

maxon
academy

Formelsammlung

Jan Braun

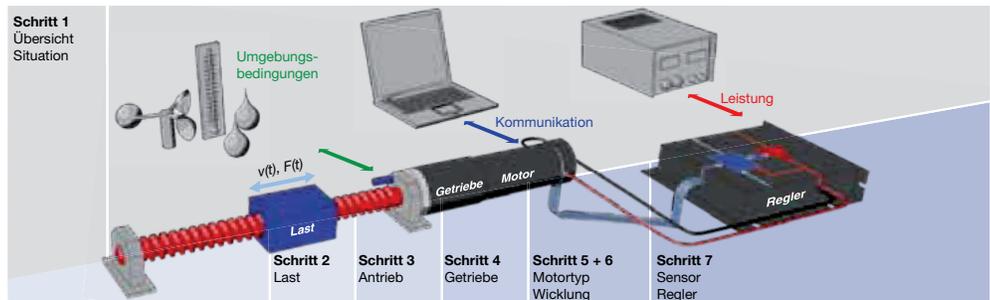
$$V_{cc} \geq \frac{U_N}{n_0} \cdot \left(n_L + \frac{\Delta n}{\Delta M} \cdot M_{L2} \right) \cdot \frac{1}{0.9} + 2 [V]$$

maxon academy

maxon motor

driven by precision

Systematik der Selektion



In der **Situationsanalyse** ist zuerst der Antrieb gesamthaft in seinem Umfeld darzustellen. Ziel ist, eine **Übersicht** zu gewinnen, die prinzipielle Lösbarkeit aufzuzeigen und sich ein Bild über die Randbedingungen und Einschränkungen zu machen. **Siehe Kap. A.1: Übersicht, Situationsanalyse**

Ziel dieses Schrittes ist, **die Bewegung der Last** in wenigen Schlüsselanforderungen zusammenzufassen. Schlüsselanforderungen sind die Kräfte (Drehmomente) und Geschwindigkeiten (Drehzahlen). Wie lange wirken sie? Welche Regelgenauigkeit ist gefordert? **Siehe Kap. A.2: Bewegung der Last**

Die mechanische Antriebsauslegung kann übersprungen werden, wenn die Last direkt angetrieben wird und keine **mechanische Umformung** dazwischen geschaltet ist.

Mechanische Antriebe wandeln mechanische Leistung in mechanische Leistung um. Für die Auswahl des Antriebs werden die Schlüsseldaten der Last auf den Ausgang des Getriebes oder Motors umgerechnet. **Siehe Kap. 3: Mechanische Antriebe**

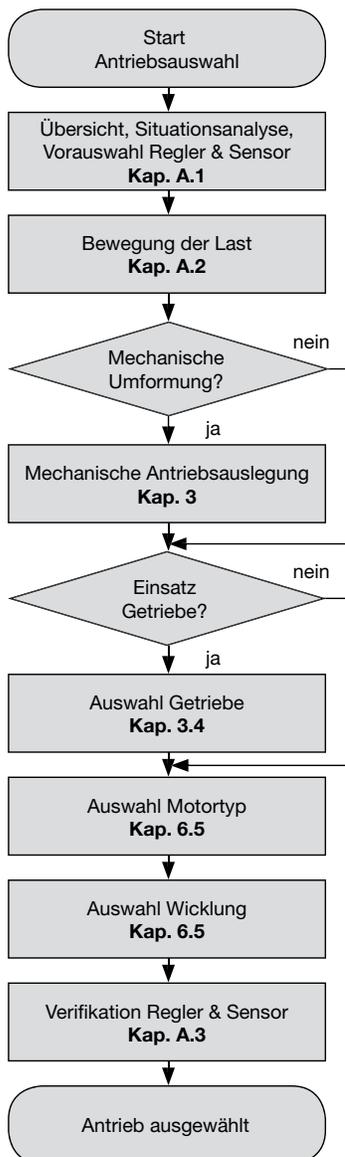
Der Punkt Auswahl **Getriebe** kann ausgelassen werden, wenn kein (maxon-) Getriebe verwendet wird. Getriebe werden typischerweise eingesetzt, wenn hohe Drehmomente bei kleinen Drehzahlen verlangt werden.

Am Ende dieses Schrittes steht fest, welches **maxon-Getriebe** verwendet werden soll. Aus der Getriebeübersetzung und dem Wirkungsgrad lassen sich die Schlüsseldaten für die Motorauswahl berechnen. **Siehe Kap. 3.4: maxon-Getriebe**

Anhand der Drehmoment- und Drehzahlenanforderungen werden nun passende **Motortypen** gesucht. Zu berücksichtigen sind ebenfalls Überlegungen zu Lebensdauer, Kommutierung und Lagerung. **Siehe Kap. 6.5: Motorauswahl**

Die **Auswahl der Wicklung** geschieht über den Vergleich der am Motor anliegenden Spannung mit der Drehzahl, sowie des zur Verfügung stehenden Stroms mit den Drehmomentanforderungen. **Siehe Kap. 6.5: Motorauswahl**

Der letzte Schritt dient der **Verifikation von Regler und Sensor**. Es muss überprüft werden, ob die Vorauswahlen von Regler und Sensor in der Situationsanalyse (Schritt 1) mit dem ausgewählten Motor kompatibel sind. **Siehe Kap. A.3: Verifikation Regler und Sensor**



Vorwort

Bei der vorliegenden Formelsammlung werden die wichtigsten Formeln in Zusammenhang aller Komponenten des Antriebssystems aufgelistet. Dies ausgehend von einem Flussdiagramm, welches eine rasche Antriebsauswahl unterstützt. Zahlreiche Illustrationen und die klare Beschreibung der Symbole auf der jeweiligen Seite unterstützen die Lesbarkeit der Formeln.

Im weitesten Sinne handelt es sich um eine Sammlung der wichtigsten Formeln aus dem maxon-Katalog, sowie aus dem Buch «Auslegung von hochpräzisen Kleinantrieben», erschienen im maxon academy Verlag.

Der Anstoss zum Schreiben dieser Formelsammlung war das Buch «Auslegung von hochpräzisen Kleinantrieben» von Dr. Urs Kafader, in welchem das umfangreiche Wissen aus der fast 50-jährigen Erfolgsgeschichte der maxon-Gleichstromantriebe kleiner Leistung (unter etwa 500 Watt) niedergeschrieben ist. Diese Sammlung soll Ingenieuren, Dozenten und Studierenden als perfekte Ergänzung zum oben genannten Buch dienen.

Dank

Mein erster Dank gilt Dr. Urs Kafader, der mich ermuntert hat, diese Sammlung an die Hand zu nehmen. Die professionelle Gestaltung und die Abbildungen sind das Werk von Patricia Gabriel und Beni Anderhalden. Urs Kafader, Barbara Schlup, Anja Schütz, Patrik Gnos, Stefan Baumann, Martin Rüegg, Michael Baumgartner, Martin Windlin, Jens Schulze, Albert Bucheli, Martin Odermatt und Walter Schmid haben das Manuskript durchgesehen und wertvolle Verbesserungsvorschläge eingebracht. Bei meinen Anliegen und Fragen erhielt ich bereitwillig Unterstützung von vielen weiteren Personen bei maxon motor ag.

*Sachseln, im Frühling 2012
Jan Braun*

2. Auflage 2012

© 2012, Verlag maxon academy, Sachseln

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in fremde Sprachen, Vervielfältigung, Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, des Nachdruckes und Vortrages, sind vorbehalten. Sofern Warenbezeichnungen, Gebrauchsnamen usw. in diesem Werk genannt werden, berechtigt dies nicht dazu, anzunehmen, dass diese im Sinne des Warenzeichen- und Markenschutzrechtes als frei zu betrachten wären. Alle in diesem Werk gemachten Angaben, insbesondere auch hinsichtlich Zahlen, Applikationen, Dosierungen usw. sowie Ratschläge und Empfehlungen sind sorgfältig abgewogen; dennoch kann dafür, wie auch für das völlige Fehlen von Druckfehlern keine Gewähr übernommen werden. Die Richtigkeit gemachter Angaben muss im Einzelfall vom Anwender selbst überprüft werden. Haftung der Autoren, des Herausgebers und/oder seiner Beauftragten für Personen-, Sach- sowie Vermögensschäden ist ausgeschlossen.

Inhalt

A.	Antriebsauswahl	6
A.1	Übersicht, Situationsanalyse	6
A.2	Bewegung der Last	7
A.3	Verifikation Regler und Sensor	8
1.	Masse, Kraft, Drehmoment	9
1.1	Kräfte Allgemein	9
1.2	Drehmomente Allgemein	11
1.3	Trägheitsmomente verschiedener Körper bezüglich der Hauptachsen durch den Schwerpunkt S	12
2.	Kinematik	14
2.1	Lineare (translative) Bewegung	14
2.2	Rotative Bewegung	15
2.3	Typische lineare (translative) Bewegungsprofile	16
2.4	Typische rotative Bewegungsprofile	18
3.	Mechanische Antriebe	21
3.1	Mechanische Umformung	21
3.2	Umformung mechanische Antriebe Translation	22
3.3	Umformung mechanische Antriebe Rotation	25
3.4	maxon-Getriebe	26
4.	Lagerung	27
4.1	Eigenschaften von Sintergleitlagern und Kugellagern im Vergleich	27
5.	Elektrotechnik	29
5.1	Grundlagen Gleichspannung	29
5.2	Elektrische Widerstandsschaltungen	31
5.3	Grundlagen Wechselspannung	33
5.4	Einfache Filter	34
6.	maxon-Motoren	35
6.1	Allgemeines	35
6.2	Leistungsbetrachtung im DC-Motor Allgemein	38
6.3	Motorkonstanten und -kennlinien	39
6.4	Beschleunigung	41
6.5	Motorauswahl	42
7.	maxon sensor	43
8.	maxon-Regler	45
8.1	Betriebsquadranten	45
8.2	Auslegung der Stromversorgung	45
8.3	Grösse der Motordrossel bei PWM-Reglern	46
9.	Thermisches Verhalten	47
9.1	Grundlagen	47
9.2	Dauerbetrieb	49
9.3	Zyklus- und Aussetzbetrieb (kontinuierlich wiederholt)	51
9.4	Kurzzeitbetrieb	52
10.	Tabellen	53
10.1	maxon-Umrechnungstabellen	53
10.2	Typische Reibungskoeffizienten für Roll-, Haft- und Gleitreibung	54
11.	Symbolliste Formelsammlung	56

A. Antriebsauswahl

A.1 Übersicht, Situationsanalyse

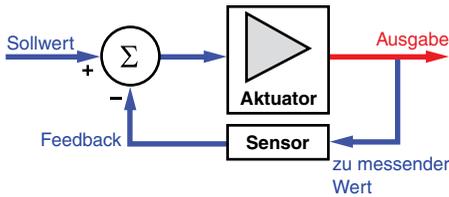
Bevor der eigentliche Selektionsprozess startet, ist eine Auseinandersetzung mit der Antriebs-situation als Ganzes nötig. Dabei werden auch die Variationsbreiten der Schlüsselparameter festgelegt. In der Regel sind die verschiedenen Aspekte stark miteinander vernetzt. Die folgen-den Punkte sollen helfen, Klarheit zu schaffen und den Rahmen für den weiteren Selektions-verlauf abzustecken.

Mechanische Auslegung



Liegt eine translative oder rotative Bewe-gung vor? Mit welchem Antrieb (Spindel, Zahnriemen, usw.) oder mit welcher Antriebs-kombination wird sie realisiert? Wird direkt angetrieben?

Regelkonzept festlegen



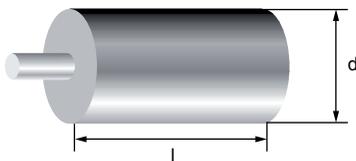
Was soll geregelt werden: Strom, Drehzahl, Position? Mit welcher Genauigkeit? Reicht ein offener Regelkreis? Wie wird die Regelgrösse gemessen? Woher kommen Befehle und Soll-werte? Dies führt bereits zu einer Vorselektion für mögliche Regler und Sensoren; d.h. für Selektionsschritt 7 (siehe Seite 2).

Leistungsüberprüfung



Steht genügend elektrische Leistung zur Verfü-gung, um die Last in allen Betriebsbedingun-gen anzutreiben und um die zu erwartenden Verluste im Antriebsstrang auszugleichen? Wie gross ist die maximal zur Verfügung stehende Spannung, wie gross der Strom?

Randbedingungen festhalten



Gibt es Einschränkungen bei den Abmessun-gen? In welcher Umgebung (Temperatur, Atmosphäre, ...) soll der Antrieb funktionie-ren? Müssen besondere Spezifikationen und Qualitätsstandards eingehalten werden? Was ist die geforderte Lebensdauer?

Ökonomische Überlegungen



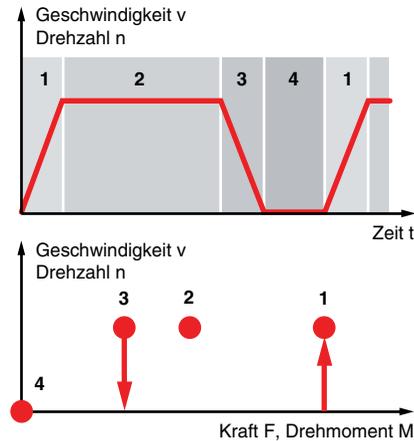
Die ökonomischen Überlegungen dürfen natürlich nicht vergessen werden. Wie kann der Antrieb möglichst kostengünstig gestaltet und trotzdem den Anforderungen bezüglich Technik und Lebensdauer gerecht werden?

Detaillierte Informationen hierzu im Buch «Auslegung von hochpräzisen Kleinantrieben», Kap. 3.

A.2 Bewegung der Last

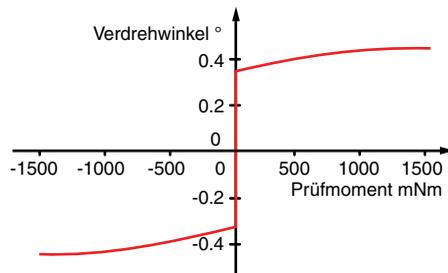
Die auszuführenden Bewegungen werden bei der Bestimmung der **Lastanforderungen** festgelegt. Wichtig ist, die Bewegungsprofile zu definieren und sich zu überlegen mit welchen Einsatzzeiten zu rechnen ist.

Arbeitspunkte



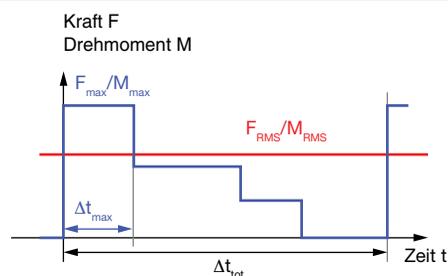
Für die Festlegung der zugehörigen **Arbeitspunkte** (Wertepaare aus Drehmoment und Drehzahl oder Kraft und Geschwindigkeit) sind die jeweiligen Gesamtkräfte und -drehmomente wichtig. Dafür müssen alle wirkenden Kräfte und Drehmomente bestimmt werden, die wiederum von den Trägheitsmomenten und Beschleunigungswerten abhängen. Für die Selektion reicht es, diese Werte mit einer Genauigkeit von etwa 10 % zu ermitteln.

Mechanisches Spiel des Antriebs



Ebenfalls gilt es die Frage nach dem maximal zulässigen **mechanischen Spiel des Antriebs** zu klären.

Schlüsselwerte



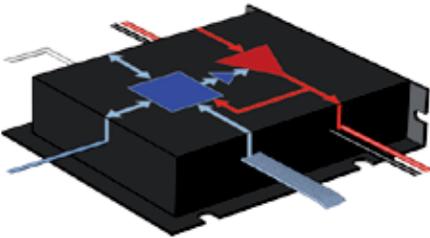
Die für die Auswahl des Antriebs wichtigen **Schlüsselwerte**, welche die Last charakterisieren, lassen sich schliesslich aus den Arbeitspunkten bestimmen.

Detaillierte Informationen hierzu im Buch «Auslegung von hochpräzisen Kleinstantrieben», Kap. 4.

A.3 Verifikation Regler und Sensor

Bei der Verifikation von **Regler und Sensor** wird überprüft, ob deren Vorauswahl in der Situationsanalyse (Selektionsschritt 1, siehe Seite 2) zum gefundenen Motor kompatibel ist. Die geeigneten Komponenten (Regler und Sensor) lassen sich durch die detaillierte Betrachtung der Ausgestaltung des Regelkreises definitiv bestimmen.

Regler oder Motion Controller



In höher entwickelten Antriebssystemen ist der Regler oder Motion Controller das zentrale Element. Dort laufen alle Fäden zusammen. Deshalb muss er einer Reihe von unterschiedlichsten Anforderungen genügen.

Der Regler muss

- die richtige Stellgrösse mit genügender Genauigkeit in sinnvoller Zeit regeln können
- die Informationen des Sensors verarbeiten können
- die Befehle und Sollwerte des übergeordneten Systems verstehen
- die benötigte elektrische Leistung bringen
- zur Motorart (DC oder EC) und zur Kommutierung passen

Sensor



Der Sensor (Encoder, DC-Tacho oder Resolver) muss grundsätzlich zur Regelaufgabe und den anderen Komponenten passen.

Zusätzlich gelten die folgenden weiteren Auswahlkriterien.

Der Sensor muss

- gemäss maxon-Baukastensystem auf den Motor montiert werden können.
- die richtige Stellgrösse (Drehzahl, Drehmoment, Drehrichtung) mit genügender Auflösung messen.
Faustregel: Die Auflösung des Sensors sollte mindestens viermal höher sein, als die geforderte Genauigkeit der Stellgrösse.

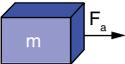
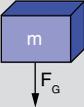
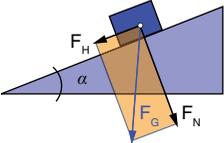
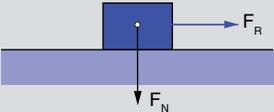
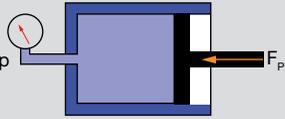
Detaillierte Informationen hierzu im Buch «Auslegung von hochpräzisen Kleinstantrieben», Kap. 9.

1. Masse, Kraft, Drehmoment

1.1 Kräfte Allgemein

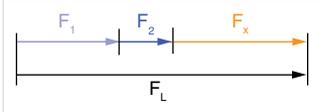
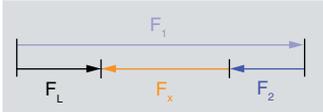
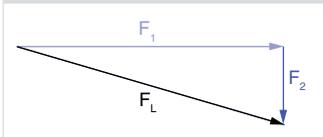
Die Kraft, welche die Masse 1 kg in 1 s um 1 m/s beschleunigt, hat die Einheit $\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$ mit dem besonderen Einheitennamen Newton (N).

Typische Teilkräfte in Antriebssystem

	Kraft zur Beschleunigung = Masse x Beschleunigung $[F] = \text{kg} \cdot \text{m/s}^2 = \text{kgm/s}^2 = \text{N}$	$F_a = m \cdot a = m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t}$
	Gravitation (Erdbeschleunigung $g = 9.81 \text{ m/s}^2 = 9.81 \text{ N/kg} \approx 10 \text{ N/kg}$)	$F_G = m \cdot g$
	Kräfteaufteilung an der schiefen Ebene in Hangabtriebskraft und Normalkraft	$F_H = F_G \cdot \sin \alpha$ $F_N = F_G \cdot \cos \alpha$
	Reibkraft Gleitende Reibung	$F_R = \mu \cdot F_N$
	Federkraft Druck-, Zugfedern	$F_S = k \cdot \Delta l$
	Druckkraft	$F_p = p \cdot A$

Symbol	Name	SI	Symbol	Name	SI
A	Querschnittsfläche	m^2	g	Fallbeschleunigung	m/s^2
F	Kraft (Force)	N	k	Federkonstante	N/m
F_a	Beschleunigungskraft	N	m	Masse	kg
F_G	Gewichtskraft Körper	N	p	Druck ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 10^{-5} \text{ bar}$)	N
F_H	Hangabtriebskraft	N	α	Winkel schiefe Ebene	$^\circ$
F_N	Normalkraft (Kraft senkrecht zur Ebene)	N	Δl	Auslenkung aus Ruhelage	m
F_p	Druckkraft	N	Δt	Zeitdauer	s
F_R	Reibkraft	N	Δv	Geschwindigkeitsänderung	m/s
F_S	Federkraft	N	μ	Reibungszahl (siehe Tabelle Kap. 10.2)	
a	Beschleunigung	m/s^2			

Berechnung der gesamten Lastkraft bestehend aus Teilkräften

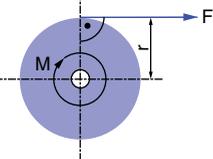
	Addition gleichgerichteter Kräfte	$F_L = F_1 + F_2 + \dots + F_x$
	Addition gegengerichteter Kräfte	$F_L = F_1 - F_2 - \dots - F_x$
	Addition senkrecht zueinander stehender Kräfte	$F_L = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$

Symbol	Name	SI
F_L	Lastkraft (Abgang)	N
$F_1/F_2/F_x$	Teilkräfte	N

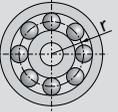
1.2 Drehmomente Allgemein

Das Drehmoment ist ein Mass für die Drehwirkung, die eine Kraft auf ein drehbares System ausübt. Es spielt für die Rotation die gleiche Rolle, wie die Kraft für die geradlinige Bewegung. Die Gleichungen gelten immer bezüglich einer definierten Drehachse.

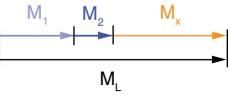
Allgemein

	<p>Drehmoment = Kraft x Hebelarm $[M] = N \cdot m = Nm$</p>	$M = F \cdot r$
---	---	-----------------

Typische Teilmomente in Antrieben

<p>Drehmoment zum Beschleunigen von Massenträgheiten Drehmoment = Trägheitsmoment x Winkelbeschleunigung (Berechnung von Trägheitsmomenten siehe folgende Seiten)</p>		$M_\alpha = J \cdot \alpha = J \cdot \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$ $M_\alpha = J \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \frac{\Delta n}{\Delta t}$
	<p>Reibung Kugel- und Sintergleitlager (vereinfacht)</p>	$M_R = \mu \cdot F_{KL} \cdot r_{KL}$
	<p>Drehmoment von Spiral- oder Schenkelfedern</p>	$M_S = k_m \cdot \Delta\varphi$

Berechnung des Lastmomentes bestehend aus Teilmomenten

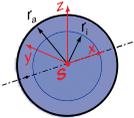
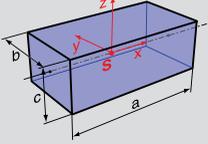
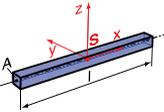
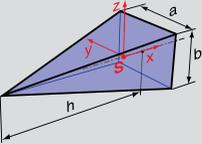
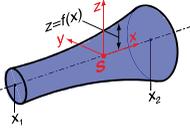
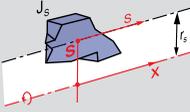
	<p>Addition gleichgerichteter Drehmomente</p>	$M_L = M_1 + M_2 + \dots + M_x$
	<p>Addition gegengerichteter Drehmomente</p>	$M_L = M_1 - M_2 - \dots - M_x$

Symbol	Name	SI	Symbol	Name	SI
F	Kraft (Force)	N	r	Radius	m
F_{KL}	Lagerbelastung axial/radial	N	r_{KL}	Mittlerer Lagerdurchmesser	m
J	Massenträgheitsmoment	kgm ²	α	Winkelbeschleunigung	rad/s ²
M	Drehmoment	Nm	Δt	Zeitdauer	s
M_L	Lastdrehmoment	Nm	$\Delta\varphi$	Drehwinkel	rad
M_R	Reib(dreh)moment	Nm	$\Delta\omega$	Winkelgeschwindigkeitsänderung	rad/s
M_S	Drehmoment Spiralfeder	Nm	μ	Reibungszahl (siehe Tabelle Kap. 10.2)	
M_α	Drehmoment für Beschleunigung	Nm			
$M_1/M_2/M_x$	Teilmomente	Nm	Symbol	Name	maxon
k_m	Direktionsmoment (Federkonstante)	Nm	Δn	Drehzahländerung	min ⁻¹

1.3 Trägheitsmomente verschiedener Körper bezüglich der Hauptachsen durch den Schwerpunkt S

Körper	Abbildung	Masse, Trägheitsmomente
Kreiszylinder		$m = \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h$ $J_x = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2$ $J_y = J_z = \frac{1}{12} \cdot m \cdot (3r^2 + h^2)$
Hohlzylinder		$m = \rho \cdot \pi \cdot (r_a^2 - r_i^2) \cdot h$ $J_x = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_a^2 + r_i^2)$ $J_y = J_z = \frac{1}{4} \cdot m \cdot \left(r_a^2 + r_i^2 + \frac{h^2}{3} \right)$
Kreiskegel		$m = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h$ $J_x = \frac{3}{10} \cdot m \cdot r^2$ $J_y = J_z = \frac{3}{80} \cdot m \cdot (4r^2 + h^2)$
Kreiskegelstumpf		$m = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot (r_2^2 + r_2 r_1 + r_1^2) \cdot h$ $J_x = \frac{3}{10} \cdot m \cdot \frac{r_2^5 - r_1^5}{r_2^3 - r_1^3}$
Kreistorus		$m = 2\rho \cdot \pi^2 \cdot r^2 \cdot R$ $J_x = J_y = \frac{1}{8} \cdot m \cdot (4R^2 + 5r^2)$ $J_z = \frac{1}{4} \cdot m \cdot (4R^2 + 3r^2)$
Kugel		$m = \frac{4}{3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot r^3$ $J_x = J_y = J_z = \frac{2}{5} \cdot m \cdot r^2$

Symbol	Name	SI	Symbol	Name	SI
J_x	Massenträgheitsmoment bezüglich der Drehachse x	kgm ²	h	Höhe	m
J_y	Massenträgheitsmoment bezüglich der Drehachse y	kgm ²	m	Masse	kg
J_z	Massenträgheitsmoment bezüglich der Drehachse z	kgm ²	r	Radius	m
R	Radius Kreistorus um z-Achse	m	r_a	Aussenradius	m
			r_i	Innenradius	m
			r_1	Radius 1	m
			r_2	Radius 2	m
			ρ	Dichte	kg/m ³

Körper	Abbildung	Masse, Trägheitsmomente
Hohlkugel		$m = \frac{4}{3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot (r_a^3 - r_i^3)$ $J_x = J_y = J_z = \frac{2}{5} \cdot m \cdot \frac{r_a^5 - r_i^5}{r_a^3 - r_i^3}$
Quader		$m = \rho \cdot a \cdot b \cdot c$ $J_x = \frac{1}{12} \cdot m \cdot (b^2 + c^2)$
Dünner Stab		$m = \rho \cdot A \cdot l$ $J_x = J_z = \frac{1}{12} \cdot m \cdot l^2$
Rechteckpyramide		$m = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot a \cdot b \cdot h$ $J_x = \frac{1}{20} \cdot m \cdot (a^2 + b^2)$ $J_y = \frac{1}{20} \cdot m \cdot (b^2 + \frac{3}{4} h^2)$
Beliebiger Rotationskörper		$m = \rho \cdot \pi \cdot \int_{x_1}^{x_2} f^2(x) \cdot dx$ $J_x = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot \int_{x_1}^{x_2} f^4(x) \cdot dx$
Satz von Steiner Trägheitsmoment bezüglich einer parallelen Drehachse x im Abstand r_s zur Achse s durch den Schwerpunkt S.		$J_x = m \cdot r_s^2 + J_s$

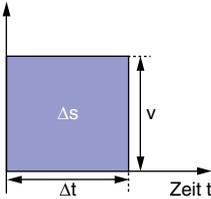
Symbol	Name	SI	Symbol	Name	SI
A	Querschnitt	m^2	b	Länge Kante b	m
J_s	Massenträgheitsmoment bezüglich der Achse s durch den Schwerpunkt S	kgm^2	c	Länge Kante c	m
J_x	Massenträgheitsmoment bezüglich der Drehachse x	kgm^2	h	Höhe	m
J_y	Massenträgheitsmoment bezüglich der Drehachse y	kgm^2	l	Länge	m
J_z	Massenträgheitsmoment bezüglich der Drehachse z	kgm^2	m	Masse	kg
a	Länge Kante a	m	r_a	Aussenradius	m
			r_i	Innenradius	m
			r_s	Abstand der Achse s von Schwerpunkt S	m
			ρ	Dichte	kg/m^3
			x_1	Punkt 1 auf der x -Achse	m
			x_2	Punkt 2 auf der x -Achse	m

2. Kinematik

2.1 Lineare (translative) Bewegung

Gleichförmige Bewegung

Geschwindigkeit v



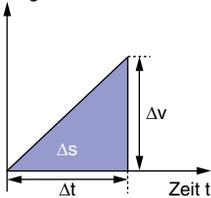
Geschwindigkeit
 $v = \Delta s / \Delta t = \text{konstant}$
 $[v] = \text{m/s}$

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

$$\Delta s = v \cdot \Delta t$$

Konstante Beschleunigung aus dem Stand

Geschwindigkeit v



Beschleunigung
 $a = \Delta v / \Delta t = \text{konstant}$
 $[a] = \text{m/s}^2$

$$\Delta v = a \cdot \Delta t$$

$$\Delta s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot \Delta t^2$$

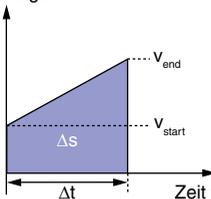
Freier Fall

$$\Delta v = g \cdot \Delta t$$

$$h = \frac{1}{2} \cdot g \cdot \Delta t^2$$

Konstante Beschleunigung aus Grundgeschwindigkeit

Geschwindigkeit v



$$v_{\text{end}} = v_{\text{start}} + a \cdot \Delta t$$

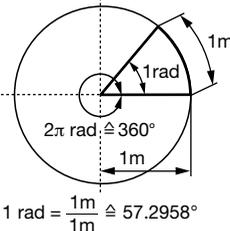
$$\Delta s = v_{\text{start}} \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a \cdot \Delta t^2$$

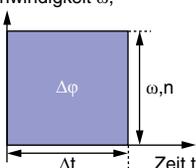
Symbol	Name	SI	Symbol	Name	SI
a	Beschleunigung	m/s^2	$t, \Delta t$	Zeit, Zeitdauer	s
g	Fallbeschleunigung	m/s^2	$v, \Delta v$	Geschwindigkeit, (-s)nderung	m/s
h	Fallhöhe	m	v_{end}	Geschwindigkeit nach Beschleunigung	m/s
Δs	Weg	m	v_{start}	Geschwindigkeit vor Beschleunigung	m/s

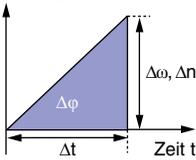
Anmerkungen:

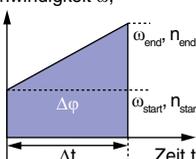
- Die eingefärbten Flächen stellen den während des Zeitabschnittes Δt zurückgelegten Weg Δs dar.

2.2 Rotative Bewegung

Allgemein		
 <p>1 rad = $\frac{1\text{m}}{1\text{m}} \hat{=} 57.2958^\circ$</p>	Umrechnung zwischen Radiant und Grad (Die Einheit <i>rad</i> wird häufig weggelassen.)	$1 \text{ rad} \hat{=} \frac{360^\circ}{2\pi}$ $360^\circ \hat{=} 2\pi \text{ rad}$
	Umrechnung zwischen Winkelgeschwindigkeit und Drehzahl	$\omega = \frac{\pi}{30} \cdot n \quad n = \frac{30}{\pi} \cdot \omega$

Gleichförmige Bewegung		
Winkelgeschwindigkeit ω , Drehzahl n 	Winkelgeschwindigkeit $\omega = \Delta\varphi / \Delta t = \text{konstant}$ $[\omega] = \text{rad/s}$	$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$
	Drehzahl $n = 30 / \pi \cdot \Delta\varphi / \Delta t = \text{konst.}$ $[n] = 1/\text{min}$	$n = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$

Konstante Beschleunigung aus dem Stand		
Winkelgeschwindigkeit ω , Drehzahl n 	Beschleunigung $\alpha = \Delta\omega / \Delta t = \text{konstant}$ $[\alpha] = 1/\text{s}^2 = \text{rad/s}^2$	$\Delta\omega = \alpha \cdot \Delta t$ $\Delta n = \frac{30}{\pi} \cdot \alpha \cdot \Delta t$
		$\Delta\varphi = \frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot \Delta t^2$ $\Delta\varphi = \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \Delta n \cdot \Delta t$

Konstante Beschleunigung aus Grundgeschwindigkeit		
Winkelgeschwindigkeit ω , Drehzahl n 		$\omega_{\text{end}} = \omega_{\text{start}} + \alpha \cdot \Delta t$ $n_{\text{end}} = n_{\text{start}} + \frac{30}{\pi} \cdot \alpha \cdot \Delta t$
		$\Delta\varphi = \omega_{\text{start}} \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot \Delta t^2$ $\Delta\varphi = \frac{\pi}{30} \cdot n_{\text{start}} \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \Delta n \cdot \Delta t$

Symbol	Name	SI	Symbol	Name	SI
$t, \Delta t$	Zeit, Zeitdauer	s	ω_{start}	Winkelgeschw. vor Beschleunigung	rad/s
α	Winkelbeschleunigung	rad/s ²	Symbol	Name	maxon
$\Delta\varphi$	Drehwinkel	rad	$n, \Delta n$	Drehzahl, (-änderung)	min ⁻¹
$\omega, \Delta\omega$	Winkelgeschwindigkeit, (-änderung)	rad/s	n_{end}	Drehzahl nach Beschleunigung	min ⁻¹
ω_{end}	Winkelgeschw. nach Beschleunigung	rad/s	n_{start}	Drehzahl vor Beschleunigung	min ⁻¹

Anmerkungen:

- Die eingefärbten Flächen stellen den während des Zeitabschnittes Δt zurückgelegten Drehwinkel $\Delta\varphi$ dar.
- Drehwinkel $\Delta\varphi = 2 \cdot \pi \cdot \text{Anzahl der Umläufe} = 360^\circ \cdot \text{Anzahl der Umläufe}$

2.3 Typische lineare (translative) Bewegungsprofile

Profil	Allgemein	Symmetrisch
Eignung		Lange Verfahrenwege bei begrenzter Geschwindigkeit
Diagramm		

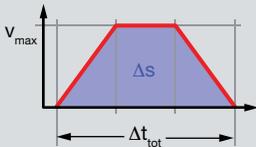
Aufgabe:

Strecke Δs in der Zeit Δt_{tot} zurücklegen	$v_{max} = \frac{\Delta s}{\Delta t_{tot} - \frac{\Delta t_a + \Delta t_c}{2}}$ $a_{max} = \frac{v_{max}}{\Delta t_a}$	$v_{max} = \frac{\Delta s}{(\Delta t_{tot} - \Delta t_a)}$ $a_{max} = \frac{\Delta s}{(\Delta t_{tot} - \Delta t_a) \cdot \Delta t_a}$
Strecke Δs bei limitierter Geschwindigkeit v_{max} zurücklegen	$\Delta t_{tot} = \frac{\Delta s}{v_{max}} + \frac{\Delta t_a + \Delta t_c}{2}$ $a_{max} = \frac{v_{max}}{\Delta t_a}$	$\Delta t_{tot} = \frac{\Delta s}{v_{max}} + \Delta t_a$ $a_{max} = \frac{v_{max}}{\Delta t_a}$
Strecke Δs bei limitierter Beschleunigung a_{max} zurücklegen		$\Delta t_{tot} = \frac{\Delta s}{a_{max} \cdot \Delta t_a} + \Delta t_a$ $v_{max} = a_{max} \cdot \Delta t_a$
Bewegung in der Zeit Δt_{tot} mit maximaler Geschwindigkeit v_{max} abschliessen	$\Delta s = \left(\frac{\Delta t_a + \Delta t_c}{2} + \Delta t_b \right) \cdot v_{max}$ $a_{max} = \frac{v_{max}}{\Delta t_a}$	$\Delta s = (\Delta t_{tot} - \Delta t_a) \cdot v_{max}$ $a_{max} = \frac{v_{max}}{\Delta t_a}$
Bewegung in der Zeit Δt_{tot} mit maximaler Beschleunigung a_{max} abschliessen		$\Delta s = a_{max} \cdot (\Delta t_{tot} - \Delta t_a) \cdot \Delta t_a$ $v_{max} = a_{max} \cdot \Delta t_a$
Bewegung mit limitierter Geschwindigkeit v_{max} und limitierter Beschleunigung a_{max}		

Symbol	Name	SI	Symbol	Name	SI
a_{max}	Maximale Beschleunigung	m/s ²	Δt_a	Zeit a	s
v_{max}	Maximale Geschwindigkeit	m/s	Δt_b	Zeit b	s
Δs	Weg	m	Δt_c	Zeit c	s
			Δt_{tot}	Gesamtzeit	s

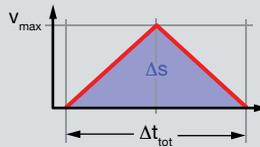
3/3 Trapez

Optimiert auf minimale Leistung
(bei gegebenem Δs und Δt):
Thermisch meist vorteilhaft



Dreieck

Optimiert auf minimale Beschleunigung/
Maximalkraft (bei gegebenem Δs und Δt).
Optimiert für minimalen Zeitbedarf
(bei gegebenem Δs und a_{max}).



$$v_{max} = 1.5 \cdot \frac{\Delta s}{\Delta t_{tot}}$$

$$a_{max} = 4.5 \cdot \frac{\Delta s}{\Delta t_{tot}^2}$$

$$v_{max} = 2 \cdot \frac{\Delta s}{\Delta t_{tot}}$$

$$a_{max} = 4 \cdot \frac{\Delta s}{\Delta t_{tot}^2}$$

$$\Delta t_{tot} = 1.5 \cdot \frac{\Delta s}{v_{max}}$$

$$a_{max} = 2 \cdot \frac{v_{max}^2}{\Delta s}$$

$$\Delta t_{tot} = 2 \cdot \frac{\Delta s}{v_{max}}$$

$$a_{max} = \frac{v_{max}^2}{\Delta s}$$

$$\Delta t_{tot} = \frac{3}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta s}{a_{max}}} \approx 2.12 \cdot \sqrt{\frac{\Delta s}{a_{max}}}$$

$$v_{max} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\Delta s \cdot a_{max}} \approx 0.7 \cdot \sqrt{\Delta s \cdot a_{max}}$$

$$\Delta t_{tot} = 2 \cdot \sqrt{\frac{\Delta s}{a_{max}}}$$

$$v_{max} = \sqrt{\Delta s \cdot a_{max}}$$

$$\Delta s = \frac{2}{3} \cdot \Delta t_{tot} \cdot v_{max}$$

$$a_{max} = 3 \cdot \frac{v_{max}}{\Delta t_{tot}}$$

$$\Delta s = \frac{1}{2} \cdot \Delta t_{tot} \cdot v_{max}$$

$$a_{max} = 2 \cdot \frac{v_{max}}{\Delta t_{tot}}$$

$$\Delta s = \frac{2}{9} \cdot a_{max} \cdot \Delta t_{tot}^2 \approx 0.22 \cdot a_{max} \Delta t_{tot}^2$$

$$v_{max} = \frac{1}{3} \cdot a_{max} \cdot \Delta t_{tot} \approx 0.33 \cdot a_{max} \Delta t_{tot}$$

$$\Delta s = \frac{1}{4} \cdot a_{max} \cdot \Delta t_{tot}^2$$

$$v_{max} = \frac{1}{2} \cdot a_{max} \cdot \Delta t_{tot}$$

$$\Delta s = 2 \cdot \frac{v_{max}^2}{a_{max}}$$

$$\Delta t_{tot} = 3 \cdot \frac{v_{max}}{a_{max}}$$

$$\Delta s = \frac{v_{max}^2}{a_{max}}$$

$$\Delta t_{tot} = 2 \cdot \frac{v_{max}}{a_{max}}$$

Symbol **Name**
 a_{max} Maximale Beschleunigung
 v_{max} Maximale Geschwindigkeit

SI
m/s²
m/s

Symbol **Name**
 Δs Weg
 Δt_{tot} Gesamtzeit

SI
m
s

2.4 Typische rotative Bewegungsprofile

Profil	Allgemein	Symmetrisch
Eignung		Lange Rotation bei begrenzter Drehzahl
Diagramm		

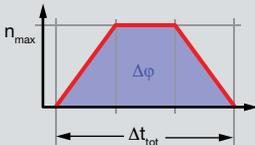
Aufgabe:

Winkel $\Delta\varphi$ in der Zeit Δt_{tot} zurücklegen	$n_{max} = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{\Delta\varphi}{\Delta t_{tot} - \frac{\Delta t_a + \Delta t_c}{2}}$ $\alpha_{max} = \frac{\Delta\varphi}{\left(\Delta t_{tot} - \frac{\Delta t_a + \Delta t_c}{2}\right) \cdot \Delta t_a}$	$n_{max} = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{\Delta\varphi}{(\Delta t_{tot} - \Delta t_a)}$ $\alpha_{max} = \frac{\Delta\varphi}{(\Delta t_{tot} - \Delta t_a) \cdot \Delta t_a}$
Winkel $\Delta\varphi$ bei limitierter Drehzahl n_{max} zurücklegen	$\Delta t_{tot} = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{\Delta\varphi}{n_{max}} + \frac{\Delta t_a + \Delta t_c}{2}$ $\alpha_{max} = \frac{\pi}{30} \cdot \frac{n_{max}}{\Delta t_a}$	$\Delta t_{tot} = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{\Delta\varphi}{n_{max}} + \Delta t_a$ $\alpha_{max} = \frac{\pi}{30} \cdot \frac{n_{max}}{\Delta t_a}$
Winkel $\Delta\varphi$ bei limitierter Winkelbeschleunigung α_{max} zurücklegen		$\Delta t_{tot} = \frac{\Delta\varphi}{\alpha_{max} \cdot \Delta t_a} + \Delta t_a$ $n_{max} = \frac{30}{\pi} \cdot \alpha_{max} \cdot \Delta t_a$
Bewegung in der Zeit Δt_{tot} mit maximaler Drehzahl n_{max} abschliessen	$\Delta\varphi = \frac{\pi}{30} \cdot n_{max} \cdot \left(\frac{\Delta t_a + \Delta t_c}{2} + \Delta t_b\right)$ $\alpha_{max} = \frac{\pi}{30} \cdot \frac{n_{max}}{\Delta t_a}$	$\Delta\varphi = \frac{\pi}{30} \cdot n_{max} \cdot (\Delta t_{tot} - \Delta t_a)$ $\alpha_{max} = \frac{\pi}{30} \cdot \frac{n_{max}}{\Delta t_a}$
Bewegung in der Zeit Δt_{tot} mit maximaler Winkelbeschleunigung α_{max} abschliessen		$\Delta\varphi = \alpha_{max} \cdot (\Delta t_{tot} - \Delta t_a) \cdot \Delta t_a$ $n_{max} = \frac{30}{\pi} \cdot \alpha_{max} \cdot \Delta t_a$
Bewegung mit limitierter Drehzahl n_{max} und limitierter Winkelbeschleunigung α_{max}		

Symbol	Name	SI	Symbol	Name	SI
α_{max}	Maximale Winkelbeschleunigung	rad/s ²	$\Delta\varphi$	Drehwinkel	rad
Δt_a	Zeit a	s			
Δt_b	Zeit b	s	Symbol	Name	maxon
Δt_c	Zeit c	s	n_{max}	Maximale Drehzahl Lastzyklus	min ⁻¹
Δt_{tot}	Gesamtzeit	s			

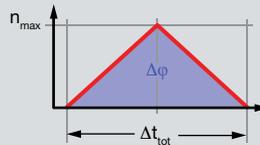
3/3 Trapez

Optimiert auf minimale Leistung
(bei gegebenem $\Delta\varphi$ und Δt):
Thermisch meist vorteilhaft



Dreieck

Optimiert auf minimale Winkelbeschleunigung/
minimales Drehmoment (bei gegebenem
 $\Delta\varphi$ und Δt) und für minimalen Zeitbedarf
(bei gegebenem $\Delta\varphi$ und α_{max}).



$$n_{max} = 1.5 \cdot \frac{30}{\pi} \cdot \frac{\Delta\varphi}{\Delta t_{tot}}$$

$$\alpha_{max} = 4.5 \cdot \frac{\Delta\varphi}{\Delta t_{tot}^2}$$

$$\Delta t_{tot} = 1.5 \cdot \frac{30}{\pi} \cdot \frac{\Delta\varphi}{n_{max}}$$

$$\alpha_{max} = 2 \cdot \frac{\pi^2}{30^2} \cdot \frac{n_{max}^2}{\Delta\varphi}$$

$$\Delta t_{tot} = \frac{3}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta\varphi}{\alpha_{max}}} \approx 2.12 \cdot \sqrt{\frac{\Delta\varphi}{\alpha_{max}}}$$

$$n_{max} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{30}{\pi} \cdot \sqrt{\Delta\varphi \cdot \alpha_{max}} \approx 6.75 \cdot \sqrt{\Delta\varphi \cdot \alpha_{max}}$$

$$\Delta\varphi = \frac{2}{3} \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \Delta t_{tot} \cdot n_{max}$$

$$\alpha_{max} = 3 \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \frac{n_{max}}{\Delta t_{tot}}$$

$$\Delta\varphi = \frac{2}{9} \cdot \alpha_{max} \cdot \Delta t_{tot}^2 \approx 0.22 \cdot \alpha_{max} \cdot \Delta t_{tot}^2$$

$$n_{max} = \frac{1}{3} \cdot \frac{30}{\pi} \cdot \alpha_{max} \cdot \Delta t_{tot} \approx 3.18 \cdot \alpha_{max} \cdot \Delta t_{tot}$$

$$n_{max} = 2 \cdot \frac{30}{\pi} \cdot \frac{\Delta\varphi}{\Delta t_{tot}}$$

$$\alpha_{max} = 4 \cdot \frac{\Delta\varphi}{\Delta t_{tot}^2}$$

$$n_{max} = 2 \cdot \frac{30}{\pi} \cdot \frac{\Delta\varphi}{\Delta t_{tot}}$$

$$\alpha_{max} = 4 \cdot \frac{\Delta\varphi}{\Delta t_{tot}^2}$$

$$\Delta t_{tot} = 2 \cdot \frac{30}{\pi} \cdot \frac{\Delta\varphi}{n_{max}}$$

$$\alpha_{max} = \frac{n_{max}^2}{\Delta\varphi} \cdot \frac{\pi^2}{30^2}$$

$$\Delta t_{tot} = 2 \cdot \sqrt{\frac{\Delta\varphi}{\alpha_{max}}}$$

$$n_{max} = \frac{30}{\pi} \cdot \sqrt{\Delta\varphi \cdot \alpha_{max}}$$

$$\Delta\varphi = \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \Delta t_{tot} \cdot n_{max}$$

$$\alpha_{max} = 2 \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \frac{n_{max}}{\Delta t_{tot}}$$

$$\Delta\varphi = \frac{1}{4} \cdot \alpha_{max} \cdot \Delta t_{tot}^2$$

$$n_{max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{30}{\pi} \cdot \alpha_{max} \cdot \Delta t_{tot}$$

$$\Delta\varphi = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{n_{max}^2}{\alpha_{max}}$$

$$\Delta t_{tot} = 2 \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \frac{n_{max}}{\alpha_{max}}$$

Symbol	Name	SI	Symbol	Name	maxon
α_{max}	Maximale Winkelbeschleunigung	rad/s ²	n_{max}	Maximale Drehzahl Lastzyklus	min ⁻¹
Δt_{tot}	Gesamtzeit	s			
$\Delta\varphi$	Drehwinkel	rad			

Notizen

3. Mechanische Antriebe

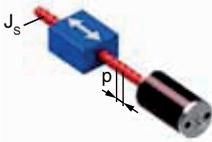
3.1 Mechanische Umformung

Einteilung	Abgabeleistung/Umformung Allgemein
<div style="text-align: center; background-color: #333; color: white; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">Translation</div> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <div style="border: 1px solid #ccc; padding: 5px; margin-bottom: 5px; background-color: #eee;">Spindel</div> <div style="margin-left: 20px;">Kugelumlaufspindel</div> <div style="margin-left: 20px;">Trapezspindel</div> <div style="border: 1px solid #ccc; padding: 5px; margin-top: 20px; background-color: #eee;">Exzenter</div> <div style="margin-left: 20px;">Kurbelwelle</div> </div> <div style="width: 45%;"> <div style="border: 1px solid #ccc; padding: 5px; margin-bottom: 5px; background-color: #eee;">Zahnstange</div> <div style="border: 1px solid #ccc; padding: 5px; margin-top: 20px; background-color: #eee;">Förderband</div> <div style="margin-left: 20px;">Kran</div> <div style="border: 1px solid #ccc; padding: 5px; margin-top: 20px; background-color: #eee;">Fahrzeug</div> </div> </div>	<p>Abgabeleistung Translation</p> $[W] = m/s \cdot N$ $P_{mech} = v \cdot F$ <p>Umformung Allgemein</p> $P_{mech,L} = \frac{P_{mech,in}}{\eta}$ $v_L \cdot F_L = \frac{\omega_{in} \cdot M_{in}}{\eta}$
<div style="text-align: center; background-color: #333; color: white; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">Rotation</div> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <div style="border: 1px solid #ccc; padding: 5px; margin-bottom: 5px; background-color: #eee;">Getriebe</div> <div style="margin-left: 20px;">Stirnradgetriebe</div> <div style="margin-left: 20px;">Planetengetriebe</div> <div style="margin-left: 20px;">Kegelradgetriebe</div> <div style="margin-left: 20px;">Schneckengetriebe</div> <div style="margin-left: 20px;">Wolfromgetriebe</div> </div> <div style="width: 45%;"> <div style="border: 1px solid #ccc; padding: 5px; margin-bottom: 5px; background-color: #eee;">Riemen</div> <div style="margin-left: 20px;">Zahnriemen</div> <div style="margin-left: 20px;">Kettenantrieb</div> <div style="border: 1px solid #ccc; padding: 5px; margin-top: 20px; background-color: #eee;">Spezialdesign</div> <div style="margin-left: 20px;">Cyclo-Getriebe</div> <div style="margin-left: 20px;">Harmonic Drive®</div> </div> </div>	<p>Abgabeleistung Rotation</p> $[W] = s^{-1} \cdot Nm$ $P_{mech} = \omega \cdot M = \frac{\pi}{30} \cdot n \cdot M$ <p>Umformung Allgemein</p> $P_{mech,L} = \frac{P_{mech,in}}{\eta}$ $\omega_L \cdot M_L = \frac{\omega_{in} \cdot M_{in}}{\eta}$
Bezeichnungen in den Formeln	
<ul style="list-style-type: none"> – Lastseitige Grössen am Abgang werden mit dem Index <i>L</i> gekennzeichnet. – Eingangsseitige Grössen (meist der Motor) werden mit dem Index <i>in</i> gekennzeichnet. 	

Symbol	Name	SI	Symbol	Name	SI
F	Kraft (Force)	N	v_L	Lastgeschwindigkeit	m/s
F_L	Lastkraft (Abgang)	N	η	Wirkungsgrad	
M	Drehmoment	Nm	ω	Winkelgeschwindigkeit	rad/s
M_L	Lastdrehmoment	Nm	ω_L	Winkelgeschwindigkeit Last	rad/s
M_{in}	Drehmoment Eingang	Nm	ω_{in}	Winkelgeschwindigkeit Eingang	rad/s
P_{mech}	Mechanische Leistung	W	Symbol	Name	maxon
$P_{mech,in}$	Mechanische Eingangsleistung	W	n	Drehzahl	min ⁻¹
$P_{mech,L}$	Mechanische Abgabeleistung	W			
v	Geschwindigkeit	m/s			

3.2 Umformung mechanische Antriebe Translation

Spindelantrieb



Drehzahl	$n_m = \frac{60}{p} \cdot v_L$
----------	--------------------------------

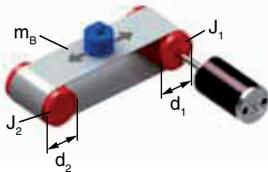
Drehmoment	$M_m = \frac{p}{2\pi} \cdot \frac{F_L}{\eta}$
------------	---

zusätzliches Drehmoment für konstante Beschleunigung (Drehzahländerung Δn_m während der Dauer Δt_a)

$$M_{m,a} = \left(J_m + J_S + \frac{m_L + m_S}{\eta} \cdot \frac{p^2}{4\pi^2} \right) \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \frac{\Delta n_m}{\Delta t_a}$$

Spiel, Positionsfehler	$\Delta\varphi_m = \Delta s_L \cdot \frac{2\pi}{p}$
------------------------	---

Bandantrieb/Förderband/Kran

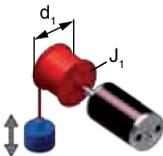


Drehzahl	$n_m = \frac{60}{\pi} \cdot \frac{v_L}{d_1}$
----------	--

Drehmoment	$M_m = \frac{d_1}{2} \cdot \frac{F_L}{\eta}$
------------	--

zusätzliches Drehmoment für konstante Beschleunigung (Drehzahländerung Δn_m während der Dauer Δt_a)

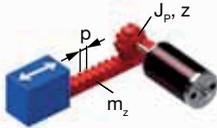
$$M_{m,a} = \left(J_m + J_1 + \frac{J_2}{\eta} \cdot \frac{d_1^2}{d_2^2} + \frac{J_X}{\eta} \cdot \frac{d_1^2}{d_X^2} + \frac{m_L + m_B}{\eta} \cdot \frac{d_1^2}{4} \right) \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \frac{\Delta n_m}{\Delta t_a}$$



Spiel, Positionsfehler	$\Delta\varphi_m = \Delta s_L \cdot \frac{2}{d_1}$
------------------------	--

Symbol	Name	SI	Symbol	Name	SI
F_L	Lastkraft	N	m_L	Masse Last	kg
J_m	Massenträgheitsmoment Eingang (Motor, Encoder, Bremse)	kgm ²	m_S	Masse Spindel	kg
J_S	Massenträgheitsmoment Spindel	kgm ²	p	Spindelsteigung	m
J_X	Massenträgheitsmoment Umlenkrolle X	kgm ²	v_L	Lastgeschwindigkeit	m/s
J_1	Massenträgheitsmoment antriebsseitig	kgm ²	Δs_L	Mechanisches Spiel Abgang	m
J_2	Massenträgheitsmoment Umlenkrolle 2	kgm ²	Δt_a	Beschleunigungszeit	s
M_m	Drehmoment Eingang	Nm	$\Delta\varphi_m$	Mechanisches Spiel Eingang	rad
$M_{m,a}$	Drehmoment für Beschleunigung	Nm	η	Wirkungsgrad	
d_X	Durchmesser Umlenkrolle X	m	Symbol	Name	maxon
d_1	Durchmesser Antriebsrolle	m	n_m	Drehzahl Eingang	min ⁻¹
d_2	Durchmesser Umlenkrolle 2	m	Δn_m	Drehzahländerung Eingang	min ⁻¹
m_B	Masse Band	kg			

Zahnstange



Drehzahl	$n_{in} = \frac{60}{p \cdot z} \cdot v_L$
----------	---

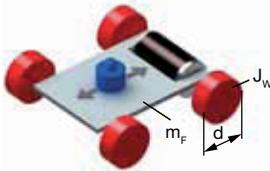
Drehmoment	$M_{in} = \frac{p \cdot z}{2\pi} \cdot \frac{F_L}{\eta}$
------------	--

zusätzliches Drehmoment für konstante Beschleunigung (Drehzahländerung Δn_{in} während der Dauer Δt_a)

$$M_{in,\alpha} = \left(J_{in} + J_p + \frac{m_L + m_z}{\eta} \cdot \frac{p^2 \cdot z^2}{4\pi^2} \right) \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \frac{\Delta n_{in}}{\Delta t_a}$$

Spiel, Positionsfehler	$\Delta\varphi_{in} = \Delta s_L \cdot \frac{2\pi}{p \cdot z}$
------------------------	--

Fahrzeug



Drehzahl	$n_{in} = \frac{60}{\pi} \cdot \frac{v_L}{d}$
----------	---

Drehmoment	$M_{in} = \frac{d}{2} \cdot \frac{F_L}{\eta}$
------------	---

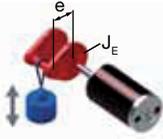
zusätzliches Drehmoment für konstante Beschleunigung (Drehzahländerung Δn_{in} während der Dauer Δt_a)

$$M_{in,\alpha} = \left(J_{in} + J_w + \frac{m_L + m_F}{\eta} \cdot \frac{d^2}{4} \right) \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \frac{\Delta n_{in}}{\Delta t_a}$$

Spiel, Positionsfehler	$\Delta\varphi_{in} = \Delta s_L \cdot \frac{2}{d}$
------------------------	---

Symbol	Name	SI	Symbol	Name	SI
F_L	Lastkraft	N	m_z	Masse Zahnstange	kg
J_{in}	Massenträgheitsmoment Eingang (Motor, Encoder, Bremse)	kgm ²	p	Teilung Verzahnung	m
J_p	Massenträgheitsmoment Ritzel	kgm ²	v_L	Lastgeschwindigkeit	m/s
J_w	Massenträgheitsmoment aller Räder zusammen	kgm ²	z	Zähnezahl Ritzel	
M_{in}	Drehmoment Eingang	Nm	Δs_L	Mechanisches Spiel Abgang	m
$M_{in,\alpha}$	Drehmoment für Beschleunigung	Nm	Δt_a	Beschleunigungszeit	s
d	Durchmesser Antriebsrad	m	$\Delta\varphi_{in}$	Mechanisches Spiel Eingang	rad
m_F	Masse Fahrzeug	kg	η	Wirkungsgrad	
m_L	Masse Last	kg	Symbol	Name	maxon
			n_{in}	Drehzahl Eingang	min ⁻¹
			Δn_{in}	Drehzahländerung Eingang	min ⁻¹

Exzenter



Sinusförmiger Geschwindigkeitsverlauf der Last
(Annahme: Konstante Motordrehzahl n_{in})

$$v_L(t) = \frac{\pi}{30} \cdot n_{in} \cdot e \cdot \sin\left(\frac{\pi}{30} \cdot n_{in} \cdot t\right)$$

Winkelabhängige periodische Beschleunigungskraft für Last,
Kolben und Gestänge (m_L)

$$F_a(\varphi) = F_a \cdot \cos\varphi = m_L \cdot \left(\frac{\pi}{30} \cdot n_{in}\right)^2 \cdot e \cdot \cos\varphi$$

Winkelabhängige Drehmomente durch unterschiedliche
Lastverhältnisse

$$\begin{aligned} M_{in1}(\varphi) &= e \cdot (F_{L1} \cdot \sin\varphi + F_{a1} \cdot \cos\varphi) & 0 \leq \varphi \leq \pi \\ M_{in2}(\varphi) &= e \cdot (F_{L2} \cdot \sin\varphi + F_{a2} \cdot \cos\varphi) & \pi \leq \varphi \leq 2\pi \end{aligned}$$

Mittlere Drehmomentbelastung

$$M_{in,RMS} = \frac{e}{\sqrt{2} \cdot \eta} \cdot \sqrt{F_{L1}^2 + F_{a1}^2 + F_{L2}^2 + F_{a2}^2}$$

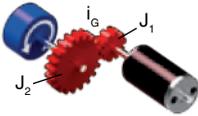
zusätzliches Drehmoment für Beschleunigung der Exzentrerscheibe
(Drehzahländerung Δn_{in} während der Dauer Δt_a)

$$M_{in,a} = \left(J_{in} + J_E\right) \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \frac{\Delta n_{in}}{\Delta t_a}$$

Symbol	Name	SI	Symbol	Name	SI
F_{L1}	Lastkraft 1. Halbtakt	N	$M_{in2}(\varphi)$	Drehmoment 2. Halbtakt	Nm
F_{L2}	Lastkraft 2. Halbtakt	N	e	Exzentrizität	m
F_a	Beschleunigungskraft	N	m_L	Masse Last	kg
$F_a(\varphi)$	Winkelabhängige periodische Beschleunigungskraft	N	$v_L(t)$	Sinusförmiger Geschwindigkeitsverlauf Last	m/s
F_{a1}	Beschleunigungskraft 1. Halbtakt	N	t	Zeit	s
F_{a2}	Beschleunigungskraft 2. Halbtakt	N	Δt_a	Beschleunigungszeit	s
J_{in}	Massenträgheitsmoment Eingang (Motor, Encoder, Bremse)	kgm ²	φ	Drehwinkel	rad
J_E	Massenträgheitsmoment Exzentrerscheibe	kgm ²	η	Wirkungsgrad	
$M_{in,RMS}$	Effektivwert Drehmoment (RMS)	Nm	Symbol	Name	maxon
$M_{in,a}$	Drehmoment für Beschleunigung	Nm	n_{in}	Drehzahl Eingang	min ⁻¹
$M_{in1}(\varphi)$	Drehmoment 1. Halbtakt	Nm	Δn_{in}	Drehzahländerung Eingang	min ⁻¹

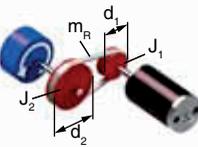
3.3 Umformung mechanische Antriebe Rotation

Getriebe



Drehzahl	$n_{in} = n_L \cdot i_G$
Drehmoment	$M_{in} = \frac{M_L}{i_G \cdot \eta}$
zusätzliches Drehmoment für konstante Beschleunigung (Drehzahländerung Δn_{in} während der Dauer Δt_a)	
$M_{in,a} = \left(J_{in} + J_1 + \frac{J_L + J_2}{i_G^2 \cdot \eta} \right) \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \frac{\Delta n_{in}}{\Delta t_a} = \left(J_{in} + J_G + \frac{J_L}{i_G^2 \cdot \eta} \right) \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \frac{\Delta n_{in}}{\Delta t_a}$	
Spiel, Positionsfehler	$\Delta \varphi_{in} = \Delta \varphi_L \cdot i_G$
Untersetzung Planetengetriebe	$i_G = \frac{z_1 + z_3}{z_1}$

Riemenantrieb



Drehzahl	$n_{in} = n_L \cdot \frac{d_2}{d_1}$
Drehmoment	$M_{in} = \frac{d_1}{d_2} \cdot \frac{M_L}{\eta}$
zusätzliches Drehmoment für konstante Beschleunigung (Drehzahländerung Δn_{in} während der Dauer Δt_a)	
$M_{in,a} = \left(J_{in} + J_1 + \frac{J_L + J_2}{\eta} \cdot \frac{d_1^2}{d_2^2} + \frac{J_x}{\eta} \cdot \frac{d_1^2}{d_x^2} + \frac{m_R \cdot d_1^2}{4 \cdot \eta} \right) \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \frac{\Delta n_{in}}{\Delta t_a}$	
Spiel, Positionsfehler	$\Delta \varphi_{in} = \Delta \varphi_L \cdot \frac{d_2}{d_1}$

Symbol	Name	SI	Symbol	Name	SI
J_G	Massenträgheitsmoment Getriebe transformiert	kgm ²	i_G	Untersetzung Getriebe (Katalogwert)	
J_{in}	Massenträgheitsmoment Eingang (Motor, Encoder, Bremse)	kgm ²	m_R	Masse Riemen	kg
J_L	Massenträgheitsmoment Last	kgm ²	z_1	Zähnezahl Sonnenrad	
J_x	Massenträgheitsmoment Umlenkrolle X	kgm ²	z_3	Zähnezahl Hohlrad	
J_1	Massenträgheitsmoment antriebsseitig	kgm ²	Δt_a	Beschleunigungszeit	s
J_2	Massenträgheitsmoment abgangsseitig	kgm ²	$\Delta \varphi_{in}$	Mechanisches Spiel Eingang	rad
M_{in}	Drehmoment Eingang	Nm	$\Delta \varphi_L$	Mechanisches Spiel Abgang	rad
$M_{in,a}$	Drehmoment für Beschleunigung	Nm	η	Wirkungsgrad	
M_L	Lastdrehmoment	Nm	Symbol	Name	maxon
d_1	Durchmesser Antriebsrolle	m	n_{in}	Drehzahl Eingang	min ⁻¹
d_2	Durchmesser Lastrolle	m	n_L	Lastdrehzahl	min ⁻¹
d_x	Durchmesser Umlenkrolle X	m	Δn_{in}	Drehzahländerung Eingang	min ⁻¹

3.4 maxon-Getriebe

Bezeichnung der maxon-Getriebe

Getriebe-Bauart

- GS Stirnradgetriebe
- GP Planetengetriebe
- KD Koaxdrive

GP **22** **A**

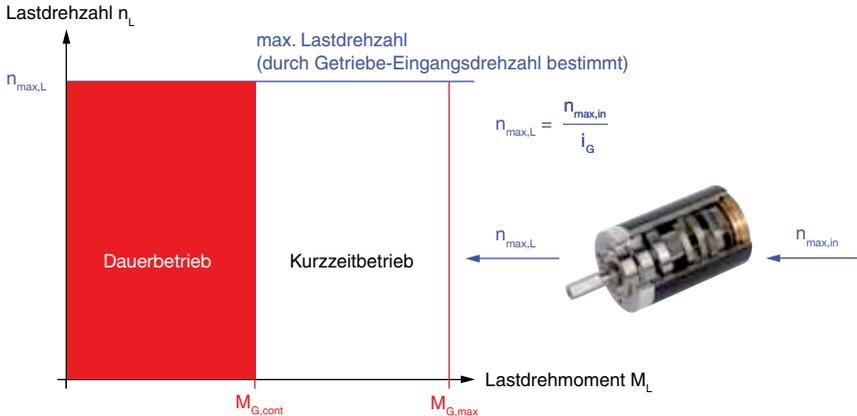
Durchmesser
in mm

Ausführung

- A Metallversion
- B Version mit überdickem Hohlrad
- C Keramikversion
- HD Heavy Duty – für Anwendungen in Öl
- HP High Power Version
- K Kunststoffversion
- L kostenoptimierte Version
- M sterilisierbare Version für Medizintechnik
- S Spindelgetriebe mit Axiallagerung
- V verstärkte Version
- Z spielarme Version

Betriebsbereiche Getriebe

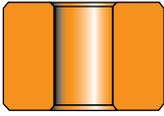
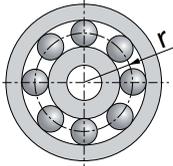
maxon-Getriebe sind auf eine Lebensdauer von mindestens 1000 Stunden bei maximalem Dauerdrehmoment und maximaler Eingangsdrehzahl ausgelegt. Werden diese Grenzwerte nicht erreicht, kann sich die Lebensdauer um ein Mehrfaches erhöhen. Kommt es zu einer Überschreitung dieser Grenzen, so ist eine progressiv abnehmende Lebensdauer zu erwarten.



Symbol	Name	SI	Symbol	Name	maxon
$M_{G,cont}$	Max. Dauerdrehmoment Getriebe (Katalogwert)	Nm	$n_{\max,in}$	Maximale Drehzahl Eingang	min ⁻¹
$M_{G,max}$	Kurzzeitig zul. Drehmoment Getriebe (Katalogwert)	Nm	$n_{\max,L}$	Maximale Drehzahl Abgang	min ⁻¹
i_G	Untersetzung Getriebe (Katalogwert)				

4. Lagerung

4.1 Eigenschaften von Sintergleitlagern und Kugellagern im Vergleich

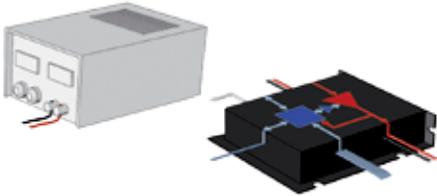
	Sintergleitlager	Kugellager
		
Betriebsarten	– Dauerbetrieb	– für alle Betriebsarten geeignet – speziell auch für Start-Stopp-Betrieb und Anwendungen mit kleinen Drehzahlen
Drehzahlbereich	– ideal ab ca. 500 min^{-1} (Bereich der hydrodynamischen Schmierung) – mit speziellen Materialpaarungen und Schmierungen auch bei tieferen Drehzahlen	– bis ca. $10\,000 \text{ min}^{-1}$ – in Spezialfällen bis $100\,000 \text{ min}^{-1}$ und höher
radiale / axiale Belastung	– nur kleine Lagerbelastungen	– höhere Belastungen – vorgespannte Kugellager: axiale Belastung bis zum Wert der Vorspannung
weitere Einsatzkriterien	– typisch in kleinen DC-Motoren bis ca. 30 mm Durchmesser und in Stirnradgetrieben – ungeeignet für umlaufende Last – nicht geeignet für Vakuumanwendungen (ausgasen) – ungeeignet für tiefe Temperaturen ($< -20^\circ\text{C}$)	– typisch in DC-Motoren ab 10 mm Durchmesser und in Planetengetrieben – vorgespannte Kugellager haben eine sehr hohe Lebensdauer und einen ruhigen Lauf: typisch in bürstenlosen DC-Motoren
Lagerspiel	– axial: typisch 0.05 ... 0.15 mm – radial: typisch 0.014 mm	– axial: typisch 0.05 ... 0.15 mm (kein Axialspiel bei Vorspannung) – radial: typisch 0.025 mm
Reibwerte	– 0.001 ... 0.01 (hydrodynamische Schmierung)	– 0.001 ... 0.1
Schmierung	– hydrodynamische Schmierung erst bei hohen Drehzahlen – Materialpaarung Welle – Lagerkörper wichtig, Porengröße des Sinterlagers und Viskosität des Schmiermittels bei Einsatztemperatur sind kritisch – Speziell: Sinter-Eisenlager mit Keramikwelle für hohe Radiallasten und hohe Lebensdauer	– Temperaturbereich der Standard-schmierung: typisch $-20 \dots 100^\circ\text{C}$ – Spezialschmierung möglich für sehr hohe oder sehr tiefe Einsatztemperaturen – Abdichtung möglich (aber höhere Reibung, tiefere Lebensdauer und tiefere Grenzdrehzahl)
Kosten	kostengünstig	teurer

Notizen

5. Elektrotechnik

5.1 Grundlagen Gleichspannung

Elektrische Leistung



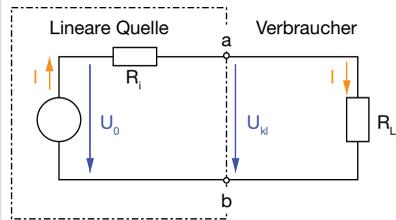
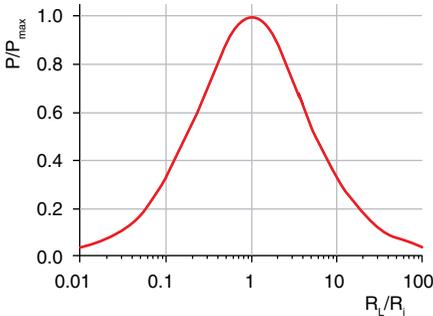
Einheit:
 $[P] = V \cdot A = VA$
 $= W = J/s$

Leistung:
 $P = U \cdot I = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R}$

Verlustleistung:
 $P_V = R \cdot I^2$

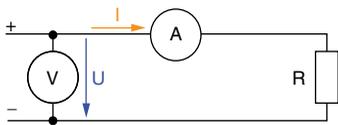
Leistungsanpassung

Bei $R_L = R_i$ wird die maximale Leistung aus einer Spannungsquelle entnommen.



$$P_{max} = \frac{U_0^2}{4 \cdot R_i} = \frac{I^2 \cdot R_i}{4}$$

Ohmsches Gesetz



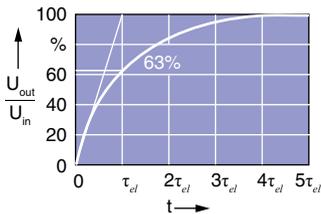
$$U = R \cdot I$$

$$I = \frac{U}{R}$$

$$R = \frac{U}{I}$$

Symbol	Name	SI	Symbol	Name	SI
I	Strom	A	R_i	Innenwiderstand Spannungsquelle	Ω
P	Leistung	W	R_L	Lastwiderstand	Ω
P_{max}	Maximale Leistung	W	U	Spannung	V
P_V	Verlustleistung	W	U_0	Ursprungspannung Spannungsquelle	V
R	Elektrischer Widerstand	Ω	U_{kl}	Klemmenspannung	V

Elektrische Zeitkonstante



Die elektrische Zeitkonstante beschreibt die Reaktionszeit des Stroms beim Ein- und Ausschalten einer Spannung.

Stromänderung über induktiver Last

$$\tau_{el} = \frac{L}{R}$$

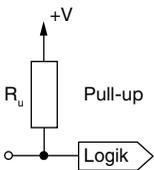
Spannungsänderung über kapazitiver Last

$$\tau_{el} = R \cdot C$$

$$[\tau_{el}] = \Omega \cdot F = \Omega \cdot As / V = s$$

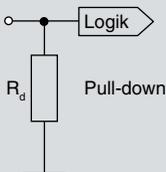
$$[\tau_{el}] = H / \Omega = Vs / A / \Omega = s$$

Pull-up / Pull-down



Pull-up: (relativ hochohmiger) Widerstand

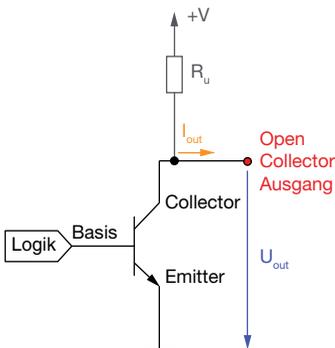
- verbindet Signalleitung mit dem höheren Spannungs-Potenzial
- bringt die Leitung auf das höhere Potenzial, falls keine extern anliegende Spannung die Leitung aktiv auf ein niedrigeres Potenzial bringt



Pull-down: (relativ hochohmiger) Widerstand

- verbindet Signalleitung mit dem niedrigeren Spannungs-Potenzial
- bringt die Leitung auf das niedrigere Potenzial, falls keine extern anliegende Spannung die Leitung aktiv auf ein höheres Potenzial bringt

Open-Collector-Ausgang



Open-Collector-Ausgang (OC):

(DE: «offener Kollektor» auch «unbeschalteter Kollektor»)

- Ausgang einer integrierten Schaltung mit einem Bipolar-Transistor mit freiem Kollektor-Ausgang.
- Meist werden die Ausgänge zusammen mit einem Pull-up-Widerstand verwendet, der im inaktiven Zustand den Ausgang auf ein höheres Potenzial hebt.

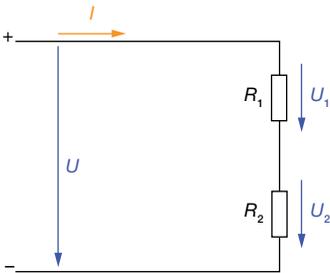
$$U_{out} = +V - (I_{out} \cdot R_u)$$

Hall-Sensoren haben meist einen Open-Collector-Ausgang ohne Pull-Up Widerstand. Dieser ist daher in den maxon-Steuerungen integriert.

Symbol	Name	SI	Symbol	Name	SI
C	Kapazität	F	t	Zeit	s
I_{out}	Ausgangsstrom	A	U_{in}	Eingangsspannung	V
L	Induktivität	H	U_{out}	Ausgangsspannung	V
R	Elektrischer Widerstand	Ω	$+V$	Speisespannung	V
R_d	Pull-down Widerstand	Ω	τ_{el}	Elektrische Zeitkonstante	s
R_u	Pull-up Widerstand	Ω			

5.2 Elektrische Widerstandsschaltungen

Reihenschaltung von Widerständen



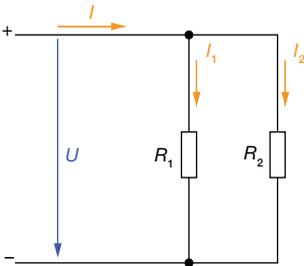
$I = \text{konstant}$

$$U = U_1 + U_2 + \dots$$

$$R = R_1 + R_2 + \dots$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

Parallelschaltung von Widerständen



$U = \text{konstant}$

$$I = I_1 + I_2 + \dots$$

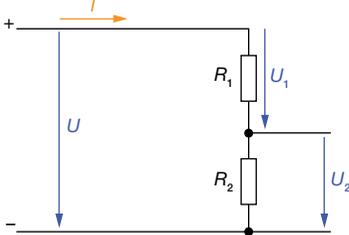
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$$

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

Symbol	Name	SI	Symbol	Name	SI
I	Gesamtstrom	A	R_1, R_2	Teilwiderstände	Ω
I_1, I_2	Teilströme	A	U	Gesamtspannung	V
R	Ersatzwiderstand	Ω	U_1, U_2	Teilspannungen	V

Spannungsteiler unbelastet

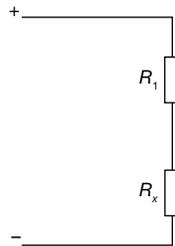
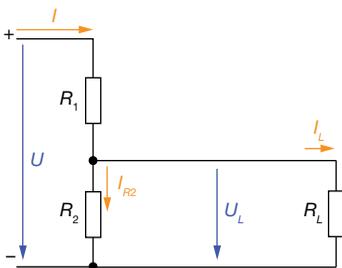


$$U_2 = U \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

$$I = \frac{U_2}{R_2} = \frac{U}{R_1 + R_2}$$

Spannungsteiler belastet



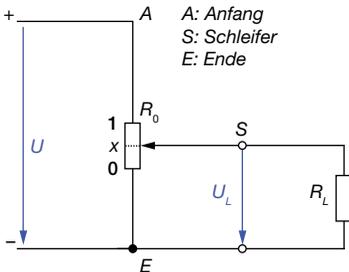
$$U_L = U \frac{R_x}{R_x + R_1}$$

$$R_x = \frac{R_L \cdot R_2}{R_L + R_2}$$

$$I_L = I \cdot \frac{R_2}{R_L + R_2}$$

$$I_{R2} = I \cdot \frac{R_L}{R_L + R_2}$$

Potentiometer



unbelastet

$$R = \frac{x \cdot R_0 \cdot R_L}{(x \cdot R_0) + R_L}$$

$$U_L = U \frac{R}{R + (1-x) \cdot R_0}$$

belastet

$$U_L = U \frac{x}{\left(\frac{R_0}{R_L} (x-x^2)\right) + 1}$$

Wicklungswiderstand

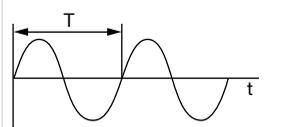
Temperaturabhängigkeit

$$R_T = R_{mot} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot \Delta T)$$

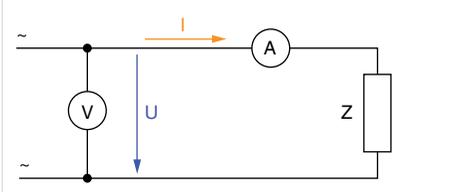
Symbol	Name	SI	Symbol	Name	SI
I	Gesamtstrom	A	R_T	Widerstand bei Temperatur T	Ω
I_L	Laststrom	A	U	Gesamtspannung	V
I_{R2}	Strom durch Widerstand R_2	A	U_1, U_2	Teilspannungen	V
R	Ersatzwiderstand	Ω	U_L	Lastspannung	V
R_0	Widerstand Potentiometer	Ω	ΔT	Temperaturdifferenz	K
R_1, R_2	Teilwiderstände	Ω	x	Stellung Potentiometer	0...1
R_L	Lastwiderstand	Ω			
R_{mot}	Anschlusswiderstand Motor (Katalogwert)	Ω	Symbol	Name	Wert
R_x	Ersatzwiderstand von R_2 und R_L	Ω	α_{Cu}	Widerstandskoeffizient Kupfer	0.0039 K ⁻¹

5.3 Grundlagen Wechselspannung

Wechselgrößen

	$[f] = 1 / s = Hz$ $[\omega] = 1 / s = rad / s$	$f = \frac{1}{T}$ $\omega = 2\pi \cdot f$
--	--	--

Ohmsches Gesetz

	$U(t) = Z \cdot I(t)$ $I(t) = \frac{U(t)}{Z}$ $Z = \frac{U(t)}{I(t)}$
--	---

Widerstände

Blindwiderstand		
X_L 	Induktiv (Reaktanz)	$X_L = \omega \cdot L = 2\pi \cdot f \cdot L$
X_C 	Kapazitiv	$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$

Impedanz (Wechselstromwiderstand)

Für Reihenschaltung von R und L , bzw. R und C	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$
---	------------------------

Symbol	Name	SI	Symbol	Name	SI
C	Kapazität	F	X	Steht für X_C oder X_L	Ω
I	Strom	A	X_C	Blindwiderstand kapazitiv	Ω
L	Induktivität	H	X_L	Blindwiderstand induktiv (Reaktanz)	Ω
R	Elektrischer Widerstand	Ω	Z	Impedanz	Ω
T	Periodendauer	s	f	Frequenz	Hz
U	Spannung	V	t	Zeit	s
			ω	Kreisfrequenz	rad/s

5.4 Einfache Filter

Allgemein

Grenzfrequenz f_c

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C} \quad \text{bzw.} \quad f_c = \frac{R}{2\pi \cdot L}$$

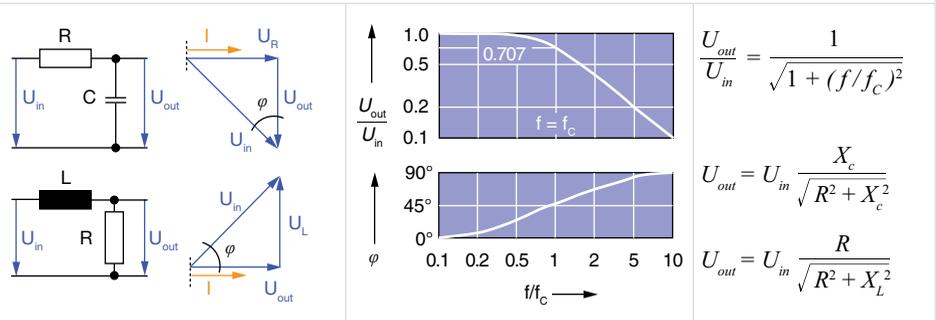
Phasenverschiebung

$$\cos\varphi = \frac{U_{out}}{U_{in}}$$

Tiefpass Filter, Integrierglied

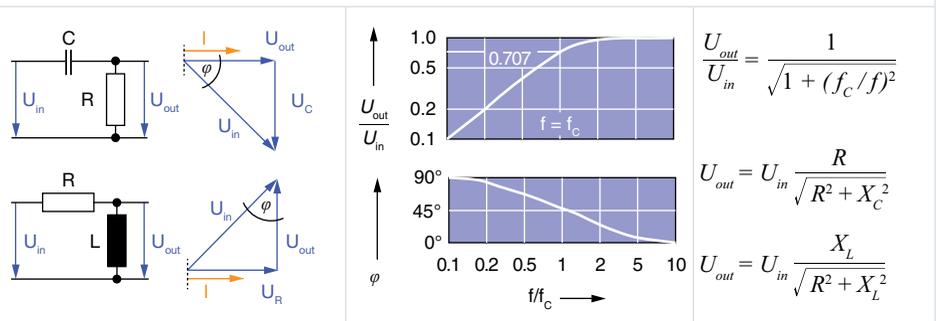
Lassen Frequenzen unterhalb ihrer Grenzfrequenz f_c annähernd ungeschwächt passieren. Höhere Frequenzen werden gedämpft.

Anwendungen: maxon-Regler-Eingänge, Messung Kommutierungssignale von maxon-Motoren.



Hochpass Filter, Differenzglied

Lassen Frequenzen oberhalb ihrer Grenzfrequenz f_c annähernd ungeschwächt passieren. Tiefere Frequenzen werden gedämpft.



Symbol	Name	SI	Symbol	Name	SI
C	Kapazität	F	U_c	Spannung über Kapazität	V
I	Strom	A	U_L	Spannung über Induktivität	V
L	Induktivität	H	f	Frequenz	Hz
R	Elektrischer Widerstand	Ω	f_c	Grenzfrequenz	Hz
U_{in}	Eingangsspannung	V	φ	Phasenverschiebungswinkel	$^\circ$
U_{out}	Ausgangsspannung	V	X_c	Blindwiderstand kapazitiv	Ω
U_R	Spannung über Widerstand	V	X_L	Blindwiderstand induktiv (Reaktanz)	Ω

6. maxon-Motoren

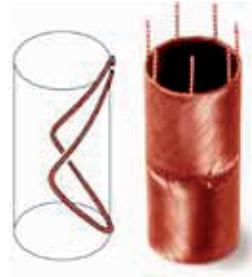
6.1 Allgemeines

Das Spezielle an maxon-Motoren

Das **Herzstück** des maxon-Motors ist die **selbsttragende eisenlose Kupferwicklung**.

Herausragende Eigenschaften der maxon DC-Motoren:

- Hoher Wirkungsgrad → geringer Energieverbrauch
- Sehr kleines Massenträgheitsmoment → höchste Beschleunigung
- Kleine Induktivität → hohe Lebensdauer
- Lineare Kennlinien → gute Regelbarkeit
- Kompakte Bauform → gutes Volumen/Leistungsverhältnis
- Kein magnetisches Rastmoment
- Geringe elektromagnetische Störungen
- Hohe Zuverlässigkeit



maxon DC motor (Bürstenbehaftete permanentmagneterregte Gleichstrommotoren)

RE Programm

- Hohe Leistungsdichte
- Hochwertiger DC-Motor mit NdFeB-Magnet
- Hohe Drehzahlen und Drehmomente
- Robustes Design (Metallflansch)



Ø6 - 65 mm

A-max Programm

- Gutes Preis-Leistungsverhältnis
- DC-Motor mit AlNiCo-Magnet
- Automatisierter Herstellprozess



Ø12 - 32 mm

RE-max Programm

- High-Performance zu niedrigen Kosten
- Kombiniert rationelle Fertigung und Konstruktion der A-max-Motoren mit der höheren Leistungsdichte der NdFeB-Magnete
- Automatisierter Herstellprozess



Ø13 - 29 mm

Eigenschaften der beiden Bürstensysteme

Graphitbürsten

- Geeignet für hohe Ströme und Stromspitzen
- Geeignet für Start-Stopp- und Reversierbetrieb
- Grössere Motoren (ab ca. 10 W)
- Höhere Reibung, höherer Leerlaufstrom
- Ungeeignet für kleine Ströme
- Mehr Geräusch
- Höhere elektromagnetische Emissionen
- Aufwändiger, teuer



Edelmetallbürsten

- Geeignet für kleinste Ströme und Spannungen
- Geeignet für Dauerbetrieb
- Kleinere Motoren
- Kleinere Reibung, weniger Geräusch
- Tiefe elektromagnetische Emissionen
- Günstiger Preis
- Ungeeignet für grosse Ströme und Stromspitzen
- Ungeeignet für Start-Stopp-Betrieb



maxon EC motor

Bürstenlose DC-Motoren (BLDC-Motoren)

- Motorverhalten wie bürstenbehafteter DC-Motor
- Aufbau ähnlich zu Synchronmotor (3-phasige Statorwicklung, rotierender Permanentmagnet)
- Bestromung der 3 Phasen abhängig von der Rotorposition mittels Kommutierungselektronik

maxon EC-Programm

- Leistungsoptimiert, mit hohen Drehzahlen bis $100\,000\text{ min}^{-1}$
- Robustes Design
- Diverse Varianten:
z.B. kurz – lang, sterilisierbar
- Geringste Restunwucht



$\varnothing 6 - 60\text{ mm}$

EC-max Programm

- Attraktives Preis/Leistungsverhältnis
- Robustes Stahlgehäuse
- Drehzahlen bis $20\,000\text{ min}^{-1}$
- Rotor mit einem Polpaar



$\varnothing 16 - 40\text{ mm}$

EC-4pole Programm

- Höchste Leistungsdichte dank 4-poligem Rotor
- Gestrickte Wicklung, System maxon® mit optimierter Verschaltung der Teilwicklungen
- Drehzahlen bis $25\,000\text{ min}^{-1}$
- Hochwertiges Rückschlussmaterial zur Reduktion der Wirbelstromverluste
- Mechanische Zeitkonstante unter drei Millisekunden



$\varnothing 22 - 45\text{ mm}$

maxon EC-Flachmotor

- Attraktives Preis/Leistungsverhältnis
- Hohe Drehmomente dank aussen liegendem, mehrpoligem Rotor
- Sehr gute Wärmedissipation bei höheren Drehzahlen dank offener Bauform
- Drehzahlen bis $20\,000\text{ min}^{-1}$



$\varnothing 10 - 90\text{ mm}$

maxon EC-i Programm

- Höchste Dynamik dank innen liegendem, mehrpoligem Rotor
- Mechanische Zeitkonstante unter drei Millisekunden
- Drehzahlen bis $15\,000\text{ min}^{-1}$



$\varnothing 40\text{ mm}$

Elektronische Kommutierung

Kommutierungstyp

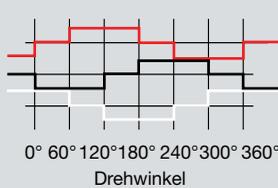
Rotorlagebestimmung

Blockkommutierung

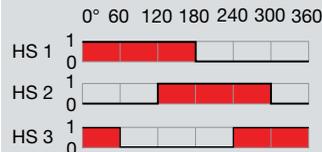
mit Hall-Sensoren

Sensorlos

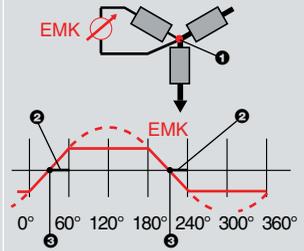
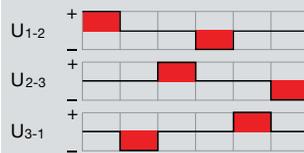
blockförmige Phasenströme



Signalverlauf der Hall-Sensoren (HS)



Motorspannung (Phase-Phase)



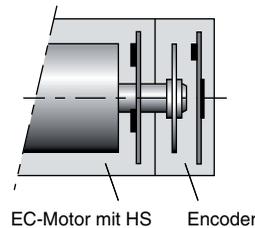
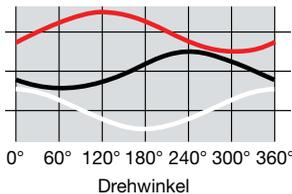
Legende

- ① Sternpunkt
- ② Zeitverzögerung 30°
- ③ Nulldurchlauf EMK

Sinuskommutierung

mit Encoder und Hall-Sensoren (HS)

sinusförmige Phasenströme



DC- und EC-Motoren im Vergleich

DC-Motor (bürstenbehaftet)

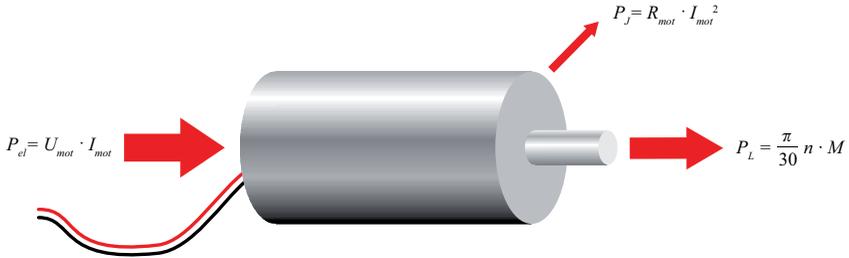
- Einfacher Betrieb und Ansteuerung, auch ohne Elektronik
- Keine elektronischen Teile im Motor
- Lebensdauer durch Bürstensystem beschränkt
- Drehzahlen durch Bürstensystem begrenzt

EC-Motor (bürstenlos)

- Hohe Lebensdauer, hohe Drehzahlen mit vorgespannten Kugellagern
- Kein Bürstenfeuer
- Eisenverluste im Rückschluss
- Braucht Elektronik für Betrieb (mehr Kabel und höhere Kosten)
- Elektronische Teile im Motor (Hall-Sensoren)

6.2 Leistungsbetrachtung im DC-Motor Allgemein

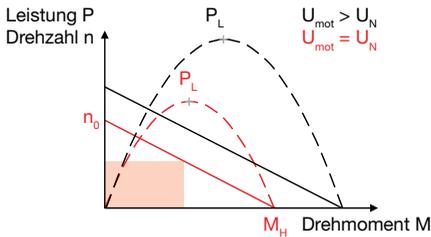
Motor als Energiewandler



Leistungsgleichgewicht Motor

$$P_{el} = P_L + P_J$$

$$U_{mot} \cdot I_{mot} = \frac{\pi}{30} \cdot n \cdot M + R_{mot} \cdot I_{mot}^2$$



Im Drehmoment-Drehzahl-Diagramm entspricht die Abgabeleistung der Fläche des Rechtecks unter der Drehzahl-Kennlinie, welches beim halben Anhaltmoment und bei der halben Leerlaufdrehzahl am Grössten ist. Die Leistungskurve hat den Verlauf einer Parabel, deren Maximalwert quadratisch von der Motorspannung abhängt.

Symbol	Name	SI	Symbol	Name	SI
I_{mot}	Motorstrom	A	R_{mot}	Anschlusswiderstand Motor (Katalogwert)	Ω
M	Drehmoment	Nm	U_{mot}	Motorspannung	V
M_H	Anhalte(dreh)moment	Nm	U_N	Nennspannung Motor (Katalogwert)	V
P	Leistung	W	Symbol	Name	maxon
P_{el}	Elektrische Eingangsleistung	W	n	Drehzahl	min ⁻¹
P_J	Joule'sche Verlustleistung	W	n_0	Leerlaufdrehzahl	min ⁻¹
P_L	Mechanische Abgabeleistung	W			

6.3 Motorkonstanten und -kennlinien

Motorkonstanten

Die **Drehzahlkonstante** k_n und die **Drehmomentkonstante** k_M sind zwei wichtige Kennzahlen der Energieumwandlung.

Drehzahlkonstante k_n

Die Drehzahlkonstante k_n verbindet die Drehzahl n mit der in der Wicklung induzierten Spannung U_{ind} (=EMK).

$$n = k_n \cdot U_{ind}$$

Drehmomentkonstante k_M

Die Drehmomentkonstante k_M verknüpft das erzeugte Drehmoment M mit dem elektrischen Strom I .

$$M = k_M \cdot I_{mot}$$

Info: maxon-Einheit mNm/A

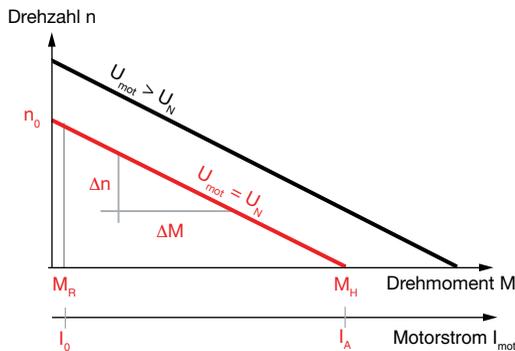
Abhängigkeit zwischen k_n und k_M
(maxon-Einheiten)

$$k_n \cdot k_M = \frac{30\,000}{\pi} \left[\frac{\text{min}^{-1}}{\text{V}} \cdot \frac{\text{mNm}}{\text{A}} \right]$$

$$= 1 \frac{\text{rad}}{\text{s} \cdot \text{V}} \cdot \frac{\text{Nm}}{\text{A}}$$

Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie

Beschreibt Motorverhalten — d.h. mögliche Arbeitspunkte (n, M) — bei konstanter Spannung U_{mot}



$$n_0 \approx k_n \cdot U_{mot}$$

$$M_H = k_M \cdot I_A$$

$$M_R = k_M \cdot I_0$$

$$n = k_n \cdot U_{mot} - \frac{\Delta n}{\Delta M} \cdot M$$

(maxon-Einheiten)

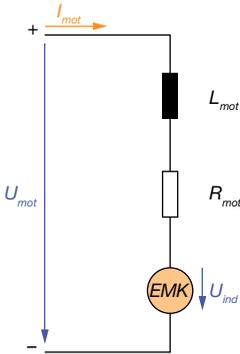
Kennliniensteigung

$$\frac{\Delta n}{\Delta M} = \frac{30\,000}{\pi} \cdot \frac{R_{mot}}{k_M^2} \approx \frac{n_0}{M_H}$$

(maxon-Einheiten)

Symbol	Name	SI	Symbol	Name	SI
I_{mot}	Motorstrom	A	U_{mot}	Motorspannung	V
I_A	Anlaufstrom	A	U_N	Nennspannung Motor (Katalogwert)	V
I_0	Leerlaufstrom	A			
k_M	Drehmomentkonstante (Katalogwert)	Nm/A	Symbol	Name	maxon
M	Drehmoment	Nm	k_n	Drehzahlkonstante (Katalogwert)	min ⁻¹ /V
M_H	Anhalte(dreh)moment	Nm	n	Drehzahl	min ⁻¹
M_R	Reib(dreh)moment	Nm	n_0	Leerlaufdrehzahl	min ⁻¹
R_{mot}	Anschlusswiderstand Motor (Katalogwert)	Ω	$\Delta n/\Delta M$	Kennliniensteigung Motor (Katalogwert)	min ⁻¹ /mNm
U_{ind}	Induzierte Spannung	V			

Spannungsgleichung Motor



$$U_{mot} = L_{mot} \cdot \frac{\partial i}{\partial t} + R_{mot} \cdot I_{mot} + U_{ind} \cong R_{mot} \cdot I_{mot} + U_{ind}$$

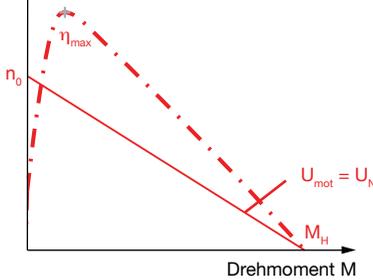
Daraus abgeleitet die Drehzahl in Abhängigkeit der Belastung (Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie)

$$n = k_n \cdot U_{mot} - \frac{\Delta n}{\Delta M} \cdot M = n_0 - \frac{\Delta n}{\Delta M} \cdot M$$

(maxon-Einheiten)

Wirkungsgradverlauf f(M)

Wirkungsgrad η
Drehzahl n



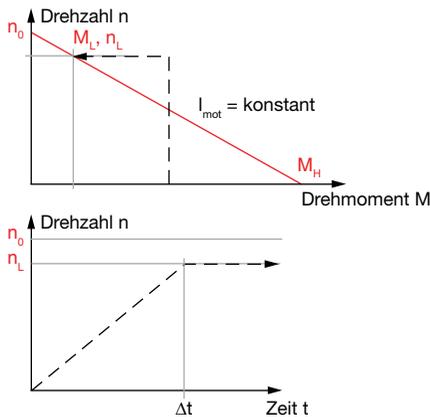
$$\eta = \frac{\pi}{30000} \cdot \frac{n \cdot (M - M_R)}{U_{mot} \cdot I_{mot}} \quad (\text{mit } M_R = k_M \cdot I_0)$$

$$\eta_{max} = \left(1 - \sqrt{\frac{I_0}{I_A}}\right)^2$$

Symbol	Name	SI	Symbol	Name	SI
EMK	Elektromotorische Kraft	V	U_N	Nennspannung Motor (Katalogwert)	V
I_{mot}	Motorstrom	A	δi	Stromänderung	A
I_A	Anlaufstrom	A	δt	Zeitänderung	s
I_0	Leerlaufstrom	A	η	Wirkungsgrad	
k_M	Drehmomentkonstante (Katalogwert)	Nm/A	η_{max}	Maximaler Wirkungsgrad bei U_N (Katalogwert)	
L_{mot}	Anschlussinduktivität Motor (Katalogwert)	H			
M	Drehmoment	Nm	Symbol	Name	maxon
M_H	Anhalte(dreh)moment	Nm	k_n	Drehzahlkonstante (Katalogwert)	min ⁻¹ /V
M_R	Reib(dreh)moment	Nm	n	Drehzahl	min ⁻¹
R_{mot}	Anschlusswiderstand Motor (Katalogwert)	Ω	n_0	Leerlaufdrehzahl	min ⁻¹
U_{ind}	Induzierte Spannung	V	$\Delta n / \Delta M$	Kennliniensteigung Motor (Katalogwert)	min ⁻¹ /mNm
U_{mot}	Motorspannung	V			

6.4 Beschleunigung

Winkel-Beschleunigung: Anlauf bei konstantem Strom



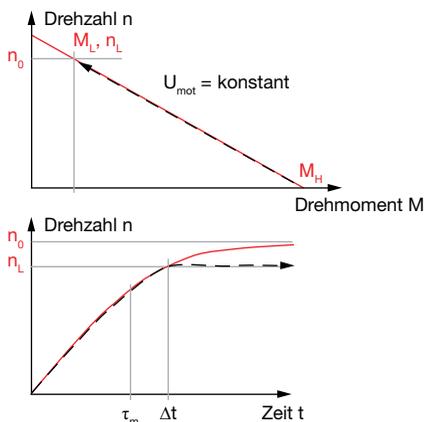
Beschleunigung

$$\alpha = \frac{M}{J_R + J_L} = \frac{k_M \cdot I_{mot}}{J_R + J_L}$$

Hochlaufzeit bis Lastdrehzahl

$$\Delta t = \frac{\pi}{30} \cdot \Delta n \cdot \frac{J_R + J_L}{M} = \frac{\pi}{30} \cdot \Delta n \cdot \frac{J_R + J_L}{k_M \cdot I_{mot}}$$

Winkel-Beschleunigung: Anlauf bei konstanter Klemmenspannung



Beschleunigung maximal

$$\alpha_{max} = \frac{M_H}{J_R + J_L}$$

Hochlaufzeit bis Lastdrehzahl

$$\Delta t = \tau_m' \cdot \ln \left[\frac{\left(1 - \frac{M_L + M_R}{M_H}\right) \cdot n_0}{\left(1 - \frac{M_L + M_R}{M_H}\right) \cdot n_0 - n_L} \right]$$

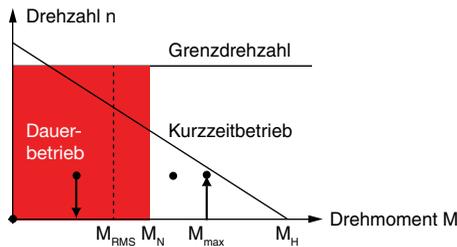
mech. Zeitkonstante mit Lastträgheit

$$\tau_m' = \frac{(J_R + J_L) \cdot R_{mot}}{k_M^2}$$

Symbol	Name	SI	Symbol	Name	SI
I_{mot}	Motorstrom	A	α	Winkelbeschleunigung	rad/s ²
J_L	Massenträgheitsmoment Last	kgm ²	α_{max}	Maximale Winkelbeschleunigung	rad/s ²
J_R	Massenträgheitsmoment Rotor	kgm ²	Δt	Hochlaufzeit	s
k_M	Drehmomentkonstante (Katalogwert)	Nm/A	τ_m	Mechanische Zeitkonstante (Katalogwert)	s
M	Drehmoment	Nm	τ_m'	Mechanische Zeitkonstante mit zusätzlichem J_L	s
M_H	Anhalte(dreh)moment	Nm	Symbol	Name	maxon
M_L	Lastdrehmoment	Nm	n	Drehzahl	min ⁻¹
M_R	Reib(dreh)moment	Nm	n_0	Leerlaufdrehzahl	min ⁻¹
R_{mot}	Anschlusswiderstand Motor (Katalogwert)	Ω	n_L	Lastdrehzahl	min ⁻¹
t	Zeit	s	Δn	Drehzahländerung	min ⁻¹
U_{mot}	Motorspannung	V			

6.5 Motorauswahl

Auswahl Motortyp



Auswahl Motortyp
anhand der geforderten Drehmomente

$$M_N > M_{RMS}$$

$$M_H > M_{max}$$

Mittlere effektive Belastung (RMS)

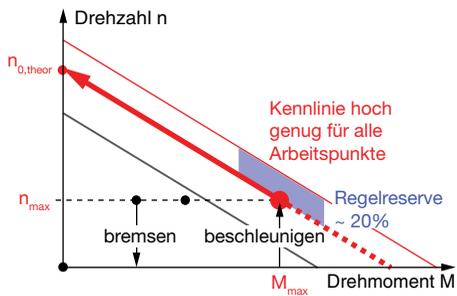
$$M_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{t_{tot}} (t_1 \cdot M_1^2 + t_2 \cdot M_2^2 + \dots + t_n \cdot M_n^2)}$$

Bemerkung:

Ein Motortyp (z.B. RE30) ist spezifiziert durch: seine Baugröße, die mechanische Abgabeleistung, die Lagerung der Welle, das verwendete Kommutierungssystem und die Kombinationsmöglichkeiten mit Getrieben und Sensoren (maxon-Baukasten)

Auswahl Wicklung

Für eine optimale Abstimmung zwischen den elektrischen und mechanischen Leistungskomponenten des Motors.



k_n spezifiziert Wicklung:

Wähle Wicklung mit

$$k_n > k_{n,theor} = \frac{n_{0,theor}}{U_{mot}} = \frac{n_{max} + \frac{\Delta n}{\Delta M} \cdot M_{max}}{U_{mot}}$$

(maxon-Einheiten)

wobei n_{max} , M_{max} extremer Arbeitspunkt und $\Delta n / \Delta M$ die mittlere Kennliniensteigung des gewählten Motortyps ist.

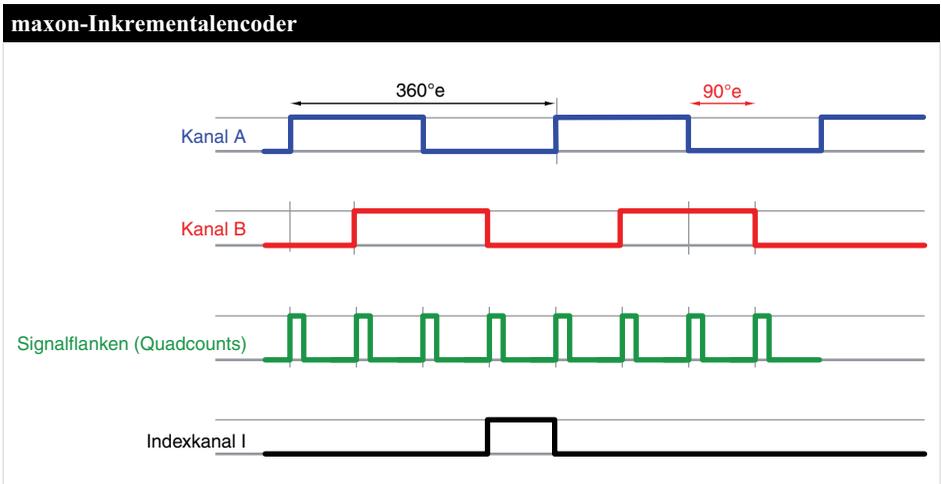
Empfehlung: Dem k_n eine Regelreserve von ca. 20% hinzufügen zum Ausgleich von Toleranzen und möglichen Lastveränderungen; k_n aber nicht zu gross wählen, da sonst die Ströme gross werden.

Benötigter maximaler Motorstrom

$$I_{mot} = I_0 + \frac{M_{max}}{k_M}$$

Symbol	Name	SI	Symbol	Name	SI
I_{mot}	Motorstrom	A	$t_{1...n}$	Zeitdauer Betriebspunkte 1...n	s
I_0	Leerlaufstrom	A	U_{mot}	Motorspannung	V
k_M	Drehmomentkonstante (Katalogwert)	Nm/A	Symbol	Name	maxon
M	Drehmoment	Nm	k_n	Drehzahlkonstante (Katalogwert)	min ⁻¹ /V
M_{max}	Maximales Drehmoment Lastzyklus	Nm	$k_{n,theor}$	Soll-Drehzahlkonstante	min ⁻¹ /V
M_H	Anhalte(dreh)moment	Nm	n	Drehzahl	min ⁻¹
M_N	Nennmoment Motor (Katalogwert)	Nm	n_{max}	Maximale Drehzahl Lastzyklus	min ⁻¹
M_{RMS}	Effektivwert Drehmoment (RMS)	Nm	$n_{0,theor}$	Soll-Leerlaufdrehzahl	min ⁻¹
$M_{1...n}$	Drehmoment Betriebspunkte 1...n	Nm	$\Delta n / \Delta M$	Kennliniensteigung Motor (Katalogwert)	min ⁻¹ /mNm
t_{tot}	Gesamtzeit Betriebszyklus	s			

7. maxon sensor



Einsatzempfehlungen	QUAD	MEnc	MR	EASY	MILE	Optisch
Hohe Pulszahlen	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Hohe Drehzahlen	✓	✓	✓	✓	✓	✗
Tiefe Drehzahlen	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Line Driver (bei langen Kabeln, rauen Umgebungsbedingungen, Positionieranwendungen)	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Tiefe Positioniergenauigkeit oder positionieren mit Getriebe	✗, ✓	✓	✓	✓	✓	✓
Hohe Positioniergenauigkeit	✗	✗	✗, ✓	✓	✓	✓
Indexkanal (für präzise Referenzfahrt)	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Staub, Schmutz, Öl	✓	✓	✓	✓	✓	✗
Ionisierende Strahlung	(✓)	(✓)	✗	✗	✗	✗
Externe Magnetfelder	✗	✗	✗	(✓)	✓	✓
Mechanisch robust	✓	✗	✗	✓	✓	✗

✓ Empfohlen ✓ mit Einschränkungen (✓) Option (auf Anfrage) ✗ nicht Empfohlen

Impulszahl aus Positionsauflösung

Benötigte Impulszahl N des Encoders für eine geforderte Positioniergenauigkeit $\Delta\varphi$.

$$N \geq \frac{360^\circ}{\Delta\varphi \cdot i}$$

Bemerkung: Durch Auswertung der Quadcounts qc erhält man eine 4x höhere Auflösung, was für eine präzise Regelung mindestens empfohlen wird.

Messauflösung Motordrehzahl

Beispiel:

Messauflösung ΔQ : 1 qc/ms
 Impulszahl N Encoder: 500 IMP

$$\Delta n = \frac{\Delta Q}{Q \cdot N}$$

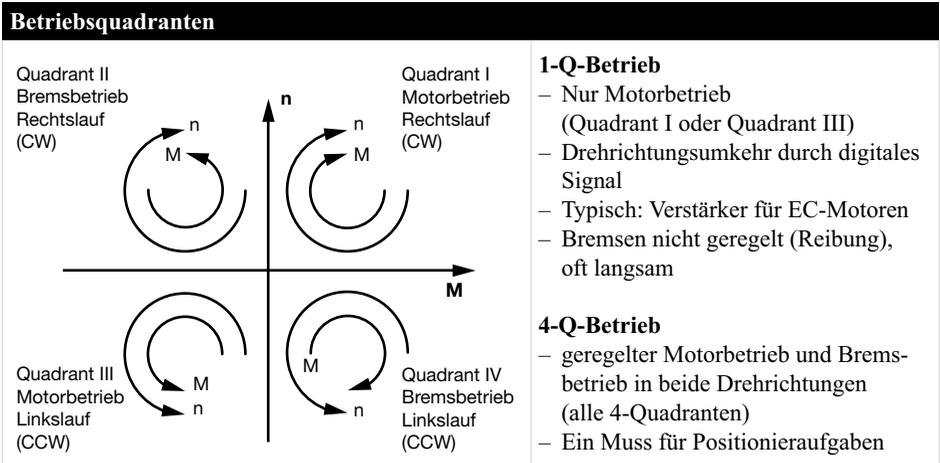
$$\Delta n = \frac{\Delta Q}{Q \cdot N} = \frac{1 \frac{qc}{ms}}{4 \frac{qc}{IMP} \cdot 500 IMP} = \frac{60\,000 \frac{qc}{min}}{2000 qc} = 30 \text{ min}^{-1}$$

Bemerkung: Die erreichbare Drehzahlstabilität ist aufgrund der Massenträgheiten und einer eventuellen Vorsteuerung (feed forward) viel höher als die hier berechnete Messauflösung.

Symbol N	Name Impulszahl pro Umdrehung	SI IMP	Symbol $\Delta\varphi$	Name Positionsauflösung	SI °
i	Untersetzung mech. Antrieb				
$Q = 4$	Quadcounts pro Impuls	qc/IMP	Symbol Δn	Name Messauflösung Motordrehzahl	maxon min ⁻¹
ΔQ	Messauflösung	qc/ms			

8. maxon-Regler

8.1 Betriebsquadranten



8.2 Auslegung der Stromversorgung

Erforderliche Versorgungsspannung bei vorgegebener Last (n_L, M_L)	
	$V_{CC} \geq \frac{U_N}{n_{0,UN}} \cdot \left(n_L + \frac{\Delta n}{\Delta M} \cdot M_L \right) + \Delta U_{max} \quad (\text{maxon-Einheiten})$
<p>Hinweise:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Bei einem 4Q-Servoverstärker muss die Stromversorgung in der Lage sein, die während dem Abbremsen der Last gewonnene kinetische Energie zu speichern (beispielsweise in einem Kondensator). – Bei Verwendung eines stabilisierten Netzteils muss der Überstromschutz für den Arbeitsbereich deaktiviert sein. – Die Formel berücksichtigt bereits den maximalen Spannungsabfall ΔU der Steuerung beim maximalen Dauerstrom. 	
Erreichbare Drehzahl bei vorgegebener Spannungsversorgung	
	$n_L \leq \left[(V_{CC} - \Delta U_{max}) \cdot \frac{n_{0,UN}}{U_N} \right] - \left[\frac{\Delta n}{\Delta M} \cdot M_L \right] \quad (\text{maxon-Einheiten})$

Symbol	Name	SI	Symbol	Name	maxon
M	Drehmoment	Nm	n	Drehzahl	min^{-1}
M_L	Lastdrehmoment	Nm	n_L	Lastdrehzahl	min^{-1}
U_N	Nennspannung Motor (Katalogwert)	V	$n_{0,UN}$	Leerlaufdrehzahl Motor bei U_N	
V_{CC}	Versorgungsspannung	V		(Katalogwert)	min^{-1}
ΔU_{max}	Max. Spannungsabfall Steuerung	V	$\Delta n/\Delta M$	Kennliniensteigung Motor (Katalogwert)	$\text{min}^{-1}/\text{mNm}$

8.3 Grösse der Motordrossel bei PWM-Reglern

Berechnung Stromrippel			
PWM Schema	1-Q	2-Level (4-Q)	3-Level (4-Q)
Maximaler Stromrippel Peak-to-Peak	$\Delta I_{PP,max} = \frac{V_{CC}}{4 \cdot L_{tot} \cdot f_{PWM}}$	$\Delta I_{PP,max} = \frac{V_{CC}}{2 \cdot L_{tot} \cdot f_{PWM}}$	$\Delta I_{PP,max} = \frac{V_{CC}}{4 \cdot L_{tot} \cdot f_{PWM}}$

Berechnung L_{tot} $L_{tot} = L_{int} + 0.3...0.8 \cdot L_{mot} + L_{ext}$

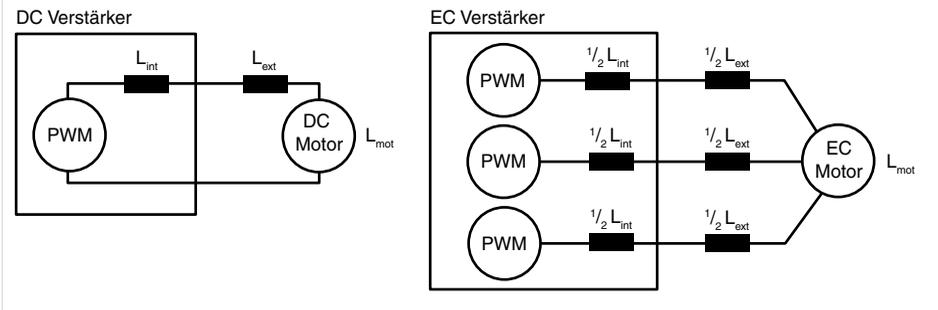
Die effektiv wirkende Motorinduktivität bei rechteckförmiger PWM-Anregung beträgt nur ca. 30 – 80% des Katalogwertes L_{mot} .
 Der Katalogwert L_{mot} ist bei einer Frequenz von 1 kHz mit sinusförmiger Anregung definiert.

- Bei Stromrippeln $\Delta I_{PP} \leq 1.5 \cdot I_N$ kann der Motor noch bis etwa 90% des Nennstroms I_N (Katalogwert) belastet werden.
- Bei Stromrippeln $\Delta I_{PP} > 1.5 \cdot I_N$ wird der Einsatz einer externen Motordrossel nach untenstehender Formel empfohlen.

Berechnung zusätzliche externe Motordrossel		
PWM-Schema	1-Q und 3-Level (4-Q)	2-Level (4-Q)

Faustformel	$L_{ext} = \frac{V_{CC}}{6 \cdot I_N \cdot f_{PWM}} - L_{int} - 0.3 \cdot L_{mot}$	$L_{ext} = \frac{V_{CC}}{3 \cdot I_N \cdot f_{PWM}} - L_{int} - 0.3 \cdot L_{mot}$
-------------	--	--

- $L_{ext} \leq 0$ keine zusätzliche Motordrossel notwendig
 $L_{ext} > 0$ zusätzliche Motordrossel empfohlen



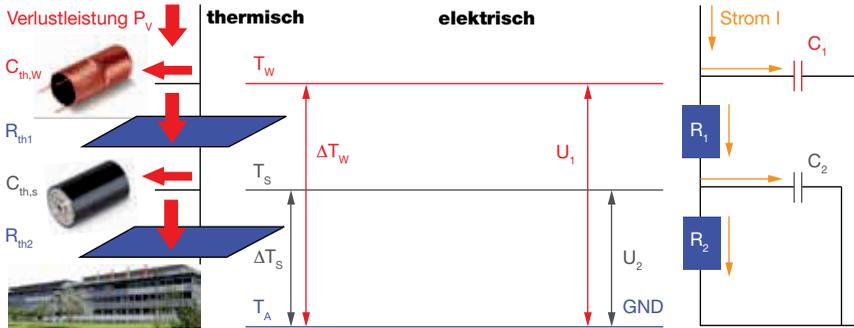
Symbol	Name	SI	Symbol	Name	SI
I_N	Nennstrom Motor (Katalogwert)	A	L_{tot}	Gesamtinduktivität	H
L_{ext}	Induktivität, zusätzliche externe Motordrossel	H	V_{CC}	Versorgungsspannung	V
L_{int}	Induktivität, eingebaute Drossel Regler	H	f_{PWM}	PWM Frequenz	Hz
L_{mot}	Anschlussinduktivität Motor (Katalogwert)	H	ΔI_{PP}	Stromrippel Peak-to-Peak	A
		H	$\Delta I_{PP,max}$	Maximaler Stromrippel Peak-to-Peak	A

9. Thermisches Verhalten

9.1 Grundlagen

Wärmequellen					
Eisenverluste in EC-Motoren und Motoren mit Eisenkernwicklung		Ummagnetisierungsverluste $P_{V,magn} = \frac{\pi}{30} n \cdot M_{magn}$		Wirbelstromverluste $P_{V,eddy} = const \cdot n^2$	
Joule'sche Verluste in der Wicklung				$P_J = R_{TW} \cdot I_{mot}^2$ $R_{TW} = R_{mot} \cdot [1 + \alpha_{Cu} \cdot (T_W - 25^\circ C)]$	
Reibverluste in der Lagerung und in den Bürsten (DC Motoren)					
Verluste im Getriebe				$P_{V,R} = \frac{\pi}{30} \cdot n_{mot} \cdot M_{mot} \cdot (1 - \eta_G)$ $P_{V,R} = \frac{\pi}{30} \cdot n_L \cdot M_L \cdot \frac{1 - \eta_G}{\eta_G}$	
Durch Erwärmung verringertes Anhaltmoment					
Erste Näherung; berechnet aus Spannung und erhöhtem Wicklungswiderstand (Temperaturabhängigkeit von k_M nicht berücksichtigt)				$M_{HT} = k_M \cdot I_{AT} = k_M \cdot \frac{U_{mot}}{R_{TW}}$	
Wärme speichern					
$Q = c \cdot m \cdot \Delta T = C_{th} \cdot \Delta T$		$Q = P_v \cdot t$			
Wicklung: $C_{th,W} = c_{Cu} \cdot m_W$		Stator: $C_{th,S} = c_{Fe} \cdot m_{mot}$		Getriebe: $C_{th,G} = c_{Fe} \cdot m_G$	
Symbol	Name	SI	Symbol	Name	SI
C_{th}	Wärmekapazität	J/K	$P_{V,magn}$	Ummagnetisierungs-Verlustleistung	W
$C_{th,G}$	Wärmekapazität Getriebe	J/K	$P_{V,R}$	Reib-Verlustleistung	W
$C_{th,S}$	Wärmekapazität Stator	J/K	Q	Gespeicherte Wärmemenge	J
$C_{th,W}$	Wärmekapazität Wicklung	J/K	R_{mot}	Anschlusswiderstand Motor (Katalogwert)	Ω
c	Spezifische Wärmekapazität	J/(kgK)	R_{TW}	Wicklungswiderstand bei aktueller Temp. T_W	Ω
I_{AT}	Anlaufstrom bei Temperatur T_W	A	T	Temperatur	$^\circ C$
I_{mot}	Motorstrom	A	T_W	Wicklungstemperatur	$^\circ C$
k_M	Drehmomentkonstante (Katalogwert)	Nm/A	t	Zeit	s
M	Drehmoment	Nm	U_{mot}	Motorspannung	V
$M_{G,cont}$	Max. Dauerdrehmoment Getriebe (Katalogwert)	Nm	ΔT	Temperaturdifferenz	K
M_{HT}	Anhalte(dreh)moment bei Temperatur T_W	Nm	η	Wirkungsgrad	
M_L	Lastdrehmoment	Nm	η_G	Getriebewirkungsgrad	
M_{magn}	Drehmoment für Ummagnetisierung	Nm	Symbol	Name	maxon
M_{mot}	Motordrehmoment	Nm	n	Drehzahl	min ⁻¹
m	Masse	kg	n_L	Lastdrehzahl	min ⁻¹
m_G	Masse Getriebe	kg	n_{mot}	Motordrehzahl	min ⁻¹
m_{mot}	Masse Motor	kg	Symbol	Name	Wert
m_W	Masse Wicklung	kg	α_{Cu}	Widerstandskoeffizient Kupfer	0.0039 K ⁻¹
P_J	Joule'sche Verlustleistung	W	c_{Cu}	Spez. Wärmekapazität Kupfer	380 J/(kgK)
P_V	Verlustleistung	W	c_{Fe}	Spez. Wärmekapazität Eisen	450 – 470 J/(kgK)
$P_{V,eddy}$	Wirbelstrom-Verlustleistung	W			

Analogie zum elektrischen Schaltkreis:



thermisch → Wärmefluss

Verluste

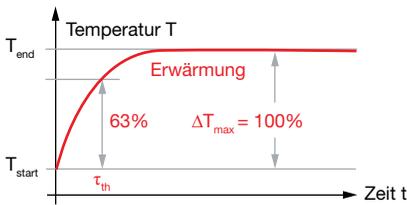
Symbol	Name	Einheit
Q	Gespeicherte Wärmemenge	J
P_v	Verlustleistung	$W = J/s$
ΔT_w	Temperaturdifferenz Wicklung – Umgebung	K
ΔT_s	Temperaturdifferenz Stator – Umgebung	K
T_A	Umgebungstemperatur	$^{\circ}C (K)$
R_{th1}	Therm. Widerstand Wicklung-Gehäuse (Katalogwert)	K/W
R_{th2}	Therm. Widerstand Gehäuse-Luft (Katalogwert)	K/W
$C_{th,w}$	Wärmekapazität Wicklung	J/K
$C_{th,s}$	Wärmekapazität Stator	J/K

elektrisch → Stromfluss

Stromquelle

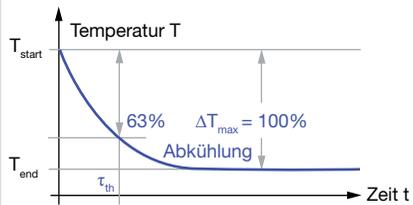
Symbol	Name	Einheit
Q	Elektrische Ladung	C
I	Strom	$A = C/s$
U_1	Spannung, Potentialdifferenz	V
U_2	Spannung, Potentialdifferenz	V
GND	Masse	V
R_1	Elektrischer Widerstand	Ω
R_2	Elektrischer Widerstand	Ω
C_1	Elektrische Kapazität	F
C_2	Elektrische Kapazität	F

Erwärmung eines einfachen Körpers



$$\Delta T(t) = \Delta T_{end} \cdot \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau_{th}}} \right]$$

Abkühlung eines einfachen Körpers



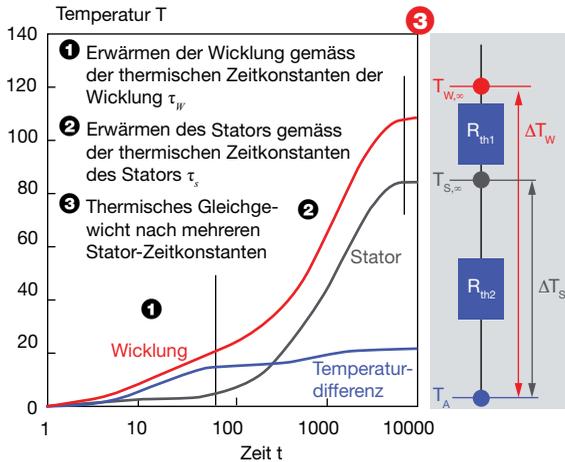
$$\Delta T(t) = \Delta T_{start} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{th}}}$$

Symbol	Name	SI	Symbol	Name	SI
T	Temperatur	$^{\circ}C$	t	Zeit	s
T_A	Umgebungstemperatur	$^{\circ}C$	ΔT_{max}	Maximale Temperaturänderung	K
T_{end}	Endtemperatur	$^{\circ}C$	$\Delta T(t)$	Temperaturänderung in Abhängigkeit der Zeit t	K
T_s	Statortemperatur	$^{\circ}C$	τ_{th}	Thermische Zeitkonstante	s
T_{start}	Starttemperatur	$^{\circ}C$			
T_w	Wicklungstemperatur	$^{\circ}C$			

9.2 Dauerbetrieb

Der Dauerbetrieb ist gekennzeichnet durch thermisches Gleichgewicht. Nach mehreren Statorzeitkonstanten bleibt die Temperaturdifferenz zwischen Rotor und Stator konstant, da deren Temperaturen nicht weiter ansteigen.

Motor: Wicklungs- und Statortemperatur

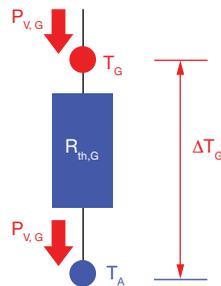


$$\Delta T_W = T_W - T_A = (R_{th1} + R_{th2}) \cdot P_J$$

$$\Delta T_W = \frac{R_{th1} \cdot R_{TA} \cdot I_{mot}^2}{1 - \alpha_{Cu} \cdot R_{th1} \cdot R_{TA} \cdot I_{mot}^2}$$

$$\Delta T_S = T_S - T_A = \frac{R_{th2}}{R_{th1} + R_{th2}} \Delta T_W$$

Getriebe: Gehäusetemperatur

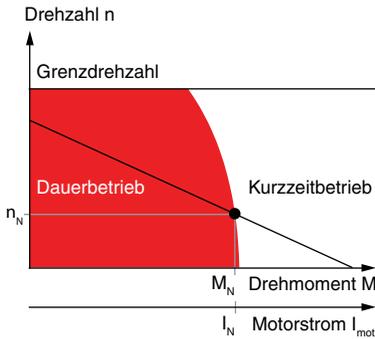


$$\Delta T_G = T_G - T_A = R_{th,G} \cdot P_{V,G}$$

$R_{th,G}$: z.B. geschätzt mit R_{th2} von Motoren derselben Grösse

Symbol	Name	SI	Symbol	Name	SI
I_{mot}	Motorstrom	A	$T_{S,\infty}$	Endtemperatur Stator	°C
P_J	Joule'sche Verlustleistung	W	T_W	Wicklungstemperatur	°C
$P_{V,G}$	Verlustleistung Getriebe	W	$T_{W,\infty}$	Endtemperatur Wicklung	°C
R_{TA}	Wicklungswiderstand bei T_A	Ω	t	Zeit	s
$R_{th,G}$	Therm. Widerstand Getriebe – Umgebung	K/W	ΔT_G	Temperaturunterschied Getriebe – Umgebung	K
R_{th1}	Therm. Widerstand Wicklung – Gehäuse (Katalogwert)	K/W	ΔT_S	Temperaturunterschied Stator – Umgebung	K
R_{th2}	Therm. Widerstand Gehäuse – Umgebung (Katalogwert)	K/W	ΔT_W	Temperaturunterschied Wicklung – Umgebung	K
T	Temperatur	°C	τ_S	Therm. Zeitkonstante Stator (Katalogwert)	s
T_A	Umgebungstemperatur	°C	τ_W	Therm. Zeitkonstante Wicklung (Katalogwert)	s
T_G	Getriebetemperatur	°C	Symbol	Name	Wert
T_S	Statortemperatur	°C	α_{Cu}	Widerstandskoeffizient Kupfer	0.0039 K ⁻¹

Zulässiger Nennstrom I_N



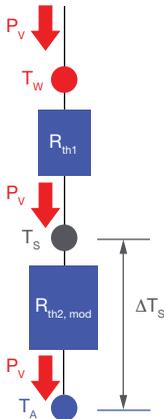
Temperaturabhängigkeit bei Standard Montagebedingungen (freie Konvektion bei 25°C; Ankoppelung horizontal an Kunststoffplatte)

$$I_{N,TA} = I_N \cdot \sqrt{\frac{T_{max} - T_A}{T_{max} - 25^\circ C}}$$

Temperaturabhängigkeit bei veränderten Montagebedingungen

$$I_{N,TA} = I_N \cdot \sqrt{\frac{T_{max} - T_A}{T_{max} - 25^\circ C} \cdot \frac{R_{th1} + R_{th2}}{R_{th1} + R_{th2,mod}}}$$

Bestimmung von $R_{th2,mod}$



Motor unter Originalbedingungen

– Montage, Befestigung, Luftzirkulation

Separate Messung im Dauerbetrieb

bei beliebigem Motorstrom I_{mot}

– Statortemperatur T_s

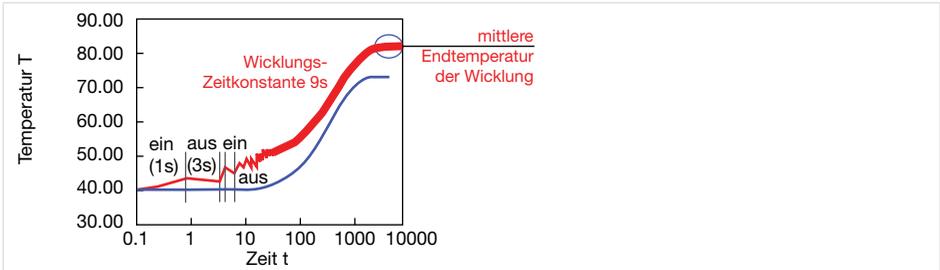
– Umgebungstemperatur T_A

$$R_{th2,mod} = \Delta T_s \cdot \frac{1 - \alpha_{Cu} \cdot R_{th1} \cdot R_{TA} \cdot I_{mot}^2}{R_{TA} \cdot I_{mot}^2 \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot \Delta T_s)}$$

Symbol	Name	SI	Symbol	Name	SI
I_{mot}	Motorstrom	A	T_A	Umgebungstemperatur	°C
I_N	Nennstrom Motor (Katalogwert)	A	T_{max}	Maximal zulässige Wicklungstemperatur (Katalogwert)	°C
$I_{N,TA}$	Nennstrom in Abhängigkeit von T_A	A	T_s	Statortemperatur	°C
M	Drehmoment	Nm	T_w	Wicklungstemperatur	°C
M_N	Nennmoment Motor (Katalogwert)	Nm	ΔT_s	Temperaturunterschied Stator – Umgebung	K
P_v	Verlustleistung	W			
R_{TA}	Wicklungswiderstand bei T_A	Ω	Symbol	Name	maxon
R_{th1}	Therm. Widerstand Wicklung – Gehäuse (Katalogwert)	K/W	n	Drehzahl	min ⁻¹
R_{th2}	Therm. Widerstand Gehäuse – Umgebung (Katalogwert)	K/W	n_N	Nenn Drehzahl Motor (Katalogwert)	min ⁻¹
$R_{th2,mod}$	Therm. Widerstand Gehäuse Umgebung modifiziert	K/W	Symbol	Name	Wert
			α_{Cu}	Widerstandskoeffizient Kupfer	0.0039 K ⁻¹

9.3 Zyklus- und Aussetzbetrieb (kontinuierlich wiederholt)

Sich wiederholende Arbeitszyklen von kurzer Dauer (typisch bis wenige Sekunden) können mit demselben Formalismus wie der Dauerbetrieb betrachtet werden.



Mittlere Erwärmung bei intermittierendem Betrieb

Effektivwert des Stroms (RMS) als Motorbelastung einsetzen

$$\Delta T_W = \frac{(R_{th1} + R_{th2}) \cdot R_{TA} \cdot I_{RMS}^2}{1 - \alpha_{Cu} (R_{th1} + R_{th2}) \cdot R_{TA} \cdot I_{RMS}^2}$$

$$\Delta T_S = \frac{R_{th2}}{(R_{th1} + R_{th2})} \Delta T_W$$

Aussetzbetrieb

RMS Strom

$$I_{RMS} = I_{on} \cdot \sqrt{\frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}}$$

Grundbedingung: $I_{RMS} \leq I_{N,TA}$

Maximaler Belastungsstrom für gegebenen Zeitzyklus

$$I_{on} \leq I_N \cdot \sqrt{\frac{T_{max} - T_A}{T_{max} - 25^\circ C} \cdot \frac{t_{on} - t_{off}}{t_{on}}}$$

Pausenlänge bei Belastung mit I_{on} während t_{on}

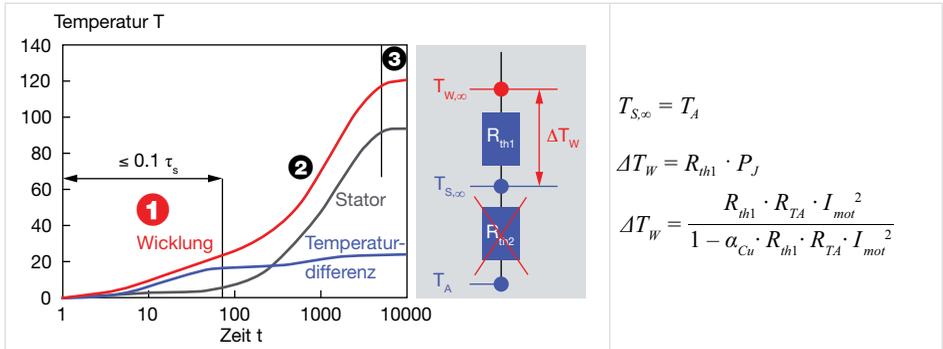
$$t_{off} \geq \left[\frac{I_{on}^2}{I_N^2 \cdot \frac{T_{max} - T_A}{T_{max} - 25^\circ C}} - 1 \right] \cdot t_{on}$$

Symbol	Name	SI	Symbol	Name	SI
I	Strom	A	T_{max}	Maximal zulässige Wicklungstemperatur (Katalogwert)	°C
I_N	Nennstrom Motor (Katalogwert)	A	$T_{S,\infty}$	Endtemperatur Stator	°C
$I_{N,TA}$	Nennstrom in Abhängigkeit von T_A	A	$T_{W,av}$	Mittlere Endtemperatur Wicklung	°C
I_{on}	Strom während Ein-Phase	A	t	Zeit	s
I_{RMS}	Effektivwert Strom (RMS)	A	t_{off}	Ausschaltdauer	s
R_{TA}	Wicklungswiderstand bei T_A	Ω	t_{on}	Einschaltdauer	s
R_{th1}	Therm. Widerstand Wicklung – Gehäuse (Katalogwert)	K/W	ΔT_S	Temperaturunterschied Stator – Umgebung	K
R_{th2}	Therm. Widerstand Gehäuse – Umgebung (Katalogwert)	K/W	ΔT_W	Temperaturunterschied Wickl. – Umgebung	K
T	Temperatur	°C	Symbol	Name	Wert
T_A	Umgebungstemperatur	°C	α_{Cu}	Widerstandskoeffizient Kupfer	0.0039 K ⁻¹

9.4 Kurzzeitbetrieb

Starke einmalige Überlast des Motors. Der Betrieb ist so kurz, dass sich die Temperatur des thermisch trägen Stators nicht signifikant erhöht, was einer Einschaltdauer bis ca. $\tau_s/10$ ($\approx 5 \cdot \tau_w$) entspricht.

→ Nur die Erwärmung der Wicklung ist zu berücksichtigen, was der Erwärmung eines einfachen Körpers entspricht (siehe Kap. 9.1).



$$T_{S,\infty} = T_A$$

$$\Delta T_W = R_{th1} \cdot P_J$$

$$\Delta T_W = \frac{R_{th1} \cdot R_{TA} \cdot I_{mot}^2}{1 - \alpha_{Cu} \cdot R_{th1} \cdot R_{TA} \cdot I_{mot}^2}$$

Überlastfaktor K

Quantifizierung der Überlast

Bedeutung:

- $K < 1$: T_{max} wird nicht erreicht im Kurzzeitbetrieb
- $K > 1$: max. Einschaltdauer t_{on} begrenzen

$$K = \frac{I_{mot}}{I_N} \cdot \sqrt{\frac{T_{max} - 25^\circ\text{C}}{T_{max} - T_S} \cdot \frac{R_{th1}}{R_{th1} + R_{th2}}}$$

Maximal zulässige Überlast bei gegebener Einschaltzeit t_{on}

$$K = \sqrt{\frac{1}{1 - \exp\left[-\frac{t_{on}}{\tau_w}\right]}}$$

Maximale Einschaltdauer t_{on} bei gegebenem Überlastfaktor K

$$t_{on} = \tau_w \cdot \ln \frac{K^2}{K^2 - 1}$$

Maximaler Motorstrom I_{mot} bei gegebenem Überlastfaktor K

$$I_{mot} = K \cdot I_N \cdot \sqrt{\frac{T_{max} - T_S}{T_{max} - 25^\circ\text{C}} \cdot \frac{R_{th1} + R_{th2}}{R_{th1}}}$$

Symbol	Name	SI	Symbol	Name	SI
I_{mot}	Motorstrom	A	$T_{W,\infty}$	Endtemperatur Wicklung	°C
I_N	Nennstrom Motor (Katalogwert)	A	T_S	Statortemperatur	°C
K	Überlastfaktor		$T_{S,\infty}$	Endtemperatur Stator	°C
P_J	Joule'sche Verlustleistung	W	t_{on}	Einschaltdauer	s
R_{TA}	Wicklungswiderstand bei T_A	Ω	t	Zeit	s
R_{th1}	Therm. Widerstand Wicklung – Gehäuse (Katalogwert)	K/W	ΔT_W	Temperaturunterschied Wicklung – Umgebung	K
R_{th2}	Therm. Widerstand Gehäuse – Umgebung (Katalogwert)	K/W	τ_s	Therm. Zeitkonstante Stator (Katalogwert)	s
T	Temperatur	°C	τ_w	Therm. Zeitkonstante Wicklung (Katalogwert)	s
T_A	Umgebungstemperatur	°C			
T_{max}	Maximal zulässige Wicklungstemperatur (Katalogwert)	°C	Symbol	Name	Wert
			α_{Cu}	Widerstandskoeffizient Kupfer	0.0039 K ⁻¹

10. Tabellen

10.1 maxon-Umrechnungstabellen

Hinweise		
Basisgrößen und Basiseinheiten im Internationalen Masssystem (SI)		
Basisgrösse	Basiseinheit	Einheitenzeichen
Länge	Meter	m
Masse	Kilogramm	kg
Zeit	Sekunde	s
Elektrische		
Stromstärke	Ampère	A
Thermodynamische		
Temperatur	Kelvin	K
Umrechnungsbeispiel		
A vorhandene Einheit (geg.)		
B gesuchte Einheit (ges.)		
gegeben:	Multiplizieren mit	gesucht:
oz-in	7.06	mNm

Basisgrösse für ...

... **Umrechnungen:**
 1 oz = 2.834952313 · 10⁻² kg
 1 in = 2.54 · 10⁻² m

... **Erdbeschleunigung:**
 g = 9.80665 m s⁻²
 = 386.08858 in s⁻²

... **Ableitungen:**
 1 yd = 3 ft = 36 in
 1 lb = 16 oz = 7000 gr (grains)
 1 kp = 1 kg · 9.80665 ms⁻²
 1 N = 1 kgms⁻²
 1 W = 1 Nms⁻¹ = 1 kgm²s⁻³
 1 J = 1 Nms⁻¹ = 1 Ws

Dezimale Vielfache und Teile der Einheiten

Vor-silbe	Kurz-zeichen	Zehner-potenz	Vor-silbe	Kurz-zeichen	Zehner-potenz
Deka..	da	10 ¹	Dezi..	d	10 ⁻¹
Hekto..	h	10 ²	Zenti..	c	10 ⁻²
Kilo..	k	10 ³	Milli..	m	10 ⁻³
Mega..	M	10 ⁶	Mikro..	μ	10 ⁻⁶
Giga..	G	10 ⁹	Nano..	n	10 ⁻⁹
Tera..	T	10 ¹²	Piko..	p	10 ⁻¹²

Leistung		P [W]							
B	A	oz-in-s ⁻¹	oz-in-min ⁻¹	in-lbf-s ⁻¹	ft-lbf-s ⁻¹	Nm s ⁻¹ = W	mW	kpm s ⁻¹	mNm/min ⁻¹
W=Nm s ⁻¹		7.06 · 10 ⁻³	1.17 · 10 ⁻⁴	0.113	1.356	1	1 · 10 ⁻³	9.807	1/60000
mW		7.06	0.117	112.9	1.356 · 10 ³	1 · 10 ³	1	9.807 · 10 ³	1/60
oz-in-s ⁻¹		1	1/60	16	192	141.6	0.142	1.39 · 10 ³	2.36 · 10 ⁻³
ft-lbf-s ⁻¹		1/192	1/11520	1/12	1	0.737	0.737 · 10 ⁻³	7.233	1.23 · 10 ⁻⁵
kpm s ⁻¹		7.20 · 10 ⁻⁴	1.2 · 10 ⁻⁵	1.15 · 10 ⁻²	0.138	0.102	0.102 · 10 ⁻³	1	1.70 · 10 ⁻⁶

Drehmoment		M [Nm]						
B	A	oz-in	ft-lbf	Nm = Ws	Ncm	mNm	kpm	pcm
Nm		7.06 · 10 ⁻³	1.356	1	1 · 10 ⁻²	1 · 10 ⁻³	9.807	9.807 · 10 ⁻³
mNm		7.06	1.356 · 10 ³	1 · 10 ³	10	1	9.807 · 10 ³	9.807 · 10 ⁻²
kpm		7.20 · 10 ⁻⁴	0.138	0.102	0.102 · 10 ⁻²	0.102 · 10 ⁻³	1	1 · 10 ⁻⁵
oz-in		1	192	141.6	1.416	0.142	1.39 · 10 ³	1.39 · 10 ⁻²
ft-lbf		1/192	1	0.737	0.737 · 10 ⁻²	0.737 · 10 ⁻³	7.233	7.233 · 10 ⁻⁵

Massenträgheitsmoment		J [kg m ²]							
B	A	oz-in ²	oz-in-s ²	lb-in ²	lb-in-s ²	Nms ² =kgm ²	mNm s ²	gcm ²	kpm s ²
g cm ²		182.9	7.06 · 10 ⁴	2.93 · 10 ³	1.13 · 10 ⁶	1 · 10 ⁻⁷	1 · 10 ⁻¹	1	9.807 · 10 ⁻⁷
kgm ² =Nms ²		1.83 · 10 ⁻⁵	7.06 · 10 ⁻³	2.93 · 10 ⁻⁴	0.113	1	1 · 10 ⁻³	1 · 10 ⁻⁷	9.807
oz-in ²		1	386.08	16	6.18 · 10 ³	5.46 · 10 ⁻⁴	54.6	5.46 · 10 ⁻³	5.35 · 10 ⁻⁵
lb-in ²		1/16	24.130	1	386.08	3.41 · 10 ⁻³	3.41	3.41 · 10 ⁻⁴	3.35 · 10 ⁻⁴

Masse		m [kg]					Kraft					F [N]				
B	A	oz	lb	gr (grain)	kg	g	B	A	oz	lbf	N	kp	p			
kg		28.35 · 10 ⁻³	0.454	64.79 · 10 ⁻⁶	1	1 · 10 ⁻³	N	0.278	4.448	1	9.807	9.807 · 10 ⁻³				
g		28.35	0.454 · 10 ³	64.79 · 10 ³	1 · 10 ³	1	kp	0.028	0.454	0.102	1	1 · 10 ⁻³				
oz		1	16	2.28 · 10 ⁻³	35.27	35.27 · 10 ⁻³	oz	1	16	3.600	35.27	35.27 · 10 ⁻³				
lb		1/16	1	1/7000	2.205	2.205 · 10 ³	lbf	1/16	1	0.225	2.205	2.205 · 10 ⁻³				
gr (grain)		437.5	7000	1	15.43 · 10 ⁻³	15.43 · 10 ⁶	pdl	2.011	32.17	7.233	70.93	70.93 · 10 ⁻³				

Länge		l [m]							
B	A	in	ft	yd	Mil	m	cm	mm	μ
m		25.4 · 10 ⁻³	0.305	0.914	25.4 · 10 ⁻⁶	1	0.01	1 · 10 ⁻³	1 · 10 ⁻⁶
cm		2.54	30.5	91.4	25.4 · 10 ⁻⁴	1 · 10 ⁻²	1	0.1	1 · 10 ⁻⁴
mm		25.4	305	914	25.4 · 10 ⁻³	1 · 10 ⁻³	10	1	1 · 10 ⁻³
in		1	12	36	1 · 10 ⁻³	39.37	0.394	3.94 · 10 ⁻²	3.94 · 10 ⁻⁵
ft		1/12	1	3	1/12 · 10 ⁻³	3.281	3.281 · 10 ⁻²	3.281 · 10 ⁻³	3.281 · 10 ⁻⁶

Winkelgeschwindigkeit			ω [s ⁻¹]	Winkelbeschleunigung			α [s ⁻²]			
B	A	s ⁻¹ = Hz	min ⁻¹	rad s ⁻¹	B	A	min ⁻²	s ⁻²	rad s ⁻²	min ⁻¹ s ⁻²
rad s ⁻¹		2π	π/30	1	s ⁻²		1/3600	1	1/2π	1/60
min ⁻¹		1/60	1	30/π	rad s ⁻²		π/1800	2π	1	π/30

Lineare Geschwindigkeit		v [m s ⁻¹]							
B	A	in-s ⁻¹	in-min ⁻¹	ft-s ⁻¹	ft-min ⁻¹	m s ⁻¹	cm s ⁻¹	mm s ⁻¹	m min ⁻¹
m s ⁻¹		2.54 · 10 ⁻²	4.23 · 10 ⁻⁴	0.305	5.08 · 10 ⁻³	1	1 · 10 ⁻²	1 · 10 ⁻³	1/60
in-s ⁻¹		1	60	12	720	39.37	39.37 · 10 ⁻²	39.37 · 10 ⁻³	0.656
ft-s ⁻¹		1/12	5	1	60	3.281	3.281 · 10 ⁻²	3.281 · 10 ⁻³	5.46 · 10 ⁻²

Temperatur			T [K]		
B	A	° Fahrenheit	° Celsius	Kelvin	
Kelvin		(°F -305.15) / 1.8	+ 273.15	1	
° Celsius		(°F -32) / 1.8	1	-273.15	
° Fahrenheit		1	1.8°C + 32	1.8 K + 305.15	

Im maxon-Katalog verwendete Einheiten

10.2 Typische Reibungskoeffizienten für Roll-, Haft- und Gleitreibung

Reibungsart	Reibungszustand	Beschreibung
Gleitreibung	Festkörperreibung (trockene Gleitreibung)	unmittelbarer Kontakt der Reibpartner
	Grenzreibung (geschmierte Gleitreibung)	Sonderfall der Festkörperreibung mit adsorbiertem Schmierstoff an den Oberflächen
	Mischreibung	Festkörperreibung und Flüssigkeitsreibung gemischt nebeneinander
	Flüssigkeitsreibung	Reibpartner sind durch Flüssigkeitsfilm (hydrostatisch oder hydrodynamisch erzeugt) vollständig getrennt
	Gasreibung	Reibpartner sind durch gasförmigen Film (aerostatisch oder aerodynamisch erzeugt) vollständig getrennt
Haftreibung		20...100 % höher als Gleitreibung
Rollreibung	Rollreibung	Körper durch geschmierte Wälzkörper getrennt
	Wälzreibung	Rollreibung mit Gleitkomponente (Schlupf)

Reibungszahl typisch	Beispiele	Reibungszahl
0.1 ... 1	Sinterbronze – Stahl	0.15 ... 0.3
	Kunststoff – Grauguss	0.3 ... 0.4
	Stahl – Stahl	0.4 ... 0.7
	Stahl nitriert – Stahl nitriert	0.3 ... 0.4
	Kupfer – Kupfer	0.6 ... 1.0
	Chrom – Chrom	0.41
	Al-Legierung – Al-Legierung	0.15 ... 0.6
0.1 ... 0.2	Stahl – Stahl	0.1
0.01 ... 0.1	Gleitlager geschmiert bei tiefen Drehzahlen	
	Sinterbronze – Stahl	0.05 ... 0.1
	Sintereisen – Stahl	0.07 ... 0.1
	Stahl gehärtet – Stahl gehärtet	0.05 ... 0.08
0.001 ... 0.01	Sintergleitlager geschmiert bei hohen Drehzahlen und kleiner Radiallast	
0.0001		
0.1 ... 1.2	Stahl – Stahl trocken	0.4 ... 0.8
	Stahl – Stahl geschmiert	0.08 ... 0.12
	Sinterbronze – Stahl trocken	0.2 ... 0.4
	Sinterbronze – Stahl geschmiert	0.12 ... 0.14
	Kunststoff – Grauguss trocken	0.3 ... 0.5
0.001 ... 0.005	Kugellager	0.001 ... 0.0025
0.001 ... 0.1		

11. Symboliste Formelsammlung

Name	Symbol	Einheit	Seitenzahl
Abstand der Achse s vom Schwerpunkt S	r_s	m	13
Anhalte(dreh)moment	M_H	Nm	38, 39, 40, 41, 42
Anhalte(dreh)moment bei Temperatur T_w	M_{HT}	Nm	47
Anlaufstrom	I_A	A	39, 40
Anlaufstrom bei Temperatur T_w	I_{AT}	A	47
Anschlussinduktivität Motor (Katalogwert)	L_{mot}	H	40, 46
Anschlusswiderstand Motor (Katalogwert)	R_{mot}	Ω	32, 38, 39, 40, 41, 47
Ausgangsspannung	U_{out}	V	30, 34
Ausgangsstrom	I_{out}	A	30
Auslenkung aus Ruhelage	Δl	m	9
Ausschaltdauer	t_{off}	s	51
Aussenradius	r_a	m	12, 13
Beschleunigung	a	m/s^2	9, 14
Beschleunigungskraft	F_a	N	9, 24
Beschleunigungskraft 1. Halbtakt / 2. Halbtakt	F_{a1} / F_{a2}	N	24
Beschleunigungszeit	Δt_a	s	22, 23, 24, 25
Blindwiderstand induktiv (Reaktanz)	X_L	Ω	33, 34
Blindwiderstand kapazitiv	X_C	Ω	33, 34
Dichte	ρ	kg/m^3	12, 13
Direktionsmoment (Federkonstante)	k_m	Nm	11
Drehmoment	M	Nm	11, 21, 38, 39, 40, 41, 42, 45, 47, 50
Drehmoment 1. Halbtakt / 2. Halbtakt	$M_{m1}(\varphi) / M_{m2}(\varphi)$	Nm	24
Drehmoment Eingang	M_m	Nm	21, 22, 23, 25
Drehmoment für Beschleunigung	$M_{m,a} / M_a$	Nm	11, 22, 23, 24, 25
Drehmoment für Ummagnetisierung	$M_{m,agn}$	Nm	47
Drehmoment Betriebspunkte 1... n	$M_{1...n}$	Nm	42
Drehmoment Spiralfeder	M_S	Nm	11
Drehmomentkonstante (Katalogwert)	k_M	Nm/A	39, 40, 41, 42, 47
Drehwinkel	$\Delta\varphi / \varphi$	rad	11, 15, 18, 19, 24
Drehzahl / Drehzahl, (-änderung)	$n / n, \Delta n$	min^{-1}	15, 21, 38, 39, 40, 41, 42, 45, 47, 50
Drehzahl Eingang	n_m	min^{-1}	22, 23, 24, 25
Drehzahl nach Beschleunigung	n_{end}	min^{-1}	15
Drehzahl vor Beschleunigung	n_{start}	min^{-1}	15
Drehzahländerung	Δn	min^{-1}	11, 41
Drehzahländerung Eingang	Δn_m	min^{-1}	22, 23, 24, 25
Drehzahlkonstante (Katalogwert)	k_n	min^{-1}/V	39, 40, 42
Druck (1 Pa = 1 N/m ² = 10 ⁻⁵ bar)	p	Pa	9
Druckkraft	F_p	N	9
Durchmesser Antriebsrad	d'	m	23
Durchmesser Antriebsrolle	d_1	m	22, 25
Durchmesser Lastrolle	d_2	m	25
Durchmesser Umlenkrolle 2	d_2'	m	22
Durchmesser Umlenkrolle X	d_X	m	22
Effektivwert Drehmoment (RMS)	$M_{m,RMS} / M_{RMS}$	Nm	24, 42
Effektivwert Strom (RMS)	I_{RMS}	A	51
Eingangsspannung	U_{in}	V	30, 34
Einschaltdauer	t_{on}	s	51, 52
Elektrische Eingangsleistung	P_{el}	W	38
Elektrische Kapazität	C_1' / C_2	F	48
Elektrische Ladung	Q	C	48
Elektrische Zeitkonstante	τ_{el}	s	30
Elektrischer Widerstand	$\hat{R} / R_1 / R_2$	Ω	29, 30, 33, 34, 48
Elektromotorische Kraft	EMK	V	40
Endtemperatur	T_{end}	°C	48
Endtemperatur Stator	$T_{S,e}$	°C	49, 51, 52
Endtemperatur Wicklung	$T_{W,e}$	°C	49, 52
Ersatzwiderstand	R'	Ω	31, 32
Ersatzwiderstand von R_2 und R_L	R_e	Ω	32
Exzentrizität	e	m	24
Fallbeschleunigung	g	m/s^2	9, 14
Fallhöhe	h	m	14
Federkonstante	k	N/m	9
Federkraft	F_s	N	9
Frequenz	f_s	Hz	33, 34
Gesamtinduktivität	L_{tot}	H	46
Gesamtspannung	U	V	31, 32
Gesamtstrom	I	A	31, 32
Gesamtzeit	Δt_{tot}	s	16, 17, 18, 19
Gesamtzeit Betriebszyklus	t_{tot}	s	42
Geschwindigkeit / Geschwindigkeit, (-änderung)	$v / v, \Delta v / \Delta v$	m/s	9, 14, 21
Geschwindigkeit nach Beschleunigung	v_{end}	m/s	14
Geschwindigkeit vor Beschleunigung	v_{start}	m/s	14
Gespeicherte Wärmemenge	Q	J	47, 48
Getriebetemperatur	T_G	°C	49
Getriebewirkungsgrad	η_G		47
Gewichtskraft Körper	F_G	N	9
Grenzfrequenz	f_C	Hz	34
Hangabtriebskraft	F_H	N	9
Hochlaufzeit	Δt	s	41
Höhe	h	m	12, 13
Impedanz	Z	Ω	33
Impulszahl pro Umdrehung	N	IMP	44
Induktivität	L	H	30, 33, 34
Induktivität, eingebaute Drossel Regler	L_{int}	H	46

Name	Symbol	Einheit	Seitenzahl
Induktivität, zusätzliche externe Motordrossel	L_{ext}	H	46
Induzierte Spannung	U_{ind}	V	39, 40
Innenradius	r_i	m	12, 13
Innenwiderstand Spannungsquelle	R_i	Ω	29
Joule'sche Verlustleistung	P_j	W	38, 47, 49, 52
Kapazität	C	F	30, 33, 34
Kennliniensteigung Motor (Katalogwert)	$\Delta n / \Delta M$	$\text{min}^{-1} / \text{mNm}$	39, 40, 42, 45
Klemmenspannung	U_{kl}	V	29
Kraft (Force)	F	N	9, 11, 21
Kreisfrequenz	ω	rad/s	33
Kurzzeitig zul. Drehmoment Getriebe (Katalogwert)	$M_{G,max}$	Nm	26
Lagerbelastung axial/radial	F_{KL}	N	11
Länge	l	m	13
Länge Kante $a / b / c$	$a / b / c$	m	13
Lastdrehmoment	M_L	Nm	11, 21, 25, 41, 45, 47
Lastdrehzahl	n_L	min^{-1}	25, 41, 45, 47
Lastgeschwindigkeit	v_L	m/s	21, 22, 23
Lastkraft (Abgang)	F_L	N	10, 21, 22, 23
Lastkraft 1. Halbtakt / 2. Halbtakt	F_{L1} / F_{L2}	N	24
Lastspannung	U_L	V	32
Laststrom	I_L	A	32
Lastwiderstand	R_L	Ω	29, 32
Leerlaufdrehzahl	n_0	min^{-1}	38, 39, 40, 41
Leerlaufdrehzahl Motor bei U_N (Katalogwert)	$n_{0,UN}$	min^{-1}	45
Leerlaufstrom	I_0	A	39, 40, 42
Leistung	P	W	29, 38
Masse	GND	V	48
Masse	m	kg	9, 12, 13, 47
Masse Band	m_B	kg	22
Masse Last	m_L	kg	22, 23, 24
Masse Fahrzeug	m_F	kg	23
Masse Getriebe	m_G	kg	47
Masse Motor	m_{mot}	kg	47
Masse Riemen	m_R	kg	25
Masse Spindel	m_S	kg	22
Masse Wicklung	m_W	kg	47
Masse Zahnstange	m_Z	kg	23
Massenträgheitsmoment	J	kgm^2	11
Massenträgheitsmoment abgangsseitig	J_2	kgm^2	25
Massenträgheitsmoment aller Räder zusammen	J_W	kgm^2	23
Massenträgheitsmoment antriebsseitig	J_1	kgm^2	22, 25
Massenträgheitsmoment bezüglich der Achse s durch den Schwerpunkt S	J_s	kgm^2	13
Massenträgheitsmoment bezüglich der Drehachse x	J_x	kgm^2	12, 13
Massenträgheitsmoment bezüglich der Drehachse y	J_y	kgm^2	12, 13
Massenträgheitsmoment bezüglich der Drehachse z	J_z	kgm^2	12, 13
Massenträgheitsmoment Eingang (Motor, Encoder, Bremse)	J_{in}	kgm^2	22, 23, 24, 25
Massenträgheitsmoment Exzentrerscheibe	J_E	kgm^2	24
Massenträgheitsmoment Getriebe transformiert	J_G	kgm^2	25
Massenträgheitsmoment Last	J_L	kgm^2	25, 41
Massenträgheitsmoment Ritzel	J_R	kgm^2	23
Massenträgheitsmoment Rotor (Katalogwert)	J_R	kgm^2	41
Massenträgheitsmoment Spindel	J_S	kgm^2	22
Massenträgheitsmoment Umlenkrolle 2 / X	J_u / J_X	kgm^2	22, 25
Max. Dauerdrehmoment Getriebe (Katalogwert)	$M_{G,cont}$	Nm	26, 47
Max. Spannungsabfall Steuerung	ΔU	V	45
Maximal zulässige Wicklungstemperatur (Katalogwert)	T_{max}	$^{\circ}\text{C}$	50, 51, 52
Maximale Beschleunigung	a_{max}	m/s^2	16, 17
Maximale Drehzahl Abgang	$n_{max,L}$	min^{-1}	26
Maximale Drehzahl Eingang	$n_{max,in}$	min^{-1}	26
Maximale Drehzahl Lastzyklus	n_{max}	min^{-1}	18, 19, 42
Maximale Geschwindigkeit	v_{max}	m/s	16, 17
Maximale Leistung	P_{max}	W	29
Maximale Temperaturänderung	ΔT_{max}	K	48
Maximale Winkelbeschleunigung	α_{max}	rad/s^2	18, 19, 41
Maximaler Stromrippel Peak-to-Peak	$\Delta I_{P,max}$	A	46
Maximaler Wirkungsgrad bei U_N (Katalogwert)	η_{max}		40
Maximales Drehmoment Lastzyklus	M_{max}	Nm	42
Mechanische Abgabeleistung	$P_{mech,L}$	W	21, 38
Mechanische Eingangsleistung	$P_{mech,in}$	W	21
Mechanische Leistung	P_{mech}	W	21
Mechanische Zeitkonstante (Katalogwert)	τ_m	s	41
Mechanische Zeitkonstante mit zusätzlichem J_L	τ_m	s	41
Mechanisches Spiel Abgang	$\Delta s_1 / \Delta \phi_L$	m / rad	22, 23, 25
Mechanisches Spiel Eingang	$\Delta \phi_{in}$	rad	22, 23, 25
Messauflösung	ΔQ	qc/ms	44
Mittlere Endtemperatur Wicklung	Δn	min^{-1}	44
Mittlerer Lagerdurchmesser	$T_{W,av}$	$^{\circ}\text{C}$	51
Motordrehmoment	F_{KL}	m	11
Motordrehzahl	M_{mot}	Nm	47
Motorspannung	n_{mot}	min^{-1}	47
Motorstrom	U_{mot}	V	38, 39, 40, 42, 47
Nenn-drehzahl Motor (Katalogwert)	I_{mot}	A	38, 39, 40, 41, 42, 47, 49, 50, 52
Nennmoment Motor (Katalogwert)	n_N	min^{-1}	50
Nennspannung Motor (Katalogwert)	M_N	Nm	42, 50
Nennstrom in Abhängigkeit von T_a	U_N	V	38, 39, 40, 45
	$I_{N,TA}$	A	50, 51

Name	Symbol	Einheit	Seitenzahl
Nennstrom Motor (Katalogwert)	I_N	A	46, 50, 51, 52
Normalkraft (Kraft senkrecht zur Ebene)	F_N	N	9
Periodendauer	T	s	33
Phasenverschiebungswinkel	φ	°	34
Positionsauflösung	$\Delta\varphi$	°	44
Pull-down Widerstand	R_f	Ω	30
Pull-up Widerstand	R_u	Ω	30
Punkt 1 / 2 auf der x-Achse	x_1 / x_2	m	13
PWM Frequenz	f_{PWM}	Hz	46
Quadcounts pro Impuls	$Q = 4$	qc/IMP	44
Querschnitt	A	m ²	9, 13
Radius / Radius 1 / Radius 2	$r / r_1 / r_2$	m	11, 12
Radius Kreistorus um z-Achse	R	m	12
Reib(dreh)moment	M_R	Nm	11, 39, 40, 41
Reibkraft	F_R	N	9
Reibungszahl (siehe Tabelle Kap. 10.2)	μ		9, 11
Reib-Verlustleistung	P_{VR}	W	47
Sinusförmiger Geschwindigkeitsverlauf Last	$v_L(t)$	m/s	24
Soll-Drehzahlkonstante	$k_{n,theor}$	min ⁻¹ /V	42
Soll-Leerlaufdrehzahl	$n_{0,theor}$	min ⁻¹	42
Spannung	U	V	29, 33
Spannung über Induktivität / Kapazität / Widerstand	$U_L / U_C / U_R$	V	34
Spannung, Potentialdifferenz	U_1 / U_2	V	48
Speisespannung	$+V$	V	30
Spez. Wärmekapazität Eisen	c_{Fe}	450 – 470 J/(kgK)	47
Spez. Wärmekapazität Kupfer	c_{Cu}	380 J/(kgK)	47
Spezifische Wärmekapazität	c	J/(kgK)	47
Spindelsteigung	p	m	22
Starttemperatur	T_{start}	°C	48
Statortemperatur	T_S	°C	48, 49, 50, 52
Steht für X_C oder X_L	X		33
Stellung Potentiometer	x	0...1	32
Strom	I	A	29, 33, 34, 48, 51
Strom durch Widerstand R_2	I_{R2}	A	32
Strom während Ein-Phase	I_{in}	A	51
Stromänderung	δi	A	40
Stromrippel Peak-to-Peak	ΔI_{pp}	A	46
Teilkräfte	$F_1 / F_2 / F_3$	N	10
Teilmomente	$M_1 / M_2 / M_x$	Nm	11
Teilspannungen	U_1, U_2	V	31, 32
Teilströme	I_1, I_2	A	31
Teilung Verzahnung	p	m	23
Teilwiderstände	R_1, R_2	Ω	31, 32
Temperatur	T	°C	47, 48, 49, 51, 52
Temperaturänderung in Abhängigkeit der Zeit t	$\Delta T(t)$	K	48
Temperaturdifferenz	ΔT	K	32, 47
Temperaturunterschied Getriebe – Umgebung	ΔT_G	K	49
Temperaturunterschied Stator – Umgebung	ΔT_S	K	48, 49, 50, 51
Temperaturunterschied Wicklung – Umgebung	ΔT_W	K	48, 49, 51, 52
Therm. Widerstand Gehäuse – Umgebung (Katalogwert)	$R_{th,G}$	K/W	48, 49, 50, 51, 52
Therm. Widerstand Gehäuse – Umgebung modifiziert	$R_{th,mod}$	K/W	50
Therm. Widerstand Getriebe – Umgebung	$R_{th,G}$	K/W	49
Therm. Widerstand Wicklung – Gehäuse (Katalogwert)	$R_{th,W}$	K/W	48, 49, 50, 51, 52
Therm. Zeitkonstante Stator / Wicklung (Katalogwerte)	τ_s, τ_w	s	49, 52
Thermische Zeitkonstante	τ_t	s	48
Überlastfaktor	K		52
Umgebungstemperatur	T_U	°C	48, 49, 50, 51, 52
Ummagnetisierungs-Verlustleistung	P_{Vmag}	W	47
Untersetzung Getriebe (Katalogwert)	i_G		25, 26
Untersetzung mech. Antrieb	i		44
Ursprung Spannung	U_i	V	29
Verlustleistung / Verlustleistung Getriebe	P_V / P_{VG}	W	29, 47, 48, 49, 50
Versorgungsspannung	V_{CC}	V	45, 46
Wärmekapazität	C	J/K	47
Wärmekapazität Getriebe / Stator / Wicklung	$C_{th,G} / C_{th,S} / C_{th,W}$	J/K	47, 48
Weg	$s, \Delta s / \Delta s$	m	14, 16, 17
Wicklungstemperatur	T_W	°C	47, 48, 49, 50
Wicklungswiderstand bei aktueller Temp. T_W	R_{TW}	Ω	47
Wicklungswiderstand bei T_U	R_{TU}	Ω	49, 50, 51, 52
Widerstand bei Temperatur T_U	R_T	Ω	32
Widerstand Potentiometer	R_P	Ω	32
Widerstandskoeffizient Kupfer	α_{Cu}	0,0039 K ⁻¹	32, 47, 49, 50, 51, 52
Winkel schiefe Ebene	α	°	9
Winkelabhängige periodische Beschleunigungskraft	$F_a(\varphi)$	N	24
Winkelbeschleunigung	α	rad/s ²	11, 15, 41
Winkelgeschwindigkeit nach / vor Beschleunigung	$\omega_{end} / \omega_{start}$	rad/s	15
Winkelgeschwindigkeit / Winkelgeschwindigkeit, (-sänderung)	$\omega / \omega, \Delta\omega / \Delta\omega$	rad/s	11, 15, 21
Winkelgeschwindigkeit Eingang / Last	ω_{in} / ω_L	rad/s	21
Wirbelstrom-Verlustleistung	P_{Veddy}	W	47
Wirkungsgrad	η		21, 22, 23, 24, 25, 40, 47
Zähnezahl Hohlrad / Ritzel / Sonnenrad	$z_1 / z / z_2$		23, 25
Zeit / Zeit, Zeitdauer	$t / t, \Delta t$	s	14, 15, 24, 30, 33, 41, 47, 48, 49, 51, 52
Zeit $a / b / c$	$\Delta t_a / \Delta t_b / \Delta t_c$	s	16, 18
Zeitänderung	δt	s	40
Zeitdauer	Δt	s	9, 11, 15
Zeitdauer Betriebspunkte 1...n	$t_{1...n}$	s	42

