

Lagervorspannung

In vielen Anwendungsfällen muss ein negatives Betriebsspiel, d. h. eine Vorspannung angestrebt werden, um die Steifigkeit der Lagerung oder die Laufgenauigkeit zu erhöhen, z. B. bei Arbeitsspindeln für Werkzeugmaschinen, Ritzellagerungen für Kfz-Achsantriebe oder bei kleinen Elektromotoren. Die Vorspannung kann durch Federn oder durch Anstellen, z.B. mit Hilfe einer Wellenmutter, aufgebracht werden. Die Vorspannung mit Federn kann auch für leicht belastete Lagerungen vorgesehen werden, um damit eine Mindestbelastung der Lager sicherzustellen.

Die Vorspannung kann durch den Vorspannweg oder die Vorspannkraft ausgedrückt werden, wobei jedoch die Vorspannkraft die primäre Bestimmungsgröße ist.

Von bewährten Konstruktionen liegen Erfahrungswerte über die optimale Vorspannkraft vor, die dann auf vergleichbare Konstruktionen übertragen werden. Bei Neukonstruktionen empfiehlt es sich, die geeignete Vorspannkraft rechnerisch zu ermitteln und durch Versuche zu überprüfen. Da im Allgemeinen aber nicht alle Einflussgrößen des wirklichen Betriebs exakt erfassbar sind, können in der Praxis Korrekturen notwendig sein. Die Zuverlässigkeit der errechneten Ergebnisse hängt vor allem davon ab, wie weit die getroffenen Annahmen über die Temperaturverhältnisse im Betrieb und das elastische Verhalten der Gegenstücke – vor allem der Gehäuse – mit den tatsächlichen Verhältnissen übereinstimmen.

Arten der Vorspannung

Je nach Lagerart wird zwischen radialer und axialer Vorspannung unterschieden. Zylinderrollenlager beispielsweise können aufgrund ihrer Konstruktion nur radial, Axial-Kugellager und Axial-Zylinderrollenlager

Bild 1

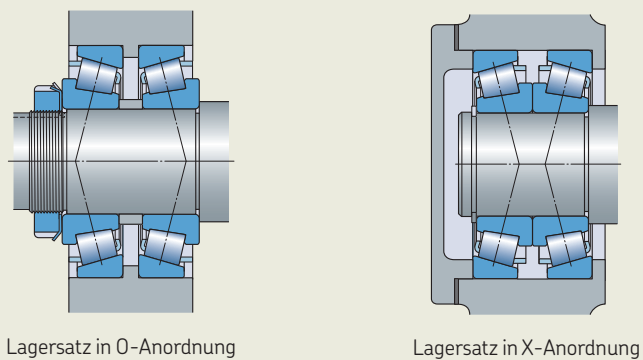


Bild 2

Lagerpaare in O-Anordnung

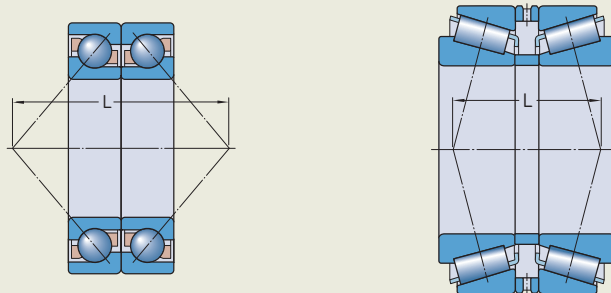
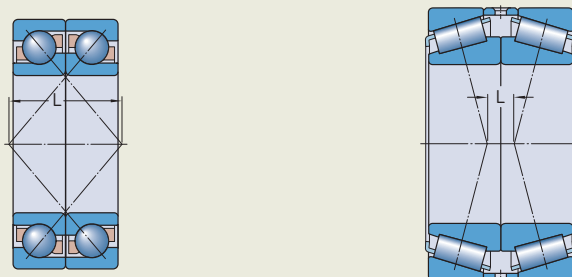


Bild 3

Lagerpaare in X-Anordnung



dagegen nur axial vorgespannt werden. Einreihige Schrägkugellager und Kegelrollenlager (**Bild 1**) werden axial vorgespannt, da sie im Allgemeinen stets zusammen mit einem zweiten Lager gleicher Art in O-Anordnung (Berührungslinien laufen auseinander) oder in X-Anordnung (die Berührungslinien laufen zusammen) angestellt werden. Rillenkugellager werden normalerweise ebenfalls axial vorgespannt. Voraussetzung ist allerdings, dass die Lager eine größere radiale Lagerluft (C3 oder C4) aufweisen, damit sich ein Berührungswinkel größer null einstellt.

Sowohl bei Schrägkugellagern als auch bei Kegelrollenlagern ist der Abstand L zwischen den Druckmittelpunkten bei O-Anordnung größer (**Bild 2**), bei X-Anordnung dagegen kleiner (**Bild 3**). Lager in O-Anordnung können daher selbst bei einem kleinen Lagermittenabstand relativ große Kippmomente aufnehmen. Außerdem sind die aus der Momentenbelastung resultierenden Radialkräfte und die dadurch hervorgerufenen elastischen Verformungen in den Lagern in O-Anordnung kleiner als bei X-Anordnung.

Wird die Welle im Betrieb wärmer als das Gehäuse, so steigt im Allgemeinen die während des Einbaus bei Umgebungstemperatur eingestellte Lagervorspannung an.

In Abhängigkeit vom Lagerabstand und der Lageranordnung (O-Anordnung oder X-Anordnung) kann die Vorspannung ansteigen oder abnehmen. Grundsätzlich gilt, dass Wärmedehnungen des Innenrings in radialer Richtung die Vorspannung in der Lagerung erhöhen. Diese Tendenz wird durch die axiale Wärmedehnung bei der X-Anordnung noch verstärkt und bei der O-Anordnung dagegen abgeschwächt.

In Abhängigkeit vom Lagerabstand und unter Voraussetzung gleicher Wärmedehnungszahlen für Lager und Gegenstücke können sich bei O-Anordnung die radialen und axialen Wärmedehnungen ausgleichen, sodass sich die Vorspannung auch bei Temperaturerhöhungen nicht ändert.

Auswirkungen der Vorspannung

Die hauptsächlichsten Auswirkungen der Lagervorspannung sind:

- eine höhere Steifigkeit
- ein geräuschärmerer Lauf
- eine genauere Führung der Welle
- der Ausgleich von Verschleiß und Setzvorgängen im Betrieb
- eine lange Gebrauchsdauer

Hohe Steifigkeit

Die Lagersteifigkeit (in kN/mm) wird definiert als das Verhältnis zwischen der auf das Lager wirkenden Kraft und den elastischen Verformungen im Lager. Bei einem vorgespannten Lager sind die belastungsbedingten elastischen Verformungen innerhalb eines bestimmten Belastungsbereichs geringer als bei einem nicht vorgespannten Lager.

Geräuscharmer Lauf

Je geringer das Betriebsspiel eines Lagers ist, umso besser werden die Wälzkörper in der unbelasteten Zone geführt und umso geräuscharmer läuft das Lager.

Genauere Wellenführung

Die Lagerung einer Welle in vorgespannten Lagern ergibt eine genauere Wellenführung, weil Ausweichbewegungen der Wellenachse unter Belastung aufgrund der Vorspannung erschwert sind. Dies sichert z.B. bei Differentiallagerungen einen gleichbleibend genauen Zahneingriff und damit auch niedrigere dynamische Zusatzkräfte. Als Folge davon ergeben sich ein geräuscharmer Lauf und eine lange Lebensdauer der Verzahnung.

Ausgleich von Verschleiß und Setzvorgängen

Verschleiß und Setzvorgänge in der Lagerung während des Betriebs erzeugen Spiel, das durch die Vorspannung ausgeglichen wird.

Lange Gebrauchsdauer

Das Einhalten der richtigen Vorspannkraft beim Einbau verbessert in vorgespannten Lagerungen aufgrund einer besseren Lastverteilung im Lager die Betriebssicherheit und ergibt damit auch eine längere Gebrauchsdauer. Zu hohe Vorspannkräfte überlasten die Lager, was eine höhere Reibung und eine kürzere Gebrauchsdauer zu Folge hat.

Vorspannung in angestellten Lagerungen mit einreihigen Schrägkugellagern oder Kegelrollenlagern

Bei der Ermittlung der Vorspannung geht man von der Vorspannkraft im Betrieb aus, die erforderlich ist, damit Steifigkeit, Lebensdauer und Betriebssicherheit optimal aufeinander abgestimmt sind. Anschließend wird die Vorspannkraft bestimmt, mit der die Lager beim Einbau angestellt werden müssen. Die Lager sollen beim Einbau die gleiche Temperatur wie die Umgebung aufweisen und keinen zusätzlichen Belastungen ausgesetzt sein.

Die zweckmäßige Vorspannung im betriebswarmen Zustand richtet sich nach den Lagerbelastungen. Ein einreihiges Schrägkugellager oder ein Kegelrollenlager kann gleichzeitig radiale und axiale Belastungen aufnehmen. Unter radialer Belastung wird im Lager eine in axialer Richtung wirkende Kraft hervorgerufen, die von einem zweiten, spiegelbildlich angeordneten Lager aufgenommen werden muss. Bei rein radialer Verschiebung der Lagerringe zueinander ist der halbe Lagerumfang oder entsprechend die Hälfte der Wälzkörper belastet. Die im Lager hervorgerufene Axialkraft beträgt in diesem Fall:

- bei einreihigen Schrägkugellagern $F_a = R \cdot F_r$
- bei einreihigen Kegelrollenlagern $F_a = 0,5 \cdot F_r / Y$

Hierin sind:

F_a = die Axialkomponente der Lagerbelastung (**Bild 4**)

F_r = die Radialkomponente der Lagerbelastung (**Bild 4**)

R = eine Variable, abhängig vom Berührungswinkel

◦ 20° (Nachsetzzeichen AB) $\rightarrow R = 0,50$

◦ 25° (Nachsetzzeichen AC) $\rightarrow R = 0,57$

◦ 30° (Nachsetzzeichen A) $\rightarrow R = 0,66$

◦ 40° (Nachsetzzeichen B) $\rightarrow R = 0,88$

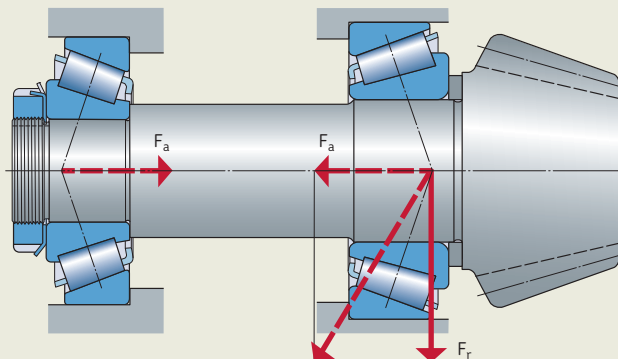
Y = der Axialfaktor des einreihigen Kegelrollenlagers (\rightarrow [Produkttablelle](#))

Bei einem mit F_r belasteten Einzellager muss demnach eine äußere Axialkraft F_a der gleichen Größe wie die interne Axialbelastung vorhanden sein, damit entsprechend der für Tragzahlangaben gültigen Voraussetzung der halbe Lagerumfang belastet ist. Ist die äußere Axialkraft kleiner, so verringert sich die Anzahl der tragenden Wälzkörper und damit die Tragfähigkeit des Lagers. Bei einer angestellten Lagerung, die aus zwei einreihigen Schrägkugellagern oder Kegelrollenlagern in O- oder X-Anordnung besteht, nehmen die beiden Lager wechselseitig die entstehenden Axialkräfte auf. Wenn beide Lager gleich sind, die Radialbelastung in der Mitte zwischen den Lagern angreift, gleichmäßig verteilt ist und die Lagerung spielfrei angestellt ist, stellt sich von selbst die Lastverteilung ein, bei der der halbe Lagerumfang belastet ist.

In anderen Belastungsfällen, vor allem bei Auftreten einer äußeren Axialbelastung, kann es erforderlich sein, die Lagerung vorzuspannen, damit das durch die belastungsbedingten elastischen Verformungen hervorgerufenen Spiel im axial entlasteten Lager ausgeglichen wird und sich dort auch eine günstige Lastverteilung einstellt.

Durch Vorspannen wird auch die Steifigkeit der Lagerung erhöht. Bei allen Betrachtungen über die Steifigkeit ist zu beachten, dass nicht allein die Federung der Lager eine Rolle spielt, sondern dass auch die Elastizität der Gegenstücke, die Passung der Lagerringe und die elastischen Verformungen aller anderen im Kraftfluss liegenden Teile einschließlich der Anlageflächen einen beträchtlichen Anteil an der Gesamtfederung haben. Die axiale und radiale Federung eines Lagers hängt von seiner inneren Konstruktion ab, d. h. von den Berührungsverhältnissen (Punkt- oder Linienberührung), der Anzahl und dem Durchmesser der Wälzkörper sowie dem Berührungswinkel. Je größer

Bild 4



der Berührungswinkel, umso größer ist die Lagersteifigkeit in axialer Richtung.

Nimmt man in erster Näherung eine lineare Abhängigkeit der Federung von der Belastung an, d. h. ein konstante Federrate, dann zeigt sich bei einem Vergleich, dass bei gleicher äußerer Axialkraft K_a die axiale Verschiebung in einer Lagerung mit Vorspannung kleiner ist als für eine Lageranordnung ohne Vorspannung (**Diagramm 1**). Eine Ritzzellagerung (**Bilder 6 und 7, Seite 6**) z. B. besteht im Allgemeinen aus zwei verschiedenen großen Kegelrollenlagern A und B mit den Federkonstanten c_A und c_B . Weiter ist die Lagerung mit der Kraft F_0 vorgespannt. Wirkt nun die äußere Axialkraft K_a auf das Lager A, so wird das Lager B entlastet, wobei die zusätzliche Belastung des Lagers A und die axiale Verschiebung δ_a kleiner sind als bei einer Lagerung ohne Vorspannung. Das Lager B wird jedoch von der axialen Vorspannkraft entlastet, und die axiale Verschiebung wird bei weiterer Belastung, wie bei einer nicht vorgespannten Lagerung, nur noch von der Federkonstanten des Lagers c_A bestimmt, wenn die äußere Axialkraft folgenden Wert übersteigt:

$$K_a = F_0 \left(1 + \frac{c_A}{c_B} \right)$$

Um eine völlige Entlastung des Lagers B zu vermeiden, wenn Lager A mit K_a belastet wird, ist demnach folgende Vorspannkraft erforderlich:

$$F_0 = K_a \left(\frac{c_B}{c_A + c_B} \right)$$

Die Kräfte und elastischen Verschiebungen in einer vorgespannten Lagerung lassen sich ebenso wie die Auswirkungen einer Änderung der Vorspannkraft am einfachsten an einem Vorspannkraft-Vorspannweg-Schaubild veranschaulichen (**Diagramm 1**). Aus dem Schaubild, das sich aus den Federkennlinien der miteinander vorgespannten Teile zusammensetzt, können folgende Zusammenhänge abgelesen werden:

- zwischen der Vorspannkraft und dem Vorspannweg innerhalb der vorgespannten Lageranordnung oder
- zwischen einer äußeren, an der vorgespannten Lagerung angreifenden Axialkraft K_a und den Lagerbelastungen sowie

Diagramm 1

Axialverschiebungen in Lagerungen mit und ohne Vorspannung

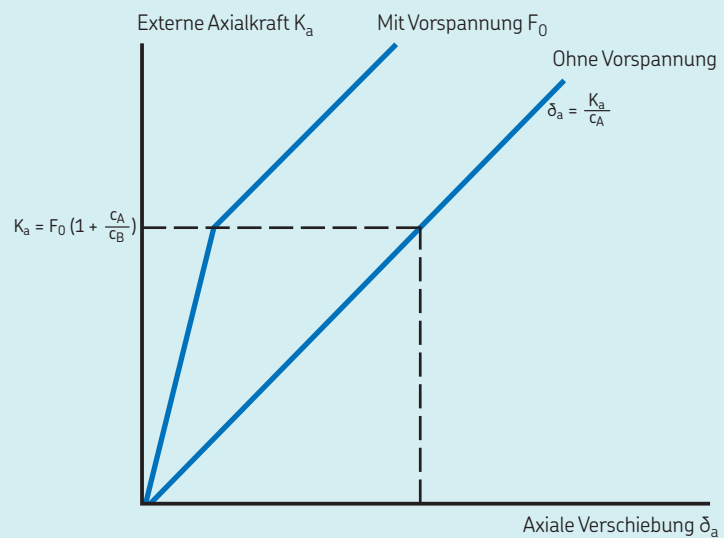
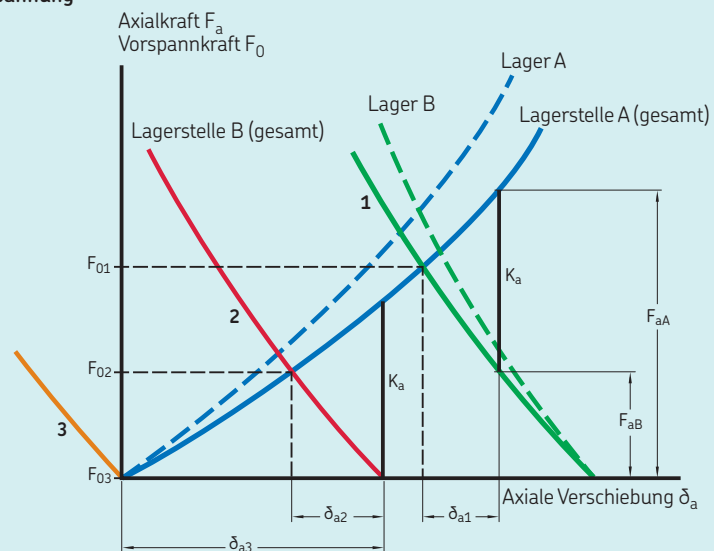


Diagramm 2

Die axiale Verschiebung in einer Lagerung in Abhängigkeit von äußerer Axialkraft und Vorspannung



der elastischen Verformung, die durch die äußere Kraft erzeugt wird.

In **Diagramm 2** sind alle durch die Betriebskräfte zusätzlich belasteten Bauteile in der von links nach rechts ansteigenden Federkennlinie und alle entlasteten Bauteile in den von rechts nach links ansteigenden Federkennlinien zusammengefasst. Die Kennlinien

1, 2 und 3 gelten für verschiedene Vorspannungskräfte ($F_{01}, F_{02} < F_{01}$ und $F_{03} = 0$). Die gestrichelten Linien beziehen sich jeweils auf das Lager allein, die durchgezogenen Linien auf die gesamte Lagerstelle.

Mit **Diagramm 2** lassen sich beispielsweise die Verhältnisse bei einer Ritzelwellenlagerung verdeutlichen, wenn das Lager A über Welle und Gehäuse gegen das Lager B vorgespannt ist (**Bild 5, Seite 6**). Die äußere Axialkraft K_a (Axialkomponente der Zahnkraft) überlagert sich der Vorspannkraft F_{01} (Kennlinie 1) in der Weise, dass das Lager A zusätzlich belastet und das Lager B entlastet wird. Die axiale Belastung an der Lagerstelle A ist mit F_{aA} , die an der Lagerstelle B mit F_{aB} bezeichnet. Unter dem Einfluss der Kraft K_a verschiebt sich die Ritzelwelle in diesem Fall axial um den Betrag δ_{a1} .

Die kleinere Vorspannkraft F_{02} (Kennlinie 2) ist so groß gewählt, dass das Lager B durch die Axialkraft K_a gerade entlastet wird,

d. h. $F_{aB} = 0$ und $F_{aA} = K_a$. Die Ritzelwelle verschiebt sich in diesem Fall um den Betrag $\delta_{a2} > \delta_{a1}$.

Bei nicht vorgespannter Lagerung (Kennlinie 3) ist die Axialverschiebung der Ritzelwelle am größten ($\delta_{a3} > \delta_{a2}$).

Anstellverfahren

Unter Anstellen wird das Einstellen der Lagerluft ebenso verstanden, wie das Vorspannen einer Lagerung mit zwei gegeneinander angeordneten Lagern. Im Betrieb stellt sich dann das gewünschte Betriebspiel bzw. die gewünschte Vorspannung ein.

Bei der für einreihige Schrägkugellager, Kegelrollenlager und auch für Rillenkugellager üblichen axialen Vorspannung wird die Vorspannkraft dadurch aufgebracht, dass einer der Ringe des einen Lagers in axialer Richtung um eine der gewünschten Vorspannkraft entsprechende Strecke, den Vorspannweg, verschoben wird.

Dem Prinzip nach unterscheidet man in diesem Fall zwei Hauptgruppen von Anstellverfahren: das individuelle und das kollektive Anstellen.

Individuelles Anstellen

Beim individuellen Anstellen wird jede Lagerung einzeln mit Hilfe von Muttern, Passscheiben, Abstandshülsen, verformbaren Zwischenhülsen usw. vorgespannt, wobei Mess- und Kontrollvorgänge sicherstellen, dass der festgelegte Nennwert der Vorspannkraft mit möglichst geringen Abweichungen eingehalten wird. Zum Einstellen der Vorspannung stehen mehrere Verfahren zu Auswahl:

- Anstellen über den Vorspannweg
- Anstellen über das Reibungsmoment
- Anstellen mit direkter Kraftmessung

Welches dieser Verfahren angewendet wird, hängt unter anderem ab vom Lagerungsfall oder der Anzahl der zu montierenden Lager. Individuelles Anstellen hat den Vorteil, dass die einzelnen Teile mit normalen Toleranzen gefertigt werden können und die gewünschte Vorspannung mit verhältnismäßig großer Genauigkeit erreicht wird.

Anstellen über den Vorspannweg

Die Grundlage dieses Verfahrens bildet die Abhängigkeit zwischen der Vorspannkraft und den elastischen Verformungen innerhalb der vorgespannten Lagerung. Sie ist in dem Vorspannkraft-Vorspannweg-Schaubild (**Diagramm 3**) dargestellt.

Dieses Anstellverfahren wird häufig angewendet, wenn die Teile der Lagerung so weit wie möglich vormontiert werden können. Die gewünschte Vorspannung, die als Vorspannweg angegeben wird, kann durch das Messen der Axialverschiebung der Welle gegenüber einen festen Punkt am Gehäuse eingestellt werden. Hierzu wird meist eine Messuhr verwendet.

Mit Hilfe entsprechend tolerierter Passscheiben, Zwischen- oder Abstandsrings kann die gewünschte Vorspannung eingestellt werden. Bei einer Ritzellagerung beispielsweise wird die Vorspannung erreicht durch:

- Einpassen von Zwischenringen zwischen die Außen- und Innenringe der beiden Lager (**Bild 5**)
- Einlegen von Passscheiben zwischen eine Gehäuseschulter und einen Lageraußenring oder zwischen eine Flanschbüchse und dem Gehäuse (**Bild 6**)
- Einpassen eines Abstandsrings zwischen eine Wellenschulter und einen der Lagerinnenringe (**Bild 7**) oder zwischen die Innenringe der beiden Lager

Diagramm 3

Abhängigkeit zwischen Vorspannkraft und elastischer Verformung in einem vorgespannten Lagerung

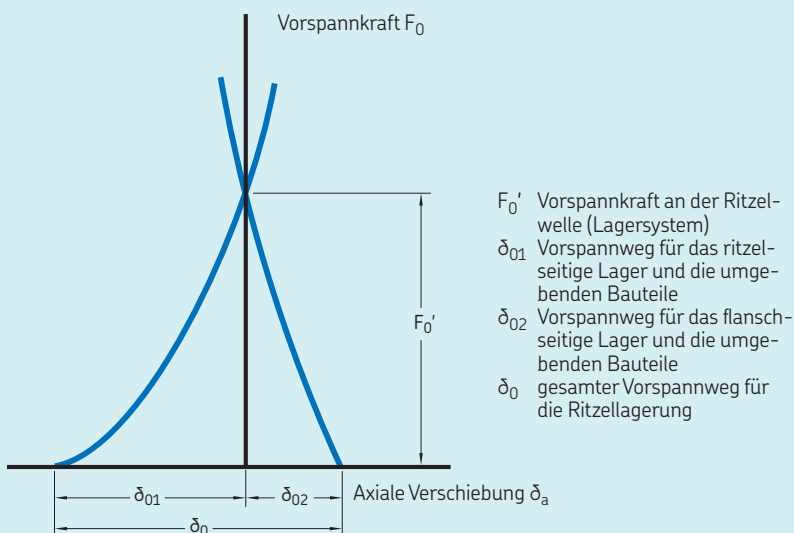
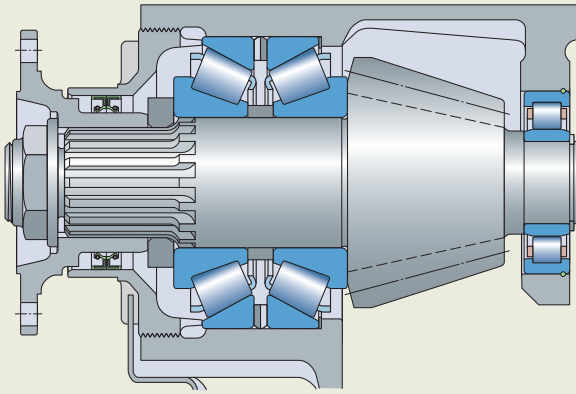
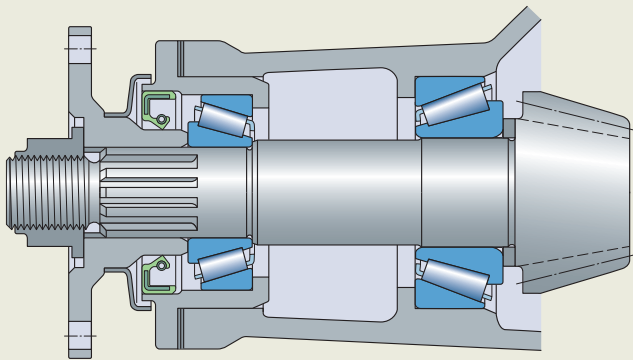


Bild 5

Die Breite der Passscheiben, der Zwischenringe oder der Distanzringe ist bestimmt durch:

- den Abstand zwischen der Wellen- und der Gehäuseschulter;
- der Gesamtbreite der beiden Lager;
- den der gewünschten Vorspannkraft entsprechenden Vorspannweg;
- einen Korrekturbeiwert für die axiale Verschiebbarkeit, um die Wärmedehnung während des Betriebs zu berücksichtigen;
- die Fertigungstoleranzen aller Teile, die vor dem Einbau durch Ausmessen der Teile festgestellt werden;
- einen Korrekturwert zur Berücksichtigung des Vorspannkraftabfall infolge von Verschleiß und Setzvorgängen.

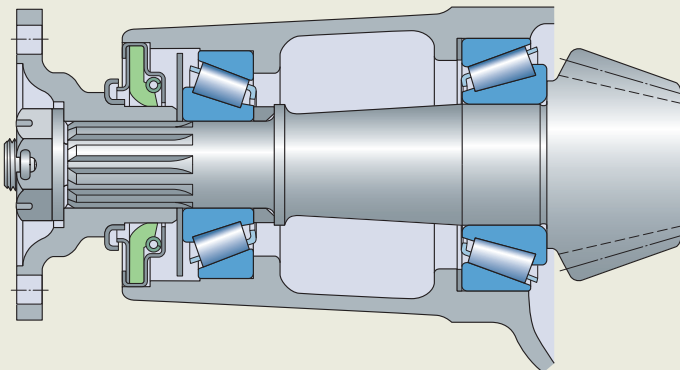
Bild 6

Anstellen über das Reibungsmoment

Dieses Anstellverfahren ist wegen des geringen Zeitaufwandes und der Möglichkeit weitgehender Automatisierung vor allem bei der Großserienfertigung üblich. Da zwischen der Lagerbelastung und dem Reibungsmoment im Lager ein eindeutiger Zusammenhang besteht, kann der Anstellvorgang abgebrochen werden, sobald das der erforderlichen Vorspannkraft entsprechende Reibungsmoment erreicht ist. Voraussetzung ist hier aber die laufende Kontrolle des Reibungsmomentes während des Anstellvorgangs. Zu beachten ist dabei allerdings, dass das Reibungsmoment von Lager zu Lager streut und außerdem von dem verwendeten Konservierungsmittel, dem Schmierzustand und der Drehzahl abhängt.

Anstellen mit direkter Kraftmessung

Da das Anstellen von Lagern den Zweck hat, eine bestimmte Vorspannkraft in den Lagern zu erzeugen, liegt es nahe, ein Verfahren anzuwenden, bei dem die Kraft auf direktem Wege erzeugt oder gemessen wird. In der Praxis werden allerdings indirekte Verfahren wie das Anstellen über den Vorspannweg oder über das Reibungsmoment vorgezogen, weil sie einfacher sind und mit einem geringeren Aufwand durchgeführt werden können.

Bild 7

Kollektives Anstellen

Für dieses Verfahren wird im englischen Sprachraum oft auch der Begriff „Random statistical adjustment“ benutzt. Bei diesem Anstellverfahren werden Lager, ihre Gegenstücke, die Abstandsringe oder -hülsen serienmäßig gefertigt und voll austauschbar

zusammengebaut. Bei Kegelrollenlagern erstreckt sich die Austauschbarkeit auch auf die einzelnen Lagerringe. Um einen unwirtschaftlichen Aufwand für die Fertigung sehr genauer Lager und Gegenstücke zu vermeiden, geht man von der Annahme aus, dass die Grenzwerte der Toleranzen – statisch gesehen – selten zusammentreffen. Wenn allerdings die Vorspannkraft mit einer möglichst geringen Streuung eingehalten werden soll, müssen die Fertigungstoleranzen eingeeengt werden. Der Vorteil der kollektiven Anstellung besteht darin, dass keine Kontrollen und keine besonderen Einrichtungen erforderlich sind.

Einhalten der richtigen Vorspannung

Bei der Wahl der Vorspannkraft für eine Lageranordnung ist zu beachten, dass sich die Steifigkeit nur noch unwesentlich erhöht, sobald die Vorspannung einen bestimmten optimalen Wert überschreitet. Dagegen nimmt die Reibung und damit auch die Erwärmung zu; außerdem fällt die Lebensdauer der Lager wegen der ständig wirkenden zusätzlichen Belastung stark ab. Eine zu starke Vorspannung kann mit einem Risiko für die Betriebssicherheit der Lagerung verbunden sein. Aus diesem Grund und wegen der erforderlichen komplexen Berechnungen, die normalerweise zur Bestimmung der angemessenen Vorspannkraft erforderlich sind, empfiehlt SKF moderne Berechnungsprogramme, wie z.B. SKF SimPro Quick und SKF SimPro Expert einzusetzen oder den Technischen SKF Beratungsservice einzuschalten.

Wichtig ist auch, beim Anstellen einer Lagerung mit Vorspannung durch geeignete Maßnahmen sicherzustellen, dass der errechnete oder aufgrund von Erfahrungen festgelegte Wert für die Vorspannkraft mit möglichst geringer Streuung eingehalten wird. Dazu gehört z. B. bei Lagerungen mit Kegelrollenlagern, dass die Lager während des Anstellens mehrmals gedreht werden, damit die Rollen nicht schränken und die Rollenstirnflächen gut am Innenring-Führungsbord anliegen. Anderenfalls wird das Kontrollergebnis verfälscht und die endgültige Vorspannung kann weit unter dem gewünschten Wert liegen.

Lager für Lageranordnungen mit Vorspannung

Für bestimmte Anwendungsfälle liefert SKF Einzellager oder zusammengepasste Lagersätze in verschiedenen Sonderausführungen, die einfacher und zuverlässiger ange stellt werden können oder bereits bei der Fertigung so aufeinander abgestimmt werden, dass sich nach dem Einbau ein vorher festgelegter Wert für die Vorspannung ergibt. Dazu gehören:

- Kegelrollenlager der Ausführung CL7C für Lagerungen mit erhöhter Laufgenauigkeit, wie z. B. Ritzelwellenlagerungen (*→ Kegelrollenlager*)
- Einreihige Universal-Schräggugellager für den satzweisen Einbau (*→ Schräggugellager*)
- Einreihige zusammengepasste Kegelrollenlager (*→ Kegelrollenlager*)
- Einreihige zusammengepasste Rillenkugellager (*→ Rillenkugellager*)