

AUSWAHL EINER SPULE ANHAND DES ARBEITSPUNKTES UND DER LEISTUNGSVERSORGUNG



Herzstück eisenloser Gleichstrommotoren ist der Rotor, der aus einer selbsttragenden Spule besteht.

EINFÜHRUNG

Gleichstrommotoren erfüllen unabhängig von ihrer Konstruktion immer dieselbe Aufgabe: elektrische Energie (Gleichstrom) in mechanische Energie umzusetzen. Die Spannung und der Strom, die dem Motor zugeführt werden, werden an der Motorwelle in ein Abtriebsdrehmoment und eine Drehgeschwindigkeit umgewandelt. Für viele Anwendungen, darunter beispielsweise tragbare Medizinprodukte wie Infusionspumpen, wird jedoch nicht einfach ein Gleichstrommotor benötigt, sondern ein Motor, der die Aufgabe maximal effizient erfüllt. Denn nur so lässt sich eine langlebige, verlässliche Lösung erreichen. In diesen Fällen werden üblicherweise eisenlose Gleichstrommotoren eingesetzt.

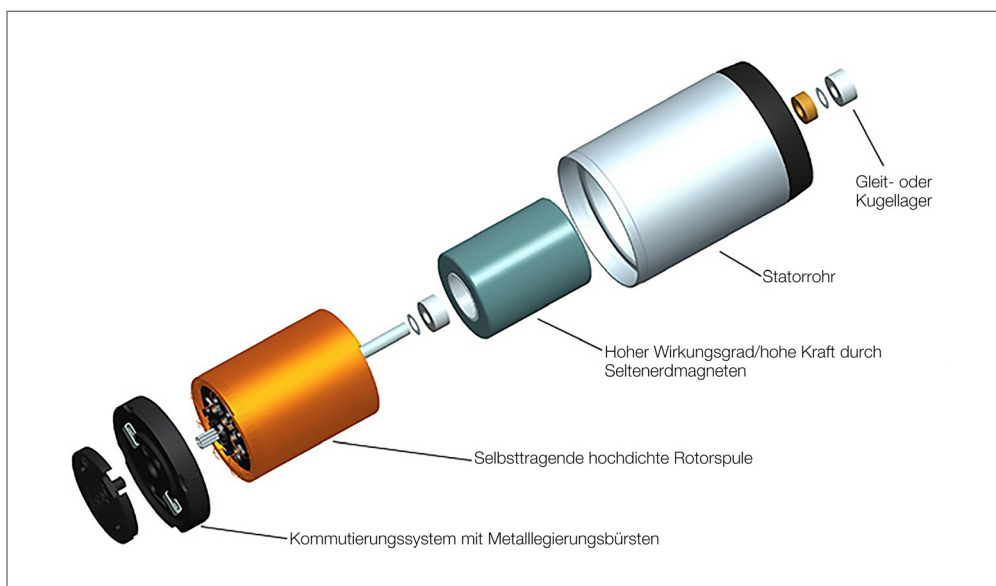
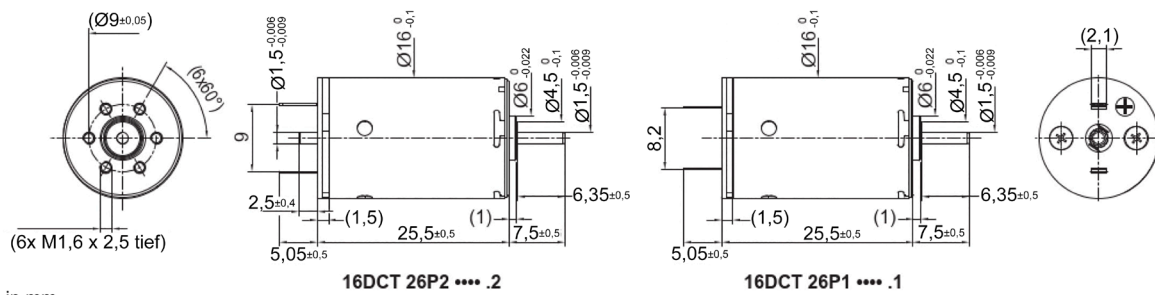


Abbildung 1: Bauweise eines eisenlosen Portescap-Gleichstrommotors

Beispielhaft sei angenommen, dass der Motor bei ca. 7000/min und einem Drehmoment von 4 mNm im Dauerbetrieb laufen und 2,9 W Dauerleistung liefern muss. Für diese Anwendung wäre ein eisenloser Portescap 16DCT Athlonix™-Gleichstrommotor mit Edelmetall-Kommutierung gut geeignet, da er eine Dauerleistung bis 4,2 W erlaubt (siehe Abbildung 2).



Maße in mm

Elektrische Daten	Symbol	16DCT 26P1/P2 *					Einheit
		219P	219E	213E	211E	207P	
1 Nennspannung	V	3	6	9	12	15	Volt
2 Leerlaufdrehzahl	n_0	8081	8600	7970	7968	8599	U/min
3 Leerlaufstrom	I_0	28,6	15,2	9,4	7,1	6,1	mA
4 Anschlusswiderstand	R	0,7	2,3	7,5	13,8	18,6	Ω
5 Ausgangsleistung	P_{2max}	4,2	4,2	4,2	4,1	4,1	W
6 Blockiermoment	mNm	16,12 (2,29)	17,13 (2,43)	12,77 (1,81)	12,33 (1,75)	13,21 (1,88)	mN•m (oz-in)
7 Wirkungsgrad	η_{max}	85	85	83	83	83	%
8 Max, Dauerdrehzahl	$n_{e max}$	10000	10000	10000	10000	10000	U/min
9 Max, Dauerdrehmoment	$M_{e max}$	5,28 (0,75)	5,27 (0,75)	5,36 (0,76)	5,27 (0,75)	5,25 (0,75)	mN•m (oz-in)
10 Max, Dauerstrom	$I_{e max}$	1,53	0,81	0,51	0,38	0,32	A
11 Drehzahlkonstante	k_E	0,37	0,69	1,12	1,49	1,73	mV / U/min
12 Drehmomentkonstante	k_M	3,52	6,62	10,70	14,27	16,53	mN•m / A
13 Motorregulierung	R/k ²	52,47	52,55	65,35	67,66	68,15	10 ⁹ /Nms
14 Reibungsmoment	T_F	0,08 (0,011)	0,08 (0,011)	0,08 (0,011)	0,08 (0,011)	0,08 (0,011)	mN•m (oz-in)
15 Mechanische Anlaufzeitkonstante	τ_m	7,79	7,80	7,56	7,51	6,63	ms
16 Rotorträgheitsmoment	J	1,48	1,48	1,16	1,11	0,97	g-cm ²

Abbildung 2: Auszug aus dem Datenblatt für Portescap 16DCT (ohne Spulen über 15 V)

Da der Motor die nötige Dauerleistung ebringen kann, muss nur noch die Motorspule gewählt werden. Für die Wahl der Motorspule sind die folgenden beiden Punkte entscheidend:

- Bei Gleichstrommotoren hängt das maximale Dauerdrehmoment von der Wärmeableitungsfähigkeit des Motors und damit in erster Linie von seiner Grösse ab. Das maximale Dauerdrehmoment ist bei Gleichstrommotoren von der Spule nahezu unabhängig.
- Um eine effiziente Motorlösung zu erreichen, lässt sich der Motor über die Wahl der Spule an die verfügbare Leistungsversorgung (Strom und Spannung) anpassen.

Dieser Beitrag geht zunächst auf die entscheidenden Formeln ein, die für die Wahl der Spule für einen Gleichstrommotor von Bedeutung sind. Im Anschluss werden verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Leistungsversorgungen vorgestellt, um die Auswirkung der Spulenwahl zu illustrieren und die oben aufgeführten Punkte besser nachvollziehbar zu machen.

THEORETISCHER HINTERGRUND

Drehmoment

Das von einem Gleichstrommotor erzeugte Drehmoment lässt sich in Form der folgenden Beziehung beschreiben: Das erzeugte Abtriebsdrehmoment ist gleich der Drehmomentkonstante des Motors multipliziert mit dem verbrauchten Strom.

$$T = k_M \cdot I$$

T = Motordrehmoment [Nm]
 k_M = Drehmomentkonstante [Nm/A]
 I = Motorstrom [A]

Wird die Drehmomentkonstante auf ihre elementare Abhängigkeit zurückgeführt, lässt sich dieselbe Formel wie folgt darstellen:

$$T_{Motor} = \underbrace{2 * r * l * B * N}_{k_M} * I_{Motor}$$

r = Spulenradius [m]
 B = magnetische Flussdichte [T]
 l = Magnetlänge [m]
 N = Anzahl der Motorspulenwicklungen [-]

Die Parameter „ r “, „ l “ und „ B “ hängen von dem gewählten Motor und seinen Maßen ab. Um andere Spulen für andere Drehmomentkonstanten zu entwerfen, wird die Anzahl der Spulenwicklungen „ N “ variiert.

DREHZAHL

Die Drehgeschwindigkeit von Gleichstrommotoren lässt sich in Form der folgenden Beziehung beschreiben:

$$\omega = \frac{U}{k_M} - \frac{R}{k_M^2} (T_f + T_l)$$

ω = Drehgeschwindigkeit [rad/s]
 R = Anschlusswiderstand [Ohm]
 U = Versorgungsspannung [V]
 T_f = Reibungsmoment [Nm]
 k_M = Drehmomentkonstante [Nm/A]
 T_l = Lastmoment [Nm]

Der Motorregulierungsfaktor R/k_M^2 bleibt für eine gegebene Motorgröße (z. B. 16 mm im Durchmesser und 25 mm in der Länge) bei unterschiedlichen Spulen konstant. Unter Vernachlässigung der Reibung ist die Leerlaufdrehzahl ω_0 des Motors durch die verfügbare Versorgungsspannung und die Drehmomentkonstante der Spule definiert:

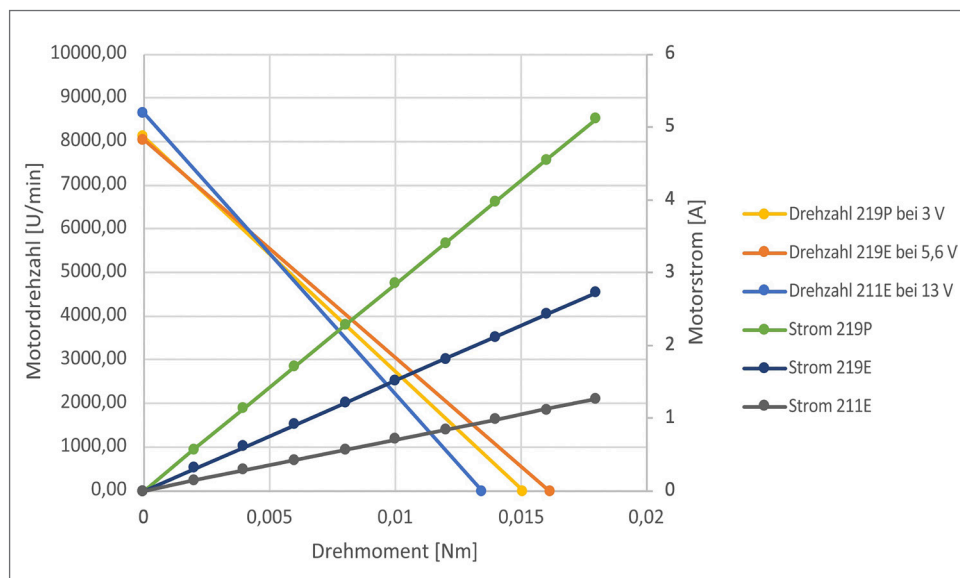


Abbildung 3: Motordrehzahl und -strom in Abhängigkeit des Drehmoments für einen 16DCT mit drei verschiedenen Spulen

$$\omega = \frac{U}{k_M} - \frac{R}{k_M^2} (T_f + T_l)$$

R/k^2 nahezu konstant für einen gegebenen Motor (Anstieg Drehmoment/Drehzahl-Kurve)

$$\omega_0 = \frac{U}{k_M}$$

Leerlaufdrehzahl in Abhängigkeit von Spule (Drehmomentkonstante) und Versorgungsspannung

Das oben aufgeführte Beispiel veranschaulicht, warum für einen bestimmten Motor in aller Regel unterschiedliche Spulen verfügbar sind: Alle aufgeführten Spulen erzielen denselben Betriebspunkt, im Beispiel bei 5500/min und einem Drehmoment von 5 mNm, jedoch mit unterschiedlichen Versorgungsspannungen und Stromanforderungen. Die Spule wird daher so gewählt, dass sie den Motor an die verfügbare Leistungsversorgung anpasst.

WIRKUNGSGRAD UND MECHANISCHE LEISTUNG

Der Wirkungsgrad ist definiert als die mechanische Ausgangsleistung geteilt durch die elektrische Eingangsleistung:

$$\eta = \frac{P_{mech}}{P_{elek}} = \frac{T * \omega}{U * I}$$

P_{mech} = mechanische Leistung [W] T = Motordrehmoment [Nm] ω = Motordrehzahl [rad/s]
 P_{elek} = elektrische Leistung [W] U = Versorgungsspannung [V] I = Motorstrom [A]

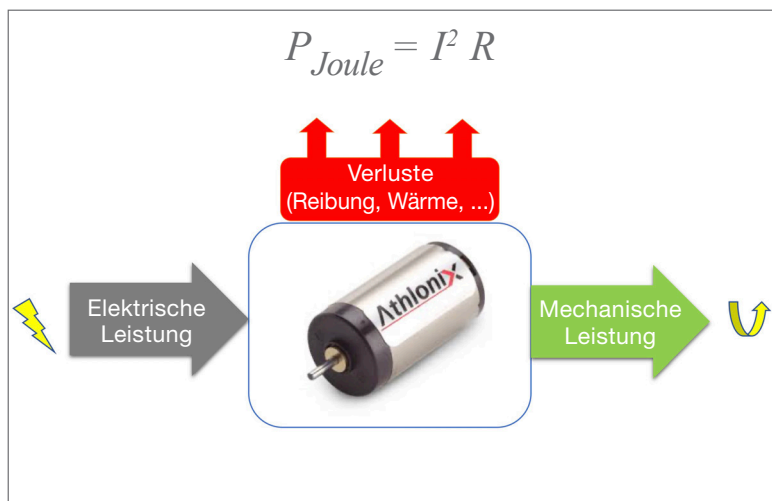


Abbildung 4: Verluste durch Reibung und Wärme bei der Umwandlung elektrischer in mechanische Leistung mit einem Gleichstrommotor

Gleichstrommotoren von Portescap erreichen mit ihrer eisenlosen Bauweise und dem optimierten Magnetkreis üblicherweise einen Wirkungsgrad von 90 %. Ein Teil der elektrischen Leistung geht jedoch unvermeidlich verloren – neben der Reibung insbesondere durch die Wärme, die der durch den Kupferdraht der Spule fließende Strom erzeugt. Diese Wärme- oder Energieverluste sind proportional zum Spulenwiderstand multipliziert mit dem Quadrat des Stroms.

Für einen hohen Wirkungsgrad muss die maximale mechanische Leistung daher bei möglichst geringen Energieverlusten erreicht werden. Wie im untenstehenden Diagramm ersichtlich, wird der Motor zu diesem Zweck bei hoher Drehzahl und niedrigem Drehmoment betrieben.

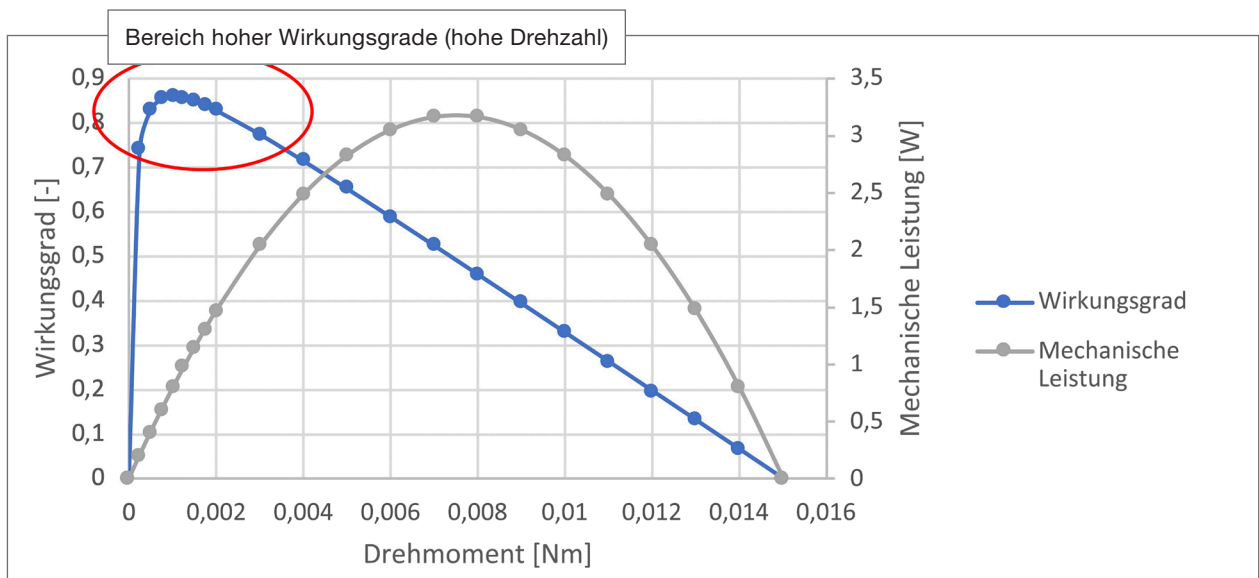


Abbildung 5: Wirkungsgrad und mechanische Leistung eines 16DCT 26P1 219P.1 bei 3 V

Obwohl Gleichstrommotoren ihre maximale mechanische Leistung bei ihrem halben Blockiermoment erreichen, ist ihr Wirkungsgrad bei niedrigerem Drehmoment aufgrund des kleineren Motorstroms und den dadurch bedingten niedrigeren Energieverlusten wesentlich höher. Um einen Motor bei der höchstmöglichen Drehzahl und damit dem größten Wirkungsgrad zu betreiben, wird eine passende Spule gewählt.

DIE WAHL DER PASSENDEN SPULE ANHAND DER VERFÜGBAREN KATALOGSPULEN

Eine kundenspezifische Spule zu entwickeln, um eine passende Motorlösung zu finden ist nicht immer eine Option. Die Entwicklung einer neuen Spule ist für den Kunden ebenso wie für den Motorhersteller zeit- und kostenaufwendig. Daher geht es im ersten Abschnitt darum, eine passende Spule unter Beschränkung auf das Katalogsortiment zu finden.

Szenario 1 – Spannungsquelle als Leistungsversorgung

Für das Beispiel aus der Einführung soll nun auch die verfügbare Leistungsversorgung berücksichtigt werden:

- Betriebspunkt: Dauerbetrieb bei ca. 7000/min und Drehmoment von 4 mNm, entspricht 2,9 W
- Gewählter Motor: eisenloser Gleichstrommotor 16DCT Athlonix™ von Portescap, max. Dauerausgangsleistung = 4,2 W
- Verfügbare Leistungsversorgung: Spannungsquelle mit 10,8 V Festspannung

Spule 213E und Spule 211E dürften passen, da sie für den Betrieb bei ungefähr 8000/min mit 9 V bzw. 12 V ausgelegt sind. Motordrehzahl und -strom am Betriebspunkt mit 10,8 V Versorgungsspannung lassen sich anhand der Formel aus der Einführung und den Spulenparametern laut Datenblatt berechnen:

$$\omega = \frac{U}{k_M} - \frac{R}{k_M^2} (T_f + T_l)$$

$$T = k_M * I$$

	SPULE 213E	SPULE 211E
Versorgungsspannung	10,8 V	
Lastmoment	4 mNm	
Reibungsmoment	0,08 mNm	
Anschlusswiderstand	7,5 Ω	13,8 Ω
Drehmomentkonstante	10,70 mNm/A	14,27 mNm/A
Motordrehzahl unter Last	7086/min	4587/min
Motorstrom	0,38 A	0,29 A

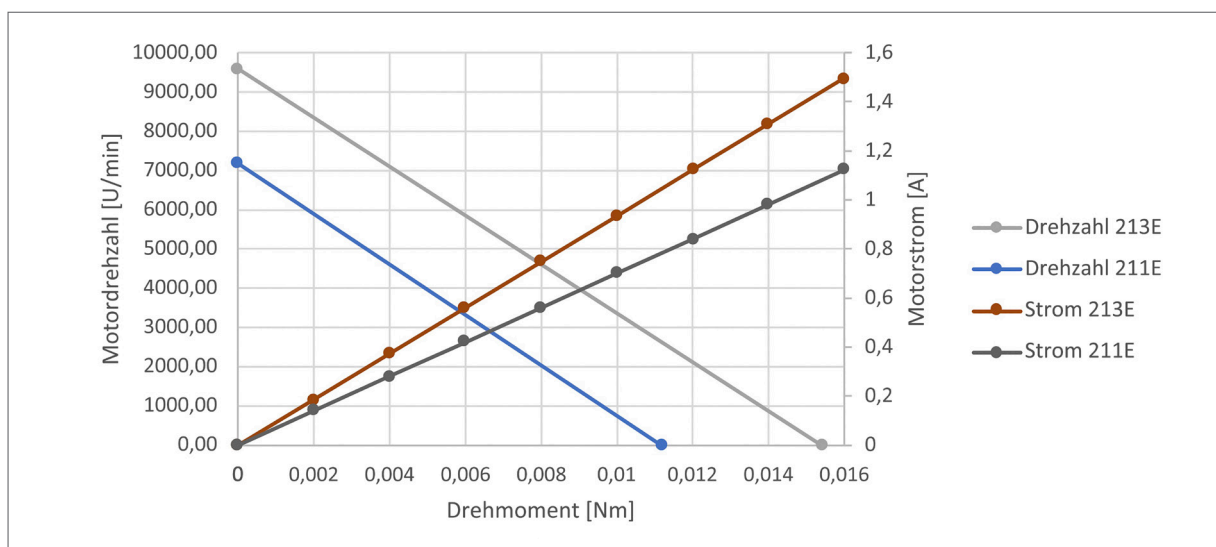


Abbildung 6: Vergleich von Drehzahl und Strom der Spulen 213E und 211E bei 10,8 V

Es ergibt sich, dass nur Spule 213E mit der verfügbaren Versorgungsspannung und dem verfügbaren Lastmoment eine Drehzahl über 7000/min erreicht. Mit einer Spannungsquelle gibt es nur eine weitgehend passende Katalogspule. Um den Motor mit der bestmöglichen Spule zu optimieren, muss eine Stromquelle verwendet werden.

Szenario 2 – Stromquelle als Leistungsversorgung

In diesem zweiten Szenario ist statt einer Spannungsquelle eine Stromquelle verfügbar, um denselben Betriebspunkt zu erreichen:

- Betriebspunkt: Dauerbetrieb bei über 7000/min und Drehmoment von 4 mNm, entspricht 2,9 W
- Passender Motor: eisenloser Gleichstrommotor 16DCT Athlonix™ von Portescap, max. Dauerausgangsleistung = 4,2 W
- Verfügbare Leistungsversorgung: Stromquelle, verfügbarer maximaler Dauerstrom = 1 A, 1–15 V

Die verfügbare Stromquelle kann in einem Spannungsbereich von 1 bis 15 V einen Dauerstrom bis 1 A liefern. Da die Versorgungsspannung flexibel ist, lässt sich der Betriebspunkt mit einer wesentlich größeren Auswahl an Katalogspulen erreichen. Die Spannung, die zur Erreichung des Betriebspunkts von 7000/min und 4 mNm nötig ist, lässt sich anhand der Formel aus dem Theorieabschnitt dieses Whitepapers berechnen. Wie beim ersten Szenario wird der Strom, der zur Erreichung des Betriebspunkts nötig ist, in einem zweiten Schritt berechnet.

$$\omega = \frac{U}{k_M} - \frac{R}{k_M^2} (T_f + T_l)$$

Auflösung für U:

$$U = k_M \left(\omega + \frac{R}{k_M^2} (T_f + T_l) \right) = k_M \omega + R \left(I_0 + \frac{T_l}{k_M} \right)$$

	SPULE 219P	SPULE 219E	SPULE 213E	SPULE 211E	207P
Lastmoment	4 mNm				
Reibungsmoment	0,08 mNm				
Anschlusswiderstand	0,7 Ω	2,3 Ω	7,5 Ω	13,8 Ω	18,6 Ω
Drehmomentkonstante	3,52 mNm/A	6,62 mNm/A	10,70 mNm/A	14,27 mNm/A	16,53 mNm/A
Leerlaufstrom	28,6 mA	15,2 mA	9,4 mA	7,1 mA	6,1 mA
Versorgungsspannung	3,4 V	6,3 V	10,7 V	14,4 V	16,7 V
Motorstrom	1,16 A	0,62 A	0,38 A	0,29 A	0,25 A
Wirkungsgrad	0,75	0,76	0,72	0,71	0,71

Die Spulen 219P und 207P sind beide keine Option, da sie eine Spannung bzw. einen Strom außerhalb des verfügbaren Bereichs voraussetzen. Spule 219E hat unter diesen drei Spulen den höchsten Wirkungsgrad, falls dieser zum entscheidenden Kriterium gemacht wird. In den meisten Fällen ist jedoch die Spule mit dem kleinsten Stromverbrauch die beste Wahl. Ein kleinerer Stromverbrauch verlängert die Lebensdauer des Kommutierungssystems und erhöht bei batteriebetriebenen Anwendungen die Zahl der Zyklen pro Batterieladung.

In diesem Szenario mit einer Stromquelle als Leistungsversorgung verbraucht Spule 211E fast nur halb so viel Strom wie Spule 219E und ist damit die beste Wahl unter den verfügbaren Katalogspulen. Gegenüber Spule 213E, die bei Szenario 1 mit Spannungsquelle als Leistungsversorgung hervorging, lässt sich der Stromverbrauch des Motors bei identischem Betriebspunkt um fast 25 % senken.

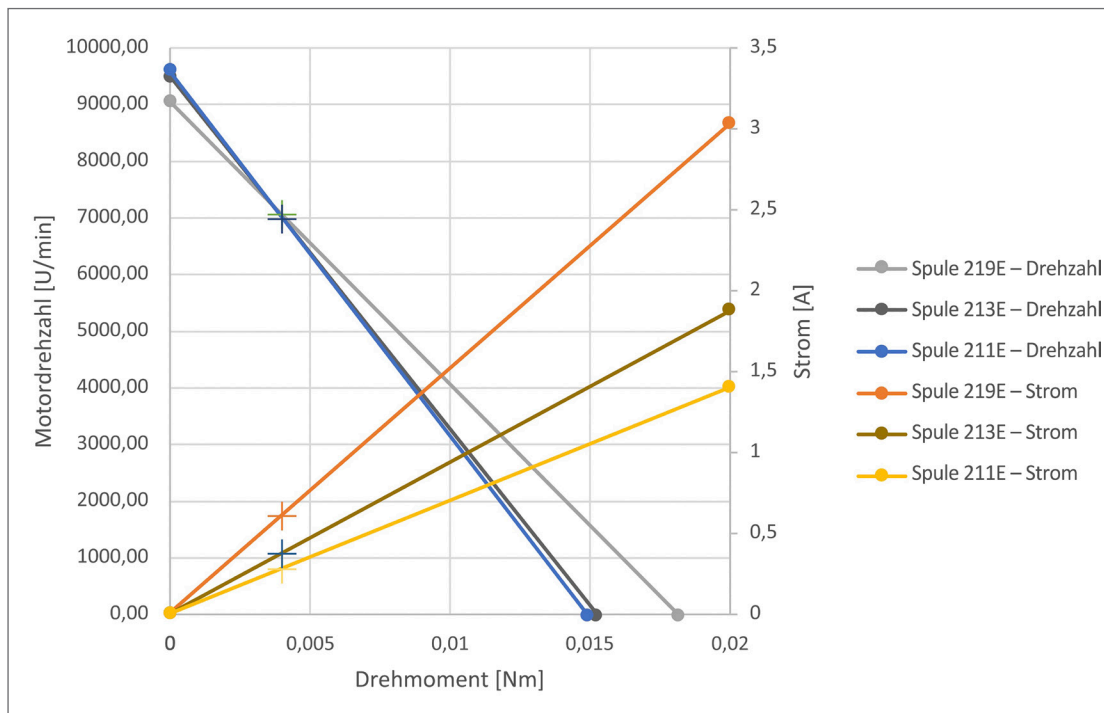


Abbildung 7: Vergleich von Drehzahl und Strom der Spulen 219E, 213E und 211E bei Verwendung einer Stromquelle

ANPASSUNG EINER SPULE AN DIE VERFÜGBARE LEISTUNGSVERSORGUNG BEI NICHTVERFÜGBARKEIT IM KATALOG

Da beim zweiten Szenario eine Stromquelle als Leistungsversorgung verfügbar ist, lässt sich der Betriebspunkt in diesem Fall mit einer Katalogspule erreichen. Der gewünschte Betriebspunkt lässt sich jedoch nicht immer erreichen, wenn ausschließlich Katalogspulen betrachtet werden. In diesem Fall sollte wie im nachfolgenden Beispiel eine kundenspezifische Spule in Erwägung gezogen werden, die auf die Leistungsversorgung zugeschnitten ist.

- Betriebspunkt: Dauerbetrieb bei über 6000/min und Drehmoment von 4 mNm, entspricht 2,5 W
- Passender Motor: eisenloser Gleichstrommotor 16DCT Athlonix™ von Portescap, max. Dauerausgangsleistung = 4,2 W
- Verfügbare Leistungsversorgung: 7 V, Strombegrenzung = max. 0,5 A

Der Katalog enthält zwei Spulen, die für rund 8000/min im Leerlauf und 6 V bzw. 9 V ausgelegt sind. Beide Spulen sind bei 7 V jedoch entweder zu langsam oder zu schnell. Daneben ist der Stromverbrauch von Spule 219E problematisch:

	Spule 219E	Spule 213E
Anschlusswiderstand	2,3 Ω	7,5 Ω
Drehmomentkonstante	6,62 mNm/A	10,70 mNm/A
Versorgungsspannung	7 V	
Lastmoment	4 mNm	
Reibungsmoment	0,08 mNm	
Motordrehzahl bei Lastmoment	8052/min	3694/min
Motorstrom	0,61 A	0,38 A

Der gewünschte Betriebspunkt lässt sich nur mit einer Spule außerhalb des Katalogsortiments erreichen. Dazu wird eine kundenspezifische Spule mit einer Wicklungszahl entworfen, die zwischen denen der Spulen 219E und 213E liegt. Ein kompetenter Motorhersteller ist in der Lage, in Abhängigkeit der Projektgröße eine neue Spule wie die oben beschriebene zu entwerfen und anzubieten.

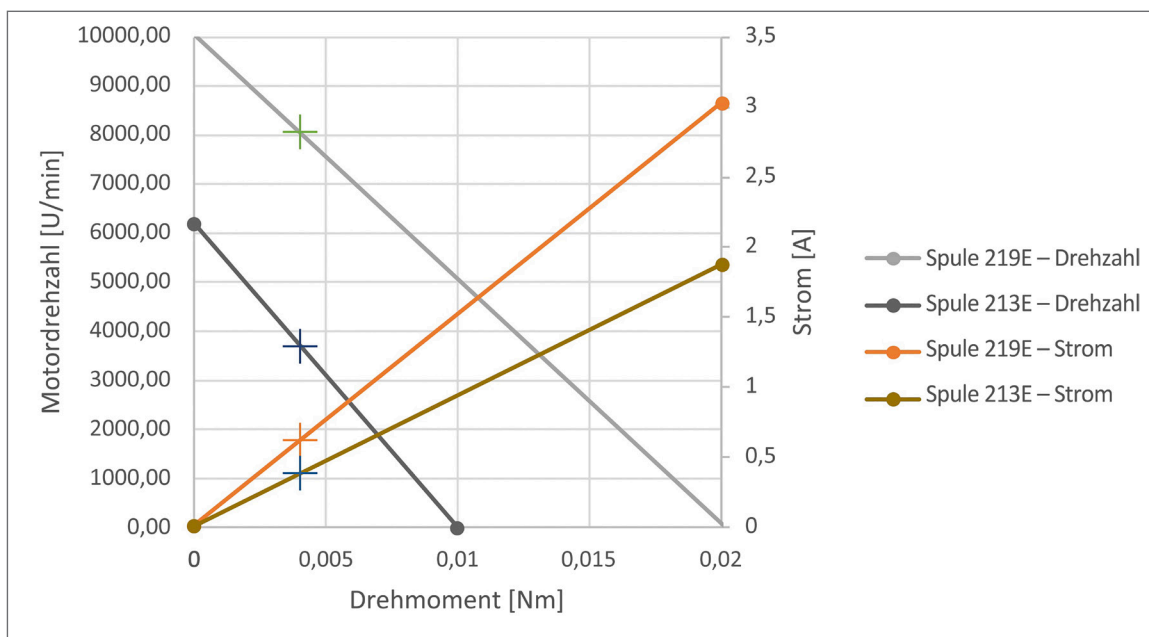


Abbildung 8: Vergleich von Drehzahl und Strom der Spulen 219E und 213E bei 7 V

FAZIT

Die folgenden Punkte sind bei der Wahl eines Gleichstrommotors für eine Anwendung entscheidend, die einen hohen Wirkungsgrad verlangt:

- Die Motorgröße wird in Abhängigkeit der nötigen mechanischen Leistung gewählt. Nur ein ausreichend großer Motor ist in der Lage, das nötige Drehmoment zu erzeugen und die durch Verluste im Motor erzeugte Wärme abzuleiten.
- Bei der Wahl der Motorspule muss die verfügbare Leistungsversorgung berücksichtigt werden. Motoranbieter führen im Allgemeinen eine Auswahl an Spulen, die bei unterschiedlichen Spannungs- und Stromanforderungen denselben Betriebspunkt erreichen.
- Für eine Motorlösung mit hohem Wirkungsgrad muss die nötige mechanische Leistung bei hoher Drehzahl und niedrigem Drehmoment erzeugt werden. Das ist mit der Wahl einer Spule möglich, die die verfügbare Leistungsversorgung optimal nutzt.

Kompetente Motorlösungsanbieter unterstützen Kunden bei der Bestimmung der passenden Motorlösung für die konkrete Anwendung unter Berücksichtigung der beiden oben aufgeführten Überlegungen. **P**

WEITERE INFORMATIONEN:

Rue Jardinière 157
 CH 2301 La Chaux-de-Fonds, Schweiz
 Telefon: +41 32 925 62 40
 Fax: +41 32 925 62 88
 sales.europe@portescap.com
 www.portescap.com

Valentin Raschke
 Anwendungstechniker
 Valentin.Raschke@portescap.com

Portescap

WENDEN SIE SICH NOCH HEUTE AN EINEN INGENIEUR:
<https://www.portescap.com/de-de/kontaktieren-sie-uns>