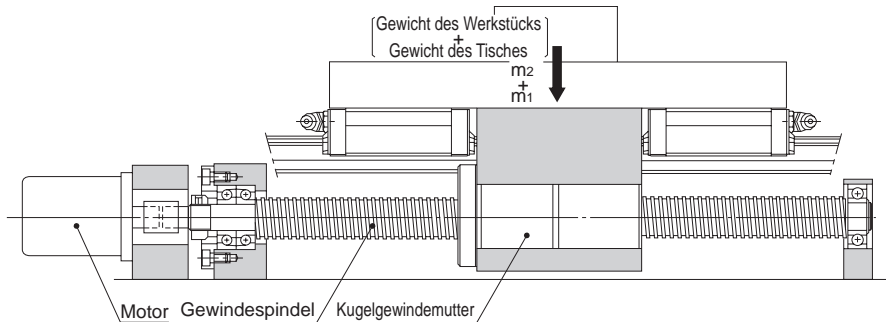


Auswahlbeispiele für Kugelgewindetriebe

Horizontales schnelles Transportsystem

[Auswahlbedingungen]

Gewicht des Tisches	$m_1 = 60 \text{ kg}$	Wiederholgenauigkeit	$\pm 0,1 \text{ mm}$
Gewicht des Werkstücks	$m_2 = 20 \text{ kg}$	Minimaler Vorschub	$s = 0,02 \text{ mm/Intervall}$
Hublänge	$l_s = 1.000 \text{ mm}$	Geforderte nominelle Lebensdauer	30.000 h
Maximalgeschwindigkeit	$V_{\max} = 1 \text{ m/s}$	Antriebsmotor	AC-Servomotor
Beschleunigungszeit	$t_1 = 0,15 \text{ s}$		Nennrehzahl:
Verzögerungszeit	$t_3 = 0,15 \text{ s}$		3.000 min^{-1}
Verfahrzyklen pro Minute	$n = 8 \text{ min}^{-1}$	Motor-Trägheitsmoment	$J_m = 1 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
Umkehrspiel	0,15 mm	Getriebe	ohne (Direktantrieb) $i = 1$
Positioniergenauigkeit	$\pm 0,3 \text{ mm/1.000 mm}$	Koeffizient des Führungs-Reibwiderstandes	$\mu = 0,003$ (rollend)
	(Positionierung nach dem Rückhub)	Verschiebewiderstand der Führung	$f = 15 \text{ N}$ (unbelastet)



[Kontrollliste]

- Spindeldurchmesser
- Steigung
- Baugröße Mutter
- Genauigkeit
- Axialspiel
- Endenlagerung
- Antriebsmotor

[Auswahl der Genauigkeitsklasse und Überprüfung des Axialspiels]

● Auswahl der Steigungsgenauigkeit

Um eine Positioniergenauigkeit von $\pm 0,3 \text{ mm}/1.000 \text{ mm}$ zu erreichen:

$$\frac{\pm 0,3}{1000} = \frac{\pm 0,09}{300}$$

ist eine Steigungsgenauigkeit von mindestens $\pm 0,09 \text{ mm}/300 \text{ mm}$ auszuwählen.

Demzufolge ist für den Kugelgewindetrieb die folgende Genauigkeitsklasse auszuwählen (siehe Tab. 1 auf [B15-20](#)).

C7 (Wegabweichung: $\pm 0,05 \text{ mm}/300 \text{ mm}$)

Da in der Genauigkeitsklasse C7 gerollte und geschliffene Kugelgewindetriebe angeboten werden, wird der preiswertere, gerollte Kugelgewindetrieb ausgewählt.

● Auswahl des Axialspiels

Für ein gefordertes maximales Umkehrspiel von $0,15 \text{ mm}$ darf das Axialspiel des Kugelgewindetriebs nicht höher als $0,15 \text{ mm}$ sein.

Diese Bedingung erfüllen gerollte Kugelgewindetriebe mit einem Spindeldurchmesser von maximal 32 mm (siehe Tab. 13 auf [B15-27](#)).

Die Anforderungen bedingen einen gerollten Kugelgewindetrieb in der Genauigkeitsklasse C7 mit einem Spindeldurchmesser von maximal 32 mm .

[Auswahl der Gewindespindel]

● Berechnung der Spindellänge

Angenommen die Gesamtlänge der Kugelgewindemutter ist 100 mm und die des Spindelendes ist 100 mm , dann ermittelt sich die Gesamt-Spindellänge bei einem Verfahrweg von 1.000 mm wie folgt:

$$1.000 + 200 = 1.200 \text{ mm}$$

Als Gewindespindellänge werden also 1.200 mm angenommen.

● Auswahl der Steigung

Bei einer Motornendrehzahl von 3.000 min^{-1} und der max. Vorschubgeschwindigkeit von 1 m/s ist die Spindelsteigung wie folgt zu ermitteln:

$$\frac{1 \times 1000 \times 60}{3000} = 20 \text{ mm}$$

Daher sollte der gewählte Typ eine Steigung von mindestens 20 mm haben.

Darüber hinaus kann der Motor direkt am Kugelgewindetrieb ohne Untersezung angeflanscht werden. Die Mindestauflösung pro Umdrehung des AC-Servomotors ist abhängig von der nachfolgend angegebenen Auflösung des Encoders, der als Standardzubehör zum AC-Servomotor geliefert wird (1.000 bzw. 1.500 Impulse/ Umdrehung):

- 1.000 Impulse/Umdrehung (nicht multipliziert)
- 1.500 Impulse/Umdrehung (nicht multipliziert)
- 2.000 Impulse/Umdrehung (multipliziert mit 2)
- 3.000 Impulse/Umdrehung (multipliziert mit 2)
- 4.000 Impulse/Umdrehung (multipliziert mit 4)
- 6.000 Impulse/Umdrehung (multipliziert mit 4)

Nach den vorliegenden Auswahlkriterien sollte die Spindelsteigung bei einer min. Vorschubgeschwindigkeit von 0,02 mm/Impuls wie folgt sein:

Steigung	20 mm	—	1.000	Impulse/Umdrehung
	30 mm	—	1.500	Impulse/Umdrehung
	40 mm	—	2.000	Impulse/Umdrehung
	60 mm	—	3.000	Impulse/Umdrehung
	80 mm	—	4.000	Impulse/Umdrehung

● Auswahl des Spindeldurchmessers

Die Kugelgewindetriebe, die den in Abschnitt [Auswahl der Genauigkeitsklasse und Überprüfung des Axialspiels] auf **B 15-70** definierten Bedingungen entsprechen, sind gerollte Kugelgewindetriebe mit einem Durchmesser von 32 mm oder weniger. Gemäß Abschnitt [Auswahl der Gewindespindel] auf **B 15-70** muss die Steigung 20, 30, 40, 60 oder 80 mm betragen (siehe Tab. 21 auf **B 15-35**). Dazu stehen folgende Kombinationen zur Verfügung:

Spindeldurchmesser	Steigung
15 mm	— 20 mm
15 mm	— 30 mm
20 mm	— 20 mm
20 mm	— 40 mm
30 mm	— 60 mm

Da die Gewindespindellänge gemäß Abschnitt [Auswahl der Gewindespindel] auf **B 15-70** 1200 mm betragen muss, ist ein Spindeldurchmesser von 15 mm unzureichend. Demzufolge muss der Spindeldurchmesser des Kugelgewindetriebs mindestens 20 mm betragen.

Nach dieser Vorauswahl kommen drei Durchmesser-/Steigungskombinationen in Betracht: Spindeldurchmesser 20 mm/Steigung 20 mm; 20 mm/40 mm; 30 mm/60 mm.

● Auswahl der Endenlagerung

Die gegenwärtige Auswahl ist bezogen auf einen langen Hubweg von 1.000 mm und eine max. Vorschubgeschwindigkeit von 1 m/s. Entsprechend ist für die Endenlagerung entweder fest - los oder fest - fest zu wählen.

Für die Lagerart fest - fest ist eine komplizierte Konstruktion sowie eine hochpräzise Installation erforderlich.

Daher wird für die gegebenen Bedingungen die Endenlagerung fest - los gewählt.

● Zulässige Axialbelastung

■ Berechnung der maximalen Axialbelastung

Verschleibewiderstand des Führungssystems	$f = 15 \text{ N}$ (unbelastet)
Gewicht des Tisches	$m_1 = 60 \text{ kg}$
Gewicht des Werkstücks	$m_2 = 20 \text{ kg}$
Koeffizient des Reibwiderstandes der Führung	$\mu = 0,003$
Maximalgeschwindigkeit	$V_{\text{max}} = 1 \text{ m/s}$
Erdbeschleunigung	$g = 9,807 \text{ m/s}^2$
Beschleunigungszeit	$t_1 = 0,15 \text{ s}$

Daraus ergeben sich die folgenden notwendigen Werte:

Beschleunigung:

$$a = \frac{V_{\text{max}}}{t_1} = 6,67 \text{ m/s}^2$$

Bei Vorwärtsbeschleunigung:

$$Fa_1 = \mu \cdot (m_1 + m_2) g + f + (m_1 + m_2) \cdot a = 550 \text{ N}$$

Bei konstanter Vorwärtsbewegung:

$$Fa_2 = \mu \cdot (m_1 + m_2) g + f = 17 \text{ N}$$

Bei Vorwärtsverzögerung:

$$Fa_3 = \mu \cdot (m_1 + m_2) g + f - (m_1 + m_2) \cdot a = -516 \text{ N}$$

Bei Rückwärtsbeschleunigung:

$$Fa_4 = -\mu \cdot (m_1 + m_2) g - f - (m_1 + m_2) \cdot a = -550 \text{ N}$$

Bei konstanter Rückwärtsbewegung:

$$Fa_5 = -\mu \cdot (m_1 + m_2) g - f = -17 \text{ N}$$

Bei Rückwärtsverzögerung:

$$Fa_6 = -\mu \cdot (m_1 + m_2) g - f + (m_1 + m_2) \cdot a = 516 \text{ N}$$

Danach ist die maximale Axialbelastung des Kugelgewindetriebs:

$$Fa_{\text{max}} = Fa_1 = 550 \text{ N}$$

Wenn eine Spindel mit einem Durchmesser von 20 mm, einem minimalen Spindel-Kerndurchmesser von 17,5 mm und einer Steigung von 20 mm kein Problem darstellt, kann diese verwendet werden. Ein Spindeldurchmesser von 30 mm wäre ideal, aber in diesem Auswahlbeispiel beruhen die weiteren Berechnungen der Knicklast und der zulässigen Zug-Druck-Belastung der Gewindespindel auf einem Spindeldurchmesser von 20 mm.

■ Berechnung der Knicklast

Faktor für Lagerart

$\eta_2 = 20$ (siehe **B 15-38**)

Die Knicklast basiert auf dem ungestützten Bereich zwischen der Endenlagerung und der Mutter mit der Lagerart fest - fest. Deshalb gilt:

Ungestützte Spindellänge

$l_a = 1100$ mm (geschätzt)

Kerndurchmesser der Gewindespindel

$dc = 17,5$ mm

$$P_1 = \eta_2 \cdot \frac{dc^4}{l_a^2} \times 10^4 = 20 \times \frac{17,5^4}{1100^2} \times 10^4 = 15.500 \text{ N}$$

■ Zulässige Zug-Druck-Belastung der Gewindespindel

$$P_2 = 116 \times dc^2 = 116 \times 17,5^2 = 35.500 \text{ N}$$

Da die Knicklast und die zulässige Zug-Druck-Belastung nicht geringer sind als die maximale Axialbelastung, kann ein Kugelgewindetrieb verwendet werden, der diese Anforderungen erfüllt.

● Zulässige Drehzahl

■ Maximale Drehzahl

- Spindeldurchmesser: 20 mm; Steigung: 20 mm

Maximalgeschwindigkeit $V_{\max} = 1$ m/s

Steigung $Ph = 20$ mm

$$N_{\max} = \frac{V_{\max} \times 60 \times 10^3}{Ph} = 3.000 \text{ min}^{-1}$$

- Spindeldurchmesser: 20 mm; Steigung: 40 mm

Maximalgeschwindigkeit $V_{\max} = 1$ m/s

Steigung $Ph = 40$ mm

$$N_{\max} = \frac{V_{\max} \times 60 \times 10^3}{Ph} = 1.500 \text{ min}^{-1}$$

- Spindeldurchmesser: 30 mm; Steigung: 60 mm

Maximalgeschwindigkeit $V_{\max} = 1$ m/s

Steigung $Ph = 60$ mm

$$N_{\max} = \frac{V_{\max} \times 60 \times 10^3}{Ph} = 1.000 \text{ min}^{-1}$$

■ Zulässige Drehzahl unter Berücksichtigung der kritischen Drehzahl der Gewindespindel

Faktor für Lagerart

$\lambda_2 = 15,1$ (siehe **B15-40**)

Ungestützte Spindellänge zwischen Mutter und Lagerung mit der Lagerart fest - los, für die die kritische Drehzahl zu berücksichtigen ist:

Ungestützte Spindellänge $\ell_b = 1.100$ mm (geschätzt)

- Spindeldurchmesser: 20 mm; Steigung: 20 mm und 40 mm
Kerndurchmesser der Gewindespindel $d_c = 17,5$ mm

$$N_1 = \lambda_2 \times \frac{d_c}{\ell_b^2} 10^7 = 15,1 \times \frac{17,5}{1100^2} \times 10^7 = 2.180 \text{ min}^{-1}$$

- Spindeldurchmesser: 30 mm; Steigung: 60 mm
Kerndurchmesser der Gewindespindel $d_c = 26,4$ mm

$$N_1 = \lambda_2 \times \frac{d_c}{\ell_b^2} 10^7 = 15,1 \times \frac{26,4}{1100^2} \times 10^7 = 3.294 \text{ min}^{-1}$$

■ Zulässige Drehzahl unter Berücksichtigung des DN-Werts

- Spindeldurchmesser: 20 mm; Steigung: 20 mm und 40 mm (Kugelgewindetrieb mit großer Steigung)
Kugelmittendurchmesser $d_p = 20,75$ mm

$$N_2 = \frac{70000}{d_p} = \frac{70000}{20,75} = 3.370 \text{ min}^{-1}$$

- Spindeldurchmesser: 30 mm; Steigung: 60 mm (Kugelgewindetrieb mit großer Steigung)
Kugelmittendurchmesser $d_p = 31,25$ mm

$$N_2 = \frac{70000}{d_p} = \frac{70000}{31,25} = 2.240 \text{ min}^{-1}$$

Daraus ergibt sich bei einem Kugelgewindetrieb mit einer Durchmesser-/Steigungskombination von 20/20 mm eine höhere max. Drehzahl als die kritische Drehzahl.

Bei Kugelgewindetrieben mit der Durchmesser-/Steigungskombination von 20/40 mm oder 30/60 mm liegt die Drehzahl unter der kritischen Drehzahl. Hier wird der DN-Wert nicht überschritten.

Nach diesen Ergebnissen fokussiert sich die Auswahl auf Kugelgewindetriebe mit der Durchmesser-/Steigungskombination 20/40 mm und 30/60 mm.

[Auswahl der Kugelgewindemutter]

● Auswahl der Kugelgewindemuttergröße

Der gerollte Kugelgewindetrieb Typ WTF mit großer Steigung wird in den Durchmesser-/Steigungskombinationen 20/40 mm und 30/60 mm hergestellt.

WTF2040-2

($C_a = 5,4$ kN, $C_{0a} = 13,6$ kN)

WTF2040-3

($C_a = 6,6$ kN, $C_{0a} = 17,2$ kN)

WTF3060-2

($C_a = 11,8$ kN, $C_{0a} = 30,6$ kN)

WTF3060-3

($C_a = 14,5$ kN, $C_{0a} = 38,9$ kN)

● Zulässige Axialbelastung

Zunächst wird die zulässige Axialbelastung des Typs WTF2040-2 ($C_{0a} = 13,6 \text{ kN}$) berücksichtigt. Unter der Annahme, dass dieser Typ in ein schnelles Transportsystem integriert wird und während der Verzögerung eine Stoßbelastung auftritt, wird ein statischer Sicherheitsfaktor (f_s) von 2,5 (siehe Tab. 1 auf **B15-47**) berücksichtigt:

$$\frac{C_{0a}}{f_s} = \frac{13,6}{2,5} = 5,44 \text{ kN} = 5.440 \text{ N}$$

Die maximale Axialbelastung beträgt 550 N. Da die zulässige Axialbelastung dieses Typs größer ist, kann dieser eingesetzt werden.

■ Berechnung der Hublänge

Maximalgeschwindigkeit $V_{\max} = 1 \text{ m/s}$
 Beschleunigungszeit $t_1 = 0,15 \text{ s}$
 Verzögerungszeit $t_3 = 0,15 \text{ s}$

● Hublänge bei Beschleunigung

$$l_{1,4} = \frac{V_{\max} \cdot t_1}{2} \times 10^3 = \frac{1 \times 0,15}{2} \times 10^3 = 75 \text{ mm}$$

● Hublänge bei konstanter Bewegung

$$l_{2,5} = l_s - \frac{V_{\max} \cdot t_1 + V_{\max} \cdot t_3}{2} \times 10^3 = 1.000 - \frac{1 \times 0,15 + 1 \times 0,15}{2} \times 10^3 = 850 \text{ mm}$$

● Hublänge bei Verzögerung

$$l_{3,6} = \frac{V_{\max} \cdot t_3}{2} \times 10^3 = \frac{1 \times 0,15}{2} \times 10^3 = 75 \text{ mm}$$

Aus den oben genannten Bedingungen ergibt sich das in der folgenden Tabelle dargestellte Verhältnis zwischen Axialbelastung und Hublänge:

Bewegung	Axialbelastung $F_{a_i}(\text{N})$	Hublänge $l_{s_i}(\text{mm})$
Nr. 1: Bei Vorwärtsbeschleunigung	550	75
Nr. 2: Bei konstanter Vorwärtsbewegung	17	850
Nr. 3: Bei Vorwärtsverzögerung	-516	75
Nr. 4: Bei Rückwärtsbeschleunigung	-550	75
Nr. 5: Bei konstanter Rückwärtsbewegung	-17	850
Nr. 6: Bei Rückwärtsverzögerung	516	75

* Der Index (N) gibt die Bewegungsnummer an.

Aufgrund der wechselseitigen Belastung der Spindel durch F_{a_3} , F_{a_4} und F_{a_5} , gekennzeichnet durch das positive bzw. negative Vorzeichen, muss die mittlere axiale Belastung in beiden Richtungen bestimmt werden.

■ Mittlere Axialbelastung

- Mittlere Axialbelastung in positiver Richtung

Aufgrund der variierenden Belastungsrichtung gilt für die Berechnung der mittleren Axialbelastung: $F_{a_{3,4,5}} = 0 \text{ N}$

$$F_{am1} = \sqrt[3]{\frac{F_{a1}^3 \times l_1 + F_{a2}^3 \times l_2 + F_{a6}^3 \times l_6}{l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6}} = 225 \text{ N}$$

- Mittlere Axialbelastung in negativer Richtung

Aufgrund der variierenden Belastungsrichtung gilt für die Berechnung der mittleren Axialbelastung: $F_{a_{1,2,6}} = 0 \text{ N}$

$$F_{am2} = \sqrt[3]{\frac{|F_{a3}|^3 \times l_3 + |F_{a4}|^3 \times l_4 + |F_{a5}|^3 \times l_5}{l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6}} = 225 \text{ N}$$

Da $F_{am1} = F_{am2}$, ist die mittlere Axialbelastung wie folgt: $F_{am} = F_{am1} = F_{am2} = 225 \text{ N}$.

■ Modifizierte nominelle Lebensdauer

Belastungsfaktor $f_w = 1,5$ (siehe Tab. 2 auf [B15-49](#))

Mittlere Belastung $F_{am} = 225 \text{ N}$

Nominelle Lebensdauer L_{10} (Umdrehungen)

$$L_{10m} = \left(\alpha \times \frac{C_a}{F_{am}} \right)^3 \times 10^6$$

$$\alpha = \frac{1}{f_w}$$

Angenommene Typen	Dynamische Tragzahl C_a (N)	Modifizierte nominelle Lebensdauer L_{10m} (Umdrehungen)
WTF 2040-2	5400	$4,1 \times 10^9$
WTF 2040-3	6600	$7,47 \times 10^9$
WTF 3060-2	11800	$4,27 \times 10^{10}$
WTF 3060-3	14500	$7,93 \times 10^{10}$

■ Durchschnittliche Umdrehungen pro Minute

Verfahrzyklen pro Minute

$$n = 8 \text{ min}^{-1}$$

Hublänge

$$l_s = 1.000 \text{ mm}$$

- Spindelsteigung: $Ph = 40 \text{ mm}$

$$N_m = \frac{2 \times n \times l_s}{Ph} = \frac{2 \times 8 \times 1000}{40} = 400 \text{ min}^{-1}$$

- Spindelsteigung: $Ph = 60 \text{ mm}$

$$N_m = \frac{2 \times n \times l_s}{Ph} = \frac{2 \times 8 \times 1000}{60} = 267 \text{ min}^{-1}$$

■ Berechnung der nominellen Lebensdauer in Stunden

- WTF2040-2

Nominelle Lebensdauer

$$L_{10} = 4,1 \times 10^9 \text{ Umdrehungen}$$

Durchschnittliche Drehzahl

$$N_m = 400 \text{ min}^{-1}$$

$$L_{10h} = \frac{L_{10}}{60 \times N_m} = \frac{4,1 \times 10^9}{60 \times 400} = 171000 \text{ h}$$

- WTF2040-3

Nominelle Lebensdauer

$$L_{10} = 7,47 \times 10^9 \text{ Umdrehungen}$$

Durchschnittliche Drehzahl

$$N_m = 400 \text{ min}^{-1}$$

$$L_{10h} = \frac{L_{10}}{60 \times N_m} = \frac{7,47 \times 10^9}{60 \times 400} = 311000 \text{ h}$$

- WTF3060-2

Nominelle Lebensdauer

$$L_{10} = 4,27 \times 10^{10} \text{ Umdrehungen}$$

Durchschnittliche Drehzahl

$$N_m = 267 \text{ min}^{-1}$$

$$L_{10h} = \frac{L_{10}}{60 \times N_m} = \frac{4,27 \times 10^{10}}{60 \times 267} = 2670000 \text{ h}$$

- WTF3060-3

Nominelle Lebensdauer

$$L_{10} = 7,93 \times 10^{10} \text{ Umdrehungen}$$

Durchschnittliche Drehzahl

$$N_m = 267 \text{ min}^{-1}$$

$$L_{10h} = \frac{L_{10}}{60 \times N_m} = \frac{7,93 \times 10^{10}}{60 \times 267} = 4950000 \text{ h}$$

■ Berechnung der nominellen Lebensdauer in Wegstrecke

- WTF2040-2

Nominelle Lebensdauer	$L = 4,1 \times 10^9$ Umdrehungen
Steigung	$Ph = 40$ mm
$L_{10S} = L \times Ph \times 10^{-6} = 164.000$ km	
- WTF2040-3

Nominelle Lebensdauer	$L = 7,47 \times 10^9$ Umdrehungen
Steigung	$Ph = 40$ mm
$L_{10S} = L \times Ph \times 10^{-6} = 298.800$ km	
- WTF3060-2

Nominelle Lebensdauer	$L = 4,27 \times 10^{10}$ Umdrehungen
Steigung	$Ph = 60$ mm
$L_{10S} = L \times Ph \times 10^{-6} = 2.562.000$ km	
- WTF3060-3

Nominelle Lebensdauer	$L = 7,93 \times 10^{10}$ Umdrehungen
Steigung	$Ph = 60$ mm
$L_{10S} = L \times Ph \times 10^{-6} = 4.758.000$ km	

Unter allen oben angegebenen Bedingungen werden die folgenden Typen ausgewählt, die die gewünschte nominelle Lebensdauer von 30.000 Stunden erreichen.

WTF 2040-2

WTF 2040-3

WTF 3060-2

WTF 3060-3

[Berücksichtigung der Steifigkeit]

Die Steifigkeit wird bei diesem Beispiel nicht berücksichtigt, da sie bei dieser Anwendung nicht relevant ist.

[Ermittlung der Positioniergenauigkeit]● **Ermittlung der Steigungsgenauigkeit**

Die Genauigkeitsklasse C7 wurde bereits in Abschnitt [Auswahl der Genauigkeitsklasse und Überprüfung des Axialspiels] auf **B15-70** ausgewählt.

C7 (Wegabweichung: $\pm 0,05$ mm/300 mm)

● **Ermittlung des Axialspiels**

Da die Positionierung nur in eine bestimmte Richtung erfolgt, bleibt das Axialspiel unberücksichtigt, da es sich nicht auf die Positioniergenauigkeit auswirkt.

WTF2040: Axialspiel: 0,1 mm

WTF3060: Axialspiel: 0,14 mm

● **Axiale Steifigkeit**

Die axiale Steifigkeit bleibt ebenfalls unberücksichtigt, da die Belastungsrichtung sich nicht ändert, und sie deswegen keinen Einfluss auf die Positioniergenauigkeit hat.

● **Thermische Nachgiebigkeit bei Wärmeentwicklung**

Bei einer angenommenen Temperaturerhöhung während des Betriebs um 5°C errechnet sich die Positioniergenauigkeit in Abhängigkeit von der Temperaturerhöhung wie folgt:

$$\begin{aligned}\Delta l &= \rho \times \Delta t \times \ell \\ &= 12 \times 10^{-6} \times 5 \times 1000 \\ &= 0,06 \text{ mm}\end{aligned}$$

● **Einfederung während des Betriebs**

Zwischen der Längsachse des Kugelgewindetriebs und dem Punkt für die Positioniergenauigkeit besteht eine Distanz von 150 mm, daher ist die Einfederung während des Betriebs zu berücksichtigen.

Angenommen, das Kippen liegt konstruktionsbedingt im Bereich von $\pm 10''$, dann errechnet sich die Positionierabweichung wie folgt:

$$\begin{aligned}\Delta a &= \ell \times \sin \theta \\ &= 150 \times \sin (\pm 10'') \\ &= \pm 0,007 \text{ mm}\end{aligned}$$

Die Positioniergenauigkeit (Δp) wird also wie folgt ermittelt:

$$\Delta p = \frac{\pm 0,05 \times 1000}{300} \pm 0,007 + 0,06 = 0,234 \text{ mm}$$

Nach den vorausgegangenen Betrachtungen in den Abschnitten [Auswahl der Genauigkeitsklasse und Überprüfung des Axialspiels] auf **B15-70** bis [Ermittlung der Positioniergenauigkeit] auf **B15-79** erfüllen die Typen WTF2040-2, WTF2040-3, WTF3060-2 und WTF3060-3 die Auswahlbedingungen. Davon wird der kompakteste Typ WTF2040-2 ausgewählt.

[Ermittlung des Drehmoments]

● Reibmoment durch externe Belastung

Das Reibmoment wird wie folgt ermittelt:

$$T_1 = \frac{F_a \cdot Ph}{2\pi \cdot \eta} \cdot i = \frac{17 \times 40}{2 \times \pi \times 0,9} \times 1 = 120 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

● Drehmoment durch Vorspannung des Kugelgewindetriebs

Der Kugelgewindetrieb ist nicht vorgespannt.

● Drehmoment für Beschleunigung

Trägheitsmoment

Das Massenträgheitsmoment der Gewindepindel je Längeneinheit ist $1,23 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{cm}^2/\text{mm}$ (siehe Tabelle der technischen Einzelheiten). Daher wird das Massenträgheitsmoment für die ganze Spindel­länge von 1.200 mm wie folgt errechnet:

$$J_s = 1,23 \times 10^{-3} \times 1.200 = 1,48 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \\ = 1,48 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J = (m_1 + m_2) \left(\frac{Ph}{2 \times \pi} \right)^2 \cdot i^2 \times 10^{-6} + J_s \cdot i^2 = (60 + 20) \left(\frac{40}{2 \times \pi} \right)^2 \times 1^2 \times 10^{-6} + 1,48 \times 10^{-4} \times 1^2 \\ = 3,39 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Winkelbeschleunigung:

$$\omega' = \frac{2\pi \cdot Nm}{60 \cdot t_1} = \frac{2\pi \times 1500}{60 \times 0,15} = 1.050 \text{ rad/s}^2$$

Gemäß obigen Betrachtungen wird für die Beschleunigung folgendes Drehmoment benötigt:

$$T_2 = (J + J_m) \times \omega' = (3,39 \times 10^{-3} + 1 \times 10^{-3}) \times 1.050 = 4,61 \text{ N} \cdot \text{m} \\ = 4,61 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Daraus ergibt sich folgendes Drehmoment:

Bei der Beschleunigung

$$T_k = T_1 + T_2 = 120 + 4,61 \times 10^3 = 4.730 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Bei konstanter Bewegung

$$T_i = T_1 = 120 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Bei der Verzögerung

$$T_g = T_1 - T_2 = 120 - 4,61 \times 10^3 = -4.490 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

[Ermittlung des Antriebsmotors]● **Drehzahl**

Da die Spindelsteigung anhand der Nenndrehzahl des Motors ausgewählt wird, muss die Motor-drehzahl hier nicht berücksichtigt werden.

Maximale Betriebsdrehzahl : 1.500 min⁻¹

Nenndrehzahl des Motors: 3.000 min⁻¹

● **Minimaler Vorschub**

Wie bei der Drehzahl ist der minimale Vorschub auch von der Spindelsteigung und der Auflösung des Encoders für den AC-Servomotor abhängig. Daher wird der minimale Vorschub auch nicht berücksichtigt.

Auflösung Encoder: 1.000 Impulse/Umdrehung

Multipliziert mit 2: 2.000 Impulse/Umdrehung

● **Motordrehmoment**

Das Drehmoment während der Beschleunigung, das in Abschnitt [Ermittlung des Drehmoments] auf

B 15-80 berechnet wurde, ist das maximale Drehmoment.

$$T_{\max} = 4.730 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Daher muss das maximale Drehmoment des AC-Servomotors mindestens 4.730 Nmm betragen.

● **Effektives Drehmoment**

Die Auswahlkriterien und das im Abschnitt [Ermittlung des Drehmoments] auf **B 15-80** ermittelte Drehmoment können wie folgt ausgedrückt werden:

Bei der Beschleunigung:

$$T_k = 4.730 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$t_1 = 0,15 \text{ s}$$

Bei konstanter Bewegung:

$$T_i = 120 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$t_2 = 0,85 \text{ s}$$

Bei der Verzögerung:

$$T_g = 4.490 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$t_3 = 0,15 \text{ s}$$

Im Stillstand:

$$T_s = 0$$

$$t_4 = 2,6 \text{ s}$$

Gemäß dem nachfolgend angegebenen effektiven Drehmoment muss das Nenndrehmoment des Motors mindestens 1305 Nmm betragen.

$$T_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{T_k^2 \cdot t_1 + T_i^2 \cdot t_2 + T_g^2 \cdot t_3 + T_s^2 \cdot t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}} = \sqrt{\frac{4730^2 \times 0,15 + 120^2 \times 0,85 + 4490^2 \times 0,15 + 0}{0,15 + 0,85 + 0,15 + 2,6}}$$

$$= 1.305 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

- **Trägheitsmoment**

Das Trägheitsmoment, das auf den Motor wirkt, entspricht dem im Abschnitt [Ermittlung des Drehmoments] auf **B 15-80** ermittelten Trägheitsmoment.

$$J = 3,39 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Obwohl die Werte je nach Hersteller variieren, sollte der Motor 10 % von dem Trägheitsmoment erzeugen, das auch auf den Motor wirkt.

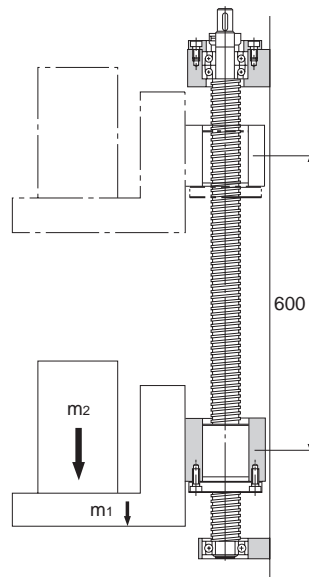
Daher sollte das Trägheitsmoment des AC-Servomotors mindestens $3,39 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ betragen.

Damit ist die Auswahl abgeschlossen.

Vertikales Transportsystem

[Auswahlbedingungen]

Gewicht des Tisches	$m_1 = 40 \text{ kg}$
Gewicht des Werkstücks	$m_2 = 10 \text{ kg}$
Hublänge	$l_s = 600 \text{ mm}$
Maximalgeschwindigkeit	$V_{\max} = 0,3 \text{ m/s}$
Beschleunigungszeit	$t_1 = 0,2 \text{ s}$
Verzögerungszeit	$t_3 = 0,2 \text{ s}$
Verfahrzyklen pro Minute	$n = 5 \text{ min}^{-1}$
Umkehrspiel	$0,1 \text{ mm}$
Positioniergenauigkeit	$\pm 0,7 \text{ mm}/600 \text{ mm}$
Wiederholgenauigkeit	$\pm 0,05 \text{ mm}$
Minimaler Vorschub	$s = 0,01 \text{ mm/Intervall}$
geforderte nominelle Lebensdauer	20.000 h
Antriebsmotor	AC-Servomotor
	Neendrehzahl:
	3.000 min^{-1}
Motor-Trägheitsmoment	$J_m = 5 \times 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
Getriebe	Ohne (Direktantrieb)
Reibungskoeffizient des Führung	
	$\mu = 0,003 \text{ (rollend)}$
Verschleibwiderstand des Führungssystems	
	$f = 20 \text{ N (unbelastet)}$



[Kontrollliste]

Spindeldurchmesser
 Steigung
 Muttertyp
 Genauigkeit
 Axialspiel
 Endenlagerung
 Antriebsmotor

[Auswahl der Genauigkeitsklasse und Überprüfung des Axialspiels]

● Auswahl der Steigungsgenauigkeit

Um eine Positioniergenauigkeit von $\pm 0,7$ mm/600 mm zu erreichen:

$$\frac{\pm 0,7}{600} = \frac{\pm 0,35}{300}$$

ist eine Steigungsgenauigkeit von mindestens $\pm 0,35$ mm/300 mm auszuwählen.

Demzufolge muss der Kugelgewindtrieb (siehe Tab. 1 auf [B 15-20](#)) der Genauigkeitsklasse C10 (Wegabweichung: $\pm 0,21$ mm/300 mm) entsprechen.

In dieser Genauigkeitsklasse C10 werden preisgünstige gerollte Kugelgewindtriebe angeboten. Daher bezieht sich die weitere Auswahl auf diese Typen.

● Auswahl des Axialspiels

Das erforderliche Umkehrspiel beträgt maximal 0,1 mm. Allerdings erzeugt das Axialspiel nicht unbedingt ein Umkehrspiel, da die Axialbelastung bei vertikaler Ausführung immer in eine Richtung wirkt.

Daher ist das Axialspiel zu vernachlässigen, und es kann ein preisgünstiger gerollter Gewindtrieb ausgesucht werden.

[Auswahl der Gewindespindel]

● Berechnung der Spindellänge

Angenommen die Gesamtlänge der Kugelgewindemutter ist 100 mm und die des Spindelendes ist 100 mm, dann ermittelt sich die Gesamt-Spindellänge bei einem Fahrweg von 600 mm wie folgt:

$$600 + 200 = 800 \text{ mm}$$

Als Gewindespindellänge werden also 800 mm angenommen.

● Auswahl der Steigung

Bei einer Motorenndrehzahl von 3.000 min^{-1} und der max. Vorschubgeschwindigkeit von 0,3 m/s ist die Spindelsteigung wie folgt zu ermitteln:

$$\frac{0,3 \times 60 \times 1000}{3000} = 6 \text{ mm}$$

Daher sollte der gewählte Typ eine Steigung von mindestens 6 mm haben.

Darüber hinaus kann der Motor direkt am Kugelgewindtrieb ohne Untersetzung angeflanscht werden. Die Mindestauflösung pro Umdrehung des AC-Servomotors ist abhängig von der nachfolgend angegebenen Auflösung des Encoders, der als Standardzubehör zum AC-Servomotor geliefert wird (1.000 bzw. 1.500 Impulse/ Umdrehung):

- 1.000 Impulse/Umdrehung (nicht multipliziert)
- 1.500 Impulse/Umdrehung (nicht multipliziert)
- 2.000 Impulse/Umdrehung (multipliziert mit 2)
- 3.000 Impulse/Umdrehung (multipliziert mit 2)
- 4.000 Impulse/Umdrehung (multipliziert mit 4)
- 6.000 Impulse/Umdrehung (multipliziert mit 4)

Auswahlkriterien

Auswahlbeispiele für Kugelgewindetriebe

Nach den vorliegenden Auswahlkriterien sollte die Spindelsteigung bei einer min. Vorschubgeschwindigkeit von 0,01 mm/Impuls wie folgt sein:

Steigung	6 mm	—	3.000	Impulse/Umdrehung
	8 mm	—	4.000	Impulse/Umdrehung
	10 mm	—	1.000	Impulse/Umdrehung
	20 mm	—	2.000	Impulse/Umdrehung
	40 mm	—	2.000	Impulse/Umdrehung

Bei einer Steigung von 6 oder 8 mm ist der minimale Vorschub 0,002 mm/Impuls, daher werden Motor-Startimpulse von mindestens 150 kHz seitens des Controllers benötigt. Dies führt zu höheren Controller-Kosten.

Zusätzlich benötigt ein Kugelgewindetrieb mit großer Steigung einen teuren Motor mit hohem Drehmoment.

Daher wird ein Kugelgewindetrieb mit 10 mm Steigung ausgewählt.

● Auswahl des Spindeldurchmessers

Die folgenden Kugelgewindetriebe erfüllen die Steigung von 10 mm gemäß Abschnitt [Auswahl der Genauigkeitsklasse und Überprüfung des Axialspiels] auf **B 15-84** und Abschnitt [Auswahl der Gewindespindel] auf **B 15-84** (siehe Tab. 21 auf **B 15-35**):

Spindeldurchmesser	Steigung
15 mm	— 10 mm
20 mm	— 10 mm
25 mm	— 10 mm

Danach wird ein Durchmesser von 15 mm mit 10 mm Steigung ausgesucht.

● Auswahl der Endenlagerung

Bei einer Hublänge des Kugelgewindetriebs von 600 mm und einer max. Vorschubgeschwindigkeit von 0,3 m/s (Drehzahl: 1.800 min⁻¹) ist die Lagerart fest - los zu wählen.

● Zulässige Axialbelastung

■ Berechnung der maximalen Axialbelastung

Verschiebewiderstand des Führungssystems

$$f = 20 \text{ N (unbelastet)}$$

$$\text{Gewicht des Tisches} \quad m_1 = 40 \text{ kg}$$

$$\text{Gewicht des Werkstücks} \quad m_2 = 10 \text{ kg}$$

$$\text{Maximalgeschwindigkeit} \quad v_{\max} = 0,3 \text{ m/s}$$

$$\text{Beschleunigungszeit} \quad t_1 = 0,2 \text{ s}$$

Daraus ergeben sich die folgenden notwendigen Werte:

Beschleunigung

$$a = \frac{v_{\max}}{t_1} = 1,5 \text{ m/s}^2$$

Bei Aufwärtsbeschleunigung:

$$F_{a1} = (m_1 + m_2) \cdot g + f + (m_1 + m_2) \cdot a = 585 \text{ N}$$

Bei konstanter Aufwärtsbewegung:

$$F_{a2} = (m_1 + m_2) \cdot g + f = 510 \text{ N}$$

Bei Aufwärtsverzögerung:

$$F_{a3} = (m_1 + m_2) \cdot g + f - (m_1 + m_2) \cdot a = 435 \text{ N}$$

Bei Abwärtsbeschleunigung:

$$F_{a4} = (m_1 + m_2) \cdot g - f - (m_1 + m_2) \cdot a = 395 \text{ N}$$

Bei konstanter Abwärtsbewegung:

$$F_{a5} = (m_1 + m_2) \cdot g - f = 470 \text{ N}$$

Bei Abwärtsverzögerung:

$$F_{a6} = (m_1 + m_2) \cdot g - f + (m_1 + m_2) \cdot a = 545 \text{ N}$$

Danach ist die maximale Axialbelastung des Kugelgewindetriebs:

$$F_{a\max} = F_{a1} = 585 \text{ N}$$

■ Berechnung der Knicklast

Faktor für Lagerart

$$\eta_2 = 20 \text{ (siehe } \boxed{\text{B15-38}})$$

Die Knicklast basiert auf dem ungestützten Bereich zwischen der Endenlagerung und der Mutter mit der Lagerart fest - fest. Deshalb gilt:

Ungestützte Spindellänge

$$\ell_a = 700 \text{ mm (geschätzt)}$$

Kerndurchmesser der Gewindespindel

$$dc = 12,5 \text{ mm}$$

$$P_1 = \eta_2 \cdot \frac{dc^4}{\ell_a^2} \times 10^4 = 20 \times \frac{12,5^4}{700^2} \times 10^4 = 9.960 \text{ N}$$

■ Zulässige Zug-Druck-Belastung der Gewindespindel

$$P_2 = 116dc^2 = 116 \times 12,5^2 = 18.100 \text{ N}$$

Das Ergebnis ist, dass die Knicklast und die zulässige Zug-Druck-Belastung der Gewindespindel mindestens der maximalen Axialbelastung entsprechen. Demzufolge können Kugelgewindetriebe, die diese Anforderungen erfüllen, problemlos verwendet werden.

- **Zulässige Drehzahl**

- **Maximale Drehzahl**

- Spindeldurchmesser: 15 mm; Steigung: 10 mm

Maximalgeschwindigkeit

$$V_{\max} = 0,3 \text{ m/s}$$

Steigung

$$Ph = 10 \text{ mm}$$

$$N_{\max} = \frac{V_{\max} \times 60 \times 10^3}{Ph} = 1.800 \text{ min}^{-1}$$

- **Zulässige Drehzahl unter Berücksichtigung der kritischen Drehzahl der Gewindespindel**

Faktor für Lagerart

$$\lambda_2 = 15,1 \text{ (siehe B15-40)}$$

Ungestützte Spindellänge zwischen Mutter und Lagerung mit der Lagerart fest - los, für die die kritische Drehzahl zu berücksichtigen ist:

Ungestützte Spindellänge

$$\ell_b = 700 \text{ mm (geschätzt)}$$

- Spindeldurchmesser: 15 mm; Steigung: 10 mm

Kerndurchmesser der Gewindespindel

$$dc = 12,5 \text{ mm}$$

$$N_1 = \lambda_2 \times \frac{dc}{\ell_b^2} 10^7 = 15,1 \times \frac{12,5}{700^2} \times 10^7 = 3.852 \text{ min}^{-1}$$

- **Zulässige Drehzahl unter Berücksichtigung des DN-Werts**

- Spindeldurchmesser: 15 mm; Steigung: 10 mm (Kugelgewindetrieb mit großer Steigung)

Kugelmittendurchmesser

$$dp = 15,75 \text{ mm}$$

$$N_2 = \frac{70000}{dp} = \frac{70000}{15,75} = 4.444 \text{ min}^{-1}$$

Nach diesen Berechnungen ist die maximale Drehzahl unter dem Wert der kritischen Drehzahl unter Berücksichtigung des DN-Wertes erfüllt.

[Auswahl der Kugelgewindemutter]

● Auswahl der Kugelgewindemuttergröße

Der Durchmesser von 15 mm und die Steigung von 10 mm ist kennzeichnend für den folgenden gerollten Kugelgewindetrieb mit großer Steigung:

BLK1510-5,6

($C_a = 9,8 \text{ kN}$, $C_{0a} = 25,2 \text{ kN}$)

● Zulässige Axialbelastung

Das Auswahlbeispiel ist während Beschleunigung und Verzögerung Schwingungen und Stößen ausgesetzt, daher wird ein Sicherheitsfaktor von $f_s = 2$ berücksichtigt (siehe Tab. 1 auf **B15-47**):

$$F_{a_{\max}} = \frac{C_{0a}}{f_s} = \frac{25,2}{2} = 12,6 \text{ kN} = 12.600 \text{ N}$$

Die maximale Axialbelastung beträgt 585 N. Da die zulässige Axialbelastung dieses Typs größer ist, kann dieser eingesetzt werden.

● Berechnung der nominellen Lebensdauer

■ Berechnung der Hublänge

Maximalgeschwindigkeit $V_{\max} = 0,3 \text{ m/s}$

Beschleunigungszeit $t_1 = 0,2 \text{ s}$

Verzögerungszeit $t_3 = 0,2 \text{ s}$

- Hublänge bei Beschleunigung

$$l_{1,4} = \frac{V_{\max} \cdot t_1}{2} \times 10^3 = \frac{0,3 \times 0,2}{2} \times 10^3 = 30 \text{ mm}$$

- Hublänge bei konstanter Bewegung

$$l_{2,5} = l_s - \frac{V_{\max} \cdot t_1 + V_{\max} \cdot t_3}{2} \times 10^3 = 600 - \frac{0,3 \times 0,2 + 0,3 \times 0,2}{2} \times 10^3 = 540 \text{ mm}$$

- Hublänge bei Verzögerung

$$l_{3,6} = \frac{V_{\max} \cdot t_3}{2} \times 10^3 = \frac{0,3 \times 0,2}{2} \times 10^3 = 30 \text{ mm}$$

Aus den oben genannten Bedingungen ergibt sich das in der folgenden Tabelle dargestellte Verhältnis zwischen Axialbelastung und Hublänge:

Bewegung	Axialbelastung $F_{a(N)}$	Hublänge $l_N(\text{mm})$
Nr. 1: Bei Aufwärtsbeschleunigung	585	30
Nr. 2: Bei konstanter Aufwärtsbewegung	510	540
Nr. 3: Bei Aufwärtsverzögerung	435	30
Nr. 4: Bei Abwärtsbeschleunigung	395	30
Nr. 5: Bei konstanter Abwärtsbewegung	470	540
Nr. 6: Bei Abwärtsverzögerung	545	30

* Der Index (N) gibt die Bewegungsnummer an.

■ Mittlere Axialbelastung

$$F_{am} = \sqrt[3]{\frac{1}{2 \times l_s} (F_{a1}^3 \cdot l_1 + F_{a2}^3 \cdot l_2 + F_{a3}^3 \cdot l_3 + F_{a4}^3 \cdot l_4 + F_{a5}^3 \cdot l_5 + F_{a6}^3 \cdot l_6)} = 492 \text{ N}$$

■ Modifizierte nominelle Lebensdauer

Dynamische Tragzahl	$C_a = 9.800 \text{ N}$
Belastungsfaktor	$f_w = 1,5$ (siehe Tab. 2 auf B 15-49)
Mittlere Belastung	$F_{am} = 492 \text{ N}$
Nominelle Lebensdauer	L_{10} (Umdrehungen)

$$L_{10m} = \left(\alpha \times \frac{C_a}{F_{am}} \right)^3 \times 10^6 = \left(\frac{9800}{1,5 \times 492} \right)^3 \times 10^6 = 2,34 \times 10^9 \text{ Umdrehungen}$$

$$\alpha = \frac{1}{f_w}$$

■ Durchschnittliche Umdrehungen pro Minute

Verfahrzyklen pro Minute	$n = 5 \text{ min}^{-1}$
Hublänge	$l_s = 600 \text{ mm}$
Steigung	$Ph = 10 \text{ mm}$

$$N_m = \frac{2 \times n \times l_s}{Ph} = \frac{2 \times 5 \times 600}{10} = 600 \text{ min}^{-1}$$

■ Berechnung der nominellen Lebensdauer in Stunden

Nominelle Lebensdauer	$L_{10} = 2,34 \times 10^9 \text{ Umdrehungen}$
Durchschnittliche Anzahl der Umdrehungen pro Minute	$N_m = 600 \text{ min}^{-1}$

$$L_{10h} = \frac{L_{10}}{60 \cdot N_m} = \frac{2,34 \times 10^9}{60 \times 600} = 65000 \text{ h}$$

■ Berechnung der nominellen Lebensdauer in Wegstrecke

Nominelle Lebensdauer	$L_{10} = 2,34 \times 10^9 \text{ Umdrehungen}$
Steigung	$Ph = 10 \text{ mm}$
$L_{10S} = L_{10} \times Ph \times 10^{-6} = 23.400 \text{ km}$	

Unter allen oben angegebenen Bedingungen wird der Typ BLK1510-5,6 ausgewählt, der die gewünschte nominelle Lebensdauer von 20.000 Stunden erreicht.

[Berücksichtigung der Steifigkeit]

Die Steifigkeit wird bei diesem Beispiel nicht berücksichtigt, da sie bei dieser Anwendung nicht relevant ist.

[Ermittlung der Positioniergenauigkeit]

● Ermittlung der Positioniergenauigkeit

Die Genauigkeitsklasse C10 wurde bereits in Abschnitt [Auswahl der Genauigkeitsklasse und Überprüfung des Axialspiels] auf **B15-84** ausgewählt.

C10 (Wegabweichung: $\pm 0,21$ mm/300 mm)

● Ermittlung des Axialspiels

Bei einer vertikalen Anwendungen wirkt die Axialbelastung nur in eine Richtung, daher muss das Axialspiel nicht berücksichtigt werden.

● Axialsteifigkeit

Die Axialesteifigkeit muss nicht berücksichtigt werden, da die Steigungsgenauigkeit höher ist als die geforderte Positioniergenauigkeit.

● Thermische Nachgiebigkeit bei Wärmeentwicklung

Da die Steigungsgenauigkeit höher ist als die hier geforderte Positioniergenauigkeit, muss die Berechnung der thermischen Nachgiebigkeit nicht berücksichtigt werden.

● Einfederung während des Betriebs

Da die Steigungsgenauigkeit viel größer ist als die geforderte Positioniergenauigkeit, braucht die Einfederung während des Betriebs hier nicht berücksichtigt werden.

[Ermittlung des Drehmoments]

● Reibmoment durch externe Belastung

Bei konstanter Aufwärtsbewegung:

$$T_1 = \frac{F_{a2} \cdot Ph}{2 \times \pi \times \eta} = \frac{510 \times 10}{2 \times \pi \times 0,9} = 900 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Bei konstanter Abwärtsbewegung:

$$T_2 = \frac{F_{a5} \cdot Ph}{2 \times \pi \times \eta} = \frac{470 \times 10}{2 \times \pi \times 0,9} = 830 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

● Drehmoment durch Vorspannung des Kugelgewindetriebs

Der Kugelgewindetrieb ist nicht vorgespannt.

● Drehmoment für Beschleunigung

Trägheitsmoment:

Das Massenträgheitsmoment der Gewindespindel je Längeneinheit ist $3,9 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{cm}^2/\text{mm}$ (siehe Tabelle der technischen Einzelheiten). Daher wird das Massenträgheitsmoment für die ganze Spindel­länge von 800 mm wie folgt errechnet:

$$J_s = 3,9 \times 10^{-4} \times 800 = 0,31 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \\ = 0,31 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J = (m_1 + m_2) \left(\frac{Ph}{2 \times \pi} \right)^2 \cdot i^2 \times 10^{-6} + J_s \cdot i^2 = (40 + 10) \left(\frac{10}{2 \times \pi} \right)^2 \times 1^2 \times 10^{-6} + 0,31 \times 10^{-4} \times 1^2 \\ = 1,58 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Winkelbeschleunigung:

$$\omega' = \frac{2\pi \cdot N_{\text{max}}}{60 \cdot t} = \frac{2\pi \times 1.800}{60 \times 0.2} = 942 \text{ rad/s}^2$$

Gemäß obigen Betrachtungen wird für die Beschleunigung folgendes Drehmoment benötigt:

$$T_3 = (J + J_m) \cdot \omega' = (1,58 \times 10^{-4} + 5 \times 10^{-5}) \times 942 = 0,2 \text{ N} \cdot \text{m} = 200 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Daraus ergibt sich folgendes Drehmoment:

Bei Aufwärtsbeschleunigung:

$$T_{k1} = T_1 + T_3 = 900 + 200 = 1.100 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Bei konstanter Aufwärtsbewegung:

$$T_{r1} = T_1 = 900 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Bei Aufwärtsverzögerung:

$$T_{g1} = T_1 - T_3 = 900 - 200 = 700 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Bei Abwärtsbeschleunigung:

$$T_{k2} = 630 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Bei konstanter Abwärtsbewegung:

$$T_{r2} = 830 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Bei Abwärtsverzögerung:

$$T_{g2} = 1.030 \text{ Nmm}$$

[Ermittlung des Antriebsmotors]

● Drehzahl

Da die Spindelsteigung anhand der Nenndrehzahl des Motors ausgewählt wird, muss die Motordrehzahl hier nicht berücksichtigt werden.

Maximale Betriebsdrehzahl : 1.800 min^{-1}

Nenndrehzahl des Motors: 3.000 min^{-1}

● Minimaler Vorschub

Wie bei der Drehzahl ist der minimale Vorschub auch von der Spindelsteigung und der Auflösung des Encoders für den AC-Servomotor abhängig. Daher wird der minimale Vorschub auch nicht berücksichtigt.

Auflösung Encoder: 1.000 Impulse/Umdrehung

● Drehmoment des Motors

Das Drehmoment während der Beschleunigung, das in Abschnitt [Ermittlung des Drehmoments] auf **B15-90** berechnet wurde, ist das maximale Drehmoment.

$$T_{\max} = T_{k1} = 1.100 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

Daher muss das maximale Spitzendrehmoment des AC-Servomotors mindestens 1.100 Nmm betragen.

● Effektives Drehmoment

Die Auswahlkriterien und das im Abschnitt [Ermittlung des Drehmoments] auf **B15-90** ermittelte Drehmoment können wie folgt ausgedrückt werden:

Bei Aufwärtsbeschleunigung:

$$T_{k1} = 1.100 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

$$t_1 = 0,2 \text{ s}$$

Bei konstanter Aufwärtsbewegung:

$$T_{t1} = 900 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

$$t_2 = 1,8 \text{ s}$$

Bei Aufwärtsverzögerung:

$$T_{g1} = 700 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

$$t_3 = 0,2 \text{ s}$$

Bei Abwärtsbeschleunigung:

$$T_{k2} = 630 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

$$t_1 = 0,2 \text{ s}$$

Bei konstanter Abwärtsbewegung:

$$T_{t2} = 830 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

$$t_2 = 1,8 \text{ s}$$

Bei Abwärtsverzögerung:

$$T_{g2} = 1.030 \text{ Nmm}$$

$$t_3 = 0,2 \text{ s}$$

Im Stillstand ($m_2 = 0$):

$$T_s = 658 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

$$t_4 = 7,6 \text{ s}$$

Gemäß dem nachfolgend angegebenen effektiven Drehmoment muss das Nenndrehmoment des Motors mindestens 743 Nmm betragen.

$$\begin{aligned}
 T_{\text{rms}} &= \sqrt{\frac{T_{k1}^2 \cdot t_1 + T_{t1}^2 \cdot t_2 + T_{g1}^2 \cdot t_3 + T_{k2}^2 \cdot t_1 + T_{t2}^2 \cdot t_2 + T_{g2}^2 \cdot t_3 + T_s^2 \cdot t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_1 + t_2 + t_3 + t_4}} \\
 &= \sqrt{\frac{1100^2 \times 0,2 + 900^2 \times 1,8 + 700^2 \times 0,2 + 630^2 \times 0,2 + 830^2 \times 1,8 + 1030^2 \times 0,2 + 658^2 \times 7,6}{0,2 + 1,8 + 0,2 + 0,2 + 1,8 + 0,2 + 7,6}} \\
 &= 743 \text{ N} \cdot \text{mm}
 \end{aligned}$$

● Trägheitsmoment

Das Trägheitsmoment, das auf den Motor wirkt, entspricht dem im Abschnitt [Ermittlung des Drehmoments] auf **B15-90** ermittelten Trägheitsmoment.

$$J = 1,58 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Obwohl die Werte je nach Hersteller variieren, sollte der Motor 10 % von dem Trägheitsmoment erzeugen, das auch auf den Motor wirkt.

Daher sollte das Trägheitsmoment des AC-Servomotors mindestens $1,58 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ betragen.

Damit ist die Auswahl abgeschlossen.

