Berechnung der einwirkenden Belastung

Linearführungen können aus allen Richtungen Belastungen und Momente resultierend aus der Einbaulage der Führungen, dem Antrieb, der Beschleunigung, den Bearbeitungskräften sowie dem Massenschwerpunkt des zu bewegenden Gegenstandes u.a. aufnehmen.

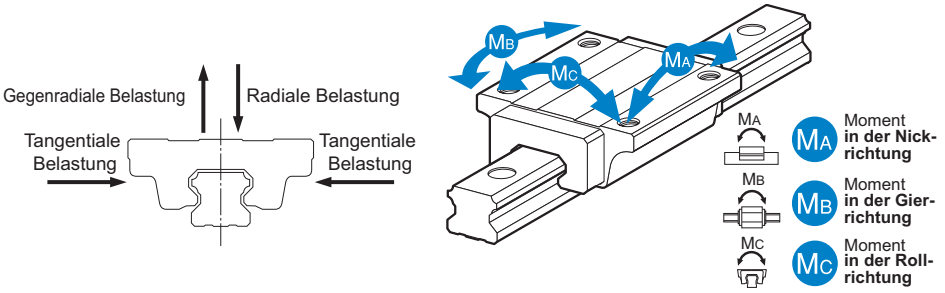


Abb. 1 Richtungen der auf die Linearführung einwirkenden Belastungen

Berechnung einer einwirkenden Belastung

[Einachsige Anwendung]

● **Momentäquivalenz**

Linearführungen werden z.T. wegen beengter Einbauverhältnisse mit nur einem Führungswagen bzw. mit zwei zusammengesetzten Wagen eingesetzt. In diesen Fällen werden die äußeren Kugeln an den Wagenenden größerem Verschleiß ausgesetzt als die anderen Kugeln (siehe Abb. 2). Hier kann der Verschleiss durch Abblättern während des Betriebs an den am größten belasteten Stellen zunehmen und die berechnete Lebensdauer dementsprechend abnehmen. Daher müssen bei diesen Betriebsbedingungen die Momente mit den entsprechenden Äquivalenzfaktoren multipliziert werden (siehe Tab. 1 bis Tab. 6 A1-43).

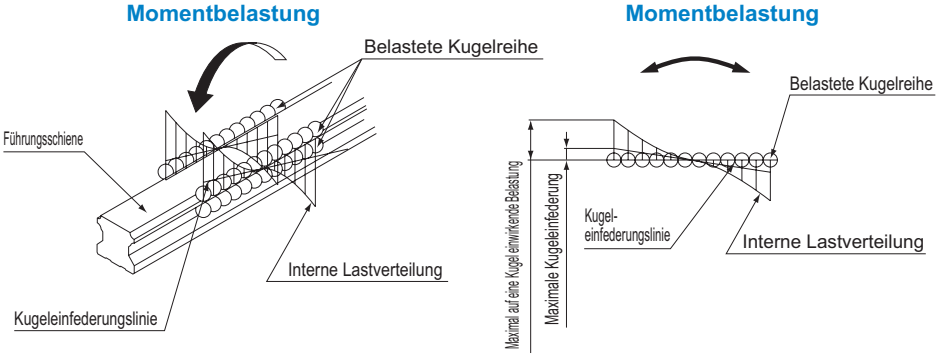


Abb. 2 Kugelbelastung bei einwirkendem Moment

Mit der folgenden Formel wird die äquivalente Belastung ermittelt, wenn ein Moment auf die Linearführung wirkt.

$$P = K \cdot M$$

P : Äquivalente Belastung pro Linearführung (N)
K : Äquivalenzfaktor
M : Wirkendes Moment (Nmm)

● Äquivalenzfaktor

Einige Linearführungen haben unterschiedliche Tragzahlen pro Belastungsrichtung. In diesem Fall sind für gleiche Momente in M_A- und M_C-Richtung die Äquivalenzfaktoren für die Radial- bzw. Gegenradialrichtung unterschiedlich.

■Äquivalenzfaktoren für Moment M_A

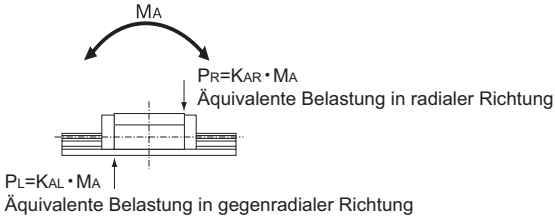


Abb. 3 Äquivalenzfaktoren für Moment M_A

Äquivalenzfaktoren für das Moment M_A .

- Äquivalenzfaktor in radialer Richtung $K_{AR}=\frac{C_0}{M_A}$
- Äquivalenzfaktor in gegenradialer Richtung $K_{AL}=\frac{C_{0L}}{M_A}$

$$\frac{C_0}{K_{AR}\cdot M_A}=\frac{C_{0L}}{K_{AL}\cdot M_A}=1$$

■Äquivalenzfaktoren für Moment M_B

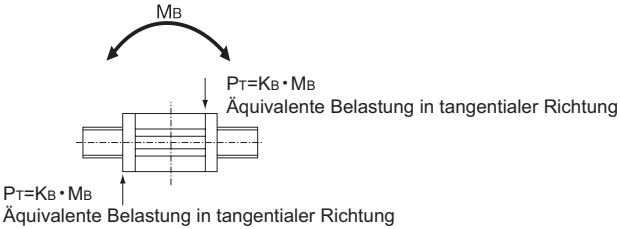


Abb. 4 Äquivalenzfaktoren für Moment M_B

Äquivalenzfaktoren für das Moment M_B .

- Äquivalenzfaktor in tangentialen Richtungen $K_B=\frac{C_{0T}}{M_B}$

$$\frac{C_{0T}}{K_B\cdot M_B}=1$$

■Äquivalenzfaktoren für Moment M_C

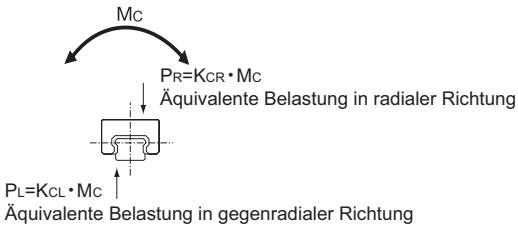


Abb. 5 Äquivalenzfaktoren für Moment M_C

Äquivalenzfaktoren für das Moment M_C .

- Äquivalenzfaktor in radialer Richtung $K_{CR}=\frac{C_0}{M_C}$
- Äquivalenzfaktor in gegenradialer Richtung $K_{CL}=\frac{C_{0L}}{M_C}$

$$\frac{C_0}{K_{CR}\cdot M_C}=\frac{C_{0L}}{K_{CL}\cdot M_C}=1$$

C_0	:	Statische Tragzahl (radiale Richtung)	(N)
C_{0L}	:	Statische Tragzahl (gegenradiale Richtung)	(N)
C_{0T}	:	Statische Tragzahl (tangentiale Richtung)	(N)
P_R	:	Berechnete Belastung (radiale Richtung)	(N)
P_L	:	Berechnete Belastung (gegenradiale Richtung)	(N)
P_T	:	Berechnete Belastung (tangentiale Richtung)	(N)

Berechnungsbeispiel

Wenn ein Führungswagen verwendet wird

Baureihe: SSR20XV1

Erdbeschleunigung g=9,8 (m/s²)
Gewicht m=10 (kg)
ℓ_1=200 (mm)
ℓ_2=100 (mm)

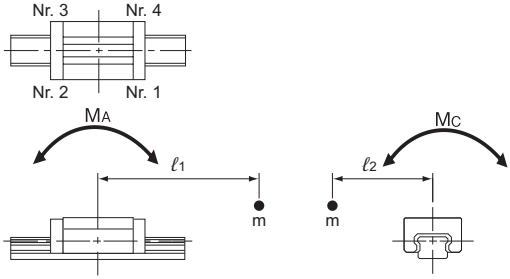


Abb. 6 Wenn ein Führungswagen verwendet wird

Nr. 1 $P_1=mg+K_{AR1}\cdot mg\cdot \ell_1+K_{CR}\cdot mg\cdot \ell_2=98+0{,}275\times 98\times 200+0{,}129\times 98\times 100=6752$ (N)
Nr. 2 $P_2=mg-K_{AL1}\cdot mg\cdot \ell_1+K_{CR}\cdot mg\cdot \ell_2=98-0{,}137\times 98\times 200+0{,}129\times 98\times 100=-1323$ (N)
Nr. 3 $P_3=mg-K_{AL1}\cdot mg\cdot \ell_1-K_{CL}\cdot mg\cdot \ell_2=98-0{,}137\times 98\times 200-0{,}0644\times 98\times 100=-3218$ (N)
Nr. 4 $P_4=mg+K_{AR1}\cdot mg\cdot \ell_1-K_{CL}\cdot mg\cdot \ell_2=98+0{,}275\times 98\times 200-0{,}0644\times 98\times 100=4857$ (N)

Wenn zwei Führungswagen eng zusammengesetzt verwendet werden

Baureihe/-größe: SVS25R2

Erdbeschleunigung g=9,8 (m/s²)
Gewicht m=5 (kg)
ℓ_1=200 (mm)
ℓ_2=150 (mm)

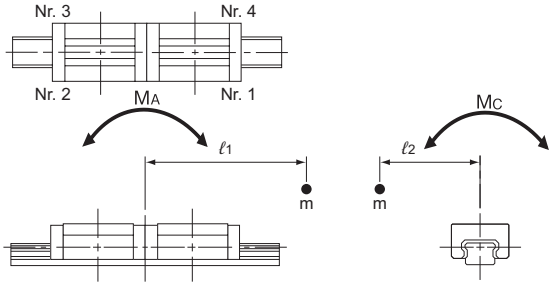


Abb. 7 Wenn zwei Führungswagen eng zusammengesetzt verwendet werden

No. 1 $P_1=\frac{mg}{2}+K_{AR2}\cdot mg\cdot \ell_1+K_{CR}\cdot \frac{mg\cdot \ell_2}{2}=\frac{49}{2}+0{,}0217\times 49\times 200+0{,}0995\times \frac{49\times 150}{2}=602{,}9$ (N)

No. 2 $P_2=\frac{mg}{2}-K_{AL2}\cdot mg\cdot \ell_1+K_{CR}\cdot \frac{mg\cdot \ell_2}{2}=\frac{49}{2}-0{,}0182\times 49\times 200+0{,}0995\times \frac{49\times 150}{2}=211{,}9$ (N)

No. 3 $P_3=\frac{mg}{2}-K_{AL2}\cdot mg\cdot \ell_1-K_{CL}\cdot \frac{mg\cdot \ell_2}{2}=\frac{49}{2}-0{,}0182\times 49\times 200-0{,}0835\times \frac{49\times 150}{2}=-460{,}7$ (N)

No. 4 $P_4=\frac{mg}{2}+K_{AR2}\cdot mg\cdot \ell_1-K_{CL}\cdot \frac{mg\cdot \ell_2}{2}=\frac{49}{2}+0{,}0217\times 49\times 200-0{,}0835\times \frac{49\times 150}{2}=-69{,}7$ (N)

Hinweis 1: Da eine Linearführung in Vertikalmontage nur eine Momentbelastung aufnimmt, ist das Einwirken einer Belastungskraft (mg) nicht erforderlich.

[Zweiachsige Anwendung]

● Festlegung der Einsatzbedingungen

Die Festlegung der Einsatzbedingungen ist für die Bestimmung der nominellen Lebensdauer und der Belastung eines Linearführungssystems notwendig. Folgende Bedingungen werden dabei berücksichtigt:

(1) Gewicht: m (kg)
(2) Richtung der Gewichtskraft:
(3) Lage des Arbeitspunkts (z.B. Schwerpunkt): ℓ_2, ℓ_3, h_1 (mm)
(4) Antriebsposition: ℓ_4, h_2 (mm)
(5) Anordnung des Linearführungssystems: ℓ_0, ℓ_1 (mm)
(Anzahl von Einheiten und Achsen)
(6) Geschwindigkeitsdiagramm
Geschwindigkeit: V (mm/s)
Zeitkonstante: t_n (s)
Beschleunigung: α_n (mm/s^2)

$$(\alpha_n = \frac{V}{t_n})$$

(7) Arbeitszyklus
Anzahl der Doppelhübe pro Minute: N_1 (min^{-1})
(8) Hublänge: ℓ_s (mm)
(9) Durchschnittsgeschwindigkeit: V_m (m/s)
(10) Erforderliche nominelle Lebensdauer in Stunden: L_{10h}

Erdbeschleunigung g=9,8 (m/s^2)

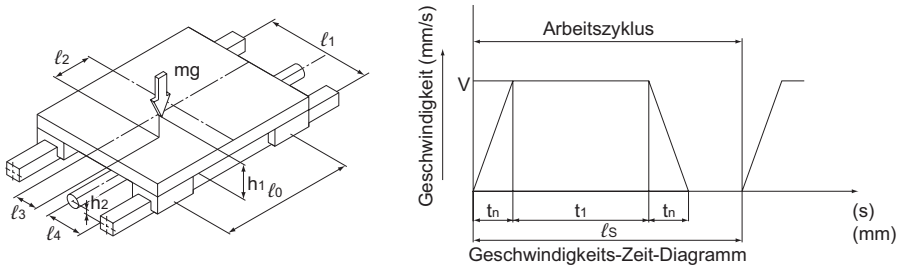


Abb. 8 Bedingung

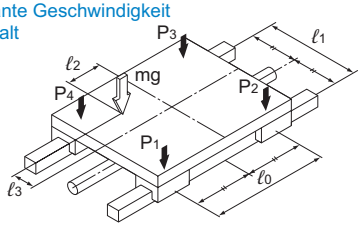
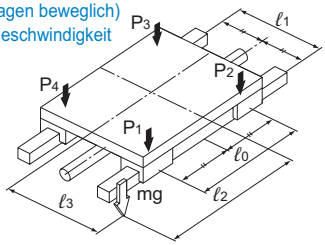
● Formel für die einwirkende Belastung

Die auf ein Linearführungssystem einwirkenden Belastungen sind abhängig von der Schwerpunktlage des Objektes, der Antriebsposition, der Beschleunigung und Verzögerung beim Anfahren und Halten, den Bearbeitungskräften sowie anderen äußeren Kräften. Diese Parameter müssen alle ausreichend bei der Auslegung eines Linearführungssystems berücksichtigt werden. Bei den folgenden zehn Beispielen werden die Belastungen für Linearführungssysteme bei unterschiedlichen Einsatzbedingungen bestimmt.

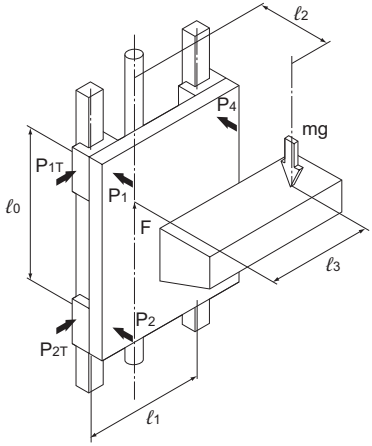
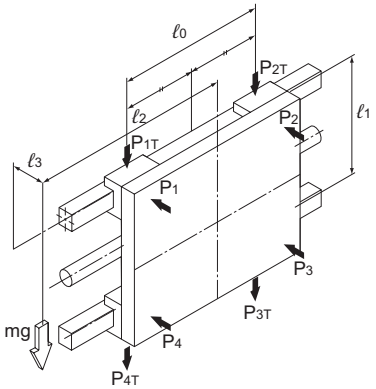
m	:	Gewicht	(kg)
ℓ_n	:	Verfahrweg	(mm)
F_n	:	Äußere Kraft	(N)
P_n	:	Einwirkende Belastung (radial/gegenradiale Richtung)	(N)
P_{nT}	:	Einwirkende Belastung (tangentiale Richtungen)	(N)
g	:	Erdbeschleunigung (g =9,8m/s^2)	(m/s^2)
V	:	Geschwindigkeit	(m/s)
t_n	:	Zeitkonstante	(s)
α_n	:	Beschleunigung	(m/s^2)

$$(\alpha_n = \frac{V}{t_n})$$

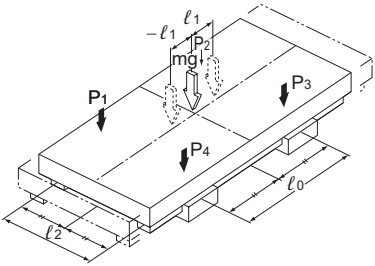
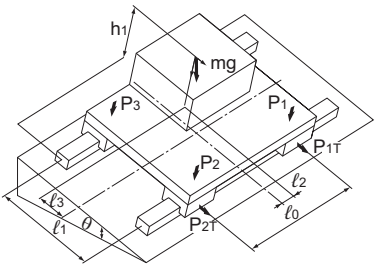
[Beispiel]

	Bedingung	Formel für die einwirkende Belastung
1	Horizontale Einbaulage (Führungswagen beweglich) Konstante Geschwindigkeit oder Halt  	$P_1 = \frac{mg}{4} + \frac{mg \cdot \ell_2}{2 \cdot \ell_0} - \frac{mg \cdot \ell_3}{2 \cdot \ell_1}$ $P_2 = \frac{mg}{4} - \frac{mg \cdot \ell_2}{2 \cdot \ell_0} - \frac{mg \cdot \ell_3}{2 \cdot \ell_1}$ $P_3 = \frac{mg}{4} - \frac{mg \cdot \ell_2}{2 \cdot \ell_0} + \frac{mg \cdot \ell_3}{2 \cdot \ell_1}$ $P_4 = \frac{mg}{4} + \frac{mg \cdot \ell_2}{2 \cdot \ell_0} + \frac{mg \cdot \ell_3}{2 \cdot \ell_1}$
2	Horizontale Einbaulage mit überhängender Belastung (Führungswagen beweglich) Konstante Geschwindigkeit oder Halt  	$P_1 = \frac{mg}{4} + \frac{mg \cdot \ell_2}{2 \cdot \ell_0} + \frac{mg \cdot \ell_3}{2 \cdot \ell_1}$ $P_2 = \frac{mg}{4} - \frac{mg \cdot \ell_2}{2 \cdot \ell_0} + \frac{mg \cdot \ell_3}{2 \cdot \ell_1}$ $P_3 = \frac{mg}{4} - \frac{mg \cdot \ell_2}{2 \cdot \ell_0} - \frac{mg \cdot \ell_3}{2 \cdot \ell_1}$ $P_4 = \frac{mg}{4} + \frac{mg \cdot \ell_2}{2 \cdot \ell_0} - \frac{mg \cdot \ell_3}{2 \cdot \ell_1}$

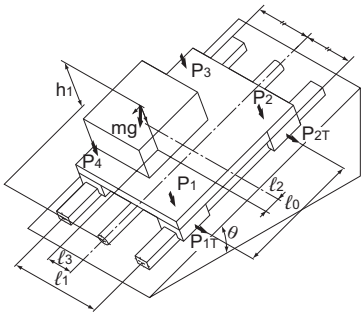
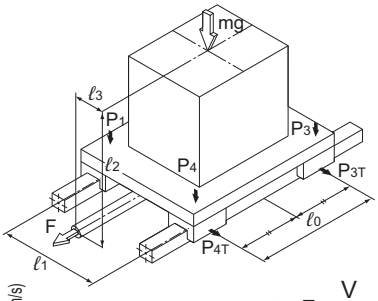
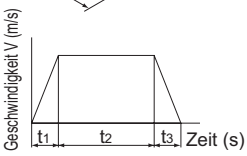
Hinweis: Die Belastung in Richtung des Pfeils ist positiv.

	Bedingung	Formel für die einwirkende Belastung
3	**Vertikale Einbaulage** **Konstante Geschwindigkeit oder Halt**  z.B.: Vertikale Achse eines Industrieroboters, Lackierautomaten, Hebers	$P_1 = P_4 = -\frac{mg \cdot \ell_2}{2 \cdot \ell_0}$ $P_2 = P_3 = \frac{mg \cdot \ell_2}{2 \cdot \ell_0}$ $P_{1T} = P_{4T} = \frac{mg \cdot \ell_3}{2 \cdot \ell_0}$ $P_{2T} = P_{3T} = -\frac{mg \cdot \ell_3}{2 \cdot \ell_0}$
4	**Wandmontage** **Konstante Geschwindigkeit oder Halt**  z.B.: Fahrachse eines Ladeportals	$P_1 = P_2 = -\frac{mg \cdot \ell_3}{2 \cdot \ell_1}$ $P_3 = P_4 = \frac{mg \cdot \ell_3}{2 \cdot \ell_1}$ $P_{1T} = P_{4T} = \frac{mg}{4} + \frac{mg \cdot \ell_2}{2 \cdot \ell_0}$ $P_{2T} = P_{3T} = \frac{mg}{4} - \frac{mg \cdot \ell_2}{2 \cdot \ell_0}$

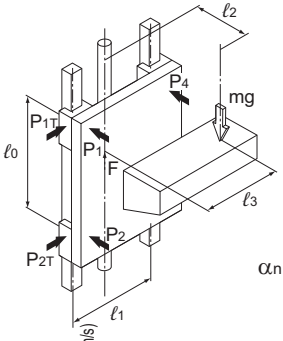
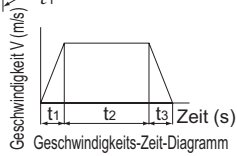
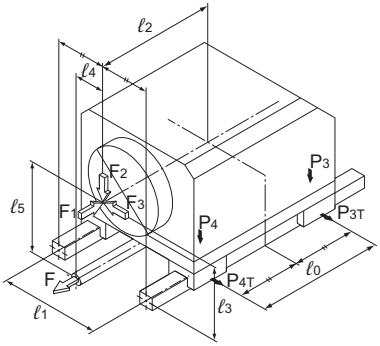
Hinweis: Die Belastung in Richtung des Pfeils ist positiv.

	Bedingung	Formel für die einwirkende Belastung
5	**Führungsschienen beweglich** **Horizontale Einbaulage**  z.B.: XY-Tisch Stapler	P_1 bis P_4 (max) = $\frac{mg}{4} + \frac{mg \cdot \ell_1}{2 \cdot \ell_0}$ P_1 bis P_4 (min) = $\frac{mg}{4} - \frac{mg \cdot \ell_1}{2 \cdot \ell_0}$
6	**Horizontal-Schrägmontage**  z.B.: NC-Drehmaschine Schlitten	$P_1 = + \frac{mg \cdot \cos\theta}{4} + \frac{mg \cdot \cos\theta \cdot \ell_2}{2 \cdot \ell_0} - \frac{mg \cdot \cos\theta \cdot \ell_3}{2 \cdot \ell_1} + \frac{mg \cdot \sin\theta \cdot h_1}{2 \cdot \ell_1}$ $P_{1T} = \frac{mg \cdot \sin\theta}{4} + \frac{mg \cdot \sin\theta \cdot \ell_2}{2 \cdot \ell_0}$ $P_2 = + \frac{mg \cdot \cos\theta}{4} - \frac{mg \cdot \cos\theta \cdot \ell_2}{2 \cdot \ell_0} - \frac{mg \cdot \cos\theta \cdot \ell_3}{2 \cdot \ell_1} + \frac{mg \cdot \sin\theta \cdot h_1}{2 \cdot \ell_1}$ $P_{2T} = \frac{mg \cdot \sin\theta}{4} - \frac{mg \cdot \sin\theta \cdot \ell_2}{2 \cdot \ell_0}$ $P_3 = + \frac{mg \cdot \cos\theta}{4} - \frac{mg \cdot \cos\theta \cdot \ell_2}{2 \cdot \ell_0} + \frac{mg \cdot \cos\theta \cdot \ell_3}{2 \cdot \ell_1} - \frac{mg \cdot \sin\theta \cdot h_1}{2 \cdot \ell_1}$ $P_{3T} = \frac{mg \cdot \sin\theta}{4} - \frac{mg \cdot \sin\theta \cdot \ell_2}{2 \cdot \ell_0}$ $P_4 = + \frac{mg \cdot \cos\theta}{4} + \frac{mg \cdot \cos\theta \cdot \ell_2}{2 \cdot \ell_0} + \frac{mg \cdot \cos\theta \cdot \ell_3}{2 \cdot \ell_1} - \frac{mg \cdot \sin\theta \cdot h_1}{2 \cdot \ell_1}$ $P_{4T} = \frac{mg \cdot \sin\theta}{4} + \frac{mg \cdot \sin\theta \cdot \ell_2}{2 \cdot \ell_0}$

Hinweis: Die Belastung in Richtung des Pfeils ist positiv.

	Bedingung	Formel für die einwirkende Belastung
7	**Vertikal-Schrägmontage**  z.B.: NC-Drehmaschine Werkzeughalter	$P_1 = +\frac{mg\cdot\cos\theta}{4} + \frac{mg\cdot\cos\theta\cdot\ell_2}{2\cdot\ell_0} - \frac{mg\cdot\cos\theta\cdot\ell_3}{2\cdot\ell_1} + \frac{mg\cdot\sin\theta\cdot h_1}{2\cdot\ell_0}$ $P_{1T} = +\frac{mg\cdot\sin\theta\cdot\ell_3}{2\cdot\ell_0}$ $P_2 = +\frac{mg\cdot\cos\theta}{4} - \frac{mg\cdot\cos\theta\cdot\ell_2}{2\cdot\ell_0} - \frac{mg\cdot\cos\theta\cdot\ell_3}{2\cdot\ell_1} - \frac{mg\cdot\sin\theta\cdot h_1}{2\cdot\ell_0}$ $P_{2T} = -\frac{mg\cdot\sin\theta\cdot\ell_3}{2\cdot\ell_0}$ $P_3 = +\frac{mg\cdot\cos\theta}{4} - \frac{mg\cdot\cos\theta\cdot\ell_2}{2\cdot\ell_0} + \frac{mg\cdot\cos\theta\cdot\ell_3}{2\cdot\ell_1} - \frac{mg\cdot\sin\theta\cdot h_1}{2\cdot\ell_0}$ $P_{3T} = -\frac{mg\cdot\sin\theta\cdot\ell_3}{2\cdot\ell_0}$ $P_4 = +\frac{mg\cdot\cos\theta}{4} + \frac{mg\cdot\cos\theta\cdot\ell_2}{2\cdot\ell_0} + \frac{mg\cdot\cos\theta\cdot\ell_3}{2\cdot\ell_1} + \frac{mg\cdot\sin\theta\cdot h_1}{2\cdot\ell_0}$ $P_{4T} = +\frac{mg\cdot\sin\theta\cdot\ell_3}{2\cdot\ell_0}$
8	**Horizontale Einbaulage mit Trägheitskräften**  $\alpha_n = \frac{V}{t_n}$  Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm z.B.: Transportgestell	Bei der Beschleunigung $P_1 = P_4 = \frac{mg}{4} - \frac{m\cdot\alpha_1\cdot\ell_2}{2\cdot\ell_0}$ $P_2 = P_3 = \frac{mg}{4} + \frac{m\cdot\alpha_1\cdot\ell_2}{2\cdot\ell_0}$ $P_{1T} = P_{4T} = \frac{m\cdot\alpha_1\cdot\ell_3}{2\cdot\ell_0}$ $P_{2T} = P_{3T} = -\frac{m\cdot\alpha_1\cdot\ell_3}{2\cdot\ell_0}$ Bei gleichförmiger Bewegung P_1 bis $P_4 = \frac{mg}{4}$ Bei der Verzögerung $P_1 = P_4 = \frac{mg}{4} + \frac{m\cdot\alpha_3\cdot\ell_2}{2\cdot\ell_0}$ $P_2 = P_3 = \frac{mg}{4} - \frac{m\cdot\alpha_3\cdot\ell_2}{2\cdot\ell_0}$ $P_{1T} = P_{4T} = -\frac{m\cdot\alpha_3\cdot\ell_3}{2\cdot\ell_0}$ $P_{2T} = P_{3T} = \frac{m\cdot\alpha_3\cdot\ell_3}{2\cdot\ell_0}$

Hinweis: Die Belastung in Richtung des Pfeils ist positiv.

	Bedingung	Formel für die einwirkende Belastung
9	**Vertikale Einbaulage mit Trägheitskräften**  $\alpha_n = \frac{V}{t_n}$  Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm z.B.: Transportlift	Bei der Beschleunigung $P_1 = P_4 = -\frac{m(g+\alpha_1)\ell_2}{2\cdot\ell_0}$ $P_2 = P_3 = \frac{m(g+\alpha_1)\ell_2}{2\cdot\ell_0}$ $P_{1T} = P_{4T} = \frac{m(g+\alpha_1)\ell_3}{2\cdot\ell_0}$ $P_{2T} = P_{3T} = -\frac{m(g+\alpha_1)\ell_3}{2\cdot\ell_0}$ Bei konstanter Bewegung $P_1 = P_4 = -\frac{mg\cdot\ell_2}{2\cdot\ell_0}$ $P_2 = P_3 = \frac{mg\cdot\ell_2}{2\cdot\ell_0}$ $P_{1T} = P_{4T} = \frac{mg\cdot\ell_3}{2\cdot\ell_0}$ $P_{2T} = P_{3T} = -\frac{mg\cdot\ell_3}{2\cdot\ell_0}$ Bei der Verzögerung $P_1 = P_4 = -\frac{m(g-\alpha_3)\ell_2}{2\cdot\ell_0}$ $P_2 = P_3 = \frac{m(g-\alpha_3)\ell_2}{2\cdot\ell_0}$ $P_{1T} = P_{4T} = \frac{m(g-\alpha_3)\ell_3}{2\cdot\ell_0}$ $P_{2T} = P_{3T} = -\frac{m(g-\alpha_3)\ell_3}{2\cdot\ell_0}$
10	**Horizontale Einbaulage mit Bearbeitungskräften**  z.B.: Bohranlage, Fräsmaschine, Drehmaschine, Bearbeitungszentrum und andere Bearbeitungsmaschinen	Bei Bearbeitungskraft F_1 $P_1 = P_4 = -\frac{F_1\cdot\ell_5}{2\cdot\ell_0}$ $P_2 = P_3 = \frac{F_1\cdot\ell_5}{2\cdot\ell_0}$ $P_{1T} = P_{4T} = \frac{F_1\cdot\ell_4}{2\cdot\ell_0}$ $P_{2T} = P_{3T} = -\frac{F_1\cdot\ell_4}{2\cdot\ell_0}$ Bei Bearbeitungskraft F_2 $P_1 = P_4 = \frac{F_2}{4} + \frac{F_2\cdot\ell_2}{2\cdot\ell_0}$ $P_2 = P_3 = \frac{F_2}{4} - \frac{F_2\cdot\ell_2}{2\cdot\ell_0}$ Bei Bearbeitungskraft F_3 $P_1 = P_2 = \frac{F_3\cdot\ell_3}{2\cdot\ell_1}$ $P_3 = P_4 = -\frac{F_3\cdot\ell_3}{2\cdot\ell_1}$ $P_{1T} = P_{4T} = -\frac{F_3}{4} - \frac{F_3\cdot\ell_2}{2\cdot\ell_0}$ $P_{2T} = P_{3T} = -\frac{F_3}{4} + \frac{F_3\cdot\ell_2}{2\cdot\ell_0}$

Hinweis: Die Belastung in Richtung des Pfeils ist positiv.