

Neue Trends bei Schraubenkompressoren und die sich daraus ergebenden Anforderungen an Wälzlager

Dipl.-Ing. **M. Wahler**, SKF GmbH, Schweinfurt

Kurzfassung

Aufgrund der Leistungsverdichtung der letzten Jahre bei Schraubenkompressoren treten Wälzlager wieder verstärkt als bestimmender Faktor für die Gebrauchsdauer der Maschine auf. Nicht nur die Wahl der richtigen Lagerart, sondern auch des richtigen Käfigs bzw. der Schmierung hat dabei entscheidenden Einfluss. Weitere Trends wie z.B. Mediensmierung oder vermehrte Förderung aggressiver Medien stellen ebenfalls - teilweise neuartige - Anforderungen an die Wälzlager. Mit speziellen Lagerlösungen wie z.B. Hybridlager oder verschleiß- und/oder korrosionsbeständige Lagerwerkstoffe lassen sich auch diese Betriebsbedingungen beherrschen und im Rahmen einer Gesamtkostenbetrachtung ist dies mitunter auch die wirtschaftlichste Lösung.

Abstract

Due to the power increase of the recent years in screw compressors the life of the rolling bearings determine today very often the life of the compressor. Especially of importance in this respect is the correct bearing execution, the cage and the lubrication. Further trends like e.g. special lubrication fluids or increased usage of chemical aggressive fluids result in partly new requirements to the rolling bearing. A possible solution in such cases can be e.g. hybrid bearings or wear and/or corrosion resistant steels. Comparing 'Total Cost of Ownership' such special solutions are many often the most economic ones.

1. Einleitung

Seit einiger Zeit sind bei Schraubenkompressoren Trends erkennbar, die signifikanten Einfluss auf die Auswahl der Wälzlager haben. Einer dieser Trends ist die Leistungsverdichtung. Für die Wälzlager äußert sich dies zum einen durch höhere Drehzahlen aber auch durch höhere Verdichtungsdrücke. Eine andere Herausforderung für die Lagerung ist der Trend zu Mediensmierung bzw. die Förderung aggressiver Medien. Im folgenden wird beispielhaft für bestimmte Betriebsbedingungen die jeweilige Problematik für die Wälzlager erläutert sowie Lösungsmöglichkeiten vorgestellt.

2. Leistungsverdichtung - höhere Drehzahlen

Speziell bei den trockenlaufenden Schraubenkompressoren ist der Trend zu höheren Drehzahlen ungebremst. Je nach Lagerart sind unterschiedlich hohe Drehzahlen realisierbar. Wichtig ist in diesem Zusammenhang der Drehzahlkennwert $n \times d_m$ (Drehzahl multipliziert mit dem mittleren Lagerdurchmesser). Eine Übersicht über das Drehzahlvermögen der unterschiedlichen Lagerarten zeigt Tabelle 1 bis 4. Diese Übersichten dienen als Richtlinie. Unter Berücksichtigung weiterer Betriebsbedingungen wie Temperatur, Schmierung, Belastung, etc. sind Abweichungen möglich. Dies sollte jedoch nur nach Rücksprache mit dem jeweiligen Wälzlagerlieferanten geschehen.

Tabelle 1: Empfohlene Käfigausführung für Schrägkugellager Reihe 72 .. BE, 73 .. BE [1]

Drehzahlkennwert $n \times d_m$	empfohlene Käfigausführung	empfohlene Genauigkeitsklasse (Laufgenauigkeit)
$\leq 450\,000$	P, J,	N
450 000 .. 650 000	M	P6
$> 650\,000$	Sonderausführung erforderlich	

P: Polyamid
J: Stahlblech
M: Messingmassiv

Tabelle 2: Empfohlene Käfigausführung für Vierpunktlager QJ 2.. , QJ 3.. [1]

Drehzahlkennwert $n \times d_m$	empfohlene Käfigausführung	empfohlene Genauigkeitsklasse (Laufgenauigkeit)
$\leq 650\,000$	MA, PHA	N
650 000 .. 1,0 Mio	MA, PHA	P6
1 Mio .. 1,2 Mio	LA, PHA	P5

MA: Messingmassiv
PHA: PEEK
LA: Leichtmetall

Tabelle 3: Empfohlene Käfigausführung für Zylinderrollenlager NU.. [1]

Drehzahlkennwert $n \times d_m$	empfohlene Käfigausführung	empfohlene Genauigkeitsklasse (Laufgenauigkeit)
$\leq 450\,000$	P, J	N
450 000 .. 650 000	P, PHA, ML	N
650 000 .. 1 Mio	ML, PHA	P6
1 Mio .. 1,2 Mio	ML	P6

MA: Messingmassiv
PHA: PEEK
LA: Leichtmetall

Tabelle 4: Empfohlene Käfigausführung für Kegelrollenlager [1]

Drehzahlkennwert n x dm	empfohlene Käfigausführung	empfohlene Genauigkeitsklasse
≤ 450 000	J	Q
450 000 .. 650 000	J	QCL7C
> 650 000	Drehzahl zu hoch	

J: Stahlblech

Mit Ausnahme der Kegelrollenlager (Tabelle 4) ist der jeweils angegebene obere Drehzahlkennwert kein absoluter Grenzwert. Mit geeigneten Maßnahmen wie z.B. spezielle Druckwinkel, spezielle Genauigkeiten, Sonderkäfigen oder keramischen Wälzkörpern sind auch deutlich höhere Drehzahlkennwerte $n \times dm > 1,2$ Millionen mit Wälzlager realisierbar. Solche Sonderausführungen sind für den jeweiligen Anwendungsfall entwickelt und optimiert. Eine allgemeine Übertragung ist daher nicht möglich. Für konkrete Einsatzfälle empfiehlt es sich den jeweiligen Wälzlagerlieferanten zu kontaktieren.

Kegelrollenlager sind aufgrund Ihrer Lagerkinematik und dem daraus resultierenden ausgeprägten Rolle-/Bordkontakt nicht für hohe Drehzahlen geeignet.

Mit steigenden Drehzahlen steigt auch die Bedeutung der Schmierung sowie der Genauigkeit der Umbauteile. Eine entsprechende allgemeine Empfehlung ist in Tabelle 5 und Bild 1 dargestellt.

Tabelle 5: Empfohlene Schmierungsart

Drehzahlkennwert n x dm	empfohlene Schmierung
≤ 850 000	Ölumlaufschmierung
850 000 .. 1,0 Mio	Öleinspritzschmierung
1,0 Mio .. 1,2 (1,4) Mio	Öleinspritzschmierung, Öl-Luft-Schmierung
> 1,2 (1,4) Mio	Öl-Luft-Schmierung

Form- und Lagegenauigkeit von Lagersitzen auf Wellen und in Gehäusen

Tolerierte Fläche Eigenschaft	Symbol für Toleranzart	Toleranz- wert	Zulässige Abweichungen Lager der Toleranzklasse ¹⁾			
			Normal, CLN	P6	P5	
Zylindrischer Sitz						
Zylinderform		t ₁	IT5/2	IT4/2	IT3/2	IT2/2
Gesamtrundlauf		t ₃	IT5/2	IT4/2	IT3/2	IT2/2
Ebene Anlagefläche						
Rechtwinkligkeit		t ₂	IT5	IT4	IT3	IT2
Gesamtplanlauf		t ₄	IT5	IT4	IT3	IT2
Erläuterung						
	Bei normalen Anforderungen					
	Bei besonderen Anforderungen hinsichtlich Laufgenauigkeit oder gleichmäßiger Abstützung					

Bild 1: Form- und Lagegenauigkeit von Lagersitzen auf Wellen und in Gehäusen [2]

Bis zu einem Drehzahlkennwert $n \times d_m \leq 1,2$ Millionen - in Einzelfällen sogar 1,4 Millionen - stellt sich mit einer entsprechend dimensionierten Öleinspritzschmierung ein Wärmegleichgewicht ein. Bei noch höheren Drehzahlkennwerten sind die Reibungsverluste aufgrund der zunehmenden Walkarbeit zu hoch und es ist eine Öl-Luft-Schmierung vorzuziehen. Die Schmiermittelmenge sollte - ausgehend von den ersten Empfehlungen des Wälzlagerherstellers - in Versuchen mit Temperaturüberwachung weiter optimiert werden.

3. Leistungsverdichtung - höhere Verdichtungsdrücke

Bei Kältemittelverdichtern ist der Trend zu höheren Drücken schon einige Zeit zu beobachten, aber auch Sonderanwendungen bei Druckluftkompressoren arbeiten bei erhöhten Verdichtungsdrücken. Dadurch erhöht sich die Belastung für die Lagerung zum Teil signifikant. Mit herkömmlichen Lagerausführungen ergibt sich daher häufig eine zu geringe nominelle Lagerlebensdauer.

Abhilfe schaffen neueste Wälzlagergenerationen wie die SKF EXPLORER Baureihe. Neben anderen Produktweiterentwicklungen kennzeichnen die EXPLORER Lager

- Funktionsflächen mit optimierter Oberflächenform sowie -güte
- Stähle mit höchster Reinheit
- Optimierte und eng kontrollierte Wärmebehandlung und Fertigungsverfahren

Bei gleicher Belastung sind mit der neuen EXPLORER Ausführung durchschnittliche Lebensdauersteigerungen mit dem Faktor 2 bis 3 - abhängig von den weiteren Betriebsbedingungen - gegenüber der vorigen Ausführung möglich.

Die enorme Leistungsverdichtung, die über die Zeit bei Wälzlagerern stattgefunden hat, zeigt Bild 2 am Beispiel der Zylinderrollenlager.

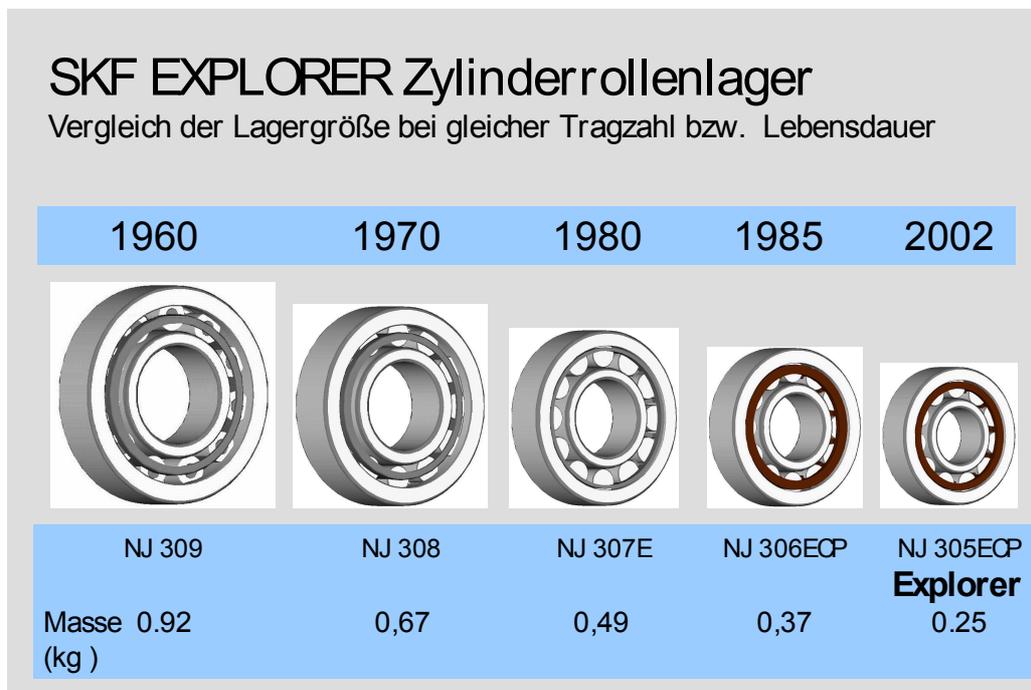


Bild 2: Leistungsverdichtung SKF Zylinderrollenlager über die Zeit

Für Anwendungen in Schraubenkompressoren mit höheren Verdichtungsdrücken bedeutet dies im Umkehrschluss, dass bei gleicher nomineller Lebensdauer die äquivalente dynamische Lagerbelastung um 25% bis 40 % erhöht werden kann!

4. Mediensmierung und/oder Verdichtung chemisch aggressiver Gase

Bei der Verdichtung von Prozessgasen oder auch bei Kältekompressoren sind mitunter aufwändige Dichtungssysteme notwendig, um den Lagerraum vom Verdichtungsraum zu trennen. Andernfalls gefährdet ein Eindringen des jeweiligen Mediums eine ausreichende Schmierung der Wälzlager. Bei bestimmten aggressiven Gasen ist es in Abhängigkeit von der Konzentration auch möglich, dass der Wälzlagerstahl angegriffen wird. Beides kann zu frühzeitigen Lagerausfällen führen.

Da diese Dichtungssysteme einerseits sehr kostenintensiv sind und andererseits auch nicht immer betriebssicher funktionieren, ist der Wunsch der Industrie verständlich auf die Dichtung zu verzichten und die Wälzlager mit dem jeweiligen Medium - pur oder als Ölgemisch - zu schmieren. Einbußen an Lebensdauer bzw. Zuverlässigkeit sollen dabei vermieden werden.

Je nach Art des Gases bzw. Schmiermediums bieten sich verschiedene spezielle Lagerlösungen an. Erfolgt kein chemischer Angriff des Wälzlagerstahls durch das Medium sind Hybridlager hervorragend geeignet, die ungünstigen Schmierungsbedingungen zu neutralisieren. Hybridlager sind definiert als Wälzlager mit Ringen aus Stahl und Wälzkörpern aus Keramik. In der heutigen Zeit kommt hauptsächlich Siliziumnitrid Si_3N_4 zum Einsatz. Bild 3 zeigt einen Vergleich der Materialeigenschaften von Stahl und Siliziumnitrid.

Herausragend ist dabei die deutlich höhere Härte sowie die niedrige Dichte von Si_3N_4 gegenüber herkömmlichem Wälzlagerstahl. Weiterhin besitzt die Materialpaarung Stahl/Siliziumnitrid eine äußerst geringe Affinität hinsichtlich Kaltverschweißung. Dadurch ist adhäsiver Verschleiß nahezu ausgeschlossen. Die Kombination sämtlicher Eigenschaften führt dazu, dass Hybridlager äußerst effektiv unter ungünstigen Schmierungsbedingungen betrieben werden können.

Wälzkörpermaterial	Stahl	Silizium Nitrid	Porzellan
Druckfestigkeit (MPa)	880	3 000	950
Zugfestigkeit (Mpa)	800	800	150
Elastizitätsmodul (Gpa)	210	310	125
Härte (HV 10)	700	1 700	800
Elektrischer Widerstand (Ω cm)	25×10^{-8} Leiter	10^{14} Isolator	10^{12} Isolator
Dichte (g/cm ³)	7,7	3,2	2,9
Thermischer Ausdehnungskoeffizient (10^{-6} K^{-1})	12	3	5

Bild 3: Vergleich der Materialeigenschaften Stahl vs. Keramik

Werden Gase verdichtet, die den Standard Wälzwerkstoff 100Cr6 angreifen, können Sondermaterialien zum Einsatz kommen. Verwendet werden meist korrosionsbeständige Stähle, die jedoch den Nachteil haben, dass die Härte geringer ist als für Wälzwerkstoffe normalerweise erforderlich. Geringere Härte bedeutet geringere nominelle Lebensdauer.

Diesen Nachteil gleicht der neue hochlegierte SKF Stahlwerkstoff VC444 aus. Dieses Material erreicht Härtewerte von $\geq 58 \text{ HRC}$, besitzt ein sehr feines Gefüge, ist extrem verschleißfest und äußerst korrosionsbeständig (s. Bild 4).

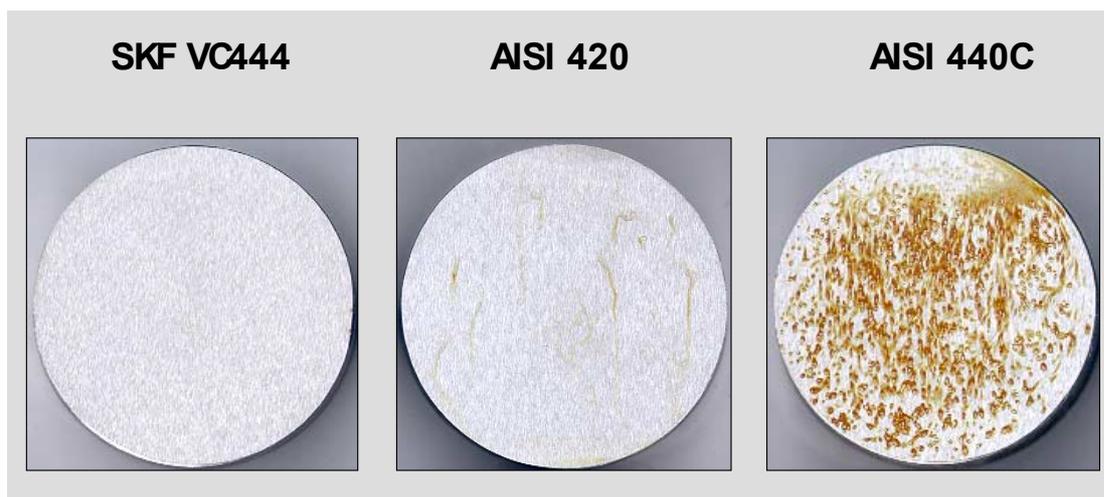


Bild 4: Korrosionsbeständigkeit im Salzspraytest nach DIN 50021

Lebensdauerergleiche zwischen Standardlager, Hybridlager und SKF VC444 plus keramische Wälzkörper zeigen die Bilder 5 und 6.

Obwohl diese Sonderlösungen naturgemäß mit höheren Kosten verbunden sind, sind diese im Rahmen einer Gesamtkostenbetrachtung häufig die wirtschaftlichste Lösung.

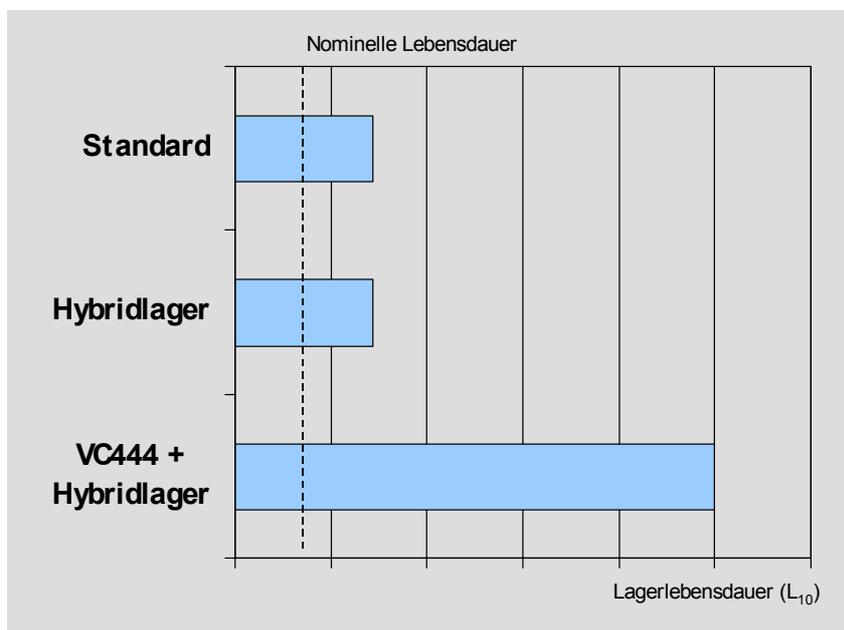


Bild 5: Lebensdauervergleich Hybridlager und VC444: Gute Schmierungsbedingungen

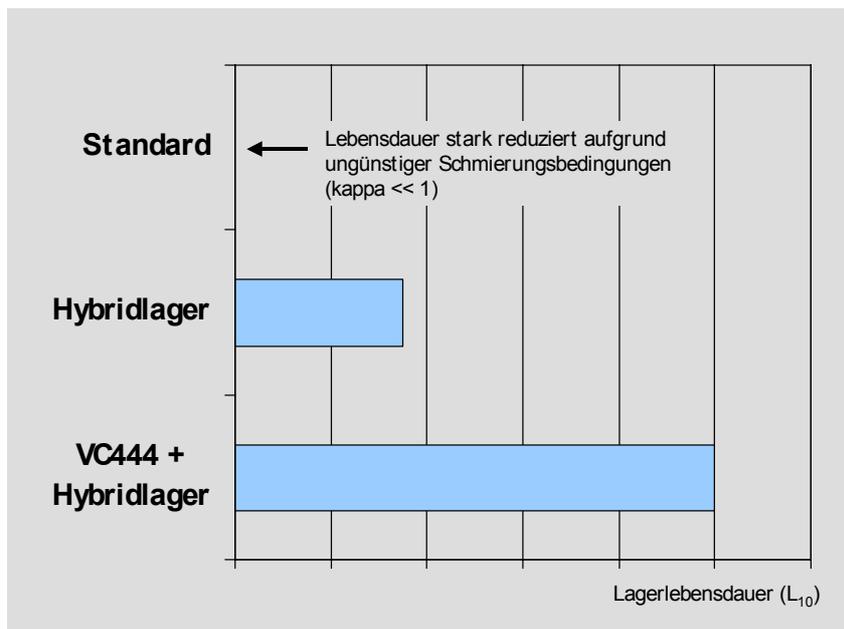


Bild 6: Lebensdauervergleich Hybridlager und VC444: Schlechte Schmierungsbedingungen

5. Literaturangaben

- [1] Bearings in twin screw compressors, application handbook, SKF, USA 1998
- [2] SKF Hauptkatalog, 5000 G, 2004