

FORM- UND LAGETOLERIERUNG DER ANSCHLUSSKONSTRUKTION VON WÄLZLAGERN

Eine Zusammenfassung von Toleranzempfehlungen und Richtlinien durch Normen
und Herstellerangaben

Vera Denzer, Walter Jorden

1 Einleitung

Eine Werkstückbeschreibung muss hinreichend *eindeutig* und *vollständig* sein, damit sie für Fertigung und Qualitätsmanagement brauchbar ist. Die Angabe von Maßen und Maßtoleranzen allein genügt diesen Anforderungen nicht. Um die notwendige Form- und Lagetolerierung korrekt und unter Beachtung der Funktions-, Fertigungs- und Prüfgerechtigkeit anzuwenden, reicht das Fachwissen des Ingenieurs auf diesem Gebiet oft nicht aus; dies belegen Studien von Susanto und Schütte [Sus91; Sut95]. In der Praxis ist es deshalb üblich, die Toleranzangaben ähnlicher Konstruktionen zu übernehmen und/oder den Toleranzwert sehr eng zu wählen. Der Fertigungsaufwand dieser „Angsttoleranzen“, d. h. der geschätzten oder gar willkürlich festgelegten Toleranzwerte, wird meist erst in der Arbeitsvorbereitung erkannt und beanstandet. Die Schwierigkeit liegt somit nicht nur darin, die richtige Toleranzart festzulegen, sondern auch einen geeigneten Toleranzwert anzugeben. Praktisch brauchbare Zahlenwerte über Toleranzangaben erhält man am günstigsten dadurch, dass man eine Reihe von als funktionsfähig bekannten Teilen nachmisst und daraus Toleranzwerte ableitet. Die Literatur, u. a. Normen und Kataloge, bietet dazu nur wenige Werte [Jor98; Sro98].

Gerade bei der Toleranzfestlegung der Anschlusskonstruktion typischer Maschinenelemente wie Lagersitze, Anschlußflächen von Dichtringen u. a., besteht oft keine andere Möglichkeit, als die Toleranzangaben aus Katalogen der Hersteller und/oder die entsprechenden Normen zu nutzen. Diese werden meist als ausreichend zur Funktionsfestlegung und Qualitätssicherung angesehen.

Sind die Toleranzangaben in Herstellerkatalogen und Normen für typische Maschinenelemente aber ausreichend, um die Forderungen an eine Zeichnung auf Eindeutigkeit und Vollständigkeit erfüllen zu können?

Wie sinnvoll sind diese Toleranzangaben hinsichtlich ihrer Funktions-, Fertigungs- und Prüfgerechtigkeit?

Diese Fragen sollten durch die Auswertung einer Zusammenstellung von Toleranzempfehlungen an die Anschlusskonstruktion von Wälzlagern aus Literatur, Herstellerinformationen, den entsprechenden Normen und der Betrachtung der Funktionsanforderungen für die typischen Maschinenelemente beantwortet werden.

Hersteller verwiesen bei Anfragen nach Toleranzempfehlungen an die Anschlusskonstruktion ihrer Produkte lediglich auf die Angaben in ihren Katalogen bzw. auf die entsprechenden Normblätter. Die dabei zugesandten Produktkataloge der verschiedensten Hersteller (hier SKF, GMN, SNR, FAG, INA) mussten daher als Toleranzempfehlungen neben den entsprechenden Normen genügen [Sro98].

2 Gestaltung der Wälzlager-Anschlusssteile

In internationalen Normen sind die Toleranzen für die Hauptabmessungen und die Laufgenauigkeit von Wälzlagern festgelegt (ISO 199-1997, ISO 492-1986, ISO 578-1973, AFBMA Standard 19-1974, DIN 620). Eine Lagerung umfasst aber nicht nur das Lager selbst, sondern auch die unmittelbar anschließenden Bauteile wie Welle und Gehäuse. Hier werden vor allem die Kontaktflächen des Lagers zur Umgebungskonstruktion betrachtet, d. h. die Lagersitze an Welle und Gehäuse (s. Bild 1). Da die Genauigkeit der Umgebungskonstruktion der Genauigkeit der verwendeten Lager entsprechen sollte, findet man in Herstellerkatalogen Richtwerte für Maß-, Form- und Lagetoleranzen, die bei der Bearbeitung der Kontaktflächen einzuhalten sind; dieses gilt auch für die Norm DIN 5425-1 - Wälzlager; Toleranzen für den Einbau; Allgemeine Richtlinien.

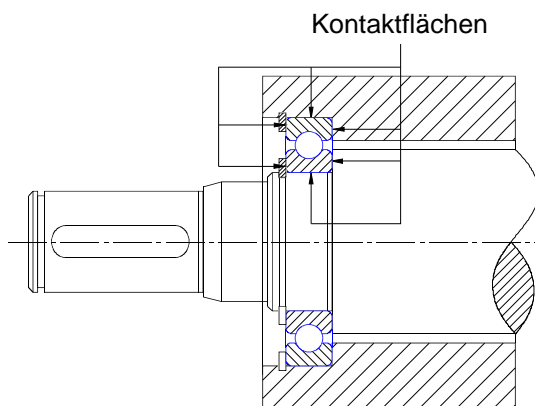


Bild 1: Kontaktflächen eines Radial-Wälzlagers zur Anschlusskonstruktion

2.1 Form- und Lagetolerierung der Kontaktflächen

Die in der Norm DIN 5425-1 enthaltenen Regeln gelten für den Einbau von Wälzlagern mit Bohrungs- Nenndurchmessern bis $d = 500$ mm und behandeln allgemein übliche Einbaufälle für Wellen und Gehäuse aus Stahl, Stahlguss oder Gusseisen. Abschnitt 3 der Norm enthält dabei die folgenden Empfehlungen für Form- und Lagetoleranzen für Pass- und Anlageflächen der Umgebungskonstruktion.

- Zylinderformtoleranz für die Passflächen

Die Zylinderformtoleranz für Passflächen auf Wellen und in Gehäusen soll je nach Anforderung um mindestens einen Grundtoleranzgrad besser sein als die vorgeschriebene Maßtoleranz des Lagersitzdurchmessers. Der Toleranzwert t_z entspricht dann der halben Durchmessertoleranz des Toleranzgrades. Es gilt:

$$t_z = IT(n-1) / 2 \quad (n = \text{Grundtoleranzgrad des Lagersitzdurchmessers}) \quad (1)$$

- Rechtwinkligkeitstoleranz für Anlageflächen

Für die Anlageflächen der Wälzlagerringe empfiehlt die Norm eine Rechtwinkligkeitstoleranz, die mindestens um einen Toleranzgrad enger ist als die zugehörige Maßtoleranz des Lagersitzdurchmessers. Es gilt in diesem Fall:

$$t_R = IT(n-1) \quad (2)$$

Betrachtet man die Toleranzempfehlungen der einzelnen Hersteller von Wälzlagern für die Kontaktflächen der Anschlusskonstruktion (Bild 1) und vergleicht diese mit den Angaben der

DIN 5425-1, so zeigt sich, dass diese meist übereinstimmen. Den Toleranzwert um einen IT-Grundtoleranzgrad besser zu wählen als die Grundtoleranz des jeweiligen Durchmessers, gilt auch hier als Faustregel.

Gelegentlich wird die Zylinderformtoleranz von Herstellern mit $t_z = IT3$ angegeben. Da Wellenabsätze üblicherweise mit dem Grundtoleranzwert IT6 gefertigt werden, liegt man mit IT3 etwa in derselben Größenordnung wie mit den in der Norm angegebenen Toleranzwerten für $(IT5) / 2$ (siehe Kap. 2.3). Ein anderer Hersteller gibt die Form- und Lagesitzflächen mit einer Rundheits- und Parallelitätstoleranz an. Die angegebenen Toleranzwerte sind aber auch hier mit denen der Norm zu vergleichen. Man kann in der Praxis davon ausgehen, dass die Zylinderformtoleranz t_z etwa ein Halbes bis ein Drittel der Maßtoleranz T beträgt [Jor98].

Einige Hersteller (GMN, SNR, FAG, INA) schlagen anstelle der Rechtwinkligkeitstoleranz eine einfache Planlauf-toleranz für die Anlagefläche vor. Hierdurch wird z. B. eine höhere Balligkeit der Anlagefläche zugelassen und die Ebenheit, sonst in der Rechtwinkligkeit mit einbeschlossen, nicht weiter eingeschränkt als durch die Allgemeintoleranzen. Da beide Toleranzangaben die Funktion der Anlagefläche gleichermaßen erfüllen und bei der Rechtwinkligkeitstoleranz eine unnötige Zusatzeinschränkung der Ebenheit gegeben wäre, ist die Angabe einer Planlauf-toleranz bei genauerer Betrachtung sinnvoller. Die Faustregel zur Ermittlung des Toleranzwertes, mindestens einen IT-Grundtoleranzgrad besser zu wählen als die des jeweiligen Lagersitzdurchmessers, kann auch an dieser Stelle übertragen werden.

2.2 Fluchtung der Bezugs-Lagersitze

Im Idealfall liegen die Achsen der Lagersitze auf einer Raumgeraden, d. h. sie müssen fluchten bzw. koaxial zueinander sitzen. DIN 5425-1 sowie einige Hersteller geben keine Hinweise und Empfehlungen zur Tolerierung der Lagegenauigkeit der Lagersitze.

Vielfach ist in Herstellerangaben (SNR, GMN, FAG) eine Einschränkung der Koaxialität, wie sie in Bild 2 dargestellt ist, zu finden. Diese Tolerierung sieht auf den ersten Blick zweckmäßig aus, ist aber weder funktions- noch prüfgerecht.

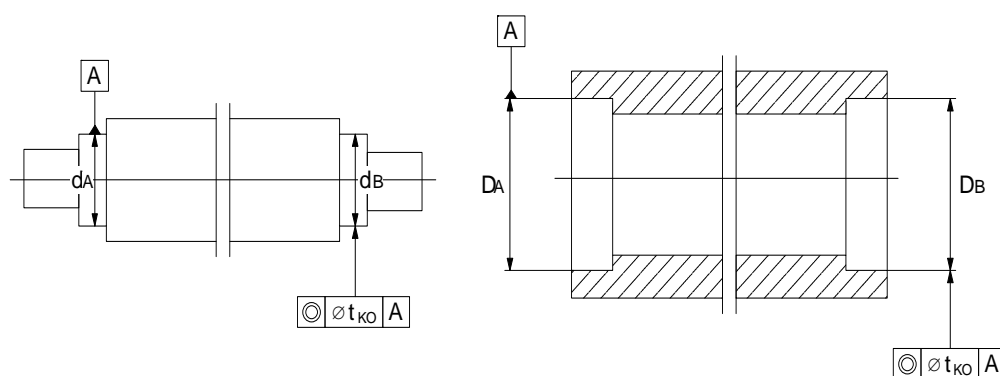


Bild 2: Ungünstige Koaxialitätstolerierung zweier Lagersitze

Sie ist nicht funktionsgerecht, da die Koaxialitätstolerierung dem tolerierten Sitz bei näherer Betrachtung der Toleranzauswirkung eine größere Abweichung einräumt als dem Sitz, der als Bezugselement dient. Sie verursacht damit eine Ungleichbehandlung der beiden Lagersitze. Diese sind aber in funktionaler Hinsicht gleichwertig.

Auch bei Betrachtung der Prüfbarkeit ist die „ungleichmäßige Koaxialitätstolerierung“ unbrauchbar. Die Messmaschine ermittelt zunächst die Bezugsachse A und verlängert sie um das N-fache bis zum tolerierten Lagersitz. Dadurch vergrößert sich die Messunsicherheit ebenfalls auf das N-fache. Eine 8-fache Verlängerung der Bezugsachse A würde z. B. zu einer 8-fachen Vergrößerung der Messunsicherheit führen. Schon geringe Abweichungen bei der Berechnung der Achse oder in der Lage des Bezugsselements führen dazu, dass das tolerierte Element außerhalb der Toleranzzone liegt (Bild 3). Das liegt am Bezugsselement, das sehr genau in Richtung des tolerierten Elements fluchten muss, damit die Toleranz eingehalten wird; dagegen darf das tolerierte Element seine Toleranzzone voll ausschöpfen. Seine Achse darf, verglichen mit der Bezugsachse, eine viel größere Winkelabweichung haben. Eine Einschränkung der Koaxialitätstoleranz, z. B. um die Hälfte, wäre aufgrund der Messunsicherheit ebenfalls indiskutabel.

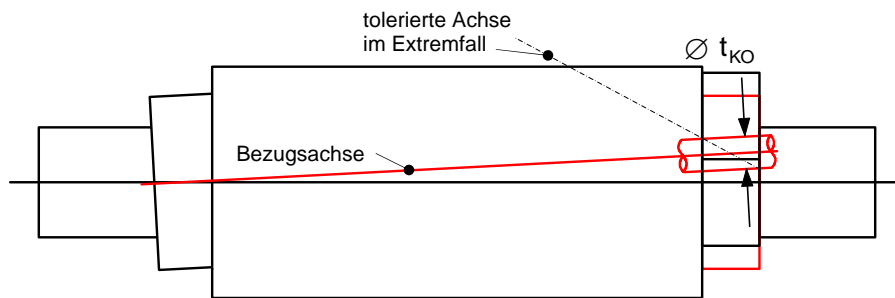


Bild 3: Koaxialitätstoleranz mit der Achse des linken Lagersitzes als Bezug

Ziel einer Tolerierung muss es sein, bei funktionaler Gleichwertigkeit der beteiligten Elemente die Abweichung von der tatsächlichen Drehachse derart einzuschränken, dass für beide Lagersitze die gleichen Abweichungen zulässig sind. Hier stehen die im folgenden genannten Möglichkeiten der Tolerierung zur Verfügung [Jor98; Sro98]:

- Geradheitstoleranz mit gemeinsamer Toleranzzone (Bild 4a).
- Koaxialitätstoleranz mit derselben Bezugsachse A-B, mit abgeleitetem Bezug aus beiden Lagersitzen A und B (Bild 4b).

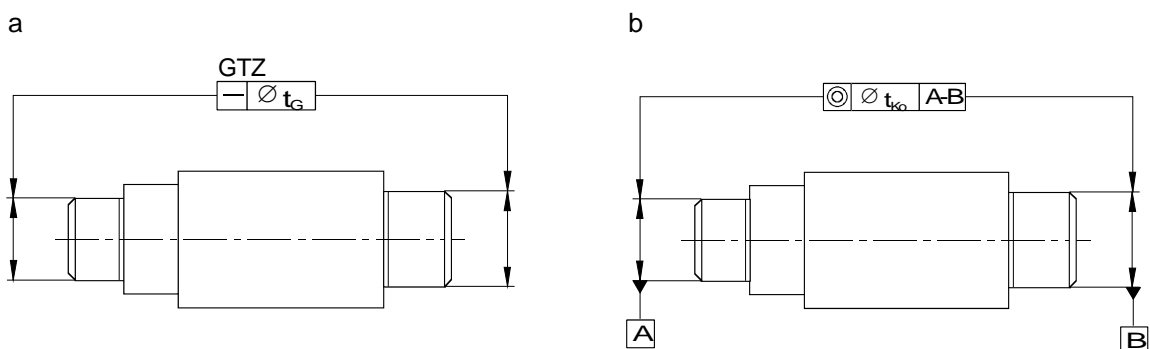
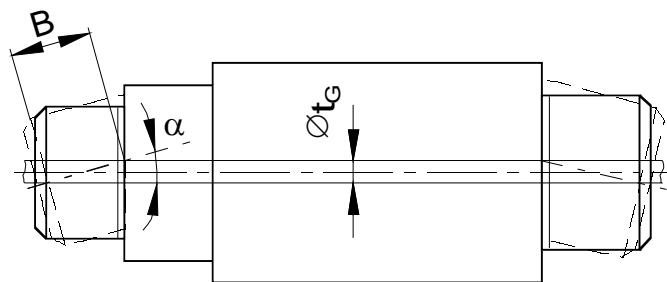


Bild 4: Tolerierung für zwei Lagersitze A und B als Bezugselemente

Bei der Vergabe der Toleranzwerte für die maximal zulässige Koaxialitätsabweichung gibt nur ein Hersteller den Wert für Kugellager der Toleranzklassen P6 sowie P5 und mit der ISO-Grundtoleranz IT4 an. Alle anderen Hersteller machen keine direkten Angaben zum Toleranzwert für die Fluchtung der Lagersitze, sondern orientieren sich an der Winkeleinstellbarkeit des jeweiligen Lagers. Aus dem Zusammenhang zwischen der Winkeleinstellbarkeit eines Lagers und der Geradheitstoleranz des Bezugs lässt sich dann ein Anhaltswert ermitteln (Bild 5). Es gilt

$$t_G = B \cdot \sin \alpha . \quad (3)$$



Legende:

α = max. Winkeleinstellbarkeit

t_G = Toleranzwert

B = Breite des Lagers

Bild 5: Zusammenhang zwischen Winkeleinstellbarkeit eines Lagers und der Geradheitstoleranz

Alternativ zu den oben genannten Toleranzarten empfiehlt ein Hersteller die Verwendung der Toleranzarten Gesamtrundlauf für die Lagersitze und Gesamtplanlauf für die Anlageflächen der Anschlusskonstruktion. Der Toleranzwert bezieht sich bei ihm wieder auf die Faustregel, den Toleranzwert um einen IT-Grundtoleranzgrad besser zu wählen als die Grundtoleranz des jeweiligen Durchmessers.

Die Gesamlaufstoleranz enthält Koaxialität und Zylindrizität. Eine Differenzierung der einzelnen Toleranzen ist jedoch nicht möglich und es kann im Grenzfall jede Einzeltoleranz die Gesamlaufstoleranz t_{LG} erreichen. [Jor98]

2.2.1 Zusammenfassung der Toleranzempfehlungen für die Fluchtung der Lagersitze

Für die Tolerierung der zulässigen Fluchtungsabweichung der Lagersitze aus gibt es im Gegensatz zur Form- und Lagetolerierung der Anschlussflächen keine Vorgaben durch Normen, an die sich der Konstrukteur halten könnte. Die Palette der Toleranzempfehlungen von Herstellern für die Angabe zur Tolerierung der Fluchtung der Lagersitze ist daher sehr vielfältig und teilweise nicht funktions- und prüfgerecht (Bild 2) oder sinnvoll.

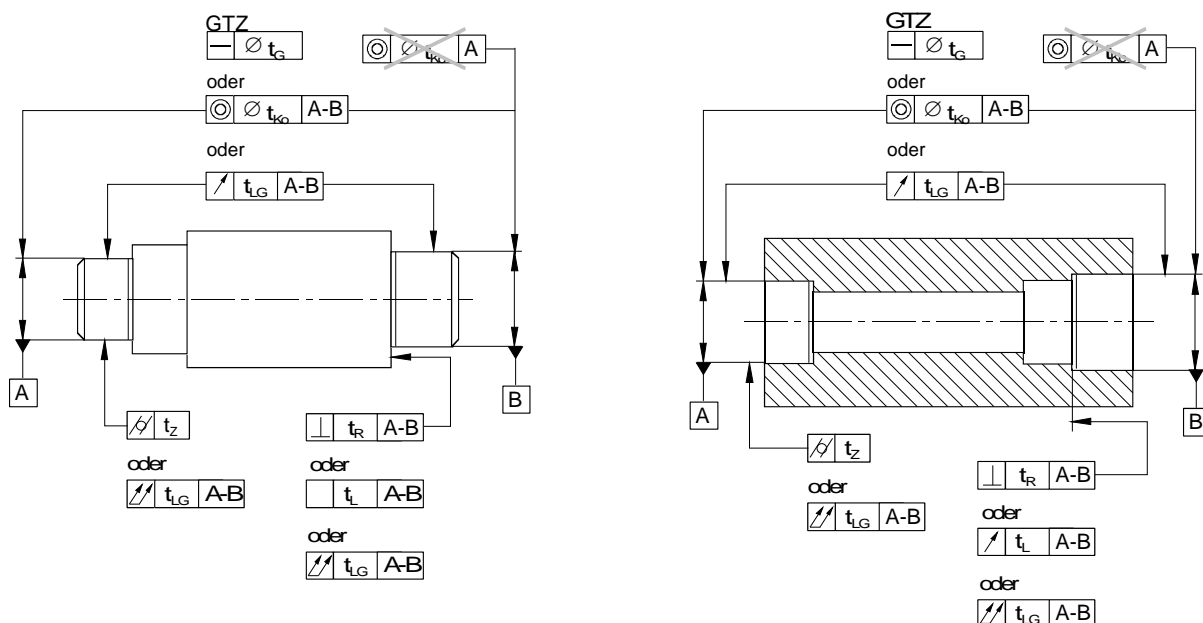


Bild 6: Form- und Lagetolerierung von Lagersitzen an Wellen und Gehäusen

Je nach Hersteller werden die zulässigen Fluchtungsabweichungen der Lagersitze über Koaxialitäts-, Geradheit- und Gesamtrundlauf toleranz festgelegt (Bild 6).

Bei der Toleranzwertangabe, die die Fluchtungsabweichung zweier Lagersitze eingrenzen soll, sind die Empfehlungen des Herstellers vergleichbar. In den meisten Fällen ist der Toleranzwert über die Winkeleinstellbarkeit des Wälzlagers zu berechnen und wird bei Anwendung der Koaxialitätstoleranz oder der Geradheitstoleranz mit gemeinsamer Toleranzzone angegeben. Entschließt sich der Konstrukteur für die Angabe der Lauf toleranz, so richtet sich der Toleranzwert wieder nach der o. g. Faustformel.

2.3 Beispiel zur Ermittlung der Toleranzwertempfehlungen

Neben der sinnvollen Angabe der Toleranzart bei der Form- und Lagetolerierung der Anschlusskonstruktion ist die Ermittlung des Toleranzwertes durch die Vorgaben von Normen und Herstellerangaben von entscheidender Bedeutung. Das folgende Beispiel der Lagersitztolerierung einer Welle soll deshalb zur Unterstützung und Verdeutlichung der Toleranzwertermittlung beitragen.

Die Lagersitze einer Welle (Bild 7) haben die Passmaße $\varnothing 140 \text{ m6}$. Die Toleranzwerte der Kontaktflächen sollen je nach Anforderung an das Wälzlager um mindestens einen Grundtoleranzgrad besser sein als die vorgeschriebene Maßtoleranz des Lagersitzdurchmessers.

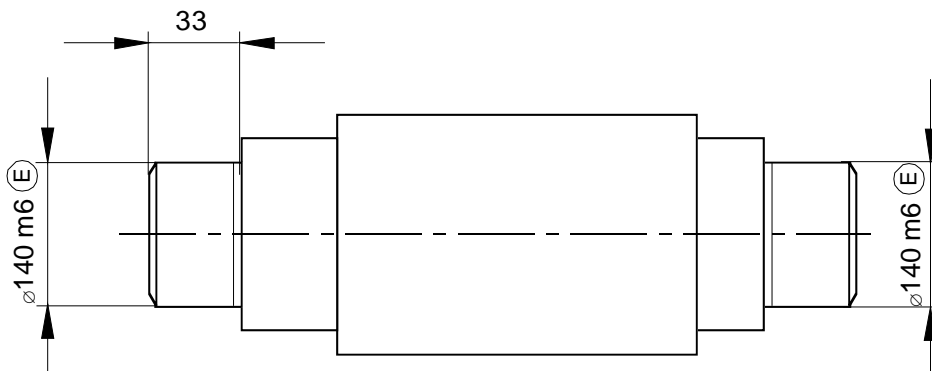


Bild 7: Beispiel zur Tolerierung von Lagersitzen

Für die Anschlussflächen der Wälzlager nach Bild 1 ergeben sich die folgenden Toleranzwerte für

- die Zylinderformtoleranz (Bild 8a) der Lagersitze $\varnothing 140 \text{ m6}$ ($T = 25 \mu\text{m}$)
 - nach der Faustregel mit Gl. 1: $\Rightarrow t_z = IT5 / 2 = 18 \mu\text{m} / 2 = 9 \mu\text{m}$
 - mit $\Rightarrow t_z = IT3 = 8 \mu\text{m}$
 - $t_z = (1/2 \dots 1/3) T$; mit Maßtoleranz $T = IT6 = 25 \mu\text{m} \Rightarrow t_z = 12,5 \dots 8,3 \mu\text{m}$
- die Rechtwinkligkeits-/Planlauf toleranz (Bild 8b) der Anlageflächen
 - nach der Faustregel mit Gl. 2: $\Rightarrow t_z = IT5 = 18 \mu\text{m}$

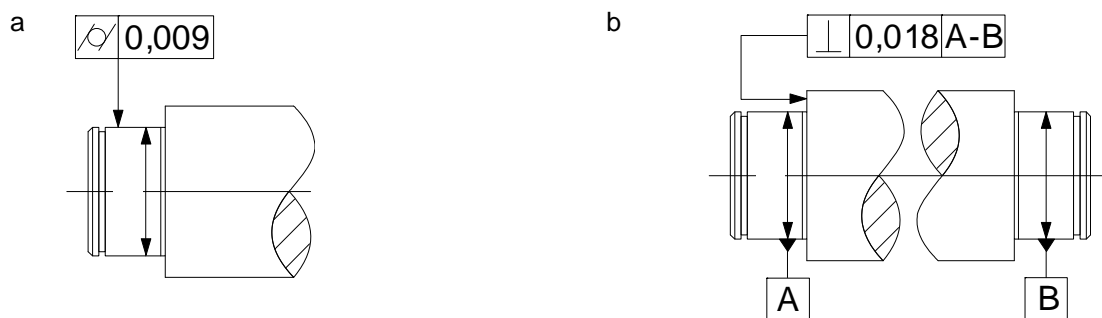


Bild 8: *Beispiel. a) Zylinderformtoleranz; b) Rechtwinkligkeits-/Planlauf toleranz*

Der Toleranzwert für den zulässigen Fluchtungsfehler der beiden Lagersitze orientiert sich an der Winkeleinstellbarkeit der Wälzlager. Dieser beträgt im Beispiel (Rillenkugellager 6028) 5...12 Winkelminuten [Brä95]. Nach Gl. 3 mit $t_G = B \cdot \sin \alpha$ (Bild 5) ergibt sich daraus ein Toleranzwert von

$$t_G = 0,0015 \dots 0,0035 B \quad (B = \text{Breite des Lagers})$$

Bei der Breite eines Lagersitzes von 33 mm ergibt sich ein Toleranzwert, der zwischen

$$t_G = 48 \mu\text{m} \dots 115 \mu\text{m}$$

liegen wird.

Geht man für höhere Ansprüche eher von dem kleineren Wert für α aus, so liegt der Zahlenwert der Fluchtungstoleranz in der Größenordnung noch über der Maßtoleranz T . Bei Zylinderrollenlagern und Nadellagern ist die Winkeleinstellbarkeit wesentlich geringer ($\alpha = 4' \dots 1'$), d. h. damit rückt der Fluchtungstoleranzwert in die Größenordnung 40...10 μm , also etwa bis herab zur Zylinderformtoleranz.

Die Ergebnisse der Ermittlung der Toleranzwerte des Beispiel zur Tolerierung der Lagersitze, mit dem Passmaß $\varnothing 140 \text{ m6}$ und einer Breite von $B = 33 \text{ mm}$, sind in der folgenden Tabelle (Tab. 1) für die einzelnen Form- und Lagetoleranzen zusammengestellt.

Toleranz	Festlegung des Toleranzwertes	Toleranzwert [μm]
t_Z oder oder	$t_Z = (^{1/2} \dots ^{1/3}) \text{IT}6$ IT5 / 2 IT 3 bzgl. des Lagersitzdurchmessers	12 ... 9 9 8
t_R	IT5	18
t_G	Winkeleinstellbarkeit α (5'...12') $t_G = \sin \alpha \cdot B$	48 ... 115
t_{K_0} oder	Winkeleinstellbarkeit α (5'...12') $t_{K_0} = \sin \alpha \cdot B$ IT 4 (Kugellager d. Toleranzkl. P5/P6)	48 ... 115 1
t_L	IT 6 bis IT 3	25 ... 8

Tab. 1: *Zusammenfassung möglicher Toleranzwerte zur Tolerierung der Anschlusskonstruktion für Rillenkugellager mit $d = \varnothing 140 \text{ mm}$ und $B = 33 \text{ mm}$*

3. Schlußbemerkung

Die Hersteller von Wälzlagern liefern fast lückenlos Angaben zur Form- und Lagetolerierung einschließlich entsprechender Toleranzwertempfehlungen. Dabei halten sie sich bei der Tolerierung der Kontaktflächen mehrheitlich an die Toleranzempfehlungen der DIN 5424-1, aber Alternativvorschläge, wie einfache Planlauf- oder Gesamtplanlauf-toleranz, sind ebenfalls zu finden. Ihre Toleranzempfehlungen, die sicherstellen sollen, dass die Achsen der Lagersitze miteinander fluchten, sind jedoch teilweise unbrauchbar, da die funktions- bzw. prüfgerechten Anforderungen nicht gewährleistet sind.

Trotz ausführlicher Angaben zur Form- und Lagetolerierung von Wälzlagern kann sich ein Konstrukteur selten sicher sein, dass seine direkt aus einem Herstellerkatalog entnommenen Daten zur Form- und Lagetolerierung sinnvoll sind. Falsche Angaben wie die der Koaxialitätsempfehlung (Bild 2) und Berechnungen, die notwendig sind, den Toleranzwert zu erlangen, wie z. B. die Fluchtungsabweichung über die Winkeleinstellung der Wälzlager, stellen neben der Vielzahl von Alternativen, die die verschiedenen Hersteller zur Tolerierung vorschlagen, ein erhebliches Fehlerpotential dar.

Eine einheitliche Festlegung zur Form- und Lagetolerierung sowie direkte Angaben der Toleranzwerte bei der Tolerierung der Anschlusskonstruktion von Wälzlagern würden eine große Erleichterung darstellen und einen weiteren Schritt in Richtung Qualitätssicherung bringen. Bei einer rechnerintegrierten Unterstützung könnte zudem von herstellerspezifischen Lösungen abgesehen werden, wenn eine geschlossene Form- und Lagetolerierung der Anschlusskonstruktionen typischer Maschinenelemente gegeben wäre.

4 Literatur

- [Jor98] Jorden, W.: *Form- und Lagetoleranzen*. Hanser Verlag, München 1998.
- [Brä95] Brändlein, J., u. a.: *Die Wälzlagerpraxis*. Vereinigte Fachverlage, Mainz 1995.
- [Sro98] Schröder, M.: *Zusammenstellung typischer Maschinenelemente mit den zugehörigen Anforderungen für eine Maß-, Form- und Lagetolerierung der Anschlusskonstruktion*. Studienarbeit an der Uni-GH Paderborn, Paderborn 1998.
- [Sus85] Susanto, A.: Industriebefragung zur Anwendungssituation der Normen DIN 7184 Teil 1, DIN 2300, DIN 7150 Teil 2 und DIN 7168 Teil 2. *DIN Mitteilungen und Elektronorm* 64 (1985), Nr. 7, S. 350-356.
- [Sut95] Schütte, W.: *Methodische Form- und Lagetolerierung*. Dissertation an der Uni-GH Paderborn, Paderborn 1995.
- [DIN 5425-1] DIN 5425 T1: *Wälzlager; Toleranzen für den Einbau; Allgemeine Richtlinien*. Berlin, Beuth, November 1984.
- [ISO 1101] DIN ISO 1101: *Form- und Lagetolerierung – Form, Richtungs-, Orts- und Lagetoleranzen – Allgemeines, Definitionen, Symbole, Zeichnungseintragungen*. Berlin, Beuth, März 1985.
- [ISO 286-1] DIN ISO 286 T1: *ISO-System für Grenzmaße und Passungen – Grundlagen für Toleranzen, Abmaße und Passungen*. Berlin, Beuth, November 1990.



Laboratorium für Konstruktionslehre
Prof. Dr.-Ing. W. Jorden
Uni-GH Paderborn

Dipl.-Ing. Vera Denzer
Pohlweg 47-49, D-33098 Paderborn
Tel.: +49 5251 / 60-2230
Fax.: +49 5251 / 60-3206
Email: jdenz1@hrz.nw-uni.paderborn.de