



**Motordaten und Betriebsbereiche von DC Motoren**

- Motorverhalten: Kennlinien, Strom
- Motordaten und Betriebsbereiche

Vgl. E-learning auf [maxonmotor.ch/academy](http://maxonmotor.ch/academy)

© 2010 maxon motor ag, Sachseln, Schweiz

maxon motor  
driven by precision

Diese Präsentation hat zum Ziel, nützliche Informationen zu vermitteln, wie die Motordatenblätter im maxon Katalog zu lesen sind.

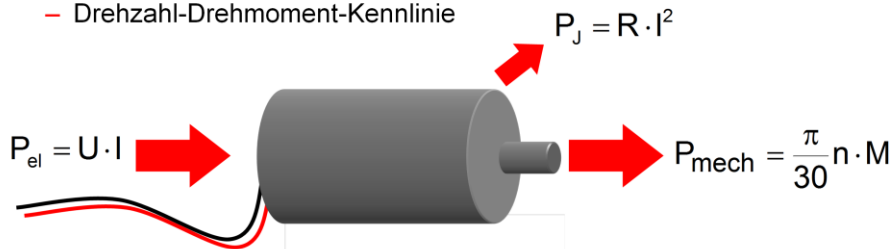
Wir werden die charakteristischen Motorkennlinien von physikalischen Prinzipien herleiten und erklären, was die Motordaten der DC- und EC-Motoren bedeuten und wie sie voneinander abhängen.

Es gibt auch ein E-Learning zum selben Thema auf der maxon Website zum freien Download.

## DC-Motor als Energiewandler

- Elektrische in mechanische Energie

- Drehzahlkonstante
- Drehmomentkonstante
- Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie



- gilt für DC- und EC-Motoren

- deshalb "EC" = "bürstenloser DC" (BLDC)

© 2010 maxon motor ag, www.maxonmotor.com/academy

maxon motor  
driven by precision

Ganz generell kann man Motoren als Energiewandler betrachten. Gleichstrommotoren (DC-Motoren) wandeln die elektrische Eingangsleistung (DC-Spannung  $V$  und Strom  $I$ ) in mechanische Abgangsleistung aus Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  und Drehmoment  $M$  um. Ingenieure bevorzugen die Drehzahl  $n$ , gemessen in  $\text{min}^{-1}$  statt  $\text{rad/s}$ ; deshalb braucht es einen Faktor  $\pi/30$ , um die Einheit der Leistung korrekt in Watt zu erhalten.

Die Theorie, die in dieser Präsentation dargestellt wird gilt für alle DC-Motoren, speziell aber für die maxon DC-Motoren und die bürstenlosen maxon EC-Motoren.

		214895	214896	214897	214898	214899	215982	215983	215985	215986	21598	
<b>Motordaten</b>												
<b>Werte bei Nennspannung</b>												
1	Nennspannung	V	3	4.5	12	15	21	24	24	30	36	48
2	Leerlaufdrehzahl	min <sup>-1</sup>	12200	10500	11500	11600	12200	12000	10600	11100	11800	10400
3	Leerlaufstrom	mA	32.6	16.9	7.38	6.02	4.66	3.94	3.26	2.79	2.57	1.56
4	Nennndrehzahl	min <sup>-1</sup>	11300	9600	10000	10000	10000	10000	9600	9600	9600	7450
5	Nennmoment (max. Dauerdrehmoment)	mNm	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
6	Nennstrom (max. Dauerbelastungsstrom)	A	0.6	0.6	0.35	0.281	0.209	0.18	0.16	0.132	0.115	0.074
7	Anhaltmoment	mNm	17.1	12.1	14.4	14.3	14.9	14.7	12.9	13.3	13.7	11.5
8	Anlaufstrom	A	7.32	2.95	1.45	1.17	0.91	0.772	0.604	0.518	0.473	0.262
9	Max. Wirkungsgrad	%	87	86	86	86	86	86	86	86	86	85
<b>Kenndaten</b>												
10	Anschlusswiderstand	Ω	0.41	1.52	8.3	12.8	23.1	31.1	39.7	57.9	76.2	183
11	Anschlussinduktivität	mH	0.0114	0.0349	0.206	0.314	0.558	0.759	0.956	1.38	1.75	4.04
12	Drehmomentkonstante	mNm A <sup>-1</sup>	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
13	Drehzahlkonstante	min <sup>-1</sup> V <sup>-1</sup>	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
14	Kennliniensteigung	min <sup>-1</sup> mNm <sup>-1</sup>	7.18	871	804	815	825	817	828	839	865	906
15	Mechanische Anlaufzeitkonstante	ms	7.93	7.44	7.27	7.29	7.3	7.31	7.35	7.32	7.35	7.47
16	Rotorträgheitsmoment	gcm <sup>2</sup>	1.05	0.816	0.864	0.854	0.844	0.854	0.848	0.834	0.811	0.786
<b>Spezifikationen</b>			<b>Betriebsbereiche</b>						<b>Legende</b>			
<b>Thermische Daten</b>			n [min <sup>-1</sup> ]						<div style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: red; border: 1px solid black;"></div> Dauerbetrie Unter Berüc schen Wider gebungstemp Belastung d erreicht = the			
17	Therm. Widerstand Gehäuse-Luft	35 KW <sup>-1</sup>							<div style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: white; border: 1px solid black;"></div> Kurzzeitbetr Der Motor d lastet werden			
18	Therm. Widerstand Wicklung-Luft	30 KW <sup>-1</sup>										
19	Therm. Widerstand Wicklung-Gehäuse	30 KW <sup>-1</sup>										
20	Therm. Widerstand Wicklung-Luft	30 KW <sup>-1</sup>										
21	Umgebungstemperatur	-30 ... +85°C										
22	Max. Wicklungstemperatur	+85°C										
<b>Mechanische Daten (Sinterlager)</b>												
23	Grenzdrehzahl	19000 min <sup>-1</sup>										

Die Datenblätter der maxon Motoren gruppieren die Motordaten in drei Blöcke und ein Betriebsbereichs-Diagramm. Auf einer Katalogseite werden die Spezifikationen für einen Motortyp (eine Baugröße) dargestellt, wobei die Spalten die Daten für die einzelnen Wicklungen (Drahtdurchmesser) enthalten. Je nach verwendetem Wicklungsdraht verändern sich die elektrischen Daten.

Beginnen wir mit den **Kenndaten der Motoren**, die sich im zweiten Block auf dem Datenblatt befinden.

## Kenndaten des Motors

beschreiben den Aufbau und das allgemeine Verhalten

- unabhängig von Spannung und Strom
  
- stark wicklungsabhängige Werte (elektromechanisch)
  - Anschlusswiderstand (Phase-Phase) R
  - Anschlussinduktivität (Phase-Phase) L
  - Drehmomentkonstante  $k_M$
  - Drehzahlkonstante  $k_n$
  
- praktisch unabhängig von Wicklung (mechanisch)
  - Kennliniensteigung  $\Delta n/\Delta M$
  - mechanische Zeitkonstante  $\tau_m$
  - Rotor-Trägheitsmoment  $J_{Mot}$

4 © 2010 maxon motor ag, www.maxonmotor.com/academy

maxon motor  
driven by precision

Die Kenndaten beschreiben den **Motoraufbau** und die innere Konstruktion. Sie sind **unabhängig von der anliegenden Spannung oder vom Strom**. Sie widerspiegeln die mechanischen Abmessungen, die Stärke des Permanentmagneten und den verwendeten Wicklungstyp.

Dabei unterscheiden sich die Kenndaten, die einen elektrischen Anteil haben, von rein mechanischen Kenndaten.

Motorparameter mit einem **elektrischen Anteil** variieren bedeutend von Wicklung zu Wicklung. Am deutlichsten erkennt man dies am Anschlusswiderstand und an der Anschlussinduktivität. Die Drehzahlkonstante  $k_n$  und die Drehmomentkonstante  $k_M$  beschreiben jeweils einen Teil der Energiewandlung von elektrisch nach mechanisch. Je nachdem welche Wicklung gewählt wird, sind ihre Werte unterschiedlich.

Die letzten drei sind rein **mechanische Parameter**. Es spielt keine Rolle, welche Wicklung man betrachtet, ihr Wert ist über die gesamte Wicklungsreihe (oder für einen Motortyp) mehr oder weniger konstant. Wie wir später noch sehen werden ist die Kennliniensteigung ein Mass für die Stärke des Motors, die ja über die Motorgrösse festgelegt ist und nicht über die Wicklung. Das Massenträgheitsmoment des Rotors ist ebenfalls praktisch konstant; die Verwendung eines dünneren Drahtes wird durch eine höhere Wicklungszahl kompensiert.

## Wicklungsreihe

Widerstand nimmt von links nach rechts zu

tiefer Widerstand  $\longleftrightarrow$  hoher Widerstand

- dicker Draht mit wenig Windungen
- tiefe Nennspannungen
- hohe Dauer- und Anlaufströme
- tiefe Drehmoment-Konstante (mNm/A)
- hohe Drehzahl-Konstante ( $\text{min}^{-1}/\text{V}$ )



- dünner Draht mit vielen Windungen
- höhere Nennspannungen
- tiefe Dauer- und Anlaufströme
- tiefe Drehzahl-Konstante ( $\text{min}^{-1}/\text{V}$ )
- hohe Drehmoment-Konstante (mNm/A)

5 © 2010 maxon motor ag, www.maxonmotor.com/academy

maxon motor  
driven by precision

Die verschiedenen Wicklungen eines Motortyps sind in Kolonnen angeordnet, wobei der Widerstand von links nach rechts zunimmt.

**Die erste Wicklung ganz links** besteht aus dem Draht mit dem dicksten Durchmesser. Nur wenige Windungen haben im Luftspalt zwischen Magnet und Gehäuse Platz. Entsprechend ist der Widerstand tief und der benötigte Strom hoch. Allerdings sind die Spannungen klein. (In einigen Fällen wird der Anschlusswiderstand sogar vom Bürstenwiderstand dominiert.)

**Die letzte Wicklung ganz rechts** besteht aus dem dünnsten Draht mit vielen Windungen. Der Widerstand ist hoch und entsprechend die benötigten Spannungen, aber der **Stromfluss ist klein**.

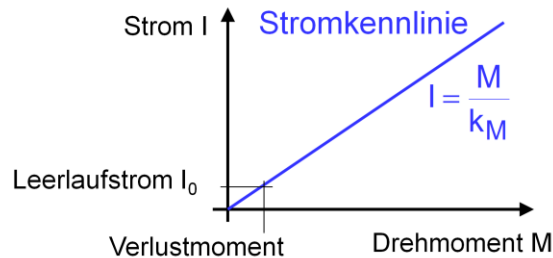
**Eine vorgegebene Anwendung** (Drehzahl und Drehmoment) kann mit allen möglichen Wicklungen betrieben werden. Allerdings wird von links nach rechts eine zunehmend höhere Spannung benötigt, während der Strombedarf abnimmt.

## Drehmomentkonstante $k_M$

- erzeugtes Drehmoment proportional zum Motorstrom

$$M = k_M \cdot I$$

- durch Motorgeometrie und magn. Flussdichten bestimmt
- Drehmoment bestimmen mittels Strommessung
- im Motor: Drehmoment = Strom
- Einheiten: mNm/A



© 2010 maxon motor ag, www.maxonmotor.com/academy

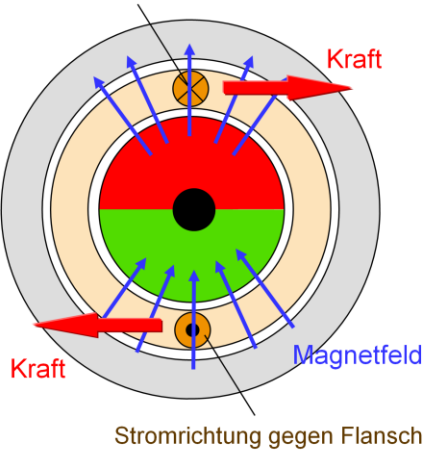
maxon motor  
driven by precision

Die **Drehmomentkonstante**  $k_M$  ist eine elektromechanische Konstante, die ein Teil der Leistungstransformation im Motor beschreibt. Sie verbindet den Motorstrom  $I$  mit dem erzeugten Drehmoment  $M$ .

Drehmoment und Strom sind für die eisenlosen maxon Motoren streng proportional. Man kann auch sagen, dass diese beiden Größen für einen Motor äquivalent sind. Damit kann man einen gegebenen Motor als Drehmomentsensor verwenden; man muss nur den Strom messen.

Für die maxon Kleinmotoren ist die Drehmomentkonstante in der **Einheit mNm/A** angegeben.

### Kraft und Drehmomenterzeugung



**Kräfte:**  
Kraft auf stromführende Leiter im Magnetfeld

**Drehmoment:**  
Summe aller Kräfte im Abstand zu Drehachse

**Einflussgrößen:**  
Geometrie } **Konstruktion**  
Flussdichte }  
Windungszahl }  $M = k_M \cdot I$

Strom  $I$  } **Anwendung**

7. © 2010, maxon motor ag, www.maxonmotor.com/academy

maxon motor  
driven by precision

Dieser schematische Motorquerschnitt zeigt den Ursprung dieser einfachen Proportionalität zwischen Drehmoment und Strom. Das zugrunde liegende physikalische Prinzip ist die **Kraft auf einen Strom führenden Leiter im externen Magnetfeld**.

Das erzeugte Drehmoment hängt von der **geometrischen Anordnung der Wicklung**, ihrer Distanz zur Drehachse, der Dichte der Windungen, der **Stärke des Magnetfeldes** im Luftspalt und dem **Strom** ab. Mit Ausnahme des Stroms sind alle anderen Parameter über den inneren Aufbau vorgegeben und können am fertigen Motor nicht mehr verändert werden. Sie werden deshalb in einer Konstante zusammengefasst, der Drehmomentkonstanten  $k_M$ . Damit ist das erzeugte Drehmoment proportional zum Motorstrom.

## Drehzahlkonstante $k_n$

- Drehzahl  $n$  und induzierte Spannung  $U_{ind}$ 
  - Induktionsgesetz: Flussänderung in Leiterschleife
  - induzierte Spannung proportional zur Drehzahl
  - eigentlich Kehrwert von  $k_M$ , nur in anderen Einheiten
$$n = k_n \cdot U_{ind}$$
- Drehzahlkonstante  $k_n$ 
  - meist zur Berechnung der Leerlaufdrehzahl  $n_0$
  - Einheit:  $\text{min}^{-1} / \text{V}$
$$n_0 = k_n \cdot U$$
- Generatorkonstante  $k_e$ 
  - Kehrwert von  $k_n$ : Motor als Generator (z.B. DC-Tacho). Wie viel Spannung wird induziert?
  - Einheiten:  $\text{mV} / \text{min}^{-1}$   
 $\text{V} / 1000 \text{min}^{-1}$

© 2010 maxon motor ag, www.maxonmotor.com/academy

maxon motor  
driven by precision

Die zweite elektromechanische Konstante ist die **Drehzahlkonstante  $k_n$** . Sie beschreibt wieviel Spannung in der Wicklung induziert wird, die im inhomogenen Magnetfeld des Luftspaltes rotiert. Nach dem Induktionsgesetz ist die induzierte Spannung umso grösser, je schneller der Fluss ändert, d.h. je schneller der Motor dreht. Somit muss wiederum eine Proportionalität bestehen, diesmal zwischen der Drehzahl und der induzierten Spannung, die über den Motoranschlüssen gemessen werden kann.

Die Einheit der Drehzahlkonstanten ist  **$\text{min}^{-1}/\text{V}$** .

Man kann zeigen, dass die Drehzahlkonstante von denselben konstruktiven Parametern abhängt wie die Drehmomentkonstante, allerdings invers. Das bedeutet, dass die Drehzahlkonstante im Wesentlichen der Kehrwert der Drehmomentkonstanten ist – allerdings in anderen Einheiten ausgedrückt.

Multipliziert man die beiden Konstanten, erhält man:

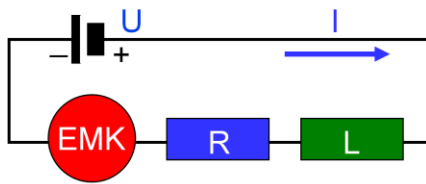
$$k_M \cdot k_n = 1 \text{ (in SI Einheiten)}$$

$$k_M \cdot k_n = 30'000/\pi = 9549 \text{ rpm/V} \cdot \text{mNm/A (in maxon Katalogeinheiten)}$$

Eine verwandte Grösse ist die **Generatorkonstante**, z.B. des DC-Tachos.



### Motor als elektrischer Schaltkreis



**EMK: induzierte Spannung**  
(Wicklungs-)Widerstand R

**Wicklungsinduktivität L**

- Spannungsabfall über L kann für DC Motoren vernachlässigt werden

Motorspannung U:

$$U = L \cdot \frac{\partial I}{\partial t} + R \cdot I + EMK \cong R \cdot I + U_{ind}$$

$$U_{ind} = U - R \cdot I$$

$$\frac{n}{k_n} = U - R \cdot \frac{M}{k_M}$$

$$n = k_n \cdot U - \left( \frac{30'000}{\pi} \cdot \frac{R}{k_M^2} \right) \cdot M$$

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

© 2010 maxon motor ag, www.maxonmotor.com/academy

maxon motor

driven by precision

Im Folgenden wollen wir das Motorverhalten herleiten.

Dazu betrachten wir den **Motor als elektrischen Schaltkreis**. Die anliegende Spannung U muss den Widerstand R des Motors, seine Induktivität L und die induzierte Spannung (oder Gegen-EMK) überwinden. Dies ist in der ersten Gleichung dargestellt, die man für quasi-stationären Betrieb weiter vereinfachen kann, d.h. für die Annahme, dass in einem Gleichstrommotor die zeitliche Ableitung des Stroms vernachlässigt werden kann.

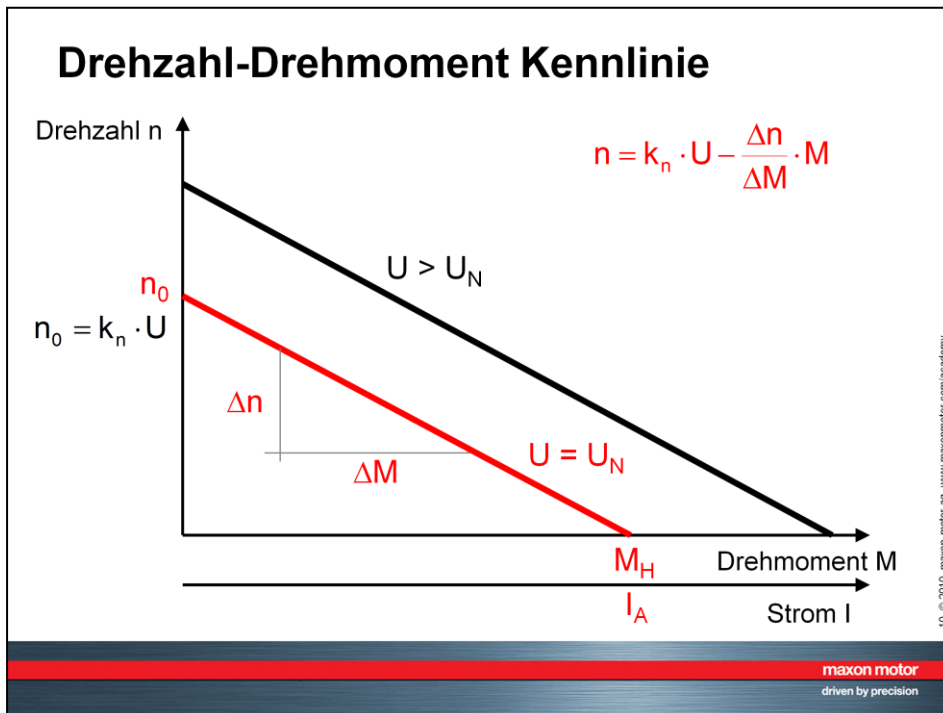
Durch umformen erhalten wir eine Gleichung für die induzierte Spannung, die gleich der anliegenden Spannung minus Widerstand mal Motorstrom ist,  $U_{ind} = U - RI$ .

Jetzt benützen wir die Drehzahl- und Drehmomentkonstante, um die elektrischen Größen  $U_{ind}$  und Strom durch die mechanischen Größen Drehzahl und Drehmoment zu ersetzen. Multiplizieren wir die Gleichung mit  $k_n$  und benützen wir die Beziehung zwischen  $k_n$  und  $k_M$ , erhalten wir die obere der eingerahmten Gleichungen. Sie besagt, dass die Motordrehzahl n gleich der Drehzahlkonstanten multipliziert mit der anliegenden Motorspannung U abzüglich einer *Motorkonstanten* mal das Drehmoment M ist.

Diese Motorkonstante ist ein Motorparameter, die den Aufbau des Motors charakterisiert, unabhängig von anliegender Spannung und Strom. Die Einheit dieser Motorkonstanten ist  $\text{min}^{-1}/\text{mNm}$  (Drehzahl/Drehmoment), weshalb wir das Symbol  $\Delta n/\Delta M$  benützen.

Die letzte Gleichung beschreibt somit das mechanische Verhalten des Motors, die gesuchte Beziehung zwischen Drehzahl und Drehmoment.

**Bemerkung:** Ein alternative Möglichkeit diese Beziehung herzuleiten, ist es die Leistungsbilanz des Motors zu betrachten, wie sie auf der zweiten Folie dieser Präsentation angedeutet ist.



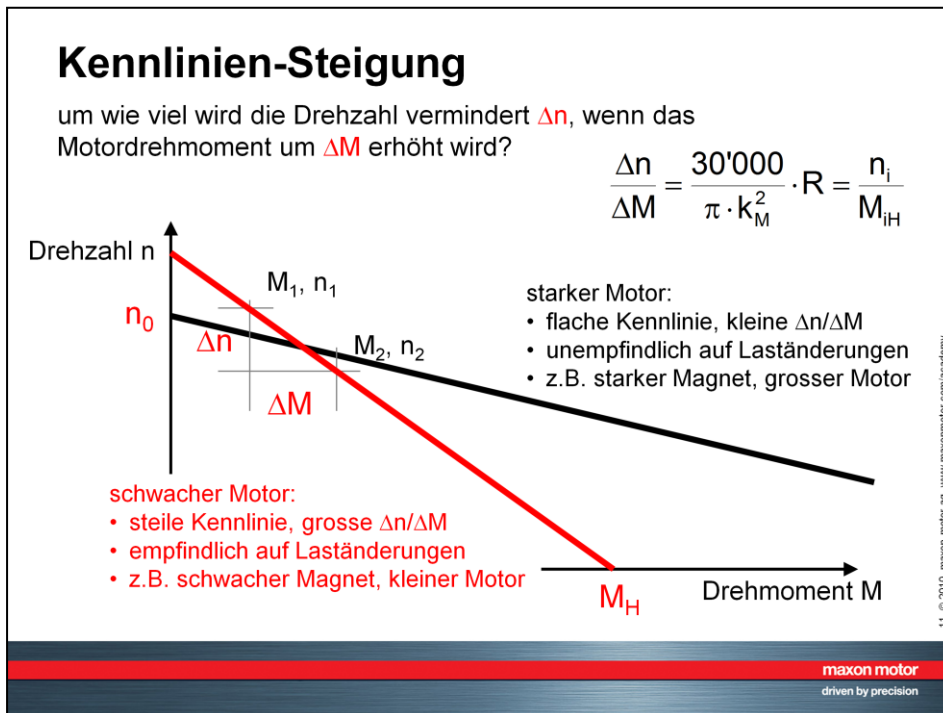
Die Beziehung zwischen Drehzahl und Drehmoment ist die Gleichung einer Geraden in unserer Standarddarstellung, wo die Drehzahl als Funktion des Drehmoments dargestellt wird (rote Gerade).

- Bei Drehmoment null ist die Drehzahl am grössten. Diese Drehzahl heisst **Leerlaufdrehzahl  $n_0$** . Die Leerlaufdrehzahl kann einfach aus der anliegenden Spannung und der Drehzahlkonstanten des Motors berechnet werden.
- Erhöht man das Lastmoment, so nimmt die Drehzahl linear ab. Die Bedeutung von  $\Delta n / \Delta M$  wird nun klar: Es ist die **Steigung der Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie**.
- Eine weitere Steigerung des Drehmoments führt zu einer Abnahme der Drehzahl bis zum Punkt, wo der Motor anhält. Das entsprechende Drehmoment heisst **Anhaltmoment  $M_H$** .
- Wir haben früher gesehen, dass Drehzahl und Strom äquivalent sind. Somit können wir eine Stromachse parallel zur Drehmomentachse ziehen. Der Strom, der dem Anhaltmoment entspricht, heisst **Anlaufstrom  $I_A$** .

Eine andere Sicht auf die Kennlinie beginnt beim Punkt, wo der Motor **startet**, d.h. beim rechten Ende. Legt man eine Spannung beim still stehenden Motor an, kann ein grosser Strom fließen, der Anlaufstrom. Es gibt noch keine Gegen-EMK, die der Spannung entgegenwirkt. Der Strom erzeugt ein hohes Drehmoment, das den Motor beschleunigt, die induzierte Spannung steigt an und weniger Strom kann fließen. Je schneller der Motor dreht, umso weniger Drehmoment wird erzeugt.

Alle diese Betrachtungen gelten für eine feste anliegende **Spannung  $U$** . Was geschieht, wenn diese Spannung verändert wird., z.B. Bei höherer Spannung? Die anliegende Spannung hat nur einen Einfluss auf den ersten Term in der Gleichung, auf die Leerlaufdrehzahl. Eine höhere Spannung resultiert in einer höheren Leerlaufdrehzahl. Die Kennliniensteigung ist nicht betroffen. Als Resultat gilt: Eine Änderung der anliegenden Spannung ergibt eine Parallelverschiebung der Kennlinie.

**Bemerkung:** Eine wichtige Eigenschaft der Kennlinie ist, dass am meisten Drehmoment beim Start erzeugt wird, was diese Motoren sehr dynamisch macht.

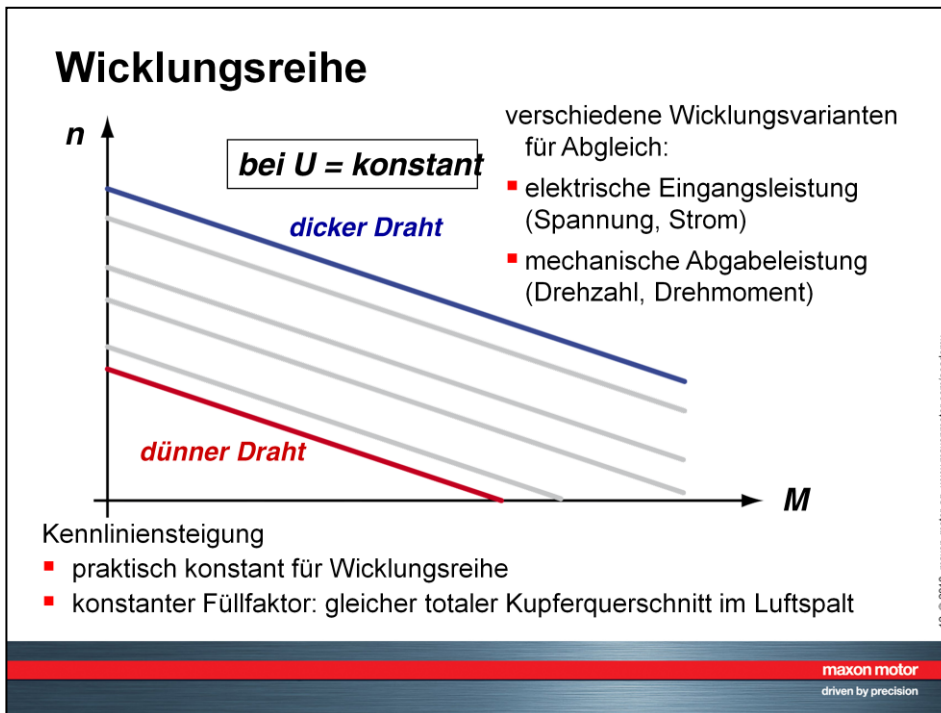


Einige Ergänzungen zur Kennliniensteigung.

Im Wesentlichen beschreibt sie, um wieviel die Drehzahl abfällt, wenn die Belastung ansteigt. Man kann sie als einer der Parameter betrachten, die die Motorstärke beschreiben.

- Ein **starker Motor** ist charakterisiert durch eine flache Kennlinie. Die Drehzahl fällt nur unwesentlich ab, wenn das Lastmoment erhöht wird. Der Wert der Kennliniensteigung ist klein.
- Bei einem **schwächeren Motor** ist der Drehzahlabfall grösser. Die Kennlinie ist steiler und die Steigung grösser.
- Tatsächlich findet man im maxon Katalog: Je grösser der Motor, umso kleiner die Kennliniensteigung.

Die Kennliniensteigung kann aus dem Widerstand R und der Drehmomentkonstante  $k_M$  des Motors berechnet werden. Alternativ kann man auch die Leerlaufdrehzahl  $n_0$  durch das Anhaltmoment  $M_H$  teilen.



Interessanterweise ist der Wert der Kennliniensteigung für einen Motortyp praktisch **unabhängig von der Wicklung**. Die Kennliniensteigung kann man deshalb als Parameter betrachten, der den Motortyp und die Baugröße spezifiziert und nicht die individuelle Wicklung.

Betrachten wir alle Wicklungen eines Motortyps **bei einer bestimmten Spannung U**, so erhalten wir eine **Schar von parallelen Kennlinien**; diejenige mit dem tiefsten Widerstand zuoberst, diejenige mit dem höchsten Widerstand zuunterst.

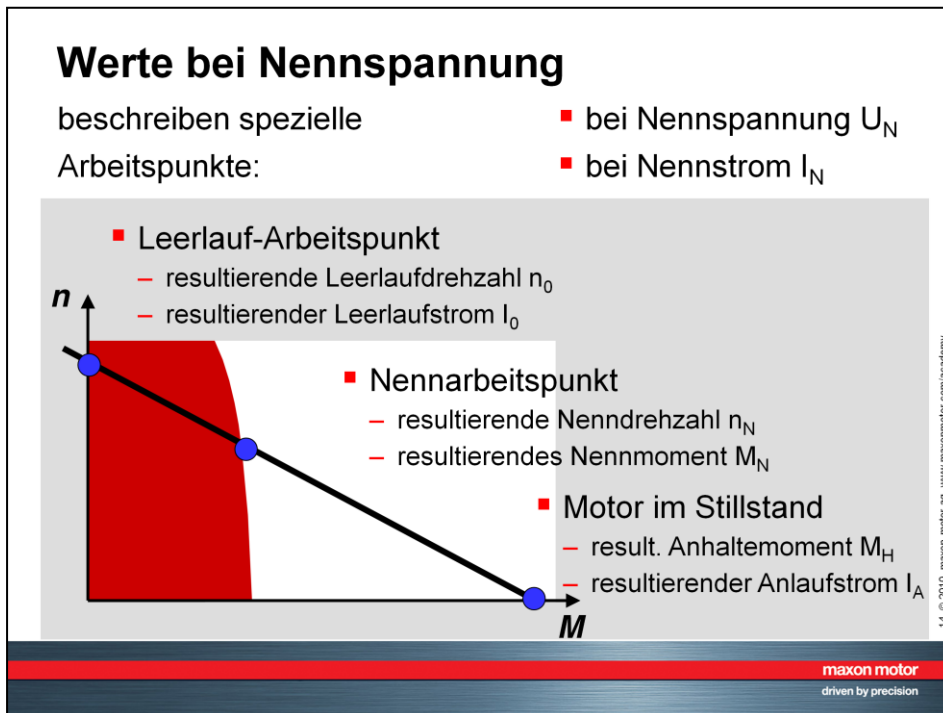
Dies ist ein nützliches Bild für den Prozess der Wicklungsauswahl.

**Bemerkung:** Die verschiedenen Wicklungen eines Motortyps erlauben die Anpassung der mechanischen Last (Drehzahl und Drehmoment, die durch die Anwendung vorgegeben sind und eine bestimmte Motorbaugröße verlangen) an die zur Verfügung stehende elektrische Eingangsleistung (Spannung und Strom des Netzgeräts).

		214895	214896	214897	214898	214899	215982	215983	215985	215986	21598	
<b>Motordaten</b>												
<b>Werte bei Nennspannung</b>												
1	Nennspannung	V	3	4.5	12	15	21	24	24	30	36	48
2	Leerlaufdrehzahl	min <sup>-1</sup>	12200	10500	11500	11600	12200	12000	10600	11100	11800	10400
3	Leerlaufstrom	mA	32.6	16.9	7.38	6.02	4.66	3.94	3.26	2.79	2.57	1.56
4	Nennndrehzahl	min <sup>-1</sup>	1130	1130	1130	1130	1130	1130	1130	1130	960	7450
5	Nennmoment (max. Dauerdrehmoment)	mNm	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.28	3.22
6	Nennstrom (max. Dauerbelastungsstrom)	A	0.6	0.6	0.35	0.281	0.209	0.18	0.16	0.132	0.115	0.074
7	Anhaltmoment	mNm	17.1	12.1	14.4	14.3	14.9	14.7	12.9	13.3	13.7	11.5
8	Anlaufstrom	A	7.32	2.95	1.45	1.17	0.91	0.772	0.604	0.518	0.473	0.262
9	Max. Wirkungsgrad	%	87	86	86	86	86	86	86	86	86	85
<b>Kenndaten</b>												
10	Anschlusswiderstand	Ω	0.41	1.52	8.3	12.8	23.1	31.1	39.7	57.9	76.2	183
11	Anschlussinduktivität	mH	0.0114	0.0349	0.206	0.314	0.558	0.759	0.956	1.38	1.75	4.04
12	Drehmomentkonstante	mNm A <sup>-1</sup>	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	44
13	Drehzahlkonstante	min <sup>-1</sup> V <sup>-1</sup>	40	40	40	40	40	40	40	40	329	217
14	Kennliniensteigung	min <sup>-1</sup> mNm <sup>-1</sup>	7.18	871	804	815	825	817	828	839	865	906
15	Mechanische Anlaufzeitkonstante	ms	7.93	7.44	7.27	7.29	7.3	7.31	7.35	7.32	7.35	7.47
16	Rotorträgheitsmoment	gcm <sup>2</sup>	1.05	0.816	0.864	0.854	0.844	0.854	0.848	0.834	0.811	0.786
<b>Spezifikationen</b>												
<b>Thermische Daten</b>												
17	Therm. Widerstand Gehäuse-Luft	35 KW <sup>-1</sup>										
18	Umgebungstemperatur	-30 ... +85°C										
19	Max. Wicklungstemperatur	+85°C										
<b>Mechanische Daten (Sinterlager)</b>												
23	Grenzdrehzahl	19000 min <sup>-1</sup>										
<b>Betriebsbereiche</b>												
maxon motor driven by precision												

Mit all diesen Erkenntnissen wenden wir uns nun dem ersten Block der Motordaten im Katalog zu, den Betriebsdaten, die von der Spannung abhängen.

Als Referenzspannung wird die **Nennspannung** in der ersten Zeile definiert. Die weiteren Motorparameter sind für diese Motorspannung spezifiziert. Die Nennspannung ist nicht die Spannung, bei welcher der Motor betrieben werden muss; grundsätzlich kann man jede Spannung anlegen. In den meisten praktischen Fällen wird die Betriebsspannung allerdings in der Nähe der Nennspannung liegen.



Die **Werte bei Nennspannung** beschreiben drei spezielle Punkte auf der Drehzahlkennlinie bei Nennspannung.

Der erste Punkt ist der **Leerlauf-Arbeitspunkt**.

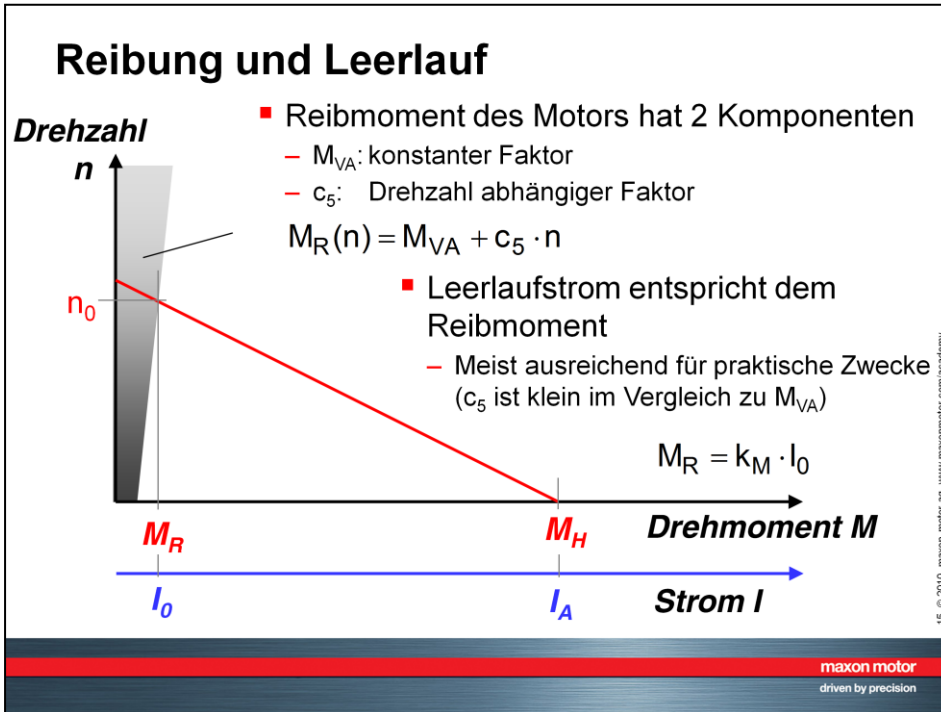
- Die Leerlaufdrehzahl ist die resultierende Drehzahl falls keine äussere Last anliegt
- Der Leerlaufstrom ist der Strom, der benötigt wird, um die inneren Verluste zu überwinden, z.B. die Reibung. (Mehr auf der nächsten Seite)

Der zweite Arbeitspunkt ist der **Nenn-Arbeitspunkt**. Er ist über den **maximal zulässigen Dauerstrom** oder Nennstrom definiert. Dies ist der maximale Strom, bei dem der Motor während langer Zeit ohne zu überhitzen betrieben werden kann.

- Das Nenndrehmoment ist das Drehmoment, das diesem Nennstrom entspricht.
- Die Nenndrehzahl ergibt sich aus dem Kennlinie und hat keine tiefere Bedeutung.

Der letzte Betriebspunkt ganz rechts beschreibt den Motor **im Stillstand oder beim Start**.

- Das Anhaltmoment gibt an, ab welchem Drehmoment der Motor stillsteht, wenn er bei Nennspannung betrieben wird.
- Der Anlaufstrom ist der entsprechende Strom, der sich ebenfalls unmittelbar beim Start einstellt, wenn der Motor mit Nennspannung beaufschlagt wird.



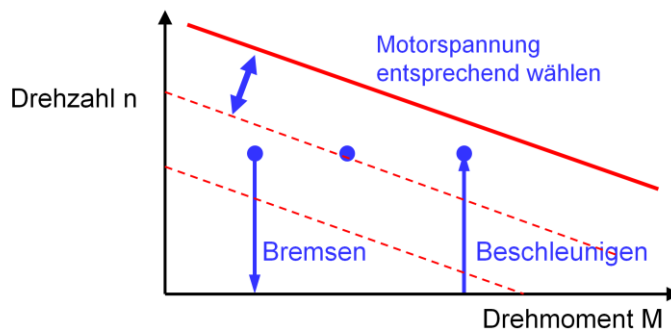
Eine genauere Betrachtung des Leerlauf-Arbeitspunkts zeigt, dass er durch die **Verluste im Motor** beeinflusst wird.

- Diese Verluste sind in diesem Diagramm als graue Fläche dargestellt. Mathematisch werden sie durch einen konstanten und einen Drehzahl abhängigen Term dargestellt.
- Die Leerlaufdrehzahl ist in Wirklichkeit etwas kleiner als die ideal berechnete  $n_{0i} = k_n \cdot U$ .

In den meisten Fällen beträgt das Verlustmoment nur ein paar wenige Prozent des Nennmoments. Deshalb können wir die Drehzahlabhängigkeit des Leerlaufstroms und den kleinen Fehler in der Berechnung der Leerlaufdrehzahl vernachlässigen.

## Arbeitspunkte

- Arbeitspunkte sind durch eine Last-Drehzahl  $n_L$  bei einem bestimmten Last-Drehmoment  $M_L$  charakterisiert.
- Arbeitspunkte müssen auf der Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie liegen: Motorspannung entsprechend anpassen.



16. © 2010. maxon motor ag. www.maxonmotor.com/academy

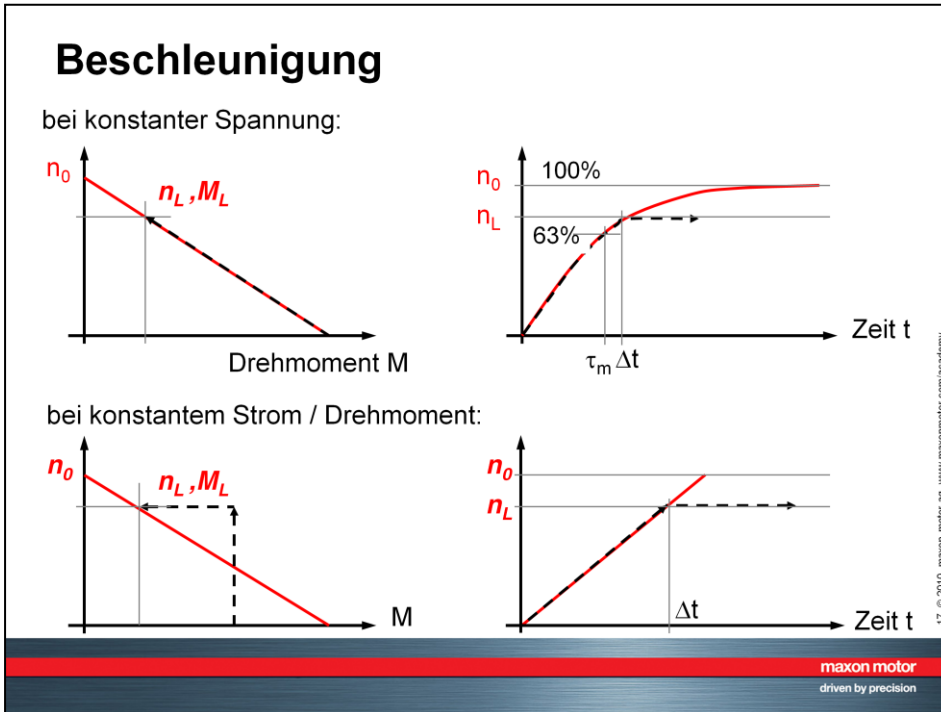
maxon motor  
driven by precision

Ein wichtiges Konzept sind die **Arbeitspunkte**. Dabei müssen wir unterscheiden zwischen

- **Arbeitspunkten der Last:** Dies sind Paare von Drehzahl und Drehmoment, welche die Anwendung erfordert. Im Diagramm werden sie als blaue Punkte dargestellt.
  - Typischerweise werden die höchsten Drehmomente während der Beschleunigung benötigt. Alle Punkte auf dem Beschleunigungspfeil sind Arbeitspunkte, die durchlaufen werden.
  - Der einzelne Punkt in der Mitte stellt konstanten Motorbetrieb bei gegebener Last und Drehzahl dar.
  - Beim Bremsen wird meist weniger Drehmoment benötigt, da die Reibung im System hilft.
- Die **Arbeitspunkte des Motors** liegen auf der Drehzahlkennlinie bei der entsprechenden Spannung..

**Den Motor bei den Arbeitspunkten zu betreiben**, die durch die Last vorgegeben sind, heisst nichts anderes, als die Motorspannung und damit die Kennlinie entsprechend anzupassen. Dies ist die Aufgabe eines Reglers.



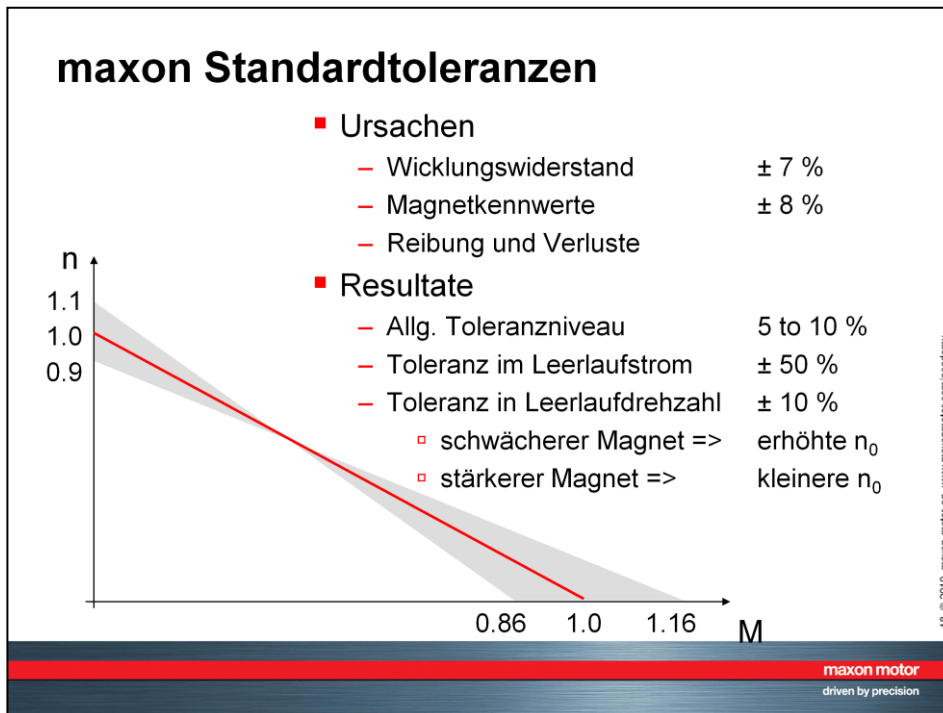


**Beschleunigung:** Es gilt zwei Situationen zu unterscheiden.

- Die erste ist **Beschleunigung bei konstanter Spannung**. Dabei wird angenommen, dass am Motor eine feste Spannung anliegt und der Motor wird entlang seiner Kennlinie bei dieser Spannung beschleunigen (oben links). Das Drehmoment, und somit die Beschleunigung, sind am Anfang am grössten. Je schneller der Motor dreht, umso weniger Strom kann fließen und um so kleiner ist der Wert der Beschleunigung. Die Drehzahl als Funktion der Zeit (oben rechts) zeigt ein exponentiell abflachendes Verhalten, das am besten über die mechanische Zeitkonstante  $\tau_m$  beschrieben wird. Voraussetzung für diese Art der Beschleunigung ist, dass die hohen Anlaufströme zur Verfügung gestellt werden können.
- Dies ist bei grösseren Motoren nicht immer der Fall. Das Netzgerät oder der Regler können den maximal möglichen Strom begrenzen. Dann sind wir in der Situation der **Beschleunigung bei konstantem Drehmoment**, wo die Beschleunigung beim maximalen Strom erfolgt, der vom Netzgerät oder Regler geliefert werden kann (unten links). In diesen Fällen nimmt die Drehzahl linear über die Zeit zu (unten rechts) und die Beschleunigungsdauer kann einfach berechnet werden.

#### Weitere Bemerkungen

- Sehr oft hat man auch ein gemischtes Verhalten: Zuerst Beschleunigung in der Strombegrenzung und später Beschleunigung bei maximaler Spannung.
- Die mechanische Zeitkonstante des Motors berücksichtigt nur die Rotorträgheit. Reibung und Lastträgheiten vergrössern diesen Wert.



## Toleranzen

Obwohl die Daten im maxon Katalog mit drei signifikanten Stellen angegeben werden, haben sie dennoch ziemlich grosse Toleranzen.

- Die Hauptquelle der Toleranzen sind Variationen im Wicklungswiderstand (Drahtdurchmesser) und Variationen in den Kennwerten der Permanentmagnete (mechanische und magnetische Toleranzen)
- Relativ gesehen, streuen die Motorverluste ziemlich stark, z.B. die Reibung in Lager und Kommutierung. Auf einer absoluten Skala sind diese Toleranzen allerdings klein.

Die wichtigsten Erkenntnisse aus praktischer Sicht sind:

- Bei der Motorauswahl sind Toleranzen von typisch 5 bis 10% einzurechnen. Diese Reserve ist bei der Auswahl zu berücksichtigen.
- Die Toleranz der Leerlaufdrehzahl ist  $\pm 10\%$ .
- Die Toleranz des Leerlaufstroms ist  $\pm 50\%$ .

## Temperatur-Einfluss

**Temperatur-Koeffizienten**

Cu	+ 0.39 % pro K	AlNiCo	- 0.02 % pro K
		Ferrit	- 0.2 % pro K
		NdFeB	- 0.13 % pro K

**Temperatur** **Widerstand** **Magnetkennwerte**

■ Beispiel: RE-Motor  
 $\Delta T = + 50K$

R: + 19.5 %

$k_n$  + 6.5 % (Leerlaufdrehzahl)  
 $k_M$  - 6.5 % (mehr Strom!)

Anhaltmoment  $M_H$ : - 22 %

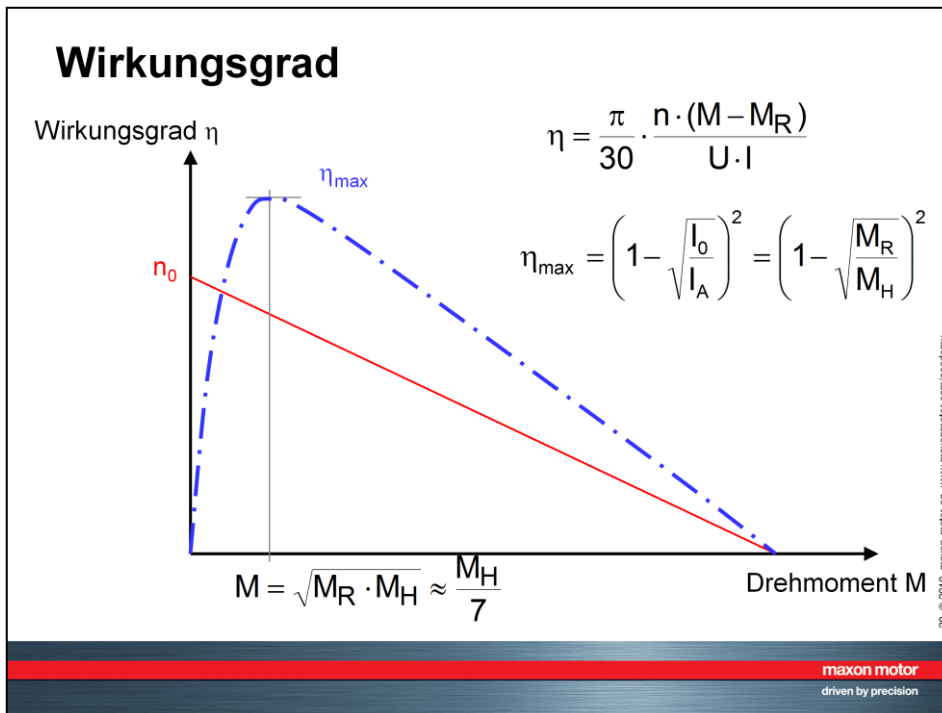
19. © 2010. maxon motor ag. www.maxonmotor.com/academy

maxon motor  
driven by precision

Die **Temperatur** hat ebenfalls einen Einfluss auf die Motordaten.

- Im Allgemeinen werden die Permanentmagnete schwächer bei höherer Temperatur; allerdings ist dieser Effekt reversibel innerhalb des im Motor erlaubten Temperaturbereichs. Die Magnete erlangen ihre Stärke zurück, wenn sie wieder abkühlen.
- AlNiCo-Magnete haben die kleinste Temperaturabhängigkeit. Sie werden deshalb in DC-Tachos verwendet, einem Messgerät, das unabhängig von der Temperatur dasselbe Ergebnis liefern sollte.
- Neodym-Magnete haben eine höhere Temperaturabhängigkeit. Ein Motor, der 50°C heisser ist, zeigt eine Drehzahlkonstante, die etwa 5% höher ist und eine Drehmomentkonstante, die etwa 5% tiefer liegt.
- Der Wicklungswiderstand nimmt ebenfalls mit etwa 0.4% pro Kelvin zu. Der Haupteffekt ist, dass sich die Leistungsverluste bei höherer Temperatur noch verstärken.

Die Abhängigkeit der Motordaten von der Temperatur wirkt sich selten als Problem aus. Die praktische Erfahrung zeigt, dass meist genügend Reserve vorhanden ist; auch wenn die Motoren aufgrund ihrer Kalt Daten ausgewählt wurden und bei längerer Betrieb erwärmen und damit etwas schwächer werden.



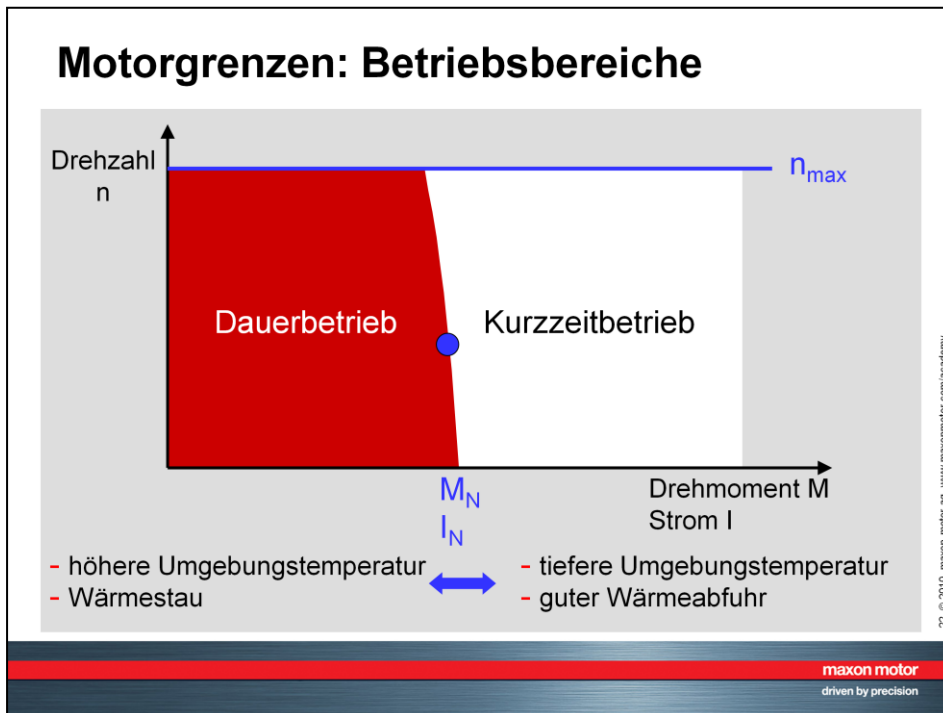
Ein hoher **maximaler Wirkungsgrad bei Nennspannung** ist ein schönes Verkaufsargument. Allerdings muss man sich bewusst sein, dass diese Grösse von der anliegenden Motorspannung abhängt (sie nimmt mit steigender Spannung zu) und vom Motordrehmoment, wie man aus dem Diagramm entnehmen kann. Betreibt man den Motor bei hohem oder sehr tiefem Drehmoment, ist der Wirkungsgrad kleiner.

Unserer Ansicht nach ist es besser, die Motorverluste über den Leerlaufstrom zu berücksichtigen.

In Batterie betriebenen Anwendungen gilt es primär sicherzustellen, dass die vorhandene Spannung möglichst gut genutzt wird und der Motor möglichst wenig Strom braucht.

		214895	214896	214897	214898	214899	215982	215983	215985	215986	215988	
<b>Motordaten</b>												
<b>Werte bei Nennspannung</b>												
1	Nennspannung	V	3	4.5	12	15	21	24	24	30	36	48
2	Leerlaufdrehzahl	min <sup>-1</sup>	12200	10500	11500	11600	12200	12000	10600	11100	11800	10400
3	Leerlaufstrom	mA	32.6	16.9	7.38	6.02	4.66	3.94	3.26	2.79	2.57	1.56
4	Nenn-drehzahl	min <sup>-1</sup>	11300	11300	11300	11300	11300	11300	11300	11300	960	7450
5	Nennmoment (max. Dauer-drehmoment)	mNm	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.28	3.22
6	Nennstrom (max. Dauerbelastungsstrom)	A	0.6	0.6	0.35	0.281	0.209	0.18	0.16	0.132	0.115	0.074
7	Anhaltmoment	mNm	17.1	12.1	14.4	14.3	14.9	14.7	12.9	13.3	13.7	11.5
8	Anlaufstrom	A	7.32	2.95	1.45	1.17	0.91	0.772	0.604	0.518	0.473	0.262
9	Max. Wirkungsgrad	%	87	86	86	86	86	86	86	86	86	85
<b>Kenndaten</b>												
10	Anschlusswiderstand	Ω	0.41	1.52	8.3	12.8	23.1	31.1	39.7	57.9	76.2	183
11	Anschlussinduktivität	mH	0.0114	0.0349	0.206	0.314	0.558	0.759	0.956	1.38	1.75	4.04
12	Drehmomentkonstante	mNm A <sup>-1</sup>	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	44
13	Drehzahlkonstante	min <sup>-1</sup> V <sup>-1</sup>	40	40	40	40	40	40	40	40	40	217
14	Kennliniensteigung	min <sup>-1</sup> mNm <sup>-1</sup>	7.18	871	804	815	825	817	828	839	865	906
15	Mechanische Anlaufzeitkonstante	ms	7.93	7.44	7.27	7.29	7.3	7.31	7.35	7.32	7.35	7.47
16	Rotorträgheitsmoment	gcm <sup>2</sup>	1.05	0.816	0.864	0.854	0.844	0.854	0.848	0.834	0.811	0.786
<b>Spezifikationen</b>												
<b>Thermische Daten</b>												
17	Therm. Widerstand Gehäuse-Luft	35 KW <sup>-1</sup>										
18	Therm. Widerstand Gehäuse-Wicklung	30 KW <sup>-1</sup>										
19	Therm. Widerstand Wicklung-Luft	30 KW <sup>-1</sup>										
20	Therm. Widerstand Wicklung-Gehäuse	30 KW <sup>-1</sup>										
<b>Weitere Spezifikationen</b>												
21	Umgebungstemperatur	-30 ... +85°C										
22	Max. Wicklungstemperatur	+85°C										
<b>Mechanische Daten (Sinterlager)</b>												
23	Grenzdrehzahl	19000 min <sup>-1</sup>										
<b>Betriebsbereiche</b>												
<b>Legende</b>												
maxon motor driven by precision												

Im dritten Teil betrachten wir die Grenzen des Motors, die im Betriebsbereichsdiagramm dargestellt sind.



Die rote Fläche im Betriebsbereichsdiagramm stellt den **Dauerbetriebsbereich** dar. Betreibt man den Motor bei Drehzahlen und Drehmomenten in diesem Gebiet, so wird der Motor nicht überhitzen und eine vernünftig lange Lebensdauer kann erwartet werden.

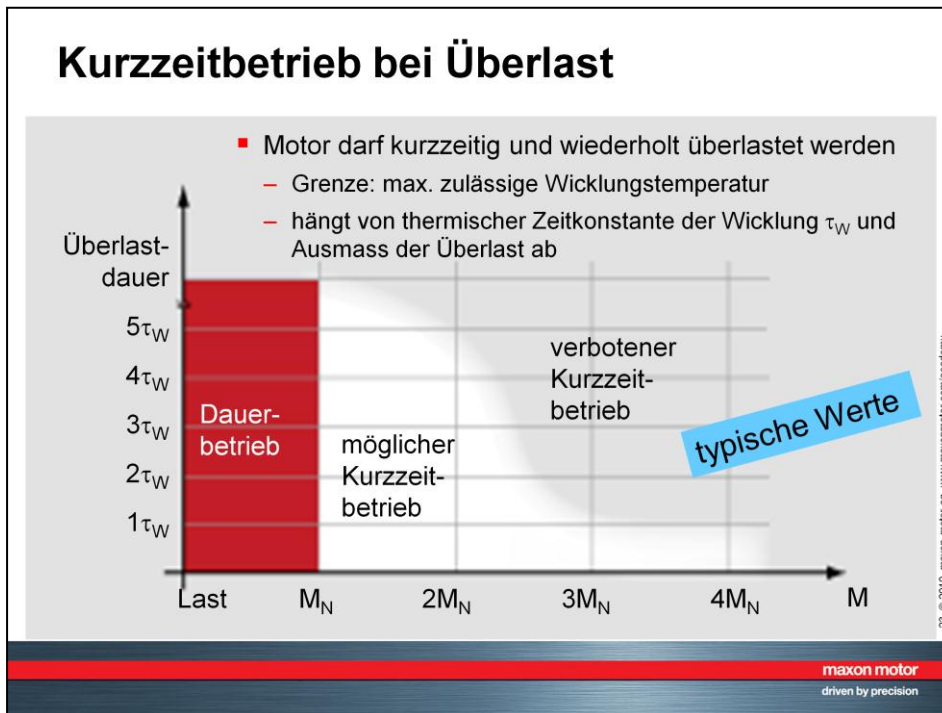
Oben ist der Dauerbetriebsbereich durch die **Grenzdrehzahl  $n_{max}$**  limitiert. Diese Drehzahl gründet auf Überlegungen zur Lebensdauer von Bürstensystem und Lagerung. Sie stellt keine absolute Grenze dar, sondern bedeutet, dass mit einer zunehmenden Reduktion der Lebensdauer und einer Erhöhung der Geräusche zu rechnen ist, wenn man sich dieser Drehzahl nähert oder sie gar überschreitet.

Auf der rechten Seite ist der Dauerbetriebsbereich durch das **maximal zulässige Dauerbelastungsmoment (oder Nennmoment)** begrenzt. Die entsprechende Stromgrösse ist der Dauerbelastungsstrom oder Nennstrom. Überschreitet man dieses Drehmoment oder diesen Strom, so wird sich ein unzulässige Motorerwärmung ergeben. Wiederum ist diese Grenze nicht scharf, sondern hängt von den Details der Wärmedissipation ab. Bei kühler Umgebungstemperatur oder bei guter Wärmeabfuhr – z.B. bei forcierter Luftkühlung – erträgt der Motor einen höheren Strom und die Grenze verschiebt sich nach rechts. In Fällen, wo die Wärme gestaut wird, ist das Dauerdrehmoment reduziert.

Bei höheren Drehzahlen steigen die internen Verluste und weniger Strom steht für die Erzeugung des Abgangsdrehmoments zur Verfügung. Darum ist meist das Dauerdrehmoment bei höheren Drehzahlen etwas kleiner.

Der **Kurzzeitbetriebsbereich** schliesst sich rechts als weisse Fläche an. Das Diagramm im Katalog geht nur bis etwa zum doppelten Nennmoment. Die Motoren können aber weit stärker überlastet werden.

Kurzzeitbetrieb bedeutet, dass der Motor bei höheren Drehmomenten als das Nennmoment betrieben werden kann, allerdings nur für eine begrenzte Zeit. Die grosse Frage ist: Wie lang ist «kurz»?



Die Überlastfähigkeit hängt von der Erwärmung des aus thermischer Sicht schwächsten Teils des Motors, d.h. der Wicklung, ab. Die Wicklungstemperatur darf die **maximal zulässige Wicklungstemperatur  $T_{max}$**  nicht überschreiten. Die Erwärmung der Wicklung gehorcht einem exponentiellen Verlauf, der mit der **thermischen Zeitkonstanten der Wicklung  $\tau_w$**  charakterisiert wird.

Diese Zeitkonstante beträgt wenige Sekunden für die kleinsten maxon Motoren bis etwa 1 Minute für die grössten. Sie gibt die intrinsische Zeiteinheit für die Dauer der Überlast.

Die **Stärke der Überlast** wird am besten in Einheiten des Nennmoments ausgedrückt; dies ist ebenfalls ein Motor spezifischer Parameter. Damit haben wir einen allgemein gültigen Rahmen, den wir mehr oder weniger für alle Motoren anwenden können.

Die Darstellung im Diagramm zeigt die Dauer der Überlast als Funktion des benötigten Drehmoments.

- Je grösser das Drehmoment, umso kürzer darf es anliegen.
- Beim doppelten Nennmoment kann der Motor während etwa 5-mal die thermische Zeitkonstante der Wicklung betrieben werden.
- Zwischen dem doppelten und dem dreifachen Nennmoment nimmt die mögliche Dauer sehr stark ab. Beim dreifachen Nennmoment beträgt die Dauer nur noch etwa 60% der thermischen Zeitkonstanten der Wicklung.

Die Darstellung gibt **allgemeine Richtlinien** und erlaubt in vielen Fällen eine schnelle Entscheidung, ob eine thermische Überlast zulässig ist oder nicht. Überlastsituationen bei relativ kleinem Drehmoment und Dauern können ohne Probleme erlaubt werden, während eine lang dauernde, hohe Überlast den Motor zerstört. Dazwischen liegt eine graue Zone, wo eine klare Antwort schwierig vorauszusagen ist und zusätzliche Versuche und Tests nötig sind. Die präzise thermische Reaktion des Motors hängt von seiner thermischen Vorgeschichte und den Details der Wärmedissipation ab.

		214895	214896	214897	214898	214899	215982	215983	215985	215986	215988	
<b>Motordaten</b>												
<b>Werte bei Nennspannung</b>												
1	Nennspannung	V	3	4.5	12	15	21	24	24	30	36	48
2	Leerlaufdrehzahl	min <sup>-1</sup>	12200	10500	11500	11600	12200	12000	10600	11100	11800	10400
3	Leerlaufstrom	mA	32.6	16.9	7.38	6.02	4.66	3.94	3.26	2.79	2.57	1.56
4	Nenn-drehzahl	min <sup>-1</sup>	11300	9600	9600	9600	9600	9600	9600	9600	9600	9600
5	Nennmoment (max. Dauer-drehmoment)	mNm	1.3	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
6	Nennstrom (max. Dauerbelastungsstrom)	A	0.6	0.6	0.35	0.281	0.209	0.18	0.16	0.132	0.115	0.074
7	Anhaltmoment	mNm	17.1	12.1	14.4	14.3	14.9	14.7	12.9	13.3	13.7	11.5
8	Anlaufstrom	A	7.32	2.95	1.45	1.17	0.91	0.772	0.604	0.518	0.473	0.262
9	Max. Wirkungsgrad	%	87	86	86	86	86	86	86	86	86	85
<b>Kenndaten</b>												
10	Anschlusswiderstand	Ω	0.41	1.52	8.3	12.8	23.1	31.1	39.7	57.9	76.2	183
11	Anschlussinduktivität	mH	0.0114	0.0349	0.206	0.314	0.558	0.759	0.956	1.38	1.75	4.04
12	Drehmomentkonstante	mNm A <sup>-1</sup>	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
13	Drehzahlkonstante	min <sup>-1</sup> V <sup>-1</sup>	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
14	Kennliniensteigung	min <sup>-1</sup> mNm <sup>-1</sup>	7.18	871	804	815	825	817	828	839	865	906
15	Mechanische Anlaufzeitkonstante	ms	7.93	7.44	7.27	7.29	7.3	7.31	7.35	7.32	7.35	7.47
16	Rotorträgheitsmoment	gcm <sup>2</sup>	1.05	0.816	0.864	0.854	0.844	0.854	0.848	0.834	0.811	0.786
<b>Spezifikationen</b>			<b>Betriebsbereiche</b>						<b>Legende</b>			
<b>Thermische Daten</b>									<b>Dauerbetrieb</b> Unter Berücksichtigung der Umgebungstemperatur und der Belastungsdauer erreicht = the...  <b>Kurzzeitbetrieb</b> Der Motor darf nicht...			
17	Therm. Widerstand Gehäuse-Luft	35 KW <sup>-1</sup>										
18	<b>Weitere Spezifikationen</b>											
19	Umgebungstemperatur	-30 ... +85°C										
20	Max. Wicklungstemperatur	+85°C										
<b>Mechanische Daten (Sinterlager)</b>												
23	Grenzdrehzahl	19000 min <sup>-1</sup>										

Im letzten Teil dieser Präsentation geben wir eine Übersicht über die weiteren Spezifikationen, insbesondere über die thermischen und mechanischen Daten.



## Thermische Daten

beschreiben die Erwärmung und die thermischen Grenzen

- hängen stark von den Montagebedingungen ab

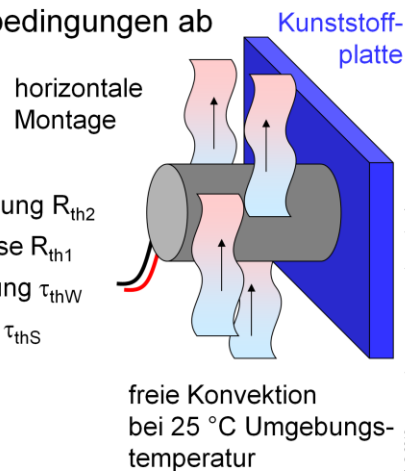
- Standardbedingungen:

- Erwärmen und Abkühlen

- therm. Widerstand Gehäuse-Umgebung  $R_{th2}$
- therm. Widerstand Wicklung-Gehäuse  $R_{th1}$
- thermische Zeitkonstante der Wicklung  $\tau_{thW}$
- thermische Zeitkonstante des Motor  $\tau_{thS}$

- Temperaturlimits

- Umgebungstemperaturbereich
- max. Wicklungstemperatur  $T_{max}$



maxon motor  
driven by precision

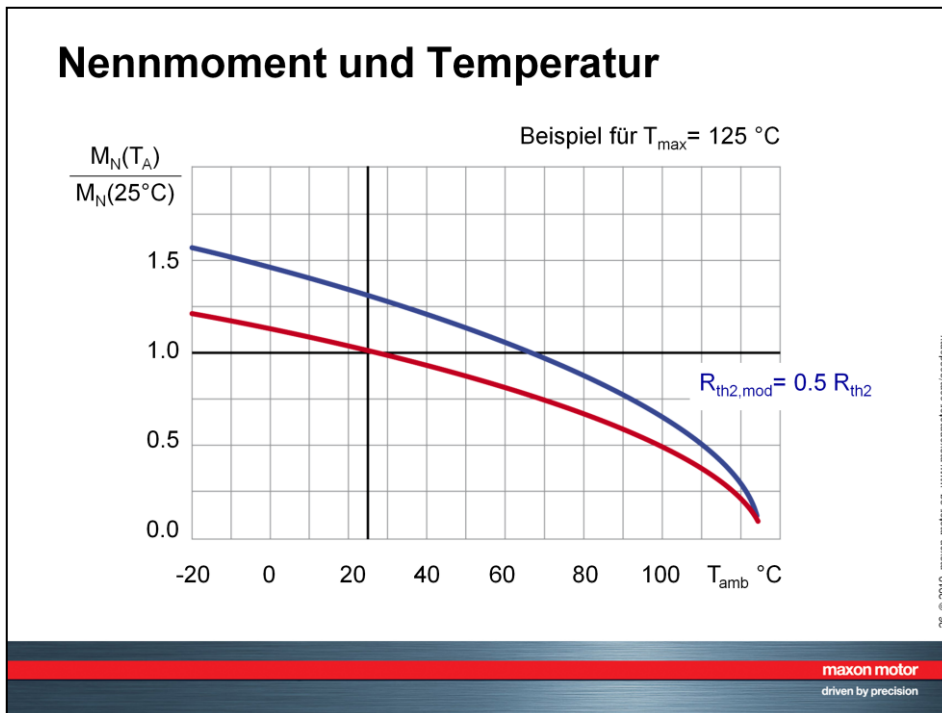
Die thermischen Daten werden benötigt, um das wärmetechnische Verhalten des Motors zu evaluieren und zu berechnen. Thermische Angaben hängen von den Details der Wärmedissipation ab. Darum werden die Angaben auf den Datenblättern für **Standardbedingungen** angegeben. Diese sind wie folgt festgelegt

- Umgebungstemperatur 25°C
- Motor horizontal auf Kunststoffplatte montiert: Sehr kleiner Wärmefluss über den Flansch.
- Freie Luftzirkulation, keine zusätzliche Kühlung. Freie Konvektion ist ein ziemlich effektiver Kühlmechanismus.

Diese Standardbedingungen repräsentieren eine **durchschnittliche Montage**. Montiert man den Motor auf eine metallische Struktur (Wärmesenke), so erhöht sich die Wärmedissipation und mehr Strom ist zulässig (vgl. nächste Seite). Wenn der Motor eingeschlossen ist und keine Konvektion möglich ist, steigt die Umgebungstemperatur an und weniger Strom ist zulässig.

Die **thermischen Widerstände** beschreiben, wie gut die Wärme von der Wicklung zum Gehäuse und vom Gehäuse an die Umgebung fließen kann. Die Montagebedingungen beeinflussen den zweiten Parameter.

Die **thermischen Zeitkonstanten** stellen die typischen Zeitraster dar, in denen sich die Wicklung und der Motor als ganzes erwärmen. Während die Wicklungstemperatur innerhalb von Sekunden reagiert, braucht es mehrere Minuten – oder bei grösseren Motoren noch länger, bis der Motor als ganzes die Temperatur ändert. Anhand der Gehäusetemperatur kann somit nicht auf kurzzeitige Änderungen der Wicklungstemperatur geschlossen werden. Das Gehäuse erreicht sein thermisches Gleichgewicht erst nach typischerweise einer halben Stunde oder mehr.

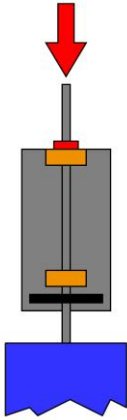


Diese Darstellung zeigt den **Einfluss der Umgebungstemperatur** auf das maximal zulässige Dauerdrehmoment (**rote Kurve**). Man erkennt, dass bei Temperaturen unterhalb 25° das zulässige Moment höher ist, während es bei steigenden Temperaturen abnimmt.

Den Einfluss einer **verbesserten Wärmedissipation** zeigt die **blaue Kurve**. Verkleinert man den thermischen Widerstand zwischen Gehäuse und Umgebung um den Faktor 2, so ergibt sich ein um 30% höheres Nennmoment (oder Nennstrom) bei Standardumgebung. Eine solche Reduktion des thermischen Widerstands kann leicht erreicht werden, z.B. indem man den Motor auf ein Metallchassis montiert.

## Mechanische Daten

beschreiben die Grenzdrehzahl und die Lager



- Grenzdrehzahl
  - Überlegungen zur Lebensdauer der Lager (EC)
  - max. Relativgeschwindigkeit zwischen Kollektor und Bürsten (DC)
- Axialspiel, Radialspiel
  - unterdrückt durch eine Vorspannung
- axiale und radiale Belastung der Lager
  - dynamisch: in Betrieb
  - statisch: im Stillstand

axiale Aufpresskraft  
(Welle abgestützt)

27 © 2010 maxon motor ag, www.maxonmotor.com/academy

maxon motor  
driven by precision

In den **mechanischen Daten** sind die Grenzdrehzahl und Angaben zu Lagerbelastung und Lagerspiel enthalten.

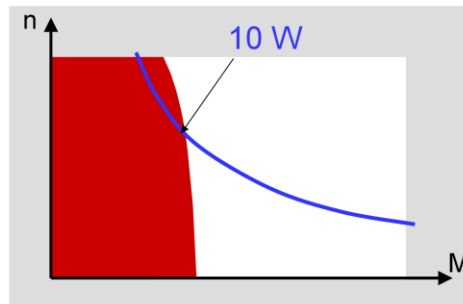
- Die **Grenzdrehzahl**  $n_{\max}$  limitiert den Dauerbetriebsbereich. Sie ergibt sich aus Überlegungen zur Lebensdauer von Lager und Bürsten.
- **Radialspiel und Axialspiel** können bei vorgespannten Kugellagern auf Null reduziert werden. Als Regel werden die Lager von bürstenbehafteten Motoren nicht vorgespannt (Man gewinnt nichts in Lebensdauer, die durch das Bürstensystem begrenzt ist). Grosse DC-Motoren (Durchmesser 50 mm und höher) und alle EC-Motoren haben vorgespannte Kugellager.
- Die **Lagerbelastung** wird für den statischen und dynamischen Fall angegeben. Statisch bedeutet im Stillstand, dynamisch bedeutet im Betrieb.

## Typenleistung

- keine einheitlichen Kriterien
  - elektrische Leistung im Nenn-Arbeitspunkt
  - Abgabeleistung im Nenn-Arbeitspunkt:
  - oder maximale Abgabeleistung  $P_{2,max}$
  - aber auch "marketingtechnische" Faktoren

$$P_{typ} = \frac{\pi}{30} \cdot n_N \cdot M_N$$

- Fazit:
  - Typenleistung ist nur Anhaltspunkt
  - Antrieb muss Drehzahl und Drehmoment bringen



28 © 2010 maxon motor ag, www.maxonmotor.com/academy

maxon motor  
driven by precision

Eine letzte Bemerkung zur **Typenleistung**.

Viele Datenblätter von DC-Motoren geben eine Typenleistung an. Es gibt aber keine einheitliche Festlegung, wie diese Leistung bei kleinen DC-Motoren anzugeben ist. Die Hersteller sind grundsätzlich frei.

Wie auch immer, die Typenleistung kann nur ein allgemeiner Richtpunkt bei der Motorauswahl sein. Wichtig ist vielmehr, dass der Motor beide Leistungsanforderungen, Drehzahl und Drehmoment unabhängig erfüllen kann.

Das **Nennmoment** des Motors ist viel wichtiger. Zum Beispiel kann ein Motor eine hohe Typenleistung aufgrund seiner hohen Grenzdrehzahl haben. Nun gibt es aber Situationen, wo diese hohe Drehzahl nicht benötigt wird, aber das Drehmoment, das der Motor liefern kann. Die Leistung, die die Anwendung benötigt, kann dann viel kleiner sein als die Typenleistung des Motors. Trotzdem wird dieser «überdimensionierte» Motor benötigt, um die Drehmomentanforderung zu erfüllen