

Keramische Werkstoffe in Wälzlagern – Siliziumnitrid für gesteigerte Anwendungen

**hightech ceram Dr. Steinmann
+ Partner GmbH**

Lühbergstr. 2 · 53945 Blankenheim

Tel.: +49 2449 911003

Fax: +49 2449 911005

Mail: info@hightech-ceram.de

Web: www.hightech-ceram.net

Einleitung

Bereits in den 70'er Jahren wurden die ersten Kugeln aus Siliziumnitrid (Si_3N_4) mittels heißpressen hergestellt und getestet. Die extrem aufwendige und teure Technologie war jedoch wenig geeignet für die Anwendung in Wälzlagern. Mit Aufkommen der Sinterertechnologie Ende der 70'er Jahre konnten zwar Fortschritte bezüglich Aufwand und Kosten gemacht werden, aber die Restporosität im Werkstoff hat die Eignung zumindest als Wälzkörperwerkstoff verhindert. Erst durch die Heißisostat-Pressetechnik Ende der 80'er Jahre gelang es nahezu porenfreie Si_3N_4 -Kugeln zu erzeugen, die das Potential als Wälzlagerkugel hatten, insbesondere, wenn sie frei von inneren Defekten, besonders aber von Oberflächendefekten waren. Auch wenn die Vorteile des Materials gegenüber den Stahlkugeln – deutlich geringeres Gewicht, höhere Härte und Steifigkeit, glattere Oberfläche, niedrigere Wärmedehnung, hoher elektrischer Widerstand und hohe Korrosionsfestigkeit – eindeutig waren, war die Nachfrage nach diesen Kugeln gering und dies hat die Herstellungskosten hochgetrieben und somit Preise unattraktiv für den Wälzlagereinsatz gemacht. Nur in Ausnahmefällen, wenn es keine andere Lösung gab, kamen Kugeln aus Si_3N_4 zum Einsatz. Die positiven Erfahrungen, die man bei diesen Einsätzen gemacht hat, haben mehr und mehr überzeugt und weitere Anwendungen aufgetan. Der richtige Durchbruch erfolgte dann Ende der 90'er Jahre. Mehr und mehr Firmen haben sich für die Si_3N_4 Kugeln interessiert und eine stetige Nachfrage mit immer höherem Kugelbedarf hat die Kosten und damit auch die Preise gesenkt und mit sinkenden Preisen kamen weitere Anwendungen hinzu was sich wiederum auf die Nachfrage und Kostensenkung ausgewirkt hat. Heute sind Si_3N_4 Kugeln aus sehr vielen, insbesondere hochbelasteten Anwendungen nicht mehr wegzudenken. Die Preise sind jedoch für Anwendungen mit geringeren Belastungen noch zu hoch. Daher hat man seit einigen Jahren versucht die Sinterertechnik so zu optimieren, dass man auf das Heißisostatpressen verzichten kann. Verbesserte Ausgangspulver und immer bessere Anlagentechnik (Gasdrucksinteranlagen mit extrem guter Temperaturkontrolle) haben seit etwa einem Jahr dazu geführt, dass auch gasdruckgesinterte Si_3N_4 -Kugeln die Anforderungen als Wälzlagerkugeln für viele Anforderungen erfüllen, wodurch auch die Kosten weiter gesenkt werden konnten. Dadurch können die Kugeln nun in immer mehr Anwendungen eingesetzt werden. Heute stehen ca. 700 Millionen Si_3N_4 -Keramikkugeln 100 Milliarden Stahlkugeln gegenüber. Bei dem deutlich geringeren Stahlkugelpreis (<1-5% vom Keramikkugelpreis) wird ein maximales Umstellungspotential von 2% = 2 Milliarden Keramikkugeln gesehen. Heute sind die hohe Zuverlässigkeit und Erschwinglichkeit die Hauptgründe für das Wachstum des Keramikkugelbedarfs zu sehen. Die Hauptwachstumsmärkte sind Europa, Japan, USA und China mit den Anwendungen: Automobilindustrie, Werkzeugmaschinen, Dental, Elektromotor, Windenergie

Herstellung von Si₃N₄ Kugeln

Mit der neuesten Gasdrucksinter-technologie haben sich 3 Verfahren zur Herstellung von Si₃N₄ Kugeln durchgesetzt.

1. Das direkte Heiisostatpressen, d.h. Sintern, Druckverdichten bei 2000 bar von gepressten, ungesinterten, glasgekapselten Kugelrohlingen. Die Glaskapsel wirkt wie eine Membran und verhindert das Eindringen des gasformigen Druckmediums in den porosen Pressling. Mit diesem Verfahren wird die beste, nahezu porenfreie Qualität erreicht.
2. Das indirekte Heiisostatpressen, d.h. die gepressten, ungesinterten Kugelrohlinge werden zunächst in herkömmlichen Gasdrucksinteranlagen gesintert, so dass sie eine geschlossene Porosität aufweisen. Danach erfolgt dann das Heiisostatpressen bei 2000 bar, um die Restporosität noch weiter zu verringern. Kugeln, die nach diesem Verfahren hergestellt werden, kommen der Qualität des zuerst genannten Verfahrens sehr nahe.
3. Das optimierte Gasdrucksintern, d.h. Sintern unter geringerem Gasdruck bis maximal 100 bar. Eine fur die Wälzlagertechnik notwendige Qualität wird aber nur erreicht, wenn ein sehr gutes Ausgangspulver zusammen mit einer optimalen Kombination der Sinterzustze unter extrem gut kontrollierten Sinterbedingungen gesintert wird.

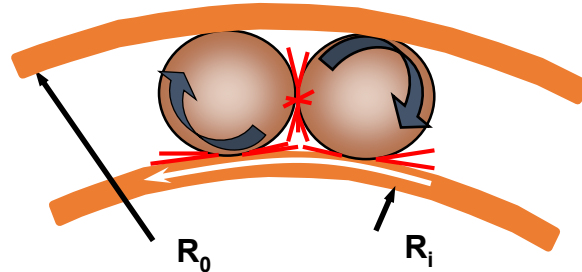
Die so hergestellten Qualitäten der Si₃N₄-Kugeln sind jedoch nur so gut wie es das eingesetzte Si₃N₄-Ausgangspulver, die Aufbereitung zusammen mit den Sinteradditiven und Zusätzen und die Qualität der Endbearbeitung erlauben. Defekte wie Poren, Einschlüsse von Verunreinigungen, Risse, Kratzer usw. sind zu vermeiden bzw. auszusortieren. Auch wenn Einschlüsse im Inneren der Kugel weniger kritisch sind, so sind sie jedoch an der Oberfläche oder knapp unter der Kugeloberfläche als kritisch anzusehen. Kritisch ist auch alles was die Oberfläche der Kugel durchbricht. Daher ist, trotz allen Prüfungen nach jedem einzelnen Verfahrensschritt, eine 100%-Prüfung der geschliffenen Kugeln erforderlich und fehlerhafte Kugeln, je nach vorgegebener Spezifikation, sind auszusortieren.

Hybridlager

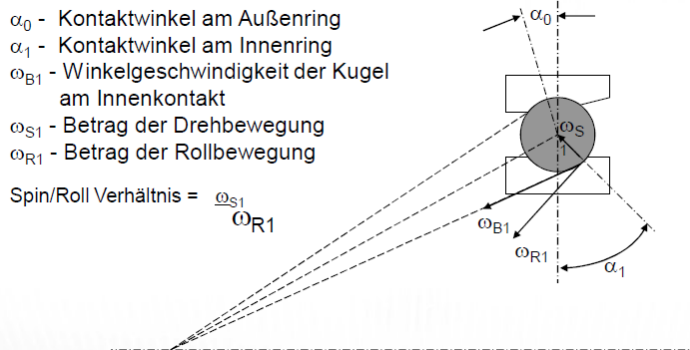
Hybridlager sind Stahlkugellager die aber an Stelle von Stahlkugeln Si₃N₄-Kugeln enthalten. Diese Si₃N₄-Kugeln bieten viele Verbesserungen gegenuber den Stahlkugeln. Die bereits in der Einführung genannte Kombination der Charakteristiken wie hohere Steifigkeit, hohere Härte, geringeres Gewicht, besseres Oberflächenfinish und Kugelgeometrie, führen zu einer reduzierten Erwärmung, was wieder zu einer kühleren Lager- und Schmiermitteltemperatur führt. Der elektrische Widerstand und der hohe Korrosionswiderstand in Kombination mit den anderen Kugelattributen hilft die Möglichkeiten der Schmierung zu erweitern. Alle diese Vorteile erlauben eine hohere Lagergeschwindigkeit und führen zu einer längeren Lebensdauer. Hybridlager setzen somit klar den Standard für hohere Bearbeitungsleistung, geringere Ausfallzeiten und geringere Gesamtbearbeitungskosten.

Kugelbewegung im Lager

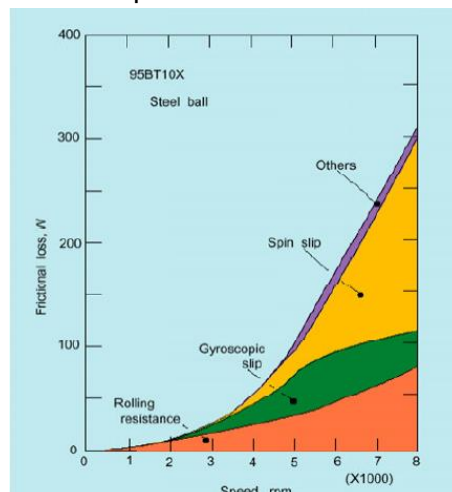
Eine Kugel kann sich ungehindert in alle drei Achsen bewegen. Im Lager erfährt sie jedoch durch den Punktkontakt neben Rollen auch Gleiten und Rutschen.



Durch die unterschiedlichen Kontaktwinkel der Kugel zum Außenring α_0 und Innenring α_1 kommt es bei höheren Geschwindigkeiten (Drehzahlen) zu Zentrifugalkräften, die überlagert werden von der Vorspannung und Kräfte die von außen auf das Lager einwirken. Dadurch ergeben sich durch die Winkelgeschwindigkeit am Innenringkontakt ω_{B1} zwei Komponenten, die Gleitkomponente mit dem Betrag der Drehbewegung ω_{S1} und dem Betrag der Rollbewegung ω_{R1} . Das Verhältnis der beiden Geschwindigkeiten wird als Spin/Roll Verhältnis = ω_{S1}/ω_{R1} bezeichnet. Wenn die Geschwindigkeit zunimmt, nimmt auch das Spin/Roll-Verhältnis zu, was zu höherer Reibung und Wärmebildung führt und begleitet wird durch höhere Oberflächenbeanspruchung. Tests haben gezeigt, dass das Spin/Roll Verhältnis ein Anzeichen für Verschleiß ist, und dass ein maximales Spin-Roll Verhältnis 0,47 beträgt. Oberhalb dieses Verhältnisses muss mit signifikantem Verschleiß gerechnet werden.



Die Reibungsverluste setzen sich unter anderem zusammen aus dem Rollwiderstand, dem gyroskopischen Gleiten, dem Gleitschlupf.

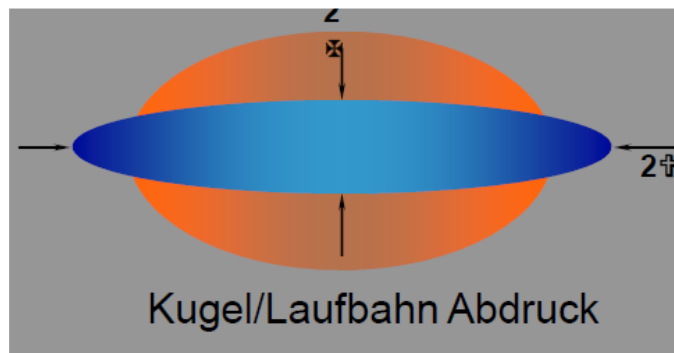


Der Effekt durch Rutschen und Gleiten der Kugeln in einem Lager wirkt sich stark auf die Lebensdauer, Geschwindigkeit und Effizienz aus. Wenn Stahlkugeln auf einer Laufbahn gleiten, führt dies zu Mikro-Verschweißungen oder kalte Adhäsion durch den Stahl-auf-Stahl Kontakt. Dadurch kommt es zur Beschädigung der Oberflächen von Kugel und Laufbahn, wodurch der Verschleiß der Kugel und der Laufbahn weiter beschleunigt wird. Diese Beschädigung führt zur Kontamination der Schmierung und Erhöhung der Lagertemperatur, was wiederum die Schmierleistung verschlechtert.

Da Siliziumnitrid und Stahl eine unterschiedliche Molekularstruktur haben, wird Verschleiß und Adhäsion eliminiert. Bleiben die Kugeln intakt, reduziert sich die Beschädigung. Kühlere, glattere Kontaktoberflächen sind das Ergebnis und die Schmierfähigkeit wird verlängert. Die hohe Kugelhärte hilft Verunreinigungen aus der Laufbahn zu „stoßen“. Die Katalyse von Schmierstoffen auf Basis Kohlenwasserstoff ist signifikant reduziert und dadurch der Reibverschleiß deutlich reduziert.

Eine bessere Oberflächengüte der Kugel, bessere Geometriestabilität durch höhere Steifigkeit sowie ein höherer Verschleißwiderstand ergeben einen bis zu 70% geringeren Gleitreibungskoeffizienten, d.h. geringere Reibung, Wärmeerzeugung und Kugel-/Laufbahn-verschleiß, sowie eine höhere Präzision was zu einer besseren Lagergeometrie, geringerer Vibration und dadurch zu geringerem Geräusch und längerer Lebensdauer führt. Hybridlager kommen daher auch mit einer geringeren Schmierfilmdicke zurecht, d.h. die Schmierung ist unproblematischer.

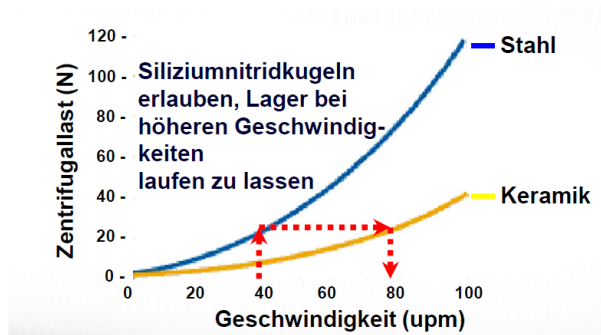
Si_3N_4 Kugeln sind 50% steifer als Stahlkugeln. Dies führt zu einer kleineren Kontaktellipse der Kugel auf der Laufbahn.



Dadurch ist der Kontaktabdruck zwischen Kugel und Laufbahn deutlich näher und etwas länger als im Stahl-auf-Stahl System. Der kleinere Kontaktabdruck (Kontaktfläche) bedeutet das ein geringerer Kontakt zwischen Kugel und Laufbahn existiert, was zu geringerer Reibung und Wärmeentwicklung im Lager führt, auch wenn weiterhin Rutschen und Gleiten vorkommt.

Si_3N_4 Kugeln sind 60% leichter als Stahlkugeln. Steigende Drehzahl führt zu steigender Belastung des Außenringes durch die Fliehkräfte und führt letztendlich zum Versagen durch Übermüdung des Stahls. Das geringere Gewicht der Si_3N_4 Kugeln reduziert die Spannungen auf der Laufbahn und ermöglicht dadurch höhere Geschwindigkeiten. Das gyroskopische Moment, erzeugt durch die X,Y,Z Bewegung der Kugel ist gleichermaßen signifikant reduziert bei höheren Geschwindigkeiten, was zu verringertem Rutschen im Lager führt. Rutschen ist die hauptsächliche Quelle für interne Lagererhitzung und Laufbahnverschleiß. Keramikkugeln mit ihrer niedrigeren Dichte haben einen beträchtlichen Vorteil gegenüber Stahlkugeln hinsichtlich des Spin/Roll Verhältnisses. Über einen Bereich konstanter Vorspannungen ist die theoretische Maximalgeschwindigkeit von Hybridlagern gegenüber Stahllagern ca. 40% höher, ohne das Spin/Roll Verhältnis von 0,47 zu übersteigen.

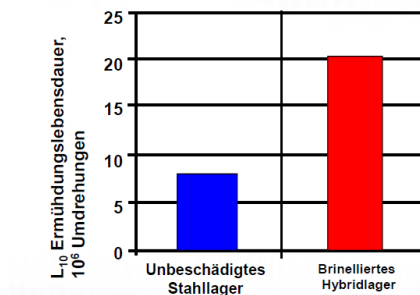
Durch die geringere Dichte der Si₃N₄-Kugeln gegenüber Stahlkugeln, kann die Geschwindigkeit deutlich erhöht werden ohne die Zentrifugallast zu erhöhen. Das Versuchsergebnis von SKF zeigt das nachfolgende Bild.



Die höhere Härte und bessere Oberfläche der Si₃N₄-Kugeln

- Typische Laufbahnoberfläche: ~0,025-0,05 µm RA
- Typische Si₃N₄ Kugeloberfläche: < 0.004 µm RA
- Typische Stahlkugeloberfläche: ~0.02 -0,05 µm RA

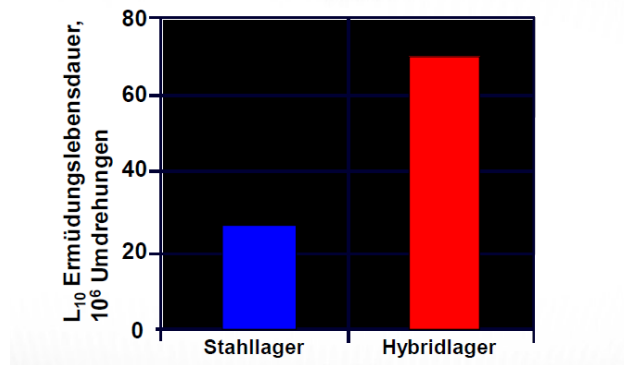
führen dazu, dass sich die Oberflächen der Laufbahnen und sogar beschädigte Oberflächen glätten, mit dem Ergebnis, dass selbst Hybridlager mit beschädigten Laufbahnen eine dreifache Lebensdauer gegenüber unbeschädigten Stahllagern haben. SKF hat einen Test mit brinellierten Laufbahnen durchgeführt. Das Ergebnis ist im nachfolgenden Bild zu sehen.



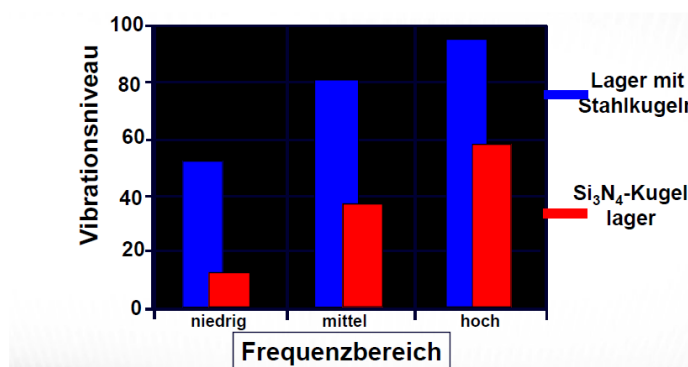
Durch die zuvor genannten positiven Eigenschaften der Si₃N₄-Kugeln gegenüber den Stahlkugeln im Lager kommt es zu einem sehr deutlich reduzierten Lauftringverschleiß, wie SKF in Versuchen nachgewiesen hat (siehe nachfolgenden Grafik).



Ein weiterer Versuch wurde in kontaminiertem Öl durchgeführt und auch hier übertreffen die Hybridlager entsprechende Stahllager in der Ermüdungslebensdauer um mehr als das Dreifache.



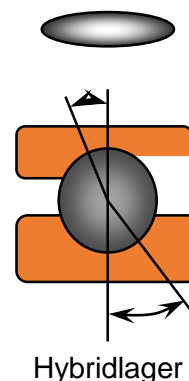
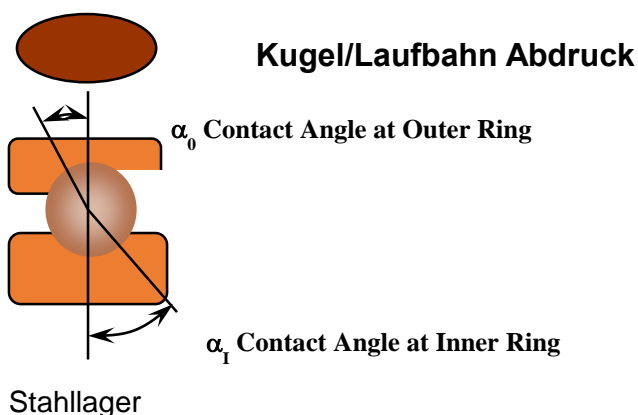
Auch bei unterschiedlichen Frequenzen ist das Vibrationsniveau in Hybridlagern deutlich niedriger als in Stahllagern.



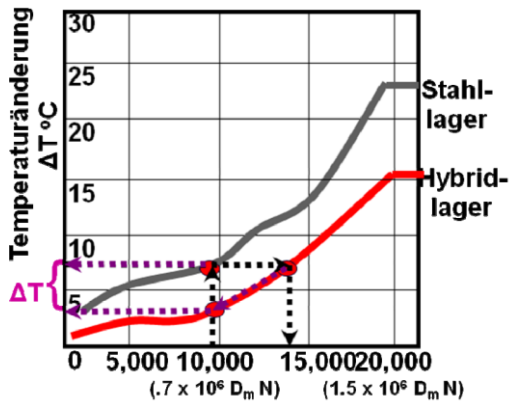
Effekte durch Geschwindigkeitszunahme auf Lager mit Stahlkugeln und Si₃N₄-Kugeln

Der Kontaktabdruck Kugel/Laufbahn vergrößert sich deutlich. Der Lagerkontakt-Winkel verschiebt sich bei steigender Temperatur

Der Kontaktabdruck Kugel/Laufbahn bleibt klein. Die Kugel bleibt stabil.



Dies führt beim Stahllager zu einer vergrößerten Kontaktellipse, erhöhter Reibung, einem System-Temperaturanstieg, Verringerung der Geschwindigkeit und einer kürzeren Lebensdauer. Im Hybridlager haben wir einen messbar geringeren System-Temperaturanstieg, eine höhere Geschwindigkeit und ein längeres Lagerleben.



Siliziumnitridkugeln erlauben eine höhere Lagergeschwindigkeit oder aber bei gleicher Geschwindigkeit stellt sich eine geringere Arbeits- oder Lagertemperatur ein.

Lagerdrehzahl upm

Siliziumnitrid ist 50% steifer als Stahl und ändert sich auch nicht mit steigender Temperatur. Diese Eigenschaft erhöht die Radialsteifigkeit von Lagern, z.B. Werkzeugmaschinenlagern bei höheren Geschwindigkeiten, da sich die Kugeln bei höheren Temperaturen nicht deformieren. Zusätzlich sind die Laufbahnen kühler, was wiederum eine Auswirkung auf die Deformation und somit die Lagersteifigkeit hat. Als Ergebnis bekommt man längere Laufzeiten und präzisere Lager.

Anwendungsbeispiele von Hybridlagern

Siliziumnitridkugeln werden dann von Konstrukteuren verwendet, wenn es sich um schwierige und oft kritische Lageranwendungen handelt. Von Flüssigsauerstoffpumpen in Raketen und Raumschiffen, Flügelklappen-Kugelgewindelager bei Boeing und Airbus, Satelliten und Dentallager bis zu Inline Skates verwenden Ingenieure Siliziumnitridkugeln, um die Lagerleistung zu maximieren.

- # Pumpen für flüssigen O₂ – Space Shuttle – Grund: Zuverlässigkeit
- # Dental Handstücke – bis 500.000 upm – Grund: Haltbarkeit
- # Langstreckensatelliten – Grund: kritischer Missionserfolg
- # Werkzeugmaschinen-spindeln – Grund: Geschwindigkeit + Sicherheit
- # Werkzeugmaschinen-Gewindespindeln – Grund: höhere Geschwindigkeit + Lebensdauer
- # Kugelgewindespindeln- Grund: Geschwindigkeit, Haltbarkeit, Korrosionswiderstand
→ Boeing 777, 737 & Airbus Flügelklappen – längere Lebensdauer
- # Inline Skates – Grund: geringeres Anlaufmoment und weniger Reibung

Man kann also mit Fug und Recht sagen, dass Ingenieure immer Si₃N₄-Kugeln verwenden, wenn Lager zuverlässig und langfristig funktionieren müssen.

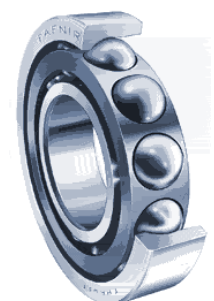
Weitere Anwendungen:

Market	Application	Market	Application	Market	Application
Aerospace/ Military	Air Cycle Machines Fan Air Control - APU Gas Turbine Engines - APU Gas Turbine - Main Shaft Gyroscopes Instruments Missiles - Main shaft Rocket Liquid Oxygen Pumps Satellites Wing Flap Ball Screws	Electro- Mechanical	Compressors - High Speed Electric Motors - Trains Electric Motors w/ Inverters, PWM Gas Meters Kinematic Mounts Optical - Kinematic Mounts Optical Readers and Encoders Power Tools - Air Driven Power Tools - Hand Grinder Power Tools - Hand Grinder	Processing	Cans - Seaming Rolls Chemical - Baths Chemical - Mixers Film Manufacturing Food - Canning, Packaging Galvanizing Lines Kiln Cars Ovens & Metal Processing
* Low Lube * Oscillation * ExtremeTemp. * Durability * Corrosion Resist. * Low Torque * Light Weight		* Low Lube * Oscillation * ExtremeTemp. * Durability * Insulation		* Low Lube * Oscillation * ExtremeTemp. * Corrosion Resist. * Durability	
Automotive	Fuel Systems Race Cars - Drag, Indy, Speed Race Car Wheels - Off Road Turbochargers	Machine Tool	Ball Screws Ball Screw Support Bearings Spindles - Boring Spindles - Drilling Spindles - Gear Cutting Spindles - Grinding Spindles - Milling	Pumps	Cryogenics Dry Magnetic Primary (Rough) Spherical Triplex Turbo Molecular
* Contamination * High Speed * Durability * Light Weight		* Low Lube * Insulation * High Speed * Durability		* Low Lube * Oscillation * High Speed * Durability	
Semiconductor	Robotics Slicers Ion Implanters - Vacuum Lasers - Blowers Miniature Ball Screws	Sporting Goods	Bicycles - Bottom Brackets Bicycles - Wheel Hubs Fishing Reels - Salt Water Gas Turbine Engines - Hobby Radio Control Vehicles/Engines Street Luge Skates - Race, Hockey	Medical	Dental Handpiece - High Speed Dental Handpiece - Low Speed Surgical Handpiece - Saws
* High Temp. * "Zero" Lubrication * Low Particulate * Corrosion Resist. * Clean Environment		* Low Lube * Low Friction * High Speed * Durability * Corrosion Resist.		* Low Lube * Contamination * High Speed * Durability	
Computer	Hard Disk Drive Spindles Hard Disk Production Equipment LCD Panel Production	Audio	Record Turntables	Textile Equip.	Spinning Boxes Winders Covering Spindles
* High Speed * Oscillating Motion * Rigidity/Accuracy * Clean Environment		* Low Friction, Roundness		* High Temp. * Durability	

Fallstudien für Hybridlageranwendungen:

Flugzeug-Generatorlager:

Die Firma Torrington Co. hat z.B. ein Hybridlager für die Anwendung im Flugzeuggenerator getestet. Die Herausforderung war die Lebensdauer zu erhöhen und die Wartungsintervalle zu reduzieren, damit die Wartungs- und Reparaturkosten gesenkt werden können. Torrington hat dabei das übliche Schmiersystem und die Lagerringe verwendet und eine Reduktion der Lager-temperatur von 40°F während der Laufzeit erhalten. Wegen der geringeren Reibung und dem geringeren Verschleiß konnte das Lager länger im Einsatz bleiben und somit die Wartungsintervalle verlängert und damit die Wartungskosten reduziert werden.

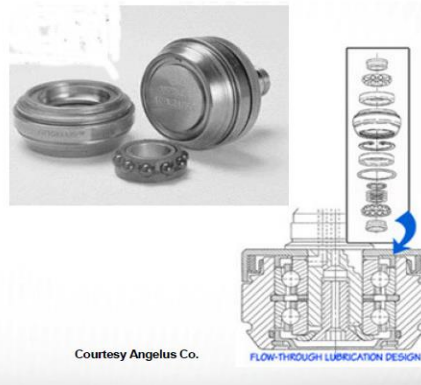


Dosenbördelrolleneinheit:

Die Verwendung von Hybridlagern in Angelus Co. Bördelrollen hat eine Anzahl von Vorteilen hinsichtlich Leistungs- und Haltbarkeit: Längeres Lagerleben, geringeres Ziehen/Gleiten an der Bördelrolle was zu weniger Oberflächenverschleiß durch Fressen und besserer Randausbildung führt. Die Bördelrolleneinheit läuft daher länger, dreht mit weniger Reibung und läuft kühler. Dadurch wird weniger Schmierung benötigt

und daher gibt es weniger Wartungsstillstand, wodurch die Anschaffungskosten durch das teurere Hybridlager schnellstens kompensiert sind. Die Ergebnisse sind im nachfolgenden Bild zu sehen.

- Geringerer Widerstand für das Bördelrollensystem
- Höhere Qualität des Dosenfalzes
- Geringere Wartung: 2 1/2 Std. Produktionszunahme pro Woche oder 7800 Minuten á 1.500 Dosen = 11,700,000 zusätzliche Dosen:
= 2.9 Mio \$-US

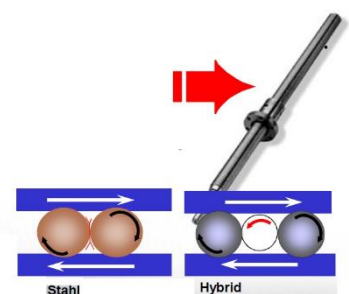


Zentrifugalpumpe:

Pumpen laufen oft mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten auch wenn sie ursprünglich für andere Auslegungen konstruiert wurden. Anwendungen unter diesen Bedingungen erzeugen höhere Radial -und Stoßbelastung auf das Lagersystem sowie Pulsieren des Druckes, was zur Vibration führt. Als Resultat bekommen wir erhöhte Temperaturen, Rutschen und Gleiten der Kugeln und Reibverschleiß am Außenring des Lagers, was zum Verfall des Schmiermittels führt. Um dieses Problem zu lösen, hat die Fa. Ingersol Dresse Pump Co. Hybridlager verwendet mit dünner Chrombeschichtung der Laufbahnen sowie Ölschmierung. Die unterschiedliche Materialpaarung (Keramik – Stahl) verhindert das Reibverschleiß-Korrosionsproblem, und die geringere Lagertemperatur reduziert gleichfalls die Zersetzung des Schmiermittels. Der hohe Elastizitätsmodul der Siliziumnitridkugeln erhöht die Lagersteifigkeit, wodurch die Vibration um 50% in der Pumpe verringert wird. Die Pumpenwartung ist nicht mehr so häufig und höhere Produktivität bei niedrigeren Kosten ist die Folge.

Hybrid-Kugelgewindetrieb

Siliziumnitridkugeln in Kugelgewindetriebs ermöglichen ein kosteneffektives Upgrade für schnellere, lineare Bewegungen. Die innere Reibung der Kugelgewindetriebe kann bis zu 45% reduziert werden, wenn eine kleinere Trennkugel aus Stahl oder einem anderen Material zwischen den Keramikugeln verwendet wird. Dadurch wird der Verschleiß an den Kugeln wie auch an den Laufbahnen verringert. Die Trennkugel eliminiert das Gleiten zwischen den lasttragenden Kugeln (die Trennkugel rollt), was auch die Verschleißrate der Paarungsflächen verbessert. Die Konstruktion erfordert geringere Schmierbedingungen und höhere Geschwindigkeits-möglichkeiten (bis zu 150 m/Minute), da die Reibung (Wärme) während des Prozesses verringert wird. Außer der höheren Geschwindigkeit ist die Temperatur um die Mutter niedriger, was eine weitere Quelle für Verschleiß ist. Die Vorteile können einen signifikanten Einfluss auf die Maschinenstillstandszeit und die Lebensdauer des Kugelgewindetriebes haben. Zum Beispiel verhindert der Kugel-gewindetrieb in Hybridbauweise für die Flügelklappenverstellung der Boeing 777 und 737 sowie etlicher Airbusmodelle die Korrosion durch falsche Rattermarken (Brinelling) während der Anwendung. Die Garantie für das Lagerdesign musste von 3 auf 5 Jahre erhöht werden. Heute sind etliche Werkzeugmaschinen-Gewindetriebe in Hybridbauweise



ausgeführt und erlauben dem Endabnehmer höhere Geschwindigkeiten zu fahren, bei Verwendung eines kostengünstigen Linearsystems.

Hybridlagertragfähigkeit

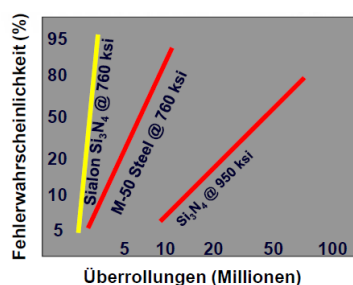
Ein direkter Austausch von Stahlkugeln mit Si₃N₄-Kugeln reduziert die Lagerlast. Si₃N₄-Kugeln erhöhen die Ermüdungsspannungen in den Stahlaufbahnen. Die reduzierte Tragfähigkeit liegt an der Einsatzgrenze des Stahls. Mit größeren Kugeln werden die Spannungen reduziert und die Lagersteifigkeit erhöht.

Eine ständige Frage bezüglich der Leistungsfähigkeit von Hybridlagern ist die Tragfähigkeit, welche die L₁₀-Lebensdauer bestimmt. Wir haben gesehen, dass die Si₃N₄-Kugel wesentlich steifer ist als eine Stahlkugel und dass dadurch der Kontaktabdruck auf der Laufbahn deutlich kleiner ist. Für eine gegebene Last bedeutet dies, dass die Spannung in der Laufbahn am Kontaktabdruck erhöht wird, und dadurch wird die theoretische L₁₀-Lebensdauer des Hybridlagers um ca. 20% reduziert. Tatsächlich weisen Anwendungen, die Lager verlangen, die in der Nähe der Maximalbelastung laufen (z.B. Radlager) eine niedrigere Lebensdauercharakteristik auf, wenn Stahlkugeln durch Si₃N₄-Kugeln ersetzt werden.

Alle bisher gemachten Erfahrungen mit Hybrid-Spindellagern zeigen jedoch, dass Versagen kaum durch Fehler, die durch Kugeln hervorgerufen werden, erfolgt, da Werkzeugmaschinen-Spindellager deutlich unter maximalen Lastbedingungen laufen. Wenn Lager jedoch höhere Lastbedingungen erfahren sollen, ist es mit einem reinen Austausch der Kugeln nicht getan. Hier müssen dann Veränderungen an den Laufbahngeometrien vorgenommen und ggf. auch die Anzahl der Kugeln im Lager erhöht werden, damit der Nachteil der höheren Steifigkeit kompensiert wird. Letztendlich hängt die Leistungsfähigkeit eines Hybridlagers auch von der Qualität des Werkstoffes und der Bearbeitungsqualität der Kugel ab. Auch helfen die anderen Vorteile, wie z.B. geringerer Verschleiß, geringere Reibung und somit geringere Lagertemperatur, längere Schmiermittellebensdauer usw., den Lebensdauernachteil zu kompensieren.

Ermüdungsversagen von Hybridlagern

Siliziumnitridkugeln versagen in der Regel nicht durch Bruch sondern durch Abblättern (Pitting der Kugeloberfläche ähnlich wie bei Stahlkugeln). Hybridlager sind begrenzt durch die Ermüdungsfähigkeit und Verschleiß der Stahlaufbahnen und der Käfige. Weniger als 3% aller Lager versagen durch Ermüdung. Dies nicht zuletzt auch durch die deutlichen Verbesserungen der Stahlqualitäten. Die meisten Spindellager versagen durch Kontamination, Mangel an Schmierung oder exzessive Wärmebildung. Ausdauerstest von Spindellagern mit einer Kontaktbeanspruchung während des Tests von 3 GPa haben die Leistungsfähigkeit der Si₃N₄-Kugeln gezeigt. Die notwendige Kontaktbeanspruchung für das Versagen einer Stahlkugel liegt bei ca. 5-7 GPa. Die Bruchfestigkeit einer Si₃N₄-Kugel ist 4-5x größer als die einer Stahlkugel. Die notwendige Kontaktbeanspruchung für das Versagen einer Si₃N₄-Kugel beträgt ca. 25-30 GPa. Selbst eine defekte Si₃N₄-Kugel versagt erst bei ca. 15 GPa.



Die Weibull-Darstellung zeigt die überlegene Ermüdungslebensdauer der Siliziumnitridkugeln.

Für den M50 Stahl und den Sialon mussten für die Weibull-Darstellung der Rollkontakt-ermüdung unterschiedliche Belastungen gewählt werden (760 ksi = 5,3 GPa), da sie bei der für Si₃N₄ verwendeten Belastung von 950 ksi = 6,6 GPa sofort versagt hätten.

Generell kann man konstatieren, dass die Rollkontaktermüdung von Si₃N₄-Kugeln deutlich höher ist als die von Stahlkugeln. Dies macht Hybridlager, insbesondere für Werkzeugmaschinen-Spindelanwendungen, für sehr viele Anwendungen zu bevorzugten Lagern, da sie eine signifikant bessere Leistung aufweisen: höhere Spindel-geschwindigkeiten, reduziertes Vibrationsniveau der Spindeln, kühlerer Spindelbetrieb, verbesserter Spindelauslauf, vereinfachtere Spindelsystem-Konstruktion, längere Spindel-lebensdauer und geringere Kosten bei Spindelreparatur.

Zusammenfassung

Heute sind Hybridspindellager aus immer mehr Anwendungen nicht mehr wegzudenken. Die Kombination von höherer Steifigkeit, höherer Härte, geringeres Gewicht, überlegenes Oberflächenfinish und Genauigkeit der Si₃N₄-Kugeln führt zu einer verringerten Wärmeentwicklung und erlaubt kühlere Lager und Schmiermitteltemperaturen. Die Steifigkeit und geringere Wärmedehnung, verbunden mit dem niedrigeren Gewicht der Si₃N₄-Kugeln ergeben Lagerfähigkeiten die steifer sind und höhere Geschwindigkeiten vertragen, bei geringeren Spindelvibrationen und Geräusch. Der elektrische Widerstand und Korrosionswiderstand, kombiniert mit den anderen Kugelattributen führen zu ausgeweiteten Schmierungsmöglichkeiten. Alles zusammen führt zu höheren Lagergeschwindigkeiten und längerer Lebensdauer. Hybridlager mit Si₃N₄-Kugeln haben klar den industriellen Standard für Hochleistungsbearbeitung und –anwendungen, geringere Stillstandzeiten und niedrigeren Gesamtbetriebskosten gesetzt.

Hier noch einmal in Stichworten zusammengefasst wie sich die Eigenschaften der Si₃N₄-Kugeln auf die Verbesserungen im Wälzlager und die Vorteile für die Anwender dieser Lager auswirken:

- 1) Geringeres Gewicht →
 - verringerte Zentrifugalkraft
 - verringertes gyroskopisches Moment
 - reduziertes Rutschen/Gleiten der Kugeln
 - geringere Reibung
 - geringere Betriebstemperatur
 - reduziertes Anlauf- & Laufmoment
 - geringere Laufbahnspannung
 - geringerer Verschleiß
 - Vorteile für den Anwender der Hybridlager: höhere Geschwindigkeit + längere Lebensdauer

- 2) Härter & steifer →
 - reduzierte Kugel- / Laufbahn-Kontaktfläche
 - geringste Kugeldeformation
 - reduziertes Rutschen/Gleiten der Kugeln
 - geringere Reibung

- geringere Betriebstemperatur
 - widersteht Kontamination von harten Partikeln
 - geringerer Verschleiß
 - höhere Lagersteifigkeit
 - ➔ Vorteile: höhere Geschwindigkeit + längere Lebensdauer + geringere Geräusche + Vibration + genauere Werkstückbearbeitung/präziseres Lagerlaufen
- 3) Glattere Kugeloberfläche & inerte Werkstoff ➔
- Verringerte Schmiermittelersetzung
 - Kein Kaltverschweißen / Adhäsionsverschleiß
 - geringere Reibung
 - reduziertes Anlauf- & Laufmoment
 - geringere Betriebstemperatur
 - geringerer Verschleiß
 - eliminiert Vibration und falsche Rattermarken (Brinelling)
 - ➔ weniger Schmierung wird benötigt + einfacheres Schmiersystem (Fett anstatt Öl) + größere Zuverlässigkeit + reduzierter Energieverbrauch + geringere Geräusche und Vibration + höhere Geschwindigkeit + längere Lebensdauer
- 4) Geringere Wärmedehnung ➔
- reduzierte Kontaktwinkelveränderung
 - stabile Betriebsvorspannung
 - minimale Kugeldeformation
 - geringere Betriebstemperatur
 - ➔ höhere Geschwindigkeit
- 5) Korrosions- und elektrischer Widerstand ➔
- geringerer Verschleiß
 - keine elektrische Funkenbildung durch die Kugeln
 - Widerstandsfähigkeit in rauer Umgebung
 - Keine Kugelschwächung / -erosion
 - Reduziertes Laufbahn-Pitting / -erosion
 - ➔ Längere Lebensdauer + größere Zuverlässigkeit + erweiterte Designmöglichkeiten

Alles zusammen macht Wälzlager mit Si₃N₄-Kugeln zu besseren Lagern und diese ergeben im Einsatz geringere Betriebskosten.

Ursprünglich wurden Hybridlager nur eingesetzt, wenn höhere Geschwindigkeiten ($>1 \times 10^6$ D_mN) erreicht werden sollten. Heute werden sie auch schon wegen der besseren Zuverlässigkeit bei geringeren Geschwindigkeiten (< 500.000 D_mN) verwendet. Ein weiterer Grund ist natürlich auch der rückläufige Preis für die Kugeln, da gestiegener Bedarf auch die Herstellkosten der Kugeln günstig beeinflusst hat. Der Bedarf an Si₃N₄-Kugeln ist inzwischen weltweit in einer nicht vorhergesehenen Geschwindigkeit so stark gestiegen, dass sich inzwischen die Lieferzeiten wieder erhöht haben, da die Investitionen mit dem Anstieg nicht Schritt halten konnten. Nach einer Konsolidierungsphase und dem nun beginnenden Einsatz von nur gasdruckgesinterten Si₃N₄-Kugeln, die jetzt neben den heißisostatisch gepressten Kugeln zum Einsatz kommen, sollten sich die Lieferzeiten mit der Zeit wieder deutlich reduzieren.

Wir von hightech ceram sind in vorderster Linie mit dabei, und dies nicht nur für Si_3N_4 -Kugeln, sondern mit unseren Partnerfirmen auch für andere Kugeln aus verschiedenen Keramiken, Metallen, Glas und Plastiken für Wälzlager- und Nichtwälzlager-Anwendungen.

Autor: Dr.-Ing. Detlef Steinmann