

Industrieautomation

Dr. Ing. Detlef Hummes

detlef.hummes@thga.de

Wissenschaftsbereich III Elektro- und Informationstechnik
Technische Fachhochschule Georg Agricola

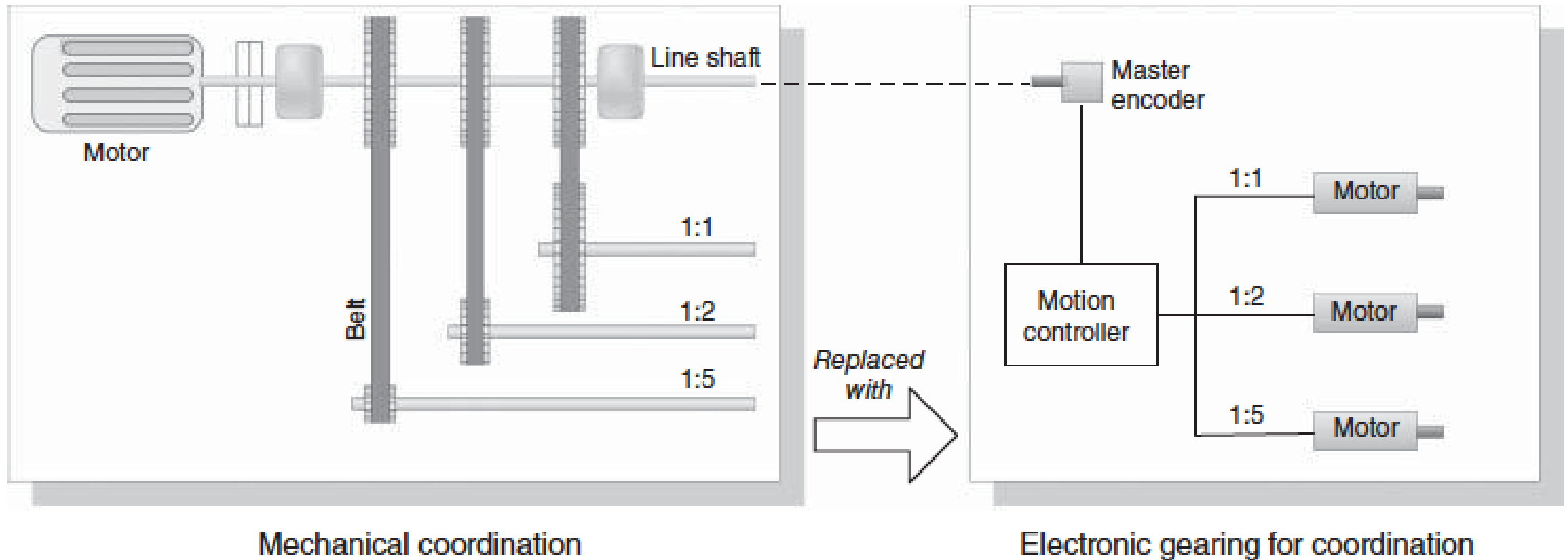


23. Dezember 2025

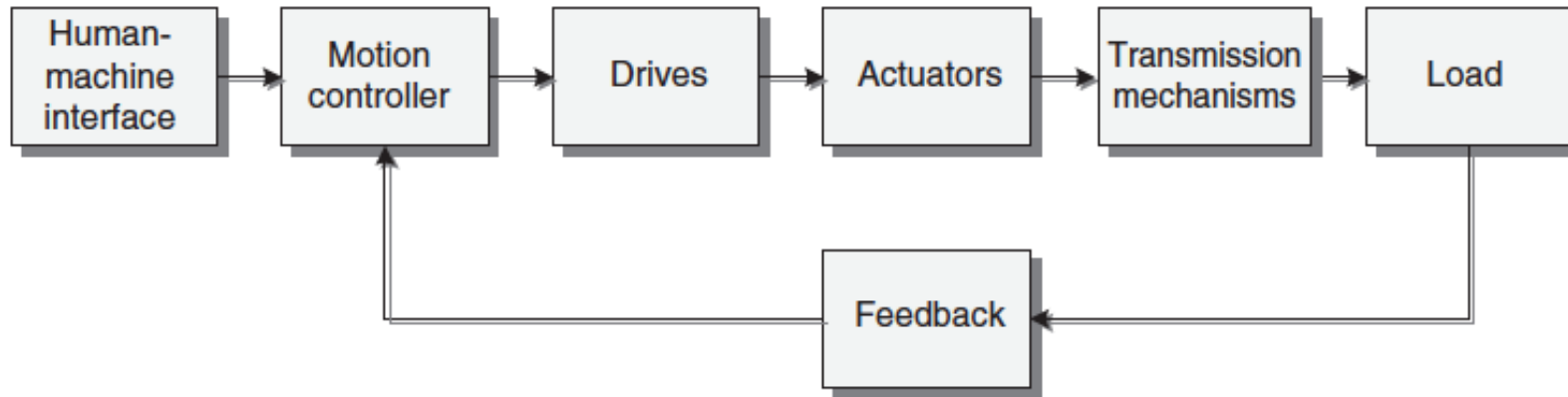
Bewegungssteuerungen

- Einsatz in der fertigungstechnischen Industrie
- Werkzeugmaschinen, Roboter und Transportsystemen
- Zielsetzung: Werkstück entlang einer vorgegebenen Bahn zu einer vorgegebenen Position fahren
- Spezielle Steuerung
CNC (Computerized Numerical Control)
RC (Robot Control)
- Zykluszeiten unter 1 ms
- Moderne Motion-Control-Systeme beinhalten Motion- und Logik-Funktionen

Bewegungssteuerungen



Bewegungssteuerungen



1. Maschine Mensch Interface (HMI)
2. Motion Controller
3. Antriebssystem
4. Mechanische Bewegungseinheit
5. Feedback

Bewegungssteuerungen

HMI (Human Machine Interface)

- Bedient die Maschine
- Programmiert den Motion-Controller



Bewegungssteuerungen

Motion Controller

- Das Gehirn des gesamten Systems
- Generiert das Bewegungsprofil basierend auf den Parametern des Bedieners
- Bekommt die Feedback Signale
- Generiert im Falle von Abweichungen Korrektursignale
- Generiert und manage komplexe Bewegungsabläufe
- Lineare Interpolation
- Master-Slave Koordination

Bewegungssteuerungen

Elemente eines Motion Controllers

Computer

- Interpretation des Anwenderprogramms
- Generierung des Bewegungsablaufs
- Regelung
- Generierung der Befehle für den Antrieb
- Überwachung der Endlagen und Sicherheits-Interlocks
- Handling von Interrupts und Fehlermeldungen

Bewegungssteuerungen

I/O für jede Achse

- Motor power Output
- Hilfs I/Os für Kommandos an den Verstärker
- Eingangskarten für die Feedback Signale und anderen externen Sensoren
- Endlagen für jede Achse

Maschinen I/O

- Digitale Eingänge für die Sensoren und Operatorbefehle
- Digitale Ausgänge für die Antriebe
- Analoge Eingänge
- Analoge Ausgänge

Bewegungssteuerungen

Kommunikation

- Netzwerkkommunikation mit anderen Einheiten
DeviceNet, Profibus, ControlNet, EtherNet/IP, EtherCAT
- USB oder serielle Kommunikation
- HMI Kommunikation

Antriebssysteme

- Die Signale des Motion Controllers sind meist sehr klein, so dass sie mittels eines Verstärkers auf größere Leistung mit höherer Spannung und Strom gebracht werden
- Motor

Als Antriebssystem kann auch ein pneumatischer, hydraulischer oder elektrohydraulischer Antrieb gewählt werden

Bewegungssteuerungen

Mechanik

Feedback

- Endschalter (I/O)
- Lineare Feedback transmitter
- Winkel Feedback transmitter
- 4 – 20 mA

Bewegungssteuerungen

Wiederholung der Grundlagen für lineare Bewegungen

Geschwindigkeit $v(t) = \frac{ds}{dt}$

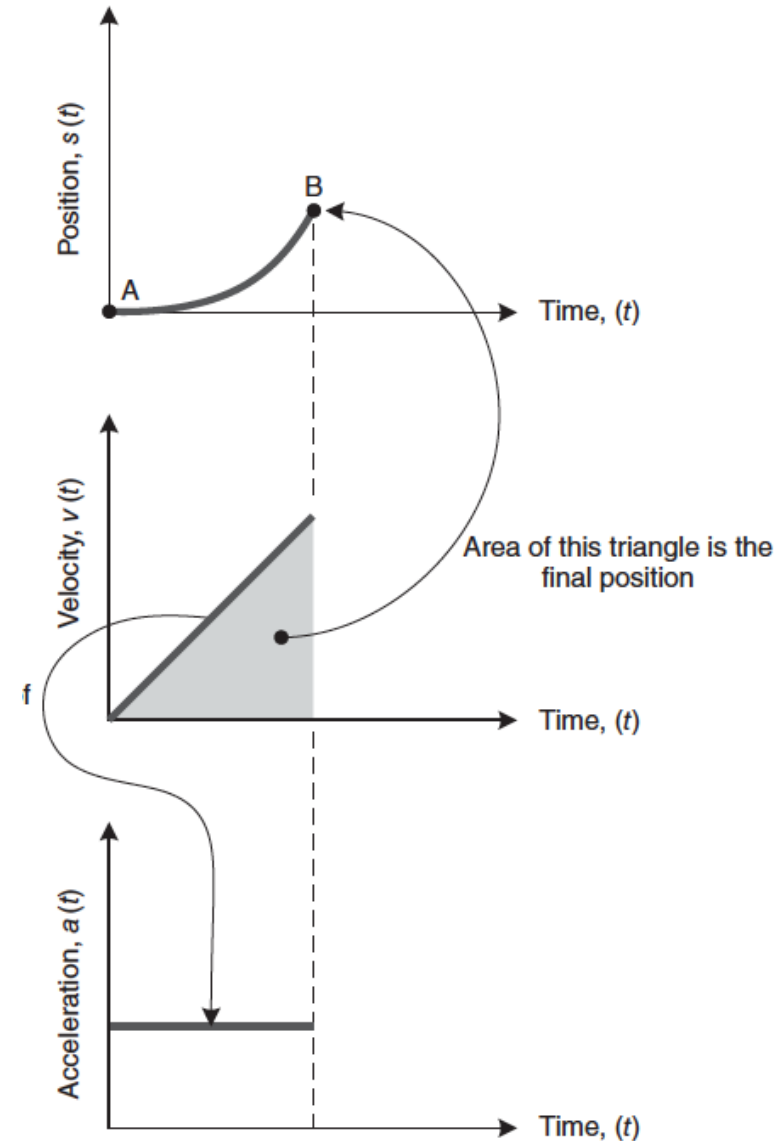
Beschleunigung $a(t) = \frac{dv}{dt}$

$$s = \int v(t) dt$$

$$v = \int a(t) dt$$

Bewegungssteuerungen

Bedenke:
Bei einer konstanten Beschleunigung
ist die zurück gelegte Strecke
eine quadratische Funktion der Zeit



Bewegungssteuerungen

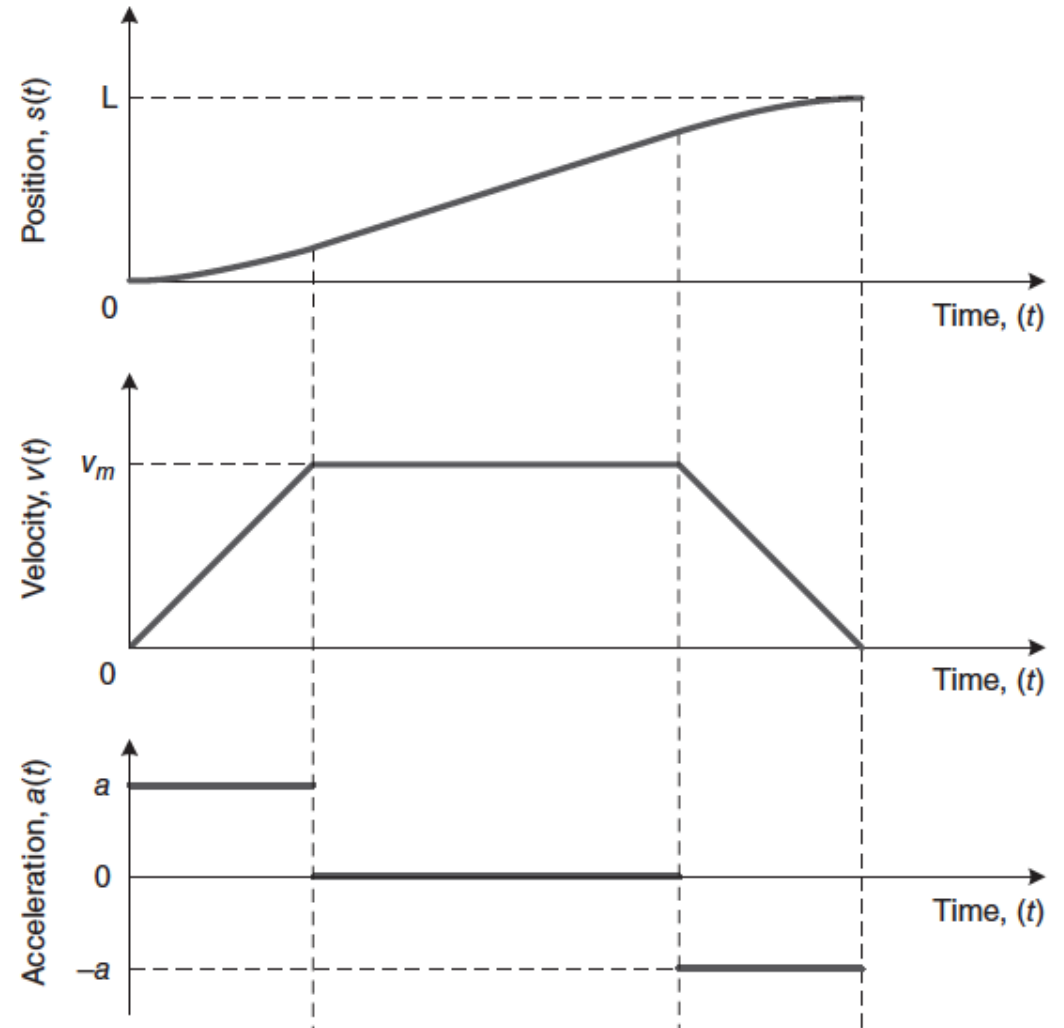
Gängige Bewegungsprofile

- Trapezförmiges Geschwindigkeitsprofil
- S-förmiges Geschwindigkeitsprofil

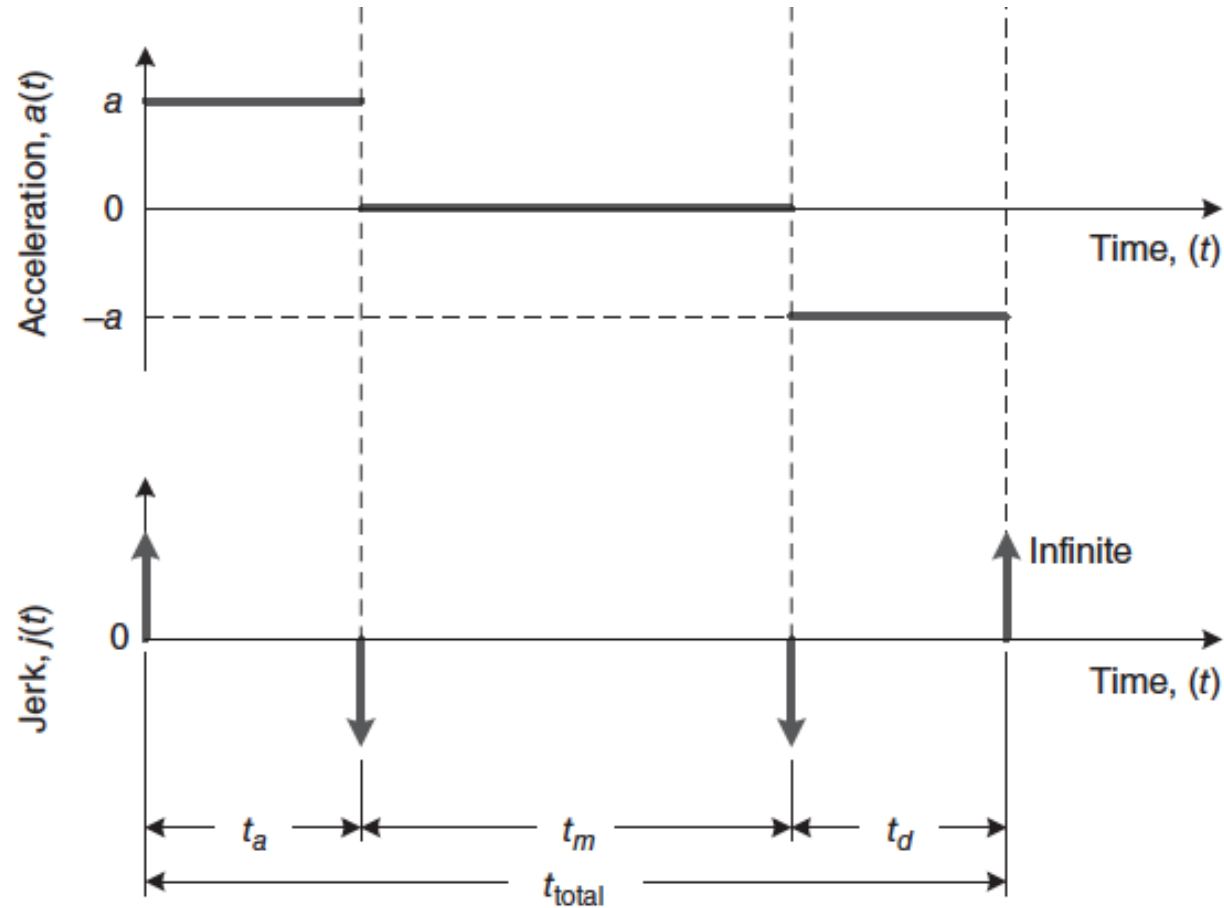
$$t_{\text{total}} = t_a + t_m + t_d$$

$$L = \frac{t_a v_m}{2} + t_m v_m + \frac{t_d v_m}{2}$$
$$= v_m(t_a + t_m)$$

$$t_m = \frac{L}{v_m} - t_a$$



Bewegungssteuerungen



Bewegungssteuerungen

Trapezförmiges Geschwindigkeitsprofil

For $0 \leq t \leq t_a$

$$t_0 = 0, v_0 = 0, s_0 = 0$$

$$s(t) = \frac{1}{2}at^2$$

For $(t_a + t_m) < t \leq t_{\text{total}}$

$$t_0 = (t_a + t_m), v_0 = v_m, s_0 = s(t_a + t_m)$$

For $t_a < t \leq (t_a + t_m)$

$$t_0 = t_a, v_0 = v_m, s_0 = s(t_a), a = 0$$

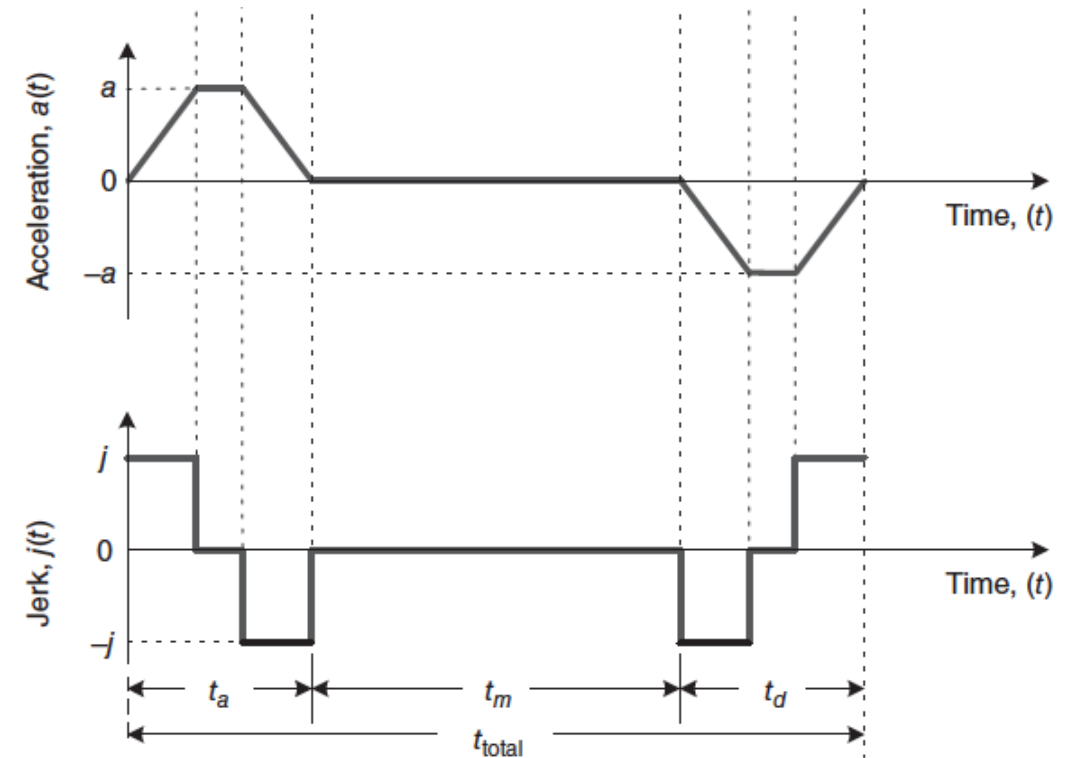
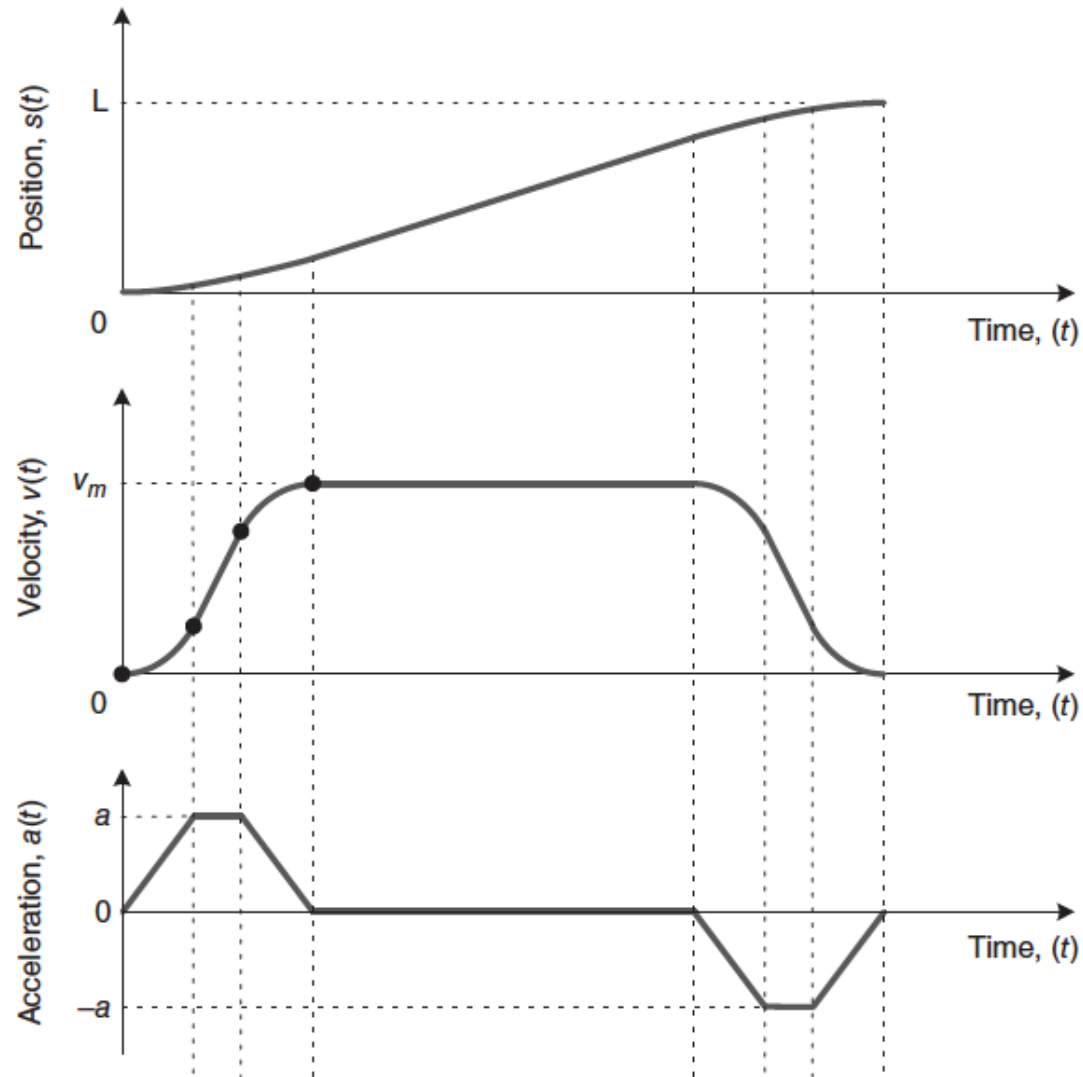
$$s(t) = s(t_a) + v_m(t - t_a)$$

$$s(t) = s(t_a + t_m) + v_m[t - (t_a + t_m)]$$

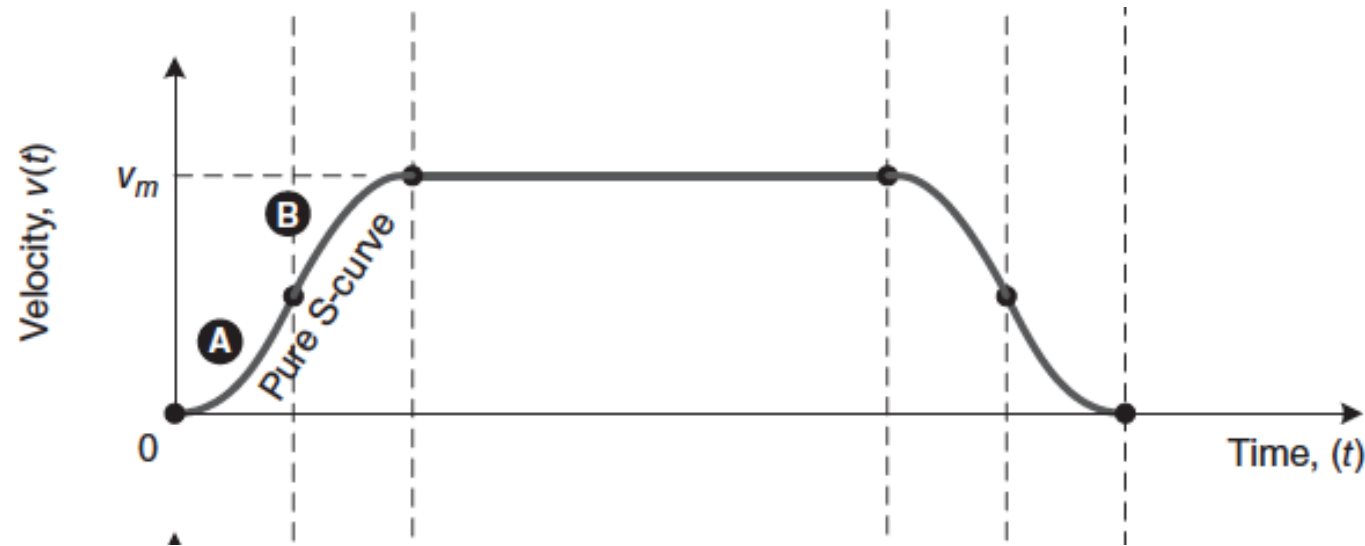
$$- \frac{1}{2}a[t - (t_a + t_m)]^2$$

Bewegungssteuerungen

S-förmiges Geschwindigkeitsprofil



Bewegungssteuerungen



$$v(t) = C_1 t^2 + C_2 t + C_3$$

Teil A:

$$v(0) = 0$$

$$a(0) = \frac{dv}{dt} = 0$$

Daraus folgt: $C_3 = 0$ und $C_2 = 0$

Bewegungssteuerungen

Kurve A

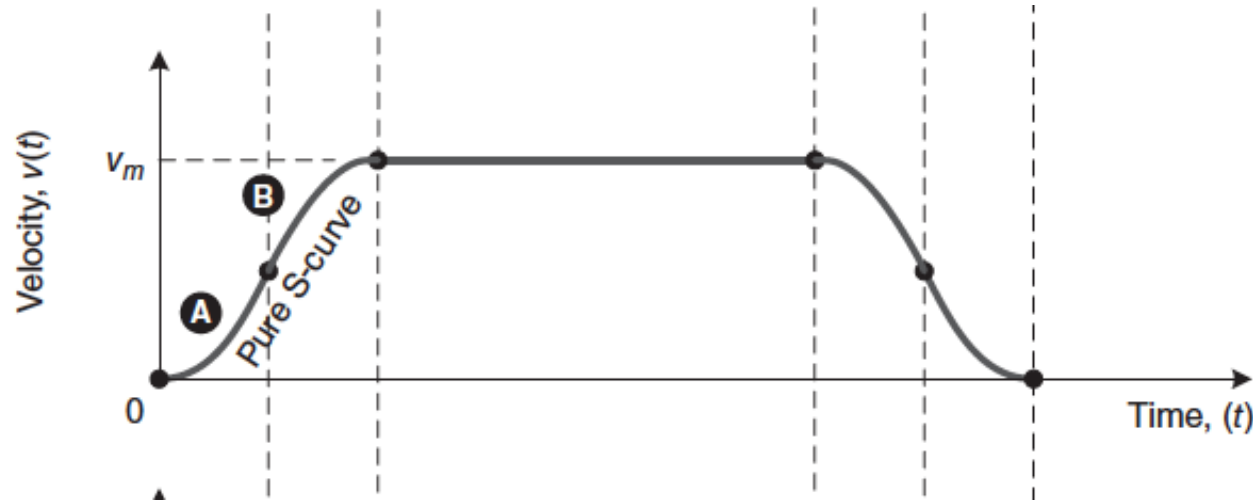
$$v\left(\frac{t_a}{2}\right) = \frac{v_m}{2}$$

$$a\left(\frac{t_a}{2}\right) = a$$

$$v(t) = C_1 t^2$$

$$v_m = \frac{1}{2} C_1 t_a^2$$

$$C_1 = \frac{2v_m}{t_a^2}$$



Max. Beschleunigung

$$a = C_1 t_a$$

$$\text{Fuer } 0 \leq t \leq \frac{t_a}{2}$$

$$C_1 = \frac{a^2}{2v_m}$$

$$v(t) = \frac{a^2}{2v_m} t^2$$

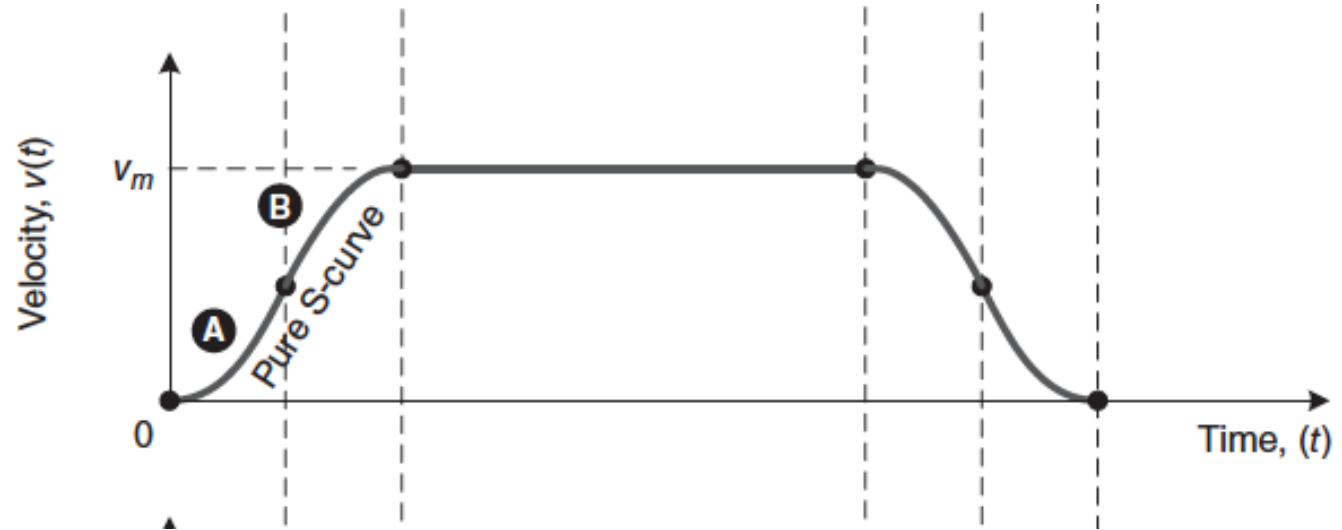
Bewegungssteuerungen

Zurück gelegte Strecke

$$s_A(t) = \frac{a^2 t^3}{6v_m}$$

Beschleunigungszeit

$$t_a = \frac{2v_m}{a}$$



Bewegungssteuerungen

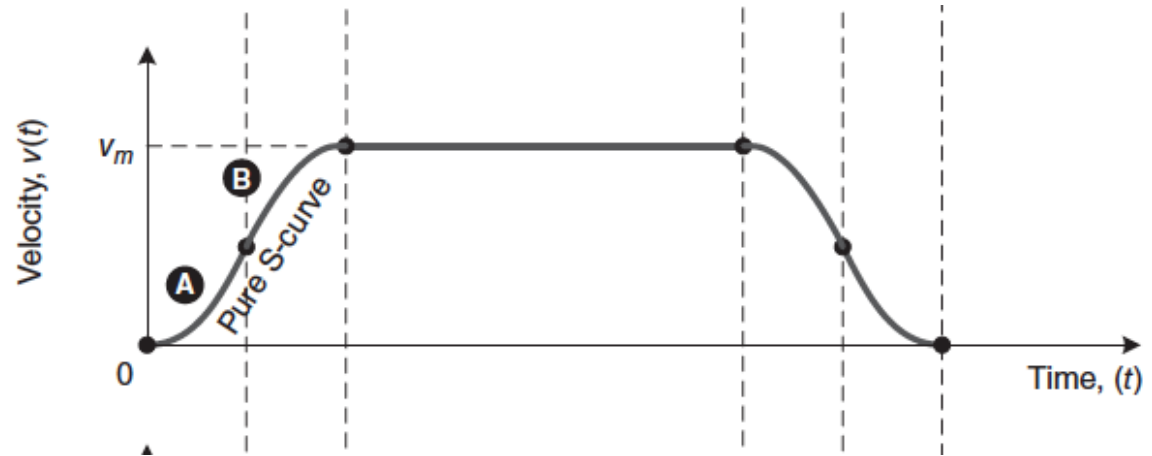
Kurve B

$$v_m = v_A + v(t)$$

$$v_m = \frac{a^2}{2v_m}(t_a - t)^2 + v(t)$$

$$v(t) = v_m - \frac{a^2}{2v_m}(t_a - t)^2$$

$$s_B(t) = s_A(t)|_0^{t_a/2} + \int_{t_a/2}^{t_a} (v_m - C_1(t^2 - 2t_a t + t_a^2)) dt$$



Bewegungssteuerungen

Zusammenfassung

$$t_a = \frac{2v_m}{a}$$

$$C_1 = \frac{a^2}{2v_m}$$

Curve A

$$0 \leq t \leq \frac{t_a}{2}$$

$$s_A(t) = C_1 \frac{t^3}{3}$$

$$v_A(t) = C_1 t^2$$

$$a_A(t) = 2C_1 t$$

Bewegungssteuerungen

Zusammenfassung

Curve B

$$\frac{t_a}{2} < t \leq t_a$$

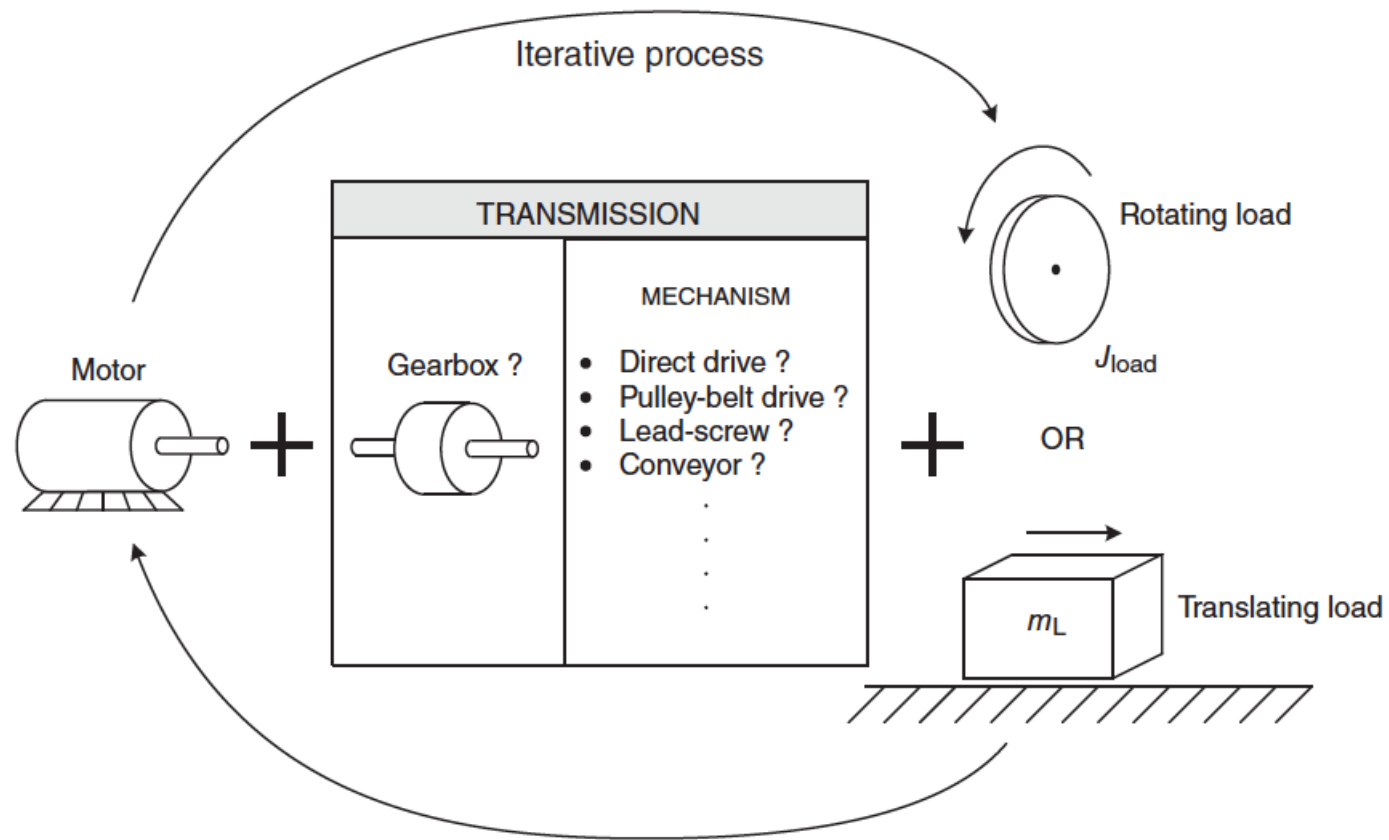
$$s_B(t) = C_1 \frac{t_a^3}{24} + v_m \left(t - \frac{t_a}{2} \right) - C_1 \cdot \left\{ t_a^2 \left(t - \frac{t_a}{2} \right) - t_a \left(t^2 - \left(\frac{t_a}{2} \right)^2 \right) + \frac{1}{3} \left(t^3 - \left(\frac{t_a}{2} \right)^3 \right) \right\}$$

$$v_B(t) = v_m - C_1(t_a - t)^2$$

$$a_B(t) = 2C_1(t_a - t)$$

Bewegungssteuerungen

Der Antrieb



Bewegungssteuerungen

Hauptauslegungsparameter für den Antrieb

- Motordrehmoment muss immer grösser sein als das maximal erforderliche Drehmoment der Last auch im Notfallbetrieb
- Ausgewogenes Verhältnis zwischen Motordrehmoment und Last
- Zusätzliche Kriterien (Preis, Lebensdauer, Zuverlässigkeit,)

Probleme bei der Auswahl des Antriebs

- Überdimensionierung
 - Höhere Kosten
 - Höherer Energieverbrauch durch größeres Trägheitsmoment
 - Höhere Reaktionszeiten
- Unterdimensionierung
 - Gefahr der Überhitzung durch Überlast
 - Ausfall in kritischen Situationen

Bewegungssteuerungen

Trägheit und Drehmoment

Zweites Newtonsches Gesetz

$$\sum T = J\alpha$$

T = Drehmoment

J = Trägheitsmoment

α = Winkelbeschleunigung

Getriebe-Übersetzung

$$N_{GB} = \frac{\text{Motorgeschwindigkeit}}{\text{Lastgeschwindigkeit}}$$

Bewegungssteuerungen

Tangentialgeschwindigkeit

$$V_{\text{tangential}} = \omega_m r_m = \omega_l r_l$$

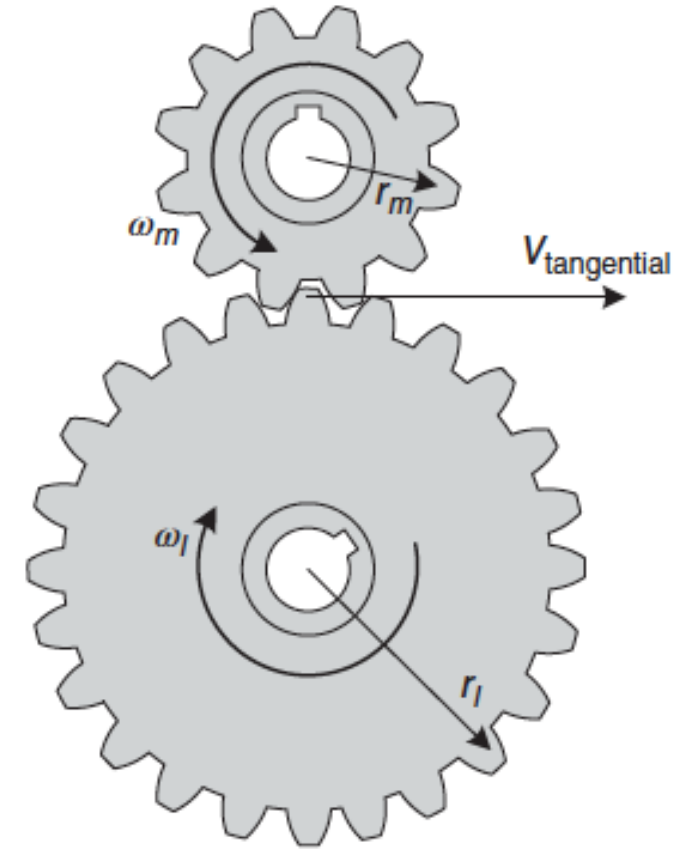
$$\frac{\omega_m}{\omega_l} = \frac{r_l}{r_m}$$

Getriebe-Übersetzung

$$N_{\text{GB}} = \frac{\omega_m}{\omega_l} = \frac{r_l}{r_m}$$

Alternativ: Übersetzung durch Anzahl der Zähne

$$\frac{n_l}{n_m} = \frac{r_l}{r_m}$$



Bewegungssteuerungen

Übersetzung mittels Drehmomentberechnung

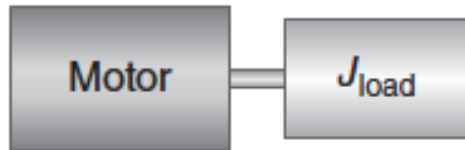
$$\mathbb{P} = T_m \omega_m = T_l \omega_l$$

$$\frac{\omega_m}{\omega_l} = \frac{T_l}{T_m}$$

$$N_{\text{GB}} = \frac{\omega_m}{\omega_l} = \frac{r_l}{r_m} = \frac{n_l}{n_m} = \frac{T_l}{T_m}$$

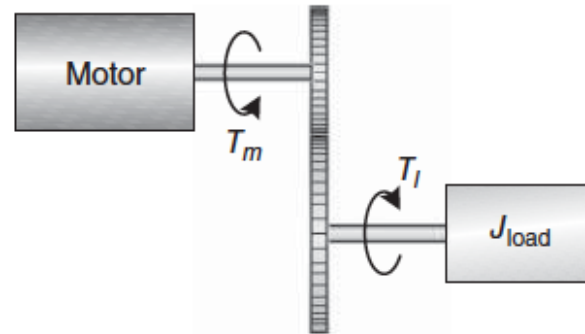
Bewegungssteuerungen

Direktantrieb



$$T_m = J_{\text{load}} \ddot{\theta}_m$$

Antrieb mit Getriebe



$$T_l = J_{\text{load}} \ddot{\theta}_l$$

$$\frac{r_l}{r_m} T_m = J_{\text{load}} \ddot{\theta}_l$$

$$r_l \theta_l = r_m \theta_m$$

$$r_l \ddot{\theta}_l = r_m \ddot{\theta}_m$$

$$\frac{r_l}{r_m} T_m = J_{\text{load}} \frac{r_m}{r_l} \ddot{\theta}_m$$

$$T_m = J_{\text{load}} \left(\frac{r_m}{r_l} \right)^2 \ddot{\theta}_m$$

$$= J_{\text{load}} \frac{1}{N_{\text{GB}}^2} \ddot{\theta}_m$$

$$J_{\text{ref}} = \frac{J_{\text{load}}}{N_{\text{GB}}^2}$$

Bewegungssteuerungen

Gesamtes Trägheitsmoment

$$J_{\text{total}} = J_m + J_{\text{on motor shaft}} + J_{\text{ref}}$$

Beachte:

$J_{\text{on motor shaft}}$ ist das externe Trägheitsmoment bezogen auf den Motorschaft

$$J_{\text{on motor shaft}} = J_{\text{coupling}} + J_{mg}$$

Bewegungssteuerungen

Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{P_{\text{output}}}{P_{\text{input}}}$$

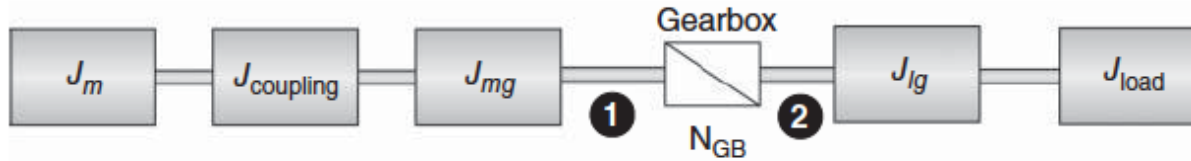
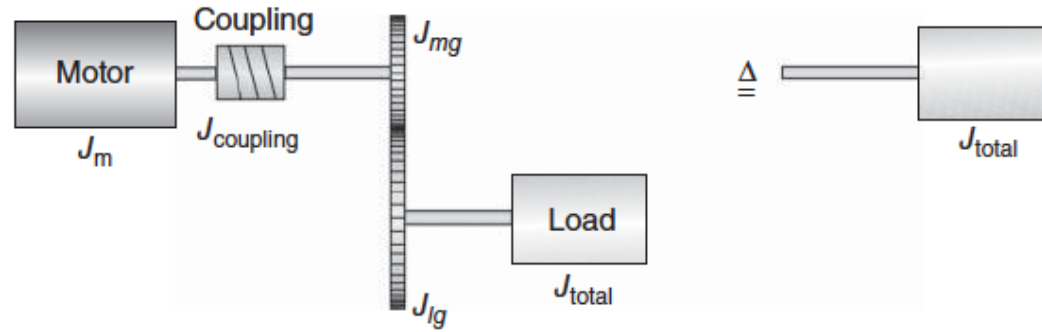
$$T_m = \frac{T_l}{\eta N_{\text{GB}}}$$

$$T_l \omega_l = \eta T_m \omega_m$$

$$J_{\text{ref}} = \frac{J_{\text{load}}}{\eta N_{\text{GB}}^2}$$

Bewegungssteuerungen

Beispiel



$$J_{total} = J_m + J_{coupling} + J_{mg} + \frac{1}{\eta N_{GB}^2} [J_{lg} + J_{load}]$$

$$J_{ref} = \frac{1}{\eta N_{GB}^2} [J_{lg} + J_{load}]$$

Trägheitsverhältnis

$$J_R = \frac{J_{on\ motor\ shaft} + J_{ref}}{J_m}$$

$$J_R \leq 5$$

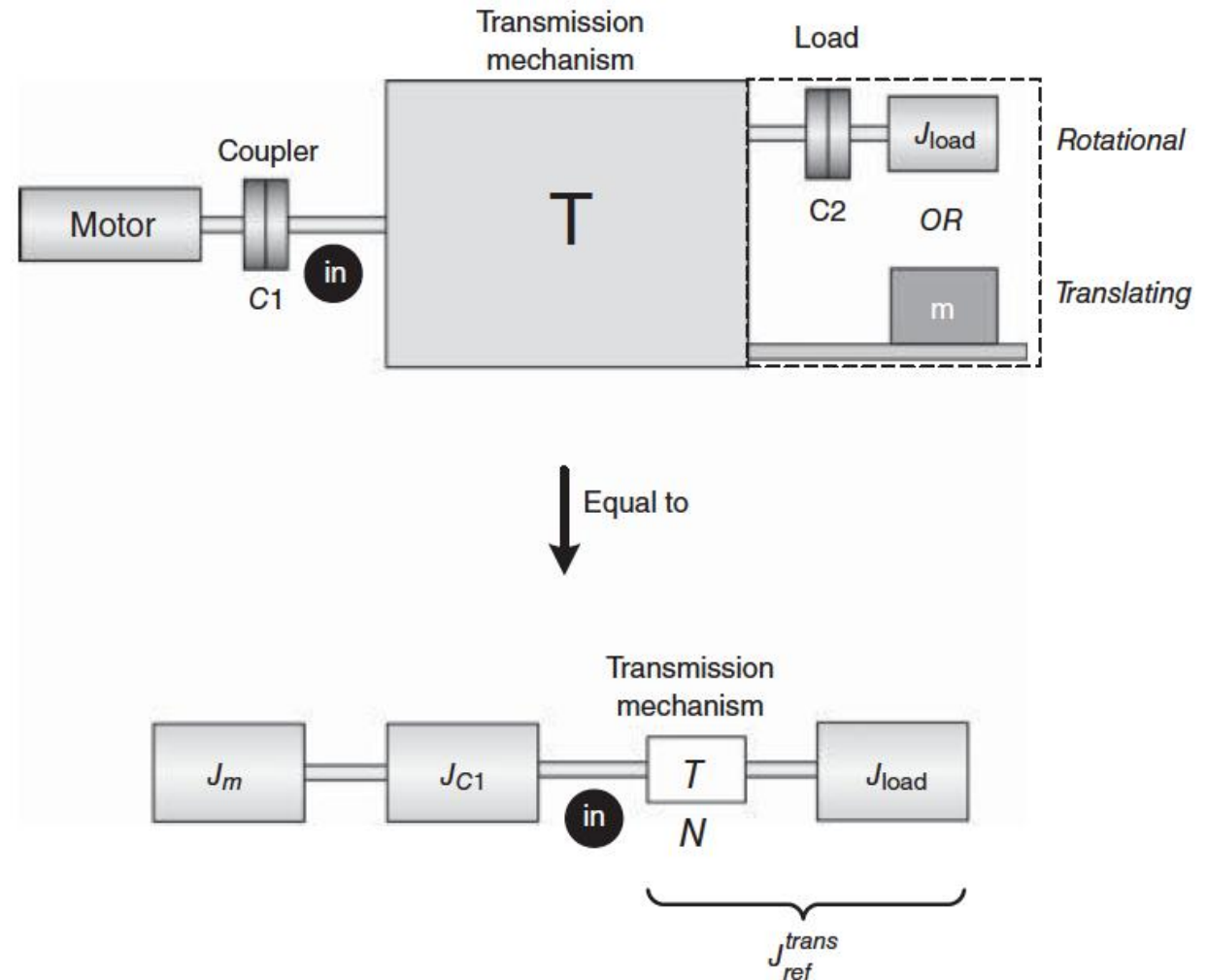
Bewegungssteuerungen

$$J_{\text{total}} = J_m + J_{C1} + J_{\text{ref}}^{\text{trans}}$$

J_m = Trägheitsmoment Motor

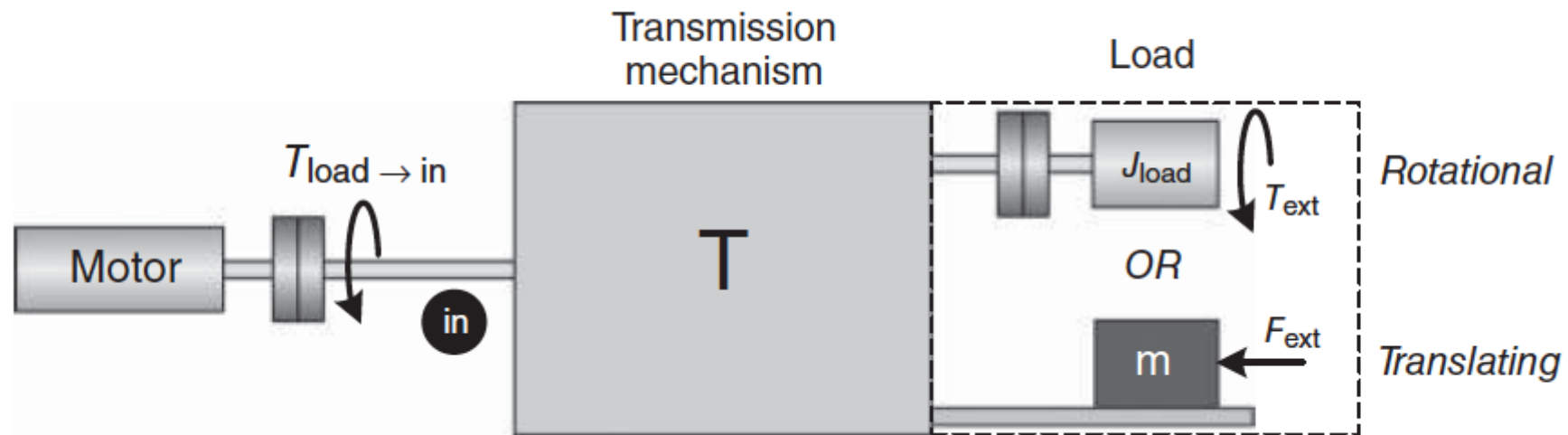
J_{C1} = Trägheitsmoment an der
Motorkupplung

J_{ref} = Trägheitsmoment der
Transmissionseinheit



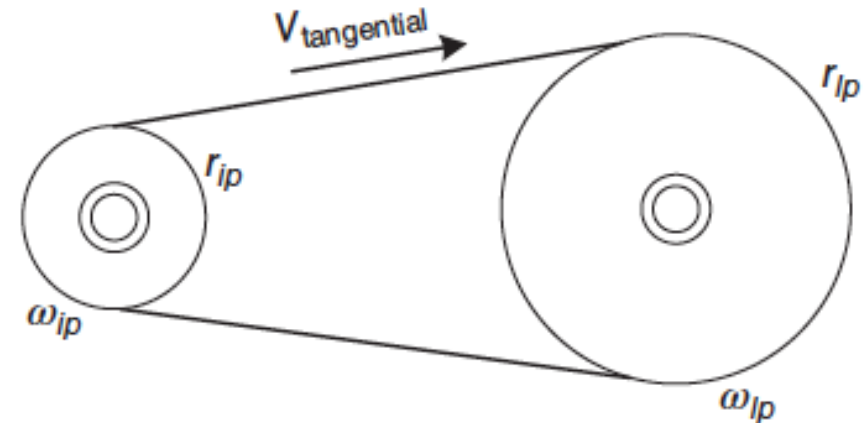
Bewegungssteuerungen

Dreh- und Lineare Bewegungen



Bewegungssteuerungen

$$V_{\text{tangential}} = \omega_{ip} \cdot r_{ip} = \omega_{lp} \cdot r_{lp}$$



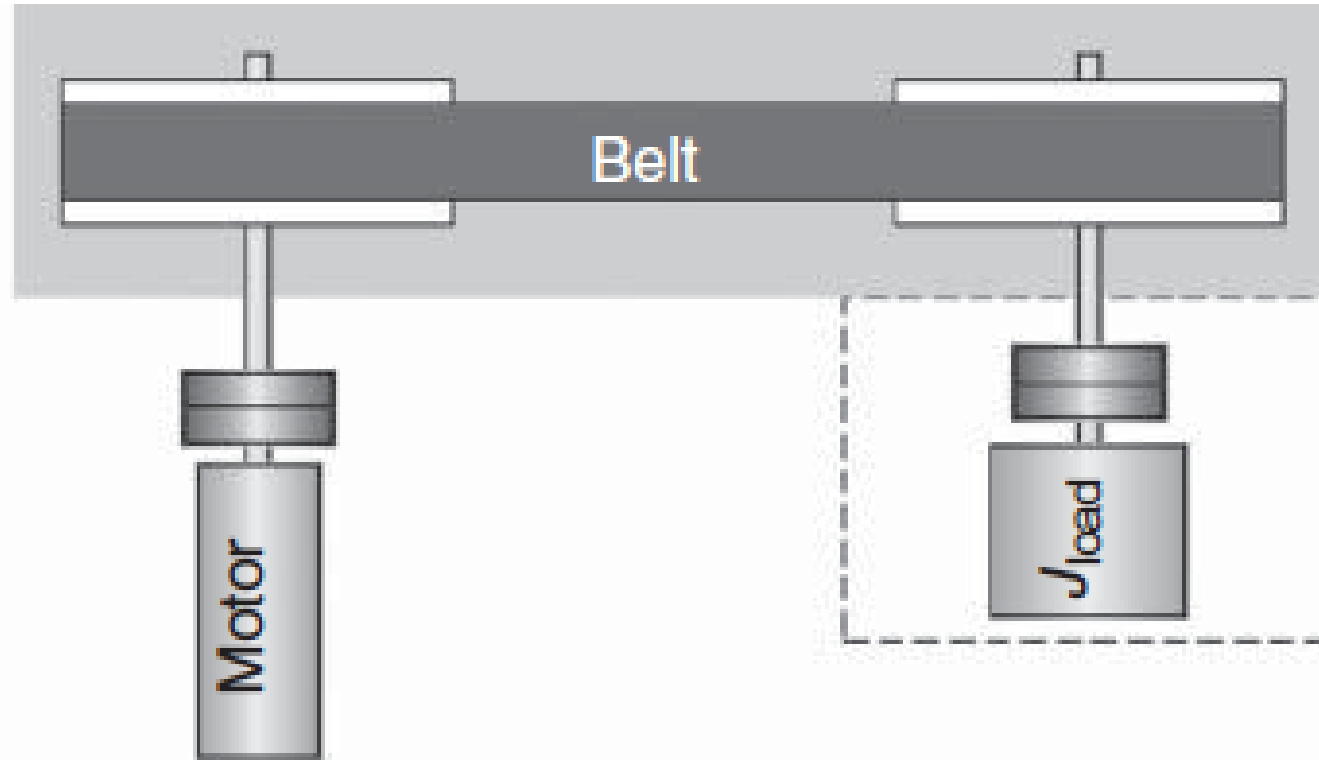
Bewegungssteuerungen

$$N_{\text{BP}} = \frac{\omega_{ip}}{\omega_{lp}} = \frac{r_{lp}}{r_{ip}}$$

$$\begin{aligned} J_{\text{ref}}^{\text{trans}} &= J_{\text{IP}} + J_{\text{belt} \rightarrow \text{in}} + J_{\text{LP} \rightarrow \text{in}} + J_{\text{load} \rightarrow \text{in}} + J_{\text{C2} \rightarrow \text{in}} \\ &= J_{\text{IP}} + \left(\frac{W_{\text{belt}}}{g \cdot \eta} \right) \cdot r_{ip}^2 + \frac{1}{\eta N_{\text{BP}}^2} (J_{\text{LP}} + J_{\text{load}} + J_{\text{C2}}) \end{aligned}$$

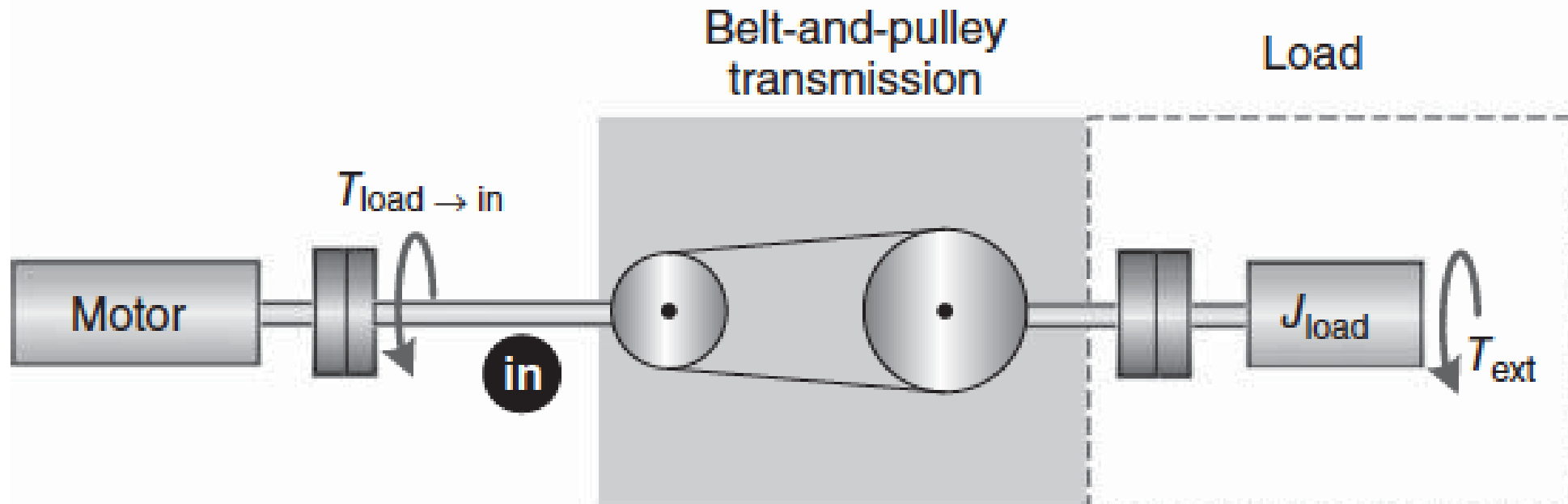
$$J = mr^2$$

Bewegungssteuerungen



(a)

Bewegungssteuerungen



(b)

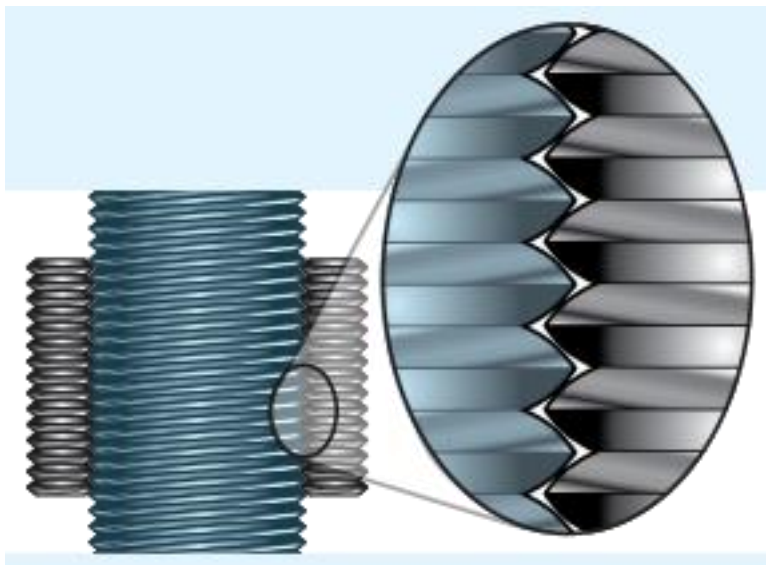
$$T_{\text{load} \rightarrow \text{in}} = \frac{T_{\text{ext}}}{\eta N_{\text{BP}}}$$

Bewegungssteuerungen

Linearantriebe



$$\Delta\theta = 2\pi p \Delta x$$



$$\frac{\text{input speed}}{\text{load speed}} = \frac{\dot{\theta}}{\dot{x}} = 2\pi p$$

$$N_S = 2\pi p$$

p = Pitch

Bewegungssteuerungen

KE =Kinetisch Energie

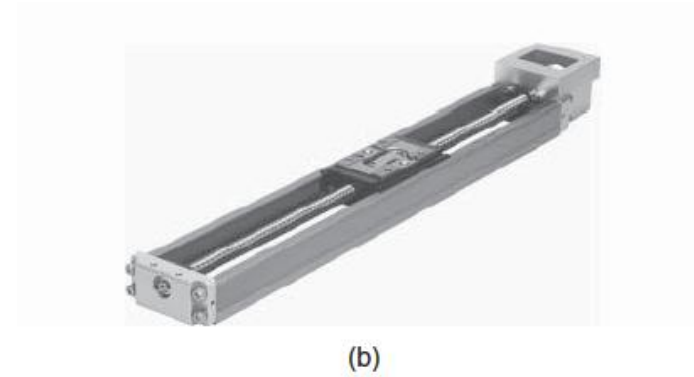
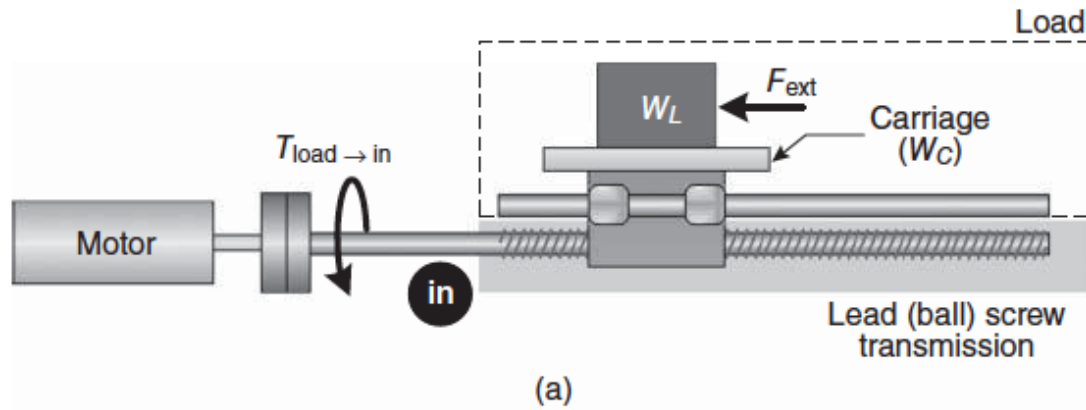
$$KE = \frac{1}{2}m\dot{x}^2$$

$$KE = \frac{1}{2}m \frac{1}{(2\pi p)^2} \dot{\theta}^2$$

$$J_{\text{ref}} = m \frac{1}{(2\pi p)^2}$$

$$J_{\text{ref}} = \frac{m}{N_S^2}$$

Bewegungssteuerungen



$$m = \frac{W_L + W_C}{g}$$

$$\begin{aligned} J_{\text{ref}}^{\text{trans}} &= J_{\text{screw}} + J_{\text{load} \rightarrow \text{in}} + J_{\text{carriage} \rightarrow \text{in}} \\ &= J_{\text{screw}} + \frac{1}{\eta N_S^2} \left(\frac{W_L + W_C}{g} \right) \end{aligned}$$

Bewegungssteuerungen

Lastdrehmoment

$$F_{\text{ext}} = F_f + F_g + F_p$$

F_f = Reibungskraft

F_g = Gravitationskraft entlang der Schraubenachse

F_p = Externe Kräfte

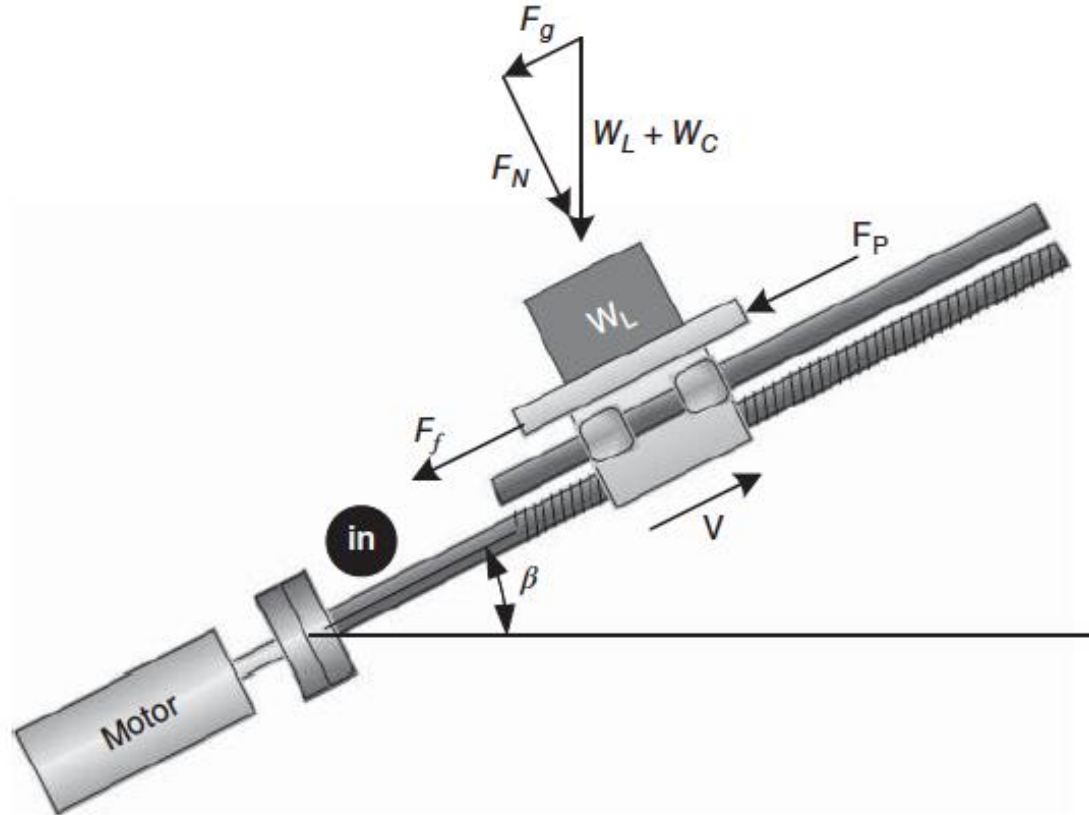
$$F_f = \mu (W_L + W_C) \cos \beta$$

$$F_g = (W_L + W_C) \sin \beta$$

$$F_{\text{ext}} = F_p + (W_L + W_C)(\sin \beta + \mu \cos \beta)$$

$$\text{Work} = F_{\text{ext}} \Delta x$$

Bewegungssteuerungen



$$\text{Work} = F_{\text{ext}} \frac{1}{(2\pi p)} \Delta\theta$$

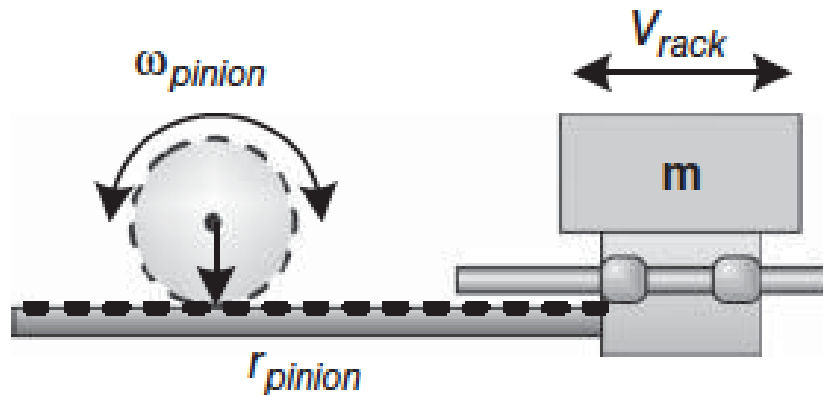
$$\text{Work} = T_{\text{load} \rightarrow \text{in}} \Delta\theta$$

$$T_{\text{load} \rightarrow \text{in}} = \frac{F_{\text{ext}}}{N_S}$$

$$T_{\text{load} \rightarrow \text{in}} = \frac{F_{\text{ext}}}{\eta N_S}$$

Bewegungssteuerungen

Zahnstange und Ritzel Antriebe

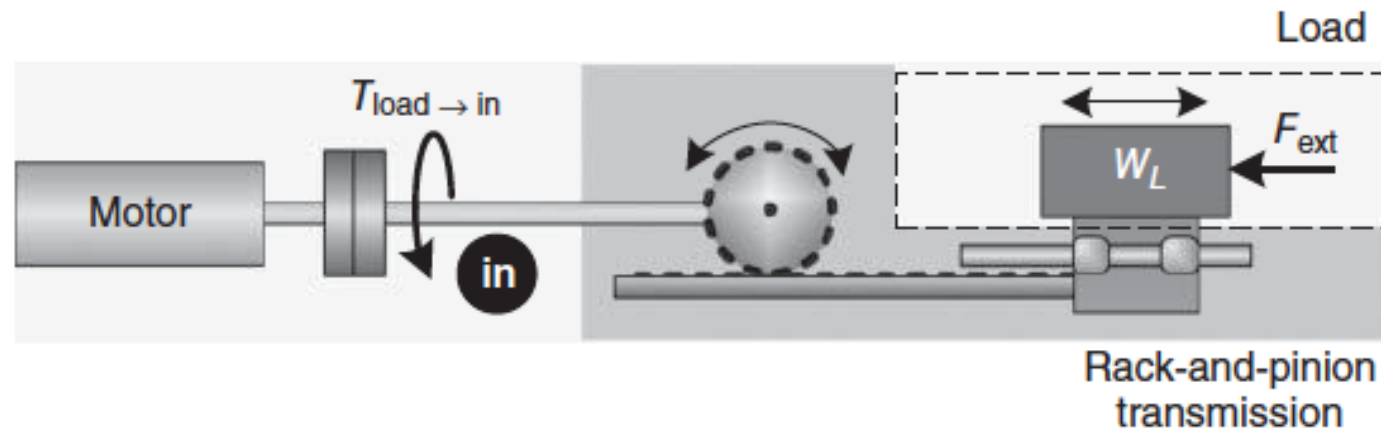


$$V_{rack} = r_{pinion} \omega_{pinion}$$

$$N_{RP} = \frac{1}{r_{pinion}}$$

$$\begin{aligned} J_{ref}^{trans} &= J_{pinion} + J_{load \rightarrow in} + J_{carriage \rightarrow in} \\ &= J_{pinion} + \frac{1}{\eta N_{RP}^2} \left(\frac{W_L + W_C}{g} \right) \end{aligned}$$

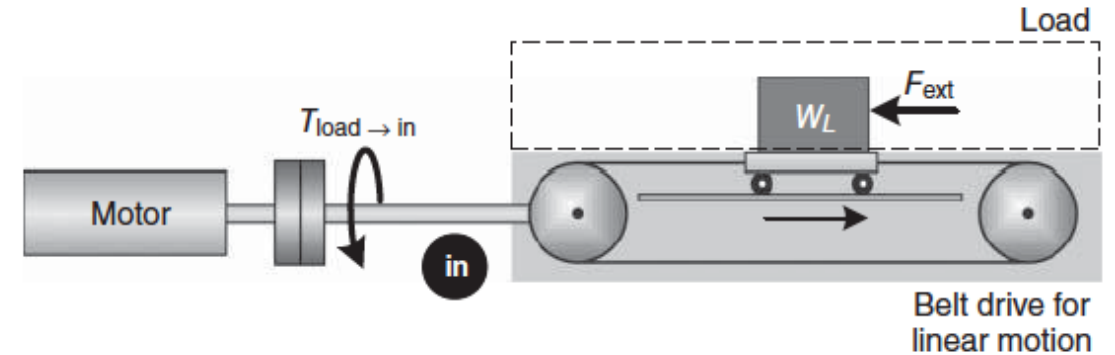
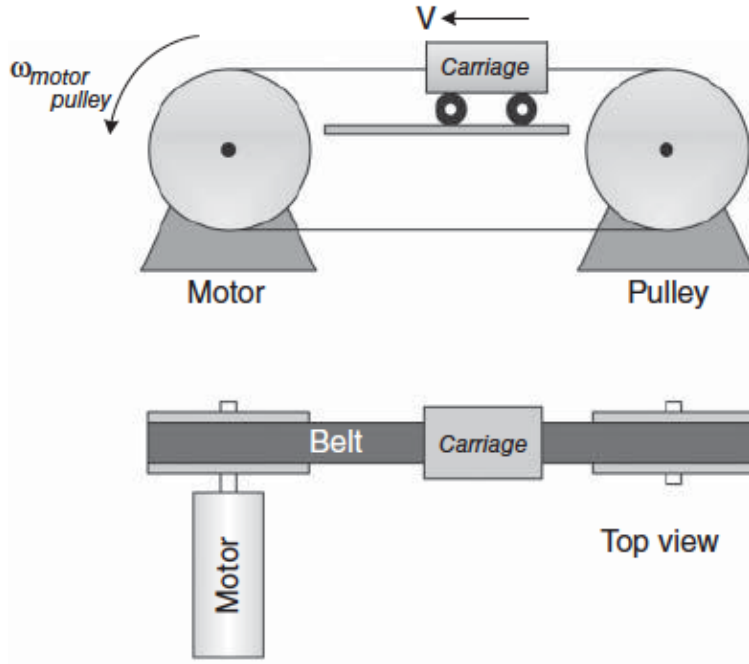
Bewegungssteuerungen



$$T_{\text{load} \rightarrow \text{in}} = \frac{F_{\text{ext}}}{\eta N_{\text{RP}}}$$

Bewegungssteuerungen

Riemenantriebe



$$J_{ref}^{trans} = J_{IP} + J_{load \rightarrow in} + J_{carriage \rightarrow in} + J_{belt \rightarrow in} + J_{LP}$$

$$= 2J_P + \frac{1}{\eta N_{BD}^2} \left(\frac{W_L + W_C + W_{belt}}{g} \right)$$

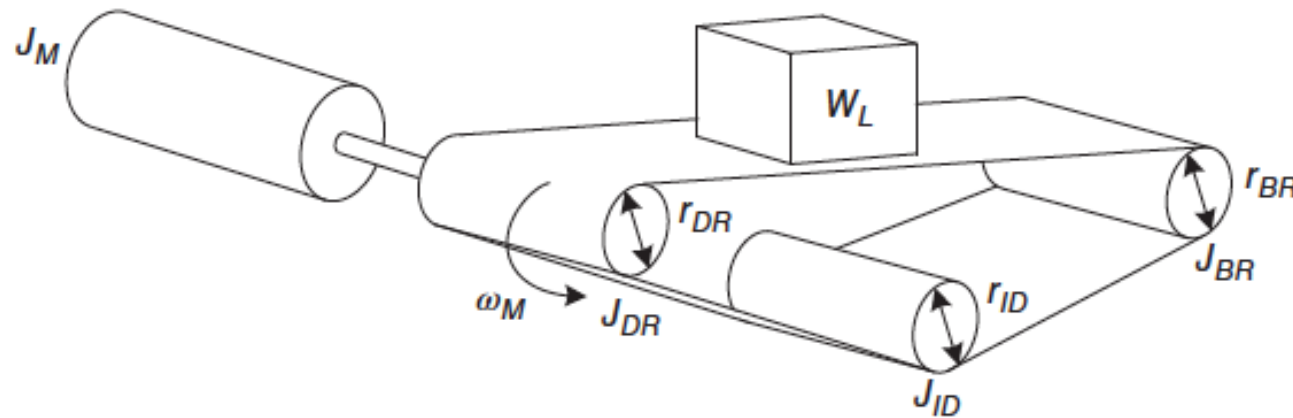
$$N_{BD} = \frac{1}{r_{ip}}$$

$$T_{load \rightarrow in} = \frac{F_{ext}}{\eta N_{BD}}$$

Bewegungssteuerungen

Förderbänder

Einsatz bei großen Lasten



$$N_{CV} = \frac{1}{r_{DR}}$$

Bewegungssteuerungen

$$J_{\text{ref}}^{\text{trans}} = J_{\text{DR}} + J_{\text{load} \rightarrow \text{in}} + J_{\text{belt} \rightarrow \text{in}} + J_{\text{ID} \rightarrow \text{in}} + J_{\text{BR} \rightarrow \text{in}}$$

$$= J_{\text{DR}} + \frac{1}{\eta N_{\text{CV}}^2} \left(\frac{W_L + W_{\text{belt}}}{g} \right) + \frac{J_{\text{ID}}}{\eta \left(\frac{r_{\text{ID}}}{r_{\text{DR}}} \right)^2} + \frac{J_{\text{BR}}}{\eta \left(\frac{r_{\text{BR}}}{r_{\text{DR}}} \right)^2}$$

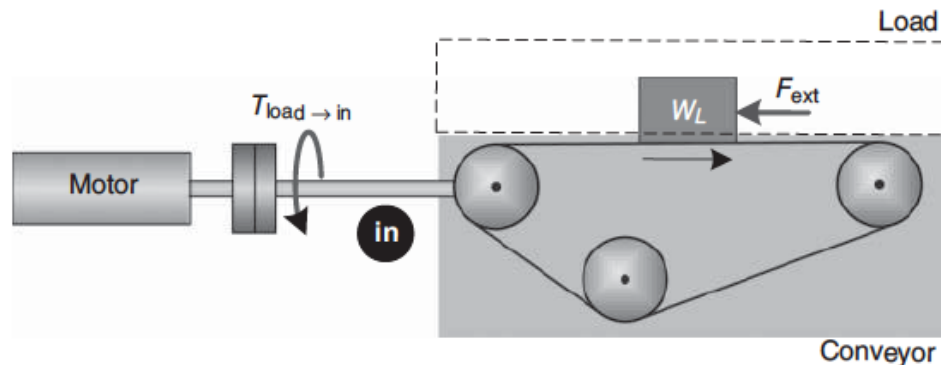
$$J_{\text{ID} \rightarrow \text{in}} = \frac{J_{\text{ID}}}{\eta \left(\frac{r_{\text{ID}}}{r_{\text{DR}}} \right)^2}$$

$$J_{\text{BR} \rightarrow \text{in}} = \frac{J_{\text{BR}}}{\eta \left(\frac{r_{\text{BR}}}{r_{\text{DR}}} \right)^2}$$

J_{DR} = Trägheitsmoment der Antriebsrolle

J_{ID} = Trägheitsmoment der Leerlaufrolle

J_{BR} = Trägheitsmoment der Rueckenrolle



$$T_{\text{load} \rightarrow \text{in}} = \frac{F_{\text{ext}}}{\eta N_{\text{CV}}}$$

$$F_{\text{ext}} = F_p + (W_L + W_{\text{belt}})(\sin \beta + \mu \cos \beta)$$

Bewegungssteuerungen

Erforderliche Drehmomente für die Antriebe

$$\sum T = J_{\text{total}} \ddot{\theta}_m$$

$$T_m - T_{\text{load} \rightarrow \text{M}} = J_{\text{total}} \ddot{\theta}_m$$

$$T_m = J_{\text{total}} \ddot{\theta}_m + T_{\text{load} \rightarrow \text{M}}$$

T_m = erforderliche Drehmoment des Motors

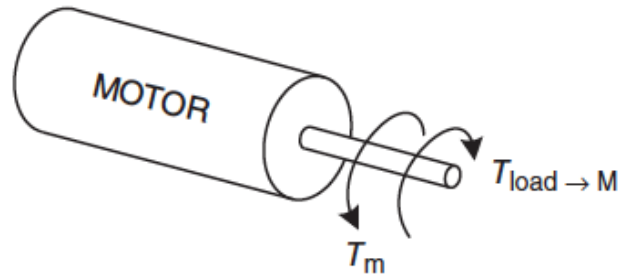
J_{total} = gesamtes Trägheitsmoment bezogen auf den Motor Schaft

$$T_{\text{ext}} = T_f + T_g + T_{\text{process}}$$

f = Reibung, g = Gravitation, process = alle am Prozess beteiligten Momente

Bewegungssteuerungen

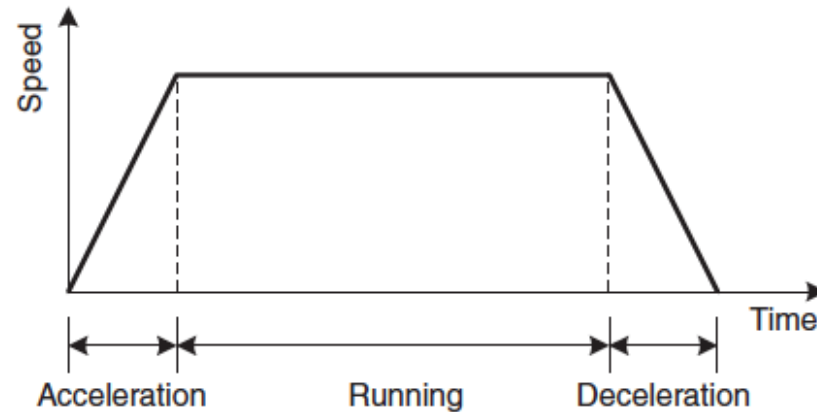
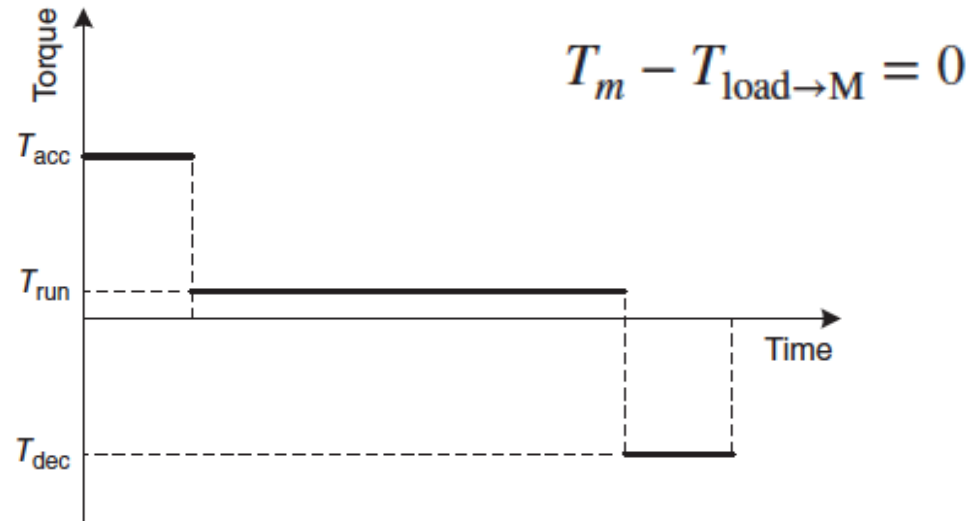
Direktantrieb



$$T_{load \rightarrow M} = T_{ext}$$

$$T_{acc} = J_{total} \ddot{\theta}_m + T_{load \rightarrow M}$$

$$T_{run} = T_{load \rightarrow M}$$



Bewegungssteuerungen

Bremsmoment

$$T_{\text{dec}} - T_{\text{load} \rightarrow \text{M}} = -J_{\text{total}} \ddot{\theta}_m$$

$$T_{\text{dec}} = T_{\text{load} \rightarrow \text{M}} - J_{\text{total}} \ddot{\theta}_m$$

Durchschnitts Drehmoment

$$T_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{T_{\text{acc}}^2 \cdot t_a + T_{\text{run}}^2 \cdot t_m + T_{\text{dec}}^2 \cdot t_d + T_{\text{dw}}^2 \cdot t_{\text{dw}}}{t_a + t_m + t_d + t_{\text{dw}}}}$$

Bewegungssteuerungen

Motor/Drehzahl Kurven

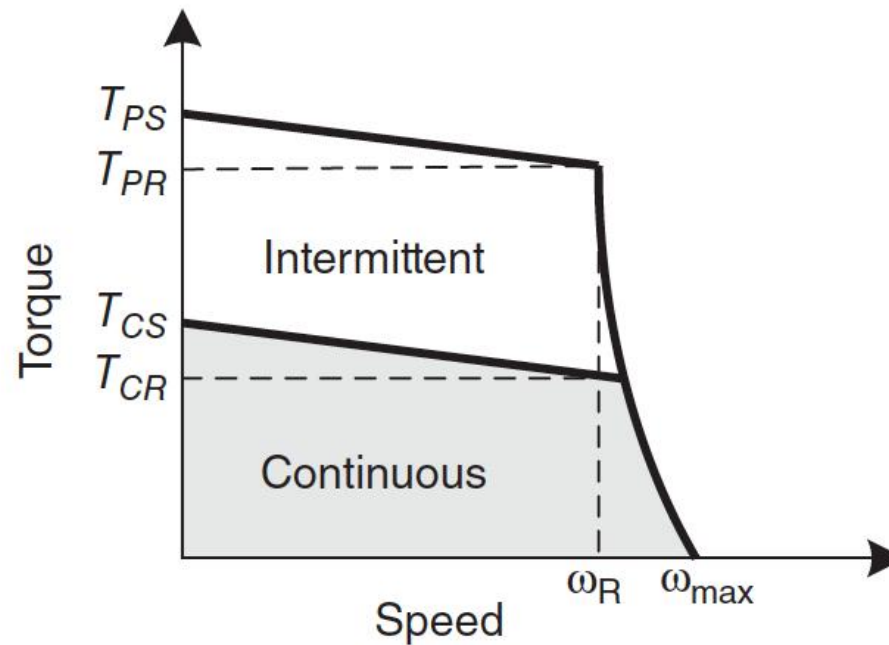
	Vector-duty Three-phase induction motor	Three-phase AC servomotor
Typical Power @460VAC (HP)	0.25–30	1–16
Cont. torque (lb in)	9–12 000	9–257
Max speed (rpm)	2× base speed	5000
Min speed (with full load)	0	0
Motor inertia	Medium	Low
Motor size	Medium	Small
Feedback	Encoder	Encoder
Speed regulation (with full load)	1000:1	10 000:1
Features	Full torque at zero speed; slower acceleration; typical applications include print cylinders, winders, positioning conveyors	Smooth motion; rapid acceleration; most popular in motion control; excellent dynamic performance; typical applications include pick-and-place, indexing, flying shears, high speed material handling

Bewegungssteuerungen

AC - Servomotoren



(a)



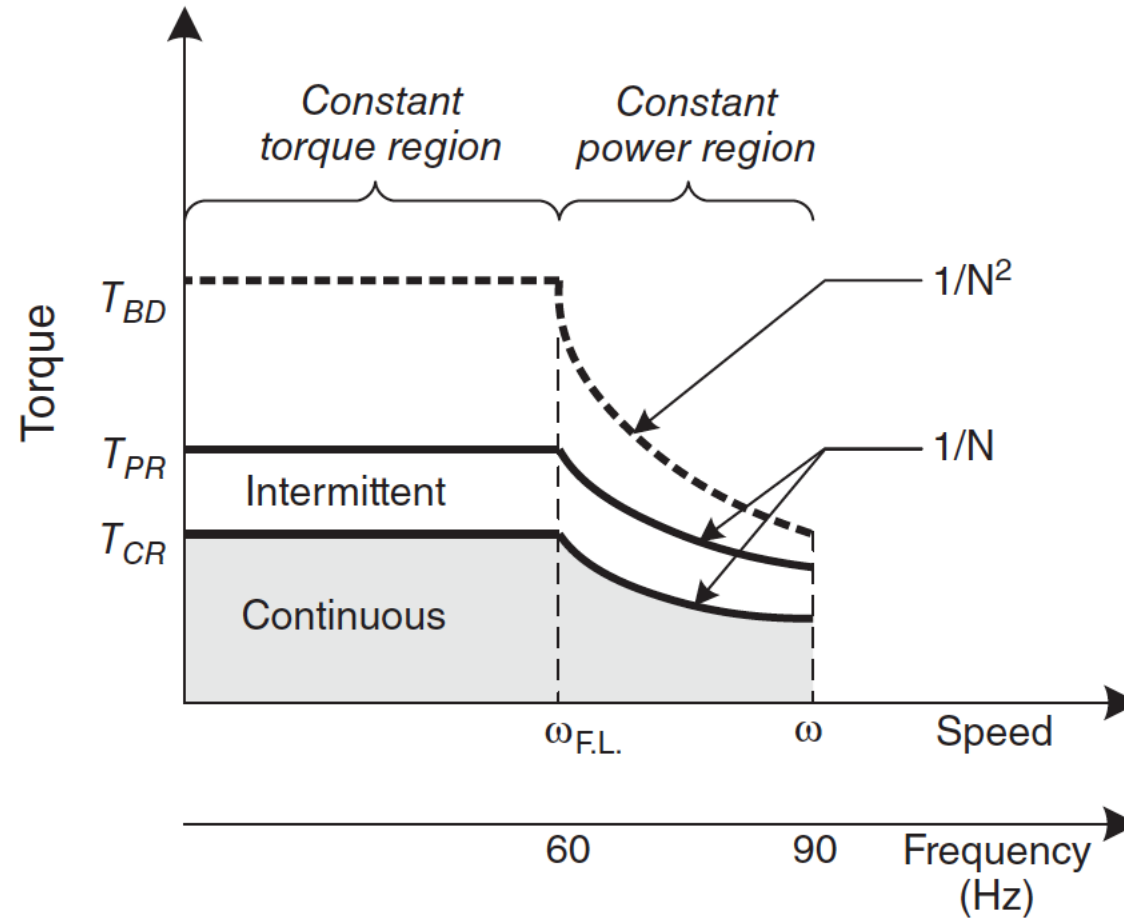
(b)

Bewegungssteuerungen

AC Asynchronmotoren



(a)

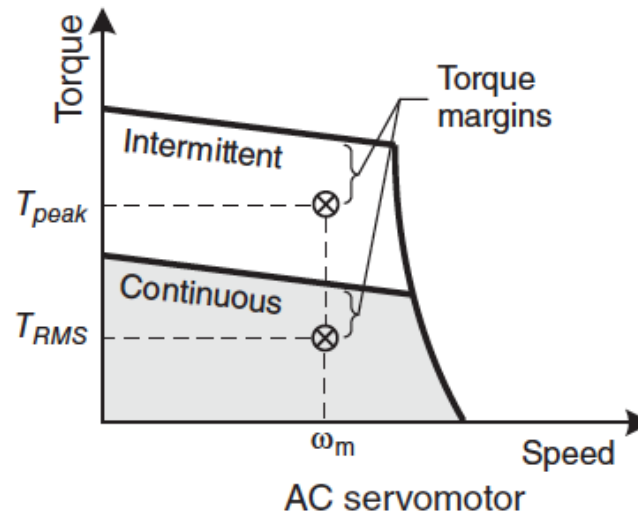


(b)

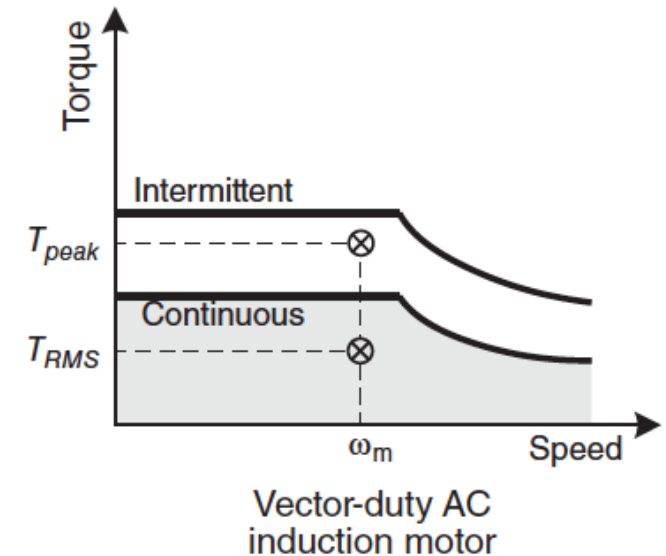
Bewegungssteuerungen

Auslegungskriterien für den Antriebsmotor

1. Drehmomentverhältnis
2. Motorgeschwindigkeit
3. Max. Drehmoment
4. Betriebsdrehmoment

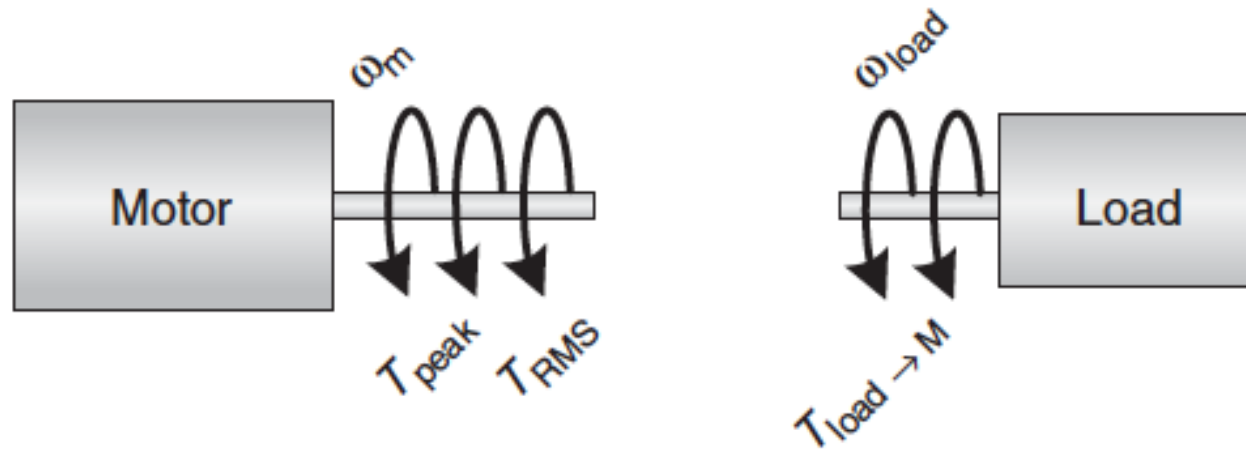
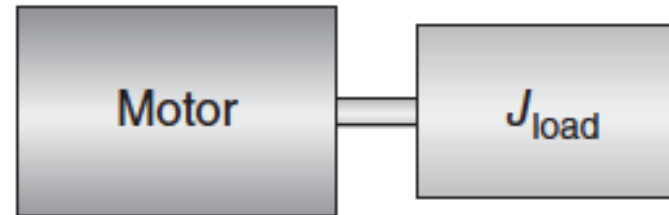


OR



Bewegungssteuerungen

Direktantrieb



Bewegungssteuerungen

Antrieb über Getriebe

- Reduzierung der Lastgeschwindigkeit und Erhöhung des Drehmoments
- Optimierung des Trägheitsverhältnis
- Reduzierung der Kosten

Planetengetriebe



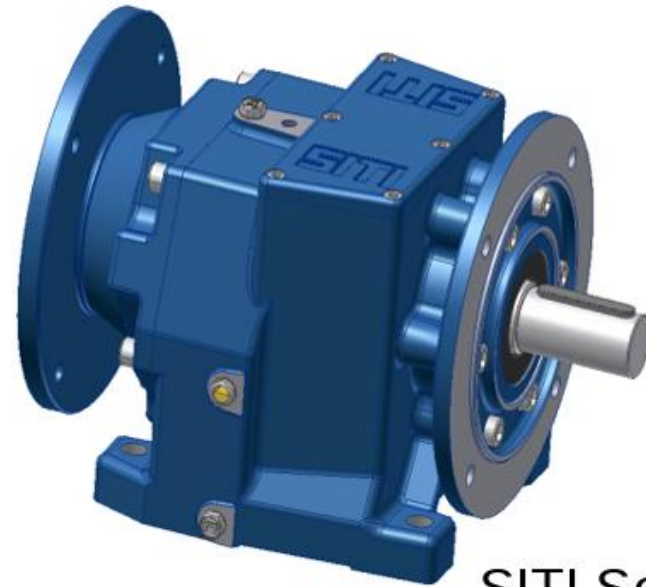
Bewegungssteuerungen



SIT1 Serie **I** und **U**

Schneckenradsatz Achswinkel = 90° Wirkungsgrad ($i=5$ gut -- $i=100$ gering)

Bewegungssteuerungen



SITI Serie **NHL**

Stirnradsatz Achswinkel = 0° Wirkungsgrad "sehr gut"

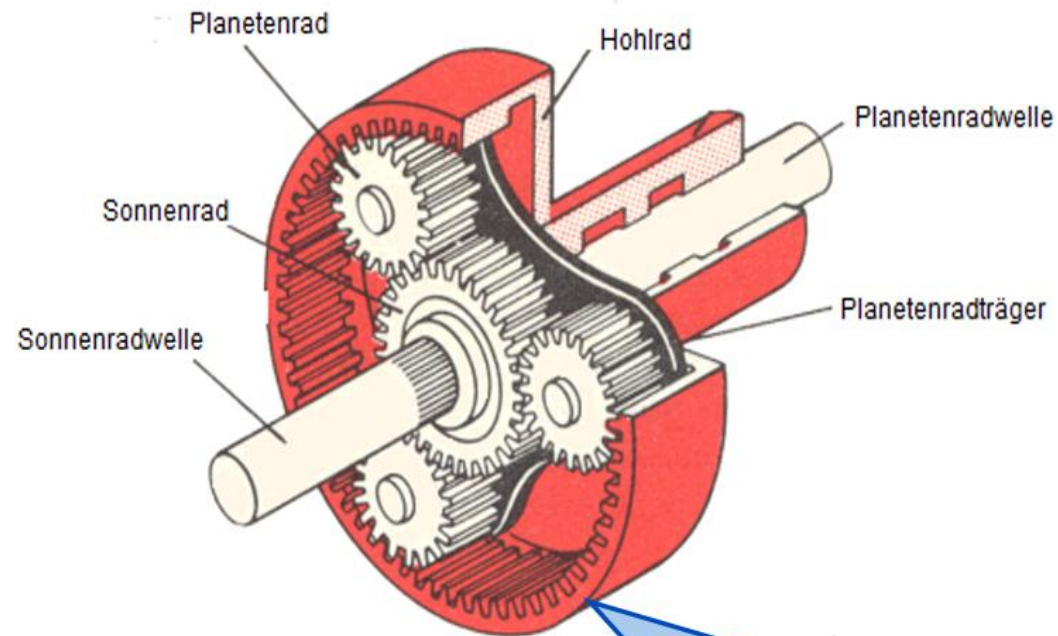
Bewegungssteuerungen



SITI Serie **BH**

Kegelradsatz Achswinkel = 90° Wirkungsgrad "sehr gut"

Bewegungssteuerungen



SITI Serie **NRG**

Planetensatz Achswinkel $=0^\circ$ Wirkungsgrad "sehr gut"

Bewegungssteuerungen

Bewegungssteuerungen

Bewegungssteuerungen

Bewegungssteuerungen

Bewegungssteuerungen

Bewegungssteuerungen