

Neue Anforderungen an die Wälzlager aus der Weiterentwicklung von Schraubenmaschinen

Auslegung von Wälzlagern für Trockenlauf und Mediensmierung

New requirements for rolling bearings coming from the advanced development of screw machines

Design of rolling bearings for dry running and medium lubricated conditions

Dipl.-Ing. **H.-J. Lange**, Schaeffler KG, Schweinfurt

Kurzfassung

In den vergangenen Jahren haben Anforderungen aus dem Markt nach medienresistenten oder gar trocken laufenden Wälzlagern zu einer Weiterentwicklung dieses Maschinenelements geführt. Mittlerweile gibt es Lösungen für Anwendungen, in denen auch die Lager von Schraubenmaschinen in unterschiedlichen Medien wie Wasser, Dampf, Flüssiggas oder Kältemittel betrieben werden können. Um das zu ermöglichen, muss die Lagergeometrie im Makro- und Mikrobereich auf derartige Anforderungen abgestimmt werden. Dazu gehört eine optimale Innenkonstruktion, die es ermöglicht, auch unter schwierigen Bedingungen eine reibungsarme Funktion zu gewährleisten. Die Weiterentwicklung der möglichen Oberflächenbearbeitung unter Berücksichtigung von verschiedenen Strukturparametern ist ein weiterer Aspekt, um den unterschiedlichen Druck-Viskositäts-Eigenschaften dieser Medien Rechnung zu tragen. Die Kombination unterschiedlicher Werkstoffe für Lagerringe, Wälzkörper und Käfige ist auf die Anwendungen abgestimmt. Der worst case solcher Anwendungen ist sicher der Betrieb von Lagern ganz ohne Medium, wie z. B. bei Schraubenmaschinen in Vakuumanwendungen. Dazu liegen bereits grundsätzliche Erkenntnisse vor. An der Umsetzung dieser Grundsatzkenntnisse für industrielle Anwendungen wird gearbeitet.

Abstract

In the past years market requirements for medium lubricated or even dry running bearings have initiated further development of rolling bearings. Meanwhile there are solutions for applications in which the bearings in screw machines are operating in different environments (e.g. water, steam, liquid gas or refrigerant). To make that possible, the bearing geometry in

the macro and micro area has to be adjusted for such requirements. Therefore, an optimized internal design is required which allows low operating friction under difficult conditions. To accommodate the different pressure viscosity properties of these media the development of surface finish manufacturing techniques to optimize structure parameters must be considered. Material selection for bearing rings, rolling elements and cages are also optimized for the applications. The worst case of such applications is the operation of bearings without lubrication, for example in screw machines for vacuum applications. Also for such conditions basic knowledge exists. The transformation of this knowledge to industrial applications is in progress.

1. Lager in Schraubenkompressoren

Es gibt unterschiedliche Schraubenkompressoren. Im Wesentlichen unterscheidet man öl-eingespritzte und trocken laufende Schrauben. In einigen Anwendungen werden die Schrauben auch mit Wasser betrieben. In allen Fällen erfolgt eine Schmierung der Lager, meist mit Öl.

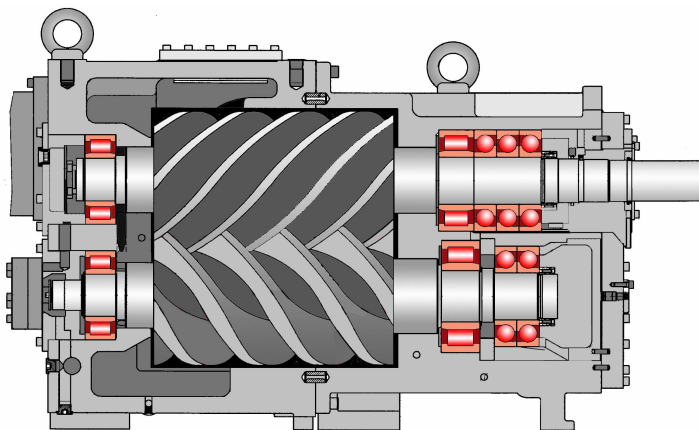


Bild 1: Typischer öleingespritzter Kompressor

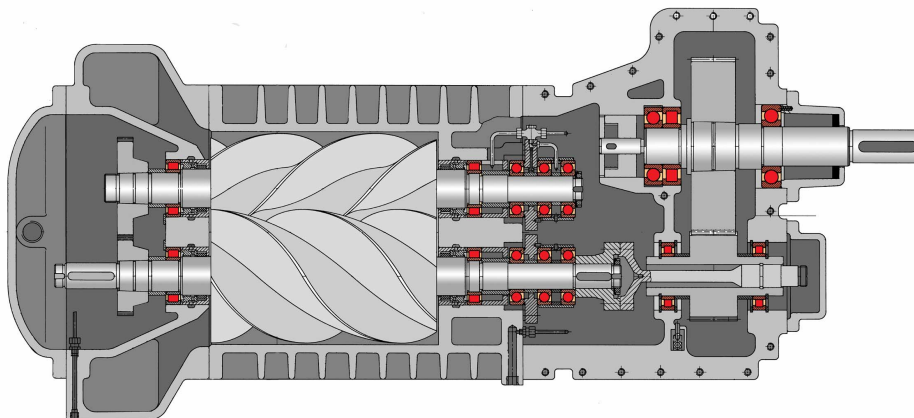
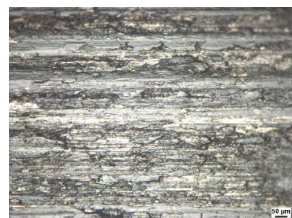


Bild 2: Ölfreier Kompressor

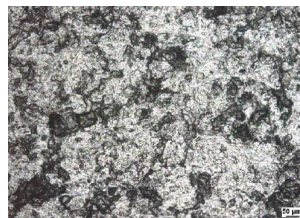
Die Weiterentwicklung der Schraubenkompressoren hat dazu geführt, dass einige Hersteller daran arbeiten, die Lager mit dem Schraubenmedium zu betreiben. So gibt es Kältekompressoren, bei denen auch die Lager mit Kältemittel geschmiert werden. In anderen Kompressoren erwägt man, die Lager und die Schrauben mit Wasser zu kühlen. In seiner Dissertation beschreibt Kliem [2] einen mit Dampf betriebenen Zweiphasen-Schraubenmotor. D. h. in diesem Fall erfolgt auch die Lagerschmierung mit Dampf. Das nächste Ziel besteht darin, für Vakuum-Anwendungen die Lager derartiger Schrauben vollständig ohne Schmierung zu betreiben.

2. Lagerschäden

Was passiert, wenn Standardlager unter derartigen Bedingungen laufen, ist bekannt.



Adhesion



Abrasion



Hot running



Fracture



Corrosion

Bild 3: Typische Wälzlagerschäden

Wälzlager, die bei mäßiger Belastung und Drehzahl gut geschmiert und einwandfrei abgedichtet sind, weisen auch nach langen Betriebszeiten keinen nennenswerten Verschleiß auf, der die Funktion der Lager in Frage stellt. Unter den oben geschilderten Bedingungen ergeben sich ohne ausreichend trennenden Schmierfilm unterschiedliche Schadensmechanismen. In Bild 3 sind einige typische Ausfälle dargestellt, die bei trocken laufenden bzw. mediengeschmierten Wälzlagern entstehen können. Im ersten Bild ist Adhäsion dargestellt. Solche Schäden entstehen, wenn kein ausreichender Schmierfilm die Kontaktflächen trennt und die Funktionsflächen geradezu aneinander kleben. Abrasiver Verschleiß entsteht, wenn Fremdkörper und Verunreinigungen, unter Umständen auch Wälzlagerabrieb selbst, in den

Kontakt gelangen und die Laufflächen förmlich abschmirlen. Hohe Temperaturen entstehen, wenn zu hohe Reibung im Kontakt auftritt und die Wärme durch Fehlen eines geeigneten Mediums nicht richtig abgeführt werden kann. Durch hohe innere Reibung zwischen den Laufbahnen und den Wälzkörpern entstehen dann übermäßige Zwangskräfte, die den Käfig brechen lassen. Das geschieht übrigens auch mit Messingmassivkäfigen, nicht nur mit dem hier dargestellten Polyamidkäfig. Korrosion letztlich ist bei allen trocken laufenden Lagern in Folge von Kondenswasserbildung im Stillstand und in mit korrosionsfördernden Medien geschmierten Lagern ein großes Problem. Die entstehenden harten Eisenoxide wirken abrasiv wie Schmirgel, auch wenn das Lager nicht immer so verrostet ist, wie hier dargestellt.

3. Stand der Technik

3.1 Bekannte Anwendungen

Trotz der geschilderten Probleme beim Betrieb von mediengeschmierten Lagern, gibt es heute bereits einige Anwendungen, die unter ähnlich schwierigen Bedingungen betrieben werden.

3.1.1 Turbopumpen Space Shuttle



Bild 4: Pratt & Whitney high pressure turbo pumps

Seit den neunziger Jahren werden Hybridlager mit Ringen aus Cronidur[®] 30¹ und keramischen Wälzkörpern sowie einem Käfig aus Hochleistungs-Polyamidimid in den Turbopumpen des Spaceshuttles mit flüssigem Sauerstoff und flüssigem Wasserstoff geschmiert.

3.1.2 LNG-Anwendungen

Ähnliche Anforderungen gibt es aber auch im Bereich der LNG- (Liquid Natural Gas) Anwendungen. Methan z. B. ist erst bei minus 163 °C flüssig. Im flüssigen Zustand wird es dann

u. a. auf Schiffen zum Verbraucher transportiert. Die Standard LNG Pumpe wird meist mit Lagerringen aus 440C, Standardkugeln und Sonderkäfigen aus Polyamidimid bestückt.



Bild 5: LNG-Anwendungen

Die Gebrauchsdauer der Lager beträgt etwa ein Jahr. Danach sind die Funktionsflächen so weit verschlissen, dass die Funktion der Pumpe nicht mehr gewährleistet ist.

3.1.3 Archimedische Schraube mit wassergeschmiertem Stützlager

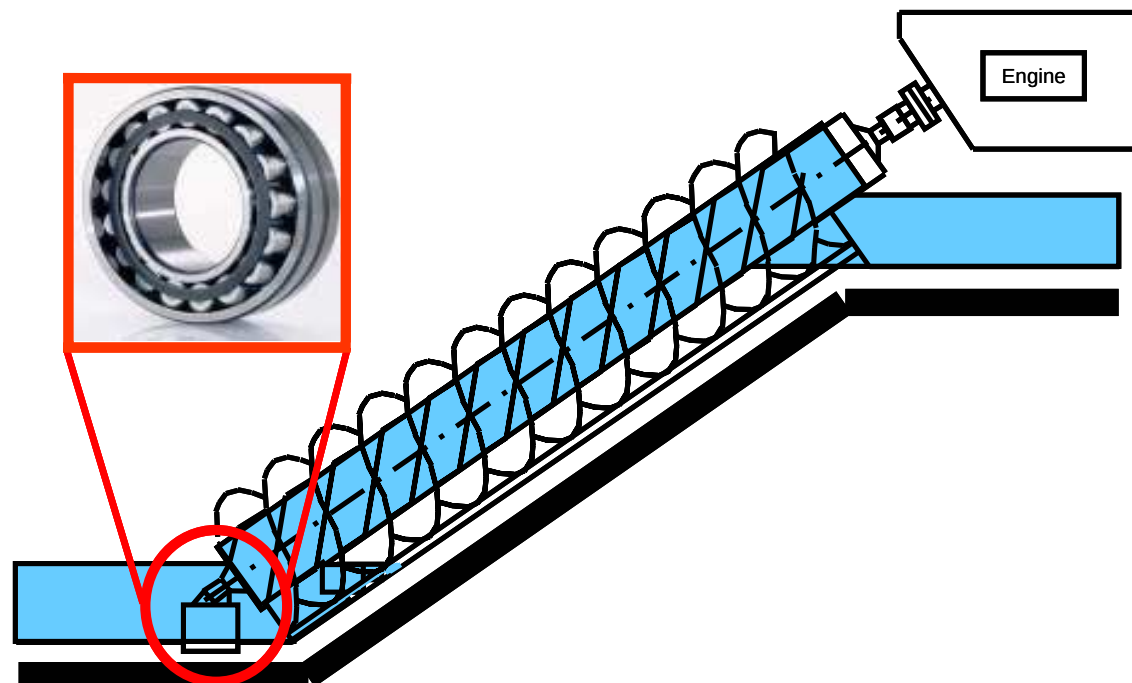


Bild 6: Wasserschnecke

Seit rund fünf Jahren läuft eine Archimedische Schraube zur Energiegewinnung aus Wasserkraft bei Dipach an der Saale. Ringe und Wälzkörper des Stützlagers bestehen aus Cronidur®30. Der Käfig ist ein serienmäßiger PA66 Polyamidkäfig. Die Lasten und Drehzahlen sind gering. Deshalb beeinträchtigen die Gleitanteile, die auch beim Pendelrollenlager auftreten, die Funktion des Lagers nicht.

4. Wälzlagertechnologie

4.1 Allgemeines

Die unter Punkt 2 beschriebenen Schäden treten auf, wenn man Lager unter den dargestellten Anforderungen betreibt. Die Beispiele unter Punkt 3 zeigen aber, dass es sehr wohl funktionierende, kritische Anwendungen gibt. Bild 7 zeigt die wichtigsten Stellgrößen Material, Oberfläche, Geometrie und Schmierung, die man miteinander in Einklang bringen muss, wenn man trocken laufende und mediengeschmierte Lager herstellen möchte.

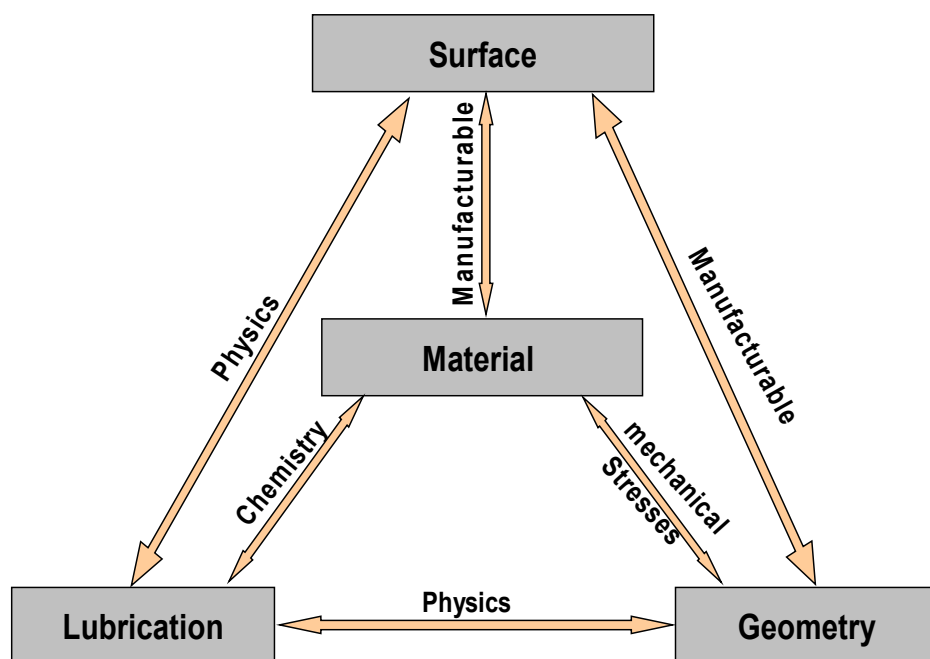


Bild 7: Advanced bearing technology

4.2 Material

4.2.1 Ringe

Den bedeutendsten Anteil in derartigen Anwendungen stellt das Material dar – sowohl für Wälzlagerringe und Wälzkörper als auch für den Käfig. Für die meisten Anwendungen ist Korrosionsbeständigkeit ein wichtiges Merkmal. Gerade wenn die Lager trocken laufen sollen, werden sie durch Luftfeuchtigkeit korrodieren, wenn sie nicht aus entsprechendem Mate-

rial bestehen. Für die Lagerringe und Wälzkörper verfolgen wir den Einsatz von nicht rostenden Stählen wie X30CrMoN151 (Cronidur®30) und X20Cr13. Der in der Schmelze aufgestickte Werkstoff X30CrMoN151 ist sehr hochwertig. Er weist neben der Rostbeständigkeit auch höhere Dauerfestigkeitswerte auf und ist dem Standard-Wälzlagermaterial in der maximalen Betriebstemperatur, Biegezugfestigkeit und Bruchdehnung deutlich überlegen [3]. Bild 8 zeigt das Ergebnis eines Salzprühtests entsprechend DIN 50021 für unterschiedliche Materialien nach 192 Stunden. Geprüft wurden je drei Rollen 8x8 mm aus 100Cr6, dünn-schichtverchromtem 100Cr6, 440C und Cronidur®30.

**SAE 52100****SAE 52100 Thin dense chromium****AISI 440 C****Cronidur30®**

Bild 8: Salzprühtest 192 h

- **hardenability HRC> 58**
- **corrosion resistant**
- **high temperature strength**
- **high contamination stability**
- **low boundary lubrication sensitivity**
- **increased endurance strength**

Bild 9: Eigenschaften X30CrMoN151 (Cronidur30®)

Eine Weiterentwicklung von X30CrMoN151 stellt X20Cr13 in einer speziellen Wärmebehandlung dar. Das Material überzeugt durch ähnliche Eigenschaften wie Cronidur®30 – bei deutlich geringeren Kosten. In verschiedenen Anwendungen hat sich in der Vergangenheit ge-

zeigt, dass es wegen der bei den Wälzlagerschäden bereits beschriebenen Problemen mit der Adhäsion oft nicht sinnvoll ist, gleiche Materialien für Ringe und Wälzkörper zu verwenden. Das geht nur, wenn die Belastungen und Drehzahlen relativ gering sind und kein hoher Gleitanteil vorliegt.

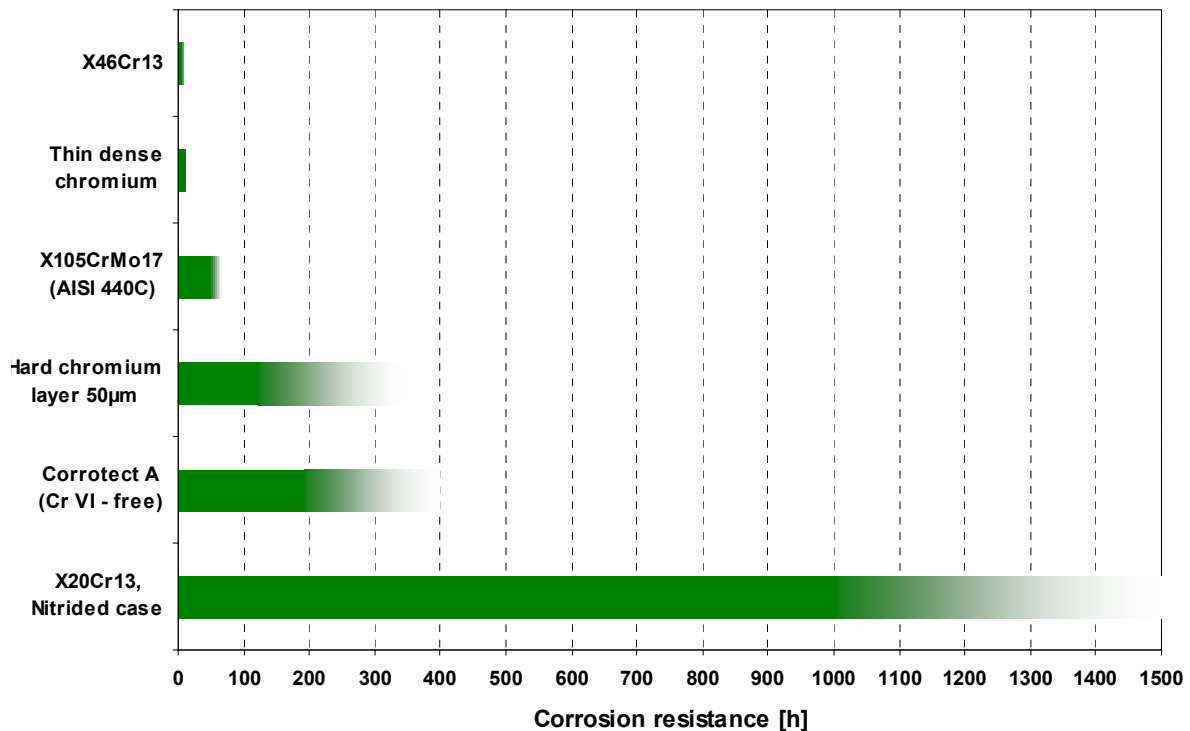


Bild 10: Langzeitsalzsprühtest (salt spray test DIN50021)

Die Alternative zu derartigen Sonderstählen ist Keramik (Si_3N_4). Lagerringe aus Keramik wären ebenfalls eine gute Lösung, wenn die Ankoppelung der keramischen Ringe an die Metall-Umbauteile einfacher zu gestalten wäre. Zudem sind Vollkeramiklager wegen der aufwändigen Bearbeitung vergleichsweise teuer.

4.2.2 Wälzkörper

In Verbindung mit Lagerringen aus Cronidur[®]30 oder X20Cr13 verwendet man Siliziumnitrid Si_3N_4 für die Wälzkörper. Die keramischen Wälzkörper haben den Vorteil der höheren Dauerfestigkeit. Mit einem keramischen Wälzkörper vermeidet man Adhäsion zwischen den Wälzpartnern. Der höhere E-Modul der Keramik erzeugt bei gleicher äußerer Belastung eine kleinere Druckellipse im Kontakt. Das erhöht zwar die Hertz'sche Pressung, ist jedoch von Vorteil in Hinblick auf die entstehende Reibung, die daraus resultierenden Temperaturen und die

Beanspruchung des Mediums im Wälzkontakt. Je kleiner die Ellipse, desto kleiner die Gleitungen und die damit verbundene Oberflächenbeanspruchung im Kontakt.

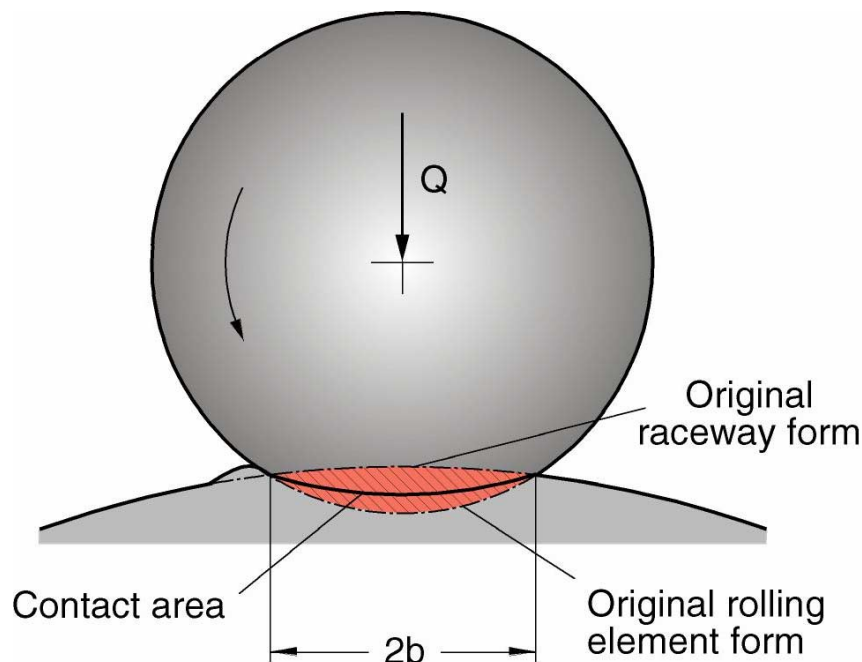


Bild 11: Verformung eines Rollkörpers und der Laufbahn in Rollrichtung

Bild 11 zeigt die Berührungsverhältnisse zwischen einem Rollkörper, z. B. einer Rolle, und der Laufbahn in der Rollrichtung. Wie man sieht, verformen sich beide Körper im Bereich der Druckflächenbreite $2b$; dabei wird die Rolle gestaucht und die Laufbahn gedehnt. Aus den unterschiedlichen Verformungen ergeben sich beim Abrollen Gleitbewegungen, die Reibung hervorrufen [1]. Die Verwendung von Keramikwälzkörpern minimiert diesen Effekt.

4.2.3 Käfig

In einigen Anwendungen ist es vor allem wichtig, dass der Käfig medienbeständig ist und auf die hohen und sehr niedrigen Temperaturen im Einsatz abgestimmt wird. Bei Medien mit geringer Schmierfähigkeit müssen bestimmte Käfigbestandteile die Reibung zwischen den Wälzpartnern verringern. Am ungünstigsten sind dabei Luft oder Vakuum. Bei Trockenlauf muss der Käfig die Schmierung komplett ersetzen. Das heißt das Käfigmaterial beinhaltet unterschiedliche Bestandteile, die im Betrieb über Tausende von Stunden als Feinstabrieb an den Laufbahnen haften und so über einen langen Zeitraum für eine Art kontinuierliche Beschichtung sorgen.

4.3 Geometrie, Innenkonstruktion

Bei der Makrogeometrie geht es vor allem um die Innenkonstruktion der Lager. Unter den dargestellten Bedingungen ist es oberstes Ziel, die Reibung gering zu halten. Das geschieht bei Kugellagern durch die Modifikation des Druckwinkels und der Schmiegun. Bei Zylinderrollenlagern ist es besonders wichtig, die Bordgeometrie so zu gestalten, dass keine hohen Pressungen im Bordkontakt auftreten. Die Erfahrung zeigt, dass die maximale Hertz'sche Pressung begrenzt werden muss. Wie bereits aufgezeigt, ist durch die Verwendung keramischer Wälzkörper die entstehende Pressung höher, so dass im Einzelfall die Konstruktion optimiert werden muss.

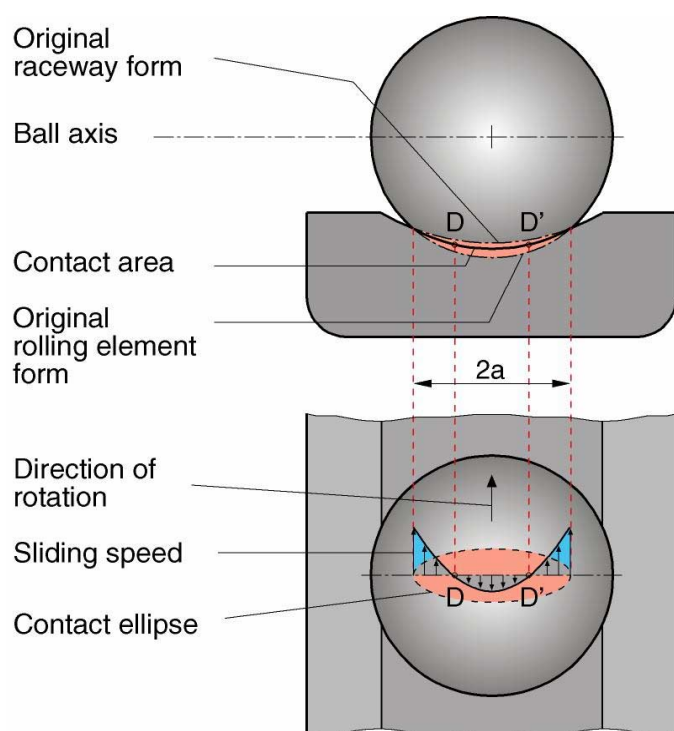


Bild 12: Gleitbewegungen, hervorgerufen durch die Krümmung der Druckfläche

Größere, zusätzliche Gleitbewegungen ergeben sich in der Druckfläche, wenn der Rollkörper in einer Laufrille abrollt und die Druckfläche quer zur Rollrichtung gekrümmt ist (Bild 12). Da der Abstand der einzelnen Druckflächenpunkte von der Kugeldrehachse verschieden ist, sind auch die zugehörigen Umfangsgeschwindigkeiten unterschiedlich. Deshalb gleitet der mittlere Abschnitt der Kugeloberfläche entgegen der Rollrichtung, während die äußeren Abschnitte in Rollrichtung gleiten. Die Gleitungen und die daraus resultierende Reibung zwischen Rollkörper und Laufbahn nehmen mit engerer Schmiegun zu [1].

4.4 Oberfläche

Zum Betrieb von Lagern bei schlechter Schmierung muss grundsätzlich versucht werden, die Oberfläche so zu gestalten, dass auch bei geringen Schmierfilmdicken nach Möglichkeit immer noch ein ausreichender Schmierfilm vorhanden ist.

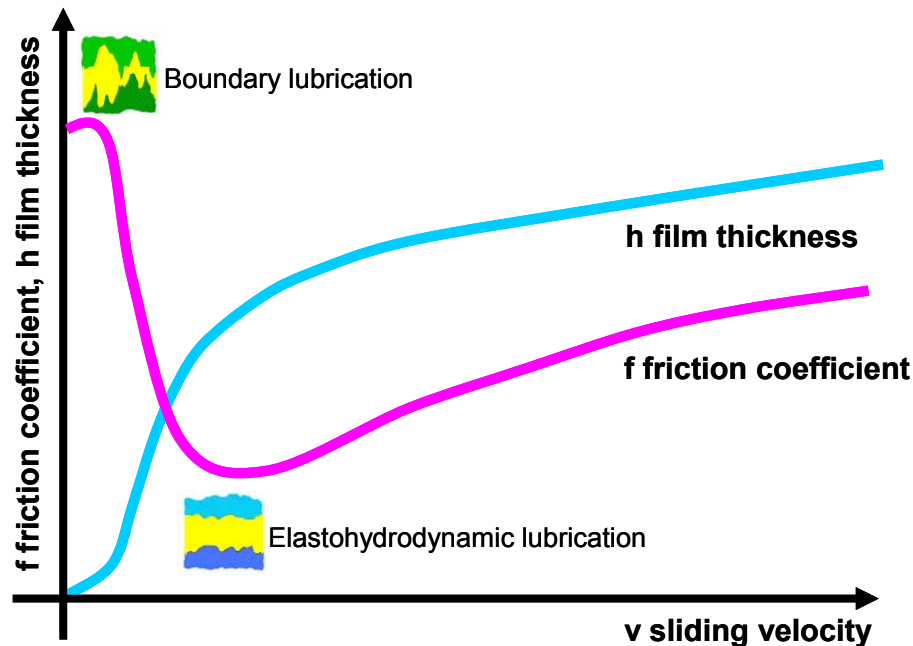


Bild 13: Stribeck Kurve

In den vergangenen Jahren hat sich gerade die Honttechnologie weiterentwickelt. Wie in Bild 14 dargestellt, werden Lagerfunktionsflächen nach dem Schleifen oder Hartdrehen beim Vorfinishen so gehont, dass das neue Profil $>R_{\max}$ unter der ursprünglichen Schleifbearbeitung liegt. [4].

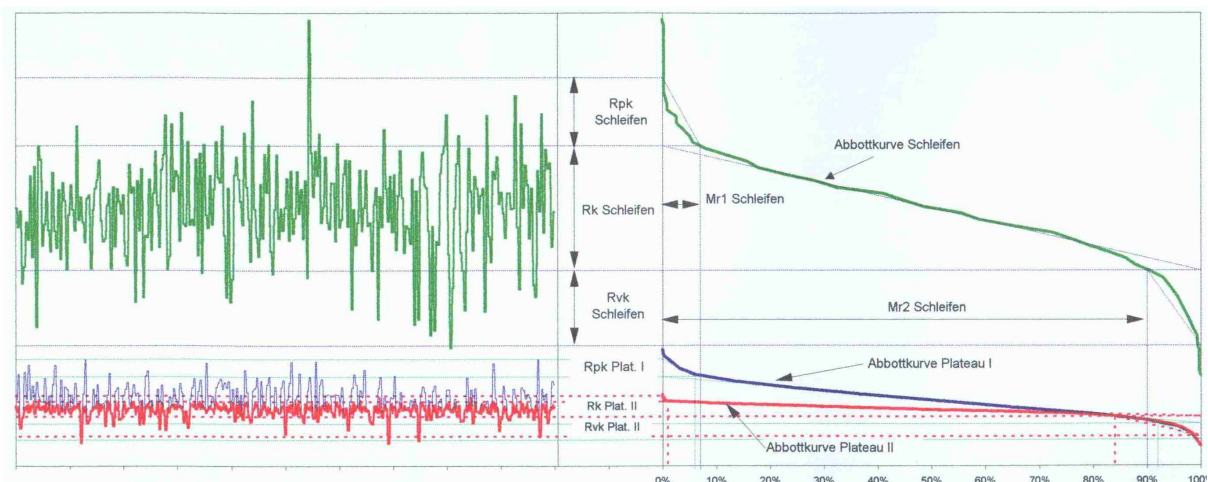


Bild 14: Abbot Kurve nach dem Plateaufinishen (Quelle Supfina)

Ziel ist es, eine Struktur wie in Bild 15 zu erreichen, in der fast keine Spitzen enthalten sind.

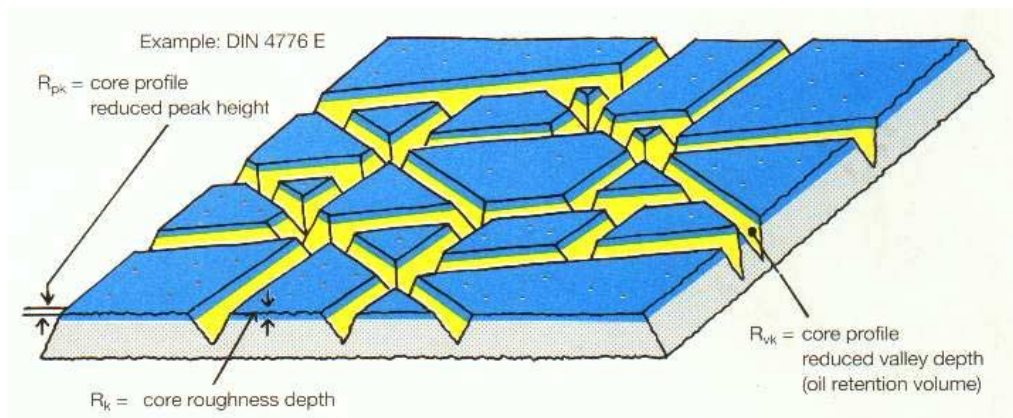


Bild 15: Plateauoberfläche, (Quelle: Supfina)

5. Entwicklungsaktivitäten

5.1 Mediensmierung

5.1.1 Weiterentwicklung LNG-Pumpen

Wegen Leckageproblemen beim Entladen strebt man an, durch besonders leistungsfähige und hochdrehende Pumpen das Erdgas bereits an Bord der Schiffe wieder in den gasförmigen Zustand zu bringen und dann an Land zu pumpen. Bei diesen Drehzahlen in der Größenordnung von ca. $n \times dm$ 1,4 Mio. U/min $\times$ mm werden andere Werkstoffkombinationen benötigt als bei Lagern aus 440C in herkömmlichen Anwendungen. Bei diesen sehr schnell laufenden Lagern wurde die Innenkonstruktion durch kleinere Wälzkörper und einen Fensterkäfig aus Polyamidimid optimiert.

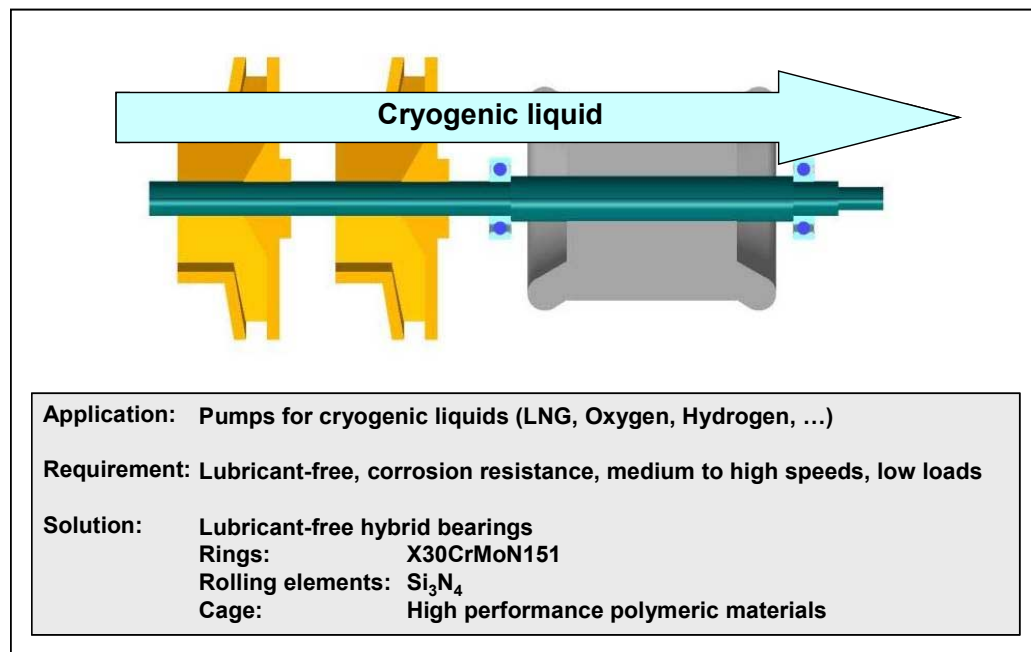


Bild 16: Schnelllaufende LNG-Pumpe

5.1.2 Kältemittelgeschmierte Lager in Kältekompressoren

Wir haben erwähnt, dass z. B. Lager in Kältekompressoren mit Kältemittel geschmiert werden. Kältemittel sind in der Lage, einen Schmierfilm aufzubauen, der deutlich kleiner ist als der eines ölgeschmierten Kontakts. Das liegt an der niedrigen Viskosität des Kältemittels und an seinem geringeren Druck-Viskositäts-Koeffizienten. Mit Hilfe dieses Wissens kann man eine Oberfläche so gestalten, dass auch unter diesen Bedingungen die Kontaktpartner von einem Schmierfilm getrennt gehalten werden. Dazu braucht man eine Oberfläche, die auch bei geringem Druck-Viskositäts-Koeffizienten des Kältemittels einen Schmierfilm ermöglicht.

5.1.3 Schmierung durch Dampf

Eingangs hatten wir den Nassdampfbetriebenen Schraubenmotor erwähnt. Seit längerem wird nach Möglichkeiten gesucht, einen Teil der bisher nur wenig oder überhaupt nicht genutzten Energiepotentiale auf niedrigem Temperaturniveau wie Industrieabwärme, solare und geothermische Wärme wirtschaftlich in mechanische und elektrische Energie zu überführen. Hierzu eignet sich ein Prozess, der Nassdampf in einem Schraubenmotor expandiert [2]. Im Versuch konnte die Funktion der Nassdampfgeschmierten Lager nachgewiesen werden. Das ermöglicht den Betrieb derartiger Maschinen – ohne zusätzlichen Ölkreislauf und weitere Abdichtungen. Das spart Bauraum und erhöht insgesamt die Betriebssicherheit des Aggregats, so dass es sich lohnt, solche Lager bis zur Serienreife weiter zu entwickeln.

5.2 Surface engineering

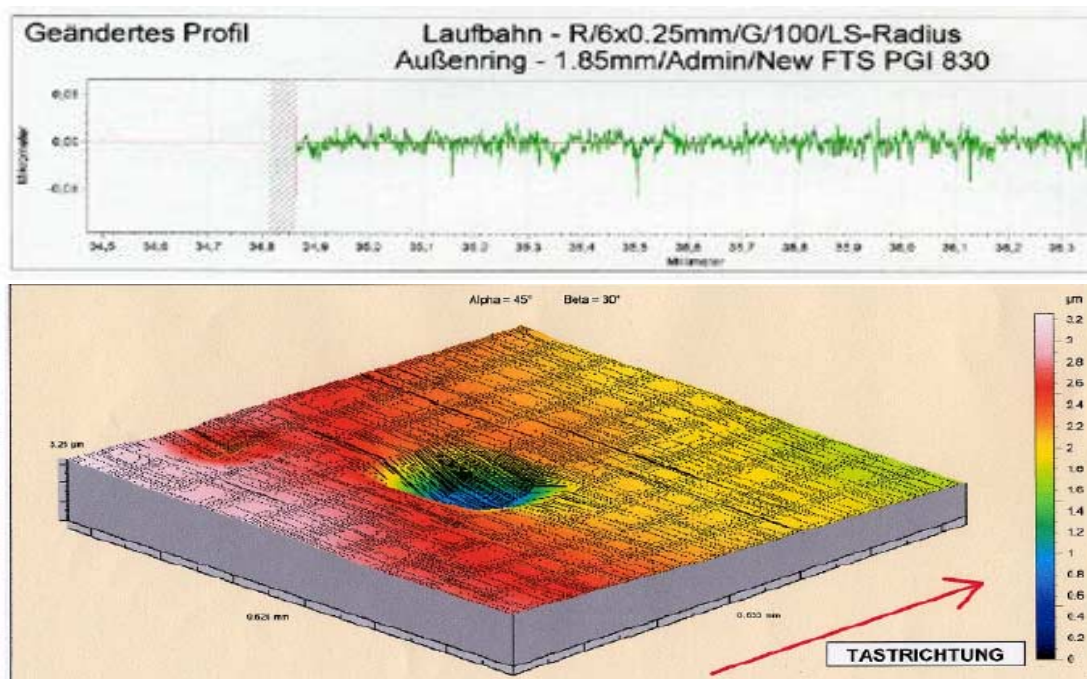
5.2.1 Theorie

Wie unter 4.4 bereits beschrieben, definieren wir anspruchsvolle Oberflächen mit anderen Strukturparametern als R_a . Geringe R_a -Werte sind jedoch nur ein Kriterium. In den zuletzt beschriebenen Anwendungen müssen die Entwickler in der Lage sein, die unterschiedlichen Aspekte der Rauigkeit zu definieren, um dann ihren Einfluss auf das Verhalten im Kontakt zu beschreiben. Diese Aspekte beschränken sich nicht nur auf die statistischen Eigenschaften der Rauigkeit, die z. B. von den Parametern der Abbott-Kurve beschrieben werden können. Sie beinhalten auch spektrale Eigenschaften der Rauigkeit, wie die Orientierung der Oberfläche und deren so genannte Autokorrelations-Länge, die mit den unterliegenden Wellenlängen der Rauheitsspitzen bzw. -tälern verbunden sind. Damit soll es im Voraus möglich sein, verschiedene Oberflächen numerisch zu generieren [5], um dann mit Hilfe von Kontaktmodellen [6] die optimale Oberfläche festzulegen, mit der die Fertigung die Lagerfunktionsflächen für die spezielle Anwendung herstellt.

Wenn man also von Oberflächentopografie spricht, beinhaltet das nicht ausschließlich die Rauigkeit, sondern auch Merkmale wie Matrizen von Dellen irgendeiner Art (Surface Texturing), die den Aufbau eines größeren Schmierfilms ermöglichen.

5.2 Praxis

In Bild 17 ist der Messschrieb eines plateaugefinishten Lagerrings (hier ein IR eines Kegelrollenlagers 30214) dargestellt. Dabei ist der R_a -Wert deutlich $< 0,01 \mu\text{m}$. Der R_{pk} -Wert ist etwa halb so groß wie der R_{vk} -Wert, d. h. selbst innerhalb dieser schon sehr guten Oberfläche sind die Spitzen nur halb so groß wie die Täler. Derartig geringe Werte stoßen bereits an die Grenze der Auflösung technisch üblicher Messgeräte für die Rauigkeit.

Bild 17: Messschrieb $R_a < 0,01$, 3-D Ansicht

5.3 Sour-Gas-Anwendungen

Bei der Erdgasförderung werden häufig Schraubenkompressoren eingesetzt, um das geförderte Gas mit höherem Druck weiterzubefördern. Im Erdgas sind bei Sour-Gas-Anwendungen Schwefelwasserstoffe enthalten, die sich mit Wasser zu Schwefelsäure verbinden. In solchen Kompressoren braucht man Materialien, die über noch bessere Korrosionseigenschaften als Cronidur®30 verfügen. An der Entwicklung entsprechender hochfester Austenite mit Wälzlageeigenschaften wird zurzeit gearbeitet.

5.4 Trockenlauf

5.4.1 Käfigmaterial

Wie beschrieben ist der Trockenlauf der worst case aller möglichen Anwendungen, da weder Schmierung und noch Kühlung zur Verfügung stehen. Die Gestaltung geeigneter Lösungen ist ein weiterer Entwicklungsschwerpunkt. Dabei sind die Auswahl der Materialien und die Optimierung der Lagerinnenkonstruktion von entscheidender Bedeutung. Bild 18 zeigt die Ergebnisse der Laufversuche mit unterschiedlichem Käfigmaterial bei Hybridlagern, also Laufringen aus Standardwälzlagerstahl 100Cr6 und Keramikugeln aus Si_3N_4 . Die Käfige sind einmal aus Standard-Polyamid PA66 und einem modifizierten PEEK Material.

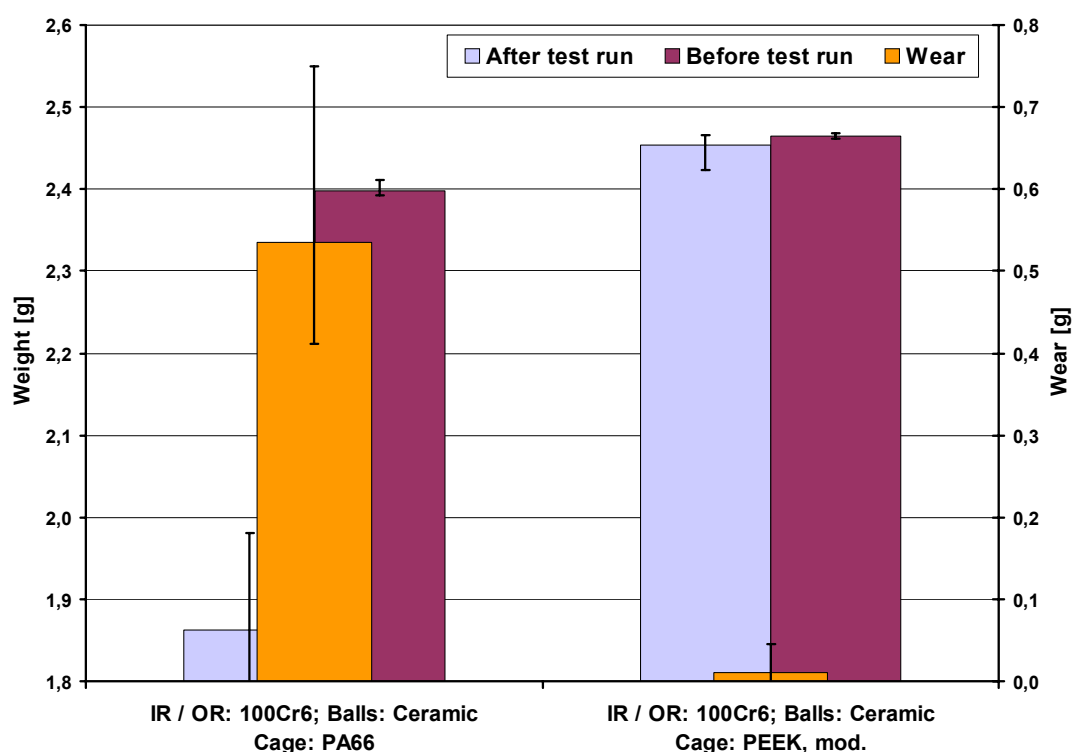


Bild 18: Ergebnisse Trockenlauf Käfigmaterial

5.4.1 Versuchsergebnisse Trockenlauf

Die ersten Ergebnisse aus solchen Trockenlaufversuchen mit Schrägkugellagern FAG 7205B liegen vor. Die Versuche wurden bei $n=1000$ U/min und einer Hertz'schen Pressung von $p_0 = 1350$ Mpa durchgeführt. Um objektive Versuchsergebnisse zu erzielen, ist es notwendig, dass keine Restmengen von Schmierstoff in Umbauteilen oder in der Umgebung vorhanden sind. Wie schon beschrieben, ist Auswahl und Kombination unterschiedlicher Werkstoffe gerade beim Trockenlauf von entscheidender Bedeutung.

Bearing type: ACBB 7205B
Ring: 100Cr6, Standard
Balls: Si_3N_4
Cage: PEEK, mod.

Bearing type: ACBB 7205B
Ring: X20Cr13, nitrided case
Balls: Si_3N_4
Cage: PEEK, mod.

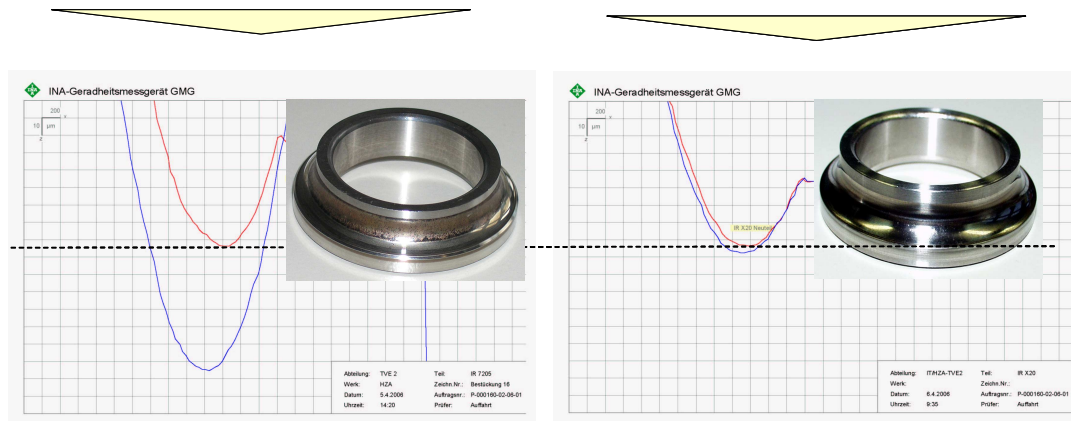


Bild 19: Verschleißergebnisse nach Trockenlauf verschiedener Ringwerkstoffe

In Bild 19 sind die Ergebnisse aus Prüfläufen unter den beschriebenen Randbedingungen dargestellt. Links ist das Standardlager aus Wälzlagerstahl mit Keramikugeln und dem modifizierten PEEK-Käfig zu erkennen. Das rechte Bild zeigt das Ergebnis mit dem besonders wärmebehandelten X20Cr13 und den gleichen Käfigen und Wälzkörpern wie links. Das Ergebnis zeigt, dass bei der richtigen Kombination der Parameter der worst case beherrschbar ist.

6. Fazit

Die beschriebenen Anwendungen und die dafür eingesetzten Wälzlagerlösungen stellen aus heutiger Sicht sicher eine High-Tech-Entwicklung dar. Unsere Erfahrungen aus den vergangenen Jahren zeigen aber, dass derartige Anforderungen zunehmen. Die Lösungsansätze dafür gewinnen an Bedeutung. Die Komplexität einzelner Ausführungen zeigt, dass es bei der Umsetzung eines großen theoretischen und praktischen Know-hows bedarf, um die richtigen Ansätze zu wählen. Mit der Entwicklung derartiger Lösungen und ihrem Einsatz in Pilotanwendungen zeigen sich in einigen Bereichen deutliche Einsparpotentiale für das gesamte Aggregat. Wenn die Maschine um 30 Prozent kostengünstiger hergestellt werden kann, ist der höhere Aufwand für das Maschinenelement Wälzlager vertretbar. Wie bei vielen anderen Anwendungen muss man damit stets das Gesamtsystem betrachten, um die wirtschaftlichste Lösung zu finden.

Literatur

- [1] Brändlein, J. u. a.: Die Wälzlagerpraxis, Mainz: Vereinigte Fachverlage GmbH 1998
- [2] Kliem, B.: Grundlagen des Zweiphasen-Schraubenmotors, Universität Dortmund Diss. 2005
- [3] Bayer, O. u. a.: Leistungssteigerung und Wirtschaftlichkeitsverbesserung bei Hochgenauigkeitslager durch Cronidur®30, HTM 55 (2000) 1 S.41-44
- [4] N.N.: Plateaufinishen, Vorgehensweise, Firmenschrift Supfina
- [5] Bakolas, V.: Numerical generation of arbitrarily oriented non-Gaussian three-dimensional rough surfaces, Wear 254 (2003) S. 546-554
- [6] Bakolas, V.; Mihailidis, A.: Analysis of Rough Line Contacts operating under mixed elastohydrodynamic lubrication conditions, Lubrication Science 16-2, (2004) 16 S. 153-168