

## Modul TA.PR+SY

# Lagerungen und Führungen

## Linearführungen und Gewindetriebe



Bild: Bosch Rexroth AG

FH Zentralschweiz

Hochschule Luzern  
Technik & Architektur

## Inhalt

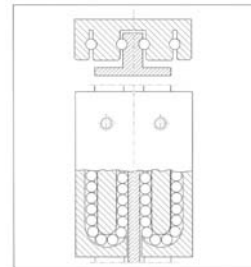
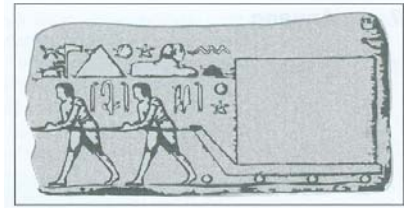
- Geschichte
- Grundlagen der Lineartechnik
- Auslegung von Linearführungen
- Grundlagen Kugelgewindetriebe
- Auslegung von Kugelgewindetrieben

Weiterführende Literatur:

- [1] *Roloff / Matek*; Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung; 22. Auflage, Verlag Vieweg, Wiesbaden 2015
- [2] *Schlecht, B.*; Maschinenelemente 2: Getriebe – Verzahnungen – Lagerungen; Pearson, München 2010
- [3] *Bosch Rexroth AG*; Handbuch Lineartechnik; R310DE 2017 (2006.07)

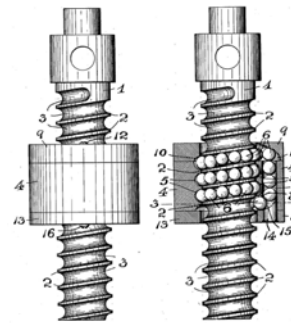
## Geschichte

- Schon die Ägypter haben beim Bau der Pyramiden Wälzführungen angewendet. Die schweren Steinquader wurden mit Baumstämmen unterlegt und Wasser reduzierte zusätzlich die Reibung.
- Dieses Grundprinzip wird heute noch bei modernen **Linearführungen** angewendet.
- Der **Kugelgewindetrieb** wurde erstmals im 19. Jahrhundert in der Literatur erwähnt.

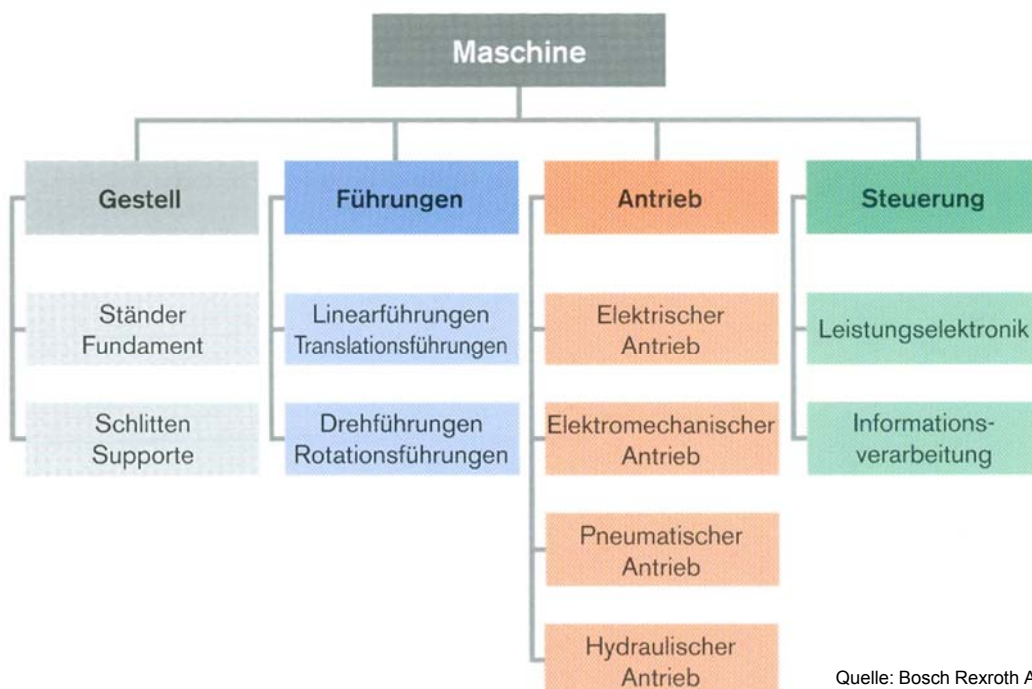


Bilder: Bosch Rexroth AG

US Patent 992897; 23.5.1911

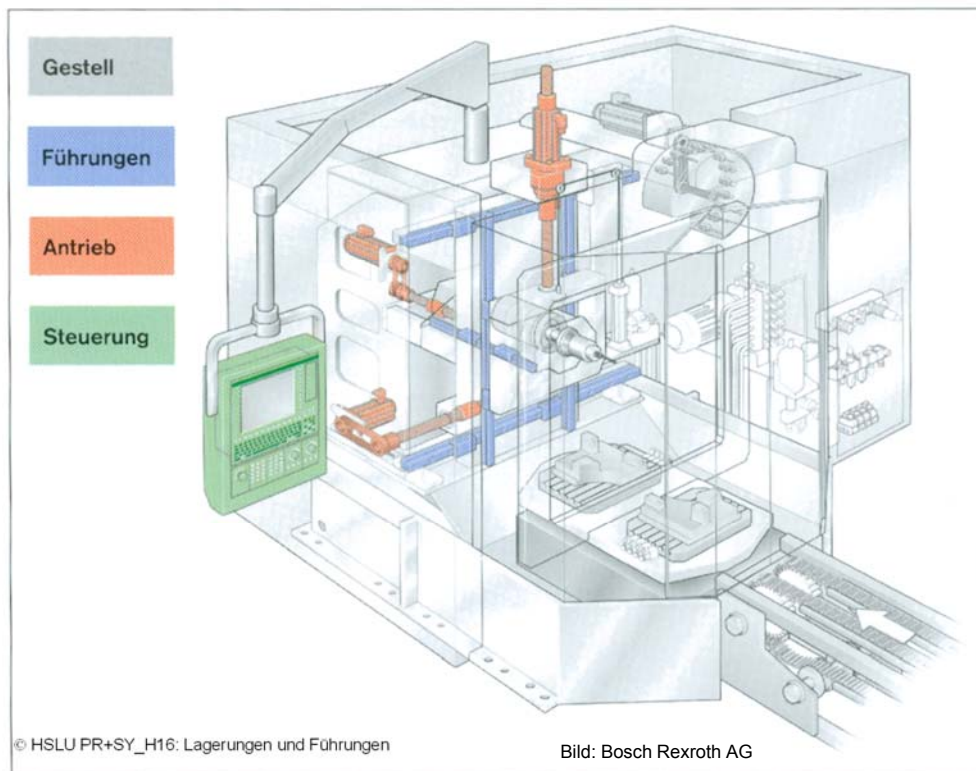


## Technische Grundlagen der Lineartechnik



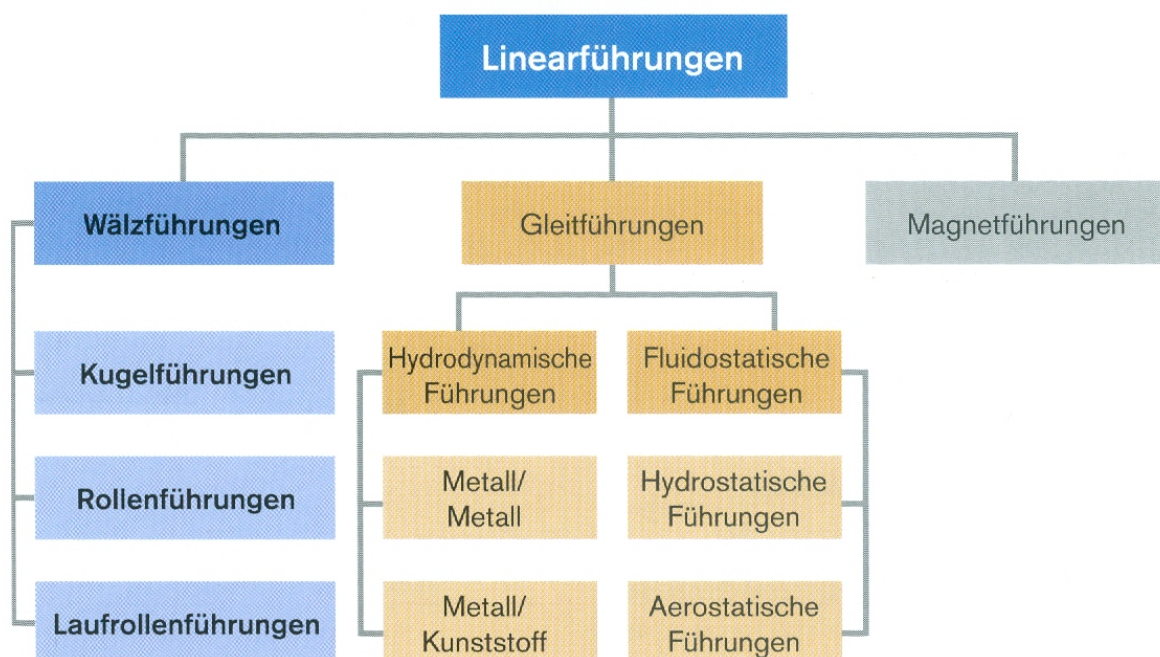
Quelle: Bosch Rexroth AG

## Elemente einer Maschine (Beispiel)



5

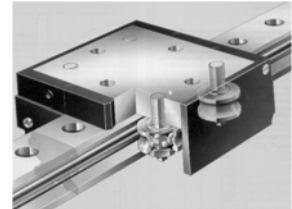
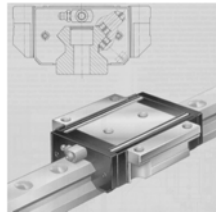
## Einteilung der Linearführungen



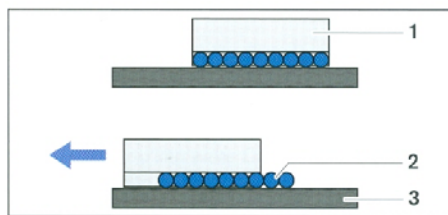
6

## Einteilung von Wälzführungen

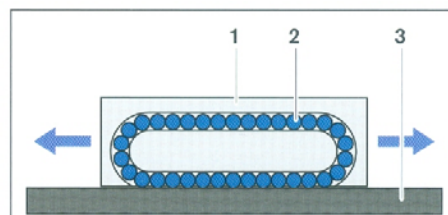
- Profilschienenführung
- Kugelbüchsenführung
- Laufrollenführung
- Prinzip des Wälzkörperumlaufs



Bilder: ina



Wälzführung ohne Wälzkörperumlauf



Wälzführung mit Wälzkörperumlauf

© HSLU PR+SY\_H16: Lagerungen und Führungen

Bilder: Bosch Rexroth AG

7

## Auswahl von Linearführungen

- Führungen werden in einer Vielzahl von Bauformen und Typen angeboten. Um die richtige Führung zu wählen muss man sich über die verschiedenen, die Konstruktion beeinflussenden Größen klar werden.
  - Belastungsart
  - Belastungswerte
  - Verfahrgeschwindigkeiten
  - Bauraum
  - Einbauverhältnisse
  - Montage
  - Genauigkeiten
  - Verschmutzung
  - Kosten



## Tragfähigkeit und nominelle Lebensdauer

- Die nominelle Lebensdauer eines Linearlagers mit Kugel- und Rollenführung berechnet sich analog zu Wälzlagern.

$$L_{10} = \left( \frac{C}{P} \right)^p \cdot 10^5$$

$$L_{10h} = \frac{L_{10}}{2 \cdot s_{Hub} \cdot n_{Hub} \cdot 60}$$

bzw.

$$L_{10h} = \frac{L_{10}}{60 \cdot v_m}$$

$L_{10}$  Nominelle Lebensdauer in m  
 $C$  dynamische Tragzahl  
 $P$  kombinierte äquivalente Lagerbelastung  
 $p$  Lebensdauerexponent  
 $s_{Hub}$  Hublänge  
 $n_{Hub}$  Hubfrequenz; Doppelhübe pro min  
 $v_m$  mittlere Verfahrgeschwindigkeit

- Die kombinierte äquivalente Lagerbelastung wird durch arithmetische Addition der Kraftbeträge ermittelt.

$$P = |F_y| + |F_z|$$

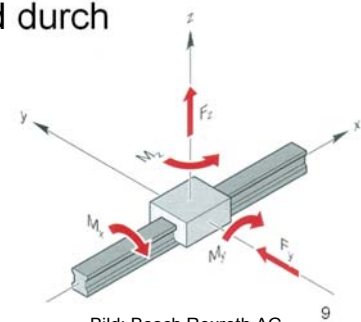
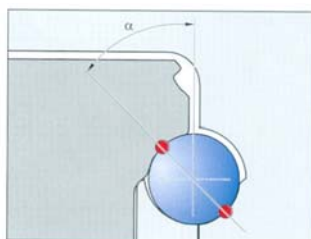


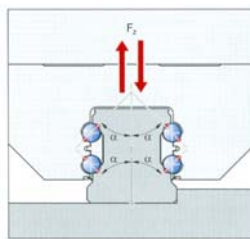
Bild: Bosch Rexroth AG

© HSLU PR+SY\_H16: Lagerungen und Führungen

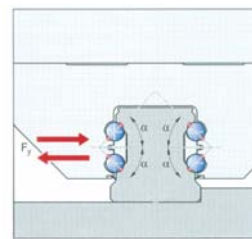
## Einfluss der Belastungsrichtung bei Profilschienenführungen



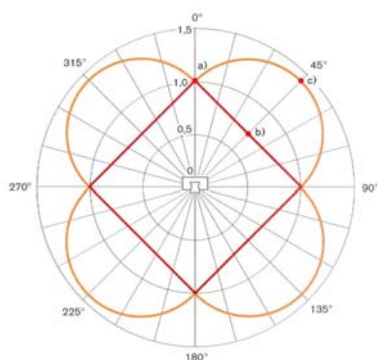
Nennberührungswinkel  $\alpha$



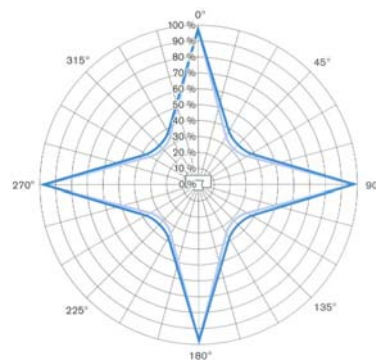
Zug- oder Druckbelastung



Seitenbelastung



— Zulässige Last für die volle Lebensdauer  
 — Erforderliche Tragzahl für die volle Lebensdauer



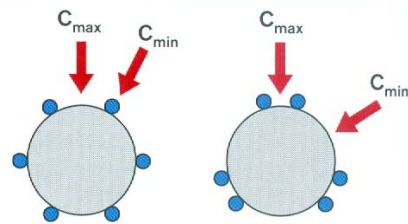
Einfluss der Lastrichtung auf die Lebensdauer

— Kugelschienenführung  
 — Rollschienenführung

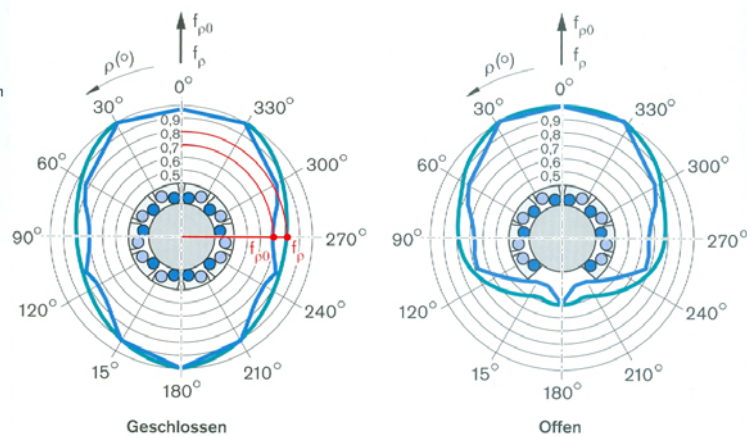
Bilder: Bosch Rexroth AG

© HSLU PR+SY\_H16: Lagerungen und Führungen

## Einfluss der Belastungsrichtung bei Kugelbüchsen



Maxima und Minima der Tragzahlen in Abhängigkeit der Anordnung der Kugelreihen.



Einfluss der Lastrichtung bei geschlossenen und offenen Kugelbüchsen auf die Tragzahlen.

- Die Tragzahl  $C$  ist mit dem Lastrichtungsfaktor zu korrigieren.

$$C_{\text{korr}} = C * f_{\rho 0}$$

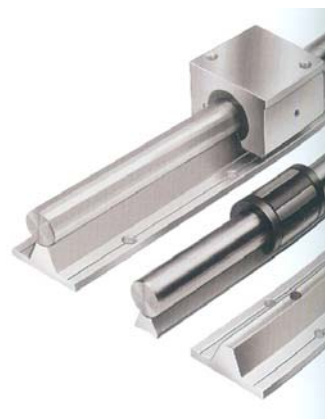
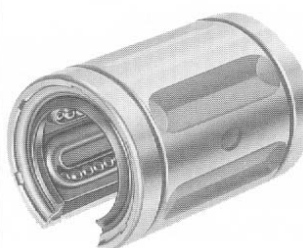
Bilder: Bosch Rexroth AG

## Verschiedene Bauformen von Kugelbüchsen

- Geschlossene Kugelbühse



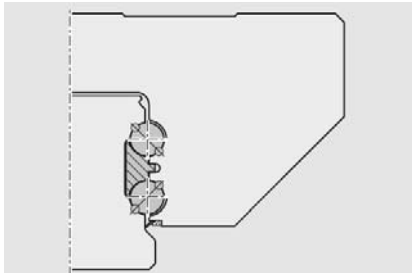
- Offene Kugelbühse



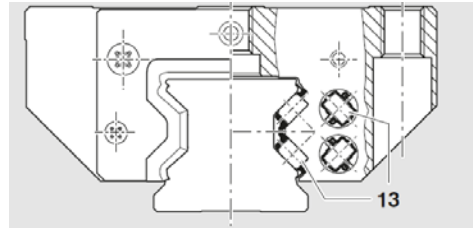
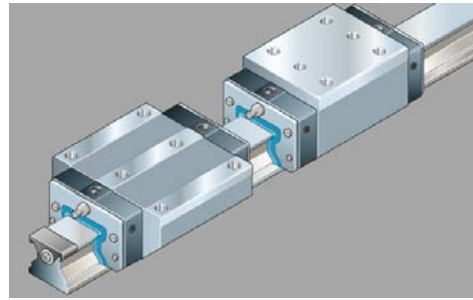
- Wellenunterstützung

Bilder: Bosch Rexroth AG

## Verschiedene Bauformen von Schienenführungen



Kugelschienenführungen



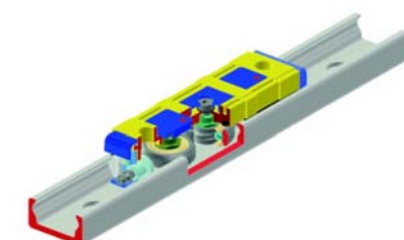
Rollenschienenführung

Bilder: Bosch Rexroth AG

## Verschiedene Bauformen von Laufrollenführungen



Laufrollenführung Standard



Laufrollenführung U-Form



Laufrollenführung für Kurven

Bilder: INA, Rollon

## Kugelgewindetriebe

- **Kugelgewindetriebe** sind Bewegungsschrauben und dienen zur Umsetzung einer Drehbewegung in eine Längsbewegung oder umgekehrt.
- Aufbau:  
Spindel mit gerollter oder geschliffener Spindellaufbahn. Mutter mit Kugellaufbahnen

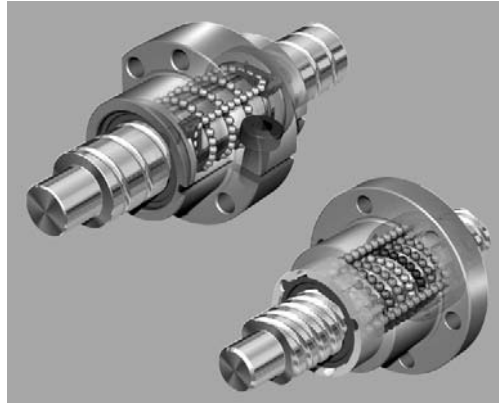
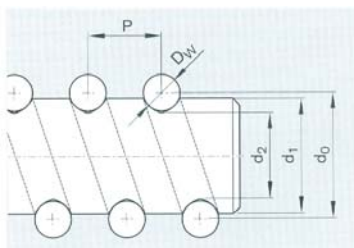
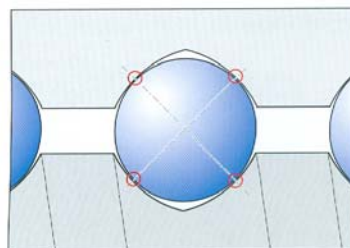


Bild: Bosch Rexroth AG

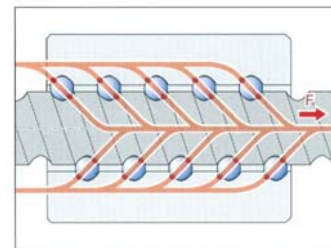
## Aufbau von Kugelgewindetrieben



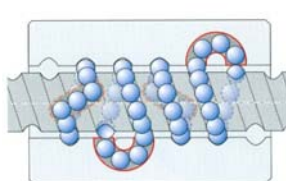
Geometrie der Spindel



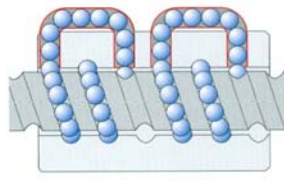
Kontaktpunkte am Wälzkörper



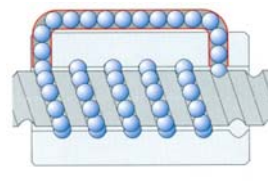
Kraftfluss im Gewindetrieb



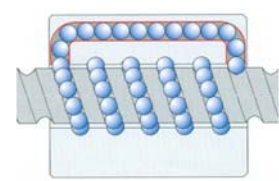
Einzelumlenkung



Rohrumlenkung  
mehrfach



Rohrumlenkung  
gesamt



Gesamtumlenkung  
integriert

Bilder: Bosch Rexroth AG



## Vergleich Kugelgewindetrieb mit Trapezspindel

### Auswahlkriterien für Kugelgewindetriebe:

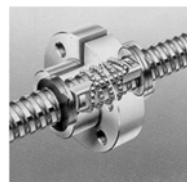
- Genauigkeitsanforderungen
- Spielfreiheit
- Belastung
- Lebensdauer
- kritische Drehzahl
- Knickung
- Steifigkeit

### Vorteile von Kugelgewindetrieben:

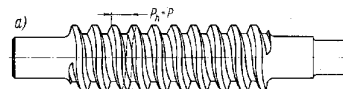
- höherer mechanischer Wirkungsgrad
- höhere Lebensdauer
- kein „stick-slip“-Effekt
- grössere Verfahrgeschwindigkeiten
- geringere Erwärmung
- hohe Positionier- und Wiederholgenauigkeit

### Vorteile von Trapezspindeln:

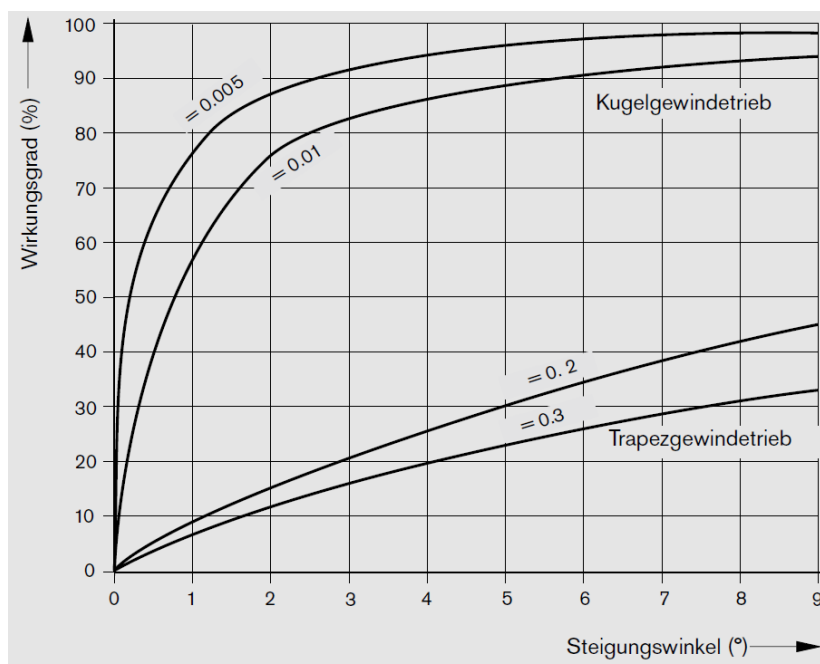
- tiefere Kosten
- Selbsthemmung



versus



## Wirkungsgradvergleich



$$\eta = \frac{\tan \varphi}{\tan(\varphi + \rho')}$$

$$\rho' = \arctan(\mu)$$

Beispiel:

Kugelgewindespindel  
25 x 5,  $\mu = 0.01$

Trapezspindel

TR 24 x 5,  $\mu = 0.2$

## Vorspannung und Steifigkeit

- Spielfreiheit und Vorspannung kann durch folgende Möglichkeiten erreicht werden:



Vorgespannte Einzelmutter



Spielfrei einstellbare Einzelmutter



Doppelmutter

## Berechnung der Lebensdauer

- Nominelle Lebensdauer analog Wälzlagerberechnung:

$$L = \left( \frac{C}{F_m} \right)^3 \cdot 10^6$$

$$L_h = \frac{L}{n_m \cdot 60}$$

$C$  dynamische Tragzahl  
 $F_m$  dynamisch äquivalente Axialbelastung  
 $L$  Nominelle Lebensdauer in Umdrehungen  
 $L_h$  Lebensdauer in  $h$   
 $n_m$  Drehzahl in  $\text{min}^{-1}$

- Antriebsmoment und Wirkungsgrad:

$$M_{An} = \frac{F \cdot P_h}{2 \cdot \pi \cdot \eta}$$

$$n_{Sp} = \frac{v}{P_h}$$

$M_{An}$  Antriebsmoment  
 $F$  Axialbelastung  
 $P_h$  Steigung  
 $d_o$  Nenndurchmesser  
 $n_{Sp}$  Spindeldrehzahl  
 $v$  Verfahrgeschwindigkeit

## Steifigkeit von Linearsystemen

- Zweiachsen Lineartisch

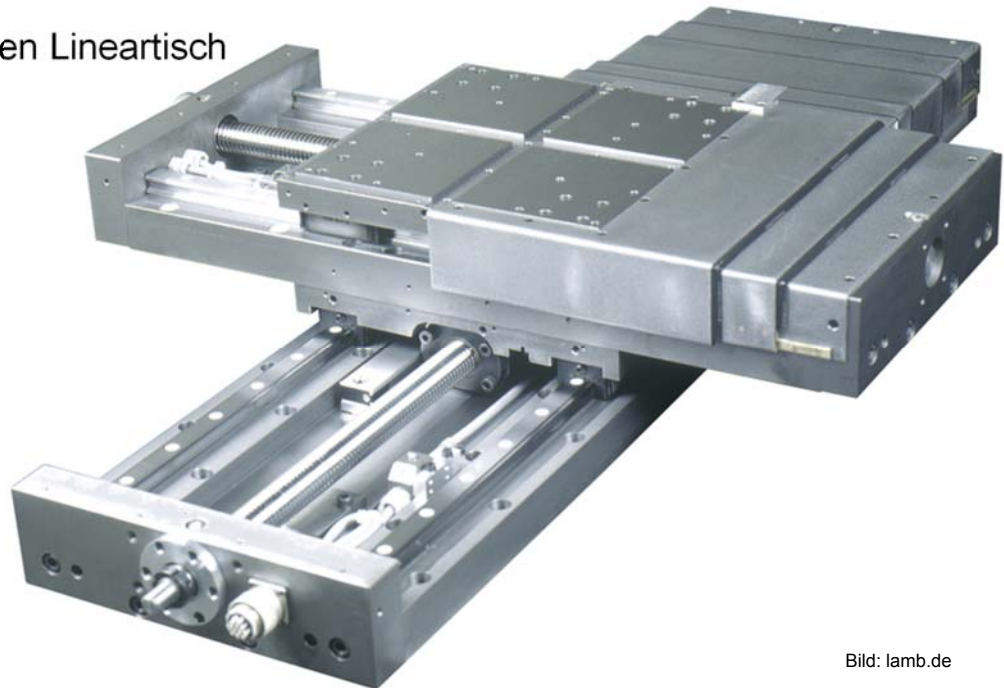
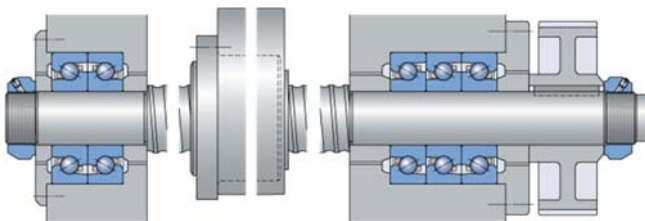


Bild: lamb.de

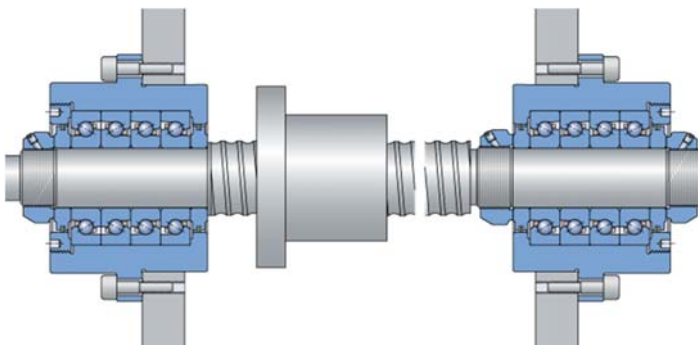
© HSLU PR+SY\_H16: Lagerungen und Führungen

21

## Spindellagerungen



Gewindetrieb, an beiden Enden von einseitig wirkenden Lagern unterstützt



Verlängerter Gewindetrieb mit Kartuschen für besonders hohe Steifigkeit

© HSLU PR+SY\_H16: Lagerungen und Führungen

Bilder: SKF

22

## Steifigkeit von Kugelgewindetrieben

- Unter Steifigkeit versteht man den Widerstand gegen elastische Vorformung.

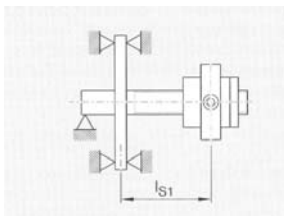
$$R = \frac{\Delta F}{\Delta l} \quad R \text{ [N/}\mu\text{m]}$$

- Die Steifigkeit eines Kugelgewindetriebes wird neben der Muttersteifigkeit auch durch sämtliche Anschlussteile, Lagerungen und der Spindel beeinflusst.

$$\frac{1}{R_{Tot}} = \frac{1}{R_{Gehäuse}} + \frac{1}{R_{Lagerung}} + \frac{1}{R_{Spindel}} + \frac{1}{R_{Mutter}}$$

## Steifigkeit der Spindel

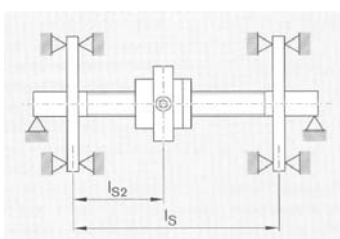
- Einseitige Festlagerung der Spindel



$$R_{Spindel} = \frac{\pi \cdot (d_0 - D_W \cdot \cos \alpha)^2 \cdot E}{4 \cdot l_{s1} \cdot 10^3}$$

$\alpha = 45^\circ$   
Kontaktwinkel zwischen Kugel  
und Laufbahn  
 $d_0$  = Nenndurchmesser  
 $D_W$  = Kugeldurchmesser

- Beidseitige Festlagerung der Spindel

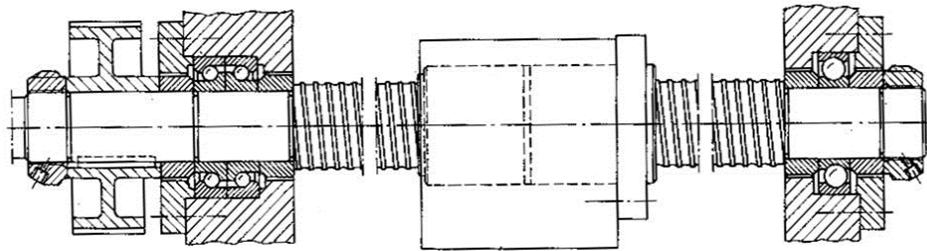


$$R_{Spindel} = \frac{\pi \cdot (d_0 - D_W \cdot \cos \alpha)^2 \cdot E}{4 \cdot l_{s2} \cdot 10^3} \cdot \frac{l_s}{l_s - l_{s2}}$$

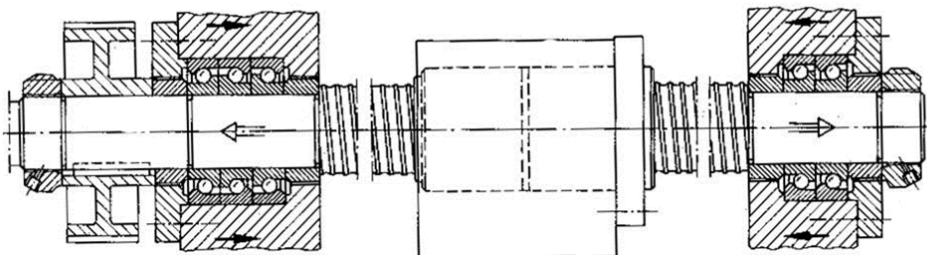
$$l_{s2} = 0 \text{ bis } 0.5 \cdot l_s$$

## Beispiel Kugelgewindespindel

nicht vorgespannt



vorgespannt



## Biegekritische Drehzahl

- Die Biegekritische Drehzahl ist abhängig von:
  - Einbauart der Endenlagerung
  - Kerndurchmesser der Spindel
  - Kritische Spindellänge, d.h. maximal ungestützte Spindellänge



$$n_k = f_{nk} \cdot \frac{d_2}{l_n^2} \cdot 10^7 \quad (\text{min}^{-1})$$

$$n_{kzul} = n_k \cdot 0.8$$

$n_k$  = Biegekritische Drehzahl [min<sup>-1</sup>]  
 $f_{nk}$  = Beiwert der von der Endenlagerung bestimmt wird  
 $d_2$  = Kerndurchmesser [mm]  
 $l_n$  = kritische Spindellänge [mm]  
 $l_1$  = Lagerabstand [mm]

Endenlagerkonfiguration	Beiwert $f_{nk}$
fest – fest 	27,4
fest – lose 	18,9
lose – lose 	12,1
fest – frei 	4,3

Bilder: Bosch Rexroth AG



## Zulässige axiale Belastung (Knicken)

- Die maximal zulässig axiale Belastung hängt ab von:
  - Endenlagerung
  - Kerndurchmesser der Spindel
  - Wirksame Knicklänge, d.h. die maximal ungestützte Spindellänge im Kraftfluss



$$F_k = f_{Fk} \cdot \frac{d_2^4}{l_k^2} \cdot 10^4 \quad (\text{N})$$

$$F_{kzul} = \frac{F_k}{2}$$

$F_{kzul}$  = zulässige Spindelbelastung [N]  
 $F_k$  = Theoretische Knickbelastung [N]  
 $f_{Fk}$  = Beiwert der von der Endenlagerung bestimmt wird  
 $d_2$  = Kerndurchmesser [mm]  
 $l_k$  = wirksame Knicklänge der Spindel [mm]

Endenlagerkonfiguration	Beiwert $f_{Fk}$
fest – fest	40,6
fest – lose	20,4
lose – lose	10,2
fest – frei	2,6

Bilder: Bosch Rexroth AG