner Rotation ist in DIN ISO 281 /1/ international genormt. Der Berechnungsablauf entspricht den aktuellen Stand der Technik. Die Berechnung der Lebensdauer erfolgt dabei nach Formel 1.1 durch den Vergleich der dynamischen Tragzahl der Wälzkörper C mit den dynamisch, äquivalenten Belastun-

gen P (Formel 1.2) nach ISO 281 unter Berücksichtigung eines, von der Arte des Wälzkörpers abhängigen, Exponenten p .

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p \quad 1.1$$

$$P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a \quad 1.2$$

Der Lebensdauerexponent p beträgt für Lager mit idealisierter Punktberührung (Kugellager) 3 und für idealisierte Linienberührung 10/3.

Die Lebensdauer L_{10} gibt die Lebensdauer eines Wälzlagers mit 90% Überlebenswahrscheinlichkeit an. Für viele Anwendungen ist diese Zuverlässigkeit jedoch zu gering. Vor allem wenn man bedenkt, dass unter günstigen Betriebsbedingungen (Schmierung, dynamische Belastungen,...) ein Wälzlager eine vielfach höhere Lebensdauer als L_{10} erreichen kann. In DIN ISO 281 besteht daher, die Lebensdauer L_{10} mit Lebensdauerbeiwerten a_{ISO} und a_1 gemäß Formel 1.3 zu korrigieren.

$$L_{nm} = a_1 \cdot a_{ISO} \cdot L_{10} \quad 1.3$$

Der Faktor a_1 verringert die Lebensdauer zu einer höheren Zuverlässigkeit. Faktor a_{ISO} berücksichtigt die Spannungskonzentration in der Kontaktzone, die Schmierbedingungen, Verunreinigungen sowie die durch feste Passung am Innenring verursachte Umfangsspannung. a_{ISO} ist daher eine Funktion der Ermüdungsspannung im Verhältnis zur tatsächlich auftretenden Spannung. Die Ermüdungsspannung der Laufbahn ist hauptsächlich abhängig von der Lastverteilung der Spannung an der Oberfläche und dem höchstbelasteten Wälzkontakt. Diese ist sehr schwer zu ermitteln. In ISO 281 wird daher die Ermüdungsgrenzbelastung C_u eingeführt. Der Lagerlebensdauerbeiwert a_{ISO} wird dann angenähert durch Formel 1.4.

$$a_{ISO} = f \left(\frac{C_u}{P} \right) \quad 1.4$$

In der praktischen Anwendung nach ISO 281 berücksichtigt der Faktor a_{ISO} folgende Einflüsse:

- Schmierung (Art des Schmierstoffes, Viskosität, Lagerdrehzahl, Lagergröße, Additive)
- Umgebung (Verunreinigung, Abdichtung)
- Verunreinigung durch feste Partikel (Härte und Teilchengröße im Verhältnis zur Lagergröße, Schmierverfahren, Filtrierung)

- Der Einbaus (Sauberkeit des Einbaus) /1/

Damit wird a_{ISO} abhängig vom Verunreinigungsbeiwert e_c und dem Viskositätsverhältnis κ (Formel 1.5).

$$a_{ISO} = f\left(\frac{e_c \cdot C_u}{P}, \kappa\right) \quad 1.5$$

1.2 Berücksichtigung rein oszillierender Bewegung

Die Berechnung der Lagerlebensdauer in ISO 281 kann durch Bildung von Lastkollektiven für veränderliche Lagerlasten und Drehzahlen berechnet werden. Bei der Berechnung der Lebensdauer von Wälzlagern gegen Rollverschleiß gehen die Annahmen jedoch immer von vollständigen Umdrehungen eines Lagerringes gegenüber des anderen aus. Für die Anwendung von Wälzlagern unter oszillierenden Betrieb, z.B. in Kreuzgelenkwellen, kann daher ISO 281 nur bedingt angewandt werden. Wird ein Lager rein oszillatorisch belastet, werden nur ein Teil der Wälzkörper sowie Teilbereiche der Lagerringe unter Last überrollt. Durch die dadurch geringere, mittlere Last ergeben sich höhere Lebensdauern für oszillatorisch belastete Lager im Vergleich zu Lagern mit kontinuierlicher Umdrehung gleicher Frequenz und Belastung.

Harris /2/ leitet über die Verhältnisse des Rotationswinkels eines oszillierenden Lagers und eines rotierenden Lagers für die Lebensdauer eines oszillierenden Lagers die Beziehung

$$L = \left(\frac{C}{P_{RE}}\right)^p \quad 1.6$$

her. P_{RE} beschreibt darin eine reduzierte, äquivalente Lagerlast gemäß

$$P_{RE} = \left(\frac{2\phi}{\pi}\right)^{\frac{1}{p}} \cdot P \quad 1.7$$

wobei ϕ den Oszillationswinkel in Radian beschreibt. Houpert /3/ erweiterte diesen Ansatz für Lager unter kombinierter radialer und axialer Last mit Berücksichtigung der Lastzone. Weiterhin wandte Houpert die Palmgren-Miner-Regel auf die Lastzone an. Letztendlich fand Houpert einen oszillatorischen Lebensdauerfaktor A_{osc} (Abbildung 1), mit dem sich die Lagerlebensdauer eines oszillierenden Lagers nach Formel 1.8 berechnen lässt.

Nach Harris liefert die Methode von Houpert besser zutreffende Er-

gebnisse für die Lagerlebensdauer als die von Harris selbst vorgeschlagene. Jedoch ist die Ermittlung des oszillatorischen Lebensdauerfaktors sehr aufwändig. Für eine Ausdehnung der Lastzone $\varepsilon > 1$, definiert nach Formel 1.9, ergeben sich nach beide Methoden gut übereinstimmende Ergebnisse. δ_a und δ_r bezeichnen darin den axialen und radialen Lagerringversatz aufgrund der äußeren Last, α den Kontaktwinkel.

$$L = A_{osc} \cdot \left(\frac{C}{P} \right)^p \quad 1.8$$

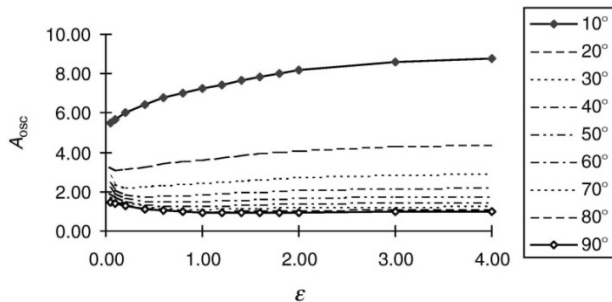


Abbildung 1: oszillatorischer Lebensdauerbeiwert A_{osc} in Abhängigkeit des Oszillationswinkels von 10° bis 90° und der Lastzone ε /3/

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\delta_a \tan \alpha}{\delta_r} \right) \quad 1.9$$

In /4/ unterteilt Harris die in /2/ vorgeschlagene Methode für die oszillierende Lagerlebensdauer noch für verschiedene Oszillationswinkel. Dafür definiert Harris einen kritischen Oszillationswinkel als Amplitude der Rotation zwischen Innen- und Außenring eines Lagers, bei dem die beanspruchte Zone durch einen Wälzkörper den beanspruchten Bereich des nächsten Wälzkörpers berührt aber nicht überlappt (Formel 1.10). z bezeichnet die Anzahl der Wälzkörper.

$$\Phi_{krit} = \frac{720^\circ}{z(1 \pm \varepsilon)} \quad 1.10$$

Für Amplituden der Oszillation $\phi > \Phi_{krit}$ gilt demnach für eine korrigierte dynamische Lagerkapazität

$$C_{osc} = C \cdot \left(\frac{180^\circ}{\phi} \right)^p \quad 1.11$$

wobei $p=3$ für Lager mit Punktkontakt und $p=4$ für Lager mit Linienkontakt gesetzt wird. Für Oszillationswinkel $\phi < \phi_{krit}$ gilt für Kugellager

$$C_{osc} = C \cdot \left(\frac{180^\circ}{\phi} \right)^{\frac{3}{10}} \cdot Z^{0,033} \quad 1.12$$

Und für Rollenlager

$$C_{osc} = C \cdot \left(\frac{180^\circ}{\phi} \right)^{\frac{2}{9}} \cdot Z^{0,028} \quad 1.13$$

. Die Lagerlebensdauer berechnet sich dann nach

$$L_{10} = \left(\frac{C_{osc}}{P} \right)^p \quad 1.14$$

mit $p=3$ für Punktkontakt und $p=10/3$ für Linienkontakt.

Die bisher vorgestellten Methoden basieren auf kinematischen Beziehungen und Betrachtung der Lastzone. Eine andere Möglichkeit, oszillierende Bewegung mit den Mitteln von ISO 281 zu berücksichtigen, ist die Bildung eines virtuellen Geschwindigkeitskollektivs. Dazu wird der sinusförmige Verlauf der Geschwindigkeit in Abschnitte gleicher Geschwindigkeit zerlegt, aus der dann das Kollektiv gebildet wird. Dieses Geschwindigkeitskollektiv wird dann auf die Berechnung des Lebensdauerbeiwertes a_{ISO} bei der Berechnung der Schmierverhältnisse angewendet.

1.3 Berechnungsbeispiel

1.3.1 Eingangsdaten

Die Beispielberechnung wird anhand eines Rillenkugellagers vom Typ 16021 durchgeführt. Die grundlegenden Lagergeometriedaten sowie die wirkenden Lasten sind in Tabelle 1 aufgeführt. Das Lager soll mit einem Mineralöl mit einer Viskosität von $256,7 \text{ mm}^2/\text{s}$ geschmiert werden. Die Einbau- und Betriebsbedingungen sind sauber.

1.3.2 Nach ISO 281, erweitert

Die erweiterte Berechnungsmethode nach ISO 281/1/ sieht die Berücksichtigung der Lagerlebensdauer nach Gleichung 1.1 mit einem Le-

Tabelle 1: Lagerbelastung und Lagergeometrie

Lagerbelastung	10000 N
Schwenkwinkel	9 °
Schwenkfrequenz	52,4 1/s
Entsprechende Drehzahl	500 1/min
Lager	16021
Innendurchmesser d	105 mm
Außendurchmesser D	160 mm
Teilkreisdurchmesser D_{pw}	132,5 mm
Breite B	18 mm
Anzahl Wälzkörper	18
Dynamische Tragzahl C	57 kN
Statische Tragzahl C_0	54 kN
Ermüdungsgrenzbelastung C_u	2390 N

bensdauerfaktor a_{ISO} vor (Gleichung 1.3). In diesem Faktor werden systemabhängige Einflüsse wie Art und Sauberkeit der Schmierung sowie die Ermüdungsgrenze des Lagers zusammengefasst.

Für das oben genannte Lager ergibt sich eine nominelle Lagerlebensdauer für eine äquivalente Drehzahl von 500 1/min von 185,2h. Die Berechnung des Lebensdauerfaktors a_{ISO} sind die Ermüdungsgrenzbelastung des Lagers, die Einschätzung der Verunreinigung sowie das Viskositätsverhältnis κ zwischen tatsächlicher kinematischer Viskosität zur Bezugsviskosität des Schmieröles als Daten notwendig. Für a_{ISO} ergibt sich somit unter den gegebenen Lastverhältnissen ein Wert von 29,5. Somit beträgt die erweiterte Lagerlebensdauer nach ISO 281 $L_{ISO\ 281} = 5471h$.

1.3.3 Nach Harris, Methode 1

1.3.3 Nach Harris, Methode 1

Harris versucht in seiner in /2/ vorgeschlagenen Methode, eine rein oszillatorische Lagerbewegung bei der Lebensdauerberechnung durch eine reduzierte Lagerlast zu berücksichtigen. Nach Formel 1.7 ergibt sich diese unter den wirkenden Belastungen zu $P_{RE} = 4642N$. Die nominelle Lagerlebensdauer beträgt damit 1851h. Diese nominelle Lebensdauer kann mit a_{ISO} aus ISO 281 zur Berücksichtigung des realen Systems erweitert werden. Unter den vorliegenden Lastfall ergibt sich a_{ISO} ebenfalls zu 29,5. Somit ergibt sich die Lagerlebensdauer nach Harris Methode 1 zu $L_{Harris,1}$ zu 546170h.

1.3.4 Nach Harris, Methode 2

Eine zweite, von Harris in /4/ vorgeschlagene Methode für die Lebensdauerberechnung oszillierender Lager geht von einer Korrektur der dynamischen Tragzahl in Abhängigkeit des Schwenkwinkels aus. Dabei muss unterschieden werden, ob der Schwenkwinkel einen kritischen Wert unterschreitet oder überschreitet. Für das vorliegende Lager ergibt sich ein kritischer Schwenkwinkel von 26,7°. Damit liegt der Betriebsschwenkwinkel unter dem kritischen Schwenkwinkel. Das bedeutet, dass jeder Wälzkörper einen Lagerbereich überrollt, der von

keinem anderen Wälzkörper berührt wird. Die korrigierte Lagerkapazität ergibt sich nach Gleichung 1.12 zu $C_{OSC} = 154kN$. Damit ergibt sich eine nominelle Lebensdauer des Lagers zu 3652h. Die korrigierte Lagerlebensdauer nach ISO 281 beträgt dann $L_{Harris,2} = 107750h$ mit $a_{ISO} = 29,5$.

1.3.5 Nach Houpert

Houpert korrigiert die Lagerlebensdauer oszillierender Wälzlager durch einen Faktor A_{OSC} , der unter Berücksichtigung der Lagerbelastung und der Theorie von Palgren und Miner gefunden wurde. Für das gegebene Lager unter rein radialer Belastung ergibt sich der Lastzonenparameter ϵ zu 0,5. Aus **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** lässt sich nun der Faktor A_{OSC} zu 6,2 bestimmen. Die nominelle Lagerlebensdauer beträgt somit 1148h. Modifiziert mit a_{ISO} ergibt sich eine Lagerlebensdauer des oszillierenden Wälzlagers zu $L_{Houpert} = 33873h$. Diese Lebensdauer gilt genau genommen nur für den Innenring. Da dieser jedoch am häufigsten durch Verschleiß ausfällt, kann dieser als schwächstes Glied im Lager aufgefasst werden, womit die Lebensdauer $L_{Houpert}$ für das komplette Lager ausschlaggebend ist.

1.3.6 Nach ISO 281, erweitert und modifiziert

Nach einer Idee ebenfalls von Houpert kann man das oszillieren eines Lagers durch Bildung eines virtuellen Lastkollektives über der Rotationsgeschwindigkeit des Lagers bei der Ermittlung von a_{ISO} berücksichtigen. Dazu wird der sinusförmige Verlauf der Oszillation in eine begrenzte Anzahl Bereiche unterteilt, über der die Rotationsgeschwindigkeit gemittelt wird. Unterteilt man bei rein sinusförmiger Oszillation einen Zyklus in 10 Bereiche mit einer mittleren Drehzahl von $0,1*n_{max}$ bis $1*n_{max}$ ergibt sich die Verteilung der Drehzahlen nach Tabelle 2.

Tabelle 2: Verteilung der Drehzahl

$0,1*n_{max}$	6,67%
$0,2*n_{max}$	6,35%
$0,3*n_{max}$	6,98%
$0,4*n_{max}$	6,35%
$0,5*n_{max}$	7,62%
$0,6*n_{max}$	7,62%
$0,7*n_{max}$	7,62%
$0,8*n_{max}$	10,16%
$0,9*n_{max}$	11,75%
$1*n_{max}$	28,79%

Die maximale Vergleichsdrehzahl n_{max} berechnet sich zu 78,5 1/min. Der Lebensdauerbeiwert a_{ISO} ergibt sich dann als mit der Häufigkeit gewichtetes, quadratisches Mittel der 10 Einzelwerte für die 10 Drehzahlen zu 34,2. Damit berechnet sich die Lagerlebensdauer des oszillierenden Lagers zu $L_{ISO 281, mod} = 6330h$.

1.3.7 Zusammenfassung Berechnungsergebnisse

Für die verschiedenen Ansätze zur Berechnung der Lagerlebensdauer oszillierender Lager ergeben sich die Ergebnisse für den vorliegenden Lastfall nach Tabelle 3.

Tabelle 3: Berechnungsergebnisse der verschiedenen Verfahren

Berechnungsverfahren	ISO 281	Harris 1	Harris 2	Houpert	ISO 281, modifiziert
a_{ISO}	29,5	29,5	29,5	29,5	34,2
Lagerlast	10000N	4642N	10000N	10000N	10000N
kritischer Schwenkwinkel	-	-	26,7°	-	-
korrigierte Lagerkapazität	-	-	154kN	-	-
A_{osc}	-	-	-	6,2	-
Lebensdauer	5471h	54617h	107750h	33873h	6330h

2 Zusammenfassung

Vorgestellt wurden verschiedene Verfahren zur Berücksichtigung oszillierender Lagerbewegung bei der Lebensdauerberechnung. Die Ergebnisse weisen große Unterschiede bei der berechneten Lebensdauer auf. Aber alle Lebensdauern liegen über den nach ISO 281 berechneten Wert. Als konservativste Auslegung kann demnach die Modifikation von ISO 281 durch ein virtuelles Lastkollektiv angesehen werden. Durch die starke Abweichung zu hohen Lebensdauern ist vorerst eine Berechnung nach /4/ abzusehen. Eine Überprüfung der Ergebnisse durch Experimente konnte bisher nicht durchgeführt werden. Daher ist eine konkrete Empfehlung zu einer der verbleibenden Berechnungsverfahren nicht möglich. Die Auswahl muss anhand der persönlichen Erfahrung und gegebener Randbedingungen erfolgen.

3 Literatur

- /1/ Norm DIN ISO 281; Oktober 2010, Wälzlager – dynamische Tragzahlen und nominelle Lebensdauer.
- /2/ Harris, T.A.; Kotzalas, M.N.: Rolling Bearing Analysis, Essential Concepts of Bearing Technology, Taylor & Francis Group, Boca Raton 2007.
- /3/ Houpert, L.: Bearing Life Calculation in Oscillatory Applications, Tribology Transactions 1999.
- /4/ Harris, T.A.; Rumbarger, J.H.; Butterfield, C.P.: Wind Turbine Design Guideline DG03 : Yaw and Pitch Rolling Bearing Life, NREL/TP-500-42362 2009.