

APPLICATION NOTE



Negativer Eingangswiderstand von Schaltreglern

ANP008c VON RANJITH BRAMANPALLI

Entwickler von Schaltreglern und Schaltnetzteilen legen hohen Wert auf die Effizienz ihrer Schaltungen, sie stoßen jedoch am Ende Ihrer Entwicklungsphase auf unangenehme Effekte – wie unerwünschte Schwingungen am Eingang des Schaltreglers - und das obwohl der Schaltregler unter allen Bedingungen eine konstante Ausgangsspannung erzeugt. Aber wieso neigt unter Umständen der Eingang des Schaltreglers zum Schwingen?

Ein Schaltregler kann einen Wirkungsgrad bis zu über 90% erreichen, jedoch liegt der Wirkungsgrad bei herkömmlichen Schaltreglern meist weit darunter. Bei einem hohem Wirkungsgrad können wir eine nahezu verlustfreie Leistungswandlung annehmen, so dass annähernd gilt:

$$P_{In} \approx P_{Out}$$

Nehmen wir jedoch einmal an, dass ein Schaltregler keine Verlustleistung erzeugt und die Eingangsleistung gleich der Ausgangsleistung ist, so gilt für das Leistungsverhältnis:

$$P_{In} = P_{Out}$$

Ein Schaltregler-Design setzt voraus, dass die Ausgangsspannung in jedem Betriebsmodi konstant ist und selbst bei einem abrupten Lastwechsel schnell wieder seinen Sollwert erreicht, ohne in Schwingung versetzt zu werden. Somit ist nur eingangsseitig eine Änderung der Spannung erlaubt. Ein konstantes Leistungsverhältnis zwischen Ein- und Ausgang führt jedoch dazu, dass bei einem Anstieg der Eingangsspannung der Eingangsstrom des Schaltreglers sinkt, ergo steigt der Eingangsstrom, wenn die Eingangsspannung sinkt. Dieser Effekt beruht auf dem s.g. „**Negativen Eingangswiderstand**“. Abbildung 1 verdeutlicht diesen Effekt.

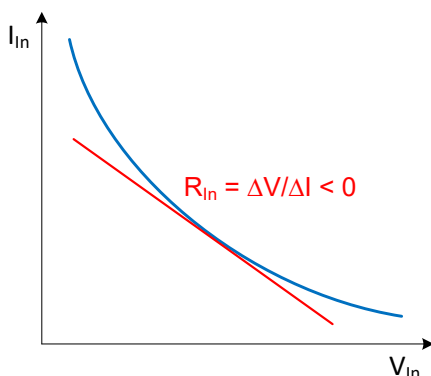


Abbildung 1: Spannung / Stromkurve am Eingang des Schaltreglers

Zunächst fällt dieser Effekt nicht auf. Er wird auch nicht erwartet, weil in der Regel der Strom proportional mit der Spannung steigt.

$$I \sim U \quad (\text{wenn } R \text{ konstant ist})$$

APPLICATION NOTE



Negativer Eingangswiderstand von Schaltreglern

So beschreibt jedenfalls das ohmsche Gesetz das Verhalten eines linearen Widerstandes. Betrachtet man einen einfachen Spannungsteiler aus idealen Widerständen, so steigt seine Ausgangsspannung, wenn seine Eingangsspannung erhöht wird. Dies wird in Abbildung 2 verdeutlicht.

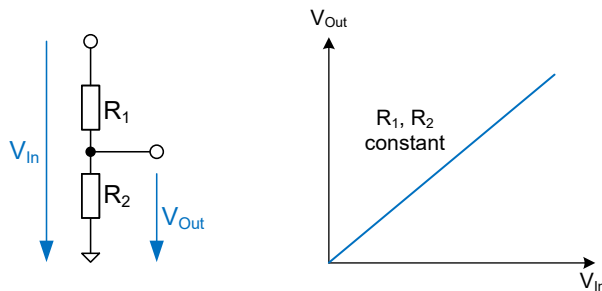


Abbildung 2: Spannungsteiler mit idealen Widerständen

In unserem Fall ist der Eingangswiderstand eines Schaltreglers jedoch nichtlinear, sondern stark **nichtlinear** und ist auch noch negativ. Abbildung 1 macht dies anschaulich. Zur weiteren Verdeutlichung möchten wir einen Spannungsteiler betrachten der nicht aus zwei idealen Widerständen aufgebaut ist, sondern aus einer Spannungsquelle mit definiertem Innenwiderstand und einem Schaltregler mit negativem Widerstand. Abbildung 3 zeigt einen solchen Spannungsteiler. Ein grundsätzlicher Aufbau des Schaltreglers und seiner Komponenten ist zur näheren Betrachtung hierzu nicht weiter erforderlich.

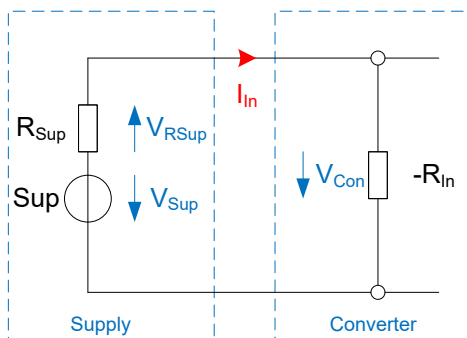


Abbildung 3: Spannungsteiler aus Spannungsquelle und negativem Widerstand

Wird die Spannung „ V_{Sup} “ der Quelle erhöht, so sinkt der Strom „ I_{In} “ und folgend der Spannungsabfall „ V_{RSup} “ am Innenwiderstand der Spannungsquelle. Die Spannung am Schaltreglereingang steigt allerdings an. Die Eingangsspannung des Schaltreglers ist um den Spannungsabfall am Innenwiderstand der Spannungsquelle verringert. Es gilt annähernd:

$$V_{\text{Con}} = V_{\text{Sup}} - V_{\text{RSup}}$$

Elektronische Bauteile, wie elektrische Widerstände treten mit negativen Werten in der Realität nicht auf. Es ist auch nicht der reale Eingangswiderstand eines Schaltreglers negativ, sondern **sein Verhalten bei Änderung der Eingangsspannung**. Demnach weist dieses Verhalten einen negativen Widerstand auf, der einen mathematischen Ursprung zu Grunde legt.

APPLICATION NOTE



Negativer Eingangswiderstand von Schaltreglern

Legt man an die Spannungs-Strom-Kurve in Abbildung 1 eine Tangente, so lässt sich in jedem Beliebigen Arbeitspunkt seiner Steigung der negative Widerstand bestimmen. Dieser ist „im allgemeinen“ definiert durch:

$$R_{IN} = \frac{\Delta V_{IN}}{\Delta I_{IN}}$$

Da die Steigung der Tangente **in diesem Fall negativ** ist, ist der Eingangswiderstandes des Schaltreglers negativ!

$$R_{IN} = \frac{\Delta V_{IN}}{\Delta I_{IN}} < 0$$

Es liegt ein dynamisches Verhalten mit negativer Steigung vor, dessen Differentialquotient theoretisch zugrunde gelegt werden kann um den negativen Widerstand als Zahlenwert zu bestimmen. Folgendes Beispiel zeigt hierzu eine Berechnungsvariante.

$$R_{IN} = \frac{\Delta V_{IN}}{\Delta I_{IN}} = \frac{10 \text{ V} - 8 \text{ V}}{0.5 \text{ A} - 0.625 \text{ A}} = -16 \Omega$$

In der Praxis und in diverser Literatur wird jedoch nicht der Differentialquotient ermittelt, sondern der stationäre Eingangswiderstand betrachtet. Es liegt ein dynamisches Verhalten vor und so in jedem Arbeitspunkt einen anderer Widerstandswert. Aus rein mathematischer Betrachtung ist der stationäre Widerstand nicht negativ. **Nun wird zugrunde gelegt, dass sein dynamisches Verhalten negativ ist und es wird mit einem negativen Vorzeichen gerechnet.** Mittels Großsignalanalyse kann der stationäre Widerstand mit folgender Annahme approximiert und wie in Beispiel 2 gezeigt berechnet werden.

$$P_{IN} = V_{IN} \cdot I_{IN}$$

$$5 \text{ W} = 8 \text{ V} \cdot 0.625 \text{ A}$$

$$R_{IN} = \frac{-V_{IN}}{I_{IN}} = \frac{-8 \text{ V}}{0.625 \text{ A}} = -12.8 \Omega$$

Wird die Eingangsspannung weiter erhöht, so steigt der negative Widerstand. Dies soll folgendes Beispiel verdeutlichen.

$$P_{IN} = V_{IN} \cdot I_{IN}$$

$$5 \text{ W} = 10 \text{ V} \cdot 0.5 \text{ A}$$

$$R_{IN} = \frac{-V_{IN}}{I_{IN}} = \frac{-10 \text{ V}}{0.5 \text{ A}} = -20 \Omega$$

APPLICATION NOTE



Negativer Eingangswiderstand von Schaltreglern

Der negative Widerstand ist allerdings kein anhaltender Zustand, sondern tritt nur bei einer kurzzeitigen Änderung – einer Transiente - am Eingang des Schaltreglers auf. Ist der ursprüngliche Betriebszustand wieder erreicht, so ist der negative Widerstand nicht mehr repräsentativ. Eine Transiente, in Verbindung mit dem negativen Eingangswiderstand reicht allerdings aus um den Eingang eines Schaltreglers in Schwingung zu versetzen.

Im Eingangskreis des Schaltreglers fließt ein getakteter Strom, der unterdrückt werden sollte, um leitungsgebundenen Störungen (Conducted Emission) zu verhindern. In der Praxis wird daher vor den Schaltreglereingang ein zusätzlicher Eingangsfilter platziert. Abbildung 4 zeigt solch eine Anordnung.

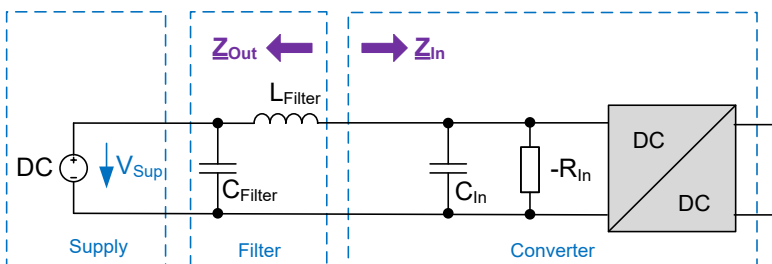


Abbildung 4: Vereinfachte Anordnung eines Schaltreglers mit Eingangsfilter

Abbildung 4 soll die Eingangsimpedanz Z_{In} des Schaltreglers verdeutlichen, welcher durch den Eingangskondensator C_{In} und dem negativen Eingangswiderstand $-R_{In}$ gebildet wird. Der Eingangsfilter, welcher z.B. mit einer Filterspule der [WE-PD2](#) oder der [WE-TI](#) von der Würth Elektronik realisiert werden kann bildet einen Reihenschwingkreis mit der Ausgangsimpedanz Z_{Out} in Richtung des Schaltreglereingangs. Der Eingangsfilter liegt parallel zum Eingangskondensator C_{In} und dem negativen Eingangswiderstand $-R_{In}$ und kann bei Resonanzfrequenz zur Oszillation des Eingangskreises führen. Wird eine Kleinsignalanalyse durchgeführt, so stellt jedoch die Spannungsquelle bei hohen Frequenzen einen Kurzschluss dar, wodurch der Filterkondensator kurzgeschlossen und resultierend nur noch die Filterspule betrachtet wird. Als Filterspule wird in der Regel eine Spule gewählt, welche über eine hohe Güte verfügt. Abbildung 5 zeigt die Impedanzkurve der Induktivität und der resultierenden Ausgangsimpedanz des Filters, welche deutlich ersichtlich bei Eigenresonanz seine höchste Impedanz aufweist.

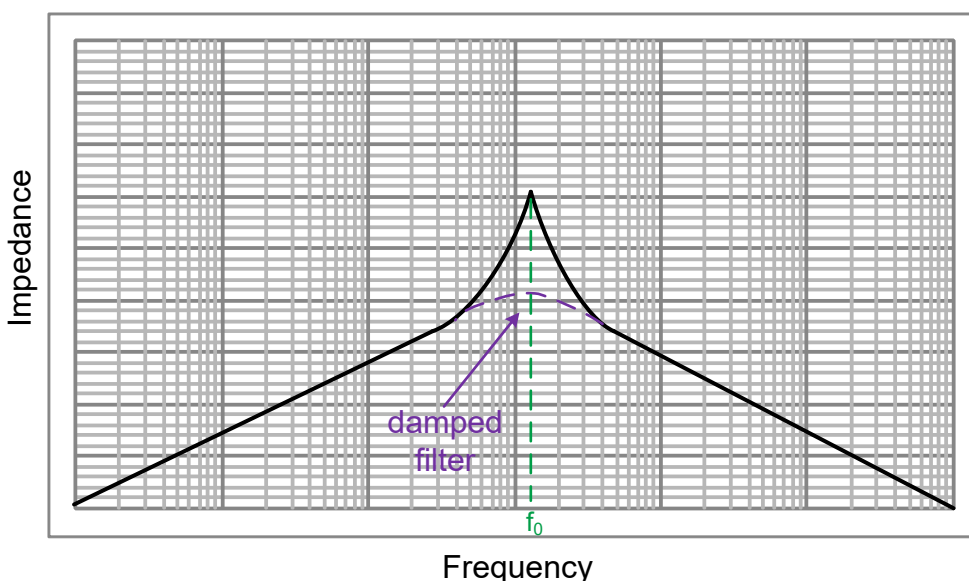


Abbildung 5: Impedanzkurve des Eingangsfilters bei Resonanzfrequenz

APPLICATION NOTE



Negativer Eingangswiderstand von Schaltreglern

Bei Resonanzfrequenz ist die Ausgangsimpedanz des Filters am höchsten und gerät in Konflikt mit der Eingangsimpedanz Z_{in} des Schaltreglers. Um eine Oszillation zu vermeiden wird empfohlen den Filter, wie in Abbildung 5 gezeigt zu dämpfen umso die Impedanz bei Resonanz zu verringern. Als Design Tipp gilt daher die Ausgangsimpedanz des Filters viel geringer als die Eingangsimpedanz des Schaltreglers zu halten.

$$Z_{Out} \ll Z_{In}$$

Oft werden im Eingangskreis Keramikkondensatoren verwendet, führen allerdings erst Recht zur Oszillation des Eingangsfilters, da Keramikkondensatoren über einen vernachlässigbaren kleine ESR verfügen. Dieser erhöht die Güte des Filters. Eine Reduzierung der Güte könnte theoretisch durch eine Parallelschaltung von Widerständen realisiert werden, ist jedoch keine praktikable Lösung. Als Design Tipp wird daher empfohlen an dieser Stelle Elektrolytkondensatoren zu verwenden, welche über einen verhältnismäßig großen ESR verfügen. Ein großer ESR kann den Eingangsfiler ausreichend in seiner Güte reduzieren, wodurch der Eingangsfiler gedämpft und eine Oszillation am Schaltreglereingang verhindert wird.

Nach ausgiebiger Untersuchung des „negativen“ Widerstandes kommen wir zur Erkenntnis, dass das Vorzeichen auf ein Verhalten beruht, welches auf den Rückgang des Eingangsstromes bei Erhöhung der Eingangsspannung eines Schaltreglers – Transienten - zurück zu führen ist. Aufgrund der Leitungsgebundenen Störungen ist ein Eingangsfiler dringend erforderlich, sollte jedoch soweit gedämpft werden, dass der negative Widerstand überkompensiert und im weiterem eine Oszillation vermieden wird. Letztendlich wird empfohlen auf eine Verwendung von Keramikkondensatoren für Eingangsfiler und Kondensator zu verzichten und Gebrauch von Elektrolytkondensator zu machen um unerwünschte Oszillationen am Schaltreglereingang zu verhindern.

APPLICATION NOTE



Negativer Eingangswiderstand von Schaltreglern

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 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

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