

Digitale Regelung ermöglicht eine stabile Stromversorgung mit schnellem Ansprechverhalten

Einleitung

Neue Trends und Anforderungen im Bereich Power Management bestimmen das Design heutiger Stromversorgungen. Einige dieser Anforderungen, wie zum Beispiel Telemetrie und Systeminformationen, sind aufgrund des technischen Fortschritts noch sehr neu. Andere, wie die Forderung nach kleineren Lösungen, höherer Integration, schnellerem Ansprechverhalten und höheren Schaltfrequenzen, bestehen bereits seit Jahrzehnten. Aber seit den Anfängen des Stromversorgungsdesigns besteht eine Anforderung, die stets gleichgeblieben ist: eine stabile Stromversorgung.

Dieser Beitrag beschreibt die Probleme, die mit analogen Spannungsmodus-Regelkreisen einhergehen und zeigt auf, wie ein digitaler Regelkreis die Bandbreite bereitstellt, die zuvor als unerreichbar galt. Die für die Stabilität verantwortlichen Variablen werden näher erläutert und mit einem analogen Regelkreis verglichen. Dabei zeigt sich, dass ein digitaler Regelkreis ein schnelleres Ansprechverhalten und eine höhere Leistungsfähigkeit bietet, während der Regelkreis stabil bleibt.

Design für Stabilität

Der Entwurf von Point-of-Load-(POL-)Stromversorgungen von einer dezentralen Versorgungsschiene wie +12V kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Die gängige Architektur ist ein analoger Spannungsmodus-Regelkreis mit fester Frequenz und externer Typ-3-Kompensation. Sie ist beliebt, weil sich damit die Pole und Nullstellen einstellen lassen, um die Bandbreite des Wandlers zu erhöhen und eine Reihe von Ausgangskondensatoren zu ersetzen. Mit einer konstanten Schaltfrequenz sind die Induktivitäts- und Kondensatorströme vorhersehbar, was eine optimale Bauteilauswahl ermöglicht. Der Nachteil dieser Topologie ist jedoch die komplexe Kompensation. Fünf externe Bauteile sind erforderlich, die erheblichen Aufwand während der Entwicklungsphase verursachen. Berücksichtigt man alle Bauteilschwankungen im Versorgungsstrang, ist die volle Bandbreite meist nicht zu erzielen, was zu einer Stromversorgung mit mittelmäßigem Ansprechverhalten führt. Gängige Designrichtlinien schlagen vor, dass die Bandbreite einer Stromversorgung in etwa $1/10$ der Schaltfrequenz (f_{sw}) betragen sollte. Das Problem dabei ist: je höher die Bandbreite, desto schneller neigt das System zu einem vorzeitigen Ausfall im Feld. Dies zeigt sich bei einem schrittweisen Stromversorgungsdesign mit Kompensation.

Am Beginn eines Designs liegt die Entwicklung der Leistungsstufe entsprechend den Systemanforderungen und der Versuch, diese mit Widerständen und Kondensatoren in der Rückkopplungsschleife zu kompensieren. Die Induktivität und die Ausgangskondensatoren sind stets so bemessen, dass sie die Leistungsanforderungen der Stromversorgung erfüllen. Dazu zählen der Ausgangsstrom, die Spannungswelligkeit und das Ansprechverhalten. Diese Bauteile werden nicht für die Gesamtkompensation ausgewählt – sie liegt in der Verantwortung des Controllers oder der Kleinsignal-Kompensationsbauteile. Anderenfalls würden die Systemkosten zu hoch ausfallen. Um eine gut kompensierte Stromversorgung zu erhalten, wird erwartet, dass alle Variablen des Ausgangsfilters konstant bleiben. Bei der Durchführung einer Analyse zeigt sich jedoch, dass die jeweilige Verteilung jeder Variable erhebliche Auswirkungen hat. Für ein Worst-Case-Modell kann eine Monte-Carlo-Simulation durchgeführt werden, die alle L- und C-Varianten kombiniert, um die Übertragungsfunktionen der Leistungsstufenbauteile zu erhalten. Auf der Basis dieser Ergebnisse, wäre die einzige Möglichkeit, ein stabiles System zu erhalten, die Bandbreite erheblich zu reduzieren, um die Auswirkung des zweipoligen Filters zu vermeiden.

Bei der Bestimmung des L-Wertes schlägt das Handbuch den Nennwert vor, der auf dem Datenblatt der Induktivität angegeben ist. Wird eine Worst-Case-Analyse durchgeführt, ist dieser Wert nicht ausreichend. Induktivitäten weisen Abweichungen ihres L-Wertes auf, die durch Faktoren wie Strom, Temperatur, Frequenz und Alterung bestimmt werden. Ein Beispiel sind Nicht-Ferrit-basierte Induktivitäten, die in Schaltnetzteilen zum Einsatz kommen: über den gesamten Nennstrombereich kann die Induktivität erheblich schwanken und auf weniger als 50% ihres Anfangswertes sinken.

Ausgangskondensatoren weisen je nach Betriebsbedingung ebenfalls hohe Abweichungen bei der Kapazität und beim ESR (äquivalenter Serienwiderstand) auf. DC-Bias-Spannungen (vor allem bei Keramikkondensatoren), Anfangstoleranzen, Temperatur- und Alterungseffekte verändern die Position des Ausgangsfilter-Zweipols im Frequenzbereich – und zwar von Board zu Board. Ändert sich die DC-Bias-Spannung und die Temperatur, kann die Kapazität von Keramikkondensatoren auf weniger als 40% des angegebenen Wertes fallen.

Auf die Schnelle ist die einzige zuverlässige Möglichkeit, die Stromversorgung zu kompensieren, das Absenken der Bandbreite und der Verlass auf einen niederfrequenten dominanten Pol, um die Bandbreite zu bestimmen. Genau so werden intern kompensierte Stromversorgungen konfiguriert. Sie weisen eine so niedrige Bandbreite auf, dass Induktivitätsschwankungen eher keine Stabilitätsprobleme verursachen. Der Nachteil ist der Einsatz eines großen Ausgangskondensators, um Leistungseinbußen zu überwinden.

Dies ist der klassische Kompromiss, den Entwickler von Stromversorgungen seit Jahren eingehen müssen. Man kann die Bandbreite optimieren – allerdings auf Kosten zusätzlicher Bauteile, die aufgrund von Bauteilschwankungen und Alterung die Instabilität erhöhen können. Oder man verwendet intern kompensierte Stromversorgungen, die für ein schnelleres Design sorgen – allerdings mit dem Nachteil höherer Kosten aufgrund der zusätzlich erforderlichen Kondensatoren, mit denen die schlechtere Leistungsfähigkeit kompensiert wird. Die Lösung dieses Problems ist eine digitale Regelung. Durch Abtastung der Ausgangsspannung und Wandlung in die Digitaldomäne lassen sich Vorteile durch die digitale Signalverarbeitung erzielen, die im Analogbereich nicht möglich sind. Mit dem ZL8800, Intersils Digital-Controller der vierten Generation, lassen sich die Vorteile der digitalen Signalverarbeitung nutzen. Der Baustein basiert auf einem proprietären ChargeMode™-Regelkreis und bietet eine kompensationsfreie Lösung ohne Leistungseinbußen.

Intersil ZL8800: ChargeMode Digital-Controller der vierten Generation

Mit der digitalen Regelung wurde das schwer lösbare Problem einer stabilen Stromversorgung beseitigt. Der ZL8800 ChargeMode Control DC/DC-Digitalregler bietet ein schnelles Ansprechverhalten und reagiert in nur einem Zyklus auf ein vorübergehendes Ereignis (Transienten). Damit verringert sich die erforderliche Ausgangskapazität eines Systems, was Platz und Kosten einspart.

Bild 1 zeigt den ZL8800, einen 2-Kanal-PWM-Controller, der +12 V oder +5 V in niedrigere Ausgangsspannungen umwandelt. Damit eignet er sich zur Versorgung von Point-of-Load-Anwendungen. Die vollständig digitale Regelschleife und interner nichtflüchtiger Speicher erübrigen zahlreiche externe Bauteile, wie sie normalerweise in analogen Reglern zu finden sind. Mit dem ChargeMode-Regelkreis erübrigt sich die lästige Wahl der Kompensationsbausteine.

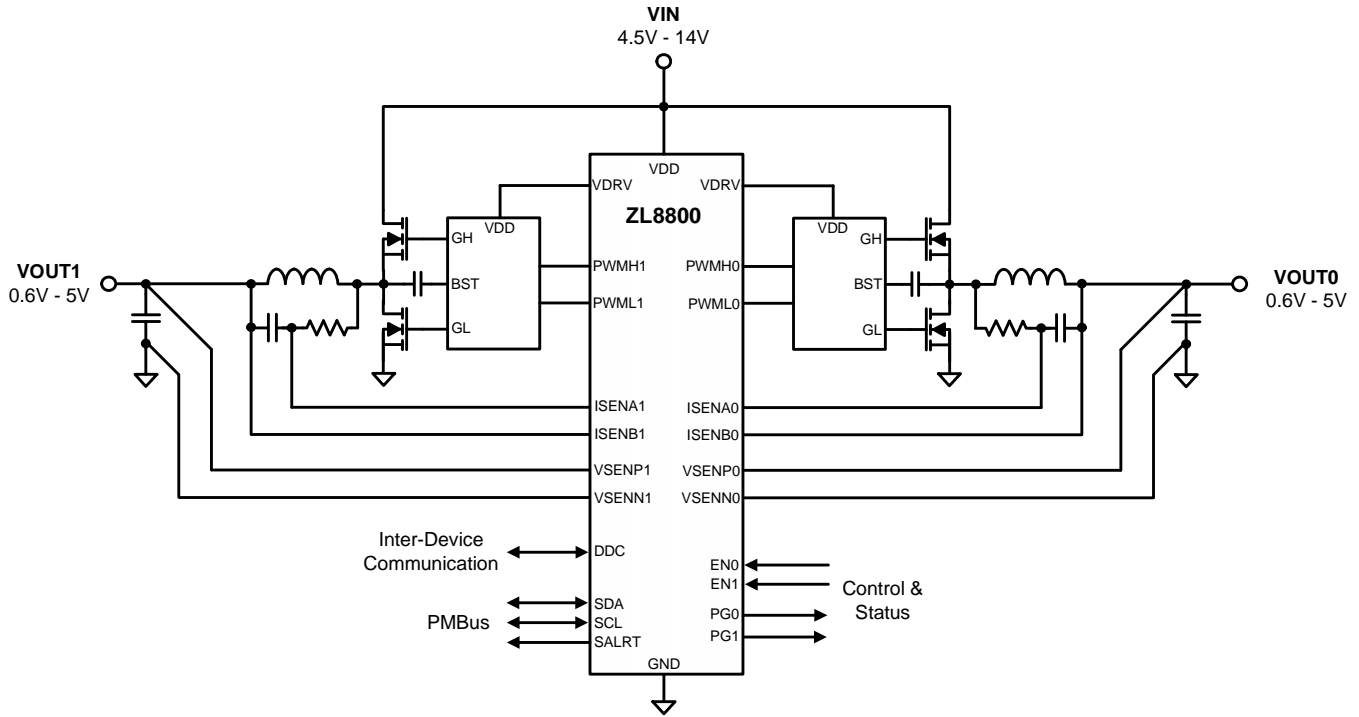


Bild 1: Der ZL8800 in einer typischen Anwendung

Intersils ChargeMode-Regelkreis reagiert sofort auf jedes vorübergehende Ereignis durch genaues Modifizieren des Tastgrads, damit die im Ausgangskondensator verlorene Ladung innerhalb eines Zyklus ersetzt werden kann. Dies wird durch Überabtasten der Ausgangsspannung erreicht, womit sich Korrekturen durchführen lassen, ohne den tatsächlichen Kapazitätswert wissen zu müssen. Der Vorteil der nicht-linearen Antwort ist, dass innerhalb eines Zyklus auf einen Lastübergang reagiert und eventuell eine Korrektur durchgeführt werden kann – mit minimalem Ringing oder Überschwingen. Im Vergleich dazu führt eine schnelle Reaktion in analogen Systemen zu einem unterdämpften System mit geringer Phasenreserve, was zu Instabilität und übermäßigem Ringing führen kann.

Wie der Intersil ZL8800 auf ein vorübergehendes Ereignis reagiert, ist in Bild 2 dargestellt. In dieser Situation findet ein 10A-Lastschritt mit einer Anstiegsgeschwindigkeit von 10 A/μs statt.

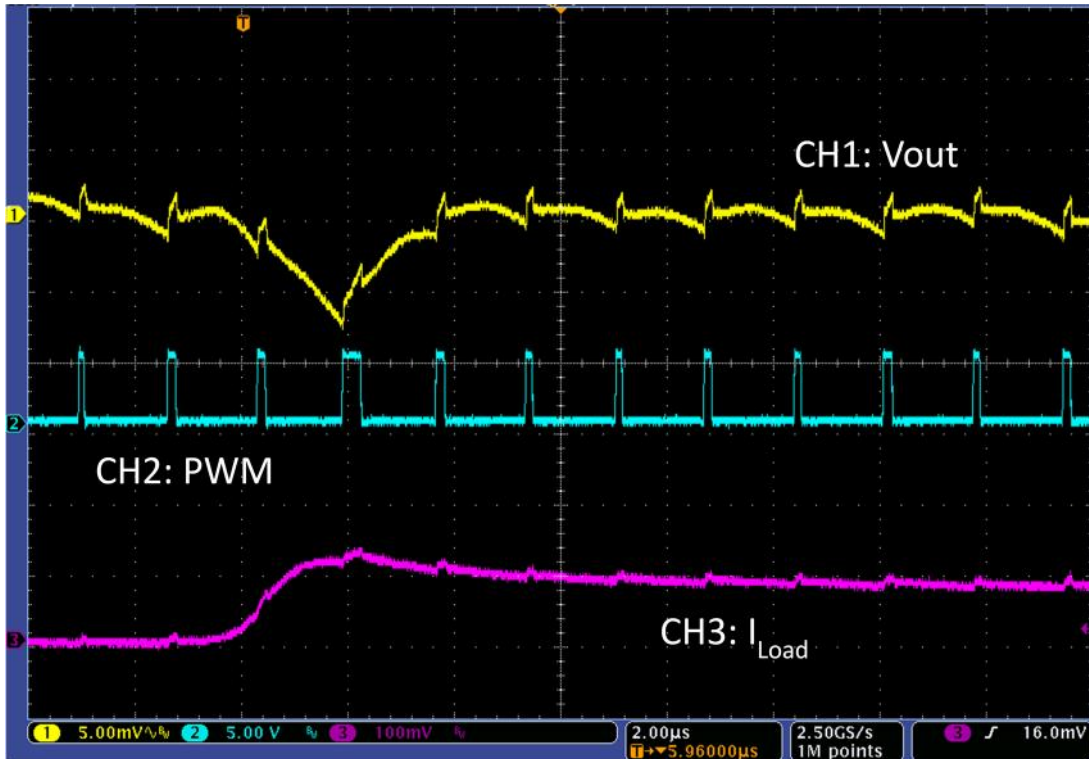


Bild 2: ZL8800-Verhalten innerhalb eines Zyklus (1V-Ausgang mit 10A-Lastschritt in 1µs)

Die Möglichkeit, auf ein vorübergehendes Ereignis so schnell zu reagieren, unterscheidet den ZL8800 von anderen Leistungsreglern. Der wirkliche Vorteil liegt aber darin, dass diese schnelle Reaktion ohne Kompensation erfolgt. Neben ihrem schnellen Regelkreis ist die ChargeMode-Architektur des ZL8800 auch besonders stabil. Damit kann jede Kombination aus Induktivität und Ausgangskapazität verwendet werden, und der Regelkreis bleibt stabil. Bei einer digitalen Architektur, die ein stabiles System erzwingt, verursachen Auswirkungen auf den Außenschaltkreis (Entfernen von Kondensatoren, Alterungs-/thermische Effekte) keinerlei Probleme.

Ein weiterer Vorteil des ZL8800-Regelkreises ist die Erweiterung der Bandbreite auf $f_{sw}/4$ und darüber hinaus. Dies ist durch verschiedene Ansätze innerhalb des Bausteins möglich. Erstens, durch eine Doppelflanken-Modulation, bei der das PWM-Signal eine feste Frequenz aufweist, aber beide Flanken moduliert werden, was die doppelte Abtastrate ermöglicht. Zusammen mit einem schnellen A/D-Wandler, der eine Überabtastung des Ausgangs durchführt, lässt sich so eine hohe Bandbreite erzielen – und das ohne den hochfrequenten Phasen-Roll-off, wie er bei anderen Wandlern üblich ist. Damit ergibt sich bei höherer Bandbreite auch ein stabiler Phasenrand.

Justierbare Rückkopplungsverstärkung

Um Entwicklern ein gewisses Maß an Freiheit bei der Wahl der Bandbreite zu ermöglichen, bietet der ZL8800 eine justierbare Rückkopplungsverstärkung. Die Standardverstärkung 256 stellt eine stabile Funktion bereit, die eine Bandbreite entsprechend der eines nominell kompensierten Analogprodukts entspricht. Eine höhere Verstärkung (typischer Bereich: 100 bis 1200) sorgt für eine schnellere Reaktion – allerdings auf Kosten eines höheren Jitter im PWM-Signal. In Systemen mit Kondensatoren, die einen niedrigen ESR aufweisen, zeigt ein höherer Jitter nur minimale Auswirkungen. Daher wird empfohlen, stets für ein schnelles Ansprechverhalten zu optimieren.

Die Oszilloskop-Aufnahmen in den Bildern 3, 4 und 5 zeigen, wie eine höhere Verstärkung des ZL8800 eine größere Bandbreite und ein schnelleres Ansprechverhalten ermöglichen. In allen Fällen wird der gleiche ChargeMode-Regelkreisalgorithmus verwendet, um ein stabiles System ohne Kompensation zu erhalten.

Die folgenden Darstellungen wurden unter diesen Bedingungen aufgenommen:

- $V_{IN} = 12\text{ V}$
- $V_{OUT} = 1\text{ V}$
- $C_{OUT} = 1500\text{ }\mu\text{F}$
- Induktivität = 300 nH
- $f_{sw} = 550\text{ kHz}$
- 10A-Laständerung mit 100 A/ μs

Bild 3 zeigt das Ansprechverhalten des ZL8800 mit einer Rückkopplungsverstärkung von 250. Bei der Messung der Schleifenverstärkung betrug die Schleifenbandbreite 26 kHz.

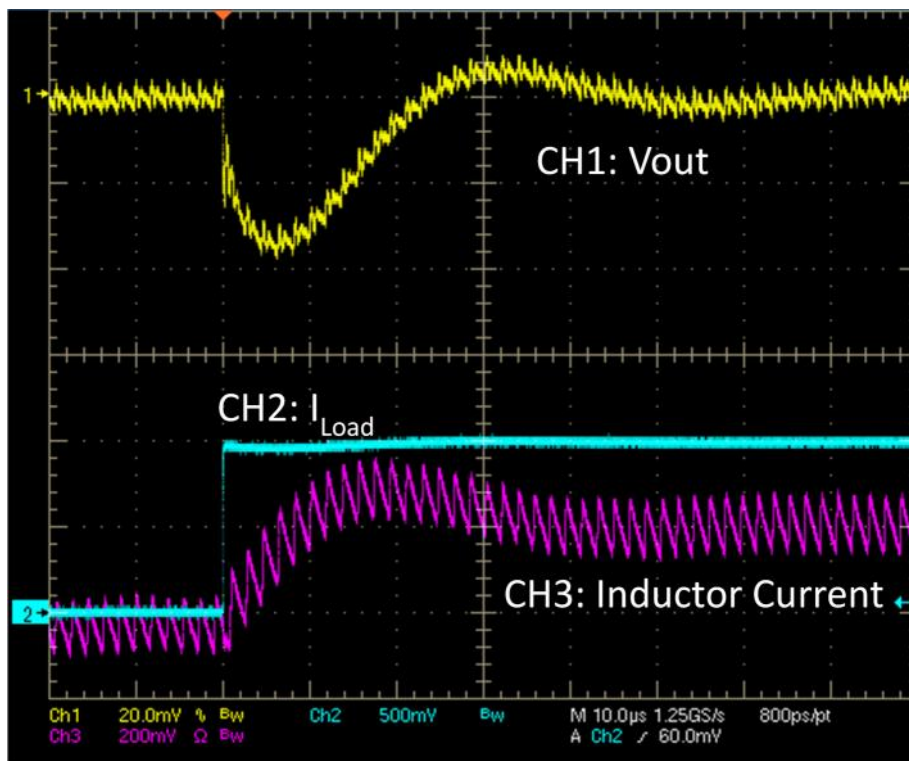


Bild 3: Ansprechverhalten mit Verstärkung = 250 (Bandbreite = 26 kHz)

Wird die Verstärkung auf 650 erhöht, ergibt sich ein schnelleres Ansprechverhalten mit verbesserter Einschwingzeit (Bild 4). Die entsprechende Schleifenbandbreite beträgt 70 kHz.

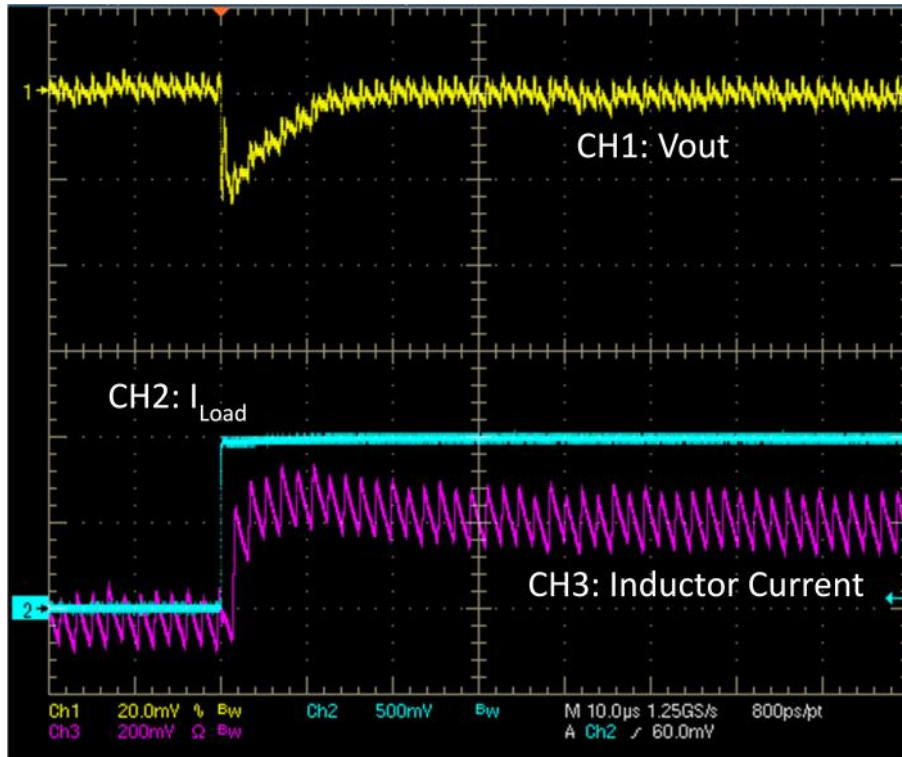


Bild 4: Ansprechverhalten mit Verstärkung = 650 (Bandbreite = 70 kHz)

Wird die Verstärkung auf 1050 weiter erhöht, ergibt sich ein noch schnelleres Ansprechverhalten, was eine Kompensation in fast einem einzigen Zyklus ermöglicht. Bild 5 zeigt, dass der Spulenstrom wieder auf den optimalen Punkt ansteigt, womit sich die Ausgangsspannung sofort erholen kann – und das ohne Überschwingen oder Ringing. Die Schleifenbandbreite beträgt 140 kHz und liegt damit knapp über 25% der Schaltfrequenz.

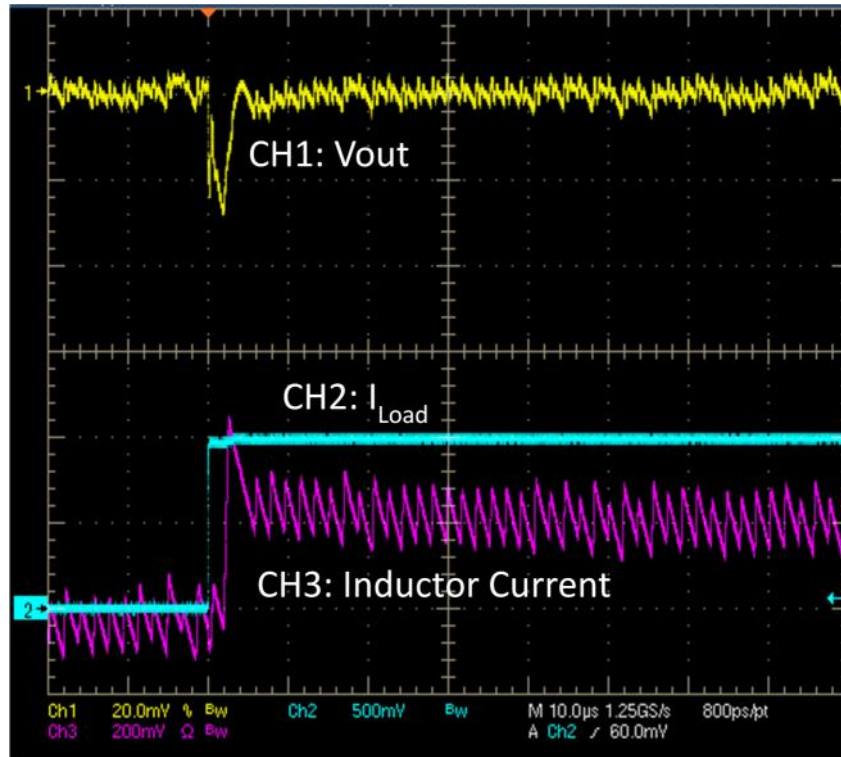


Bild 5: Ansprechverhalten mit Verstärkung = 1050 (Bandbreite = 140 kHz)

Fazit

Leistungswandler mit analoger Kompensation haben also ihre Grenzen, wenn Designs mit hoher Bandbreite erforderlich sind, ohne dabei die Stabilität oder langfristige Zuverlässigkeit durch Bauteilswankungen und Alterung zu beeinträchtigen. Mit der digitalen Regelungsarchitektur des ZL8800 ist es möglich, einen kompensationsfreien Leistungswandler mit hoher Bandbreite zu entwickeln. Damit lässt sich eine Stromversorgung in kurzer Zeit und ohne Ausgangskapazität bereitstellen. Weitere Informationen über Intersils digitale Stromversorgungslösungen unter: www.intersil.com/digitalpower.

###

Über Intersil

Intersil Corporation ist ein führender Anbieter hochleistungsfähiger Analog-, Mixed-Signal- und Power-Management-ICs für die Bereiche Industrie, Infrastruktur, Computing und Highend-Consumerelektronik. Weitere Informationen über Intersil unter: www.intersil.com.

+1 408-432-8888 | ©2014 Intersil Americas LLC. Alle Rechte vorbehalten. Intersil (und das Logo) sind Marken der Intersil Corporation oder einer der Tochtergesellschaften. Alle anderen hier erwähnten Marken sind im Besitz der jeweiligen Eigentümer.