

# Das Kugelrollenlager – Weniger ist mehr!

Heinrich Hofmann  
Rainer Eidloth  
Dr. Robert Plank  
Gottfried Ruoff



# Einleitung

Am Anfang war der Punkt, dann kam der Kreis, und 1883 war die Kugel geboren.

Es waren immer die Wälzkörper – egal ob Kugeln oder Rollen – die die Konstruktion, die Bauformen und letztendlich die Leistungsfähigkeit der Wälzlager entscheidend geprägt haben. Um 1900, als man fähig war, sicher zu härten und genau zu schleifen, wurden die Grundkonstruktionen fast aller Wälzlager serienreif entwickelt (Bild 1).

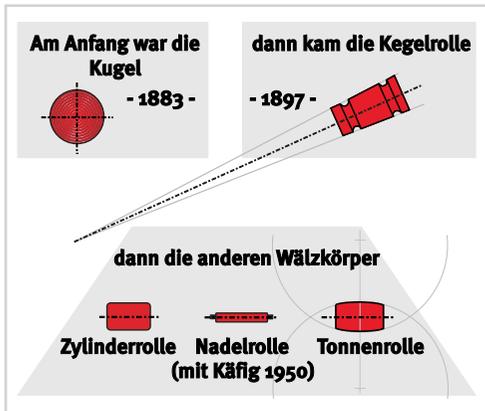


Bild 1 Historie Wälzlagerbauformen

Es waren die neuen Fahrzeuge – egal ob Fahrrad oder Motorwagen – die dringend auf eine niedrige Reibung, auf die Rollreibung, angewiesen waren. War doch das Drehmoment des Menschen an der Fahrradtrittkurbel limitiert und das Drehmoment der ersten Motoren noch klein.

Die bekannte und seit Jahrtausenden genutzte niedrige Rollreibung zwischen Rad und fester Straße wurde nun konsequent mit der Erfindung des Kugel- und Kegelrollenlagers im Zentrum des Rades genutzt. Denn die Kugeln oder Rollen wirken wie viele kleine reibungsarme Räder zwischen Radachse und Nabe.

Aber auch die Wellen in den ersten Getrieben wurden zur genauen und verschleißarmen Führung der Zahnräder sehr früh in Kugellagern abgestützt (Bild 2).

Das Kugellager ist aus heutiger Sicht eine erfolgreiche Fehlkonstruktion aus dem Jahre 1900. Obwohl es nun über 100 Jahre alt ist, ist das

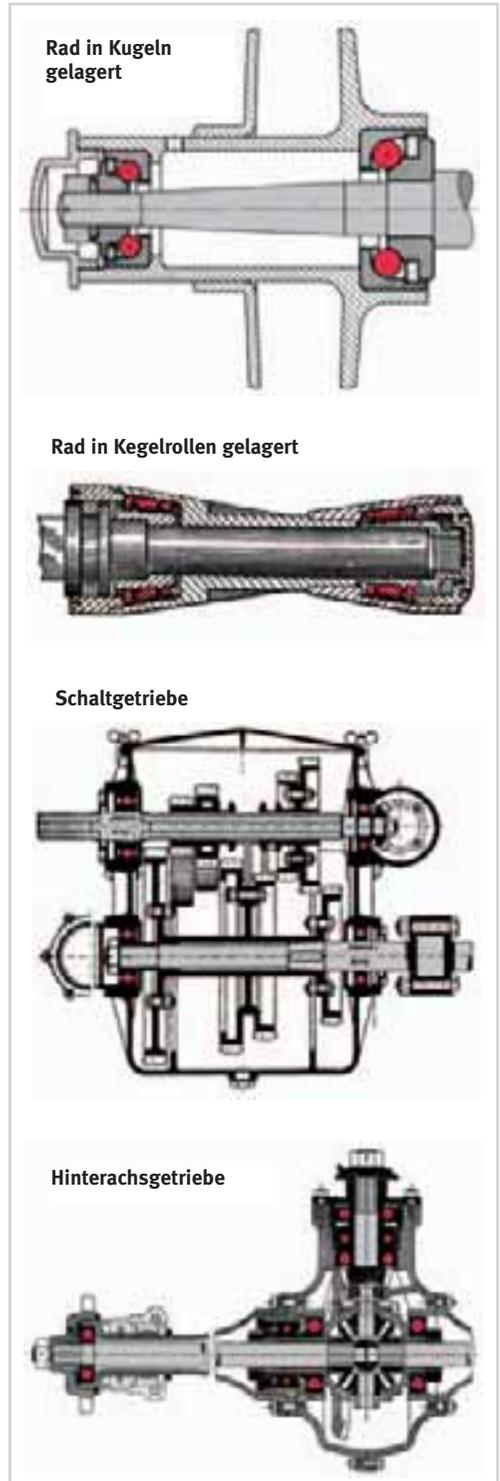


Bild 2 Rad- und Getriebelagerungen um 1900

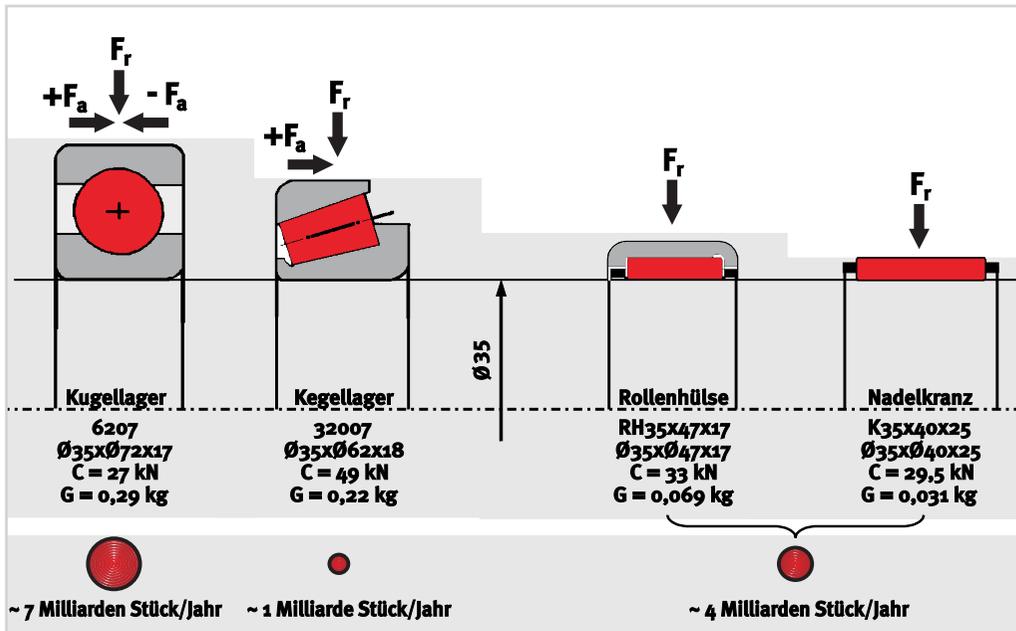


Bild 3 Vergleich der Bauformen

Kugellager heute noch Stückzahlweltmeister von allen Wälzlagerbaureihen. Fast 7 Milliarden Stück werden derzeit pro Jahr weltweit produziert.

Die Kegelrollenlager wurden auch um die Jahrhundertwende entwickelt und sind heute die Nr. 3 mit einer produzierten Stückzahl von knapp 1 Milliarde pro Jahr.

Es dauerte von 1900 bis 1950, also 50 Jahre, bevor das Nadellager als dritte große Baureihe serienreif war. Die Technologie zur Herstellung der dünnen Querschnitte für Käfige und der spanlosen Laufringe war erst um 1950 serienreif. Gemessen an der Stückzahl – produziert werden pro Jahr 4 Milliarden – ist die Nadellagerfamilie die Nr. 2 weltweit.

Die maßstäbliche Darstellung zeigt bei konstanter Bohrung von 35 mm – aber geordnet nach Außendurchmesser – erhebliche Unterschiede in Größe, Tragzahl und Gewicht (Bild 3).

Alle anderen Wälzlagerbaureihen, ausgerüstet mit Zylinderrollen und Tonnenrollen, werden in Stückzahlen produziert, die um 10er Potenzen kleiner sind als die erwähnten drei Baureihen.

## Unterschiede der Wälzlager mit Kugeln, Kegeln und Nadeln

Ein Vergleich der Leistungsgewichte, d. h. der Tragfähigkeit in kN dividiert durch das Lagergewicht in kg, machen die Unterschiede deutlich.

Um aber auch die Unterschiede der Baureihen im eingebauten Zustand deutlich zu machen wurde ein virtuelles Zweiwelgenretriebe konstruiert.

Die Welle 1 ist als Fest-Loslagerung in einem Kugellager und einer Rollenröhre gelagert.

Die Lagerung der Welle 2 ist als Stützlagerung in zwei gleichen Kegelrollenlagern ausgeführt. Die Kegelrollenlager stützen sich axial gegenseitig ab. Man spricht auch von einer angeordneten Lagerung, da das Axialspiel zur Sicherung einer optimalen Funktion eingestellt wird (Bild 4).

Bei der Stützlagerkonstruktion wird deutlich, dass der Innenringbord des Kegelrollenlagers axial Raum beansprucht. Dieser Bord wird benötigt, um die Kegelrolle stirnseitig zu führen. Zusätzlich zur Rollreibung am Rollenmantel entsteht somit

Gleitreibung am Bord. Das Kegelrollenlager ist daher von der Reibung her gesehen ein so genanntes Hybridlager. Die Belastbarkeit ist radial und axial hoch. Das Leistungsgewicht ist für das Lagerbeispiel 32007 mit 223 kN/kg respektabel. Mit einem Außendurchmesser von 62 mm baut das Kegelrollenlager radial auch nicht zu groß.

Die Schwachstellen des Kegelrollenlagers sind also die Baubreite und die Reibung.

Bei der Los-/Festlagerkonstruktion der Welle 1 fällt auf, dass die Rollenhülse als Loslager radial klein baut. Dieses ist möglich durch die Integration der Innenringlaufbahn in die Welle und durch den dünnen spanlos hergestellten Außenring.

Das Leistungsgewicht ist mit 478 kN/kg sehr hoch. Die Rollenhülse ist allerdings nur radial belastbar.

Die Rollenhülse, ein Verwandter der Nadelfamilie, ist eine technisch ausgereizte und zudem wirtschaftliche Lösung für eine reine Radiallagerung!

Das Kugellager 6207 als Festlager baut mit einem Außendurchmesser von 72 mm am größten und hat mit 93 kN/kg das niedrigste Leistungsgewicht. Es ist aber radial sowie axial belastbar.

## Nachteile des Kugellagers

### Kugelfüllgrad

Einerseits erlaubt die Exzentermontage einteilige Laufringe ohne Schwachstellen wie Füllnuten mit tiefen Rillen. Die tiefen Rillen erhöhen die axiale Belastbarkeit. In den USA bezeichnet man

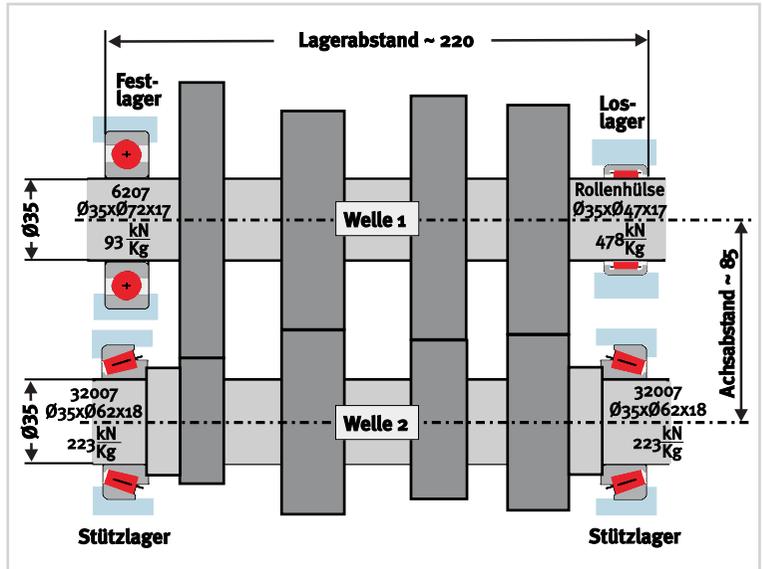


Bild 4 2-Wellengetriebe, Stand der Lagertechnik

ein Kugellager deshalb als „deep groove ball bearing“.

Montagebedingt ist der Kugelfüllgrad durch den sichelförmigen Raum zwischen den Laufringen limitiert oder anders ausgedrückt: „Viel Luft und wenige Kugeln“ befinden sich nach der Kugelverteilung auf dem Teilkreisumfang. Zum Beispiel sind im Kugellager 6207 nur 9 Kugeln montierbar (Bild 5).

## Breitennutzung

Die Kugelbreite wird nur zu 70 % genutzt, d. h. 30 % der Kugelbreite verschwinden axialen Bauraum und erhöhen das Gewicht.

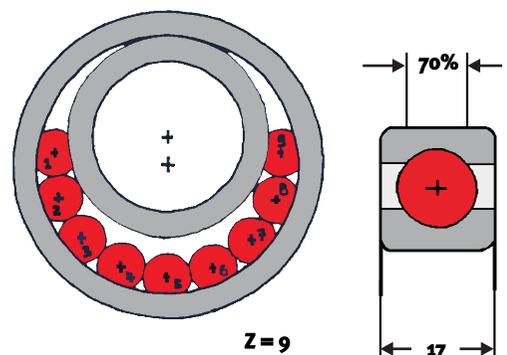


Bild 5 Kugelfüllgrad/Breitennutzung

## Flächenpressung

Die Kontaktzone ist bei kleiner Last nur „punktförmig“ ausgeprägt, d. h. durch die schlechte Schmiegun ist die Druckellipse klein und die Flächenpressung hoch. Damit wird die Flächenpressung größer als bei Rollenlagern mit Linienkontakt.

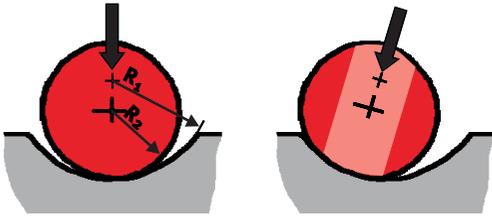


Bild 6 Druckwinkel und Schmiegun

Bei reiner Axiallast – siehe Abbildung 6 – beobachtet man auf dem Kugeläquator ein umlaufendes Verschleißband, das umso breiter ist, je höher die Last wird.

Unter Axiallast verändert sich die Drehachse der Kugel nicht. Wenn allerdings wie z. B. unter

Radiallast eine lastfreie Zone im Lager entsteht, dann ändert sich die Drehachse der Kugel bei jeder Umdrehung chaotisch.

## Lösungsansätze

Die Lösung ist das Kugellager! Die dicke Kugel wird abgespeckt und zur schlanken Kugelrolle (KXR) im Kugellager!

Anders ausgedrückt, wird das nichttragende, „faule“ Fleisch der Kugel links und rechts mit je 15 % des Kugeldurchmessers abgeschnitten. Die Laufringe werden dadurch um 30 % des Kugeldurchmessers schmaler.

Bei der Konstruktion der Kugellager wurde eine neue Führung der Wälzkörper unter Nutzung von Käfig und Rollenstirnseite entwickelt. Bei Null-Last und Null-Drehzahl ermöglicht diese Führung eine Ausrichtung der Wälzkörper im Startbetrieb. Die Taschenböden des Käfigs sind so gestaltet, dass sich die belastete Kugelrolle in Abhängigkeit des Druckwinkels frei einstellen kann (Bild 7).

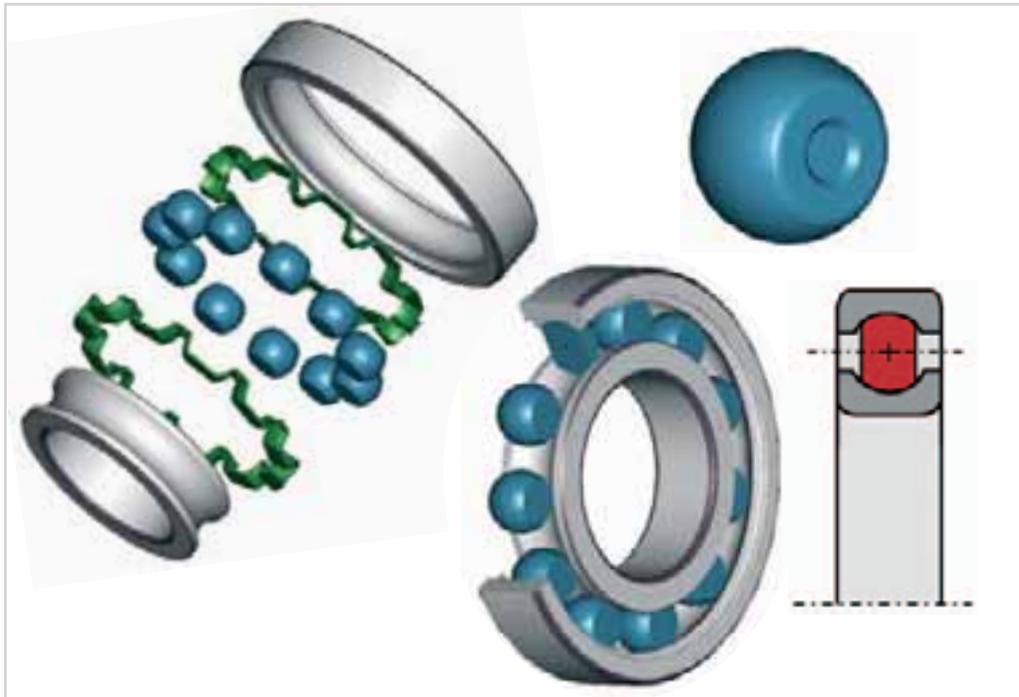


Bild 7 Kugellager

# Vorteile der „schlanken“ Kugelrollenlager

## Füllgrad

Der Füllgrad erhöht sich, d. h., es können in das Basislager 6207 elf statt neun Wälzkörper montiert werden.

Da die Kugelrollen um 30 % schmaler sind als die Kugeln, können in um 90 Grad gedrehter Stellung mehr Wälzkörper mittels Exzentermontage eingebracht werden (Bild 8).

Mehr Wälzkörper bedeuten mehr Tragfähigkeit.

## Breitennutzung

Bei voller Breitennutzung der Kugelrolle wird die Lagerbreite reduziert – im betrachteten Fall von 17 mm auf 13,5 mm, d. h. um 20 %. Durch die reduzierte Breite verringert sich das Lagergewicht um 20 %.

Bei der Kugelrolle trifft der bekannte Spruch „Weniger ist mehr!“ voll und ganz zu, denn trotz geringer Breite können mehr Wälzkörper verbaut werden.

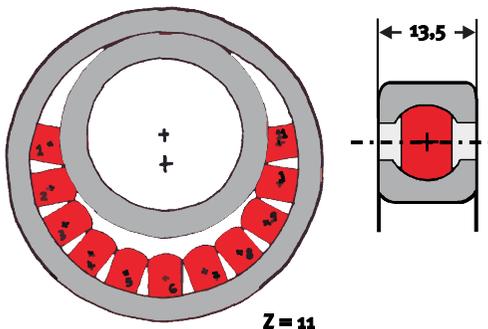


Bild 8 Füllgrad/Breitennutzung

## Flächenpressung

Die Punktberührung bei Kugeln führt bekanntlich zu hoher Flächenpressung. Die Änderung der Schmiegun auf ein logarithmisches Profil

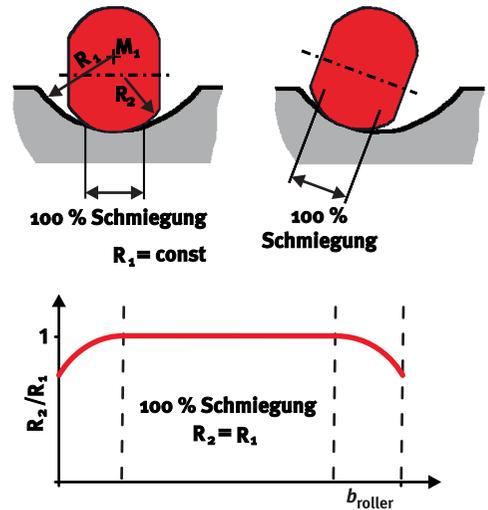


Bild 9 Druckwinkel und Schmiegun

auf der Kugelrolle steigert die Tragzahl nochmals. Das logarithmische Profil des Kugelrollenmantels vermeidet Kantenpressung in den axialen Randbereichen der Kugelrolle (kleiner Radius) bei gleichzeitig sehr enger Schmiegun im Kontaktbereich (großer Radius). Auch bei kleineren und mittleren Belastungen bildet sich eine breite Druckellipse mit niedriger Flächenpressung aus (Bild 9).

Die Kugelrolle kann mit logarithmischem Profil konstruiert werden, da die Drehachse immer senkrecht zum variablen Druckwinkel steht. Damit verändern sich die Schmiegunverhältnisse nicht, wenn sich das Lastverhältnis axial zu radial und sich damit der Druckwinkel verändert. Die Schmiegun „wandert“ mit der Lastveränderung optimal mit (Bild 9).

Alle rechnerischen Simulationen und Laufversuche beweisen: „Und sie dreht sich doch“ – und zwar um die gewollte Drehachse! Die Kugelrolle rotiert mit ihrer speziellen Massenverteilung optimal um ihre Achse, das heißt sie folgt den Keiselgesetzen.

Achtung: Das Kugelrollenlager behält die tiefen Rillen des Kugellagers und somit die hohe axiale Tragfähigkeit. Die Kugelrollen sind breiter als der Abstand der Laufringborde. Aber mittels Exzentermontage sind viele Kugelrollen montierbar.

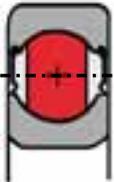
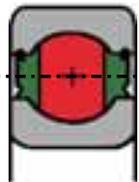
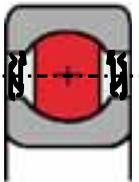
| Anwendungsbereiche<br>KXR-Lager,<br>1-reihig + gedichtet | Schaltgetriebe<br>(Clean Bearing)   | Spannsysteme<br>Spannrollen<br>breite Reihe 622..                                 | Gelenkwellen<br>(Stützlager)   | Dito,<br>aber kleiner  |
|--|---|---|--|--|
| KXR-Lager<br>Festlager<br>Bsp. 6207                      |  |  |                       |  |
| $\emptyset 35 \times \emptyset 72 \times 17$<br>DIN 625  | entweder a)<br>leistungsfähiger<br>aber schmaler                                  | oder b)<br>gleiche Breite<br>mehr Fettraum<br>leistungsfähiger                    | oder c)<br>gleiche Breite/<br>bessere Dichtung<br>(Dicht- und<br>Schleuderscheibe)<br>leistungsfähiger | oder<br>leistungsgleich<br>aber kleiner<br>+ schmaler                              |
|  | $\emptyset 35 \times \emptyset 72 \times 13,5$<br>KXRS (Schmal)                   | $\emptyset 35 \times \emptyset 72 \times 17$<br>KXRF (Fettraum)                   | $\emptyset 35 \times \emptyset 72 \times 17$<br>KXRD (Dichtung)  | $\emptyset 35 \times \emptyset 66 \times 12$<br>KXRK (Klein)                       |

Bild 10 Anwendungen für Kugellager

## Anwendungsbereiche der Kugellager

Unterschieden werden einreihige Festlageranwendungen und zweireihige Stützlageranwendungen (angestellte Lagerungen).

Das einreihige KXR-Lager, z. B. 6207KXR ergänzt das Kugellager nach DIN-Abmessungen und ist:

- Entweder leistungsfähiger, aber schmaler bei gleichem Außendurchmesser und gleicher Bohrung (Bild 10)
- leistungsfähiger bei gleicher Breite und mehr Fettraum
- leistungsfähiger bei gleicher Breite und verbesserter Abdichtung
- oder leistungsgleich, aber radial kleiner und noch schmaler als das Standardkugellager.

Das zweireihige KXR-Lager = KXRT (Tandemanordnung) kann das Kegelrollenlager und die mehrreihigen Kugellager ersetzen, denn 2 Kugellager ersetzen eine Kegelrolle (Bild 11).

Das KXRT-Lager ist leistungsgleich, aber reibungsärmer und schmaler als das Kegelrollenlager.

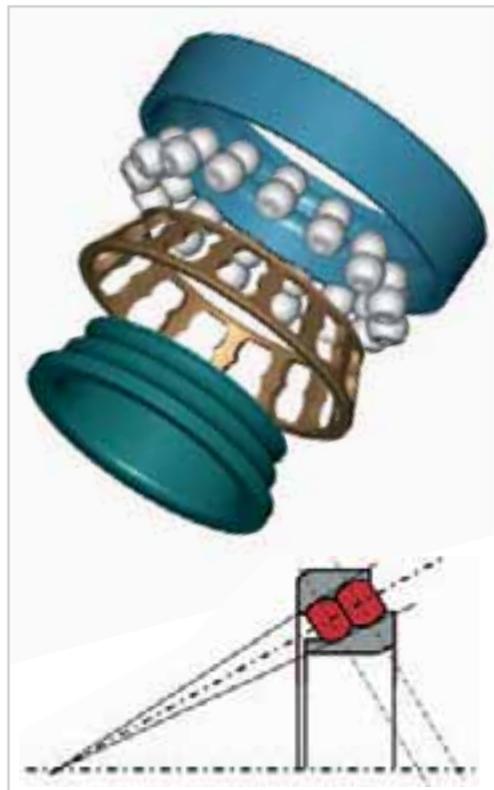


Bild 11 Kugellager in Tandemanordnung

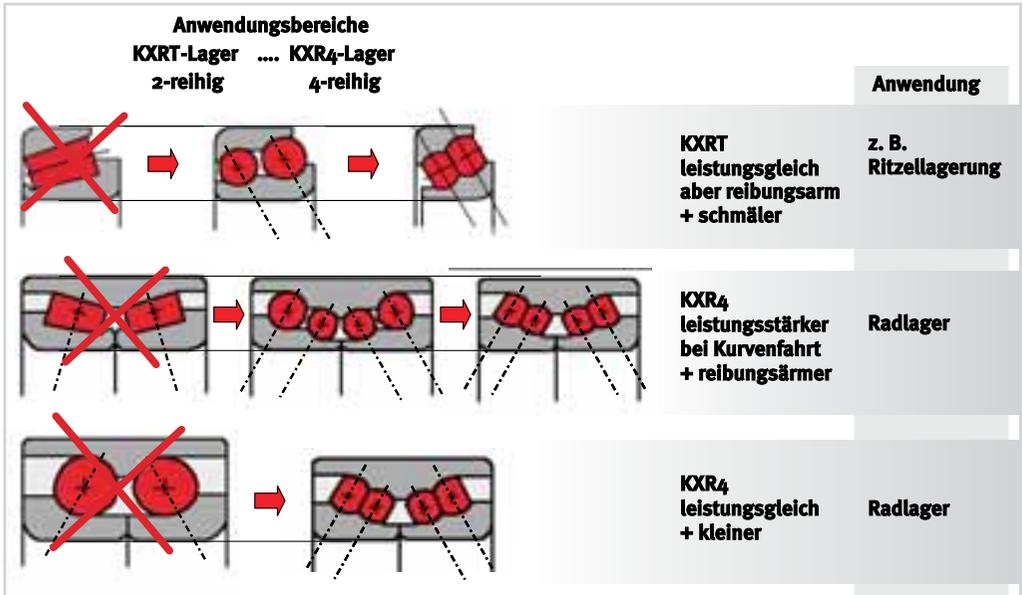


Bild 12 Anwendungen KXRT/KXR<sub>4</sub>-Lager

Das KXRT-Lager ist die folgerichtige Weiterentwicklung der Tandemkugellager (Anwendung z. B. Ritzzellagerung) mit 2 Reihen Kugeln.

Bild 12 zeigt einige Anwendungsmöglichkeiten: Das vierreihige KXR<sub>4</sub>-Lager ersetzt zweireihige Kegelrollenlager und vierreihige Kugellager bei gleicher Bohrung und Außendurchmesser. Das KXR<sub>4</sub>-Lager kann auch zweireihige Kugellager ersetzen. In diesem Fall sind die Kugelrollen kleiner und der Außendurchmesser ist reduziert.

Für die in Bild 4 beschriebene virtuelle Wellenanordnung eines Getriebes können die neuen KXR-Konstruktionen vorteilhaft angewendet werden (Bild 13).

Das Festlager der Welle 1 wird durch ein leistungsgleiches aber kleiner und schmaler bauendes einreihiges KXR-Lager ersetzt.

Die beiden Stützlager der Welle 2 werden durch zweireihige KXRT-Lager substituiert. Die Einbau-räume – Achsabstand und Lagerabstand – sind verkleinerbar!

Bekanntlich ist bei Front-Quer-Fahrzeugen ein kurzbauendes Schaltgetriebe erforderlich. Hinzu kommt, dass die Reibung der KXRT-Lager kleiner ist als beim Kegelrollenlager, da die Bordgleitreibung entfällt.

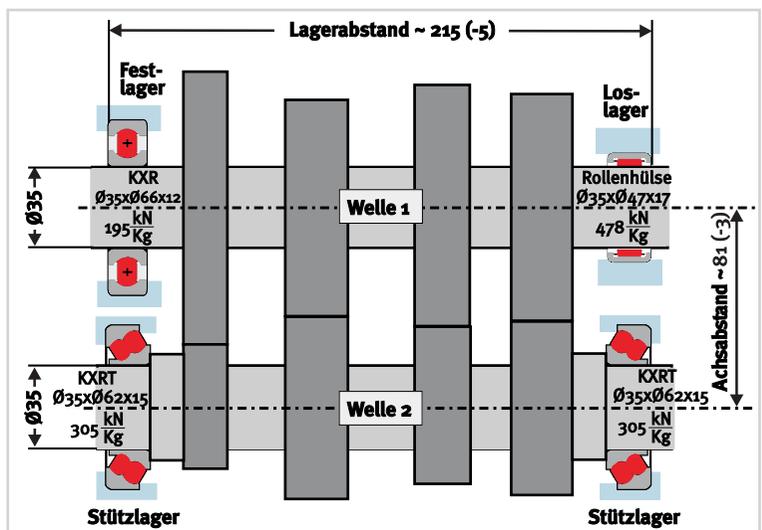


Bild 13 2 Wellengetriebe mit KXR/KXRT-Lager

Die Lageranstellung und Schmierung wird für die KXRT-Stützlager einfacher und robuster.

## Verifizierung

Folgende Untersuchungen wurden zum Leistungsnachweis der Kugelrollenlager-Konstruktionen durchgeführt.

### Rechnerische Simulation der Kinematik

Die Kugelrollen stabilisieren sich aufgrund ihres Trägheitsmoments schneller als die „runde Vollkugel“. Bekannt ist, dass z. B. ein Fahrrad umso stabiler läuft, je höher die Geschwindigkeit wird. Erklärbar wird dies durch die Kreiselkräfte.

### Versuche unter Last und Drehzahl

- Prüfung unter Momentenbelastung  
Bei dieser harten Prüfung ändert sich bei jeder Umdrehung der Druckwinkel von plus auf minus für jede Kugelrolle. Es zeigt sich, dass die Kugelrollen gemäß der Theorie mit dem Druckwinkel „mitwandern“.
- Dynamische Versuche unter axialer und radialer Last
- Die Kugelrollenlager erfüllen die theoretisch erwartete Lebensdauer.
- Fahrversuche  
Die Funktion im Schaltgetriebe ist auch bei Knallstarts und Zug-Schub-Umkehr gegeben.

## Zusammenfassung und Ausblick

Die Kugelrolle als neuer Wälzkörper führt zu einer neuen Wälzlagerbaureihe mit einem breiten Anwendungsfeld im Kfz- und Industriebereich.

Für Anwendungen in Getrieben sind die Kugelrollenlager und Kugelrollen-Tandemlager hervorragend geeignet.

### Vorteile der Kugelrollenfamilie

Bei unverändertem Lastfall

- Weniger Raumbedarf
- Weniger Gewicht
- Weniger Reibung, geringerer Energieverbrauch

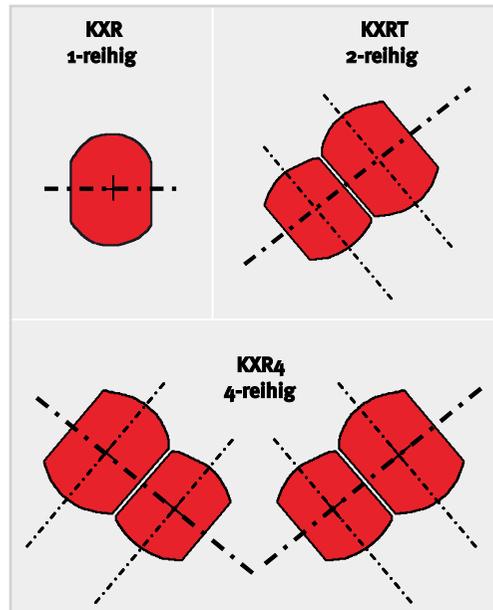


Bild 14 Zusammenfassung/Vorteile

Bei gleichem Bauraum

- Höhere Leistung (Tragfähigkeit)
- Größerer Fettraum
- Mehr Bauraum für verbesserte Abdichtung

Für die Computerbranche hat G.E. Moore, Mitbegründer der Fa. Intel, vorhergesagt, dass sich in regelmäßigen Zeitabständen die Leistungsfähigkeit der Prozessoren verdoppeln werde. Ähnliches gilt auch für unsere Branche, denn die Leistungen vieler Aggregate ließen und lassen sich immer wieder signifikant steigern. Ein Baustein auf dem Weg zu mehr Leistung sind auch die neuen Kugelrollenlager.

Sieht man das Potenzial, das in der Familie der Kugelrollenlager steckt, sind wir zuversichtlich, dass sich die Produktleistungen vieler Aggregate erheblich steigern lassen. 100 Jahre nach der Erfindung des Kugellagers und 50 Jahre nach der Serienreife des Nadellagers wurde damit eine neue, Erfolg versprechende Wälzlagerreihe geboren.

Im Rahmen der Entwicklung der Kugelrollenlager bis zur Serienreife freuen wir uns über innovative Partner, mit denen wir anwendungsbezogene Lösungen hoher Leistungsdichte realisieren können.