

# ANWENDUNGSHINWEIS

Entwerfen eines Inverswandlers mit dem  
MagI<sup>3</sup>C Power Modul WPMDH1302401/171032401  
(6 - 42 V<sub>IN</sub> / 3 A / 5 - 24 V<sub>OUT</sub>)



ANS007B VON CHRISTOPHER RICHARDSON

## 1. Einleitung

MagI<sup>3</sup>C-Stromversorgungsmodule von Würth Elektronik eiSos werden normalerweise als synchrone Abwärts-wandler verwendet, die eine höhere Eingangsspannung mit hoher Effizienz und nur wenigen Störungen in eine niedrigere Ausgangsspannung umwandeln können. Der Inverswandler ist eine weitere Topologie, die mit Stromversorgungsmodulen der MagI<sup>3</sup>C-Familie realisiert werden kann. Hierzu sind nur wenige Anpassungen erforderlich. Diese Topologie wandelt eine positive Eingangsspannung V<sub>IN</sub> in eine negative Ausgangsspannung -V<sub>OUT</sub> um. Dabei kann der Absolutwert von -V<sub>OUT</sub> größer oder kleiner sein als der von V<sub>IN</sub>.

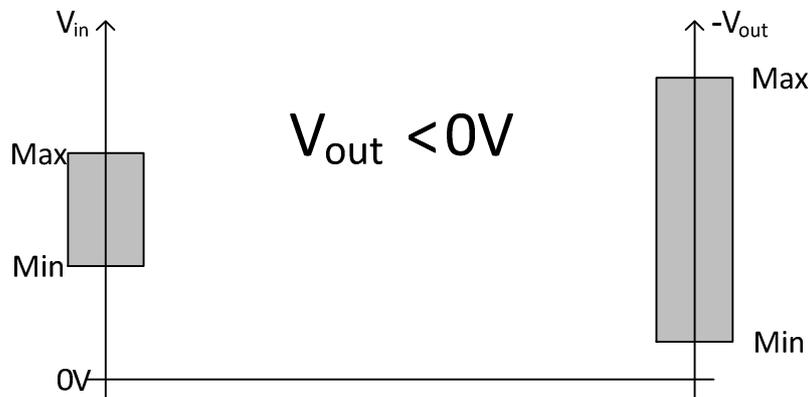


Abbildung 1: Der Eingangsspannungsbereich und der Absolutwert des Ausgangsspannungsbereichs können sich bei Verwendung eines Inverswandlers überlappen.

In diesem Anwendungshinweis wird erläutert, wie die externen Bauteile für die Inverswandlertopologie ausgewählt werden und wie die Demobaugruppen für die Abwärtswandlertopologie auch für die Inverswandlung verwendet werden können. Abbildung 2 zeigt, wie eine Inverswandlertopologie aus einem synchronen Abwärts-wandler hergeleitet werden kann, indem die Masse- und Ausgangsanschlüsse neu zugeordnet werden sowie die Verbindung des Eingangskondensators modifiziert wird.

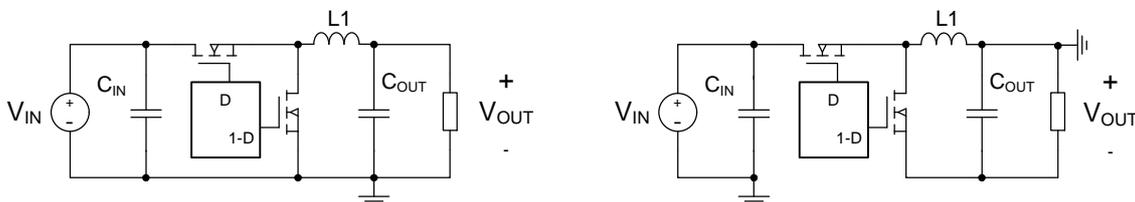


Abbildung 2: Synchroner Abwärts-wandler (links) und synchroner Inverswandler (rechts)

# ANWENDUNGSHINWEIS

Entwerfen eines Inverswandlers mit dem  
MagI<sup>3</sup>C Power Modul WPMDH1302401/171032401  
(6 - 42 V<sub>IN</sub> / 3 A / 5 - 24 V<sub>OUT</sub>)



Abbildung 3 stellt in einem einfachen Schaltbild links ein MagI<sup>3</sup>C-Stromversorgungsmodul aus der [VDRM](#)-Baureihe dar, das als synchroner Abwärtswandler fungiert; auf der rechten Seite sind die Änderungen dargestellt, die für die Implementierung eines Inverswandlers erforderlich sind. Für die Umsetzung der in den Abbildungen 2 und 3 gezeigten Schaltungen ist C<sub>IN1</sub> nicht erforderlich. Der Kondensator ist im Blockschaltbild nicht gezeigt; seinen Nutzen werden wir in Abschnitt 4.7.1 erläutern.

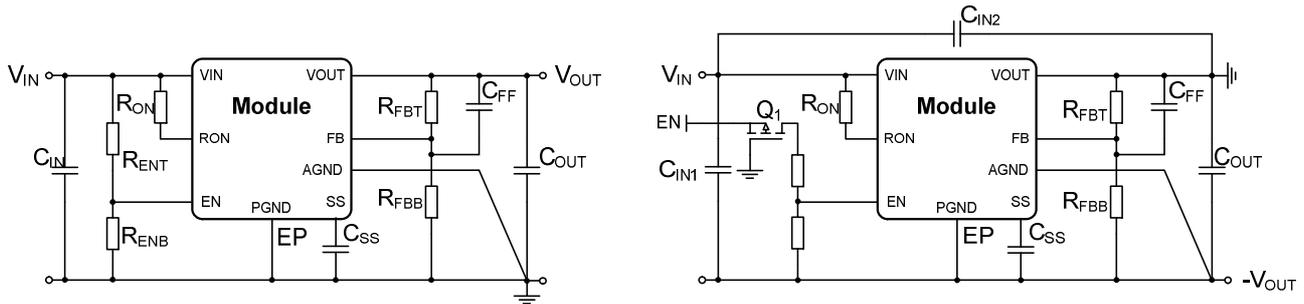


Abbildung 3: Synchroner Abwärtswandler (links) und Inverswandler (rechts) unter Verwendung von [VDRM-Modulen](#)

## 2. Spannungen und Ströme im synchronen Inverswandler

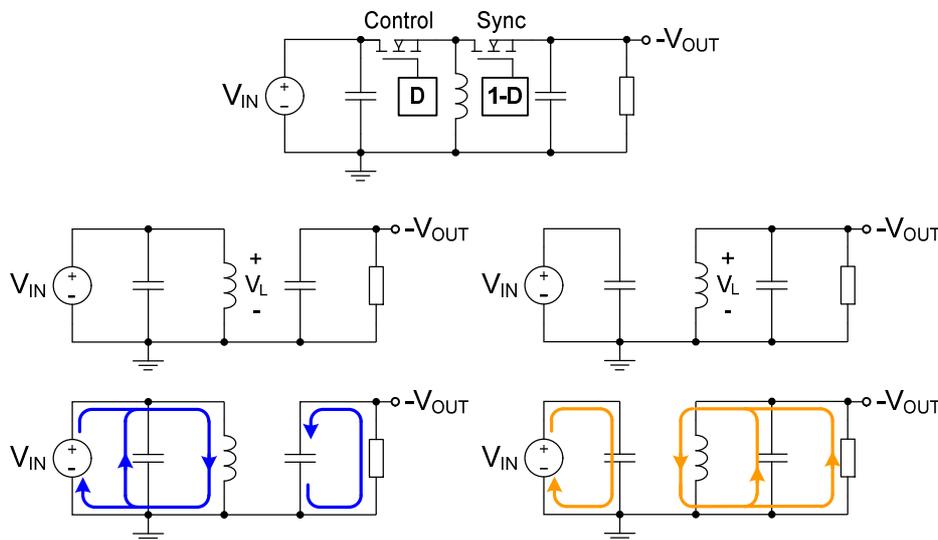


Abbildung 4: Inverswandler mit aktivem Steuerungs-MOSFET (links) und aktivem Synchronisierungs-MOSFET (rechts). Der Tastgrad  $D$  ist unten in Gleichung 2 definiert.

Abbildung 4 zeigt die beiden Schaltzustände des synchronen Inverswandlers. Wenn der Steuer-MOSFET über die Spule mit der Spannung verbunden ist, ist  $V_L$  gleich der Eingangsspannung  $V_{IN}$ . Während dieses Zeitraums nimmt der Strom in der Spule zu. Zudem erhält der Ausgangskondensator die Ausgangsspannung aufrecht. Wenn der Steuer-MOSFET sich ab- und der Synchronisierungs-MOSFET sich einschaltet, kommutiert der Drosselstrom und durchfließt die Betriebserde, die Last und den Synchronisierungs-MOSFET. Hierbei wird eine negative Spannung durch den Lastwiderstand bezogen auf die Betriebserde erzeugt. Der Drosselstrom lädt auch den Ausgangskondensator auf. Die Spannung in der Drossel entspricht dabei  $-V_{OUT}$ .

# ANWENDUNGSHINWEIS

Entwerfen eines Inverswandlers mit dem  
MagI<sup>3</sup>C Power Modul WPMDH1302401/171032401  
(6 - 42 V<sub>IN</sub> / 3 A / 5 - 24 V<sub>OUT</sub>)



## 3. Beschränkungen bei Spannung, Strom und Tastgrad

Die Auswahl des für Abwärtswandlertopologien passenden MagI<sup>3</sup>C-Stromversorgungsmoduls ist unkompliziert: Die Angaben zu Eingangs- und Ausgangsspannungsbereich sowie zum Ausgangsstrombereich im Datenblatt des jeweiligen Moduls zeigen die exakten Grenzwerte für die einzelnen Größen. Für den Inverswandler sind weitere Berechnungen erforderlich. Außerdem ist zu beachten, dass hierbei sowohl der maximale Eingangsspannungsbereich als auch der Ausgangsstrombereich niedriger sind als beim Abwärtswandler.

### 3.1. Eingangsspannungsbereich

Eine nähere Untersuchung des Inversreglers in Abbildung 3 zeigt, dass die Bezugsspannung des Moduls nicht mehr die Betriebserde, sondern vielmehr die negative Ausgangsspannung ist. Die Gesamtspannung zwischen dem V<sub>IN</sub>- und dem AGND-Pin ist gleich der Eingangsspannung plus dem Absolutwert der Ausgangsspannung. Dies lässt sich erklären, indem man berücksichtigt, dass die Spannungen über C<sub>IN,2</sub> und C<sub>OUT</sub> sich addieren, wobei die Betriebserde die Mittelanzapfung darstellt. Tabelle 1 zeigt die maximale Eingangsnennspannung für die einzelnen Produkte der VDRM-Familie:

Typ	Bauform	Best.-Nr.	WE-Artikelnummer	V <sub>IN</sub> [V]	V <sub>OUT</sub> [V]	I <sub>OUT</sub> [A]
Abwärts-wandler mit variabler Ausgangsspannung (VDRM)	TO263-7EP	<a href="#">171 012 401</a>	WPMDH1102401J	6–42	5–24	1
	TO263-7EP	<a href="#">171 012 402</a>	WPMDH1152401J	6–42	5–24	1,5
	BQFN-39	<a href="#">171 020 302</a>	WPMDB1200362Q	2,95–6 V	0,8–3,6	2
	TO263-7EP	<a href="#">171 020 601</a>	WPMDH1200601J	6–42	0,8–6	2
	BQFN-41	<a href="#">171 021 501</a>	WPMDU1251501N	7–50	2,5–15	2,5
	TO263-7EP	<a href="#">171 032 401</a>	WPMDH1302401J	6–42	5–24	3
	BQFN-39	<a href="#">171 040 302</a>	WPMDB1400362Q	2,95–6 V	0,8–3,6	4
	TO263-7EP	<a href="#">171 050 601</a>	WPMDM1500602J	6–36	0,8–6	5
	BQFN-39	<a href="#">171 060 302</a>	WPMDB1600362Q	2,95–6 V	0,8–3,6	6

Tabelle 1: Eingangsspannungs-, Ausgangsspannungs- und Eingangsstrombereiche für die MagI<sup>3</sup>C VDRM-Stromversorgungsmodule

Beispielsweise wäre das [171 032 401](#) (42 V<sub>IN</sub> / 3 A / 5 - 24 V<sub>OUT</sub>) bei einer Eingangsspannung von 24 V auf eine theoretische maximale Ausgangsspannung von -18 V begrenzt. In der Praxis sollte ein Puffer von mindestens 3 - 4 V für Überswingen und Transienten einkalkuliert werden, was bei einer Eingangsspannung von 24 V eine empfohlene maximale Ausgangsspannung von 14 - 15 V zuließe.

Der Inverswandlerbetrieb bietet gegenüber dem Abwärtsregler einen wesentlichen Vorteil: Wie der Name sagt, kann der Absolutwert der Ausgangsspannung höher oder niedriger sein als die Eingangsspannung. Solange die Mindestdauer der Einschalt- und der Ausschaltphase der Module berücksichtigt wird, lässt sich mit einer Eingangsspannung von nur 6 V ein Ausgangswert von -12 V erzielen. Zudem kann, sobald das Modul im Betrieb ist, die Eingangsspannung bis unter die normale Mindesteingangsspannung V<sub>IN</sub> von 6 V für den Abwärtsmodus abgesenkt werden – es muss lediglich die Summe von V<sub>IN</sub> + |-V<sub>OUT</sub>| mindestens 6 V betragen. Abbildung 5 zeigt die maximale Eingangsspannung als Funktion der Ausgangsspannung und die maximale Ausgangsspannung als Funktion der Eingangsspannung.

# ANWENDUNGSHINWEIS

Entwerfen eines Inverswandlers mit dem  
MagI<sup>3</sup>C Power Modul WPMDH1302401/171032401  
(6 - 42 V<sub>IN</sub> / 3 A / 5 - 24 V<sub>OUT</sub>)

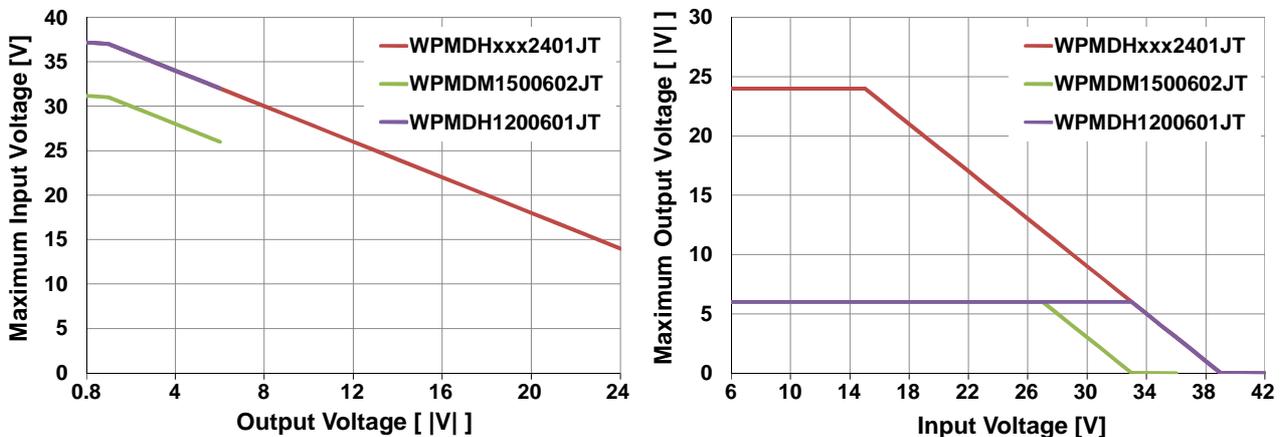


Abbildung 5: Grafische Beziehungen zwischen maximaler Eingangs- und Ausgangsspannung

## 3.2. Maximaler Ausgangsstrom

In der Inverswandlertopologie ist der maximal mögliche Ausgangsstrom vom Regler eine Funktion des Tastgrads. (Er kann auch als Funktion des Verhältnisses zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung betrachtet werden.) Das liegt daran, dass MagI<sup>3</sup>C-Stromversorgungsmodule den Drosselstrom erkennen und in der Inverswandlertopologie der Durchschnittswert des Drosselstroms nicht mit dem durchschnittlichen Ausgangsstrom identisch ist (siehe Gleichung 1). Des Weiteren erkennen MagI<sup>3</sup>C-Stromversorgungsmodule den Drosselstrom während der Einschaltphase des High-Side-MOSFETs, wenn der Strom seinen Spitzenwert erreicht. Die Überstrom-Schutzschaltung überwacht diesen Drosselspitzenstrom. Zur Berechnung des Spitzenstroms muss zunächst der Durchschnittsstrom bestimmt werden. Der Durchschnittsstrom der Drossel ist eine Funktion des Tastgrads  $D$ , definiert durch:

$$I_{L-AVG} = \frac{I_{OUT}}{1 - D} \quad (1)$$

$$D = \frac{|V_{OUT}|}{V_{IN} + |V_{OUT}|} \quad (2)$$

Der Spannungsabfall in den Leistungs-MOSFETs und der internen Speicherdrossel können ignoriert werden, da sie bei den meisten Anwendungen im Vergleich zu  $-V_O$  und  $V_{IN}$  niedrig sind. Zum Berechnen des maximalen Ausgangsstroms für den Inverswandler benötigen wir die Ausgangsspannung, die minimale Eingangsspannung, die Induktivität und die Schaltfrequenz. Zunächst berechnen wir den maximalen Tastgrad:

$$D_{MAX} = \frac{|V_{OUT}|}{V_{IN,min} + |V_{OUT}|} \quad (3)$$

Jedes MagI<sup>3</sup>C-Stromversorgungsmodul hat einen festen Grenzwert für den Überstromschutz. Der Übersicht halber sind diese Grenzwerte mit den internen Speicherdrosseln in Tabelle 2 angegeben.

# ANWENDUNGSHINWEIS

Entwerfen eines Inverswandlers mit dem  
MagI<sup>3</sup>C Power Modul WPMDH1302401/171032401  
(6 - 42 V<sub>IN</sub> / 3 A / 5 - 24 V<sub>OUT</sub>)



Artikelnummer	Mindeststromgrenzwert I <sub>OCp</sub> (A)	Interne Induktivität L <sub>1</sub> (μH)
WPMDH1200601JT	2,3	10
WPMDM1500602JT	5,4	3,3
WPMDH1102401JT	1,5	15
WPMDH1152401JT	2,4	15
WPMDH1302401JT	3,2	10

Tabelle 2: Mindestgrenzwerte für den Überstromschutz über den gesamten Temperaturbereich

Der Spitze-Spitze-Drosselrippelstrom und der Spitzenstrom für Inversregler werden wie folgt berechnet:

$$\Delta i_L = \frac{V_{IN,min} \cdot D_{max}}{L_1 \cdot f_{SW}} \quad (4)$$

$$I_{L-PK} = I_{L-max} + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (5)$$

Abschließend lassen sich die Gleichungen so umstellen, dass man den maximal erreichbaren Ausgangsstrom für die in der Applikation geforderten Bedingungen errechnen kann:

$$I_{OUT-max} = (1 - D_{max}) \cdot \left( I_{OCp} - \frac{V_{IN,min} \cdot D_{max}}{2 \cdot L_1 \cdot f_{SW}} \right) \quad (6)$$

### 3.3. Grenzwerte beim Tastgrad

Der Tastgrad bei der [VDRM](#)-Produktfamilie der MagI<sup>3</sup>C-Stromversorgungsmodule wird nicht direkt durch die konstante Einschaltphasenregelung begrenzt, sondern der High-Side-Schalter muss in jedem Schaltzyklus für mindestens 260 ns aus- und für mindestens 150 ns eingeschaltet sein. Diese Grenzwerte führen zu effektiven Mindest- und Höchstwerten für den Tastgrad, die die Module für alle Topologien erzielen können; in allen Modulen werden diese Grenzwerte umso restriktiver, je stärker die Schaltfrequenz zunimmt. Grundsätzlich wird der Inverswandler wahrscheinlich eher als der Abwärtswandler die Grenzwerte für maximalen Tastgrad bzw. minimale Ausschaltzeit erreichen, denn der Inverswandler kann mit niedrigeren Eingangsspannungen betrieben werden als ein Abwärtsregler.

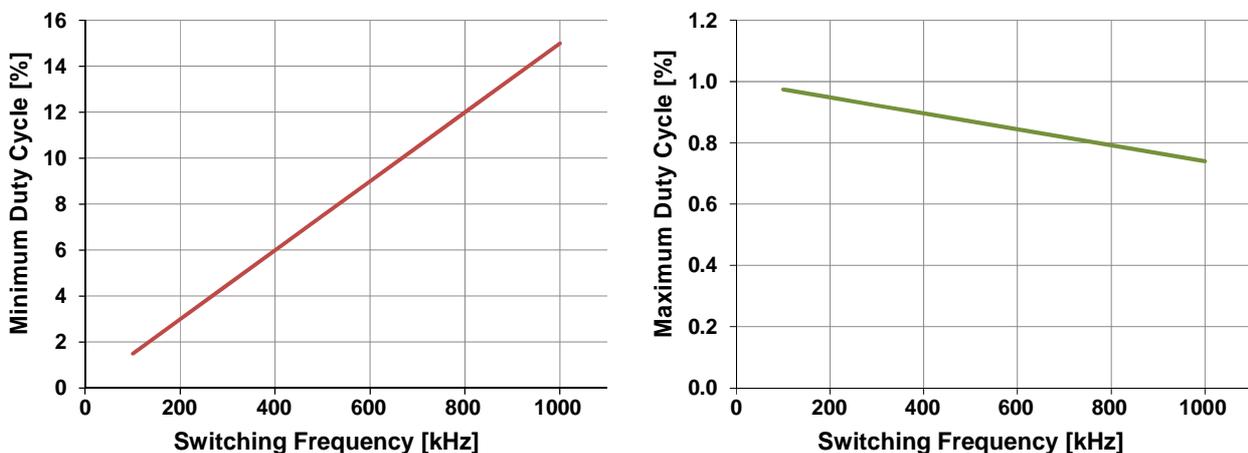


Abbildung 5: Tastgradgrenzwerte bezogen auf Schaltfrequenzen zwischen 100 kHz und 1 MHz.

# ANWENDUNGSHINWEIS

Entwerfen eines Inverswandlers mit dem  
MagI<sup>3</sup>C Power Modul WPMDH1302401/171032401  
(6 - 42 V<sub>IN</sub> / 3 A / 5 - 24 V<sub>OUT</sub>)



## 4. Konstruktionsleitfaden

In diesem Abschnitt werden Konstruktion und Auswahl der erforderlichen Bauteile für einen Inverswandler beschrieben, der den folgenden Spezifikationen entspricht:

**Eingangsspannung: V<sub>IN</sub> = 10 - 28 VDC**

**Ausgangsspannung: V<sub>OUT</sub> = -12,0 VDC, I<sub>O-MAX</sub> = 1,0 A**

**Geschätzte Leistungseffizienz η = 90 %**

Dieser Wandler kann mit 12 oder 24 V Gleichspannung, 12 V gleichgerichteter Wechselspannung oder 12 V- bzw. 24 V-Batterien betrieben werden. Die Ausgangsspannung in Höhe von -12 V könnte zur Versorgung von Verstärkern, Sensoren oder anderen Analogfunktionen verwendet werden, die eine negative Spannung erfordern.

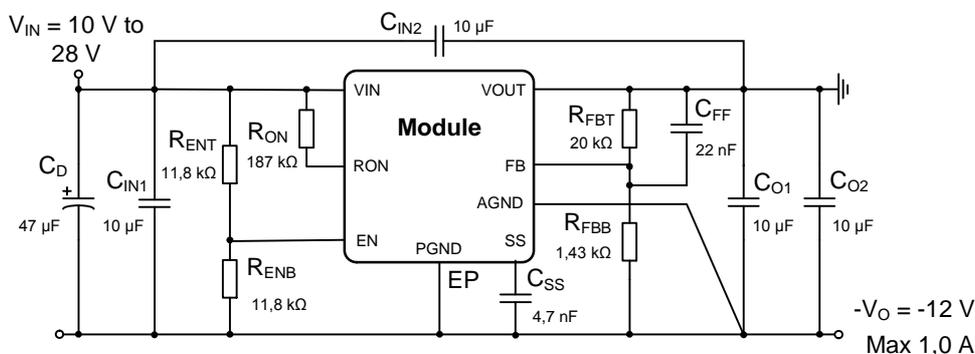


Abbildung 6: Schaltbild für das Konstruktionsbeispiel

### 4.1. Auswahl des geeigneten Stromversorgungsmoduls

Bei diesem Prozess werden Schritte häufiger wiederholt werden müssen. Zunächst einmal beträgt die zwischen V<sub>IN</sub>- und V<sub>OUT</sub>-Pin maximal anliegende Spannung 28 V + 12 V = 40 V. Das bedeutet, dass das [5 A MagI<sup>3</sup>C-VDRM](#) mit einem Grenzwert von 36 V bereits ausgeschlossen werden kann. Danach können wir den durchschnittlichen Drosselstrom mithilfe der Gleichungen 1 und 3 berechnen. Denken Sie daran, dass der höchste Strom auftritt, wenn die Eingangsspannung den niedrigsten Wert hat:

$$D_{\max} = \frac{|V_{\text{OUT}}|}{V_{\text{IN,min}} + |V_{\text{OUT}}|} = \frac{12 \text{ V}}{10 \text{ V} + 12 \text{ V}} = 0.55 \quad I_{\text{L-AVG}} = \frac{I_{\text{OUT}}}{(1 - D_{\max}) \cdot \eta} = \frac{1.0 \text{ A}}{(1 - 0.55) \cdot 0.9} = 2.45 \text{ A}$$

Wenn der Durchschnittsstrom über 2,0 A liegt, können wir diejenigen Bauteile, die nur 1,0, 1,5 und 2,0 A liefern, ebenfalls aus der Auswahl entfernen. Es bleibt als nur die Version WPMDH1302401JT für 3,0 A. Und dieses Bauteil werden wir auch verwenden.

### 4.2. Auswahl der Schaltfrequenz

Hierbei handelt es sich um eine grundlegende Entscheidung, die Auswirkungen auf die Effizienz und die Verlustleistung im Modul hat. Da die Speicherdrossel intern ist, spielt der Kompromiss zwischen Platzbedarf/Größe und Effizienz keine so große Rolle wie bei gängigen Schaltreglern. Infolgedessen sind die wesentlichen Auswahlkriterien Leistungseffizienz/Verlustleistung, die Größe von Eingangs- und Ausgangskondensatoren, der Spitzenrippelstrom (damit der Überstromschutz nicht anspricht) und das Vorhandensein beliebiger empfindlicher Frequenzbänder.

## ANWENDUNGSHINWEIS

### Entwerfen eines Inverswandlers mit dem MagI<sup>3</sup>C Power Modul WPMDH1302401/171032401 (6 - 42 V<sub>IN</sub> / 3 A / 5 - 24 V<sub>OUT</sub>)



Aufgrund der erforderlichen Mindestlänge der Einschaltphase von 150 ns wird die maximal mögliche Schaltfrequenz wie folgt berechnet:

$$f_{\text{SW,max}} = \frac{V_{\text{OUT}}}{150 \text{ ns} \cdot V_{\text{IN,max}}} = \frac{12 \text{ V}}{150 \text{ ns} \cdot 28 \text{ V}} = 2.9 \text{ MHz} \quad (7)$$

Der Wert 2,9 MHz liegt deutlich außerhalb des für das [3 A MagI<sup>3</sup>C-VDRM](#) Modul empfohlenen Maximalbereichs von 200 - 800 kHz – und somit natürlich deutlich jenseits der praktikablen Schaltfrequenz für ein MagI<sup>3</sup>C-Stromversorgungsmodul, das eine Ausgangsleistung von 12 W liefert. (Ausführliche Informationen zur Abhängigkeit der Verlustleistung von der Frequenz finden Sie im Abschnitt „Verlustleistung“.) 500 kHz sind eine wesentlich vernünftiger Option, und für diese entscheiden wir uns auch.

#### 4.3. Prüfen von Spitzenstrom und Überstromschutz

Wie im Abschnitt „Maximaler Ausgangsstrom“ erwähnt, beeinflussen das Verhältnis von Eingangs- zur Ausgangsspannung und die Schaltfrequenz den maximalen Ausgangsstrom. Nachdem wir uns für das 3,0 A Modul entschieden und die Schaltfrequenz festgelegt haben, können wir mithilfe von Gleichung 6 sicherstellen, dass der Überstromschutz nicht anspricht:

$$I_{\text{OUT-max}} = (1 - D_{\text{max}}) \cdot \left( I_{\text{OCP}} - \frac{V_{\text{IN,min}} \cdot D_{\text{max}}}{2 \cdot L_1 \cdot f_{\text{SW}}} \right) = (1 - 0.55) \cdot \left( 3.2 \text{ A} - \frac{10 \text{ V} \cdot 0.55}{2 \cdot 10 \mu\text{H} \cdot 500 \text{ kHz}} \right) = 1.2 \text{ A}$$

Auf der Grundlage dieser Auswertung ist das [3 A MagI<sup>3</sup>C-VDRM](#) Modul eine ausgezeichnete Wahl.

#### 4.4. Auswahl des Einschaltphasenwiderstands R<sub>ON</sub>

Die VDRM-Produktfamilie der MagI<sup>3</sup>C-Stromversorgungsmodule verwendet eine Regelschleife für die Einschaltphase. Zudem wird die Schaltfrequenz durch Auswahl eines Widerstands programmiert, mit dem bestimmt wird, wie lange der High-Side-MOSFET im jeweiligen Zyklus verbleibt. Die Einschaltdauer verhält sich umgekehrt proportional zur Eingangsspannung und führt so zu einer über den Eingangsspannungsbereich konstanten Schaltfrequenz. Aus diesem Grund sind die Auswahlgleichungen für Abwärts- und Inversregler identisch:

$$R_{\text{ON}} = \frac{V_{\text{OUT}}}{1.13 \cdot 10^{-10} \cdot f_{\text{SW}}} = \frac{12 \text{ V}}{1.13 \cdot 10^{-10} \cdot 500 \text{ kHz}} = 185 \text{ k}\Omega \quad (8)$$

Der nächstgelegene E96-Wert ist 187 kΩ, und sobald der tatsächliche R<sub>ON</sub>-Wert ausgewählt ist, sollte die maximale Einschaltdauer mithilfe der nächsten Gleichungsfolge ausgewertet werden.

$$t_{\text{ON,max}} = \frac{1.13 \cdot 10^{-10} \cdot R_{\text{ON}}}{V_{\text{IN,min}} + |V_{\text{OUT}}|} = \frac{1.13 \cdot 10^{-10} \cdot 187 \text{ k}\Omega}{10 \text{ V} + 12 \text{ V}} = 1.11 \mu\text{s} \quad (9)$$

#### 4.5. Berechnen der internen Drosselströme

Der durchschnittliche Drosselstrom ist bereits bekannt: Nach Gleichung 1 beläuft er sich auf 2,45 A. Wenn die maximale Einschaltdauer und die Induktivität gegeben sind, können der Spitze-Spitze-Rippelstrom und der Drosselspitzenstrom berechnet werden:

## ANWENDUNGSHINWEIS

Entwerfen eines Inverswandlers mit dem  
Mag1<sup>3</sup>C Power Modul WPMDH1302401/171032401  
(6 - 42 V<sub>IN</sub> / 3 A / 5 - 24 V<sub>OUT</sub>)



$$\Delta i_L = \frac{V_{IN,min} \cdot t_{ON,max}}{L_1} = \frac{10 \text{ V} \cdot 1.11 \mu\text{s}}{10 \mu\text{H}} = 1.1 \text{ A}_{P-P} \quad (10)$$

$$I_{L-PK} = I_{L-AVG} + \frac{\Delta i_L}{2} = 2.45 \text{ A} + \frac{1.1 \text{ A}}{2} = 2.99 \text{ A} \quad (11)$$

### 4.6. Auswahl der Ausgangskondensatoren

Zunächst muss ein wünschenswerter Maximalwert für die Spitze-Spitze-Ausgangsspannungswelligkeit definiert werden. Sofern die Toleranz der Last für die Welligkeit nicht bekannt ist, kann von typischen Werten in einer Größenordnung von 1–2 % der Ausgangsspannung ausgegangen werden. In unserem Fall ist das 1 % von 12 V, somit 120 mV.

$$C_{O,min} = \frac{I_{O,max} \cdot t_{ON,max}}{\Delta V_{O-max}} = \frac{1.0 \text{ A} \cdot 1.11 \mu\text{s}}{120 \text{ mV}} = 9.2 \mu\text{F} \quad (12)$$

$$ESR_{max} = \frac{\Delta V_{O-max}}{I_{L-PK}} = \frac{120 \text{ mV}}{2.99 \text{ A}} = 40 \text{ m}\Omega \quad (13)$$

Anders als der glatte Ausgangsstrom eines Abwärtswandlers mit seinem niedrigen Effektivwert ist der Ausgangsstrom eines Inverswandlers pulsierend und hat einen hohen Effektivwert – ähnlich wie bei einem Aufwärts- oder Sperrwandler. Es ist aus diesem Grund sehr wichtig, den Effektivstrom zu berechnen, der an dem oder den Ausgangskondensatoren anliegt:

$$I_{C_{OUT,RMS}} = I_{OUT,max} \cdot \sqrt{\frac{V_{OUT}}{V_{IN,min}}} = 1.0 \text{ A} \cdot \sqrt{\frac{12 \text{ V}}{10 \text{ V}}} = 1.1 \text{ A} \quad (14)$$

Grundsätzlich ist es bei Kapazitätswerten von unter ca. 20  $\mu\text{F}$  möglich, ohne großen Aufwand Keramik-kondensatoren zu verwenden. Des Weiteren bewältigen Keramikvielschicht-Chipkondensatoren (MLCCs) sehr hohe Effektivstromwerte, was sie zu perfekten Ausgangskondensatoren für Inverswandler macht. Aluminium-Polymer SMD Kondensatoren wären auch hervorragend geeignet. Berücksichtigt man den Kapazitätsverlust von MLCCs beim Betrieb an Gleichspannung, dann können zwei Kondensatoren der Bauform 1210/25 V/10  $\mu\text{F}$  mit X7R-Dielektrikum jeweils 7  $\mu\text{F}$  bieten, wenn eine Ausgangsspannung von 12 V daran angelegt wird. Die typische ESR solcher Kondensatoren liegt bei ca. 2 - 3 m $\Omega$ , also deutlich unterhalb des berechneten Maximums, weswegen die Welligkeit der Ausgangsspannung wesentlich niedriger sein wird als der angestrebte Wert von 120 mV<sub>P-P</sub>.

### 4.7. Auswahl der Eingangskondensatoren

Wie bei den Ausgangskondensatoren besteht auch hier der erste Schritt in der Definition einer maximalen Spitze-Spitze-Welligkeit der Eingangsspannung. Dieser Wert hängt in hohem Maße von der Positionierung und der Anbindung des Inversreglers innerhalb der Anwendung ab: Ist er über einen Kabelbaum mit der Eingangsstromversorgung verbunden oder handelt es sich um eine Anwendung, bei der durch Verordnungen wie EN55025 strenge Grenzwerte für leitungsgebundene EMI festgelegt sind, dann ist der Wert für  $\Delta V_{IN-MAX}$  exakt definiert. In solchen Fällen wird zur Erfüllung der EMI-Anforderungen häufig ein zusätzliches L-C- oder Ferrit-

## ANWENDUNGSHINWEIS

Entwerfen eines Inverswandlers mit dem  
MagI<sup>3</sup>C Power Modul WPMDH1302401/171032401  
(6 - 42 V<sub>IN</sub> / 3 A / 5 - 24 V<sub>OUT</sub>)



C-Filter benötigt. (Hinweis: Ausführliche Informationen zur Filterkonstruktion finden Sie im Werk „[Trilogie der induktiven Bauelemente](#)“, das über Würth Elektronik bezogen werden kann.)

Fehlen festgelegte Grenzwerte, dann ist ein typischer Zielwert 1 % der minimalen Eingangsspannung. In diesem Fall wären dies 1 % von 10 V, also 100 mV. Die Eingangskapazität lässt sich dann wie folgt berechnen:

$$C_{IN,min} = \frac{I_{OUT,max} \cdot t_{ON,max}}{\Delta V_{IN-MAX}} = \frac{1.1 \text{ A} \cdot 1.11 \mu\text{s}}{100 \text{ mV}} = 11.1 \mu\text{F} \quad (15)$$

$$ESR_{MAX} = \frac{\Delta V_{IN-MAX}}{I_{L-PK}} = \frac{100 \text{ mV}}{2.99 \text{ A}} = 33 \text{ m}\Omega \quad (16)$$

Inverswandler ziehen ebenso wie Abwärts- und Sperrregler pulsierende Eingangsströme mit hohen Effektivwerten, weswegen auch hier die Berechnung des Effektivstroms des Eingangskondensators wichtig ist:

$$I_{IN,AVG} = \frac{I_{OUT,max} \cdot V_{OUT}}{V_{IN,min} \cdot \eta} = \frac{1 \text{ A} \cdot 12 \text{ V}}{10 \text{ V} \cdot 0.9} = 1.33 \text{ A} \quad (17)$$

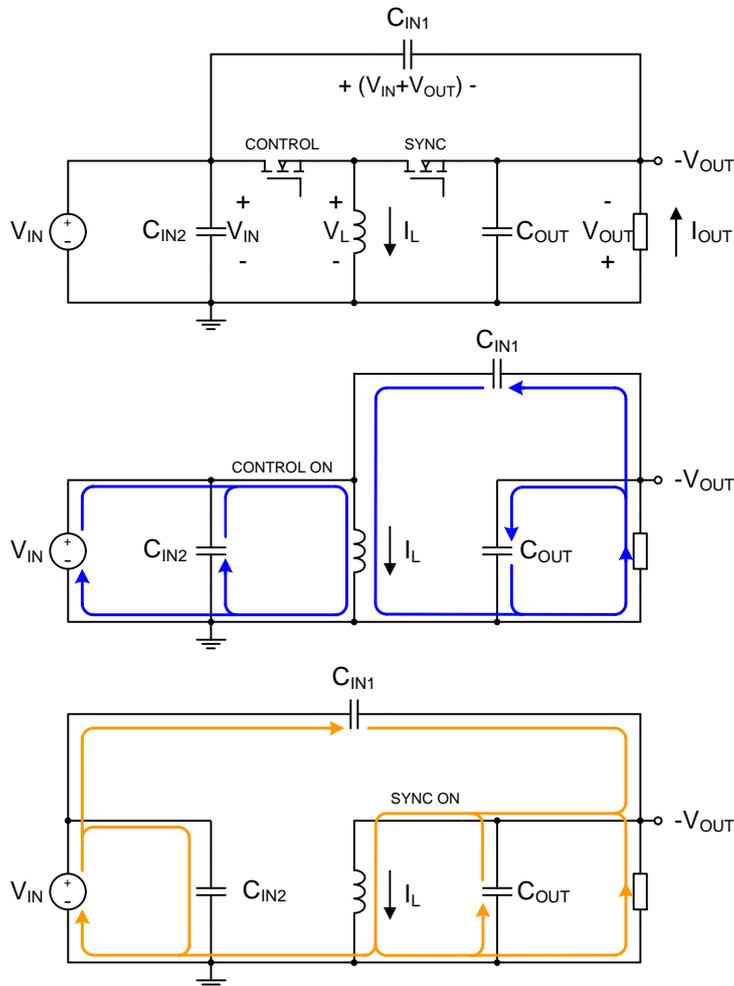
$$I_{CIN,RMS} = I_{IN,AVG} \cdot \sqrt{\frac{D_{max}}{1 - D_{max}}} = 1.33 \text{ A} \cdot \sqrt{\frac{0.55}{1 - 0.55}} = 1.47 \text{ A} \quad (18)$$

# ANWENDUNGSHINWEIS

Entwerfen eines Inverswandlers mit dem  
Mag<sup>3</sup>C Power Modul WPMDH1302401/171032401  
(6 - 42 V<sub>IN</sub> / 3 A / 5 - 24 V<sub>OUT</sub>)



## 4.7.1. Zwei Positionen für die Eingangskondensatoren



**Abbildung 7: C<sub>IN1</sub> liegt zwischen V<sub>IN</sub> und -V<sub>OUT</sub>, C<sub>IN2</sub> zwischen V<sub>IN</sub> und GND, wodurch die Strompfade vorgegeben sind**

Aufgrund der Art und Weise, wie in der Inverswandlertopologie ein Abwärtsregler verwendet wird, der auf die negative Ausgangsspannung bezogen ist, gibt es zwei Positionen, an denen die Eingangskapazität genutzt wird. C<sub>IN2</sub> ist zwingend erforderlich, weil er die vom Wandler benötigten hohen Wechselströme bereitstellt und die Eingangsspannung aufrechterhält, solange der Steuerungs-MOSFET deaktiviert und der Synchronisierungs-MOSFET aktiviert ist (vgl. Abbildungen 4 und 7). C<sub>IN1</sub> ist nicht unbedingt notwendig, aber sehr nützlich, um die Welligkeit der Ausgangsspannung zu reduzieren und so Probleme mit Lasten aus dem Weg zu räumen, die anfällig für Spannungswelligkeiten sind, beispielsweise Verstärker oder AD-Wandler. Zudem verbessert eine niedrigere Ausgangswelligkeit die leitungsgebundene EMI am Ausgang des Wandlers.

Auf den ersten Blick könnte C<sub>IN1</sub> wie ein zusätzliches, unnötige Kosten verursachendes Bauteil wirken, aber in der Praxis spart diese Komponente Geld wie auch Platz auf der Platine ein, denn es erlaubt das – möglicherweise sogar vollständige – Weglassen von Ausgangsfiltern.

An C<sub>IN1</sub> liegt eine durchschnittliche Spannung von V<sub>OUT</sub> + V<sub>IN</sub> an; in der vorliegenden Anwendung ist dies schlimmstenfalls V<sub>INMAX</sub>, womit die Summe von 40 V erreicht wird. C<sub>IN2</sub> ist der „Standardeingangskondensator“

## ANWENDUNGSHINWEIS

Entwerfen eines Inverswandlers mit dem  
MagI<sup>3</sup>C Power Modul WPMDH1302401/171032401  
(6 - 42 V<sub>IN</sub> / 3 A / 5 - 24 V<sub>OUT</sub>)



zwischen V<sub>IN</sub> und Betriebserde, weswegen die Maximalspannung gleich V<sub>INMAX</sub> – in diesem Fall also 28 V – ist.

Die Verteilung der Gesamtkapazität zwischen den Positionen C<sub>IN1</sub> und C<sub>IN2</sub> beeinflusst sowohl die Welligkeit der Eingangsspannung (zwischen V<sub>IN</sub> und Betriebserde, wo die leitungsgebundene EMI gemessen wird) als auch die der Ausgangsspannung. Normalerweise besteht der beste Kompromiss darin, die Hälfte der in Gleichung 15 berechneten Gesamtkapazität bei C<sub>IN1</sub> und die andere Hälfte bei C<sub>IN2</sub> anzuordnen.

Aufgrund der an C<sub>IN1</sub> und C<sub>IN</sub> auftretenden hohen Effektivströme sind MLCCs als Eingangskondensatoren für Inverswandler eine exzellente Wahl. Die Maximalspannungen von 40 bzw. 28 V an C<sub>IN1</sub> und C<sub>IN2</sub> erfordern die Nutzung von Kondensatoren, die für mindestens 50 V ausgelegt sind, mit X5R- oder X7R-Dieelektrikum. In diesem Fall verwenden wir 10-µF-Komponenten der Bauform 1210 für 50 V mit X5R-Dieelektrikum. Aufgrund des Kapazitätsverlusts infolge der Gleichstromvorspannung besteht ein Vorteil der Konstruktion mit MLCCs darin, dass der schlimmstmögliche Fall, in dem die höchste Kapazität benötigt wird, bei der kleinstmöglichen Eingangsspannung auftritt, bei der der Kapazitätsverlust am niedrigsten ist. In diesem Beispiel (22 V) liegt die Istkapazität von C<sub>IN1</sub> bei ca. 6 µF, und bei 10 V für C<sub>IN2</sub> beträgt sie ca. 9 µF. An jeder Position wird jeweils ein Kondensator angeordnet. Aufgrund der komplexen Interaktion und der Schwierigkeit, die Ströme über die Kondensatoren zu messen, kann eine Laborsimulation sehr hilfreich sein. Abbildungen 8 und 9 zeigen die Welligkeit der Eingangsspannung bezogen auf Masse und die Welligkeit der Ausgangsspannung für zwei Fälle: zunächst für die Anordnung der Gesamtkapazität an C<sub>IN2</sub> und dann für die empfohlene Kapazitätsteilung zwischen den beiden Positionen.

In diesem Beispiel ist die Welligkeit der Eingangsspannungen in beiden Fällen ähnlich, jedoch bei zwischen C<sub>IN1</sub> und C<sub>IN2</sub> geteilter Kapazität geringfügig höher. Ursache hierfür sind die Kapazitätsverluste beim Anlegen von V<sub>OUT</sub> + V<sub>IN</sub> an C<sub>IN1</sub>. Eine deutliche Verbesserung finden wir hingegen bei der Welligkeit der Ausgangsspannung vor. Diese ist im durchgehenden AC-Weg begründet, den C<sub>IN1</sub> von der Eingangs- zur Ausgangsspannung bietet. Ohne C<sub>IN1</sub> gäbe es bei keinem der beiden Schaltzustände eine direkte Energieübertragung vom Eingang zum Ausgang, während bei Integration von C<sub>IN1</sub> ein Wechselstrom fließen kann, durch den sich die Ausgangswelligkeit sowohl bei der Wellenform als auch hinsichtlich der Amplitude stärker an die angestrebte niedrige Welligkeit der Ausgangsspannung eines Abwärtswandlers annähert.

# ANWENDUNGSHINWEIS

Entwerfen eines Inverswandlers mit dem  
Mag<sup>3</sup>C Power Modul WPMDH1302401/171032401  
(6 - 42 V<sub>IN</sub> / 3 A / 5 - 24 V<sub>OUT</sub>)

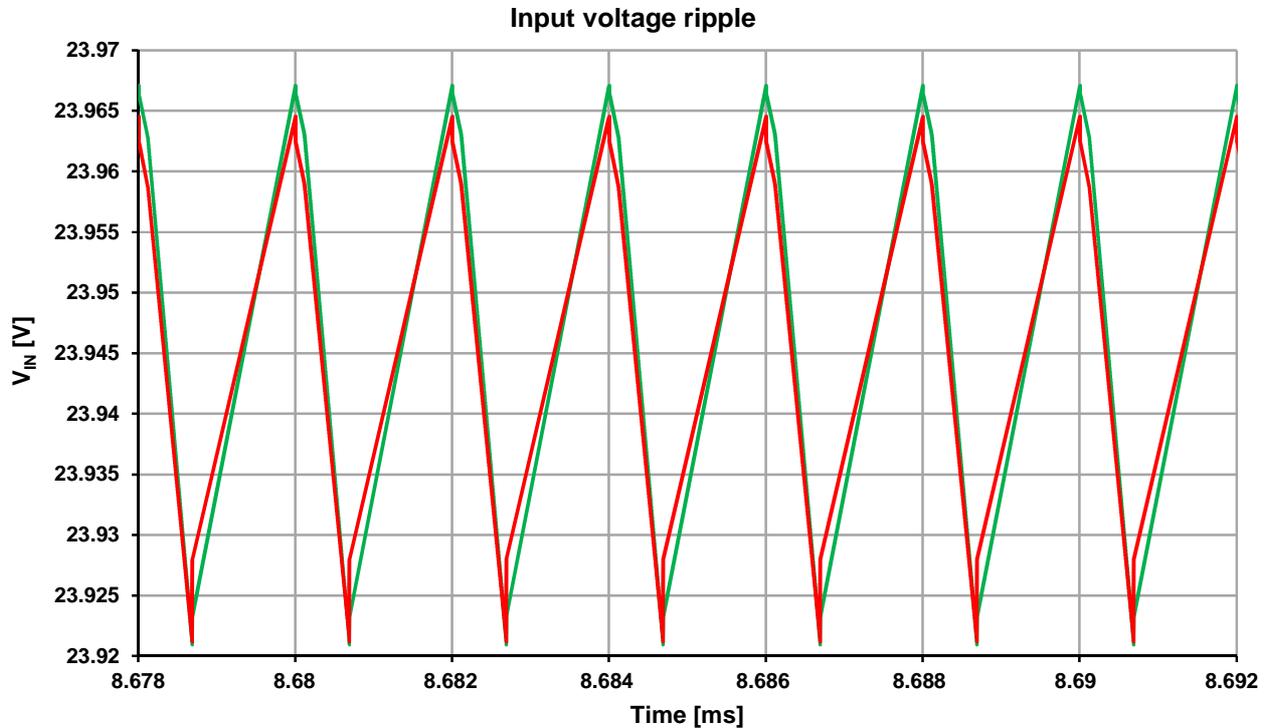


Abbildung 8: Welligkeit der Eingangsspannung: gesamte Kapazität bei C<sub>IN2</sub> (rot), 50:50-Teilung der Kapazität (grün)

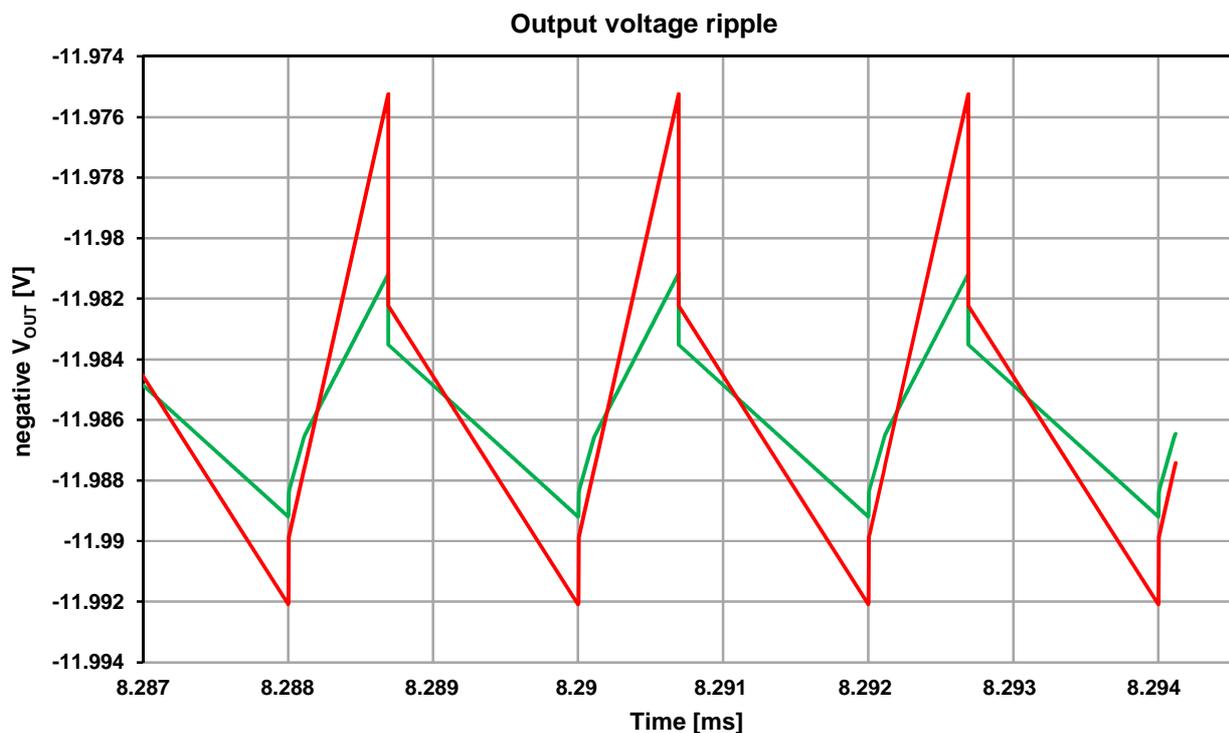


Abbildung 9: Welligkeit der Ausgangsspannung: gesamte Kapazität bei C<sub>IN2</sub> (rot), 50:50-Teilung der Kapazität (grün)

## ANWENDUNGSHINWEIS

Entwerfen eines Inverswandlers mit dem  
Mag<sup>3</sup>C Power Modul WPMDH1302401/171032401  
(6 - 42 V<sub>IN</sub> / 3 A / 5 - 24 V<sub>OUT</sub>)



### 4.7.2. Dämpfung zur Vermeidung von Resonanz am Eingang

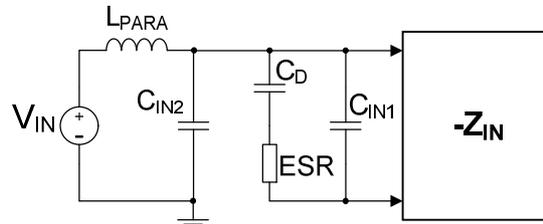


Abbildung 10: Parasitäre Eingangsleitungsinduktivität  $L_{PARA}$ , Eingangskondensatoren und Dämpfungskondensator  $C_D$  mit definiertem ESR

Die Kombination aus großer parasitärer Induktivität aufgrund langer Eingangsleitungen der Stromversorgung und reinen Keramikkondensatoren bildet ein L-C-Filter mit hoher Güte, das in Schwingung versetzt werden kann, wenn es die negative Eingangsimpedanz eines Schaltwandlers speist. Aus mathematischer Sicht schwingt ein Schaltnetzteil mit dem Eingangfilter, wenn die Impedanz des Eingangsfilters höher ist als der Absolutwert der negativen Eingangsimpedanz des Schaltnetzteils. Diese subharmonische Resonanz wird oft als „Netzteilwechselwirkung“ bezeichnet. Abbildung 11 zeigt den negativen Effekt auf die in diesem Anwendungshinweis entworfene Beispielschaltung beim Anschluss an eine Stromversorgung über 30-cm-Kabel. Der schlimmste Fall einer Netzteilwechselwirkung tritt bei minimaler Eingangsspannung und maximalem Ausgangsstrom auf, wenn der Absolutwert der Eingangsimpedanz des Wandlers am niedrigsten ist. Diese Schwingung von ca. 43 kHz ist eine EMI-Quelle und sollte durch Ergänzen eines größeren Kondensators mit höherer ESR parallel zu  $C_{IN1}$  beseitigt werden, um die Resonanz zu unterdrücken.

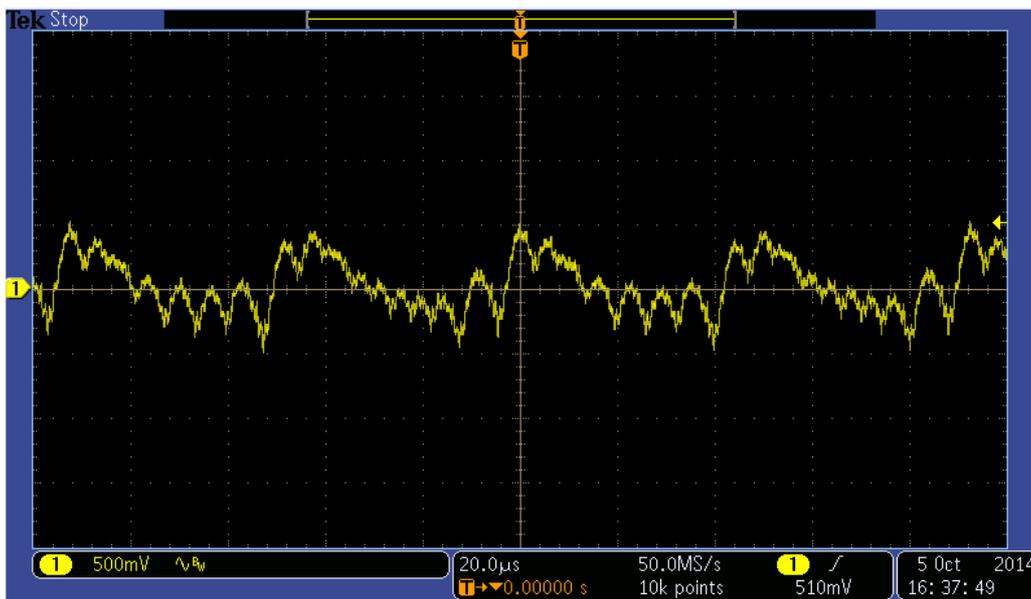


Abbildung 11: Eingangsspannung mit subharmonischer Schwingung infolge der Netzteilwechselwirkung bei  $V_{IN} \leq 10,5 \text{ V}$  und  $I_o = 1,0 \text{ A}$

Die Kapazität des Abschwächungskondensators  $C_D$  sollte vier bis fünf Mal höher liegen als die des Keramikkondensators  $C_{IN1}$ . Zur kritischen Dämpfung der L-C-Resonanz lässt sich die minimale ESR des Abschwächungskondensators wie folgt berechnen:

## ANWENDUNGSHINWEIS

Entwerfen eines Inverswandlers mit dem  
Mag<sup>3</sup>C Power Modul WPMDH1302401/171032401  
(6 - 42 V<sub>IN</sub> / 3 A / 5 - 24 V<sub>OUT</sub>)



$$ESR \geq \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{L_F}{C_{IN,1}}} - DCR = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{1 \mu\text{H}}{10 \mu\text{F}}} - 0.003 \Omega = 0.155 \Omega \quad (19)$$

Für dieses Beispiel ist die tatsächliche Eingangsinduktivität rein parasitär; in solchen Fällen kann ein Wert von 1  $\mu\text{H}$  angenommen werden. Wird eine Eingangs-drossel verwendet, dann ersetzt dieser Wert  $L_F$ . Die ESR der meisten großen MLCCs liegt im Bereich zwischen 2–3 m $\Omega$  und kann ignoriert werden. Aluminiumkondensatoren sind aufgrund ihrer hohen ESR eine gute Wahl für die Abschwächung, doch lässt sich notwendigenfalls auch ein diskreter Widerstand in Reihe mit  $C_D$  schalten, um einen ausreichend hohen Abschwächungswiderstand zu gewährleisten. In diesem Beispiel wollen wir annehmen, dass  $C_{IN1}$  bei  $V_{IN} = 10 \text{ V}$  ( $C_{IN1} = 10 \mu\text{F}$ ) 100 % seiner Nennkapazität aufweist. Deswegen bieten 47  $\mu\text{F}$  das Vier- bis Fünffache der erforderlichen Kapazität. Eine geeignete Option wäre ein 47- $\mu\text{F}$ -Aluminium-Elektrolyt-Kondensator für 50 V mit einer Impedanz von 300 m $\Omega$  und einem Effektivstrom (Nennwert) von 500 mA. Ein solcher Kondensator würde nicht nur jegliche potenziell auftretende Schwingung abschwächen, sondern auch die Spitze-Spitze-Welligkeit von Eingangs- wie Ausgangsspannung reduzieren.

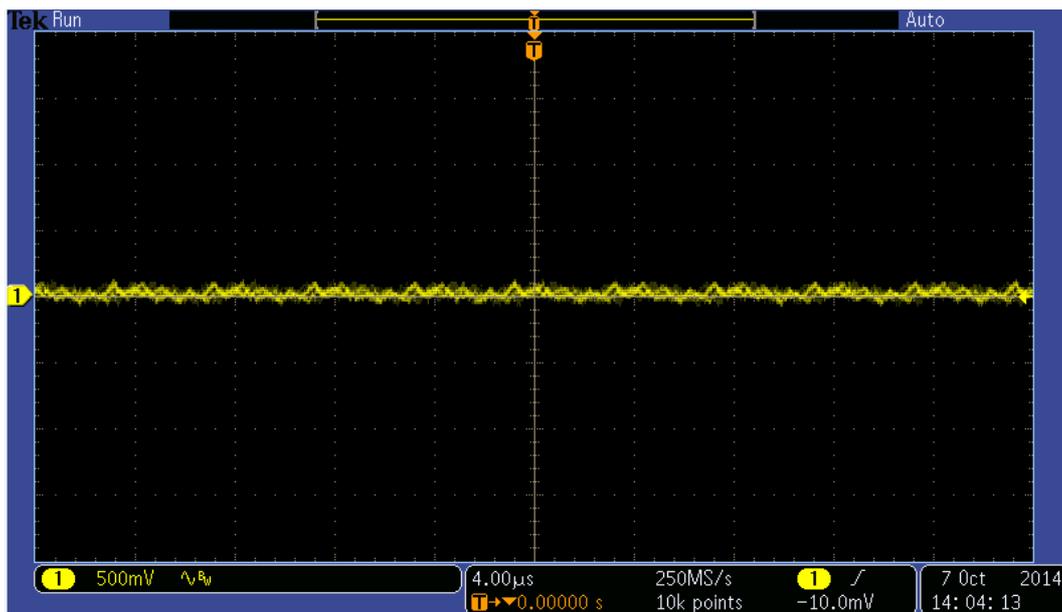


Abbildung 12: Welligkeit der Eingangsspannung bei Abschwächungskondensator  $C_D$  parallel zu  $C_{IN1}$ .  $V_{IN} = 10,0 \text{ V}$ ,  $I_o = 1,0 \text{ A}$

### 4.8. Ausgangsspannung, UVLO und Softstarter

Die Ausgangsspannung wird mit einem Spannungsteiler aus SMD Widerständen unter Verwendung derselben Gleichungen wie beim Abwärtsregler ausgewählt. Wählen Sie für den oberen Rückkopplungswiderstand  $R_{FBT}$  einen Wert zwischen 10 und 50 k $\Omega$  aus. In unserem Beispiel hat  $R_{FBT}$  20 k $\Omega$ . Der untere Widerstand  $R_{FBB}$  wird dann wie folgt berechnet:

$$R_{FBB} = \frac{R_{FBT}}{\frac{V_{OUT}}{0.804 \text{ V}} - 1} = \frac{20 \text{ k}\Omega}{\frac{12 \text{ V}}{0.804 \text{ V}} - 1} = 1.43 \text{ k}\Omega \quad (20)$$

(Festlegung  $R_{FBB} = 1.43 \text{ k}\Omega$ )

## ANWENDUNGSHINWEIS

Entwerfen eines Inverswandlers mit dem  
Magl<sup>3</sup>C Power Modul WPMDH1302401/171032401  
(6 - 42 V<sub>IN</sub> / 3 A / 5 - 24 V<sub>OUT</sub>)



Der Softstarter bleibt ebenfalls unverändert. Die eingangsseitige UVLO (Spannungsabfallsperre) dagegen erfordert einige Änderungen. Wird zwischen V<sub>IN</sub> und -V<sub>OUT</sub> ein Widerstandsteiler eingesetzt, dann bleibt der Anstiegsgrenzwert (also der Grenzwert für die Einschaltphase) mit dem eines Abwärtsreglers identisch. Das liegt daran, dass das -V<sub>OUT</sub>-Netz vor Beginn der Anstiegsphase des Inverswandlers bei ca. 0 V liegt; sobald jedoch der Reglerbetrieb beginnt, fällt die Spannung am GND-Pin des Moduls um den Wert der Ausgangsspannung und verschiebt so den fallenden UVLO-Grenzwert (also den Grenzwert für die Abschaltphase) um einen Betrag, der der Ausgangsspannung entspricht. Es muss sichergestellt sein, dass die maximale Betriebsspannung von 6,5 V am EN-Pin nicht überschritten wird, sobald das Modul sich im Betrieb befindet und die Gesamtspannung zwischen den V<sub>IN</sub>- und GND-Pins gleich V<sub>IN</sub> + V<sub>OUT</sub> ist. Auf den Standarddemobaugruppen für die Magl<sup>3</sup>C-Stromversorgungsmodule befindet sich eine 5,1-V-Zenerdiode, die zur Vermeidung von Überspannungen den EN- mit dem GND-Pin verbindet. Diese Zenerdiode muss bei allen Konstruktionen vorhanden sein, bei denen die UVLO mit einem einfachen Widerstandsteiler realisiert wird.

### 4.8.1. Schiebeschaltungen für Präzisions-UVLOs oder Logikeinschaltung

Bei einigen Anwendungen kann die große Hysterese zwischen dem steigenden UVLO-Einschaltgrenzwert (V<sub>EN</sub>) und dem fallenden Abschaltgrenzwert (V<sub>SD</sub>) von Vorteil sein, doch in den meisten Fällen beträgt die Differenz zwischen V<sub>EN</sub> und V<sub>SD</sub> weniger als 1 V. Wenn Sie eine kleine Hysterese erzielen möchten, benötigen Sie einen Schiebekomparator. Abbildung 13 zeigt einen beispielhaften Aufbau aus kostengünstigen Bauteilen.

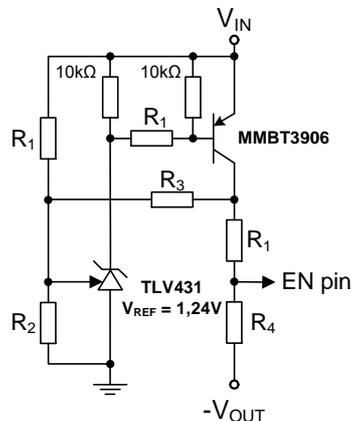


Abbildung 13: Schiebekomparator für Präzisions-UVLOs mit geregelter Hysterese

Die folgenden Gleichungen definieren die Widerstandswerte, die zur Festlegung der gewünschten UVLO-Grenzwerte erforderlich sind:

$$V_{EN} = 9,5 \text{ V} \quad V_{SD} = 9,0 \text{ V}$$

$$R_1 = (V_{EN} - V_{REF}) \cdot 10 \text{ k}\Omega = (9,5 \text{ V} - 1,24 \text{ V}) \cdot 10 \text{ k}\Omega = 82,6 \text{ k}\Omega \quad (21)$$

(Festlegung  $R_1 = 82,5 \text{ k}\Omega$ )

Die logische Einschaltspannung am EN-Pin sollte auf einen Wert von etwa 3 V festgelegt werden.

## ANWENDUNGSHINWEIS

Entwerfen eines Inverswandlers mit dem  
Mag<sup>3</sup>C Power Modul WPMDH1302401/171032401  
(6 - 42 V<sub>IN</sub> / 3 A / 5 - 24 V<sub>OUT</sub>)



$$R_4 = \frac{3 \text{ V} \cdot R_1}{V_{\text{OUT}} + V_{\text{EN}} - 3 \text{ V}} = \frac{3 \text{ V} \cdot 82.5 \text{ k}\Omega}{12 \text{ V} + 9.5 \text{ V} - 3 \text{ V}} = 13.4 \text{ k}\Omega \quad (22)$$

(Festlegung  $R_4 = 13.7 \text{ k}\Omega$ )

$$R_3 = \frac{R_1 \cdot (V_{\text{SD}} + V_{\text{OUT}})}{V_{\text{EN}} - V_{\text{SD}}} - R_1 - R_4 \quad (23)$$

$$R_3 = \frac{82.5 \text{ k}\Omega \cdot (9 \text{ V} + 12 \text{ V})}{9.5 \text{ V} - 9 \text{ V}} - 82.5 \text{ k}\Omega - 13.4 \text{ k}\Omega = 3.37 \text{ M}\Omega$$

(Festlegung  $R_3 = 3.4 \text{ M}\Omega$ )

$$R_2 = \frac{R_1 \cdot V_{\text{REF}} \cdot (R_1 + R_3 + R_4)}{(R_1 + R_3 + R_4) \cdot (V_{\text{EN}} - V_{\text{REF}}) - R_1 \cdot (V_{\text{OUT}} + V_{\text{REF}})} \quad (24)$$

$$R_2 = \frac{82.5 \text{ k}\Omega \cdot 1.24 \text{ V} \cdot (82.5 \text{ k}\Omega + 3.4 \text{ M}\Omega + 13.7 \text{ k}\Omega)}{(82.5 \text{ k}\Omega + 3.4 \text{ M}\Omega + 13.7 \text{ k}\Omega) \cdot (9.5 \text{ V} - 1.24 \text{ V}) - 82.5 \text{ k}\Omega \cdot (12 \text{ V} + 1.24 \text{ V})} = 12.9 \text{ k}\Omega$$

(Festlegung  $R_2 = 13 \text{ k}\Omega$ )

Die Bezugnahme des Moduls auf das -V<sub>O</sub>-Netz modifiziert auch die Schnittstelle zum Ein- oder Ausschalten über andere ICs, Mikrocontroller usw. mithilfe von CMOS- oder TTL-Logikpegeln. Wie wir auf der linken Seite von Abbildung 3 sehen können, benötigen wir einen P-MOSFET und zwei Widerstände. R<sub>ENT</sub> und R<sub>ENB</sub> sollten jeweils auf 10 k $\Omega$  festgelegt sein.

## ANWENDUNGSHINWEIS

Entwerfen eines Inverswandlers mit dem  
MagI<sup>3</sup>C Power Modul WPMDH1302401/171032401  
(6 - 42 V<sub>IN</sub> / 3 A / 5 - 24 V<sub>OUT</sub>)



### 5. Verwenden der Abwärtsregler-Demobaugruppe für die Inverswandlung

Zum testen der MagI<sup>3</sup>C-Stromversorgungsmodule als Inversregler sind nur ein paar Handgriffe und ein Lötcolben erforderlich. Zum Erstellen der in Abschnitt 3 entworfenen Schaltung verwenden wir als Ausgangsbasis die Demobaugruppe WPMDH1302401JT. Gehen Sie nun wie folgt vor:

1. Als Eingangskondensatoren kommen ursprünglich zwei MLCCs (1210, X5R, 50 V, 10 µF) zum Einsatz. Belassen Sie einen davon als CIN1 auf der Platine, entfernen Sie den zweiten, positionieren Sie ihn aufrecht und verbinden Sie ihn über eine möglichst kurze Leitung mit dem ehemaligen Knoten „Vout“, der nun als Betriebserde fungiert. Dies ist jetzt CIN2.
  - a. Um die in Abschnitt 3.7.2 beschriebene subharmonische Schwingung zu verhindern, fügen Sie einen für mindestens 47 µF/50 V ausgelegten Aluminium-Elektrolyt-Kondensator zwischen den Knoten V<sub>IN</sub> und -V<sub>OUT</sub> ein.
2. Zur Verschiebung des Einschaltgrenzwerts (V<sub>IN</sub> ansteigend) auf 9,5 V ersetzen Sie RENB durch einen 18-kΩ-Widerstand (1 %). Denken Sie daran, dass der Abschaltgrenzwert um den Wert der Ausgangsspannung (12 V) angehoben wird, sodass der Regler in der Praxis so lange im Betrieb bleibt, bis die Eingangsspannung auf nahezu null fällt.
  - a. So verwenden Sie eine Logikeinschaltung: Entfernen Sie RENT und verbinden Sie mit einem 12-kΩ-Durchsteckwiderstand V<sub>IN</sub> mit der Quelle eines Durchsteck-P-MOSFET. Verbinden Sie die Basis mit der Betriebserde, den Drain mit dem EN-Pin des Moduls.
  - b. Zur Festlegung der Hysterese entsprechend unserer Definition in Abschnitt 4.8.1 entfernen Sie sowohl RENT als auch RENB. Bauen Sie die Schaltung aus Abbildung 13 unter Beachtung der berechneten Werte in einem kleinen Teilbereich der Lochrasterplatine auf und verbinden Sie sie dann über möglichst kurze Kabel mit den Knoten V<sub>IN</sub>, GND, -V<sub>OUT</sub> und EN der Demobaugruppe.
3. Bringen Sie entsprechende Aufkleber an oder streichen Sie die vorhandene Markierung „GND“ durch und beschriften Sie sie als „-V<sub>OUT</sub>“ neu. Dasselbe tun Sie mit der Originalmarkierung „V<sub>OUT</sub>“, die Sie mit „GND“ beschriften. Die Verwendung eines andersfarbigen Anschlussdrahts (beispielsweise in blau) erinnert den Benutzer daran, dass die Ausgangsspannung negativ ist.
  - a. Denken Sie daran, dass viele elektronische Lasten nur mit positiven Spannungen funktionieren, weswegen die Betriebserde der modifizierten Demobaugruppe mit dem positiven Eingang der elektronischen Ladung und die negative Ausgangsspannung der Demobaugruppe mit dem negativen Eingang der elektronischen Last verbunden werden sollte.

# ANWENDUNGSHINWEIS

Entwerfen eines Inverswandlers mit dem  
 MagI<sup>3</sup>C Power Modul WPMDH1302401/171032401  
 (6 - 42 V<sub>IN</sub> / 3 A / 5 - 24 V<sub>OUT</sub>)

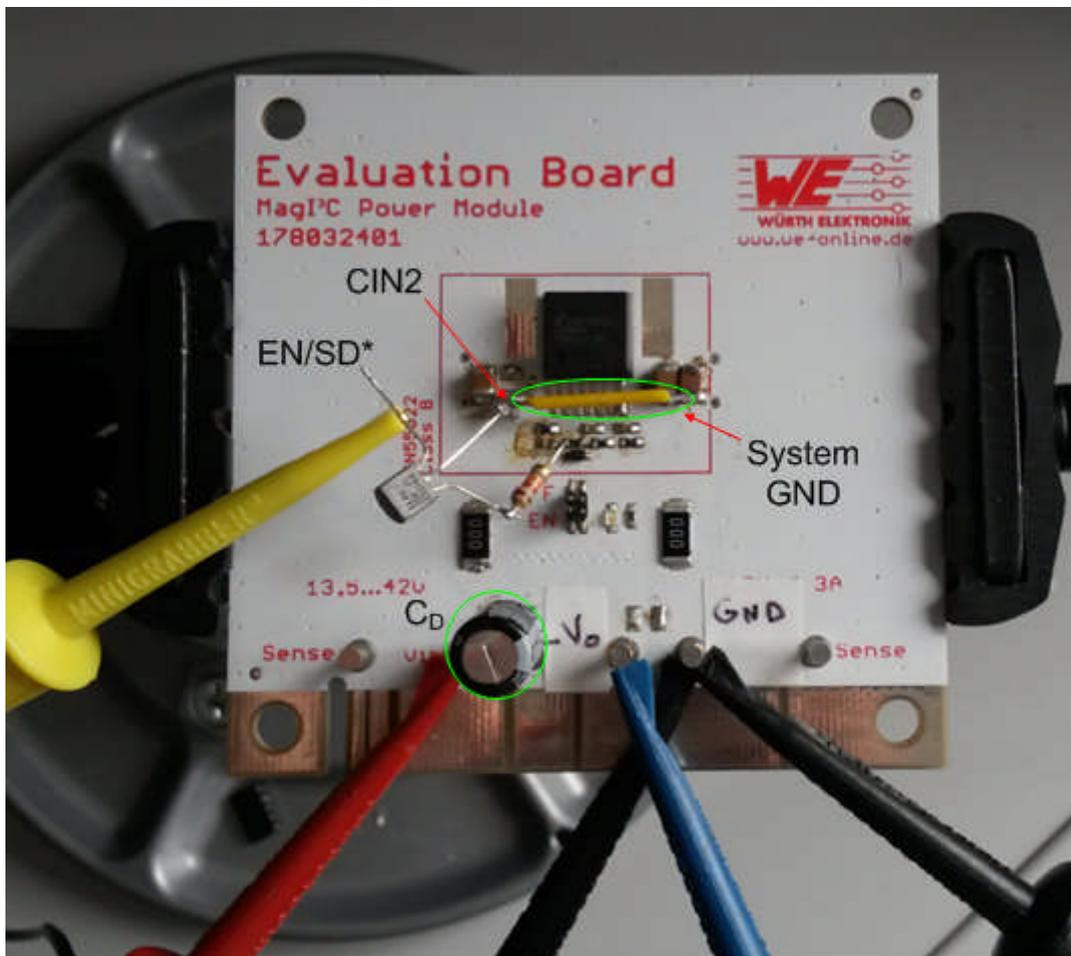


Abbildung 14: Demobaugruppe 178032401 mit Modifikationen zur Verwendung als Inverswandler

## 6. Thermische Aspekte

Die im Datenblatt zur 178032401 im Abschnitt „Power Loss and Board Thermal Requirements“ beschriebene Theorie lässt sich mit wenigen Änderungen auch auf den Inversregler anwenden. Sehen Sie sich zunächst einmal die beiden folgenden Diagramme aus dem Datenblatt an:

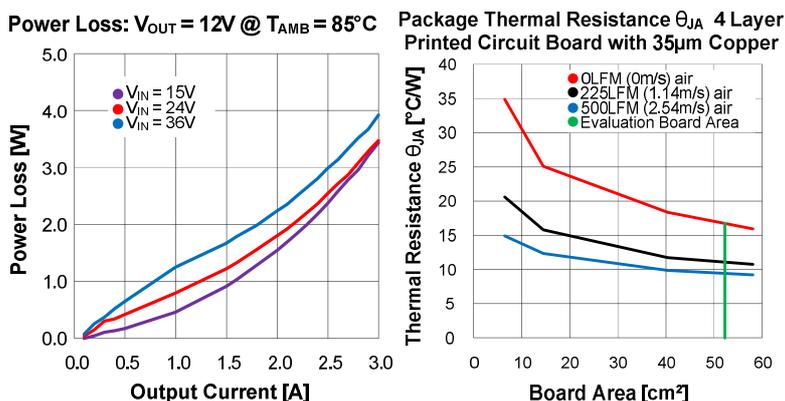


Abbildung 15: Daten zum thermischen Verhalten (aus dem Datenblatt zur 178032401)

# ANWENDUNGSHINWEIS

## Entwerfen eines Inverswandlers mit dem MagI<sup>3</sup>C Power Modul WPMDH1302401/171032401 (6 - 42 V<sub>IN</sub> / 3 A / 5 - 24 V<sub>OUT</sub>)



Zur Verwendung der Kennlinien aus Abbildung 15 setzen Sie den in Gleichung 1 berechneten Drosselstrom  $I_{L-AVG}$  als Ausgangsstrom ein. Der denkbar schlimmste Fall in Sachen Verlustleistung liegt vor, wenn die Eingangsspannung am niedrigsten und folglich der Drosselstrom am höchsten ist. Setzen Sie  $V_{INMIN} + |V_O|$  anstelle von  $V_{IN}$  in die Kennlinie für Verlustleistung bezogen auf den Ausgangsstrom ein. In diesem Beispiel sind dies  $10\text{ V} + 12\text{ V} = 22\text{ V}$ , d. h., die rote Kennlinie für  $V_{IN} = 24\text{ V}$  ist die nächstgelegene. Zur Erinnerung: Der durchschnittliche Drosselstrom liegt bei 2,45 A, mithin lässt sich eine Verlustleistung  $P_D$  von ca. 2,5 W aus der Kennlinie ablesen. Dem Datenblatt lässt sich entnehmen, dass der maximale Wärmewiderstand, der erforderlich ist, um die Modultemperatur unter dem Grenzwert von 125 °C zu halten, wie folgt berechnet wird:

$$\theta_{ja_{MAX}} = \frac{T_{J_{max}} - T_A}{P_D} = \frac{125^\circ\text{C} - 85^\circ\text{C}}{2.5\text{ W}} = 16 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} \quad (25)$$

Die Kennlinie des Wärmewiderstands bezogen auf den Platinenbereich zeigt, dass etwa 55 cm<sup>2</sup> benötigt werden, um entsprechend viel Leistung abzuführen und die Modultemperatur unter 125 °C zu halten.

## 7. Stückliste

Index	Beschreibung	Größe	Wert	Best.-Nr.
U1	MagI <sup>3</sup> C-Stromversorgungsmodul	7-poliges VDRM	U <sub>In</sub> : 6 - 42 V, U <sub>Out</sub> : 0,8 - 6 V, I <sub>out</sub> : 3 A	<a href="#">171 032 401</a>
CIN1, CIN2, Co1, Co2	Keramikvielschicht-Chipkondensatoren (MLCC)	1210	10 µF, 50 V, ±20 %, X5R	
CD	Aluminium-Elektrolyt-Kondensator	8 × 11,5 mm	100 µF, 0,87 A, 0,3 Ω	EEUFR1H101
CSS	Keramikvielschicht-Chipkondensator (MLCC)	0603	4,7 nF, 50 V, ±10 %, X5R	
RENB, RENT	Dickschichtwiderstand	0603	11,8 kΩ, 1 %	
RFBB	Dickschichtwiderstand	0603	1,43 kΩ, 1 %	
RFBT	Dickschichtwiderstand	0603	20 kΩ, 1 %	
RON	Dickschichtwiderstand	0603	187 kΩ, 1 %	

# ANWENDUNGSHINWEIS

Entwerfen eines Inverswandlers mit dem  
MagI<sup>3</sup>C Power Modul WPMDH1302401/171032401  
(6 - 42 V<sub>IN</sub> / 3 A / 5 - 24 V<sub>OUT</sub>)



## 8. Leiterplattenlayout

Der nun folgende Abschnitt enthält eine Schrittanleitung, um eine Platine mit maximaler Effizienz, Wärmemanagement und elektromagnetischer Kompatibilität (EMV) zu erstellen. Abbildung 16 zeigt das vollständige Schaltbild einschließlich optionaler Eingangs- und Ausgangsfilter für weitere Schaltungskonfigurationen oder -anforderungen.

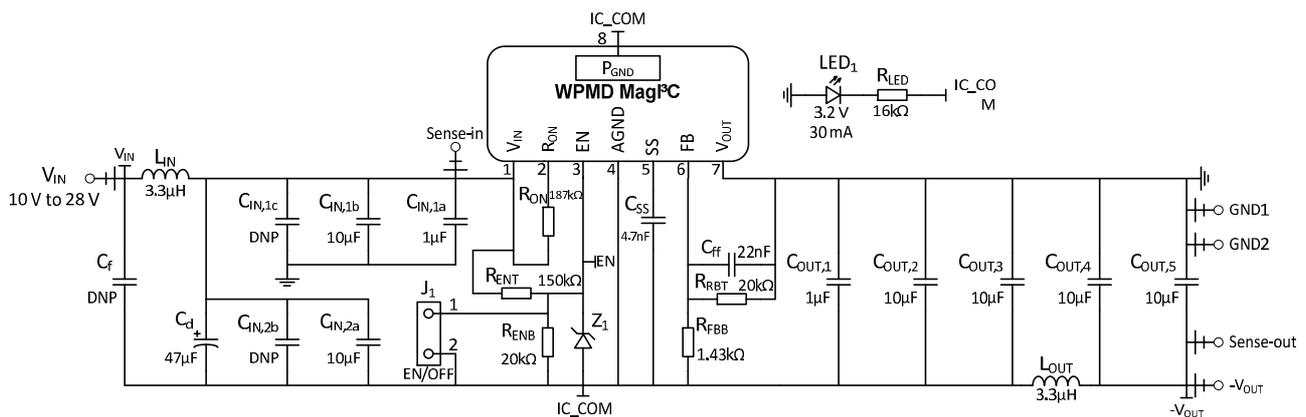


Abbildung 16: Vollständiges Schaltbild für Platinenlayout

Ein optionales Bauteil, das auf diesem Schaltbild nicht dargestellt ist, ist ein Kühlkörper für das MagI<sup>3</sup>C Modul (Fischer FK 244 08 D PAK). Die beiden 3,5 mm x 9 mm großen Deckschichtpads auf beiden Seiten des Moduls (vgl. Abbildungen 17 und 18) dienen der Montage dieses Kühlkörpers.

### 8.1. Einsetzen des Moduls und der Eingangskondensatoren aus Keramik

#### 8.1.1. Schalt- und Überschwingfrequenz

Grundsätzlich gibt es zwei Rauschgrundfrequenzen bei hart geschalteten Wandlern: Die Schaltfrequenz und die Überschwingfrequenz. „Überschwingen“ bezeichnet hierbei die Schwingung, die auftritt, wenn in der parasitären Kapazität von Halbleiterschaltern gespeicherte Energie beim Öffnen oder Schließen freigesetzt wird und dann mit der parasitären Induktivität in der Schaltung überschwingt. Das Überschwingen tritt üblicherweise bei Frequenzen auf, die mehrere Größenordnungen höher als die Schaltfrequenz sind – meist im Bereich zwischen 50 und 200 MHz. Im Stromkreis mit den stärksten elektromagnetischen Störungen (EMV) sind der oder die Eingangskondensatoren mit den internen Leistungs-MOSFETS der MagI<sup>3</sup>C-Stromversorgungsmodule verbunden. Deswegen ist es zur maximalen Absenkung der abgestrahlten EMV unabdingbar, den umschlossenen Bereich möglichst klein zu halten. Positionieren Sie die kleinsten Kondensatoren möglichst nah an den Pins bzw. Pads des Moduls, um beim Ausfiltern des Überschwingens maximale Wirkung zu erzielen. In diesem Kontext bezeichnet „klein“ sowohl die Kapazität als auch seine Abmessungen. Je höher die Frequenz eines Signals, desto besser strahlt es bei abnehmender Schleifenlänge. Aus diesem Grund werden höhere Frequenzen durch niedrigere Kapazität effizienter ausgefiltert. Gleichermäßen wichtig ist die physische Größe der Kondensatoren, denn je kleiner der Kondensator ist, desto niedriger ist seine parasitäre Induktivität (ESL). Auch deswegen ist der physisch kleinere Kondensator der bessere Filter für höherfrequente Störungen.

#### 8.1.2. Führung der beiden Eingangskreise

Für den Inverswandler gibt es zwei Eingangskreise: einen zwischen V<sub>IN</sub>, den MOSFETS und GND und einen zweiten zwischen V<sub>IN</sub>, den MOSFETS und -V<sub>O</sub>. Hier ist ein Kompromiss erforderlich, wobei dem Kreis zwischen

## ANWENDUNGSHINWEIS

Entwerfen eines Inverswandlers mit dem  
Mag<sup>3</sup>C Power Modul WPMDH1302401/171032401  
(6 - 42 V<sub>IN</sub> / 3 A / 5 - 24 V<sub>OUT</sub>)



V<sub>IN</sub>, MOSFETS und -V<sub>O</sub> Vorrang eingeräumt werden sollte, da hier der höhere Spitze-Spitze-Rippelstrom auftritt und deswegen mehr EMV abgestrahlt wird als beim Kreis zwischen V<sub>IN</sub>, MOSFETS und GND.

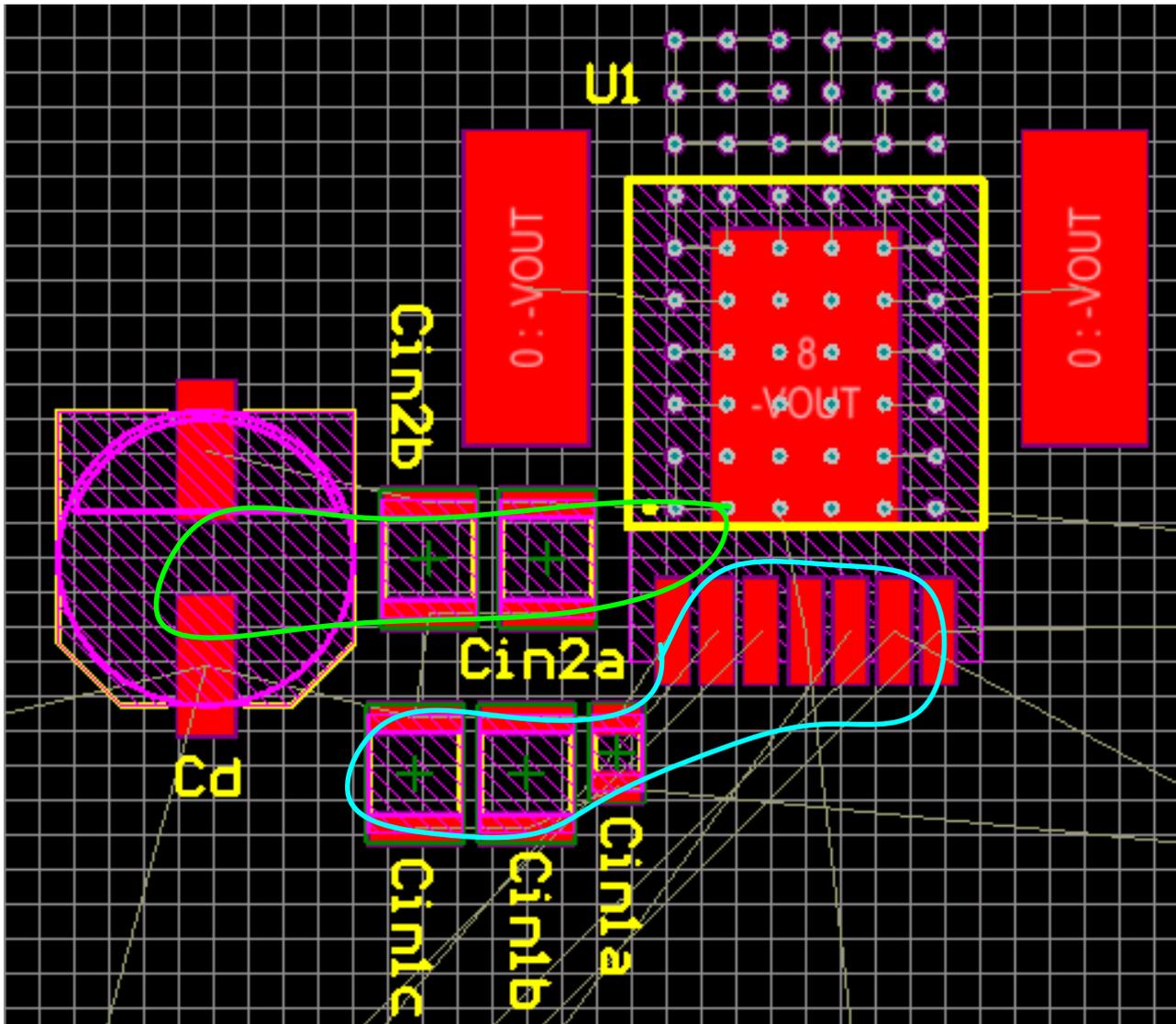


Abbildung 17: Positionieren Sie die Eingangskondensatoren mit möglichst kleiner Schleife rechts neben den Pins bzw. Pads des Moduls. Die Schleife zwischen V<sub>IN</sub>, MOSFETS und V<sub>O</sub> ist grün gekennzeichnet, der Kreis zwischen V<sub>IN</sub>, MOSFETS und GND blau.

### 8.1.3. Positionieren der größeren Kondensatoren mit höherer Kapazität in größerem Abstand

Der Kondensator C<sub>d</sub> bietet eine EingangsfILTERwirkung und verringert zudem den Rippelstrom/-spannung. Er kann weiter entfernt vom Modul angebracht werden, da es sich hierbei um einen Kondensator mit höherer Kapazität und wesentlich höherer ESL handelt, der aufgrund dessen nur geringe Auswirkungen auf die hochfrequente EMV hat.



## ANWENDUNGSHINWEIS

Entwerfen eines Inverswandlers mit dem  
MagI<sup>3</sup>C Power Modul WPMDH1302401/171032401  
(6 - 42 V<sub>IN</sub> / 3 A / 5 - 24 V<sub>OUT</sub>)



den Pins des Moduls minimiert, dann verringert sich auch ihre Anfälligkeit gegenüber der Störstrahlung, die von den MOSFETS, der Drossel und ggf. vorhandenen externen Störquellen erzeugt wird.

### 8.3.1. Anordnen des Ausgangsspannungs-Widerstandsteilers in der Nähe des Moduls

Ein häufig anzutreffender Layoutfehler besteht in der Anordnung des Ausgangsrückführungs-Widerstandsteilers (R<sub>fbt</sub> und R<sub>fb</sub>) in der Nähe des letzten Ausgangskondensators (je nach Verwendung des Ausgangsfilters C<sub>O3</sub> oder C<sub>O4</sub>). Dies ist insofern ein Fehler, als die Impedanz der Leiterbahn, die den Mittelpunkt des Teilers mit dem FB-Pin verbindet, sehr hoch ist – es handelt sich um den Eingang eines Komparators oder eines Operationsverstärkers. Diese hohe Impedanz wiederum macht die Leiterbahn extrem anfällig für Störeinstreuungen. Die Leiterbahn muss deswegen möglichst kurz gehalten werden, indem R<sub>fbt</sub> und R<sub>fb</sub> möglichst nah am FB- und AGND-Pin positioniert werden.

### 8.3.2. Verwenden einer zentralen Bezugsquelle für die Analogbauteile

Eine weitere nützliche Vorgehensweise besteht darin, alle Analogbauteile, die mit dem AGND-Pin des Moduls verbunden sind, über eine oberseitige Leiterbahn oder ein Kupferfläche zu führen und diese dann an nur einer Stelle mit dem AGND-Pin zu verbinden. (Beachten Sie dabei, dass der AGND-Pin elektrisch vor dem Ausgangsfilter mit dem Knoten -V<sub>O</sub> verbunden ist; im Schaltbild in Abbildung 16 ist dieses Netz als „IC\_COM“ bezeichnet.) Der AGND-Pin wird dann über eine kurze Bahn mit dem Wärmeleitpad des Moduls verbunden, das den PGND-Pins („Power Ground“) eines normalen Schaltreglers oder Steuer-ICs entspricht. Diese Punktverbindung dient der Bereitstellung einer gemeinsamen Bezugsspannung für alle Analogfunktionen. Diese relative Bezugsspannung zwischen dem MagI<sup>3</sup>C-Stromversorgungsmodul und den Analogkomponenten bleibt in diesem Fall auch dann gleich, wenn elektrische Störungen in die AGND-Leiterbahn oder das Profil einstreuen.

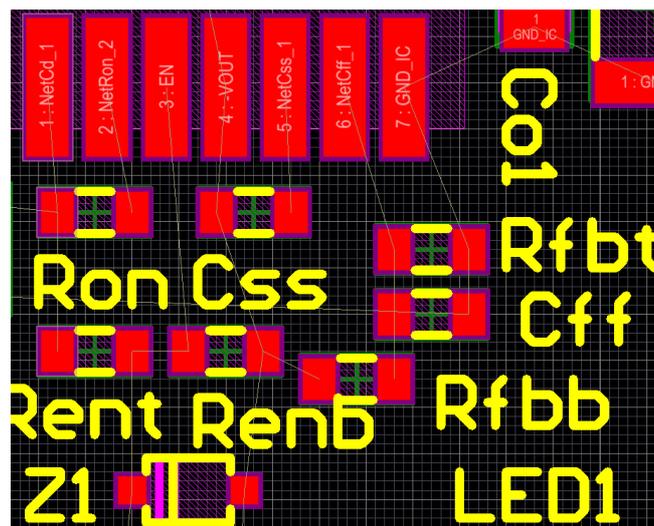


Abbildung 19: Anordnung der Analogbauteile, mit Detaildarstellungen rechts

### 8.4. Führen der Leistungspolygone auf der Leiterplattenoberseite

Für die oberseitigen Stromwege, über die Eingangs- und Ausgangsstrom übertragen und an die die Eingangs- und Ausgangskondensatoren angeschlossen sind, sollten breite Leiterbahnen bzw. massive Polygone verwendet werden. Bei Bauteilen mit hoher Leistungsdichte – und um ein solches handelt es sich beim MagI<sup>3</sup>C-

# ANWENDUNGSHINWEIS

Entwerfen eines Inverswandlers mit dem  
MagI<sup>3</sup>C Power Modul WPMDH1302401/171032401  
(6 - 42 V<sub>IN</sub> / 3 A / 5 - 24 V<sub>OUT</sub>)



Stromversorgungsmodul – stellt das Kupferprofil zwischen dem Versorgungspad und Pin 4 des Moduls auch den wesentlichen Wärmeabfuhrweg dar. Beachten Sie, dass dieses Netz beim Inversregler die negative Ausgangsspannung -V<sub>O</sub> vor dem Ausgangsfilter ist, die als „IC\_COM“ beschriftet ist. Wenn man die Polygone/Flächen von Netzen wie V<sub>IN</sub> und GND, -V<sub>O</sub> und GND oder V<sub>IN</sub> und -V<sub>O</sub> nahe aneinander entlangführt, erhöht sich auch die vorteilhafte parasitäre Kapazität zwischen ihnen. Hierdurch verstärkt sich der Wert in der Regel um 100 pF bis 1 nF, was für die Filterung der höchsten Störfrequenzen sehr praktisch ist.

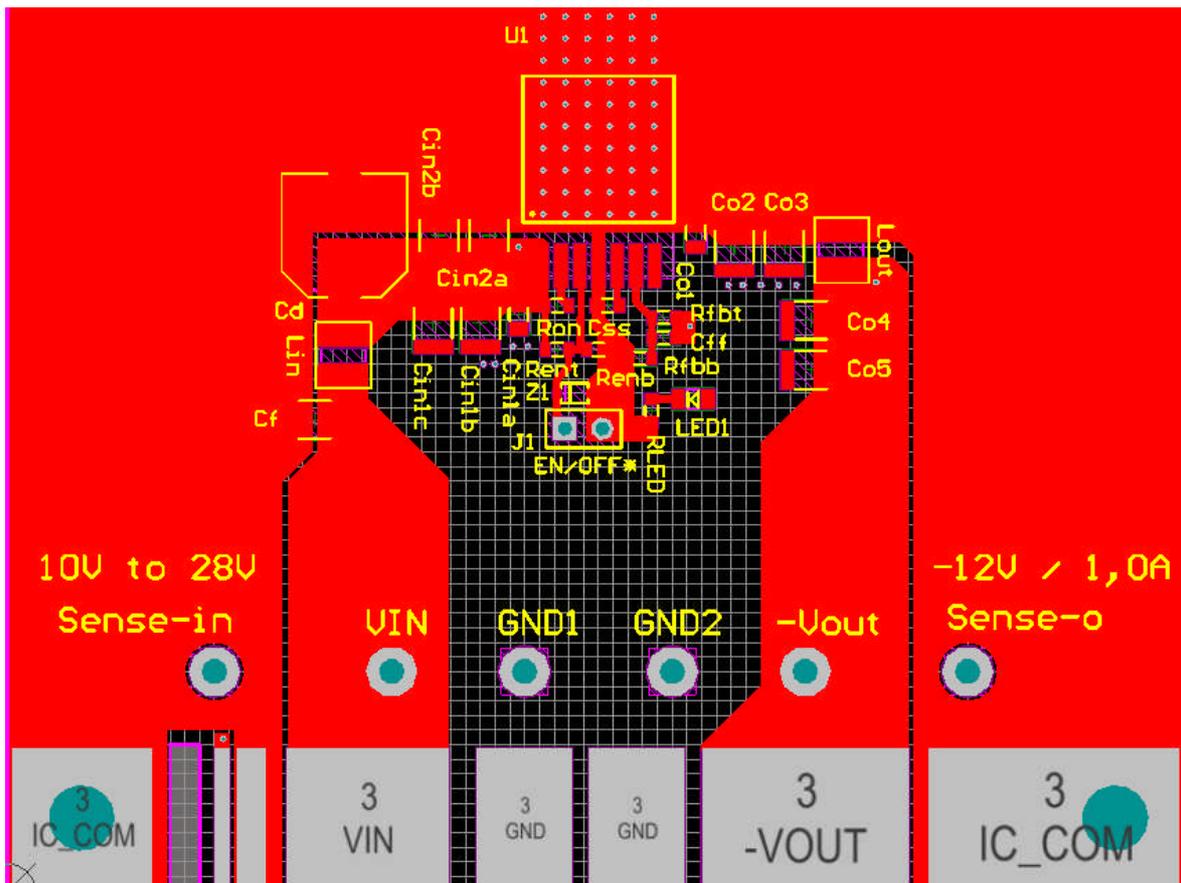


Abbildung 20: Leistungspolygone V<sub>IN</sub>, IC\_COM und -V<sub>O</sub>

## 8.5. Platzieren der Analogbauteile vor dem GND-Polygon

Positionieren Sie zunächst die Bezugsleiterbahn bzw. das Bezugsprofil wie im Abschnitt „Anordnen der Analogbauteile“ beschrieben und in Abbildung 19 gezeigt.

## ANWENDUNGSHINWEIS

Entwerfen eines Inverswandlers mit dem  
MagI<sup>3</sup>C Power Modul WPMDH1302401/171032401  
(6 - 42 V<sub>IN</sub> / 3 A / 5 - 24 V<sub>OUT</sub>)

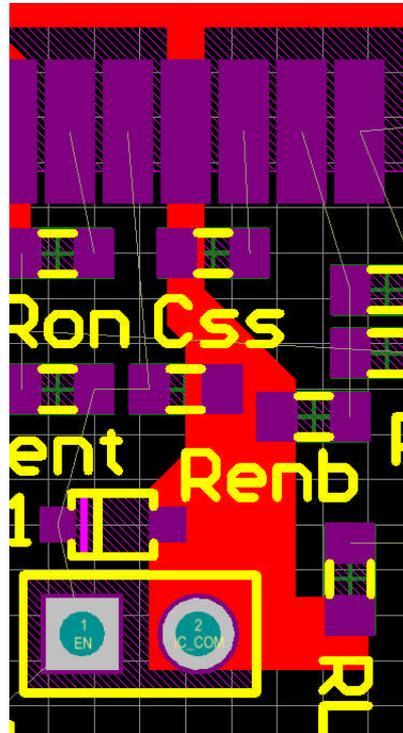


Abbildung 21: Einzelpunktverbindung aller Analogbauteile mit dem AGND-Pin und nachgeschaltet dem Versorgungspad

### 8.6. Layout der Betriebserde

Bei diesem Inverswandler stellt das GND-Netz eine wichtige Verbindung auf der unterseitigen Schicht zwischen den negativen Anschlüssen der Eingangskondensatoren und den positiven Anschlüssen der Ausgangskondensatoren bereit. Dieses Profil sorgt für eine Absenkung der Induktivität im Kreis zwischen V<sub>IN</sub>, MOSFET und GND. Grundsätzlich sollten alle Wege, die Schaltströme übertragen, ohne Wechsel der Schicht und ohne Verwendung von Vias geführt werden, denn diese bilden einen unerwünschten Widerstand und erhöhen zudem noch die Induktivität. Wenn die Verwendung von Vias unvermeidlich ist, verwenden Sie mehrere Vias parallel, um Widerstand und Induktivität zu senken.

## ANWENDUNGSHINWEIS

Entwerfen eines Inverswandlers mit dem  
Mag1<sup>3</sup>C Power Modul WPMDH1302401/171032401  
(6 - 42 V<sub>IN</sub> / 3 A / 5 - 24 V<sub>OUT</sub>)

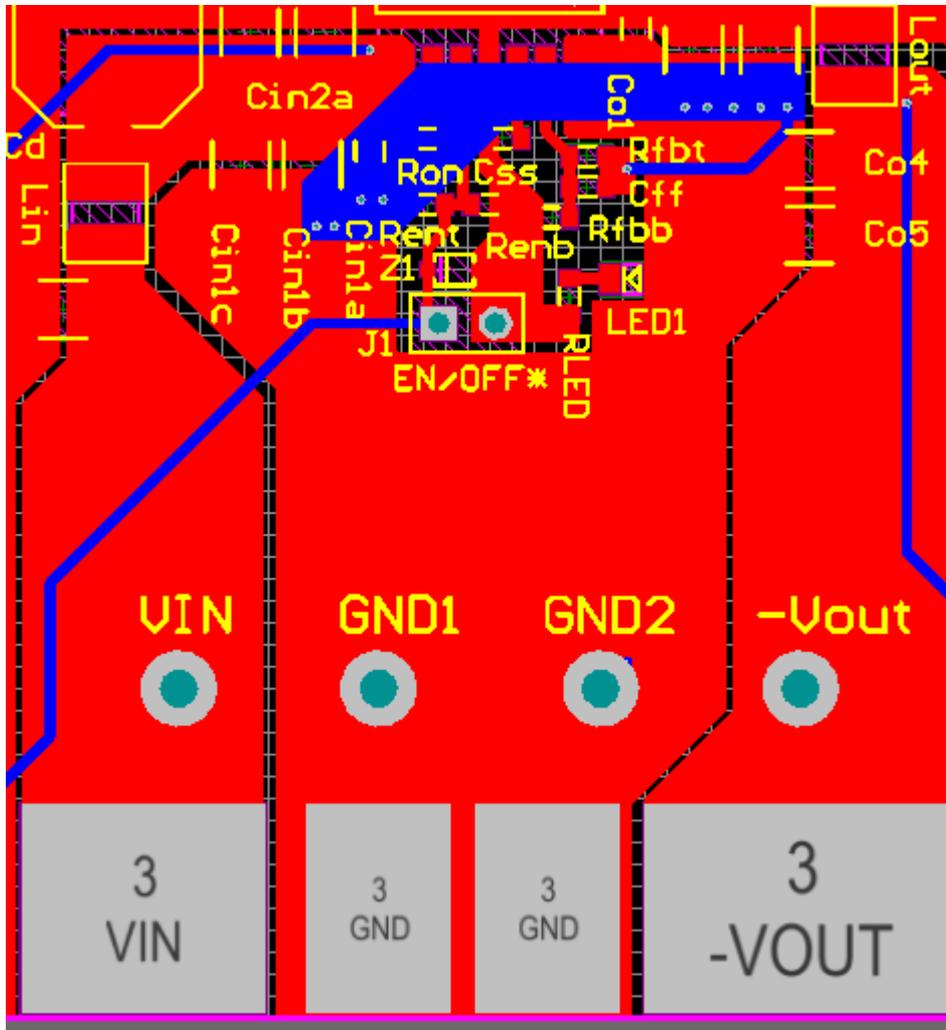


Abbildung 22: GND-Netz, geführt über ober- und unterseitige Leiterplatten-Schichten

### 8.7. Wärmemanagement durch Fluten der unterseitigen Schicht

Das Versorgungspad des Moduls ist mit dem IC\_COM-Netz verbunden, d. h., der größte Teil der unterseitigen Leiterplatten-Schicht sollte mit diesem Netz verbunden sein. Es ist wichtig, die unterseitige Schicht möglichst massiv zu gestalten. Dies ist sowohl in elektrischer Hinsicht (bessere parasitäre Kapazität zwischen V<sub>IN</sub> und GND einerseits und V<sub>IN</sub> und -V<sub>OUT</sub> andererseits) als auch für ein wirkungsvolles Wärmemanagement sinnvoll (ein größerer Kupferbereich ist über die Wärmeabfuhr-Vias mit dem freiliegenden Pad verbunden). Nur die kurze Verbindung am GND-Netz und eine minimale Anzahl von Kelvin-Messleitungen werden über diese Schicht geführt; danach sollte alles übrige mit Kupfer geflutet werden, das mit IC\_COM verbunden ist.

## ANWENDUNGSHINWEIS

Entwerfen eines Inverswandlers mit dem  
MagI<sup>3</sup>C Power Modul WPMDH1302401/171032401  
(6 - 42 V<sub>IN</sub> / 3 A / 5 - 24 V<sub>OUT</sub>)

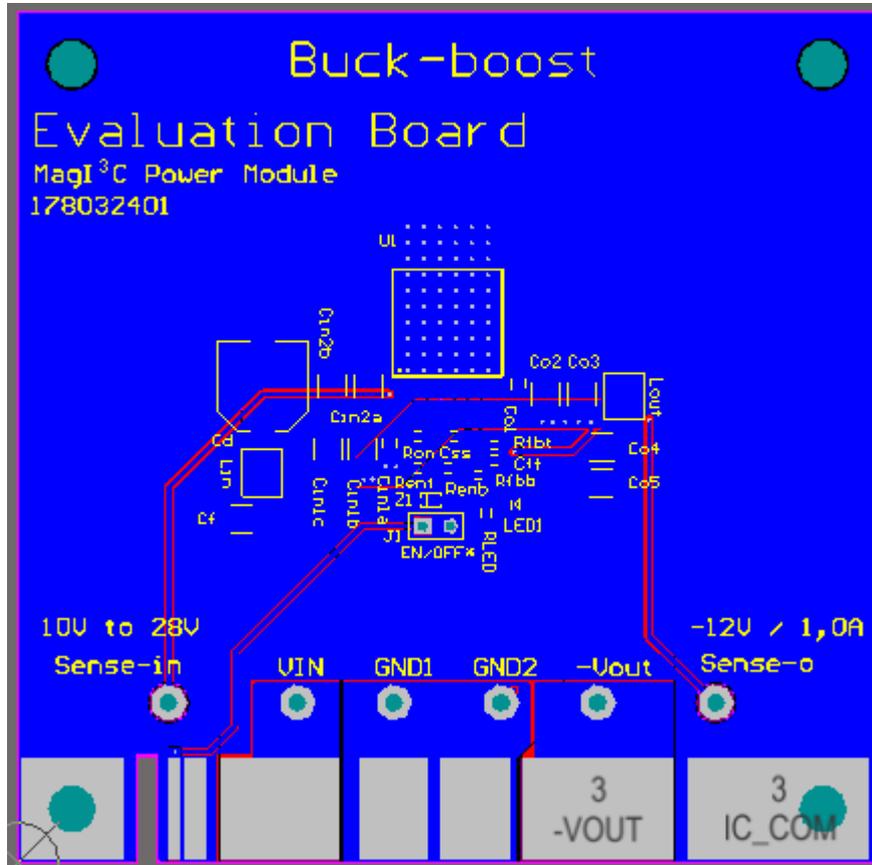


Abbildung 23: Unterseitige Schicht mit der mit IC\_COM verbundenen, mehrere Wärmeabfuhrlöcher aufweisenden Massivebene

## 9. Fazit

Wenn man die VDRM-Module der MagI<sup>3</sup>C-Stromversorgungsmodule genauer betrachtet, kann man damit hervorragende Inversregler konstruieren. Sie stellen eine kompakte Lösung mit geringen EMV-Störungen dar, die negative Ausgangsspannungen für eine Vielzahl von Anwendungen bereitstellen können – und das ohne komplizierten Konstruktionsaufwand.

# ANWENDUNGSHINWEIS

## Entwerfen eines Inverswandlers mit dem Mag1<sup>3</sup>C Power ModuWPMDH1302401/171032401 (6 - 42 V<sub>IN</sub> / 3 A / 5 - 24 V<sub>OUT</sub>)



### WICHTIGER HINWEIS

Der Anwendungshinweis basiert auf unserem aktuellen Wissens- und Erfahrungsstand, dient als allgemeine Information und ist keine Zusicherung der Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG zur Eignung des Produktes für Kundenanwendungen. Der Anwendungshinweis kann ohne Bekanntgabe verändert werden. Dieses Dokument und Teile hiervon dürfen nicht ohne schriftliche Genehmigung vervielfältigt oder kopiert werden. Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG und seine Partner- und Tochtergesellschaften (nachfolgend gemeinsam als „WE“ genannt) sind für eine anwendungsbezogene Unterstützung jeglicher Art nicht haftbar. Kunden sind berechtigt, die Unterstützung und Produktempfehlungen von WE für eigene Anwendungen und Entwürfe zu nutzen. Die Verantwortung für die Anwendbarkeit und die Verwendung von WE-Produkten in einem bestimmten Entwurf trägt in jedem Fall ausschließlich der Kunde. Aufgrund dieser Tatsache ist es Aufgabe des Kunden, erforderlichenfalls Untersuchungen anzustellen und zu entscheiden, ob das Gerät mit den in der Produktspezifikation beschriebenen spezifischen Produktmerkmalen für die jeweilige Kundenanwendung zulässig und geeignet ist oder nicht.

Die technischen Daten sind im aktuellen Datenblatt zum Produkt angegeben. Aus diesem Grund muss der Kunde die Datenblätter verwenden und wird ausdrücklich auf die Tatsache hingewiesen, dass er dafür Sorge zu tragen hat, die Datenblätter auf Aktualität zu prüfen. Die aktuellen Datenblätter können von [www.we-online.com](http://www.we-online.com) heruntergeladen werden. Der Kunde muss produktspezifische Anmerkungen und Warnhinweise strikt beachten. WE behält sich das Recht vor, an seinen Produkten und Dienstleistungen Korrekturen, Modifikationen, Erweiterungen, Verbesserungen und sonstige Änderungen vorzunehmen.

Lizenzen oder sonstige Rechte, gleich welcher Art, insbesondere an Patenten, Gebrauchsmustern, Marken, Urheber- oder sonstigen gewerblichen Schutzrechten werden hierdurch weder eingeräumt noch ergibt sich hieraus eine entsprechende Pflicht, derartige Rechte einzuräumen. Durch Veröffentlichung von Informationen zu Produkten oder Dienstleistungen Dritter gewährt WE weder eine Lizenz zur Verwendung solcher Produkte oder Dienstleistungen noch eine Garantie oder Billigung derselben.

Die Verwendung von WE-Produkten in sicherheitskritischen oder solchen Anwendungen, bei denen aufgrund eines Produktausfalls sich schwere Personenschäden oder Todesfällen ergeben können, sind unzulässig. Des Weiteren sind WE-Produkte für den Einsatz in Bereichen wie Militärtechnik, Luft- und Raumfahrt, Nuklearsteuerung, Marine, Verkehrswesen (Steuerung von Kfz, Zügen oder Schiffen), Verkehrssignalanlagen, Katastrophenschutz, Medizintechnik, öffentlichen Informationsnetzwerken usw. weder ausgelegt noch vorgesehen. Der Kunde muss WE über die Absicht eines solchen Einsatzes vor Beginn der Planungsphase (Design-In-Phase) informieren. Bei Kundenanwendungen, die ein Höchstmaß an Sicherheit erfordern und die bei Fehlfunktionen oder Ausfall eines elektronischen Bauteils Leib und Leben gefährden können, muss der Kunde sicherstellen, dass er über das erforderliche Fachwissen zu sicherheitstechnischen und rechtlichen Auswirkungen seiner Anwendungen verfügt. Der Kunde bestätigt und erklärt sich damit einverstanden, dass er ungeachtet aller anwendungsbezogenen Informationen und Unterstützung, die ihm durch WE gewährt wird, die Gesamtverantwortung für alle rechtlichen, gesetzlichen und sicherheitsbezogenen Anforderungen im Zusammenhang mit seinen Produkten und der Verwendung von WE-Produkten in solchen sicherheitskritischen Anwendungen trägt. Der Kunde hält WE schad- und klaglos bei allen Schadensansprüchen, die durch derartige sicherheitskritische Kundenanwendungen entstanden sind.

### NÜTZLICHE LINKS

Application Notes:

<http://www.we-online.de/app-notes>

**REDEXPERT** Design Tool:

<http://www.we-online.de/redexpert>

Toolbox:

<http://www.we-online.de/toolbox>

Produkt Katalog:

<http://katalog.we-online.de/>

### KONTAKTINFORMATIONEN

Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG

Max-Eyth-Str. 1, 74638 Waldenburg, Germany

Tel.: +49 (0) 7942 / 945 – 0

Email: [appnotes@we-online.de](mailto:appnotes@we-online.de)

Web: <http://www.we-online.de>