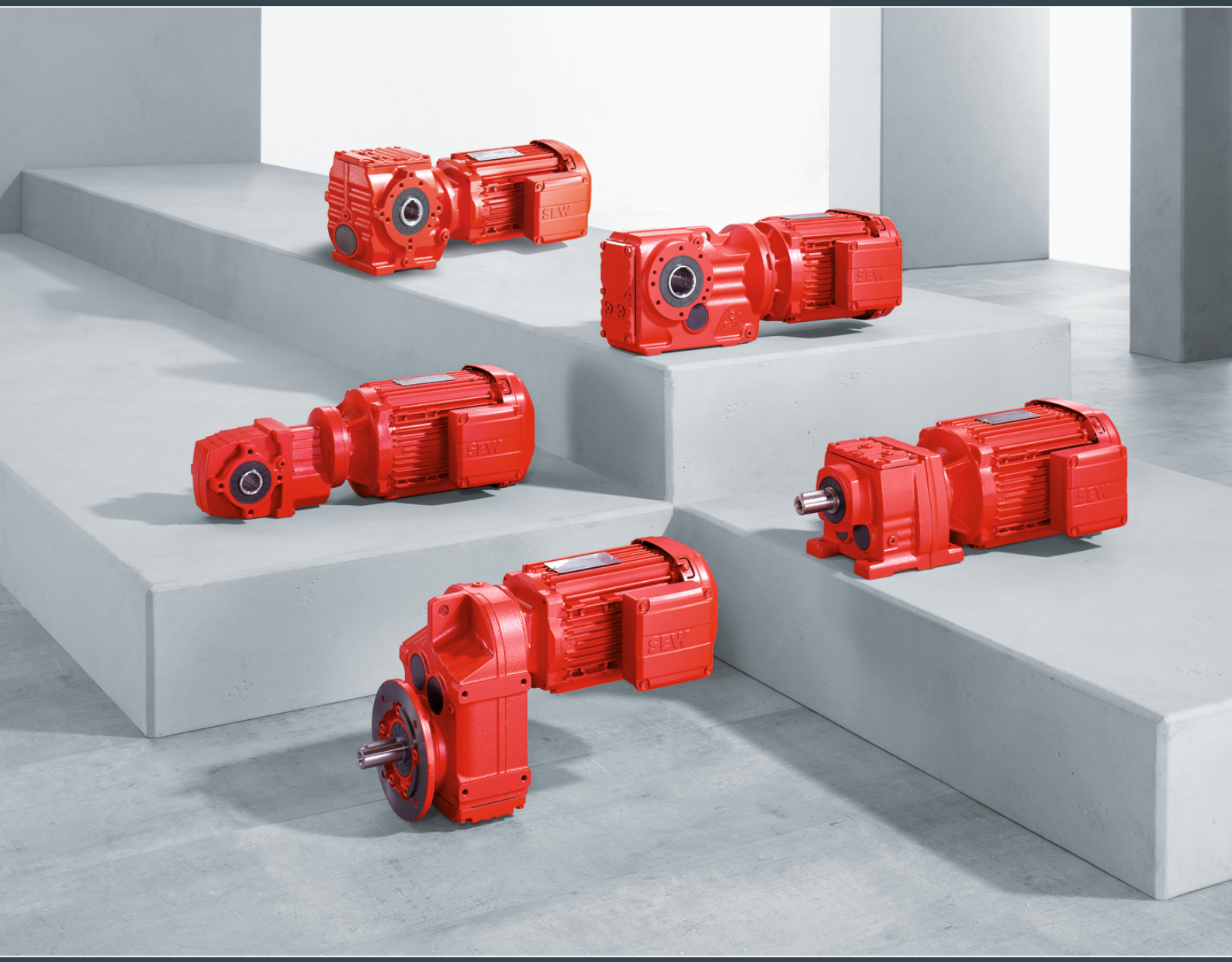
SEW EURODRIVE

Formelsammlung



Praxis der Antriebstechnik

Geregelte und ungeregelte Antriebe projektieren

Ausgabe 08/2019

29121043/DE



Inhaltsverzeichnis

1 Inhalt und Aufbau 5
1.1 Formelzeichen und Indizes 5
1.1.1 Häufig verwendete Indizes 6
1.1.2 Formeln und Einheiten 7

2 Allgemeine applikationsseitige Berechnungen 8
2.1 Fahrdynamik 8
2.2 Abtriebsdrehzahl und Übersetzungsanforderung 9
2.3 Kräfte und Drehmomente 10
2.4 Massenträgheitsmoment 11
2.5 Wirkungsgrad 11
2.6 Sonderfall Spindelantrieb 12

3 Projektierung geregelter Antriebe 13
3.1 Getriebe 13
3.1.1 Abtriebsseitige Drehmomente nach Fahrabschnitten 13
3.1.2 Querkraft 13
3.2 Motor 13
3.2.1 Motordrehzahl 13
3.2.2 Motordrehmomente 14
3.2.3 Maximale Motorauslastung 14
3.2.4 Thermische Motorauslastung 15
3.3 Bremse 15
3.3.1 Bremsarbeit 15
3.3.2 Bremseneinfalldrehzahl 16
3.3.3 Standzeit bis zur Inspektion 16
3.3.4 Getriebebelastung bei Not-Halt-Bremsung 16
3.3.5 Querkraft bei Not-Halt-Bremsung 17
3.3.6 Zulässige Not-Halt-Kennwerte 17
3.4 Frequenzumrichter 18
3.4.1 Maximaler und effektiver Motorstrom 18
3.4.2 Bremswiderstand (optional) 19

4 Projektierung ungeregelter Antriebe 20
4.1 Leistungsberechnung 20
4.2 Motor 21
4.2.1 Motoranlauf 21
4.2.2 Anlaufverhalten 22
4.2.3 Schalthäufigkeit 22
4.3 Bremse 22
4.3.1 Bremsarbeit 23
4.3.2 Bremseneinfalldrehzahl 23
4.3.3 Standzeit bis zur Inspektion 23
4.3.4 Weiterführende Auswahlkriterien der Bremse 24
4.4 Getriebe 25
4.4.1 Vorauswahl 25

29121043/DE – 08/2019

4.4.2 Berechnung der tatsächlichen Getriebebelastung 26

5 Tabellenanhang 27

5.1 Querkraft-Zuschlagsfaktor f_Z verschiedener Übertragungselemente 27

5.2 Massenträgheitsmomente verschiedener geometrischer Körper 27

5.3 Wirkungsgrade von Übertragungselementen 28

5.4 Spindelwirkungsgrade 28

5.5 Lagerreibwerte 28

5.6 Beiwerte für Spur- und Seitenreibung 28

5.7 Reibwerte verschiedener Werkstoffpaarungen 29

5.8 Rollreibung (Hebelarm der Rollreibung) 29

6 Zeichenlegende 30

Stichwortverzeichnis 37

29121043/DE – 08/2019

1 Inhalt und Aufbau

Die vorliegende Formelsammlung bezieht sich auf das Projektierungshandbuch "Praxis der Antriebstechnik - Geregelte und ungeregelte Antriebe projektieren".

Thematischer Aufbau

Die Formelsammlung behandelt die folgenden Themen:

- Allgemeine applikationsseitige Berechnungen
- Projektierung geregelter Antriebe
- Projektierung ungeregelter Antriebe

1.1 Formelzeichen und Indizes

Die verwendeten Formelzeichen und Indizes sind möglichst sprachneutral und darauf ausgerichtet, alle relevanten Informationen im Index mitzuführen. Dies verbessert die Verständlichkeit und hilft, Größen untereinander einfach unterscheiden zu können.

Der Index ist modular aufgebaut und setzt sich meist aus mehreren Bestandteilen zusammen. Beginnend mit einem Kürzel für die betrachtete Komponente des Antriebsstrangs können bis zu zwei weitere Zusätze folgen, die z. B. einen zulässigen Produktkennwert benennen oder den Betrachtungsrahmen abbilden.

Die Applikation bildet eine Ausnahme, sie wird nicht mit einem eigenen Kürzel versehen, da sie über den gesamten Projektierungsablauf immer im Fokus steht. Lediglich bei bestimmten Themen wird die Applikation zur besseren Unterscheidung gegenüber anderen Größen indiziert.

Beispiel: Bedeutung des Formelzeichens $M_{G_per_es}$

Das Formelzeichen $M_{G_per_es}$ steht für das zulässige Not-Halt-Drehmoment am Getriebeabtrieb und ist folgendermaßen aufgebaut.

	Bedeutung
M	Physikalische Größe, hier: Drehmoment
G	Komponente des Antriebsstrangs, hier: Getriebe
per	Zulässiger Produktkennwert (per = permitted)
es	Betriebs- oder Betrachtungszustand, hier: Bezug auf Not-Halt-Bremsung (es = emergency stop)

29121043/DE – 08/2019

1.1.1 Häufig verwendete Indizes

Folgende Kürzel werden im Index verwendet:

- Die betrachtete Komponente des Antriebsstrangs.

Index	Bedeutung (Komponente)
G	Getriebe
Mot	Motor
B	Bremse
FU	Frequenzumrichter
BW	Bremswiderstand

- Verschiedene Produktkenngrößen.

Index	Bedeutung
per	Zulässiger Produktkennwert
N	Bemessungswert gemäß Typenschild

- Betriebs- oder Betrachtungszustand.

Index	Bedeutung
es	Bezug auf Not-Halt-Ereignis
B	Bezug auf mechanische Bremsung
H	Bezug auf Motorhochlauf
’	Bezug auf den generatorischen Betrieb (z. B. M'_{Mot_stat})
x	Physikalische Größe, reduziert auf die Motorwelle (J_x = Massenträgheitsmoment der Last reduziert auf die Motorwelle)
gen	Generatorischer Fahrabschnitt
n	Allgemeiner Fahrabschnitt. "n" kann ersetzt werden durch: • "ac" (acceleration) für den Fahrabschnitt "Beschleunigung" • "const" (constant speed) für den Fahrabschnitt "Konstantfahrt" • "dec" (deceleration) für den Fahrabschnitt "Verzögerung" • eine Zahl: 1, ... Zahlen nummerieren die Fahrabschnitte fortlaufend, z. B. zur Berechnung des effektiven Motordrehmoments.

Die folgenden Formelzeichen weichen von dieser modularen Indizierung ab, da sie als Begrifflichkeiten fest etabliert sind:

- M_{a_max} = dauerhaft zulässiges Abtriebsdrehmoment des Getriebes
- i_G = Getriebeübersetzung
- F_R = Querkraft am Getriebeabtrieb
- F_A = Axialkraft am Getriebeabtrieb
- t_2 = Bremseneinfallzeit

29121043/DE – 08/2019

1.1.2 Formeln und Einheiten

Die Gestaltung der Formeln entspricht der DIN-Norm 1338 für Formelschreibweise und Formelsatz. Die Einheit der physikalischen Größen in den Formeln ist jeweils neben der Formel angegeben (z. B. [P] = kW). Es werden die in der elektrischen Antriebstechnik gängigen, an die SI-Einheiten oder von ihnen abgeleiteten Einheiten verwendet.

Die sich aus der Umrechnung der Einheiten ergebenden Faktoren sind einheitenlos in die Formel integriert. Das Multiplikationszeichen wird immer als "x" dargestellt.

Beispiel: Leistung

Als Beispiel dient die Berechnung der Leistung P aus Drehmoment M und Drehzahl n. Die Leistung soll direkt in Kilowatt berechnet werden, obwohl die Drehzahl in Umdrehungen pro Minute und das Drehmoment in Newtonmeter in die Formel eingeht. Durch den in der Formel einheitenlosen Umrechnungsfaktor von 9550 (gerundeter Wert) können die gängigen Einheiten direkt verwendet werden.

Leistung	
$P = \frac{M \times n}{9550}$	[P] = kW [M] = Nm [n] = min^{-1}

29121043/DE – 08/2019

2 Allgemeine applikationsseitige Berechnungen

2.1 Fahrdynamik

Statische Bewegungsgleichungen	
Lineare Bewegung: $v = const.$ $s = v \times t$	[s] = m [t] = s [v] = m s^{-1} [ω] = s^{-1} [φ] = rad = 1
Rotative Bewegung: $\omega = const.$ $\varphi = \omega \times t$	

Dynamische Bewegungsgleichungen	
Lineare Bewegung: $a = const.$ $v = a \times t$ $s = \frac{1}{2} \times a \times t^2 = \frac{1}{2} \times v \times t$	[a] = m s^{-2} [s] = m [t] = s [v] = m s^{-1} [α] = s^{-2} [ω] = s^{-1} [φ] = rad = 1
Rotative Bewegung: $\alpha = const.$ $\omega = \alpha \times t$ $\varphi = \frac{1}{2} \times \alpha \times t^2 = \frac{1}{2} \times \omega \times t$	

Zusammenhang lineare und rotative Größen	
Winkelgeschwindigkeit: $\omega = \frac{v}{r}$	[a] = m s^{-2} [r] = m [v] = m s^{-1} [α] = s^{-2} [ω] = s^{-1}
Winkelbeschleunigung: $\alpha = \frac{a}{r}$	

29121043/DE – 08/2019

2.2 Abtriebsdrehzahl und Übersetzungsanforderung

Abtriebsdrehzahl in Abhängigkeit der Winkelgeschwindigkeit	
Drehzahl: $n = \frac{\omega \times 60}{2\pi}$	$[n] = min^{-1}$ $[\omega] = s^{-1}$

Abtriebsdrehzahl in Abhängigkeit der linearen Geschwindigkeit	
Drehzahl: $n = \frac{v \times 60000}{\pi \times d}$	$[d] = mm$ $[n] = min^{-1}$ $[v] = m\ s^{-1}$

Abtriebsdrehzahl bei Applikationen mit Vorgelegen	
Abtriebsdrehzahl des Getriebes: $n_G = n_v \times i_v$	$[i_V] = 1$ $[n_G] = min^{-1}$ $[n_V] = min^{-1}$

Übersetzungsanforderung	
Ideale Getriebeübersetzung: $i_{G_id} = \frac{n_{Mot}}{n_G}$	$[i_{G_id}] = 1$ $[n_G] = min^{-1}$ $[n_{Mot}] = min^{-1}$

29121043/DE – 08/2019

2.3 Kräfte und Drehmomente

Statische Kräfte	
Haft- oder Gleitreibungskraft für horizontale Bewegung: $F_f = F_N \times \mu = m \times g \times \mu$	[c] = 1 [d] = mm [d_b] = mm [f] = mm [g] = m s^{-2} [F_f] = N [F_{f_b}] = N [F_{f_r}] = N [F_{f_t}] = N [F_G] = N [F_H] = N [F_N] = N [F_{tr}] = N [m] = kg [r] = mm [β] = ° oder rad [μ] = 1 [μ_{f_r}] = 1 [μ_{f_b}] = 1 [μ_{tr}] = 1
Lagerreibungskraft: $F_{f_b} = F_N \times \mu_{f_b} = m \times g \times \mu_{f_b}$	
Rollreibungskraft: $F_{f_r} = F_N \times \frac{f}{r} = F_N \times \mu_{f_r} = m \times g \times \frac{2f}{d}$	
Spurreibungskraft: $F_{f_t} = F_N \times c = m \times g \times c$	
Fahrwiderstandskraft (gleichzeitiges Auftreten von Lager-, Roll- und Spurreibung): $F_{tr} = F_N \times \left(\frac{2}{d} \times \left(\mu_{f_b} \times \frac{d_b}{2} + f \right) + c \right) = m \times g \times \mu_{tr}$	
Normalkraft in der Horizontalen: $F_N = m \times g$	
Normalkraft an der schiefen Ebene: $F_N = m \times g \times \cos \beta$	
Erdanziehungskraft: $F_G = m \times g$	
Hangabtriebskraft: $F_H = m \times g \times \sin \beta$	

Dynamische Kräfte und Drehmomente	
Beschleunigungskraft: $F_{dyn} = m \times a$	[a] = m s^{-2} [F_{dyn}] = N [m] = kg
Beschleunigungsdrehmoment: $M_{dyn} = J \times \alpha$	[J] = kgm^2 [M_{dyn}] = Nm [α] = s^{-2}

29121043/DE – 08/2019

2.4 Massenträgheitsmoment

Massenträgheitsmoment bei paralleler Drehachse	
Steinerscher Satz: $J = J_{cg} + m \times x^2$	$[J] = kgm^2$ $[J_{cg}] = kgm^2$ $[m] = kg$ $[x] = m$

Massenträgheitsmoment der Last reduziert auf die Motorwelle	
Rotative Bewegung: $J_x = \frac{J}{i_{tot}^2} = J \times \left(\frac{n_L}{n_{Mot}} \right)^2$	$[i_{tot}] = 1$ $[J] = kgm^2$ $[J_x] = kgm^2$ $[m] = kg$ $[n_L] = min^{-1}$ $[n_{Mot}] = min^{-1}$ $[v] = m\ s^{-1}$
Lineare Bewegung: $J_x = 91.2 \times m \times \left(\frac{v}{n_{Mot}} \right)^2$	

2.5 Wirkungsgrad

Berücksichtigung der Wirkungsgrade	
Motorischer Betrieb: $F_\eta = \frac{F}{\eta}$ $M_\eta = \frac{M}{\eta}$	$[F] = N$ $[F_\eta] = N$ $[F'_\eta] = N$ $[M] = Nm$ $[M_\eta] = Nm$ $[M'_\eta] = Nm$ $[\eta] = 1$ $[\eta'] = 1$
Generatorischer Betrieb: $F'_\eta = F \times \eta'$ $M'_\eta = M \times \eta'$	

29121043/DE – 08/2019

2.6 Sonderfall Spindelantrieb

Drehzahl einer Spindel	
$n = \frac{v \times 60000}{p}$	[n] = min^{-1} [p] = mm [v] = m s^{-1}

Drehmoment einer Spindel	
Motorischer Betrieb: $M = \frac{F \times p}{2\pi \times \eta_{Spi} \times 1000}$	[F] = N [M] = Nm [p] = mm [η_{Spi}] = 1
Generatorischer Betrieb: $M = \frac{F \times p}{2\pi \times 1000} \times \eta_{spi}$	

Reduziertes Lastträgheitsmoment am Spindelantrieb	
Bei bekannter Geschwindigkeit und Motordrehzahl: $J_x = 91.2 \times m \times \left(\frac{v}{n_{Mot}} \right)^2$	[J_x] = kgm^2 [m] = kg [n_{Mot}] = min^{-1} [p] = mm [v] = m s^{-1}
Bei bekannter Spindelsteigung: $J_x = m \times \left(\frac{p}{2000 \times \pi} \right)^2$	

29121043/DE – 08/2019

3 Projektierung geregelter Antriebe

3.1 Getriebe

3.1.1 Abtriebsseitige Drehmomente nach Fahrabschnitten

Fahrabschnitt	Horizontal-, Dreh- oder Vertikalbewegung aufwärts
Beschleunigung	$M_{ac} = M_{stat} + M_{dyn} = F_{stat} \times r + F_{dyn} \times r$
Konstante Geschwindigkeit	$M_{const} = M_{stat} = F_{stat} \times r$
Verzögerung	$M_{dec} = M_{stat} - M_{dyn} = F_{stat} \times r - F_{dyn} \times r$

Fahrabschnitt	Vertikalbewegung abwärts
Beschleunigung	$M_{ac} = - M_{stat} + M_{dyn} = -F_{stat} \times r + F_{dyn} \times r$
Konstante Geschwindigkeit	$M_{const} = - M_{stat} = - F_{stat} \times r$
Verzögerung	$M_{dec} = - M_{stat} - M_{dyn} = - F_{stat} \times r - F_{dyn} \times r$

Drehmoment am Getriebeabtrieb inklusive Lastwirkungsgrad	
$M_n > 0$, motorisch: $M_{G_n} = \frac{M_n}{\eta_L}$	$[M_{G_n}] = Nm$ $[M'_{G_n}] = Nm$ $[M_n] = Nm$ $[\eta_L] = 1$
$M_n < 0$, generatorisch: $M'_{G_n} = M_n \times \eta_L$	

3.1.2 Querkraft

Querkraft am Getriebeabtrieb	
$F_R = \frac{M_{G_max} \times 2000}{d} \times f_Z$ Zuschlagsfaktor f_Z siehe Kapitel "Tabellenanhang" (→ 🗎 27)	$[d] = mm$ $[f_Z] = 1$ $[F_R] = N$ $[M_{G_max}] = Nm$

3.2 Motor

3.2.1 Motordrehzahl

Motordrehzahl (Sollwertvorgabe)	
$n_{Mot} = n_G \times i_G$	$[i_G] = 1$ $[n_G] = min^{-1}$ $[n_{Mot}] = min^{-1}$

29121043/DE – 08/2019

3.2.2 Motordrehmomente

Motordrehmoment inklusive Getriebewirkungsgrad	
M_{Mot_n} > 0, motorisch: $M_{Mot_n} = \frac{M_{G_n}}{i_G \times \eta_G}$	$[i_G] = 1$ $[M_{G_n}] = Nm$ $[M'_{G_n}] = Nm$ $[M_{Mot_n}] = Nm$ $[M'_{Mot_n}] = Nm$ $[\eta_G] = 1$ $[\eta'_G] = 1$
M'_{Mot_n} < 0, generatorisch: $M'_{Mot_n} = \frac{M'_{G_n}}{i_G} \times \eta'_G$	

3.2.3 Maximale Motorauslastung

Dynamisches Drehmoment zur Eigenbeschleunigung des Motors	
$M_{Mot_iac} = J_{Mot} \times \frac{n_{Mot}}{9.55 \times t_{ac}}$	$[J_{Mot}] = kgm^2$ $[M_{Mot_iac}] = Nm$ $[n_{Mot}] = min^{-1}$ $[t_{ac}] = s$

Gesamtdrehmoment des Motors	
Fahrabschnitt "Beschleunigung": $M_{Mot_ac_tot} = M_{Mot_ac} + M_{Mot_iac}$	$[M_{Mot_ac}] = Nm$ $[M_{Mot_ac_tot}] = Nm$ $[M_{Mot_iac}] = Nm$ $[M_{Mot_dec}] = Nm$ $[M'_{Mot_dec}] = Nm$ $[M_{Mot_dec_tot}] = Nm$ $[M'_{Mot_dec_tot}] = Nm$
Fahrabschnitt "Verzögerung": • Motorischer Betrieb $M_{Mot_dec_tot} = M_{Mot_dec} - M_{Mot_iac}$ • Generatorischer Betrieb: $M'_{Mot_dec_tot} = M'_{Mot_dec} - M_{Mot_iac}$	

29121043/DE – 08/2019

3.2.4 Thermische Motorauslastung

Mittlere Drehzahl	
Mittlere Geschwindigkeit: $\bar{v} = \frac{v_1 \times t_1 + ... + v_n \times t_n}{t_1 + ... + t_n} = \frac{s_1 + ... + s_n}{t_1 + ... + t_n} = \frac{s_{tot}}{t_{tot}}$	[d] = mm $[i_G]$ = 1 $[\bar{n}_G]$ = min^{-1} $[\bar{n}_{Mot}]$ = min^{-1} $[\bar{v}, v_n]$ = m s^{-1} $[s_{tot}, s_n]$ = m $[t_{tot}, t_n]$ = s
Mittlere Abtriebsdrehzahl: $\bar{n}_G = \frac{\bar{v} \times 60000}{\pi \times d}$	
Mittlere Motordrehzahl: $\bar{n}_{Mot} = \bar{n}_G \times i_G$	

Effektives Motordrehmoment	
$M_{Mot_eff} = \sqrt{\frac{M^2_{Mot_1_tot} \times t_1 + M^2_{Mot_2_tot} \times t_2 + ... + M^2_{Mot_n_tot} \times t_n}{t_1 + t_2 + ... + t_n}}$	$[M_{Mot_eff}]$ = Nm $[M_{Mot_n_tot}]$ = Nm $[t_n]$ = s

3.3 Bremse

3.3.1 Bremsarbeit

Bremsarbeit im Not-Halt-Fall	
Horizontal oder rotativ: $W_{B_es} = \frac{M_B}{M_B + M'_{Mot_stat}} \times \frac{(J_{Mot} + J_x \times \eta_L \times \eta'_G) \times n^2_{B_es}}{182.5}$	$[J_{Mot}]$ = kgm^2 $[J_x]$ = kgm^2 $[M_B]$ = Nm $[M'_{Mot_stat}]$ = Nm $[n_{B_es}]$ = min^{-1} $[W_{B_es}]$ = J $[\eta_L]$ = 1 $[\eta'_G]$ = 1
Vertikal abwärts: $W_{B_es} = \frac{M_B}{M_B - M'_{Mot_stat}} \times \frac{(J_{Mot} + J_x \times \eta_L \times \eta'_G) \times n^2_{B_es}}{182.5}$	

29121043/DE – 08/2019

3.3.2 Bremseneinfalldrehzahl

Drehzahldifferenz bei Bremseneinfall	
$n_{dif} = \frac{9.55 \times M'_{Mot_stat} \times t_2}{J_{Mot} + J_x \times \eta_L \times \eta'_G}$ Bremseneinfallzeit, je nach Verschaltung der Bremse: • $t_{2,I}$ = Bremseneinfallzeit für wechselstromseitige Abschaltung • $t_{2,II}$ = Bremseneinfallzeit für gleich- und wechselstromseitige Abschaltung	$[J_{Mot}]$ = kgm² $[J_x]$ = kgm² $[M'_{Mot_stat}]$ = Nm $[n_{dif}]$ = min^{-1} $[t_2]$ = s $[\eta_L]$ = 1 $[\eta'_G]$ = 1

Bremseneinfalldrehzahl im Not-Halt-Fall	
$n_{B_es} = n_{Mot} + n_{dif}$	$[n_{B_es}]$ = min^{-1} $[n_{dif}]$ = min^{-1} $[n_{Mot}]$ = min^{-1}

3.3.3 Standzeit bis zur Inspektion

Anzahl der zulässigen Not-Halt-Bremsungen	
$N_{B_insp} = \frac{W_{B_insp}}{W_{B_es} \times f_W}$	$[f_W]$ = 1 $[N_{B_insp}]$ = 1 $[W_{B_insp}]$ = J $[W_{B_es}]$ = J

3.3.4 Getriebebelastung bei Not-Halt-Bremsung

Abtriebsdrehmoment bei Not-Halt-Bremsung	
Horizontal oder rotativ: $M_{G_es} = \frac{i_G}{\eta'_G}\left[\left(M_B + M'_{Mot_stat}\right) \times \frac{\frac{J_x \times \eta_L \times \eta'_G}{J_{Mot}}}{\frac{J_x \times \eta_L \times \eta'_G}{J_{Mot}} + 1} - M'_{Mot_stat}\right]$	$[i_G]$ = 1 $[J_{Mot}]$ = kgm² $[J_x]$ = kgm² $[M_B]$ = Nm $[M_{G_es}]$ = Nm $[M'_{Mot_stat}]$ = Nm $[\eta'_G]$ = 1 $[\eta_L]$ = 1
Vertikal abwärts: $M_{G_es} = \frac{i_G}{\eta'_G}\left[\left(M_B - M'_{Mot_stat}\right) \times \frac{\frac{J_x \times \eta_L \times \eta'_G}{J_{Mot}}}{\frac{J_x \times \eta_L \times \eta'_G}{J_{Mot}} + 1} + M'_{Mot_stat}\right]$	

29121043/DE – 08/2019

3.3.5 Querkraft bei Not-Halt-Bremsung

Aufzunehmende Querkraft bei Not-Halt-Bremsung	
$F_{R_es} = \frac{M_{G_es} \times 2000}{d} \times f_z$	[d] = mm [f_Z] = 1 [F_{R_es}] = N [M_{G_es}] = Nm

3.3.6 Zulässige Not-Halt-Kennwerte

Zulässiges Abtriebsdrehmoment bei Not-Halt-Bremsung für verschiedene Betriebsfaktoren f_B	
• $f_B \leq 2.5$: $M_{G_per_es} = 1.7 \times M_{a_max}$ • $f_B > 2.5$: $M_{G_per_es} = 1.7 \times i_G \times 2.5 \times M_N$	[f_B] = 1 [i_G] = 1 [M_{a_max}] = Nm [$M_{G_per_es}$] = Nm [M_N] = Nm

Zulässige Querkraft am Getriebeabtrieb bei Not-Halt-Bremsung	
$F_{R_per_es} = 1.7 \times F_{R_per}$	[F_{R_per}] = N [$F_{R_per_es}$] = N

29121043/DE – 08/2019

3.4 Frequenzumrichter

3.4.1 Maximaler und effektiver Motorstrom

Genaue Berechnung des Motorstroms	
$I_{Mot} = \sqrt{\left(\frac{M_{Mot}}{M_N} \times I_{q_N}\right)^2 + I_d^2}$	$[I_d]$ = A $[I_{Mot}]$ = A $[I_{q_N}]$ = A $[M_{Mot}]$ = Nm $[M_N]$ = Nm

Abschätzung Motorstrom	
$I_{Mot} = I_N \times \frac{M_{Mot}}{M_N}$	$[I_{eff}]$ = A $[I_{max}]$ = A $[I_{Mot}]$ = A $[I_N]$ = A $[M_{Mot}]$ = Nm $[M_{Mot_ac_tot}]$ = Nm $[M_{Mot_eff}]$ = Nm $[M_N]$ = Nm
Maximal erforderlicher Motorstrom zur Auswahl des Frequenzumrichters: $I_{max} = I_N \times \frac{M_{Mot_ac_tot}}{M_N}$	
Effektiv erforderlicher Motorstrom zur Auswahl des Frequenzumrichters: $I_{eff} = I_N \times \frac{M_{Mot_eff}}{M_N}$	

29121043/DE – 08/2019

3.4.2 Bremswiderstand (optional)

Mittlere Drehzahl	
Fahrabschnitt "Verzögerung": $\bar{n}_{Mot_dec} = \frac{n_{Mot_max}}{2}$	$[M'_{Mot_n_tot}]$ = Nm $[\bar{n}_{Mot_const}]$ = min^{-1} $[\bar{n}_{Mot_dec}]$ = min^{-1} $[n_{Mot_max}]$ = min^{-1} $[\bar{n}_{Mot_n}]$ = min^{-1} $\bar{P}_{gen_n}]$ = kW
Fahrabschnitt "Konstante Geschwindigkeit": $\bar{n}_{Mot_const} = n_{Mot_max}$	
Gemittelte Bremsleistung im generatorischen Fahrabschnitt n: $\bar{P}_{gen_n} = \frac{M'_{Mot_n_tot} \times \bar{n}_{Mot_n}}{9550}$	

Mittlere generatorische Bremsleistung	
$\bar{P}_{gen} = \frac{\sum_{n=gen} \bar{P}_{gen_n} \times t_n}{\sum_{n=gen} t_n} = \frac{\bar{P}_{gen_1} \times t_1 + \bar{P}_{gen_2} \times t_2 + .. \bar{P}_{gen_n} \times t_n}{t_1 + t_2 + .. t_n}$	$[\bar{P}_{gen}]$ = kW $[\bar{P}_{gen_n}]$ = kW $[t_n]$ = s

Generatorische Einschaltdauer	
$ED_{BW} = \frac{\sum_{n=gen} t_n}{t_{tot}} \times 100$	$[ED_{BW}]$ = % $[t_n]$ = s $[t_{tot}]$ = s

Spitzenbremsleistung	
$P_{gen_pk} = \frac{M'_{Mot_dec_tot} \times n_{Mot_max}}{9550}$	$[M'_{Mot_dec_tot}]$ = Nm $[n_{Mot_max}]$ = min^{-1} $[P_{gen_pk}]$ = kW

Maximal zulässiger Bremswiderstandswert	
$R_{BW_max} = \frac{U_{DCL}^2}{P_{gen_pk}}$	$[P_{gen_pk}]$ = W $[R_{BW_max}]$ = Ω $[U_{DC}]$ = V

29121043/DE – 08/2019

4 Projektierung ungeregelter Antriebe

4.1 Leistungsberechnung

Leistung	
Allgemein (lineare Bewegung): $P = \frac{F \times v}{1000}$	
Allgemein (rotative Bewegung): $P = \frac{M \times n}{9550}$	
Statisch (lineare Bewegung): $P_{stat} = \frac{F_{stat} \times v}{1000}$	[F] = N [F_{dyn}] = N [F_{stat}] = N [M] = Nm [M_{dyn}] = Nm [M_{stat}] = Nm [n] = min^{-1} [n_L] = min^{-1} [P] = kW [P_{dyn}] = kW [P_{max}] = kW [P_{Mot_max}] = kW [P_{Mot_stat}] = kW [P_{stat}] = kW [v] = m s^{-1} [η_L] = 1 [η_G] = 1
Statisch (rotative Bewegung): $P_{stat} = \frac{M_{stat} \times n_L}{9550}$	
Dynamisch (lineare Bewegung): $P_{dyn} = \frac{F_{dyn} \times v}{1000}$	
Dynamisch (rotative Bewegung): $P_{dyn} = \frac{M_{dyn} \times n_L}{9550}$	
Maximal erforderliche Leistung der Applikation im Fahrabschnitt "Beschleunigung": $P_{max} = P_{stat} + P_{dyn}$	
Statische Leistung einschließlich Last- und Getriebewirkungsgrad für den Fahrabschnitt "Konstante Geschwindigkeit": $P_{Mot_stat} = \frac{P_{stat}}{\eta_L \times \eta_G}$	
Maximale Leistung der Applikation einschließlich Last- und Getriebewirkungsgrad für den Fahrabschnitt "Beschleunigung": $P_{Mot_max} = \frac{P_{max}}{\eta_L \times \eta_G}$	

29121043/DE – 08/2019

4.2 Motor

4.2.1 Motoranlauf

Statisches Drehmoment	
$M_{Mot_stat} = \frac{P_{Mot_stat} \times 9550}{n_{Mot}}$	$[M_{Mot_stat}]$ = Nm $[n_{Mot}]$ = min^{-1} $[P_{Mot_stat}]$ = kW

Dynamisches Drehmoment	
$M_{dyn} = \frac{J \times n}{9.55 \times t_{ac}}$	$[J]$ = kgm^2 $[n]$ = min^{-1} $[M_{dyn}]$ = Nm $[t_{ac}]$ = s

Hochlaufzeit	
Vertikal aufwärts, horizontal und rotativ: $t_H = \frac{\left(J_{Mot} + \frac{J_x}{\eta_L \times \eta_G} \right) \times n_{Mot}}{9.55 \times \left(M_H - M_{Mot_stat} \right)}$	$[J_{Mot}]$ = kgm^2 $[J_x]$ = kgm^2 $[M_H]$ = Nm $[M_{Mot_stat}]$ = Nm $[n_{Mot}]$ = min^{-1} $[t_H]$ = s $[\eta_L]$ = 1 $[\eta_G]$ = 1

29121043/DE – 08/2019

4.2.2 Anlaufverhalten

Beschleunigung der Applikation bei Motorhochlauf	
$a_H = \frac{v}{t_H}$	$[a_H] = m\ s^{-1}$ $[t_H] = s$ $[v] = m\ s^{-1}$

Maximal zulässige Beschleunigung	
In Abhängigkeit der Massenverteilung auf die angetriebenen Räder: $a_{max} = \frac{m_1}{m_{tot}} \times g \times \mu_{f_st}$	$[a_{max}] = m\ s^{-1}$ $[g] = m\ s^{-1}$ $[m_1] = kg$ $[m_{tot}] = kg$ $[N_1] = 1$ $[N_{tot}] = 1$ $[\mu_{f_st}] = 1$
In Abhängigkeit der Anzahl angetriebener Räder bei gleichmäßiger Massenverteilung: $a_{max} = \frac{N_1}{N_{tot}} \times g \times \mu_{f_st}$	

4.2.3 Schalthäufigkeit

Zulässige Schalthäufigkeit	
Vertikal aufwärts, horizontal oder rotativ: $Z_{per} = Z_0 \times \frac{1 - \frac{M_{Mot_stat}}{M_H}}{\frac{J_{Mot} + \frac{J_x}{\eta_L \times \eta_G}}{J_{Mot}}} \times K_P$	$[J_{Mot}] = kgm^2$ $[J_x] = kgm^2$ $[K_P] = 1$ $[M_H] = Nm$ $[M_{Mot_stat}] = Nm$ $[Z_0] = h^{-1}$ $[Z_{per}] = h^{-1}$ $[\eta_G] = 1$ $[\eta_L] = 1$

4.3 Bremse

Statisches Motordrehmoment (generatorisch)	
$M'_{Mot_stat} = \frac{P_{stat} \times 9550}{n_{Mot}} \times \eta_L \times \eta'_G$	$[M'_{Mot_stat}] = Nm$ $[n_{Mot}] = min^{-1}$ $[P_{stat}] = kW$ $[\eta'_G] = 1$ $[\eta_L] = 1$

29121043/DE – 08/2019

4.3.1 Bremsarbeit

Aufzunehmende Bremsarbeit	
Horizontal oder rotativ: $W_B = \frac{M_B}{M_B + M'_{Mot_stat}} \times \frac{(J_{Mot} + J_x \times \eta_L \times \eta'_G) \times n_B^2}{182.5}$	$[J_{Mot}] = kgm^2$ $[J_x] = kgm^2$ $[M_B] = Nm$ $[M'_{Mot_stat}] = Nm$ $[n_B] = min^{-1}$ $[W_B] = J$ $[\eta_L] = 1$ $[\eta'_G] = 1$
Vertikal abwärts: $W_B = \frac{M_B}{M_B - M'_{Mot_stat}} \times \frac{(J_{Mot} + J_x \times \eta_L \times \eta'_G) \times n_B^2}{182.5}$	

4.3.2 Bremseneinfalldrehzahl

Drehzahldifferenz bei Bremseneinfall	
$n_{dif} = \frac{9.55 \times M'_{Mot_stat} \times t_2}{J_{Mot} + J_x \times \eta_L \times \eta'_G}$ Bremseneinfallzeit, je nach Verschaltung der Bremse: • $t_{2,I}$ = Bremseneinfallzeit für wechselstromseitige Abschaltung • $t_{2,II}$ = Bremseneinfallzeit für gleich- und wechselstromseitige Abschaltung	$[J_{Mot}] = kgm^2$ $[J_x] = kgm^2$ $[M'_{Mot_stat}] = Nm$ $[n_{dif}] = min^{-1}$ $[t_2] = s$ $[\eta_L] = 1$ $[\eta'_G] = 1$

Bremseneinfalldrehzahl	
$n_B = n_{Mot} + n_{dif}$	$[n_B] = min^{-1}$ $[n_{dif}] = min^{-1}$ $[n_{Mot}] = min^{-1}$

4.3.3 Standzeit bis zur Inspektion

Anzahl der zulässigen Bremsungen	
$N_{B_insp} = \frac{W_{B_insp}}{W_B}$	$[N_{B_insp}] = 1$ $[W_B] = J$ $[W_{B_insp}] = J$

29121043/DE – 08/2019

4.3.4 Weiterführende Auswahlkriterien der Bremse

Anhaltezeit	
$t_s = t_2 + t_B$ Bremseneinfallzeit, je nach Verschaltung der Bremse: • $t_{2,I}$ = Bremseneinfallzeit für wechselstromseitige Abschaltung • $t_{2,II}$ = Bremseneinfallzeit für gleich- und wechselstromseitige Abschaltung	$[t_B]$ = s $[t_s]$ = s $[t_2]$ = s

Bremszeit	
Horizontal oder rotativ: $t_B = \frac{(J_{Mot} + J_x \times \eta_L \times \eta'_G) \times n_B}{9.55 \times (M_B + M'_{Mot_stat})}$	$[J_{Mot}]$ = kgm² $[J_x]$ = kgm² $[M_B]$ = Nm $[M'_{Mot_stat}]$ = Nm $[n_B]$ = min^{-1} $[t_B]$ = s $[\eta'_G]$ = 1 $[\eta_L]$ = 1
Vertikal abwärts: $t_B = \frac{(J_{Mot} + J_x \times \eta_L \times \eta'_G) \times n_B}{9.55 \times (M_B - M'_{Mot_stat})}$	

Bremsgeschwindigkeit	
$v_B = \frac{n_B \times d \times \pi}{i_G \times 60000}$	$[d]$ = mm $[i_G]$ = 1 $[n_B]$ = min^{-1} $[v_B]$ = m s^{-1}

Anhalteweg	
Horizontal: $s_B = v_B \times (t_2 + \frac{1}{2} \times t_B)$ Bremseneinfallzeit, je nach Verschaltung der Bremse: • $t_{2,I}$ = Bremseneinfallzeit für wechselstromseitige Abschaltung • $t_{2,II}$ = Bremseneinfallzeit für gleich- und wechselstromseitige Abschaltung	$[s_B]$ = m $[t_B]$ = s $[t_2]$ = s $[v_B]$ = m s^{-1}

Bremsverzögerung	
$a_B = \frac{v_B}{t_B}$	$[a_B]$ = m s^{-2} $[t_B]$ = s $[v_B]$ = m s^{-1}

29121043/DE – 08/2019

4.4 Getriebe

4.4.1 Vorauswahl

Betriebsfaktor	
Definition des Betriebsfaktors: $f_B = \frac{M_{a_max}}{M_N \times i_G}$	$[f_B] = 1$ $[i_G] = 1$ $[M_{a_max}] = Nm$ $[M_N] = Nm$

Stoßgrad	
Massenbeschleunigungsfaktor: $f_a = \frac{J_x}{J_{Mot}}$ Stoßgrad I: gleichförmige Belastung des Getriebes für $f_a \leq 0.2$ Stoßgrad II: ungleichförmige Belastung des Getriebes für $f_a \leq 3$ Stoßgrad III: stark ungleichförmige Belastung des Getriebes für $f_a \leq 10$	$[f_a] = 1$ $[J_{Mot}] = kgm^2$ $[J_x] = kgm^2$

Mindestbetriebsfaktor in Abhängigkeit aller möglichen Zusatzfaktoren	
$f_{B_req} = f_{B_L} \times f_{B1} \times f_{B2} \times f_{B3}$	$[f_{B1}] = 1$ $[f_{B2}] = 1$ $[f_{B3}] = 1$ $[f_{B_L}] = 1$ $[f_{B_req}] = 1$

29121043/DE – 08/2019

4.4.2 Berechnung der tatsächlichen Getriebebelastung

Abtriebsdrehmoment bei Motorhochlauf

Vertikal aufwärts, horizontal oder rotativ:

$$M_{G_H} = \left(M_{Mot_stat} + \left(M_H - M_{Mot_stat} \right) \times \frac{\frac{J_x}{\eta_L \times \eta_G}}{J_{Mot} + \frac{J_x}{\eta_L \times \eta_G}} \right) \times i_G \times \eta_G$$

[i_G] = 1
[J_{Mot}] = kgm²
[J_x] = kgm²
[M_H] = Nm
[M_{G_H}] = Nm
[M_{Mot_stat}] = Nm
[η_L] = 1
[η_G] = 1

Aufzunehmende Querkraft bei Motorhochlauf

$$F_{R_H} = \frac{M_{G_H} \times 2000}{d} \times f_z$$

[d] = mm
[f_Z] = 1
[F_{R_H}] = N
[M_{G_H}] = Nm

Abtriebsdrehmoment bei mechanischer Bremsung

Horizontal oder rotativ:

$$M_{G_B} = \frac{i_G}{\eta'_G} \left(\left(M_B + M'_{Mot_stat} \right) \times \frac{\frac{J_x \times \eta_L \times \eta'_G}{J_{Mot}}}{\frac{J_x \times \eta_L \times \eta'_G}{J_{Mot}} + 1} - M'_{Mot_stat} \right)$$

Vertikal abwärts:

$$M_{G_B} = \frac{i_G}{\eta'_G} \left(\left(M_B - M'_{Mot_stat} \right) \times \frac{\frac{J_x \times \eta_L \times \eta'_G}{J_{Mot}}}{\frac{J_x \times \eta_L \times \eta'_G}{J_{Mot}} + 1} + M'_{Mot_stat} \right)$$

[i_G] = 1
[J_{Mot}] = kgm²
[J_x] = kgm²
[M_B] = Nm
[M_{G_B}] = Nm
[M'_{Mot_stat}] = Nm
[η'_G] = 1
[η_L] = 1

Aufzunehmende Querkraft bei mechanischer Bremsung

$$F_{R_B} = \frac{M_{G_B} \times 2000}{d} \times f_z$$

[d] = mm
[f_Z] = 1
[F_{R_B}] = N
[M_{G_B}] = Nm

29121043/DE – 08/2019

5 Tabellenanhang

5.1 Querkraft-Zuschlagsfaktor f_z verschiedener Übertragungselemente

Übertragungselement	Zuschlagsfaktor f_z	Bemerkungen
Zahnrad	1.15	< 17 Zähne
Kettenrad	1.40	< 13 Zähne
Kettenrad	1.25	< 20 Zähne
Schmalkeilriemen-Scheibe	1.75	Einfluss der Vorspannkraft
Flachriemenscheibe	2.50	Einfluss der Vorspannkraft
Zahnriemenscheibe	1.50	Einfluss der Vorspannkraft
Ritzel-Zahnstange, nicht vorgespannt	1.15	< 17 Zähne
Ritzel-Zahnstange, vorgespannt	2.00	Einfluss der Vorspannkraft

5.2 Massenträgheitsmomente verschiedener geometrischer Körper

Körper	Lage der Drehachse	Symbol	Massenträgheitsmoment J_{cg}
Kreisring, dünn Hohlzylinder, dünnwandig	Senkrecht zur Kreisringebene		$J_{cg} = m \times r^2$
Vollzylinder	Längsachse		$J_{cg} = \frac{1}{2} \times m \times r^2$
Hohlzylinder, dickwandig	Längsachse		$J_{cg} = \frac{1}{2} \times m \times \left(r_1^2 + r_2^2\right)$
Kreisscheibe	Senkrecht zur Scheibenebene		$J_{cg} = \frac{1}{2} \times m \times r^2$
Kreisscheibe	Symmetrieachse in der Scheibenebene		$J_{cg} = \frac{1}{4} \times m \times r^2$
Kugel	Durch den Mittelpunkt		$J_{cg} = \frac{2}{5} \times m \times r^2$
Kugelhülle, dünnwandig	Durch den Mittelpunkt		$J_{cg} = \frac{2}{3} \times m \times r^2$
Stab, dünn, mit Länge l	Senkrecht zur Stabmitte		$J_{cg} = \frac{1}{12} \times m \times l^2$
Quader, mit Kantenlängen b, c und d	Parallel zu Kante c (hier: Höhe)		$J_{cg} = \frac{1}{12} \times m \times (b^2 + d^2)$

29121043/DE – 08/2019

5.3 Wirkungsgrade von Übertragungselementen

Übertragungselement	Bedingungen	Wirkungsgrad
Drahtseil	Je vollständige Umschlingung der Seilrolle (gleit- oder wälzgelagert)	0.91 – 0.95
Keilriemen	Je vollständige Umschlingung der Keilriemenscheibe (normale Riemenspannung)	0.88 – 0.93
Kunststoffbänder	Je vollständige Umschlingung/Rollen wälzgelagert (normale Bandspannung)	0.81 – 0.85
Gummibänder	Je vollständige Umschlingung/Rollen wälzgelagert (normale Bandspannung)	0.81 – 0.85
Zahnriemen	Je vollständige Umschlingung/Rollen wälzgelagert (normale Bandspannung)	0.90 – 0.96
Ketten	Je vollständige Umschlingung/Räder wälzgelagert (abhängig von Kettengröße)	0.90 – 0.96
Getriebe	Ölschmierung: • 3-stufig (Stirnräder), abhängig von Getriebequalität • Bei Schnecken- und Kegelstirnradgetrieben	 0.94 – 0.97 Nach Herstellerangabe

5.4 Spindelwirkungsgrade

Spindel	Wirkungsgrad
Trapezgewinde abhängig von Steigung und Schmierung	0.3 – 0.5
Kugelumlaufspindel	0.8 – 0.9

5.5 Lagerreibwerte

Lager	Reibwert
Wälzlager	μ_{f_b} = 0.005
Gleitlager	μ_{f_b}= 0.09

5.6 Beiwerte für Spur- und Seitenreibung

Spur- und Seitenreibung	Beiwert
Wälzgelagerte Räder	c = 0.003
Gleitgelagerte Räder	c = 0.005
Seitliche Führungsrollen	c = 0.002

29121043/DE – 08/2019

5.7 Reibwerte verschiedener Werkstoffpaarungen

Werkstoffpaarung	Reibungsart	Reibwert
Stahl auf Stahl	Haftreibung (trocken)	μ_0 = 0.12 – 0.60
	Gleitreibung (trocken)	μ = 0.08 – 0.50
	Haftreibung (geschmiert)	μ_0 = 0.12 – 0.35
	Gleitreibung (geschmiert)	μ = 0.04 – 0.25
Holz auf Stahl	Haftreibung (trocken)	μ_0 = 0.45 – 0.75
	Gleitreibung (trocken)	μ = 0.30 – 0.60
Holz auf Holz	Haftreibung (trocken)	μ_0 = 0.40 – 0.75
	Gleitreibung (trocken)	μ = 0.30 – 0.50
Kunststoffriemen auf Stahl	Haftreibung (trocken)	μ_0 = 0.25 – 0.45
	Gleitreibung (trocken)	μ = 0.25
Stahl auf Kunststoff	Haftreibung (trocken)	μ_0 = 0.20 – 0.45
	Gleitreibung (geschmiert)	μ = 0.18 – 0.35

5.8 Rollreibung (Hebelarm der Rollreibung)

Paarung		Hebelarm	
Stahl auf Stahl		f ≈ 0.5 mm	
Holz auf Stahl (Rollenbahn)		f ≈ 1.2 mm	
Kunststoff auf Stahl		f ≈ 2 mm	
Hartgummi auf Stahl		f ≈ 7 mm	
Kunststoff auf Beton		f ≈ 5 mm	
Hartgummi auf Beton		f ≈ 10 – 20 mm	
Mittelhartes Gummi auf Beton		f ≈ 15 – 35 mm	
Vulkollan auf Stahl	∅ 100 mm	f ≈ 0.75 mm	**Achtung!** Hebelarm der Rollreibung ist stark hersteller-, geometrie- und temperaturabhängig.
	∅ 125 mm	f ≈ 0.9 mm	
	∅ 200 mm	f ≈ 1.5 mm	
	∅ 415 mm	f ≈ 3.1 mm	

29121043/DE – 08/2019

6 Zeichenlegende

In der Zeichenlegende ist die Bedeutung der Formelzeichen in alphabetischer Reihenfolge aufgeführt.

Zeichen	Bedeutung	Einheit
a	Beschleunigung	$m\ s^{-2}$
a_H	Hochlaufbeschleunigung	$m\ s^{-2}$
a_{max}	Maximal mögliche Beschleunigung	$m\ s^{-2}$
c	Spurreibungskoeffizient	1
d	Durchmesser des Übertragungselements	m
d_b	Lagerdurchmesser	mm
ED_{BW}	Generatorische Einschaltdauer	%
f	Frequenz	Hz
f	Hebelarm der Rollreibung	mm
f_a	Massenträgheitsverhältnis	1
f_B	Betriebsfaktor	1
f_{B1}	Zusatzfaktor für Umgebungstemperatur (nur bei Schneckengetriebe)	1
f_{B2}	Zusatzfaktor für Einschaltdauer (nur bei Schneckengetriebe)	1
f_{B3}	Zusatzfaktor für Tieftemperaturbereich	1
f_{B_L}	Mindestbetriebsfaktor der Applikation	1
f_{B_req}	Mindestbetriebsfaktor	1
f_{ol}	Überlastfaktor des Frequenzumrichters (z. B. 1.5 bei Überlastfähigkeit 150 %)	1
f_W	Verschleißfaktor, Ermittlung gemäß verwendetem Lastbereich für Bremsarbeit	1
f_Z	Zuschlagsfaktor	1
F	Kraft	N
F_A	Axialkraft am Getriebeabtrieb	N
F_{A_per}	Zulässige Axialkraft (Zug oder Druck)	N
F_{dyn}	Dynamische Kraft (Beschleunigungs- oder Verzögerungskraft)	N
F_f	Reibungskraft	N
F_{f_b}	Lagerreibungskraft	N
F_{f_r}	Rollreibungskraft	N
F_{f_st}	Haftreibungskraft	N
F_{f_t}	Spurreibungskraft	N
F_G	Erdanziehungskraft	N
F_H	Hangabtriebskraft	N
F_N	Normalkraft	N

29121043/DE – 08/2019

Zeichen	Bedeutung	Einheit
F_R	Querkraft am Getriebeabtrieb	N
F_{R_B}	Aufzunehmende Querkraft am Getriebeabtrieb bei mechanischer Bremsung	N
F_{R_es}	Aufzunehmende Querkraft am Getriebeabtrieb beim Bremsen im Not-Halt-Fall	N
F_{R_H}	Aufzunehmende Querkraft am Getriebeabtrieb bei Motorhochlauf	N
F_{R_per}	Zulässige Querkraft am Getriebeabtrieb im Abstand l/2 zum Wellenbund	N
$F_{R_per_es}$	Zulässige Querkraft am Getriebeabtrieb beim Bremsen im Not-Halt-Fall	N
$F_{R_x_per}$	Zulässige Querkraft im Abstand x zum Wellenbund	N
F_{stat}	Statische Kraft	N
F_{tot}	Gesamtkraft	N
F_{tr}	Fahrwiderstandskraft	N
F_η	Aufzubringende Kraft in Abhängigkeit des Wirkungsgrads (motorisch)	N
F'_η	Aufzunehmende Kraft in Abhängigkeit des Wirkungsgrads (generatorisch)	N
g	Erdbeschleunigung	$m\ s^{-2}$
I_A	Anlaufstrom	A
I_d	Magnetisierungsstrom	A
I_{eff}	Effektiv erforderlicher Motorstrom	A
i_G	Getriebeübersetzung	1
i_{G_id}	Berechnete ideale Getriebeübersetzung	1
I_{max}	Maximal erforderlicher Motorstrom	A
I_{Mot}	Motorstrom (Außenleiterstrom)	A
I_N	Bemessungsstrom des Motors	A
I_{N_FU}	Ausgangsbemessungsstrom des Frequenzumrichters	A
I_q	Drehmomentbildender Strom	A
I_{q_N}	Bemessungswert des drehmomentbildenden Stroms	A
i_{tot}	Gesamtübersetzung zwischen Appikation und Motor	1
i_V	Vorgelegeübersetzung	1
J	Massenträgheitsmoment	kgm^2
J_{cg}	Massenträgheitsmoment des Körpers, bezogen auf eine durch den Schwerpunkt S gehende Drehachse	kgm^2
J_{Mot}	Massenträgheitsmoment des Motors	kgm^2
J_x	Massenträgheitsmoment der Last reduziert auf die Motorwelle	kgm^2

29121043/DE – 08/2019

Zeichen	Bedeutung	Einheit
J_Z	Massenträgheitsmoment der Option schwere Zusatzschwungmasse /Z	kgm^2
K	Leistungssteigerungsfaktor für die verschiedenen Betriebsarten	1
K_J	Berechnungsfaktor Massenträgheitsmoment	h^{-1}
K_M	Berechnungsfaktor statisches Motordrehmoment	h^{-1}
K_P	Berechnungsfaktor statische Leistung und Einschaltdauer	h^{-1}
l	Länge	m
m	Masse	kg
m_{tot}	Gesamtmasse der Applikation	kg
M	Drehmoment	Nm
M_{a_max}	Dauerhaft zulässiges Abtriebsdrehmoment des Getriebes	Nm
M_A	Anlaufmoment	Nm
M_B	Bremsmoment	Nm
M_{dyn}	Dynamisches Drehmoment/Beschleunigungsdrehmoment	Nm
M_{f_b}	Lagerreibungsdrehmoment	Nm
M_{f_r}	Rollreibungsdrehmoment	Nm
M_{f_t}	Spurreibungsdrehmoment	Nm
M_{G_B}	Abtriebsdrehmoment bei mechanischer Bremsung	Nm
M_{G_es}	Abtriebsdrehmoment beim Bremsen im Not-Halt-Fall	Nm
M_{G_H}	Abtriebsdrehmoment bei Hochlauf des Motors	Nm
M_{G_max}	Maximales Drehmoment am Getriebeabtrieb inklusive Lastwirkungsgrad über alle Fahrabschnitte	Nm
M_{G_n}	Drehmoment am Getriebeabtrieb im Fahrabschnitt n (z. B. Beschleuinigung) inklusive Lastwirkungsgrad (motorisch)	Nm
$M_{G_per_es}$	Zulässiges Abtriebsdrehmoment beim Bremsen im Not-Halt-Fall	Nm
M_H	Hochlaufmoment	Nm
M_K	Kippmoment	Nm
M_L	Antriebsdrehmoment an der Applikation	Nm
M_{Mot}	Applikativ gefordertes Motordrehmoment	Nm
M_{Mot_ac}	Drehmoment der Applikation im Fahrabschnitt "Beschleunigung" als Anforderung an den Motor inklusive Wirkungsgrade (motorisch)	Nm
$M_{Mot_ac_tot}$	Gesamtdrehmoment der Applikation einschließlich der Eigenbeschleunigung des Motors im Fahrabschnitt "Beschleunigung" als Anforderung an den Motor inklusive Wirkungsgrade (motorisch)	Nm
M_{Mot_const}	Drehmoment der Applikation im Fahrabschnitt "Konstante Geschwindigkeit" als Anforderung an den Motor inklusive Wirkungsgrade (motorisch)	Nm

29121043/DE – 08/2019

Zeichen	Bedeutung	Einheit
M'_{Mot_const}	Drehmoment der Applikation im Fahrabschnitt "Konstante Geschwindigkeit" als Anforderung an den Motor inklusive Wirkungsgrade (generatorisch)	Nm
M_{Mot_dec}	Drehmoment der Applikation im Fahrabschnitt "Verzögerung" als Anforderung an den Motor inklusive Wirkungsgrade (motorisch)	Nm
$M_{Mot_dec_tot}$	Gesamtdrehmoment der Applikation einschließlich der Eigenverzögerung des Motors im Fahrabschnitt "Verzögerung" als Anforderung an den Motor inklusive Wirkungsgrade (motorisch)	Nm
M_{Mot_eff}	Effektives Motordrehmoment	Nm
M_{Mot_iac}	Dynamisches Drehmoment zur Eigensbeschleunigung oder -verzögerung des Motors	Nm
M_{Mot_n}	Drehmoment der Applikation als Anforderung an den Motor im Fahrabschnitt n inklusive Lastwirkungsgrad (motorisch)	Nm
$M_{Mot_n_tot}$	Gesamtdrehmoment der Applikation inklusive Eigenbeschleunigung des Motors im Fahrabschnitt n als Anforderung an den Motor	Nm
M_{Mot_stat}	Statisches Drehmoment der Applikation als Anforderung an den Motor inklusive Wirkungsgrade (motorisch)	Nm
M_n	Applikationsseitiges Drehmoment ohne Lastwirkungsgrad im Fahrabschnitt n	Nm
M_N	Bemessungsdrehmoment des Motors	Nm
M_S	Sattelmoment	Nm
M_{stat}	Statisches Drehmoment der Applikation	Nm
M_{tr}	Fahrwiderstandsdrehmoment	Nm
M_η	Aufzubringendes Drehmoment in Abhängigkeit des Wirkungsgrads (motorisch)	Nm
M'_{G_n}	Drehmoment am Getriebeabtrieb im Fahrabschnitt n (z. B. Verzögerung) inklusive Lastwirkungsgrad (generatorisch)	Nm
M'_{Mot_dec}	Drehmoment der Applikation im Fahrabschnitt "Verzögerung" als Anforderung an den Motor inklusive Wirkungsgrade (generatorisch)	Nm
$M'_{Mot_dec_tot}$	Gesamtdrehmoment der Applikation einschließlich der Eigenverzögerung des Motors im Fahrabschnitt "Verzögerung" als Anforderung an den Motor inklusive Wirkungsgrade (genratorisch)	Nm
M'_{Mot_n}	Drehmoment der Applikation als Anforderung an den Motor im Fahrabschnitt n inklusive Lastwirkungsgrad (generatorisch)	Nm
M'_{Mot_stat}	Statisches Drehmoment der Applikation als Anforderung an den Motor inklusive Wirkungsgrade (generatorisch)	Nm
M'_η	Aufzunehmendes Drehmoment in Abhängigkeit des Wirkungsgrads (generatorisch)	Nm

29121043/DE – 08/2019

Zeichen	Bedeutung	Einheit
n	Drehzahl	min^{-1}
n_a	Abtriebsdrehzahl	min^{-1}
n_B	Bremseneinfalldrehzahl	min^{-1}
n_{B_es}	Bremseneinfalldrehzahl im Not-Halt-Fall	min^{-1}
N_{B_insp}	Anzahl der zulässigen Not-Halt-Bremsungen bis zur Bremseninspektion	1
n_{dif}	Drehzahldifferenz bei Bremseneinfall	min^{-1}
n_G	Abtriebsdrehzahl des Getriebes	min^{-1}
n_L	Drehzahl der Applikation	min^{-1}
n_{max}	Maximale Drehzahl	min^{-1}
n_{Mot}	Motordrehzahl	min^{-1}
n_{Mot_max}	Maximale Motordrehzahl	min^{-1}
$\overline{n}_{Mot_n}$	Mittlere Motordrehzahl im Fahrabschnitt n	min^{-1}
n_N	Bemessungsdrehzahl	min^{-1}
n_{syn}	Synchrondrehzahl	min^{-1}
N_{tot}	Anzahl aller Räder	1
n_V	Abtriebsdrehzahl des Vorgeleges	min^{-1}
p	Spindelsteigung	mm
P	Leistung	kW
P_1	Zugeführte Leistung	W
P_2	Abgegebene oder nutzbare Leistung	W
P_{dyn}	Dynamische Leistung	kW
$\overline{P}_{gen}$	Mittlere generatorische Bremsleistung	kW
$\overline{P}_{gen_n}$	Mittlere Bremsleistung im generatorischen Fahrabschnitt n	kW
P_{gen_pk}	Spitzenbremsleistung	kW
P_H	Verfügbare Motorleistung während des Hochlaufs	kW
P_{max}	Maximale Leistung	kW
P_{Mot_max}	Maximale Leistung der Applikation als Anforderung an den Motor inklusive Wirkungsgrade (motorisch)	kW
P_{Mot_stat}	Statische Leistung der Applikation als Anforderung an den Motor inklusive Wirkungsgrade (motorisch)	kW
P_N	Bemessungsleistung des Motors	kW
P_{stat}	Statische Leistung	kW
r	Radius	m
$r_{1,2}$	Innerer und äußerer Radius	m
r_b	Lagerradius	mm
R_{BW}	Widerstandswert des Bremswiderstands	Ω

29121043/DE – 08/2019

SEW EURODRIVE

Zeichen	Bedeutung	Einheit
R_{BW_max}	Maximaler Widerstandswert des Bremswiderstands abhängig von der Applikation	Ω
s	Strecke	m
s_B	Bremsweg	m
s_{tot}	Gesamtstrecke	m
t	Zeit	s
T	Periodendauer	s
t2,I	Bremseneinfallzeit für wechselstromseitige Abschaltung	s
t2,II	Bremseneinfallzeit für gleich- und wechselstromseitige Abschaltung	s
t_{ac}	Beschleunigungszeit im Fahrabschnitt "Beschleunigung"	s
t_B	Bremszeit	s
t_H	Hochlaufzeit	s
t_n	Dauer des Fahrabschnitts n	s
t_s	Anhaltezeit	s
t_{tot}	Gesamtzeit	s
U	Spindelumfang	mm
U_{DCL}	Spannungsschwelle im Zwischenkreis, bei der der Brems-Chopper durchgeschaltet wird	V
U_{Mot}	Motorspannung (Phase gegen Phase)	V
v	Geschwindigkeit	$m\ s^{-1}$
v_B	Geschwindigkeit der Applikation bei Bremseneinfall	$m\ s^{-1}$
W_B	Aufzunehmende Bremsarbeit	J
W_{B_es}	Aufzunehmende Bremsarbeit im Not-Halt-Fall	J
W_{B_insp}	Zulässige Bremsarbeit bis zur Bremseninspektion	J
W_{B_per}	Zulässige Bremsarbeit in Abhängigkeit der Bremsengröße und -einfalldrehzahl	J
$W_{B_per_es}$	Zulässige Bremsarbeit im Not-Halt-Fall	J
x	Abstand	m
Z_0	Leerschalthäufigkeit	h^{-1}
Z_{per}	Zulässige Schalthäufigkeit	h^{-1}
Z_{req}	Geforderte Schalthäufigkeit	h^{-1}
α	Winkelbeschleunigung	s^{-2}
β	Neigungswinkel zur Horizontalen	° oder rad
γ	Reibungswinkel	° oder rad
η	Wirkungsgrad	1
η_L	Lastwirkungsgrad	1
η_{spi}	Spindelwirkungsgrad	1

29121043/DE – 08/2019

Zeichen	Bedeutung	Einheit
η'_G	Rücktreibender Getriebewirkungsgrad	1
μ	Reibungskoeffizient	1
μ_{f_b}	Lagerreibungskoeffizient	$[\mu_{f_b}] = 1$
μ_{f_st}	Haftreibungskoeffizient	1
μ_{tr}	Gesamtreibungskoeffizient des Fahrwiderstands	1
φ	Winkel	rad oder °
ω	Winkelgeschwindigkeit	s^{-1}
ω_G	Winkelgeschwindigkeit am Getriebeabtrieb	s^{-1}
ω_{Mot}	Winkelgeschwindigkeit am Motor	s^{-1}

29121043/DE – 08/2019

Stichwortverzeichnis

A

Abtriebsdrehmoment
- Bei mechanischer Bremsung ... 26
- Bei Motorhochlauf ... 26
- Beim Bremsen im Not-Halt-Fall ... 16

Abtriebsdrehzahl
- Bei Applikationen mit Vorgelegen ... 9
- In Abhängigkeit der linearen Geschwindigkeit ... 9
- In Abhängigkeit der Winkelgeschwindigkeit ... 9
- Zusammenhang lineare und rotative Größen ... 8

Allgemeine applikationsseitige Berechnungen
- Abtriebsdrehzahl und Übersetzungansforderung ... 9
- Fahrdynamik ... 8
- Kräfte und Drehmomente ... 10
- Massenträgheitsmoment ... 11
- Spindelantrieb ... 12
- Wirkungsgrade ... 11

Anhalteweg ... 24
Anhaltezeit ... 24
Anzahl der zulässigen Bremsungen ... 23
Anzahl der zulässigen Not-Halt-Bremsungen ... 16

B

Beiwerte für Spur- und Seitenreibung ... 28
Beschleunigung der Applikation bei Motorhochlauf ... 22
Betriebsfaktor ... 25
Bremsarbeit ... 23
Bremsarbeit im Not-Halt-Fall ... 15
Bremse (geregelt) ... 15
- Abtriebsdrehmoment beim Bremsen im Not-Halt-Fall ... 16
- Anzahl der zulässigen Not-Halt-Bremsungen 16
- Bremsarbeit im Not-Halt-Fall ... 15
- Bremseneinfalldrehzahl im Not-Halt-Fall ... 16
- Drehzahldifferenz bei Bremseneinfall ... 16
- Querkraft bei Not-Halt-Bremsung ... 17
- Zulässige Not-Halt-Kennwerte für verschiedene Betriebsfaktoren ... 17
- Zulässige Querkraft am Getriebeabtrieb bei Not-Halt-Bremsung ... 17

Bremse (ungeregelt) ... 22
- Anhalteweg ... 24
- Anhaltezeit ... 24
- Anzahl der zulässigen Bremsungen ... 23
- Bremsarbeit ... 23
- Bremseneinfalldrehzahl ... 23
- Bremsgeschwindigkeit ... 24
- Bremsverzögerung ... 24
- Bremszeit ... 24
- Drehzahldifferenz bei Bremseneinfall ... 23
- Statisches Motordrehmoment (generatorisch) 22

Bremseneinfalldrehzahl ... 23
Bremseneinfalldrehzahl im Not-Halt-Fall ... 16
Bremsgeschwindigkeit ... 24
Bremsverzögerung ... 24
Bremszeit ... 24

D

Drehmoment am Getriebeabtrieb inklusive Lastwirkungsgrad ... 13
Drehzahldifferenz bei Bremseneinfall ... 16, 23
Dynamische Bewegungsgleichungen ... 8
Dynamische Kräfte und Drehmomente
- Beschleunigungsdrehmoment ... 10
- Beschleunigungskraft ... 10

Dynamisches Drehmoment ... 21
Dynamisches Drehmoment zur Eigenbeschleunigung des Motors ... 14

E

Effektives Motordrehmoment ... 15
Erdanziehungskraft ... 10

F

Fahrdynamik
- Dynamische Bewegungsgleichungen ... 8
- Statische Bewegungsgleichungen ... 8

Fahrwiderstandskraft ... 10
Formelsammlung
- Formelzeichen und Indizes ... 5
- Inhalt und Aufbau ... 5

Formelzeichen und Indizes ... 5
- Darstellung der Formeln und Einheiten ... 7
- Häufig verwendete Indizes ... 6

Frequenzumrichter ... 18
- Generatorsiche Einschaltdauer (Bremswiderstand) ... 19
- Maximal zulässiger Bremswiderstandswert ... 19

29121043/DE – 08/19

Mittlere Drehzahl 19
Mittlere generatorische Bremsleistung 19
Motorstrom, effektiv 18
Motorstrom, genaue Berechnung 18
Motorstrom, maximal 18
Spitzenbremsleistung 19

G

Generatorsiche Einschaltdauer (Bremswiderstand) 19
Gesamtdrehmoment des Motors 14
Getriebe (geregelt) 13
Abtriebsseitige Drehmomente nach Fahrabschnitten 13
Drehmoment am Getriebeabtrieb inklusive Lastwirkungsgrad 13
Querkraft am Getriebeabtrieb 13
Getriebe (ungeregelt) 25
Abtriebsdrehmoment bei mechanischer Bremsung 26
Abtriebsdrehmoment bei Motorhochlauf 26
Betriebsfaktor 25
Mindestbetriebsfaktor 25
Querkraft bei mechanischer Bremsung 26
Querkraft bei Motorhochlauf 26
Stoßgrad 25

H

Haft- oder Gleitreibungskraft 10
Hangabtriebskraft 10
Hochlaufzeit 21

K

Kräfte
Dynamische Kräfte und Drehmomente 10
Statische Kräfte 10

L

Lagerreibungskraft 10
Lagerreibwerte 28
Leistungsberechnung (ungeregelt) 20

M

Massenträgheitsmoment
Bei paralleler Drehachse (Steinerscher Satz) 11
Der Last reduziert auf die Motorwelle 11
Massenträgheitsmomente verschiedener geometrischer Körper 27
Maximal zulässige Beschleunigung 22
Maximal zulässiger Bremswiderstandswert 19
Maximale Motorauslastung 14
Mindestbetriebsfaktor 25
Mittlere generatorische Bremsleistung 19
Motor (geregelt) 13
Dynamisches Drehmoment zur Eigenbeschleunigung des Motors 14
Effektives Motordrehmoment 15
Gesamtdrehmoment des Motors 14
Maximale Motorauslastung 14
Mittlere Drehzahl 15
Motordrehmoment inkusive Getriebwirkungsgrad 14
Motordrehzahl (Sollwertvorgabe) 13
Thermische Motorauslastung 15
Motor (ungeregelt) 21
Beschleunigung der Applikation bei Motorhochlauf 22
Dynamisches Drehmoment 21
Hochlaufzeit 21
Maximal zulässige Beschleunigung 22
Schalthäufigkeit, zulässig 22
Statisches Drehmoment 21
Motordrehmoment inkusive Getriebwirkungsgrad 14
Motordrehzahl (Sollwertvorgabe) 13
Motorstrom, effektiv 18
Motorstrom, ganaue Berechnung 18
Motorstrom, maximal 18

N

Normalkraft an der schiefen Ebene 10
Normalkraft in der Horizontalen 10

P

Projektierung geregelter Antriebe
Bremse 15
Frequenzumrichter 18
Getriebe 13
Motor 13
Projektierung ungeregelter Antriebe
Bremse 22
Getriebe 25
Leistungsberechnung, ... 20
Motor 21

29121043/DE – 08/19

Q

Querkraft
Am Getriebeabtrieb ... 13
bei mechanischer Bremsung ... 26
Bei Motorhochlauf ... 26
Bei Not-Halt-Bremsung ... 17
Querkraft-Zuschlagsfaktor verschiedener Übertragungselemente ... 27

R

Reibwerte verschiedener Werkstoffpaarungen ... 29
Rollreibung (Hebelarm der Rollreibung) ... 29
Rollreibungskraft ... 10

S

Schalthäufigkeit, zulässig ... 22
Spindelantrieb
Drehmoment einer Spindel ... 12
Reduziertes Lastträgheitsmoment ... 12
Spindeldrehzahl ... 12
Spindelwirkungsgrade ... 28
Spitzenbremsleistung ... 19
Spurreibungskraft ... 10
Statische Bewegungsgleichungen ... 8
Statische Kräfte ... 10
Statisches Drehmoment ... 21
Stoßgrad ... 25

T

Tabellenanhang ... 27
Thermische Motorauslastung ... 15

U

Übersetzungsanforderung
Ideale Getriebeübersetzung ... 9

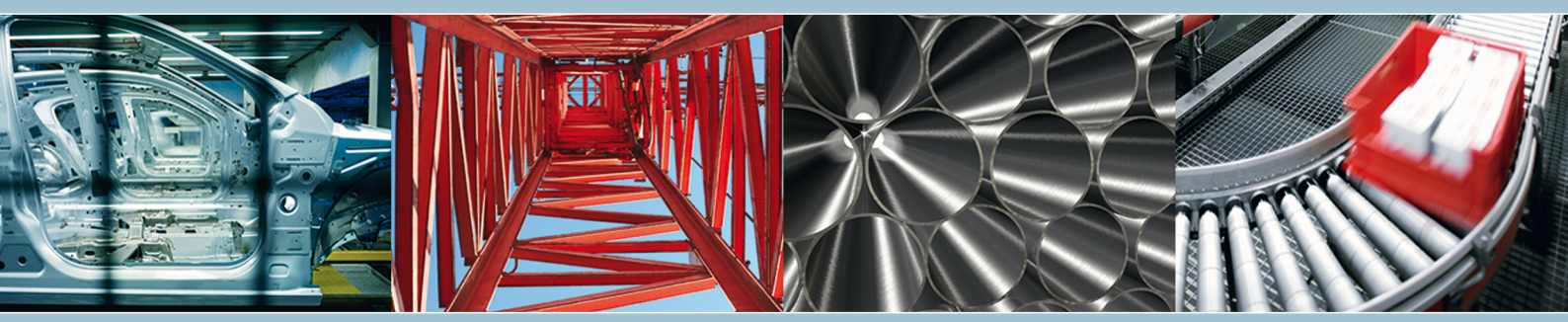
W

Wirkungsgrade
Im motorischen und generatorischen Betrieb. 11
Von Übertragungselementen ... 28

Z

Zeichenlegende ... 30
Zulässige Not-Halt-Kennwerte für verschiedene Betriebsfaktoren ... 17
Zulässige Querkraft am Getriebeabtrieb bei Not-Halt-Bremsung ... 17

29121043/DE – 08/19





SEW-EURODRIVE
Driving the world

SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG
Ernst-Blickle-Str. 42
76646 BRUCHSAL
GERMANY
Tel. +49 7251 75-0
Fax +49 7251 75-1970
sew@sew-eurodrive.com
→ www.sew-eurodrive.com