

maxon motor ag Brünigstrasse 220 CH – 6072 Sachseln www.maxonmotor.com	PWM Leistungsendstufen: Stromrippe & externe Motordrosseln	Version: 1.0 (Dt.) Autor: WJ Datum: 2018-05-25
---	---	--

Steuerungen und Verstärker mit PWM Leistungsendstufen: Stromrippe und externe Motordrosseln?

Moderne Motorsteuerungen und Verstärker basieren auf einem PWM Leistungsausgang, bei welchem die notwendige Motorspannung durch eine permanente Variation der PWM Pulsbreite erzeugt wird. Die PWM gesteuerte Motorspannung verursacht einen Stromrippe bedingt durch den Stromanstieg und –rückgang in der Motorwicklung in jedem PWM Zyklus. Der Stromrippe kann zu einer zusätzlichen Erwärmung der Motorwicklung (selbst im Stillstand und ohne Last) führen. Der maximale Peak-to-Peak Wert (I_{PP}) des Stromrippels hängt dabei von verschiedenen Faktoren ab. Der Zusammenhang wird auch anhand der Formeln auf den beiden letzten Seiten dieses Dokuments sichtbar.

Stromrippe: Einflussfaktoren

- Die PWM-Frequenz f_{PWM} der Leistungsendstufe:
 - Je höher die PWM-Frequenz, desto kleiner ist der Stromrippe.
- Das PWM-Schema der Leistungsendstufe:
 - Bei 4-Q Motorsteuerungen mit einem 2-Level PWM ist der Stromrippe grösser als bei 1-Q Motorsteuerungen oder 4-Q Motorsteuerungen mit 3-Level PWM.
- Die Versorgungsspannung V_{CC} :
 - Je kleiner die Versorgungsspannung, desto kleiner ist der Stromrippe.
- Die wirksame Gesamtinduktivität L_{tot} des Motors und eventuell vorhandener Motordrosseln:
 - Je höher die Induktivität L_{tot} , desto kleiner ist der Stromrippe.
- Die Last im Verhältnis zum Nennstrom I_{Cont} des Motors (siehe Katalogdatenblatt):
 - Je kleiner die Last, desto mehr Stromrippe ist zulässig ohne den Motor zu überhitzen.

Motordrosseln?

Zusätzliche Drosseln (in Ergänzung zu der Induktivität der Motorwicklung) können den Stromrippe stark reduzieren. Solche Drosseln können bereits in die Leistungsendstufe der Steuerung integriert sein (wie bei maxon häufig üblich) oder können extern in Serie zu der Motorleitung verdrahtet werden.

Durch den Einsatz von Motordrosseln ergeben sich verschiedene Vorteile:

- Motordrosseln schützen den Motor vor Überhitzung durch übergrossen Stromrippe:
 - Durch zusätzliche Motordrosseln wird der durch die PWM verursachte Stromrippe verkleinert und damit die zusätzliche Wärmeentwicklung im Motor reduziert.
- Motordrosseln können in Spezialfällen notwendig sein um die Stabilität des Stromreglers zu garantieren:
 - Bei einzelnen Steuerung wird teilweise eine "minimal notwendige Anschlussinduktivität" spezifiziert.
- Motordrosseln verhindern das ungewollte Ansprechen der Spitzenwert-Strombegrenzung, z.B. bei „DEC Module 24/2“ und „DEC Module 50/5“ mit niederinduktiven Motoren an hoher Versorgungsspannung.
- Externe Motordrosseln sind beim Betrieb von bürstenbehafteten DC Motoren mit CLL-Scheiben an Verstärkern ohne eingebaute Drosseln dringend empfohlen.

maxon motor control

maxon motor ag Brünigstrasse 220 CH – 6072 Sachseln www.maxonmotor.com	PWM Leistungsendstufen: Stromrippl & externe Motordrosseln	Version: 1.0 (Dt.) Autor: WJ Datum: 2018-05-25
---	---	--

maxon Steuerungen und Verstärker:

Die meisten maxon Steuerungen besitzen direkt in der Endstufe integrierte Motordrosseln und hohe PWM-Frequenzen, durch welche häufig kein Bedarf für externe Drosseln mehr besteht. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die meisten maxon Steuerungen und Verstärker. Die Informationen zu der PWM-Frequenz und integrierten Motordrosseln finden sich auch in dem Datenblatt im Katalog und im Kapitel „Specifications“ der produktspezifischen „Hardware Reference“.

Aktuelle maxon Steuerungen und Verstärker:

maxon Steuerungen bzw. Verstärker	PWM Frequenz f_{PWM}	PWM Schema	Integrierte Motordrosseln L_{int} (Phase-Phase)	Minimale Anschluss-induktivität
MAXPOS Produktlinie				
MAXPOS 50/5	100 kHz	3-Level (4-Q)	20 μH (=10 μH + 10 μH)	-
EPOS4 Produktlinie				
EPOS4 Module 24/1.5	50 kHz	3-Level (4-Q)	-	-
EPOS4 Compact 24/1.5 CAN	50 kHz	3-Level (4-Q)	188 μH (=94 μH + 94 μH)	-
EPOS4 50/5	50 kHz	3-Level (4-Q)	30 μH (=15 μH + 15 μH)	-
EPOS4 70/15	50 kHz	3-Level (4-Q)	30 μH (=15 μH + 15 μH)	-
EPOS4 Module 50/5	50 kHz	3-Level (4-Q)	-	-
EPOS4 Compact 50/5 CAN	50 kHz	3-Level (4-Q)	18.8 μH (=9.4 μH + 9.4 μH)	-
EPOS4 Module 50/8	50 kHz	3-Level (4-Q)	-	-
EPOS4 Compact 50/8 CAN and EtherCAT	50 kHz	3-Level (4-Q)	4.4 μH (=2.2 μH + 2.2 μH)	-
EPOS4 Module 50/15	50 kHz	3-Level (4-Q)	-	-
EPOS4 Compact 50/15 CAN and EtherCAT	50 kHz	3-Level (4-Q)	4.4 μH (=2.2 μH + 2.2 μH)	-
EPOS2 Produktlinie				
EPOS2 24/2	100 kHz	3-Level (4-Q)	94 μH (=47 μH + 47 μH)	-
EPOS2 Module 36/2	50 kHz	3-Level (4-Q)	20 μH (=10 μH + 10 μH)	-
EPOS2 24/5 EPOS2 P 24/5	50 kHz	3-Level (4-Q)	30 μH (=15 μH + 15 μH)	-
EPOS2 50/5	50 kHz	3-Level (4-Q)	44 μH (=22 μH + 22 μH)	-
EPOS2 70/10	50 kHz	3-Level (4-Q)	50 μH (=25 μH + 25 μH)	-

maxon motor control

maxon motor ag Brünigstrasse 220 CH – 6072 Sachseln www.maxonmotor.com	PWM Leistungsendstufen: Stromrippl & externe Motordrosseln	Version: 1.0 (Dt.) Autor: WJ Datum: 2018-05-25
---	---	--

maxon Steuerungen bzw. Verstärker	PWM Frequenz f_{PWM}	PWM Schema	Integrierte Motordrosseln L_{int} (Phase-Phase)	Minimale Anschluss-induktivität
ESCON Produktlinie				
ESCON Module 24/2	53.6 kHz	3-Level (4-Q)	-	-
ESCON 36/2 DC	53.6 kHz	3-Level (4-Q)	300 μH	-
ESCON 36/3 EC	53.6 kHz	3-Level (4-Q)	94 μH (=47 μH + 47 μH)	-
ESCON Module 50/4 EC-S	53.6 kHz	2-Level (4-Q)	-	-
ESCON 50/5	53.6 kHz	3-Level (4-Q)	60 μH (=30 μH + 30 μH)	-
ESCON Module 50/5	53.6 kHz	3-Level (4-Q)	-	-
ESCON Module 50/8 (HE)	53.6 kHz	3-Level (4-Q)	-	-
ESCON 70/10	53.6 kHz	3-Level (4-Q)	30 μH (=15 μH + 15 μH)	-
DEC Module				
DEC Module 24/2	46.8 kHz	1Q	-	-
DEC Module 50/5	46.8 kHz	1Q	-	-

NRND (= nicht empfohlen für Neuprojekte) und abgekündigte Produkte

maxon Steuerungen bzw. Verstärker	PWM Frequenz f_{PWM}	PWM Schema	Integrierte Motordrosseln L_{int} (Phase-Phase)	Minimale Anschluss-induktivität
EPOS3 Produktlinie				
EPOS3 70/10	50 kHz	3-Level (4-Q)	44 μH (=22 μH + 22 μH)	-
EPOS Produktlinie				
EPOS 24/1 #280937, #302267, #302287	50 kHz	3-Level (4-Q)	300 μH (=150 μH + 150 μH)	-
EPOS 24/1 #317270	50 kHz	3-Level (4-Q)	660 μH (=330 μH + 330 μH)	-
EPOS 24/5 EPOS P 24/5	50 kHz	3-Level (4-Q)	30 μH (=15 μH + 15 μH)	-
EPOS 70/10	50 kHz	3-Level (4-Q)	50 μH (=25 μH + 25 μH)	-
DEC Produktlinie				
DEC 24/1	39 kHz	1Q	300 μH (=150 μH + 150 μH)	-
DEC 24/3	39 kHz	1Q	-	-
DEC 50/5	39 kHz	1Q	-	-
DEC 70/10	50 kHz	2-Level (4-Q)	50 μH (=25 μH + 25 μH)	-

maxon motor control

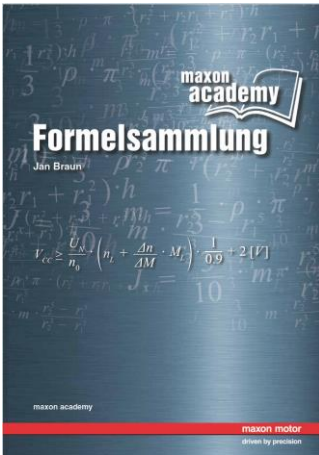
maxon motor ag Brünigstrasse 220 CH – 6072 Sachseln www.maxonmotor.com	PWM Leistungsendstufen: Stromripple & externe Motordrosseln	Version: 1.0 (Dt.) Autor: WJ Datum: 2018-05-25
---	--	--

maxon Steuerungen bzw. Verstärker	PWM Frequenz f_{PWM}	PWM Schema	Integrierte Motordrosseln L_{int} (Phase-Phase)	Minimale Anschluss-induktivität
DECS 50/5	50 kHz	1Q	-	-
DES 50/5	50 kHz	3-Level (4-Q)	320 μH (=160 μH + 160 μH)	-
DES 70/10	50 kHz	3-Level (4-Q)	-	> 400 μH
ADS Produktlinie				
ADS 50/5 ADS_E 50/5	50 kHz	2-Level (4-Q)	150 μH	-
ADS 50/10 ADS_E 50/10	50 kHz	2-Level (4-Q)	75 μH	-
MIP Produktlinie				
MIP 10	60 kHz	3-Level (4-Q)	1000 μH	-
MIP 50	60 kHz	2-Level (4-Q)	320 μH (=160 μH + 160 μH)	> 60 μH @24VDC > 90 μH @ 48VDC
MIP 100	60 kHz	3-Level (4-Q)	20 μH (=10 μH + 10 μH)	> 35 μH @24VDC > 90 μH @48VDC

Formeln,

Um den Stromripple zu berechnen und die Notwendigkeit von zusätzlichen Motordrosseln zu überprüfen, gibt es ein paar einfache Formeln und "Daumenregeln".

Die Informationen auf den folgenden Seiten sind der maxon "Formelsammlung" (auf Seite 46) entnommen.



Die maxon "Formelsammlung" ist die Basis für die Antriebsauslegung ausgehend von Anwendungsanforderungen.

Die "Formelsammlung" bietet einen umfassenden Überblick und eine Vielzahl an Formeln für die Bewertung von mechanischen, elektrischen und thermischen Aspekten der Antriebs- und Steuerungsauslegung.

Die maxon "Formelsammlung" ist kostenlos!

Bitte fragen Sie bei Ihrem lokalen maxon Vertriebspartner für die gedruckte Version der Formelsammlung an oder laden Sie die PDF Version von der maxon Website.

Ihr maxon Vertriebspartner berät Sie auch gerne bei der Motor- und Steuerungsauswahl basierend auf den Anforderungen Ihrer Anwendung.

Berechnung des Stromrippel

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.

maxon motor control

maxon motor ag Brünigstrasse 220 CH – 6072 Sachseln www.maxonmotor.com	PWM Leistungsendstufen: Stromripple & externe Motordrosseln	Version: 1.0 (Dt.) Autor: WJ Datum: 2018-05-25
---	--	--

Daumenregeln

- maxon's 4-Q Steuerungen basieren auf einem 3-Level PWM Schema. Es kann deshalb die Formel $I_{PP} = V_{CC} / (4 * L_{tot} * f_{PWM})$ zur Abschätzung des Stromrippels zugrunde gelegt werden, welche für 1-Q und 4Q (3-Level PWM) Steuerungen gilt.
- Die effektive Induktivität der Motorwicklungen beträgt bei PWM Frequenzen von 50 – 100 kHz lediglich 30-80% des spezifizierten Werts im Motor-Datenblatt (bei welchem die Angabe auf einer Frequenz von 1 kHz basiert). Zu Berechnung der effektiven Induktivität sollte der spezifizierte Wert deshalb mit 0.3 multipliziert werden.
- In die Gesamtinduktivität L_{tot} muss ebenfalls die Induktivität der internen Drosseln der Steuerung einberechnet werden. Es sind jeweils nur zwei der internen Drosseln (Phase – Phase) gleichzeitig bestromt.
- Falls der Stromripple I_{PP} kleiner ist als der 1.5-fache Motor-Nennstrom (gemäss Motordatenblatt) und die Motorlast ist tiefer als 90% des spezifizierten Motor-Nennmoments sind keine externen Motordrosseln erforderlich.

Beispiel

- Motor: ECi-40, #449464
 - Nennstrom: 2.8 A
 - Anschlussinduktivität: 0.39 mH
- ESCON 50/5, #409510
 - PWM Frequenz: 53.6 kHz
 - Eingebaute Motordrossel: 3 x 30 µH
- Versorgungsspannung:
 - V_{CC} : 24 V
- Gesamtinduktivität:
 - $L_{tot} = (0.3 * 0.39 \text{ mH}) + (2 * 0.03 \text{ mH})$
 $L_{tot} = 0.177 \text{ mH}$
- Stromripple:
 - $I_{PP} = V_{CC} / (4 * L_{tot} * f_{PWM})$
 - $I_{PP} = 24 \text{ V} / (4 * 0.177 \text{ mH} * 53.6 \text{ kHz})$
 $I_{PP} = 0.63 \text{ A}$
- Schlussfolgerung:
 - Der Stromripple (= 0.63A) ist deutlich kleiner als der spezifizierte Nennstrom des Motors (= 2.8A), d.h. es sind keine zusätzlichen Massnahmen (w.e externe Motordrosseln) für den Betrieb erforderlich.

maxon motor control

maxon motor ag
Brünigstrasse 220
CH – 6072 Sachseln
www.maxonmotor.com

PWM Leistungsendstufen: Stromripple & externe Motordrosseln

Version: 1.0 (Dt.)
Autor: WJ
Datum: 2018-05-25

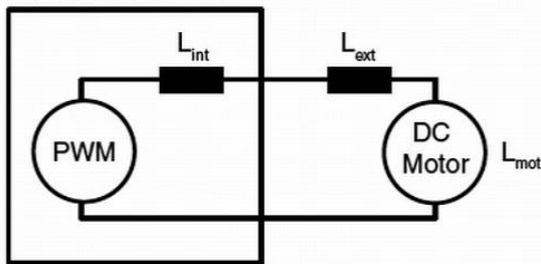
Abschätzung der Notwendigkeit zusätzlicher Motordrosseln

Berechnung zusätzliche externe Motordrossel

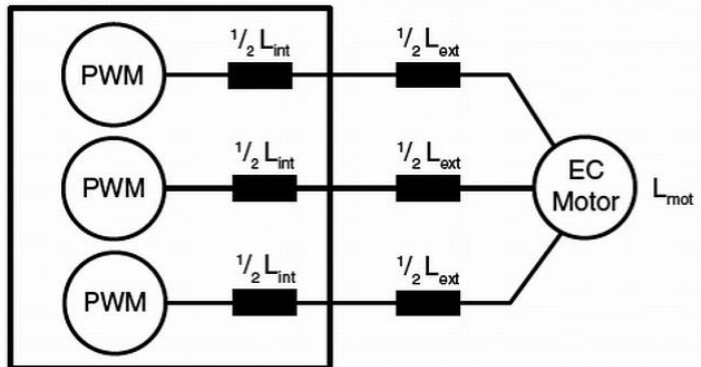
PWM-Schema	1-Q und 3-Level (4-Q)	2-Level (4-Q)
Faustformel	$L_{ext} = \frac{V_{CC}}{6 \cdot I_N \cdot f_{PWM}} - L_{int} - 0.3 \cdot L_{mot}$	$L_{ext} = \frac{V_{CC}}{3 \cdot I_N \cdot f_{PWM}} - L_{int} - 0.3 \cdot L_{mot}$

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

DC Verstärker



EC Verstärker



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}	Stromripple Peak-to-Peak	A
			$\Delta I_{PP,max}$	Maximaler Stromripple Peak-to-Peak	A

Anmerkung:

maxon Steuerungen nutzen hohe PWM Frequenzen (50 – 100 kHz), ein 3-Level PWM Schema und besitzen häufig integrierte Motordrosseln passend zu dem typischen Einsatzbereich an Motoren. In der Summe können hierdurch bei einem möglichen Verzicht auf externe Motordrosseln die Verdrahtungs- und Systemkosten reduziert werden.

Bei dem Einsatz von maxon Steuerungen werden in den meisten Fällen keine zusätzlichen Drosseln benötigt. Nichtsdestotrotz sollten die obigen Formeln zur Überprüfung bei einer zu starken Motorerwärmung oder bei dem Einsatz von Produktvarianten in „Module“ Ausführung (ohne integrierte Drosseln) herangezogen werden.