

## KISSsoft berechnet Wälzlager in der Windindustrie

KISSsoft AG, Dipl.-Ing. Ioannis Kaliakatsos



Wälzlager sind essentielle Bestandteile in den meisten Maschinen, wenn es darum geht, Leistung und Bewegung zu übertragen. Sie isolieren die beweglichen von den stehenden Teilen der Maschine und ermöglichen so deren Funktion. Ausgehend vom klassischen Standpunkt der Maschinenkonstruktion sind Wälzlager nur ein weiteres Maschinenelement, welches passend zu den gegebenen Betriebsbedingungen gewählt werden sollte. Dennoch lohnt sich eine genauere Untersuchung von Wälzlagern aus mehreren Gründen.

Durch die Integration der Lager in die maschinelle Funktion hat jede Verbesserung der Betriebsbedingungen von Lagerungen einen direkten Einfluss auf das Gerät, die Lebenszykluskosten und unter Umständen auch auf die Umwelt. Techniken, welche das Reibmoment oder den Rollwiderstand verbessern, führen beispielsweise zu einer höheren Effizienz, verbesserten Produktionsprozessen, höherer Lebensdauer und daraus folgend auch zur Schonung der Umwelt [1]. Des Weiteren zeigen Analysen der Lebenszykluskosten, dass der grösste Teil von den Betriebskosten beansprucht wird, im Gegensatz zu den Anschaffungs-, bzw. Entsorgungskosten [2]. Unplanmässige Instandhaltungskosten sind ein integraler Bestandteil der Betriebskosten, was eine adäquate Lebensdauer der einzelnen Bausteine einer Maschine rechtfertigt. Ein Stillstand der Maschine durch Ausfall der Lager führt zu hohen Stillstandskosten, welche es zu vermeiden gilt.

In diesem Artikel wird die Lebensdauer von Wälzlagern untersucht – auf der Basis von erweiterten Berechnungen durch die Berücksichtigung der inneren Geometrie nach internationalen Standards. Denn die Vorhersage der Lebensdauer ist Hauptbestandteil eines erfolgreichen Maschinendesigns.

## Lebensdauerberechnung – theoretischer Hintergrund und Einflussfaktoren

Die Lagerlebensdauer hat eine statistische Bedeutung und ihre Herkunft geht auf die Lundberg-Palmgreen-Theorie [3] zurück. Diese besagt, dass in einer Gruppe gleicher Lager unter gleichen Betriebsbedingungen (Temperatur, Last, Drehzahl und Schmierung) die Anzahl der Lager, welche nach einer gewissen Anzahl Stunden überlebt, von der Stundenzahl abhängig ist. Die Lebensdauer, in welcher 90% der Lager standhalten, wird Basislebensdauer  $L_{10}$  genannt und wird im Allgemeinen von den Lagerherstellern zur Verfügung gestellt. Je höher diese Lebensdauer ist, umso zuverlässiger erreicht ein Lager die geforderte Lebensdauer.

Die klassische Standardberechnung der Lebensdauer beruht auf der ISO 281 [4]. Die Idee hinter dieser Methode besteht in der Bestimmung einer äquivalenten Last aus den Radial- und Axialkräften in Abhängigkeit des Lagertyps (radial oder axial). Hieraus folgt für die Lebensdauer

$$L_{10} = \left( \frac{C_i}{P_i} \right)^n$$

mit  $i=r$  für Radiallager und  $i=a$  für Axiallager,  $C_i$  für die dynamische Tragzahl,  $P_i$  für die dynamische äquivalente Belastung und  $n=3$  für Kugel- sowie  $n=10/3$  für Rollenlager. Die dynamische Tragzahl wird im Allgemeinen vom Lagerhersteller zur Verfügung gestellt, kann aber im Bedarfsfall auch nach den Formeln in [4] berechnet werden, wenn die Lagergeometrie bekannt ist.

Diese Methode genügt nicht, falls eine Betrachtung unter den Aspekten allgemeiner Last (neben Radial- und Axiallast auch Kippmomente), Lagerringfehlstellung und Lagerluft nötig ist. Infolgedessen gibt es einen steigenden Trend zur Berücksichtigung der inneren Geometrie nach ISO/TS 16281 [5]. Bedingt durch die Tatsache, dass solche Methoden sehr rechenintensiv sind, ist in der Praxis die Nutzung spezialisierter Computersoftware üblich. Das Berechnungsprogramm von KISSsoft [6] liefert hierzu ein modular aufgebautes und bedienerfreundliches Werkzeug.

Die Basisprinzipien, beschrieben in der ISO/TS 16281 [5], beinhalten die komplette Analyse der internen Last jedes Rollelements unter Berücksichtigung der inneren Geometrie, des Kippens und/oder der Fehlstellung und Lagerluft. Die nach [5] berechnete Lebensdauer wird Referenzlebensdauer, bei 10% Ausfallwahrscheinlichkeit  $L_{10r}$ , genannt. Der Kontakt zwischen Rollelement und Laufbahn bei Kugellagern wird als Punktkontakt behandelt, wohingegen der Kontakt bei Rollenlagern als Linienkontakt, wie in Bild 1 dargestellt, angenommen wird.

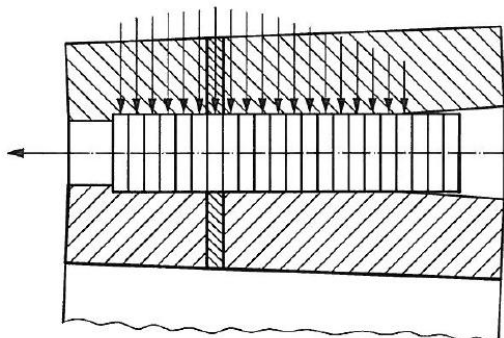


Bild 1: Linienkontakt bei Rollenlagern [5]

Es gibt mehrere Faktoren, welche die Referenzlebensdauer eines Lagers beeinflussen. Für eine gegebene Lastbedingung ist die Hertz'sche Pressung auf der Kontaktfläche des Rollelements grösstenteils vom Radius der Laufbahnrinne des Rings im Querschnitt (für Kugellager) und dem Rollprofil (für Rollenlager) abhängig. Im Allgemeinen führt eine erhöhte Hertz'sche Pressung zu einer Verringerung der Lebensdauer. Jeder Faktor, welcher das Radialspiel beeinflusst – sei es

ein Presssitz des Lagers auf der Welle und/oder im Gehäuse, eine erhöhte Betriebstemperatur und die daraus folgende Expansion des Lagers oder eine lokale Deformation der Lagerringe z.B. durch Gehäuseverformungen – hat einen direkten Einfluss auf die interne Lastverteilung und dadurch auf die Lebensdauer. Die Schmierbedingungen werden durch den ISO-Modifikationsfaktor  $\alpha_{ISO}$  berücksichtigt. Eine 10% abweichende Ausfallwahrscheinlichkeit ist im Modifikationsfaktor für Ausfallwahrscheinlichkeit  $\alpha_1$  nach [4] erfasst. Die modifizierte Referenzlebensdauer wird somit berechnet als

$$L_{nmr} = \alpha_1 \cdot \alpha_{ISO} \cdot L_{10r}$$

## Beispiel einer Anwendung

Es ist hilfreich, die obengenannten Erläuterungen an einem Beispiel aus der Praxis zu zeigen. Zu diesem Zweck wird ein typisches Beispiel aus dem Windenergiesektor herangezogen, wie es in Bild 2 zu sehen ist. Für Windkraftanlagen wird mittlerweile durchweg die Wälzlagerberechnung nach ISO/TS 16281 gefordert. Beim Beispiel handelt es sich um eine Welle aus einer 2 MW Windturbine mit einer Drehzahl von 1750 1/min. Es werden zwei Zylinderrollenlager zum Stützen der signifikanten Radiallast sowie ein Rillenkugellager für die axialen Kraftkomponenten eingesetzt. Die Kupplung der Turbinenflügel auf der rechten Seite und das getriebene Stirnrad (220 mm Teilkreisdurchmesser) auf der linken Seite sind zu erkennen.

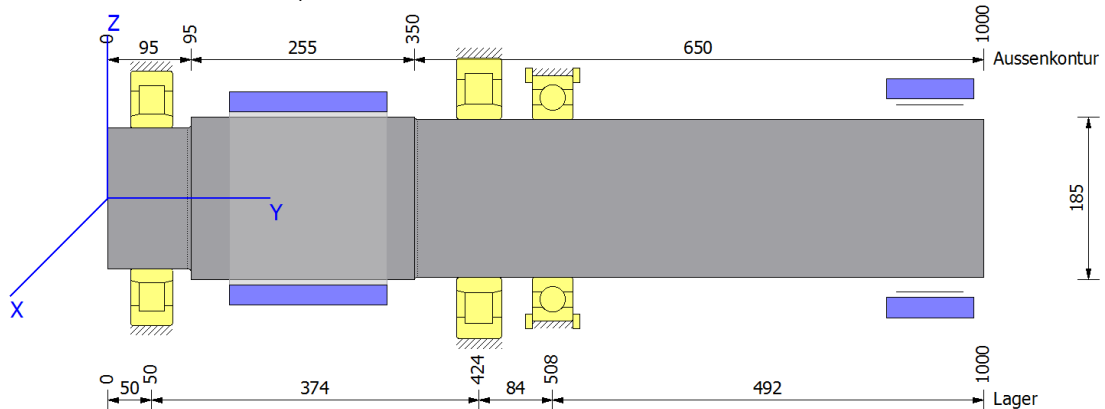


Bild 2 Typische Welle in einer Windturbine

Im idealen Fall, in welchem die Lager perfekt im Gehäuse sitzen, ergibt sich für die modifizierte Referenzlebensdauer der kritischen Radiallager rund 99'000 h für das linke Lager und 736'600 h für das rechte Lager.

Die hohe Lebensdauer des rechten Lagers ist auf die ideale Lastbedingung zurückzuführen, die in realen Anwendungen eher selten vorkommt. Herstellungsfehler sowie Deformationen, bedingt durch Last und Montage, verformen das Gehäuse. Dies hat einen direkten Einfluss auf den Aussenring des Lagers und verursacht dadurch erhöhte Kontaktpressungen zwischen Rollen und Laufbahnen. Die Deformation des Gehäuses kann als Fehlstellung des Aussenrings modelliert werden. Ein kleiner Fehler von  $0.3^\circ$  führt zu einer exzentrischen Belastung, welche wiederum eine hohe Kontaktpressung zur Folge hat. Die Konsequenz ist eine Reduktion der Lagerlebensdauer (modifizierte Referenzlebensdauer) auf rund 8'280 h.

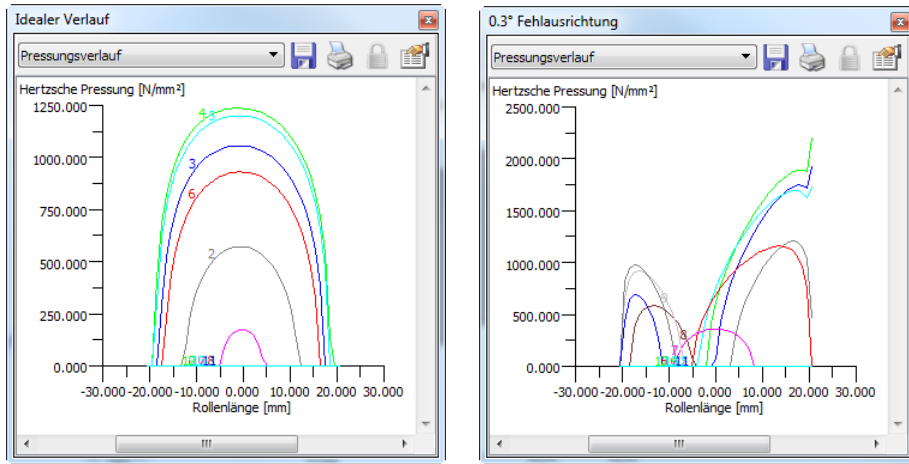


Bild 3 Lastverteilung auf den Rollen des rechten Zylinderrollenlagers der Windturbinenwelle aus Bild 2 (links: idealer Fall; rechts: mit Gehäuseverformungen)

Können solche Montagefehler nicht vermieden werden, so ist in diesem Fall eine potentielle Korrektur der Rollen zu einem optimalen Profil hin möglich. Der Einfachheit halber werden hier die Ergebnisse mit unsymmetrisch profilierten Rollen herangezogen – bei denen die linke Hälfte der Rollen eine standardlogarithmische Profilierung und die rechte Hälfte einen Profilwert aufweist, welcher dem doppelten Wert der logarithmischen Seite entspricht. Der neue Pressungsverlauf (Bild 4) zeigt klar, dass die Spannungsspitzen beseitigt wurden. Die Lebensdauer des Lagers hat sich hierdurch auf rund 26'200 h erhöht. Die durch die neue Profilierung der Rollen erhöhten Herstellungskosten können durch die nun möglichen Einsparungen der Instandhaltungskosten ausgeglichen werden, welche durch die kurze Lebensdauer des rechten Lagers verursacht worden wären.

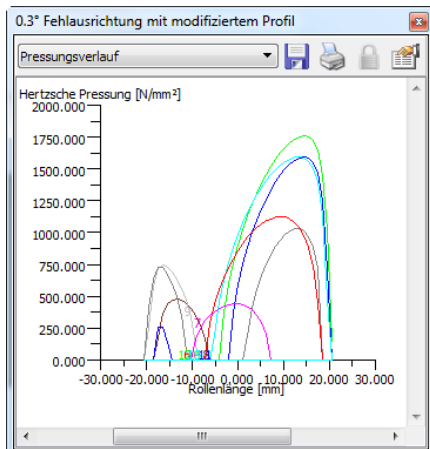


Bild 4 Lastverteilung auf den Rollen bei Berücksichtigung der Fehlstellung und der ausgleichenden Profilierung der Rollen

Fall	Ideal	0.3° Fehlstellung	0.3° Fehlstellung mit Ausgleichsprofilierung der Rollen
Maximale Pressung (N/mm <sup>2</sup> )	1'238	2'196	1'758
Modifizierte Referenzlebensdauer (h)	736'628	8'278	26'214

Tabelle 1 Zusammenfassung der Lastfälle des rechten Zylinderrollenlagers nach Bild 2

Moderne Windkraftanlagen müssen eine lange Lebensdauer erreichen, dürfen aber gleichzeitig nur geringe Wartungskosten verursachen. Betrieb und Wartung sind normalerweise gut kalkulierbar und mit einer zuverlässigen Berechnungssoftware lässt sich die Schadenswahrscheinlichkeit bei Wälzlagern im Vorhinein drastisch reduzieren.

KISSsoft bietet mit der implementierten Berechnungsmethode nach ISO/TS 16281 unter dem Aspekt der geforderten Lebensdauer realitätsnahe Vorhersagen über zukünftiges Verhalten, geforderte Stabilität und Lebensdauer eines Getriebes.

- [1] "Roller Bearing Contribute to the Environment", Japan Bearing Association, Global environment committee
- [2] "A Life Cycle Cost Calculation and Management System for Machine Tools", Rafael Enparantza, Oscar Azkarate, Jose Zendoia, Proceedings of the 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, 2006
- [3] "Roller Bearing Analysis", Tedric A. Harris, John Wiley & Sons, Inc. 2001
- [4] ISO 281, Roller bearings - Dynamic load ratings and rating life, 2007
- [5] ISO/TS 16281, Roller bearings - Methods for calculating the modified reference rating life for universally loaded bearings, 2008
- [6] KISSsoft – Berechnungsprogramme für den Maschinenbau, [www.KISSsoft.AG](http://www.KISSsoft.AG)