

7 Anwendungsrichtlinien und Anwendungsbeispiele

Die in diesem Buch dargestellten Zusammenhänge sind in einem Computerprogramm „PolExact“-web-online-Berechnungsprogramm *Maßhaltigkeitsnachweise für Kunststoff- und Gummiteile* verarbeitet [38].

7.1 Passungsauswahl

Presspassungen sind in der Passungsauswahlreihe mit den Toleranzlagen x und u (System Einheitsbohrung) ausgewiesen. Wichtigstes Anwendungsgebiet ist die Herstellung von Kunststoffteilen mit Metallachsen (Stahl, Messing), wie kleinen Zahnrädern, Kupplungen, Nocken, Hebeln durch nachträgliches Einpressen der Achsen in die mit Bohrung vorgefertigten Kunststoffteile. Es ist dabei üblich im System Einheitswelle zu arbeiten, da für die Achsen häufig Normmaterialien eingesetzt werden können. Ein weiteres Anwendungsgebiet ist die Befestigung von Metallachsen in Kunststoffteilen als Träger, wie das beispielsweise an Scharnieren bekannt ist. Weitere Anwendungen sind festsitzende Zapfen oder Bunde.

Die Metallachsen liegen üblicherweise im Nennmaßbereich bis 3 mm. Für diese kleinen Nennmaße sind die in der Passungsauswahlreihe aufgeführten Toleranzklassen IT 8 an Kunststoffteilen nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand realisierbar. Hinzu kommt, dass für Pressverbindungen mit Kunststoffen andere Kriterien gelten. Die für die oben genannten Teile eingesetzten Kunststoffe sind überwiegend von teilkristalliner Struktur (PA, PP, POM, PC, PBTP, häufig faserverstärkt). Die Mikroschädigungsgrenze dieser Werkstoffe liegt bei ca. 2 bis 3 % Verformung. Oberhalb der Mikroschädigungsgrenze nehmen insbesondere die Werte der dynamischen Dauerfestigkeit ab und die Spannungsrisseigung bei Medieneinfluss stark zu. Damit lassen sich 3 % elastische Verformung als obere Grenze und 1 % elastische Verformung als untere Grenze postulieren, um eine ausreichende Haftfestigkeit gegen Verdrehen und Verschieben zu gewährleisten. In [16] werden, um die Anwendung einer Presspassung in einem weiteren Temperaturbereich zu ermöglichen, größere Verformungen zugelassen, indem gegen die Streckgrenze als zulässige Beanspruchungsgrenze gerechnet wird. Auf Grund des größeren Wärmeausdehnungskoeffizienten im Vergleich zu Metallen sind Presspassungen mit Kunststoffen sehr temperaturempfindlich.

Für das Nennmaß 1 mm muss demnach das Bohrungsuntermaß zwischen 0,01 und 0,03 mm liegen. Die Toleranz beträgt 20 µm. Das entspricht ungefähr einer Toleranzklasse IT 9.

Für das Nennmaß 3 mm muss das Bohrungsuntermaß zwischen 0,03 und 0,09 mm liegen. Hier beträgt die Toleranz 60 µm. Diese Bohrung ist in der Toleranzgruppe „Feinwerkstechnik“ realisierbar.

Übergangspassungen sind in der Passungsauswahlreihe mit Einheitsbohrung in der Toleranzlage n ausgewiesen. Sie finden in der Kunststofftechnik Anwendung in Gehäusen zur Aufnahme von Wälzlager-Außenringen, die nicht verschiebbar sein sollen (IT 7). Auch hier sind die vorher genannten kunststoffspezifischen Regeln sinngemäß anzuwenden. Zur Befestigung von Seilscheiben, Zahnrädern, Schneckenrädern aus Kunststoff auf Metallachsen sind bei Nutzung dieser Übergangspassungen zusätzliche Verdrehsicherungen vorzusehen. Werden hierzu die Wellen gerändelt oder gekerbt, ist die Wirkung dieser Oberfläche auf den Kunststoff zu berücksichtigen. Diese konstruktive Lösung ist nur mit zähen, wenig kerbempfindlichen Kunststoffen realisierbar. Mit Übergangspassungen werden Gleitlagerbuchsen aus Thermoplasten in Gehäuse eingepresst.

Mit den Toleranzlagen k und j werden Passungen für häufig auszubauende Maschinen- oder Geräteelemente, z.B. Handräder, Wechselräder, ausgebildet. Auch hier werden die Metallteile vorzugsweise im System Einheitswelle ausgelegt.

Gleitlagerbuchsen aus Duroplasten erhalten am Außendurchmesser Freimaßtoleranzen nach DIN 7168, die mit der Gehäuse-Bohrungstoleranz H 7 gepaart wird. Allerdings wird diese Verbindung meist noch durch Einkleben gesichert.

Spieelpassungen beginnen mit den Toleranzlagen H/h. Sie sind für *Gleitsitze*, d.h. mit Handkraft verschiebbare Bauteile auf Wellen geeignet. Hierzu gehören verschiebbare Scheiben, Spann- und Seilrollen, Räder, Kupplungen, Stellringe, Hebel sowie Wälzlager-Innenringe auf Kunststoffzapfen.

Von wesentlich größerer Bedeutung sind aber Passungen an Dichtungen, die mit dieser Toleranzlage ausgeführt werden. Das betrifft Deckel an Gefäßen und Gehäusen, an die hohe Anforderungen hinsichtlich Spritzschutz, Aromaschutz und Luftabschluss gestellt werden, ohne dass ausgesprochene Dichtungsmaterialien (Weichdichtungen) oder elastische Effekte zur Anwendung gelangen. Dementsprechend reicht die Anwendung von der Haushaltsdose bis zum Getriebedeckel.

Spieelpassungen mit den Toleranzlagen F/h bzw. f/H bilden so genannte *Laufsitze*. Es ist die wichtigste Passung für Gleitführungen, Säulenführungen und für 2-Punkt-Wellenlagerungen, insbesondere Pumpenlager. Auch die Passung zwischen Kolben und Zylinder an Kolbenpumpen ist hier einzuordnen.

Mit *leichten Laufsitzen* in den Toleranzlagen C/h und D/h werden thermoplastische Gleitlager für Haushaltmaschinen, Landmaschinen, wenig belastete Fahrzeuge, für Hebel und Kurbeln gestaltet. Wenn es nicht möglich ist ein ein-

wandfreies Fluchten von mehreren Lagerstellen einer Welle zu gewährleisten, wird man gleichfalls diese Passungen wählen.

7.2 Allgemeine Anwendungsrichtlinien

Praktische Erfahrungen haben gezeigt, dass Maßtoleranzen über IT 12 zu keinen brauchbaren Passungen führen. Die Auswahlpassungen nach DIN 7157 beschränken sich sogar auf IT 11 als größte Toleranzklasse. Aus dem gleichen Grund werden auch nur Toleranzpaarungen empfohlen, die nicht mehr als zwei Klassen auseinander liegen. Die Herstellung *eines* Passungselements mit sehr hoher Präzision stellt eine Verschwendung von Arbeitszeit und Kosten dar, wenn das Partnerelement erheblich geringere Qualität aufweist.

Bei der Paarung eines Kunststoffteils mit einem Metallteil wird empfohlen, das Metallteil als Einheitswelle oder Einheitsbohrung auszubilden. Diese Forderung leitet sich aus der vorn genannten Möglichkeit genormte metallische Halbzeuge einzusetzen und aus der Tatsache ab, dass im Maschinen- und Gerätebau für diese Toleranzlagen sehr häufig Lehren vorliegen. Das Kunststoffteil wird dann die funktionsbedingte Toleranzfeldlage erhalten. Da sich für ein Kunststoffteil generell Maßverschiebungen ergeben, kann im Werkzeugbau praktisch nie eine Einheits-Toleranzlage in der formgebenden Gravur genutzt werden.

Bei Paarung von Kunststoffteilen miteinander wird empfohlen einem der Teile die Toleranzlage Einheitsbohrung oder Einheitswelle zuzuordnen.

Bei der Passungsbildung sollte grundsätzlich von den Vorzugstoleranzlagen nach DIN 7157 ausgegangen werden. Die dort ersichtlichen und empfohlenen Abmaße sind soweit möglich in die der DIN 16 901 einzupassen. Es zeigt sich, dass die DIN 16 901 vielen der vorn genannten Funktionsforderungen nicht genügen kann. Ihre Realisierung an Kunststoffteilen zeigt aber, dass die technischen Möglichkeiten bereits heute weiter fortgeschritten sind.

Andererseits können zur Herstellung von Presspassungen auch für die Metallwelle gröbere Toleranzen ausgewählt werden, als die Vorzugspassungen nach DIN 7157 ausweisen, wenn eine entsprechende gröbere Toleranz am Kunststoffteil, wie gezeigt wurde, den Funktionsanforderungen genügen kann.

Für Passungsspiele und -übermaße gelten die Bestimmungsgleichungen nach Tabelle 28.

Analog zum Maßtoleranzfeld von Einzelmaßen entsteht bei Passungen ein *Passtoleranzfeld* im Zusammenwirken von fertigungs- und anwendungsbedingten Maßstreuungen als *verfügbare Passtoleranz* und im Zusammenwirken der Grenzspiele und/oder Grenzübermaße als *erforderliche Passtoleranz*. Die Bestimmung und Abgleichung der Passtoleranzen kann mit den Beziehungen erfolgen nach Tabelle 29.

Tab. 28: Bestimmungsgleichungen für Passungsspiele und -übermaße

Passungsart	Spiele bzw. Übermaße		
		bei ABF	bei AWB
Spielpassung	<ul style="list-style-type: none"> • Höchstspiel • Mindestspiel • mittleres Spiel 	$S_o = G_{oB} - G_{uW}$ $S_u = G_{uB} - G_{oW}$ $S_m = (S_o + S_u)/2$	$S'_o = G'_{oB} - G'_{uW}$ $S'_u = G'_{uB} - G'_{oW}$ $S'_m = (S'_o + S'_u)/2$
Presspassung	<ul style="list-style-type: none"> • Höchstübermaß • Mindestübermaß • mittleres Übermaß 	$U_o = G_{uB} - G_{oW} $ $U_u = G_{oB} - G_{uW} $ $U_m = (U_o + U_u)/2$	$U'_o = G'_{uB} - G'_{oW} $ $U'_u = G'_{oB} - G'_{uW} $ $U'_m = (U'_o + U'_u)/2$
Übergangspassung	<ul style="list-style-type: none"> • Höchstspiel • Mindestübermaß • mittleres Spiel oder Übermaß 	$S_o = G_{oB} - G_{uW}$ $U_o = G_{uB} - G_{oW} $ $U_o \leq S_o: S_m = (S_o - U_o)/2$ $U_o > S_o: U_m = (U_o - S_o)/2$	$S'_o = G'_{oB} - G'_{uW}$ $U'_o = G'_{uB} - G'_{oW} $ $U'_o \leq S'_o: S'_m = (S'_o - U'_o)/2$ $U'_o > S'_o: U'_m = (U'_o - S'_o)/2$
Hinweise: Index B: Bohrung; Index W: Welle; Übermaße sind im ISO-Passungssystem positive Zahlenwerte			

Tab. 29: Verfügbare und erforderliche Passtoleranzen

Passtoleranz		bei ABF	bei AWB
Verfügbare Passtoleranz		$P_{TV} = R_{FW} + R_{FB}$	$P'_{TV} = \sqrt{\{P_{TV}^2 + (R_{AW} - R_{AB})^2\}}$
Erforderliche Passtoleranz	<ul style="list-style-type: none"> • Spielpassung • Presspassung • Übergangspassung 	$P_{Te} = S_o - S_u$ $P_{Te} = U_o - U_u$ $P_{Te} = S_o + U_o$	$P'_{Te} = S'_o - S'_u$ $P'_{Te} = U'_o - U'_u$ $P'_{Te} = S'_o + U'_o$
Hinweise: R_{FB} : fertigungsbedingte Maßstreuung der Bohrung; R_{FW} : fertigungsbedingte Maßstreuung der Welle; R_{AB} : anwendungsbedingte Maßstreuung der Bohrung; R_{AW} : anwendungsbedingte Maßstreuung der Welle P_{TV} : verfügbare Passtoleranz; P_{Te} : erforderliche Passtoleranz			

Form- und Lagetoleranzen an Passflächen beeinflussen die Funktion der Passung. Ihre Berücksichtigung bei der Passungsberechnung ist wie folgt möglich:

1. durch Addition der Form- und Lagetoleranzen zu den Maßtoleranzen der Passteile;
2. durch Berücksichtigung der Form- und Lagetoleranzen bei der Festlegung der Grenzsple und/oder Grenzübermaße.

Dem zweiten Weg ist der Vorzug zu geben, da die komplexen Fertigungs- und Anwendungseinflüsse auf Form- und Lageabweichungen besser situationsabhängig berücksichtigt werden können.

Beispielrechnung

Für eine Metallwelle und eine Kunststoffbohrung aus POM mit dem Nennmaß 8 mm ist ein leichtgängiger Laufsitz auszubilden.

Die vorgeschlagene Vorzugspassung nach DIN 7157 ist C11/h11 mit den Abmaßen

$$\begin{aligned} 8 \text{ h11} &= 8 \text{ } 0/-90; T_F = 90 \text{ } \mu\text{m} \\ 8 \text{ C11} &= 8 \text{ } +170/+80; T_F = 90 \text{ } \mu\text{m}; \text{ ergibt die} \end{aligned}$$

Passungstoleranz +260/+80 (Höchstspiel/Mindestspiel).

Für das Kunststoffmaß wird die Toleranzgruppe 110 B nach DIN 16 901 gewählt:

$$T_F = 140 \text{ } \mu\text{m};$$

mit der Toleranzfeldlage 8 +220/+80 ergibt sich die Passungstoleranz +310/+80.

7.3 Toleranzen und Kosten

Aus wirtschaftlichen Gründen wird man bei der Herstellung eines Produktes gemäß dem Prinzip *so grob wie möglich und so genau wie nötig*, keine übertriebenen Präzisionsforderungen stellen. Nach Möglichkeit soll auf die Genauigkeit der Allgemeintoleranzen zurückgegriffen werden.

Bei Kunststoffherzeugnissen wirken sich verringerte Toleranzen in folgenden Kostenelementen aus:

Werkzeugkosten

Werkzeugbauteile, einschließlich der formgebenden Kontureinsätze, werden überwiegend spanend hergestellt. Aus der Zerspanungstechnik ist bekannt, dass in Bereichen kleiner Toleranzen ($T < 0,01 \text{ mm}$) eine Halbierung der Toleranz etwa die vierfachen Fertigungskosten zur Folge hat. Dabei liegen die Kosten für InnenPassflächen (Außenmaße am Formteil) stets höher als die für AußenPassflächen (Kerne). Es ist dabei zu bedenken, dass die Fertigungsgenauigkeit für ein Werkzeug ca. 2 bis 3 Toleranzklassen genauer liegen muss, als für das Formteil. Nach [10] darf, im Gegensatz zur DIN 16 749, bei Präzisionsformteilen das Werkzeug-Toleranzfeld sogar nur 10 % der Formteiltoleranz betragen; das sind bis zu 5 IT-Klassen!

Mit den zunehmenden Präzisionsforderungen wird es notwendig, das Werkzeug im Angussystem rheologisch zu berechnen. Damit steigt auch der Konstruktionsaufwand. Trotzdem sind oft erhebliche Nacharbeiten nicht vermeidbar.

Da für die Kunststofftechnik sehr hohe Stückzahlen typisch sind, kann trotzdem der Einfluss auf die Stückkosten gering sein.

Maschine und Prozessführung

Geringe Fertigungstoleranzen stellen hohe Anforderungen an den Maschinenzustand (Führungen) und die Qualität der Maschinensteuerung. Es sind zusätzliche Regelkreise und eine ständige Überwachung der kritischen Prozessparameter (Prozessregelkarte) erforderlich. Die diesbezüglichen gestiegenen Forderungen der vergangenen Jahre, insbesondere in Zulieferfirmen typischer Einsatzgebiete, wie dem Fahrzeugbau, haben zu erheblichen Belastungen der kunststoffverarbeitenden Industrie geführt.

Ausschuss

Gleichbleibendes Produktionsniveau vorausgesetzt, führt jede Einengung der Fertigungstoleranz zu einer erhöhten Ausschussquote. Sie beinhaltet Verluste in der Fertigungszeit, beim Material- und Energieeinsatz. Gleichzeitig erhöht sich der erforderliche Aufwand für die Produktionskontrolle und die Wareneprüfung.

7.4 Kunststoff-Gleitlager

Maßgebend für die Eignung eines Kunststoffes als Gleitlagermaterial sind:

- gute Gleit- und Notlaufeigenschaften,
- hohe Verschleiß- und ausreichende Druckfestigkeit,
- ausreichende Temperaturbeständigkeit.

In DIN ISO 6691 sind die Eigenschaftswerte für erprobte Gleitlagerwerkstoffe zusammengestellt. Tabelle 30 gibt auszugsweise die Zuordnung von Kunststoff und Anwendungsgebiet wider. Eine Reihe von Thermoplasten werden auch zur Verbesserung der Notlaufeigenschaften, der Druckbelastbarkeit, der Wärmeabfuhr und der Verschleißfestigkeit mit Molybdändisulfid, Graphit, Blei und Kohlenstofffasern gefüllt.

Als Gleitpartner eignet sich vorzugsweise gehärteter Stahl, bei Hgw auch verchromter Stahl. Nichteisen-Metalle ergeben bei einer Oberflächenhärte < 50 HRC größere Reibungskoeffizienten und einen größeren Gleitreibungverschleiß. Die Norm weist optimale Oberflächenrauigkeiten der Gleitpartner aus.

In DIN 1850 T. 5 sind Buchsen für Gleitlager aus Duroplasten und in T. 6 Einpressbuchsen aus Thermoplasten genormt.

Gleitlagerbuchsen aus Duroplasten werden spanend fertiggearbeitet. Für ihren Einbau wird im Gehäuse eine Bohrungstoleranz von H 7 gefordert; für den Außendurchmesser der Buchsen ist eine Abmaßtabelle angegeben. Die Abmaße entsprechen etwa den Toleranzen c 9 bis d 9. Die Buchsen können am Außendurchmesser Rillen für Klebstoffe aufweisen. Die Buchsen können in das Gehäuse eingepresst oder eingeklebt werden. Die Nennmaßbereiche für den

Innendurchmesser reichen von 3 bis 250 mm. Für beide Durchmesser ist eine Koaxialität von IT 10 gefordert. Die Welle trägt die Toleranz h 7, für die Buchsenbohrung ist eine Abmaßtabelle angegeben, die etwa der Toleranzlage B 9 entspricht, um auch bei erhöhter Temperatur die Funktion zu gewährleisten. Gleitlager aus Duroplasten müssen geschmiert werden.

Tab. 30: Anwendungsbereiche von Kunststoffen als Gleitlagerwerkstoff

PA	stoß- und schwingungsbeanspruchte Lager, Gelenksteine in Stahlwerkskupplungen, Bremsgestängebuchsen im Waggonbau, Landmaschinenlager, Federaugenbuchsen
POM	Präzisionsgleitlager für die Feinwerktechnik, Elektromechanik und für Haushaltsgeräte für Trockenlauf und Mangelschmierung
PETP, PBTP	Präzisionsgleitlager für die Feinwerktechnik für Temperaturen < 70 °C, für Trockenlauf und Mangelschmierung, Gleitlager für Unterwasseranlagen, Führungsbuchsen für Gestänge, Gleitlager für oszillierende Bewegung
UHMW-PE, HDPE	Gleitlager in Anlagen in sandführenden Gewässern, Gleitlager in Straßenbau- und Landmaschinen, Tieftemperaturlager, Gleitlager in Chemieanlagen
PTFE	Gleitlager in Chemieanlagen, Hochfrequenztechnik, Hochtemperaturlager, Niedrigst-Reibwert-Anwendungen, Brückenlager, Lager mit kleinsten Reibgeschwindigkeiten, Gleitlager in Lebensmittelmaschinen
PTFE-Verbundlager	Gleitlager für oszillierende Bewegungen, Anlaufscheiben für Trockenlauf und Mangelschmierung
PI	Gleitlager für Hochtemperaturanwendung, Tunnelofen
Hgw, PF71, PF74	Gleitlager für Kräne, Förderanlagen und Bergbaugeräte

Gleitlagerbuchsen aus Thermoplasten können mit Spritzgussqualität (Toleranzgruppe A) oder Zerspanungsqualität (Toleranzgruppe B) eingesetzt werden. Gleitlagerbuchsen aus Thermoplasten werden eingepresst. Dementsprechend trägt die Gehäusebohrung die Toleranz H 7 und für den Buchsen-Außendurchmesser der Toleranzgruppe A ist eine Abmaßtabelle angegeben, die etwa der Toleranzlage zb 11 entspricht, für die Toleranzgruppe B ist die genannte Toleranz vorgeschrieben. Die Nennmaßbereiche für den Innendurchmesser der Buchsen reichen von 6 bis

200 mm. Auch hier wird eine Koaxialität der Durchmesser von IT 10 gefordert. Mit der Wellentoleranz h 9 werden leichte Spielpassungen mit den Toleranzlagen D 12 für gespritzte Buchsen und C 11 für spanend fertigbearbeitete Buchsen gebildet. Diese Toleranzen gelten für die Buchsen im eingepressten Zustand, so dass die Verformungen auf Grund der Pressspannungen rechnerisch eliminiert werden können (Ansatz: dickwandiges Rohr unter Außendruck). In [16] wird folgende Näherungsbeziehung zur Abschätzung der Änderung des Innendurchmessers einer Thermoplast-Lagerbuchse durch das Einpressen angegeben:

$$\Delta h_e = \Delta D/D (d_L + 3 \cdot s_K)$$

mit ΔD – Einpressübermaß; D – Buchsen-Außendurchmesser; d_L – Lager-Innendurchmesser; s_K – Wanddicke der Lagerschale.

Die Rautiefe R_z beträgt in Umfangsrichtung maximal 16 (gespritzt) bzw. 25 μm (gespant).

Die angegebenen Toleranzen für die Spielpassung garantieren auch bei mäßig erhöhter Temperatur ein ausreichendes Spiel. Unter besonderen Bedingungen, z. B. einer höheren Umgebungstemperatur oder einer Wärmeeinleitung über Gehäuse oder Welle, kann es erforderlich sein, die Maßverschiebung nachzurechnen. Erhard und Strickle [16] geben folgende Beziehung für die mittlere Temperatur von Thermoplast-Gleitlagern an:

$$TL = (T_R \cdot k_3 + 2680 \cdot p \cdot v^\kappa \cdot \mu \cdot k_r) / (k_3 + 2680 \cdot p \cdot v^\kappa \cdot a),$$

mit k_3 Lagerkonstante = $15/s + 350/3b$; k_r : Riefenrichtungsfaktor nach Tabelle 31; a Gleitfaktor = $0 \dots 30 \cdot 10^{-4}$; s Lagerwanddicke in mm; b Lagerbreite in mm; v Gleitgeschwindigkeit in m/s; p Lagerdruck in $0,1 \text{ N/mm}^2$; μ Gleitreibungszahl; $\kappa = 1,0$ für Längslager, = $1,2 \dots 1,3$ für Querlager mit oszillierender Bewegung, = $1,4$ für Querlager mit rotierender Bewegung.

Tab. 31: Riefenrichtungsfaktor k_r zur Berechnung von Thermoplast-Gleitlagern

Rautiefe in μm	HDPE	POM	PA 6	PA/PE	PTFE
< 0,5	1,0	1,1	1,0	1,1	1,0
0,5 ... 1	0,9	1,1	1,2	1,1	0,9
1 ... 2	0,85	1,1	1,2	1,1	0,85
2 ... 4	0,85	1,0	1,1	1,0	0,85
4 ... 6	0,8	0,9	1,0	0,85	0,8

Kunststoff-Gleitlager können auch in Formteile integriert sein. Bild 18 zeigt das kombinierte Radial- und Axiallager für die Lenkrolle eines Möbelfußes, das gleichzeitig die Befestigungs- und Abdeckfunktion wahrnimmt.

Beispielrechnung

Ein Thermoplast-Gleitlager aus PA 6 ist gepaart mit einer gehärteten Stahlwelle. Der Nenndurchmesser beträgt 12 mm. Die Lagerbohrung ist durch Bohren fertigbearbeitet worden (Toleranzgruppe B). Es wird Trockenlauf vorgegeben. Die Buchse hat eine Wanddicke von 3 mm und eine Länge von 20 mm. Die Umgebungstemperatur soll 45 °C betragen.

Lagerspiel im Einbauzustand:

Stahlwelle 12 h 9 = 12 0/-43; Buchse 12 C 11 = 12 +95/+205;

Passungstoleranz = Höchstspiel/Mindestspiel = +248/+95 µm.

Die Temperaturnachrechnung ergibt eine Temperaturerhöhung um 1 K auf 46 °C; $\Delta T = 23$ K.

Lagerspiel im Betriebszustand:

Stahlwelle (Wärmeausdehnung wegen guter Wärmeableitung nicht berücksichtigt) = 12 0/-43;

Buchse: Da die Wärmeausdehnung in Längsrichtung nicht behindert ist, wird nur die Wärmeausdehnung der Querschnittsfläche betrachtet:

$$\alpha_{\text{Fläche}} \approx 2 \cdot \alpha_{\text{Linear}} = 2 \cdot 80 \cdot 10^{-6};$$

$$A = 141,3 \text{ mm}^2; \Delta A = 0,520 \text{ mm}^2; d = \sqrt{D^2 - 4 \cdot (A + \Delta A)/\pi} = 11,973 \text{ mm};$$

$$\Delta d = -27 \text{ µm};$$

Bohrungsmaß 12 +68/+178;

Passungstoleranz = Höchstspiel/Mindestspiel = +221/+68.



Bild 18: Gehäuse mit Lager für die Lenkrolle eines Möbelfußes