

Berechnung

Spindelhubgetriebe

Bei der Auslegung von Spindelhubgetrieben wird im allgemeinen wie folgt verfahren:

1. Festlegung der Geschwindigkeit, der benötigten Kraft und der möglichen Einbaulagen der Spindelhubgetriebe.
2. Auswahl der Antriebselemente (Kupplungen, Wellen, Kegelradgetriebe, Motoren) zum synchronen Antrieb der einzelnen Spindelhubgetriebe. Hierbei sind folgende Kriterien ausschlaggebend:
 - Geringstmögliche Belastung der einzelnen Übertragungsglieder. Insbesondere ist die Einspeisung des gesamten Antriebsdrehmoments über die Verzahnung eines Kegelradgetriebes zu vermeiden.
 - Geringstmögliche Anzahl von Übertragungsgliedern und kurze Verbindungswellen.
 - Vorrichtung zum Schutz der Anlage durch drehmomentbegrenzende Kupplung.

Auswahl eines Spindelhubgetriebes und des dazugehörigen Antriebs

Axiale Belastung $F=kN$

kritische Knickkraft? Siehe Seite 78-80

Geschwindigkeit $v = m/min$ (Nur Ausführung R)

kritische Drehzahl? Siehe Seite 78-80

Einschaltdauer? $ED = \% \text{ in } 1h$

Siehe Seite 62-64; 70-72

Getriebegröße wählen

Erforderliches Antriebsdrehmoment berechnen oder nachschlagen

Siehe Seite 81

Zulässiges Antriebsdrehmoment prüfen

**Überprüfen von Seitenkräften auf die Spindel,
sowie Axial- und Radialkräfte auf Antriebswellen**

(Seitenkräfte auf Spindel vermeiden=Führung)

Notwendige Antriebsleistung in kW berechnen (Losbrechmoment beachten)

Siehe Seite 77

Berechnung Spindelhubgetriebe

Kräfte und Momente am Spindelhubgetriebe

Hinweis: Kräfte und Momente lassen sich nur unter vereinfachenden Annahmen abschätzen; Reibungsbeiwerte von Gleitpaarungen und damit ihre Erwärmung und Lebensdauer sind Funktion von Last, Geschwindigkeit, Temperatur und Schmierbedingungen; kritische Drehzahlen und Knicklängen sind abhängig von der Steifigkeit und Masse der Einspannung und der Maschinengestelle etc..

| | | |
|------------------|---|---|
| F_{eff} | = | Axialkraft auf die Hubspindel |
| F_S | = | Resultierende aller Seitenkräfte auf die Hubspindel |
| M | = | Moment der Hubspindel oder Mutter (entfällt bei Ausführung V) |
| V_H | = | Hubgeschwindigkeit |
| F_{ax} | = | Axialkraft auf die Antriebswelle |
| F_r | = | Radialkraft auf die Antriebswelle |
| M_T | = | Antriebsmoment |
| n_T | = | Antriebsdrehzahl |
| P | = | Steigung der Spindel |
| i | = | Übersetzung |
| η | = | Wirkungsgrad |
| M_0 | = | Leerlaufdrehmoment (S. 28 (Nm)) |

$$F_{\text{eff}} = \frac{M_T - M_0}{\frac{P}{i}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \eta$$

Antriebsleistung

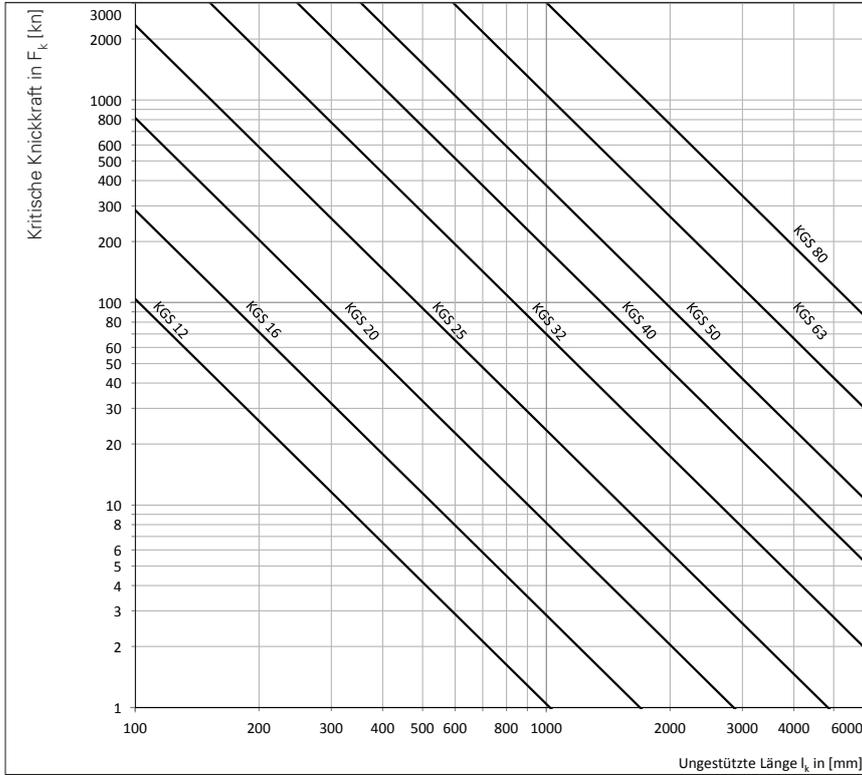
$$P_a = \frac{M_d \cdot n}{9550}$$

| | |
|-------|-------------------------------------|
| M_d | Erforderliches Antriebsmoment [Nm] |
| n | Spindeldrehzahl [1/min] |
| P_a | Erforderliche Antriebsleistung [kW] |

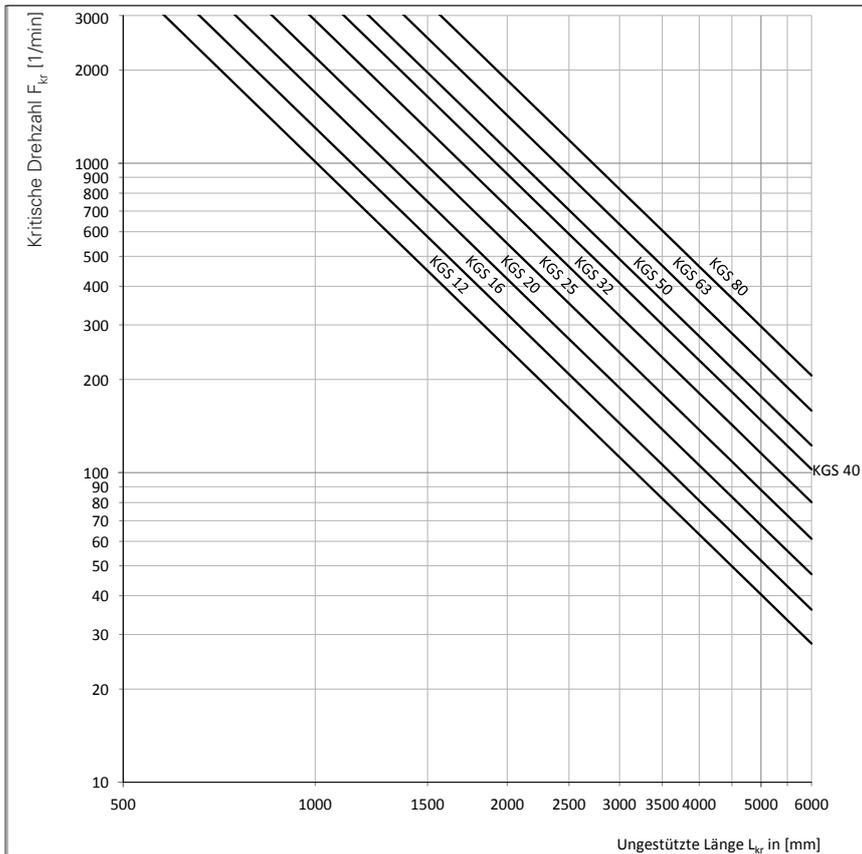
Berechnung

Spindelhubgetriebe

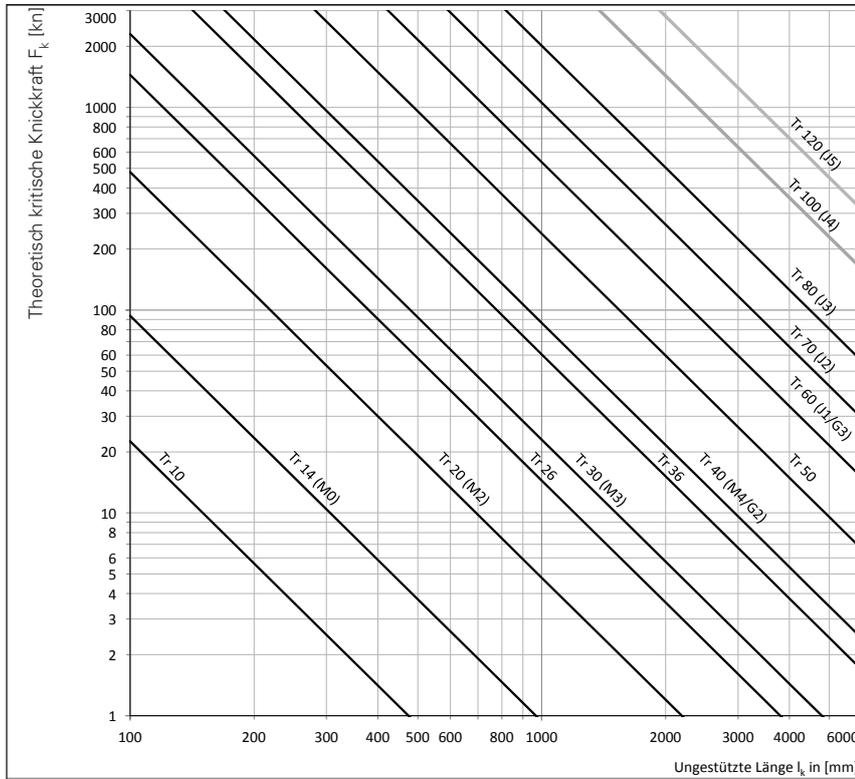
Theoretisch kritische Knickkraft Spindelhubgetriebe M/J, Schnellhubgetriebe G1-G3 mit Kugelgewindespindel



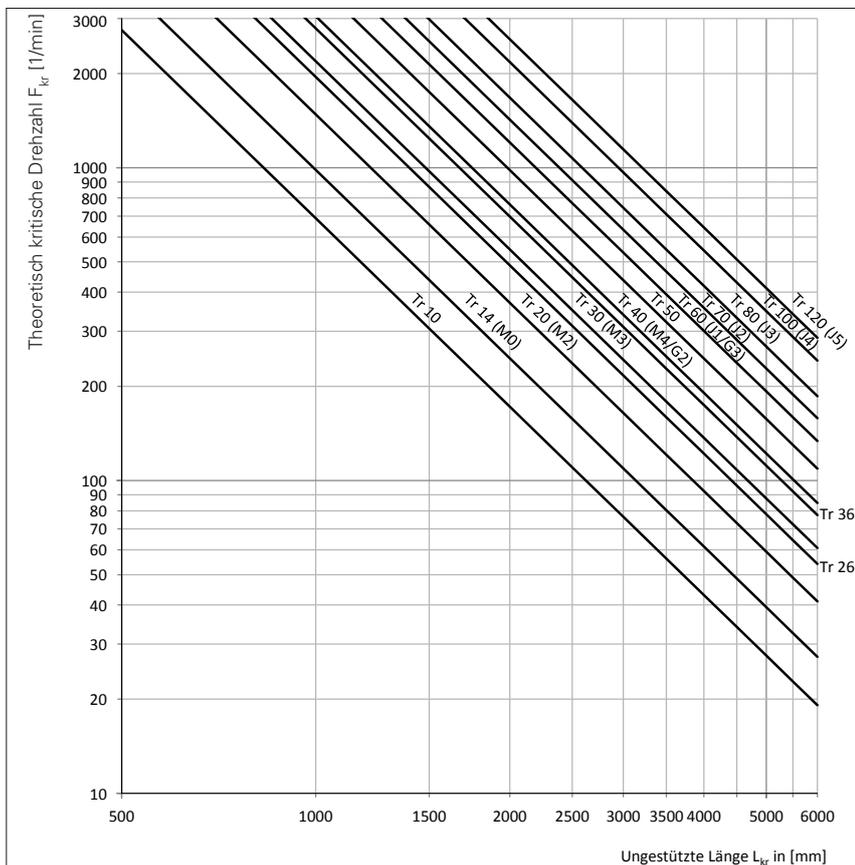
Theoretisch kritische Drehzahl Spindelhubgetriebe M/J, Schnellhubgetriebe G1-G3 mit Kugelgewindespindel



Theoretisch kritische Knickkraft Spindelhubgetriebe M/J, Schnellhubgetriebe G1-G3 mit Trapezgewindespindel



Theoretisch kritische Drehzahl Spindelhubgetriebe M/J, Schnellhubgetriebe G1-G3 mit Trapezgewindespindel



Berechnung Spindelhubgetriebe

Kritische Knickkraft

Bei schlanken Hubspindeln besteht die Gefahr des seitlichen Ausknickens unter Druckbelastung.

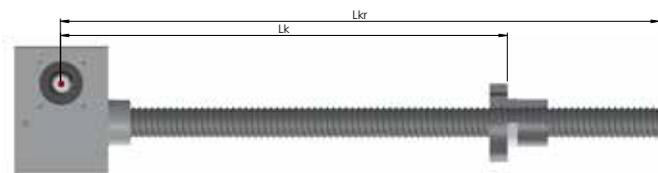
Vor der Festlegung der zulässigen Druckkraft auf die Spindel sind die der Anlage entsprechenden Sicherheitsfaktoren zu beachten.

Lagerungsarten

Typische Werte des Korrekturfaktors f_k entsprechend den klassischen Einbaufällen für Standardspindellagerungen.

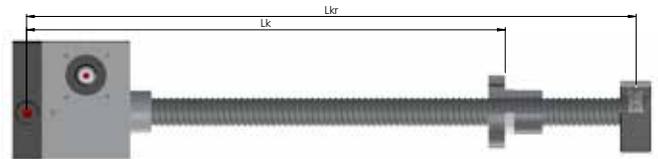
Neff-Lagerfall I

Festlager-Loses Ende, Korrekturfaktor $f_k=0,25 / f_{kr}=0,43$



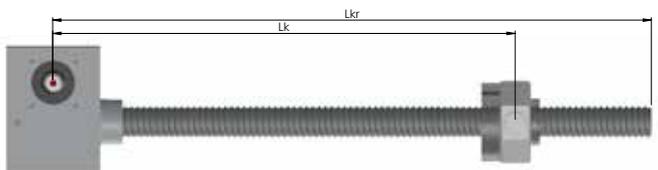
Neff-Lagerfall II

Loslager-Loslager, Korrekturfaktor $f_k=1 / f_{kr}=1,21$



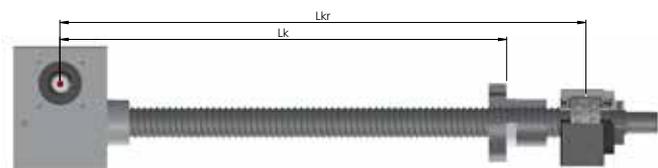
Neff-Lagerfall III

Festlager-Loslager, Korrekturfaktor $f_k=2,05 / f_{kr}=1,89$



Neff-Lagerfall IV

Festlager-Festlager, Korrekturfaktor $f_k=4 / f_{kr}=2,74$



Kritische Knickkraft Spindelhubgetriebe M/J, Schnellhubgetriebe G1-G3 mit Kugelge- windspindel/Trapezgewindespindel

Theoretisch kritische Knickkraft in [kN]:

$$F_k = \left(\frac{d_2}{L_{kr}} \right)^2 \cdot 10^5 : 1000$$

Maximal zulässige Axialkraft in:

$$F_{zul} = F_k \cdot f_k \cdot \frac{1}{S_f}$$

| | |
|-----------|---|
| F_{zul} | Maximal zulässige Axialkraft [kN] |
| F_k | Theoretische kritische Knickkraft [kN] |
| f_k | Korrekturfaktor, der die Art der Spindellagerung berücksichtigt |
| d_2 | Kerndurchmesser der Spindel [mm] |
| L_{kr} | Ungestützte Länge an der die Kraft auf die Spindel wirkt [mm] |
| S_f | Sicherheitsfaktor (vom Anwender festgelegt) |

Achtung!

Die Betriebskraft darf höchstens 80 % der maximalen zulässigen Axialkraft betragen

Kritische Knickkraft Spindelhubgetriebe M/J, Schnellhubgetriebe G1-G3 mit Kugelge- windspindel

Theoretisch kritische Drehzahl in [1/min]

$$F_{kr} = \left(\frac{d_2}{L_{kr}} \right)^2 \cdot 10^8$$

| | |
|-----------|---|
| n_{zul} | Maximal zulässige Spindeldrehzahl [1/min] |
| n_{kr} | Theoretische kritische Spindeldrehzahl [1/min], die zu Resonanzschwingungen führt |
| f_{kr} | Korrekturfaktor, der die Art der Spindellagerung berücksichtigt |
| d_2 | Kerndurchmesser der Spindel [mm] |
| L_{kr} | ungestützte Spindellänge [mm] |

Achtung!

Die Betriebsdrehzahl darf höchstens 80 % der maximalen Drehzahl betragen!

Maximal zulässige Drehzahl in [1/min]

$$f_{kr} = F_{kr} \cdot f_k \cdot 0,8$$

Antriebs- dimensionierung

Erforderliche Antriebsdrehmomente

Erforderliches Antriebsdrehmoment eines Spindelhubgetriebes

Das erforderliche Antriebsdrehmoment eines Spindelhubgetriebes ergibt sich aus der Axiallast auf die Hubspindel, der Übersetzung und dem Wirkungsgrad. Zu beachten ist, dass das Losbrechmoment erheblich höher sein kann als das im kontinuierlichen Betrieb erforderliche Drehmoment. Dies gilt insbesondere für Spindelhubgetriebe mit niedrigem Wirkungsgrad nach längerem Stillstand. Bei großen Spindelsteigungen und sehr kurzen Anlaufzeiten ist eventuell das Beschleunigungsmoment zu überprüfen.

$$M_T = \frac{F_{\text{eff}}}{2 \cdot \pi \cdot \eta} \cdot \frac{p}{i} + M_0$$

Hinweis:

Das erforderliche Antriebsmoment stellt kein Kriterium zur Auswahl des Motors dar. Der Anwender muß hier entscheiden, welche Leistung er für erforderlich hält!

M_T ist das erforderliche Antriebsmoment des Spindelhubgetriebes an der Schneckenwelle [Nm].

F_{eff} ist die tatsächlich wirkende Axialkraft auf die Hubspindel [kN].
 η ist der Wirkungsgrad des Spindelhubgetriebes in Dezimalschreibweise, z. B. 0,32 anstelle von 32 %. η ist ein aus Messungen ermittelter Durchschnittswert.

$\frac{p}{i}$ ist die Übersetzung des Spindelhubgetriebes in mm Hub pro Umdrehung der Schneckenwelle.

M_0 ist das Leerlaufmoment des Spindelhubgetriebes [Nm]. M_0 wurde durch Messungen nach kurzer Einlaufzeit mit Fließfettschmierung bei Raumtemperatur ermittelt. Es handelt sich hierbei um einen Mittelwert, der je nach Einlaufzustand, Schmiermittel und Temperatur mehr oder weniger großen Schwankungen unterworfen ist.

Erforderliches Antriebsdrehmoment einer Spindelhubanlage

Das erforderliche Antriebsdrehmoment einer Spindelhubanlage ergibt sich aus den Antriebsdrehmomenten der einzelnen Spindelhubgetriebe unter Berücksichtigung der statischen und dynamischen Reibungsverluste in den Übertragungselementen (Kupplungen, Verbindungswellen, Stehlager, Winkelgetriebe, etc.). Hierbei ist es nützlich, den Kraftfluss anhand einer Skizze zu veranschaulichen.

$$M_{\text{Antriebsmotor}} = M_{T \text{ SHG1}} \cdot \frac{1}{\eta_{V1}} + M_{T \text{ SHG2}} + M_{T \text{ SHG3}} \cdot \frac{1}{\eta_{V2}} \cdot \frac{1}{\eta_K}$$

$M_{T \text{ SHG1}}$ ist das erforderliche Antriebsdrehmoment des Spindelhubgetriebes SHG 1. Zu beachten ist, dass das Anlaufdrehmoment (Losbrechmoment und eventuell Beschleunigungsmoment) erheblich höher sein kann als das für den kontinuierlichen Betrieb erforderliche Antriebsdrehmoment. Dies gilt insbesondere für Spindelhubgetriebe mit niedrigem Wirkungsgrad nach längerem Stillstand.

η_{V1} (V1) beinhaltet die statischen und dynamischen Reibungsverluste in den Stehlagern und Kupplungen.

η_{V2} ist der Wirkungsgrad der Verbindungswelle V2.

η_V = 0,75...0,95 je nach Länge der Welle und Anzahl der Stehlager.

η_K ist der Wirkungsgrad des Kegelradgetriebes (nur bei Kraftfluss über die Verzahnung, hier also zwischen Verbindungswelle V2 und Antriebsmotor).

$\eta_K = 0,90$

Maximale Antriebsleistung in kW:

| | M 0 | M 1 | M 2 | M 3 | M 4 | M 5 | J 1 | J 2 | J 3 | J 4 | J 5 |
|-------------------|------|------|------|------|---------|-----|-----|-----|------|------|-----|
| Übers. H (Trapez) | 0,18 | 0,3 | 0,55 | 1,18 | 2,3 | 4,7 | 6,5 | 8,4 | 10,9 | 14,7 | 19 |
| Übers. L (Trapez) | 0,12 | 0,19 | 0,35 | 0,75 | 1,4 | 3 | 4,2 | 5,4 | 7,3 | 9,3 | 12 |
| Kugelgewinde | 0,18 | 0,3 | 0,56 | 0,95 | 1,7/3,2 | 5,9 | – | – | 13,9 | – | – |

Diese Werte stellen kein Auswahlkriterium für den Antriebsmotor dar, dieser ist vielmehr entsprechend Drehmoment, Drehzahl und Betriebsbedingungen auszuwählen.

Antriebs- dimensionierung

Erforderliche Antriebsdrehmomente

Maximales Antriebsdrehmoment

Sollte das Spindelhubgetriebe durch Anlaufen der Spindel gegen ein Hindernis blockieren, können von der Verzahnung noch die folgenden maximalen Drehmomente M_T an der Antriebswelle aufgenommen werden. Bei hintereinander geschalteten Spindelhubgetrieben kann das dem Antrieb nächstliegende Spindelhubgetriebe dieses Moment auf seiner Antriebswelle übertragen.

| Baugröße | M_{Tmax} [Nm] |
|----------|-----------------|
| M 0 | 1,5 |
| M 1 | 3,4 |
| M 2 | 7,1 |
| M 3 | 18 |
| M 4 | 38 |
| M 5 | 93 |
| J 1 | 148 |
| J 2 | 178 |
| J 3 | 240 |
| J 4 | 340 |
| J 5 | 570 |

Beschleunigungswerte

Drehstromasynchronmotor 4-polig:

- ca. 0,5 m/s² (bei Direkteinschaltung)

Servomotor:

- max. 5 m/s² (begrenzt durch max. Antriebsdrehmoment)

Bei Einsatz von Hubgetrieben in Verbindung mit Servomotoren ist folgendes zu beachten:

- Im Vergleich zu Linearachsen werden größere Massen bewegt.
- Es werden überwiegend konstante Geschwindigkeiten mit unterschiedlichen Drehzahlen gefahren.
- Der Einsatzzweck liegt oft im Bereich Justieren/Positionieren von Vorrichtungen.
- Es werden Positionen mit rel. geringen Einschaltzeiten angefahren und deshalb werden hohe Beschleunigungswerte eher selten benötigt.
- Hohe Beschleunigungswerte wirken sich aufgrund niedriger Hubgeschwindigkeiten nur unwesentlich auf die Gesamthubzeit aus.

Kräfte und Momente auf die Antriebswelle

Werden Spindelhubgetriebe nicht querkräftfrei über eine Kupplung auf der Motorwelle angetrieben, sondern mittels Kette oder Riemen, so ist darauf zu achten, dass die Radialkraft auf die Antriebswelle nicht die Grenzwerte (siehe Tabelle unten) überschreitet.

Im ungünstigsten Fall hebt die Schneckenwelle infolge Durchbiegung unter der Radialkraft F_R vom Schneckenrad ab. Diese Anordnung ist zu vermeiden, da sich hier der Eingriff zwischen Schnecke und Schneckenrad verschlechtert und damit der Verschleiß zunimmt.

| Baugröße | F_{Rmax} [kN] |
|----------|-----------------|
| M 0 | 0,07 |
| M 1 | 0,1 |
| M 2 | 0,2 |
| M 3 | 0,3 |
| M 4 | 0,5 |
| M 5 | 0,8 |
| J 1 | 0,8 |
| J 2 | 1,3 |
| J 3 | 1,3 |
| J 4 | 2,1 |
| J 5 | 3,1 |

Auswahl des Antriebsmotors

Die Kenntnis des erforderlichen Antriebsdrehmomentes und der Antriebsdrehzahl ermöglichen die Auswahl eines geeigneten Antriebsmotors. Es ist grundsätzlich zu überprüfen, ob keines der verwendeten Spindelhubgetriebe bzw. Übertragungsglieder vom Antriebsmotor überlastet werden kann. Diese Gefahr besteht insbesondere bei Anlagen mit mehreren Spindelhubgetrieben im Falle ungleichmäßiger Belastung. In der Regel muss die Anlage durch Endschalter bzw. drehmomentbegrenzende Kupplungen gegen Anfahren auf die Endposition oder auf Hindernisse geschützt werden.

Kräfte und Momente an der Motorwelle

Zahnriemen- oder Kettenantriebe können bei sehr kleinem Ritzel erhebliche Radialkräfte auf die Motorwelle ausüben. Im Zweifelsfall wird empfohlen, mit dem Motorenhersteller Rücksprache zu halten.

Auswahl eines Kegelaradgetriebes

Die Auswahl eines Kegelaradgetriebes wird von folgenden Größen bestimmt:

- Antriebsmoment
- Antriebsdrehzahl (siehe Maßtabellen)
- Einschaltzeit und Antriebsleistung
- Kräfte und Momente auf die Wellenenden (im Zweifelsfall bitte Rücksprache nehmen).

Erforderliche Antriebsdrehzahl

Die erforderliche Antriebsdrehzahl ergibt sich aus der gewünschten Hubgeschwindigkeit, der Übersetzung des Spindelhubgetriebes und der Übersetzung der Übertragungselemente. Im Allgemeinen ergeben sich hierbei mehrere Möglichkeiten, um eine bestimmte Hubgeschwindigkeit zu erlangen. Kriterien für eine geeignete Auswahl sind:

- günstiger Wirkungsgrad
- geringstmögliche Belastung der Übertragungselemente für raum- und kostensparende Bauweise
- Vermeidung kritischer Drehzahlen von Hubspindeln und Verbindungswellen.

Mutterndrehmoment der Hubspindel

Das Mutterndrehmoment M der Hubspindel ist das Drehmoment, das die Hubspindel auf die Befestigungsplatte ausübt (alle Ausführungen N außer V), bzw. das Drehmoment, das die Laufmutter von der Spindel erfährt (Ausführung R). Es ist nicht zu verwechseln mit dem Antriebsmoment M_T des Spindelhubgetriebes an der Schneckenwelle.

M [Nm] = F_{eff} [kN] · f_M (gültig für den mittleren und oberen Lastbereich)
 M ist das Mutterndrehmoment der Hubspindel [Nm] für den Bewegungsvorgang „Heben unter Last“.

F_{eff} ist die tatsächlich aufliegende Axialkraft [kN].

f_M ist ein Umrechnungsfaktor, der die Spindelgeometrie und die Reibung beinhaltet. Der Wert gilt für normale Schmierverhältnisse. Der größere Wert ist bei Trocken- und Haftreibung anzusetzen. Bei der Ausführung Kugelgewindetrieb ist f_M praktisch konstant.

| Baugröße | f_M (Trapezgewinde) | f_M (Kugelgewinde) |
|----------|-----------------------|----------------------|
| M 0 | 1,4 | 1,2 |
| M 1 | 1,6 | 1,6 |
| M 2 | 1,8 | 1,6 |
| M 3 | 2,7 | 1,6 |
| M 4 | 3,4 | 1,6/3,2 |
| M 5 | 4,6 | 3,2 |
| J 1 | 5,5 | – |
| J 2 | 6,4 | – |
| J 3 | 7,2 | 3,2 |
| J 4 | 8,0 | – |
| J 5 | 10,6 | – |