

# APPLICATION NOTE



## Verlustfrei gefiltert

ANP009c, VON RANJITH BRAMANPALLI

### 1. Bedarf eines Ausgangsfilters

Schaltregler weisen ausgangsseitig eine Restwelligkeit in ihrer Ausgangsspannung auf, welche nachfolgende Baugruppen stören und zu elektromagnetischen Beeinflussungen führen können. Zur Störunterdrückung werden daher häufig Ausgangsfilter verwendet, welche unter Umständen Einfluss auf die Regelschleife ausüben können. Um Verluste in der Ausgangsleistung zu verhindern, kann dabei eine Kompensation der Regelschleife erforderlich werden. Gleichgültig welche Schaltreglertopologie im Einsatz ist, der Ausgangsstrom verursacht durch den parasitären Serienwiderstand ESR und der parasitären Induktivität ESL des Ausgangskondensators eine unerwünschte Restwelligkeit. In Abhängigkeit des gewählten Kondensatortypen entsteht so eine relativ große Restwelligkeit und weist unterschiedliche Kurvenformen auf. So zeigt beispielsweise ein gängiger Elektrolytkondensator, je nach Ausgangsleistung des Schaltreglers, eine Rippel-Spannung bis zu einigen hundert Millivolt. Bei der Wahl eines Keramikcondensators kann die Rippel-Spannung nur noch einige zehntel Millivolt betragen. Hohe Restwelligkeit ist unerwünscht und kann nachfolgende elektronische Baugruppen stören. Speziell analoge und HF-Schaltkreise erfordern eine stabile, geglättete und saubere Versorgungsspannung. Nicht zu vernachlässigen ist allerdings auch der hochfrequente Anteil an harmonischen Oberschwingungen der Ausgangsspannung, welche zur erhöhten elektromagnetischen Störaussendung führen kann. Ein Ausgangsfilter kann an dieser Stelle die Restwelligkeit reduzieren und hochfrequente Anteile herausfiltern.

### 2. Reduzierung der Restwelligkeit

Um die Restwelligkeit auf wenige Millivolt zu reduzieren und hochfrequente Anteile zu unterdrücken wird in der Praxis üblicherweise auf LC-Tiefpassfilter zurückgegriffen. Abbildung 1 zeigt solch einen Tiefpassfilter, der beispielsweise mit einer ungeschirmten Spule, einer WE-PD2 und einem gebräuchlichen Elektrolytkondensator realisiert werden kann.

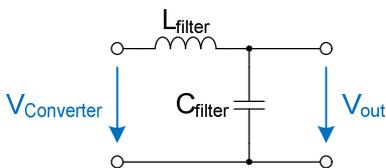


Abbildung 1: einfacher Tiefpassfilter

Ist eine besonders saubere Ausgangsspannung erforderlich, wird der LC- Tiefpassfilter um einen nachfolgenden Tiefpass aus einem Ferrit und einem Kondensator erweitert. Abbildung 2 zeigt einen solchen Zweistufen Ausgangsfilter, welcher kostengünstig beispielweise mit einer Spule WE-PD2 und einem SMD-Ferrit WE-MPSB realisiert werden kann.

## APPLICATION NOTE



### Verlustfrei gefiltert

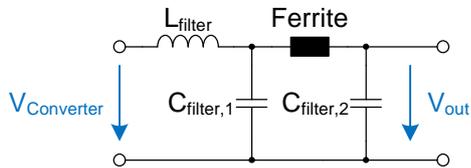


Abbildung 2: Zweistufen Ausgangsfilter

„LFilter“ und „CFilter 1“ fungieren als Tiefpassfilter, welche die Taktfrequenz des Schaltreglers ausfiltern und seine harmonischen Oberschwingungen dämpfen. Weitere hochfrequente Anteile der Ausgangsspannung des Schaltreglers werden durch den SMD-Ferrit in Wärme umgewandelt und zusammen mit „Cfilter 2“ in ihrer Amplitude gedämpft. Solch ein Ausgangsfilter reduziert die Restwelligkeit auf wenige Millivolt und ermöglicht sogar die Versorgung von empfindlichen analogen Schaltungen.

### 3. Gleichstromverluste am Ausgangsfilter

Ab einer gewissen Ausgangsleistung des Schaltreglers führt der Ausgangsfilter zu großen Gleichstromverlusten der Ausgangsleistung und somit zur Reduzierung des Wirkungsgrads des Schaltreglers. Der Gleichstromwiderstand RDC der Spulen und Ferrite erzeugt nun einen signifikanten Spannungsabfall über dem Ausgangsfilter und bewirkt dadurch eine Reduzierung der resultierenden Ausgangsspannung. Abbildung 3 zeigt diesen Effekt.

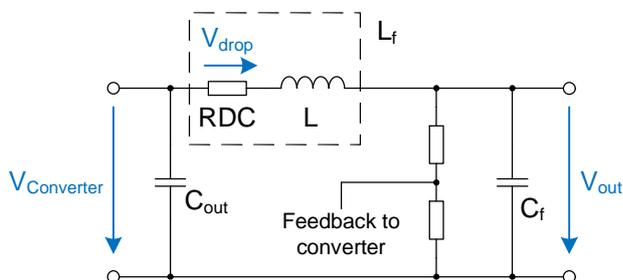


Abbildung 3: Spannungsabfall an der Filterspule

Je nach Abhängigkeit der Bauform der Spule, kann der RDC zwischen wenigen Milliohm bis einigen Ohm betragen und ist daher bei hohen Ausgangsströmen nicht vernachlässigbar. Selbst ein SMD-Hochstromferrit kann einen RDC von bis zu  $0,04 \Omega$  aufweisen. Zur Ermittlung der Ist-Spannung wird bei Schaltreglern die Ausgangsspannung über einen Spannungsteiler abgegriffen und an den Feedback-Anschluss des Schaltregler-IC's geführt. Um Verluste der Ausgangsspannung durch einen Ausgangsfilter zu reduzieren, besteht die Möglichkeit den Ausgangsfilter in die Regelschleife zu implementieren, indem der Ist-Wert nach dem Ausgangsfilter ermittelt wird. Abbildung 4 zeigt die schematische Anordnung dieses Verfahrens.

# APPLICATION NOTE



## Verlustfrei gefiltert

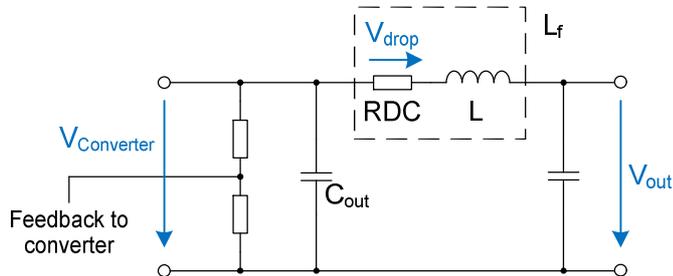


Abbildung 4: Implementierung des Ausgangsfilters in den Regelkreis

## 4. Stabilität des Regelkreises

Filterspule, Ferrit und die Filterkondensatoren führen jedoch zu einer unerwünschten Phasenverschiebung, wodurch die Stabilität der Regelschleife gestört wird. Diese unerwünschte Phasenverschiebung führt zur Verkleinerung der Amplituden- und Phasenreserve. Im Extremfall führt es zu Instabilität und die Ausgangsspannung neigt zum Schwingen. Um die Stabilität zu gewährleisten, wird in der Praxis eine Amplitudenreserve von  $> 12$  dB und eine Phasenreserve von  $> 45^\circ$  verlangt, damit der Regelkreis bei Erregung nicht zum Schwingen neigt. Als dynamisch stabil gilt der Regelkreis, wenn die Schleifenverstärkung auf 0dB fällt, bevor die zugehörige Phasenverschiebung den Wert von  $-180^\circ$  erreicht hat. Dabei soll der Amplitudengang der Schleifenverstärkung den Schnitt der X-Achse, also bei 0 dB mit 20 dB / Dekade durchlaufen. Abbildung 5 zeigt ein Bode-Plot eines stabil-geregelten Buck-Konverters. Dieses Beispiel zeigt eine Amplitudenreserve von 32 dB und eine Phasenreserve von  $56^\circ$ .

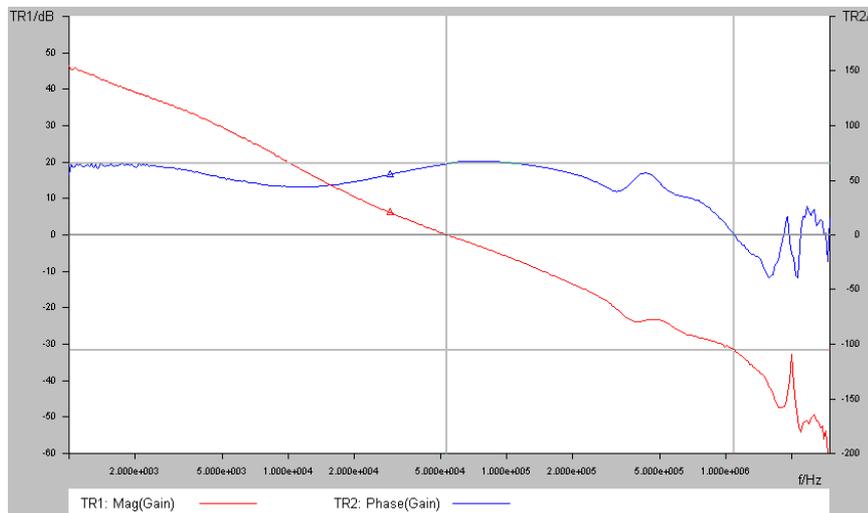


Abbildung 5: Bode-Plot eines stabil-geregelten Schaltreglers

Sind die Stabilitätskriterien eines Schaltreglers mit einem Ausgangsfilter nicht erfüllt, so ist eine Kompensation der Regelschleife erforderlich, um eine stabile Ausgangsspannung zu gewährleisten. Die Stabilität der Regelstrecke übt somit Einfluss auf die Stabilität der Ausgangsspannung aus.

## APPLICATION NOTE



### Verlustfrei gefiltert

## 5. Transient Response

Bei einer Spannungsschwankung am Eingang des Schaltreglers soll die Ausgangsspannung stabil bleiben. Analog hierzu soll bei einem schlagartigen Abfall oder Anstieg des Ausgangsstroms, die Ausgangsspannung schnell nachgeregelt werden. Es ist die Rede vom Transient Response. Abbildung 6 zeigt den Transient Response eines stabil-geregelten Schaltreglers (gelbe Kurve) bei einer Ausgangsspannung von 5 V und einem schlagartigen Lastwechsel von 0 A auf 1 A (grüne Kurve).

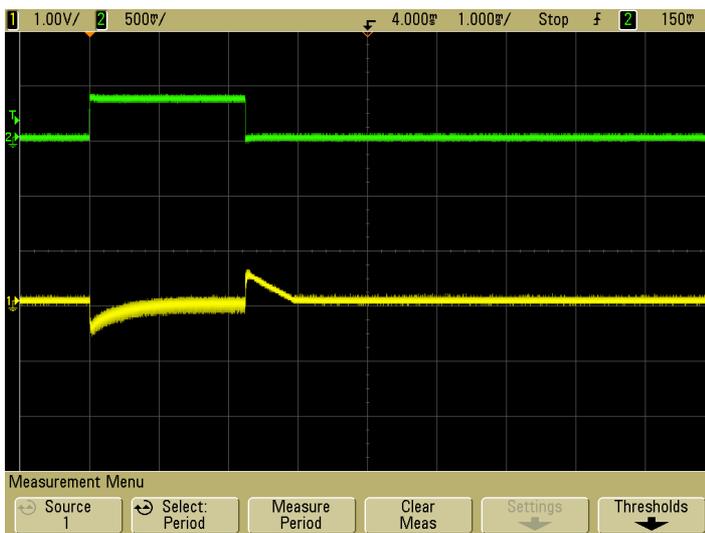


Abbildung 6: Transient Response eines stabil-geregelten Schaltreglers

Eine schlagartige Laständerung soll zu einer schnellen Sprungantwort des Regelkreises führen und die Ausgangsspannung zeitig auf seinen Soll-Wert regeln. Dabei soll die Sprungantwort keine zu große Amplitude in der Ausgangsspannung bewirken, da sonst nachfolgende Baugruppen bei einer Spannungsüberhöhung zerstört werden könnten. Idealerweise soll die Ausgangsspannung nach der Sprungantwort zeitig auf den Soll-Wert geregelt werden, ohne dabei ein Überschwingen zu erzeugen oder gar zu klingeln. Ein Klingeln während der Ausgleichsphase wäre somit auf eine Instabilität des Schaltreglers zurückzuführen. Ist eine schnelle Sprungantwort und eine zeitige Ausgleichsphase gegeben, so kann der Schaltregler als stabil-geregelt gelten.

## 6. Zusammenfassung

Wird der Ausgangsfilter in die Regelstrecke implementiert entsteht eine Regelstrecke 2. Ordnung. Der Schaltregler muss daher mit einem höheren Integrationsanteil betrieben werden, wodurch die Regelstrecke gedämpft und somit langsamer wird. Eine umständliche Kompensation der Regelstrecke wird nun erforderlich. Von dem Verfahren, der Implementierung des Ausgangsfilters in die Regelstrecke, wird daher abgeraten. Ein Abgriff der Ausgangsspannung des Schaltreglers sollte unmittelbar am Ausgangskondensator des Schaltreglers erfolgen, somit vor einem Ausgangsfilter. Um DC-Verluste des Ausgangsfilters zu reduzieren wird empfohlen Filterspulen und Ferrite mit möglichstem kleinem  $R_{DC}$  zu wählen.

# APPLICATION NOTE



## Verlustfrei gefiltert

### 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>