Rauschverminderungs-Netzwerk für einstellbare Low-Drop-Spannungsregler

Der Begriff Noise bedeutet Rauschen im weiteren Sinne (also thermisches und elektronisches Rauschen plus diverse Störungen). Rausch-Parameter zu berücksichtigen, ist extrem wichtig beim Design von analogen High-Performance-Schaltungen.

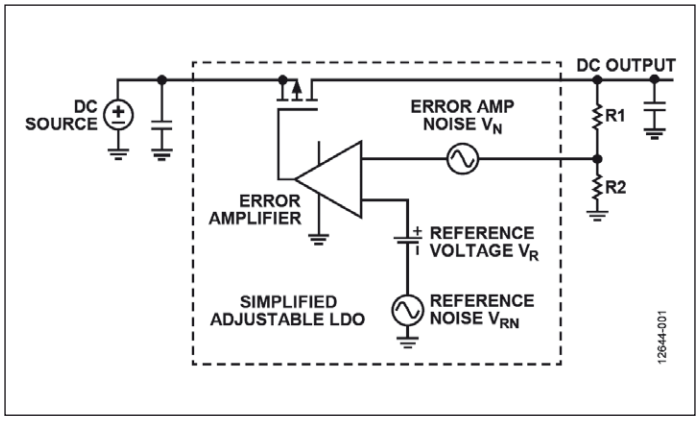

Bild 1: Vereinfachtes Blockschaltbild eines einstellbaren LDOs mit internen Rauschquellen

Ganz besonders gilt dies für Highspeed-Taktsysteme, ADCs, DACs, VCOs und PLLs. Der Schlüssel zur Reduzierung der Rauschspannung am Ausgang besteht darin, die Wechselspannungsverstärkung bei geschlossener Schleife nahe bei 1 zu halten, ohne dabei die AC-Performance und die Gleichspannungsverstärkung bei geschlossener Schleife zu beeinträchtigen.

Dieser Applikationsbericht beschreibt, wie man ein einfaches RC-Netzwerk einsetzen kann, um das Ausgangsrauschen eines einstellbaren Low-Drop-out-Reglers (LDO) zu minimieren. Im Experiment gewonnene Daten für verschiedene LDOs werden präsentiert und belegen die hohe Effizienz der einfachen Schaltungstechnik.

Obwohl die Rauschreduktion hier der primäre Fokus ist, so werden die Ergebnisse auch bezüglich der Betriebsspannungs-Unterdrückung (Power Supply Rejection Ratio, PSRR) und des Verhaltens an schwankenden Lasten (Transient Load Response) aufgezeigt.

Schaltungstechnik

In Bild 1 ist ein vereinfachtes Blockschaltbild eines typischen einstellbaren LDOs dargestellt. Die Ausgangsspannung V_{OUT} ist eine Funktion der Referenzspannung V_R sowie der DC-Schleifenverstärkung (DC Closed-Loop Gain) des Fehlerverstärkers. Die Ausgangsspannung errechnet sich folgendermaßen:

$$V_{OUT} = V_R \times (1 + R_1/R_2).$$

Darin ist $1 + R_1/R_2$ die Verstärkung der geschlossenen Rückkopplungsschleife (DC Closed-Loop Gain).

Das Rauschen des Fehlerverstärkers V_N multipliziert sich mit dem selben Faktor, und daher wird ein Ausgangsrauschen entstehen, welches mit der programmierten Ausgangsspannung mitgeht. Wenn Ausgangsspannungen eingestellt werden, die kleiner sind als die doppelte Referenzspannung, dann gibt es nur ein moderates Ansteigen des Ausgangsrauschens. Für empfindliche Anwendungen ist dies schon nicht mehr akzeptabel.

Original-Quelle:
Noise Reduction Network for Adjustable Low Dropout Regulators
Glenn Moritas
Application Note AN-1329 von Analog Devices, 2014
frei übersetzt und gekürzt von FS

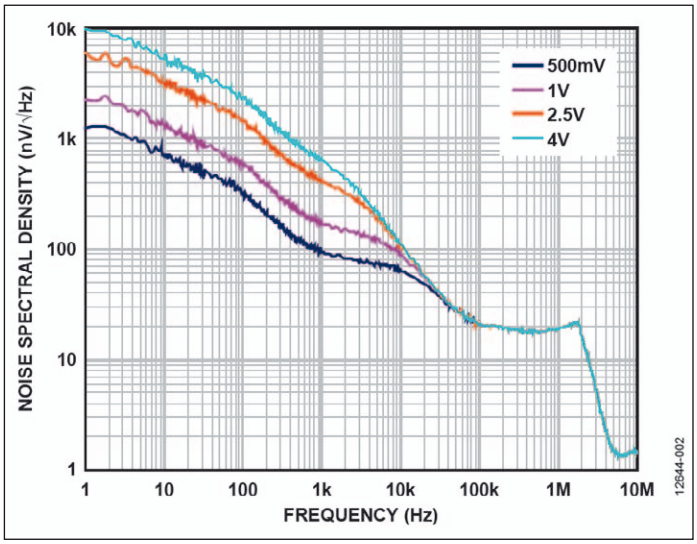

Bild 2: Spektrale Rauschdichte eines ADP 125 bei verschiedenen Ausgangsspannungen

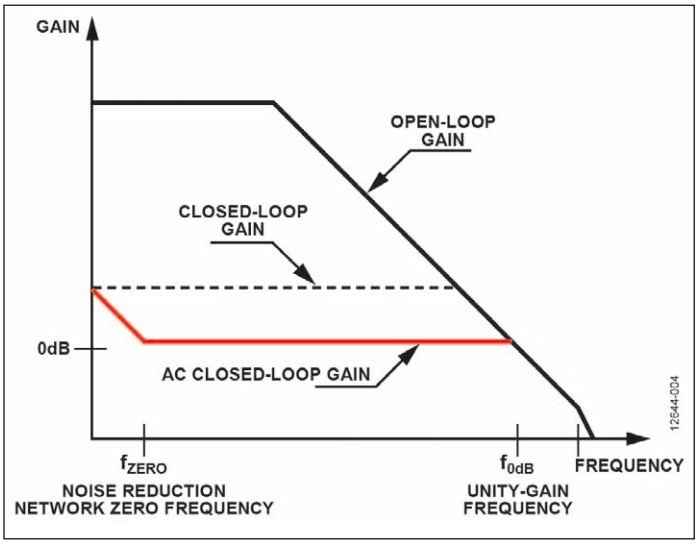

Bild 3: Verlauf verschiedener Verstärkungen beim Einsatz des Rauschverminderungs-Netzwerks

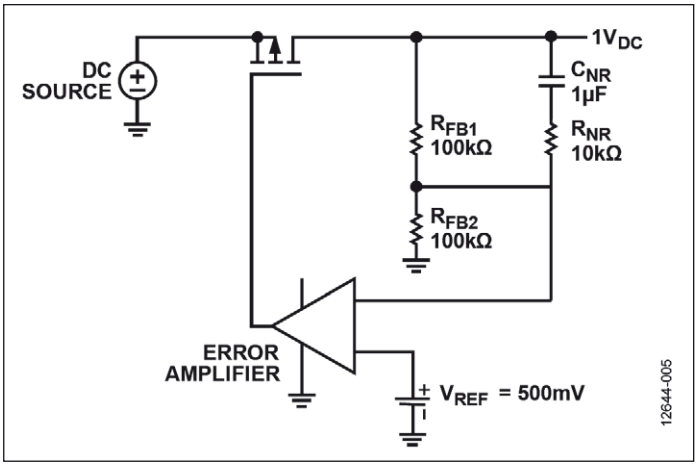

Bild 4: So wird die Verstärkung nur für das Rauschen reduziert.

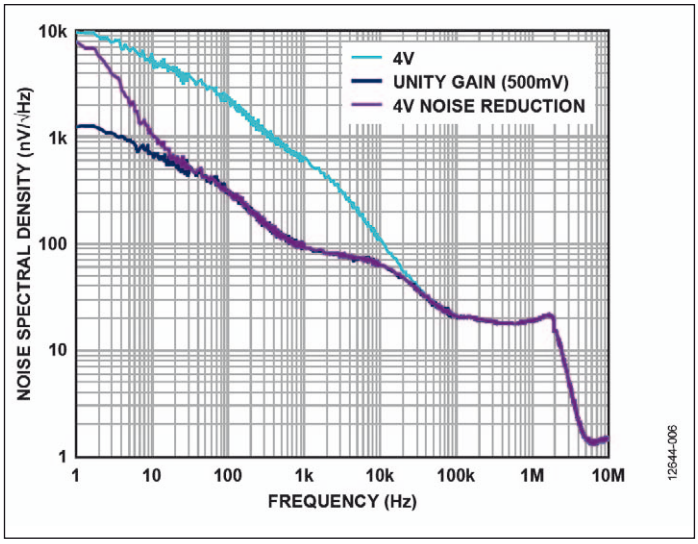

Bild 5: Spektrale Rauschdichte eines ADP 125 bei 4 V und 500 mV Ausgangsspannung

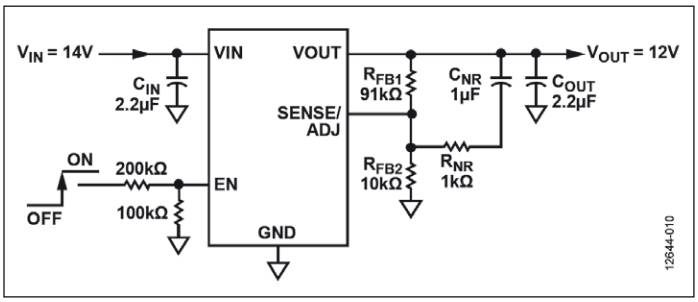

Bild 6: Modifikation der Außenbeschaltung zur Rauschreduktion

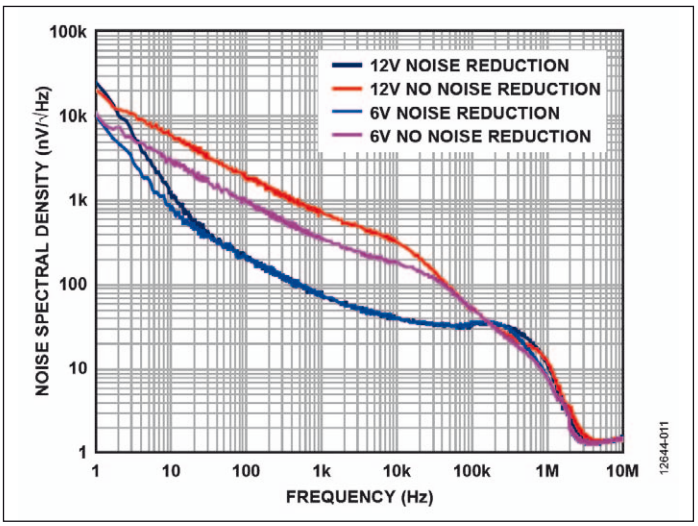

Bild 7: Spektrale Rauschdichte eines ADP 7142 bei 6 und 12 V Ausgangsspannung mit und ohne Rauschverminderungs-Netzwerk

Das Rauschen in LDOs

Hauptsächlich wird das Rauschen von der internen Referenzquelle mit V_R und dem Fehlerverstärker (elektronisches Rauschen) erzeugt. Moderne LDOs arbeiten mit internen Bias-Strömen von einigen 100 nA, um Ruheströme von etwa 15 µA zu bewirken. Damit verbunden sind hohe Werte des Bias-Widerstands (bis 1 GOhm). Dies wiederum bedeutet einen stärker rauschenden Fehlerverstärker und eine mehr verrauschte Referenzspannung. Normalerweise wird die Ausgangsspannung über externe Widerstände eingestellt. Daher ist der DC Closed Loop Gain um 1 größer als der AC Closed Loop Gain. Das LDO-Rauschen lässt sich durch Filtern der Referenzspannung und Herabsetzen der Verstärkung des Fehlerverstärkers für das Rauschen reduzieren. Im ersten Fall lässt sich manchmal ein externer Kondensator nutzen. Stets kommt man dann dahin, dass das Ausgangsrauschen sich recht proportional zur Ausgangsspannung verhält. Das belegt Bild 2 ganz deutlich.

Bild 3 vergleicht den AC Closed-Loop Gain eines Reglers mit sorgfältig entwickeltem Rauschverminderungs-Netzwerk mit dem Closed-Loop Gain eines nicht modifizierten Reglers. Die AC-Verstärkung liegt bei 1 (0 dB), abgesehen von geringen Frequenzen. Das Resultat: Rauschen wird auf einen höheren Wert verstärkt.

In Bild 4 ist das prinzipielle Innenleben eines auf 1 V eingestellten LDOs gezeigt, wobei R_{FB1} und R_{FB2} die Ausgangsspannung bestimmen. Das Rauschen des Fehlerverstärkers wird durch R_{NR} und C_{NR} herabgesetzt. Einige LDOs haben einen geringen Phasenwinkel oder sind bei Einsverstärkung nicht stabil. Daher wurde R_{NR} willkürlich eingesetzt, um die Verstärkung bei hohen Frequenzen auf etwa 1,1 zu bringen. Der Wert von R_{NR} kann nach Bedarf so gewählt werden, dass der LDO mit Sicherheit stabil arbeitet, wenn auch die Rauschreduktion dann nicht den vollen Effekt bringt. Der Wert von C_{NR} wurde so festgelegt, dass die niedrigste Frequenz für eine volle Wirksamkeit des Rauschverminderungs-Netzwerks (bestehend aus C_{NR}, R_{FB1} und R_{NR}) unter 10 Hz liegt. Das stellt sicher, dass das Rasuchen in der 1/f-Region ebenso reduziert wird.

Ein praktisches Beispiel

In Bild 5 wird das Rauschen der Ausgangsspannung eines einstellbaren LDOs über der Frequenz gezeigt, mit und ohne Rauschverminderungs-Netzwerk. Dessen Effekt ist unübersehbar. In diesem und in vielen anderen Fällen erfolgt eine signifikante Reduktion des störenden Rauschens in der Region 20 Hz bis 10 kHz und darüber hinaus bis 50 kHz für eine Reihe von LDOs. Die spektrale Dichte des Rauschens des einstellbaren LDOs bei Einsverstärkung (Unity Gain) ist ebenfalls dokumentiert. Über der durch R_{FB1} und C_{NR} bestimmten unteren Frequenz entfaltet das Rauschverminderungs-Netzwerk unübersehbar eine solche Wirkung, dass das Rauschen nun fast identisch ist mit dem bei Einsverstärkung des LDOs. Zu beachten ist, dass die Kurven

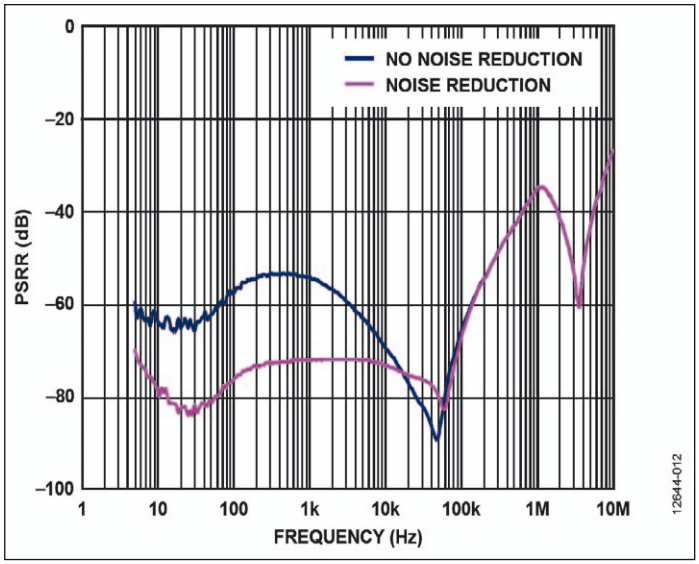

Bild 8: Das PSRR des ADP 125 mit und ohne Rauschverminderungs-Netzwerk

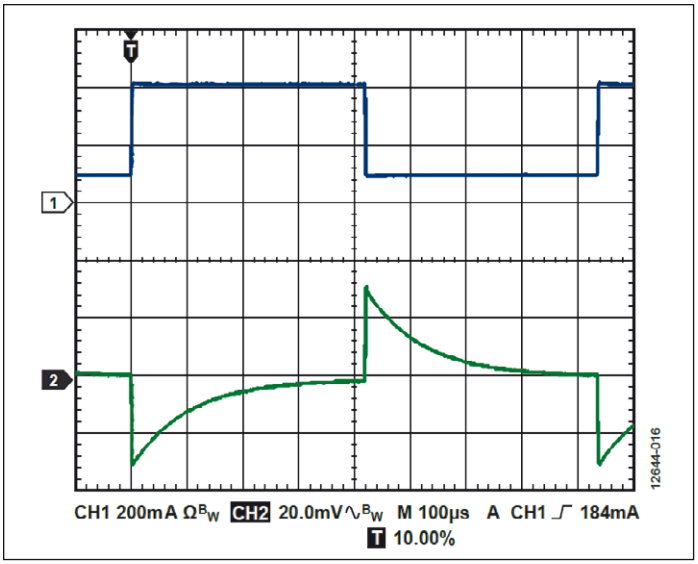

Bild 9: Verhalten eines ADP 125 bei transienter Last ohne Rauschverminderungs-Netzwerk

mit und ohne Rauschverminderungs-Netzwerk über 20 kHz konvergieren. Dies rührt daher, dass der Closed-Loop Gain des Fehlerverstärkers sich der Open-Loop-Charakteristik des Verstärkers nähert, sodass keine weitere Reduktion des Rauschens möglich ist.

Das Rauschverminderungs-Netzwerk

Es folgt ein Design-Beispiel für den Einsatz des Rauschverminderungs-Netzwerks mit dem Regler ADP 7142. Angenommen, das Rauschen des ADP 7142 beträgt 11 µV, dann folgt für das Ausgangsrauschen:

Rauschen = 11 µV x $(R_{PAR} + R_{FB2}) / R_{FB2}$

Darin ist R_{PAR} die parallele Kombination von R_{FB1} und R_{NR}.

Basierend auf den Bauteilwerten in Bild 6 hat der ADP 7142 in dieser Schaltung die folgenden Eigenschaften:

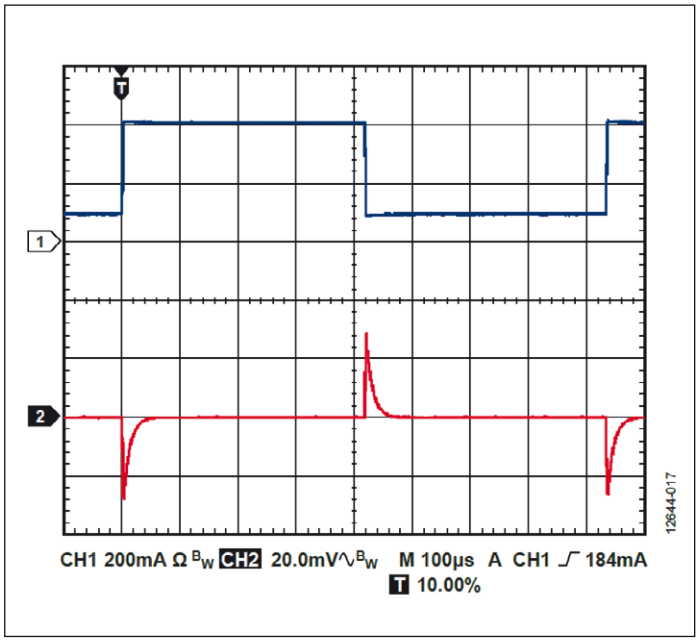

Bild 10: Verhalten des ADP 125 bei transienter Last mit Rauschverminderungs-Netzwerk

- DC Gain 10 (20 dB)
- 3-dB-Roll-off-Frequenz 1,75 Hz
- High-Frequency AC Gain 1,1 (0,82 dB)
- theoretische Rauschverminderung um Faktor 9,1 (19,2 dB)
- gemessenes RMS-Rauschen des einstellbaren LDOs ohne Rauschverminderung 70 µV
- gemessenes RMS-Rauschen des einstellbaren LDOs mit Rauschverminderung 12 µV
- gemessene Rauschverminderung15,3 dB

Bild 7 zeigt die Spektralverteilung des Rauschens eines ADP 7142 bei eingestellten Ausgangsspannungen von 6 und 12 V mit und ohne Rauschverminderungs-Netzwerk. Das Rauschen am Ausgang mit Rauschverminderungs-Netzwerk ist bei beiden Spannungen fast gleich. Es ist teilweise geringer als erwartet/errechnet.

Betriebsspannungs-Unterdrückung

Die Betriebsspannungs-Unterdrückung (Power Supply Rejection Ratio = PSRR) verbessert sich ebenfalls. Das PSRR sagt aus, wie gut eine Schaltung unerwünschte Signale, wie Noise oder Ripple, die auf der Versorgungsspannung auftauchen können, unterdrückt. Es ergibt sich aus:

PSRR = 20 x log (VE_{in} / VE_{out})

Dabei sind VE_{in} and VE_{out} die unerwünschten Signale an Eingang und Ausgang. Für die meisten Baugruppen, wie ADCs, DACs und Verstärker, bezieht man dieses PSRR auf die Pins, welche die Versorgungsspannung ins Innere führen. Und auch ein LDO-Eingangs-Pin liefert Versorgungsspannung ins Innere.

Wie verbessert ein Rauschverminderungs-Netzwerk das Ausgangsrauschen eines einstellbaren LDOs? Dies ist besonders bei niedrigen Frequenzen möglich. Für Frequenzen unter dem Punkt, wo der LDO Closed-Loop- und der Open-Loop-Gain konvergieren, beträgt der Wert der PSRR-Verbesserung in dB näherungsweise

20 log $(1 + R_{FB1} / R_{NR})$.

In Bild 8 ist der Effekt des Rauschverminderungs-Netzwerks auf die PSRR beispielhaft dokumentiert. Die Verbesserung für Frequenzen von 10 Hz bis über 20 kHz liegt allgemein zwischen 15 dB und 20 dB.

Verbesserung bei schwankender Last

Eine Last kann in der Praxis kurzzeitig (transient) undefiniert schwanken. Es sind auch Rückspannungen möglich. Bei einfach beschalteten LDOs ergibt

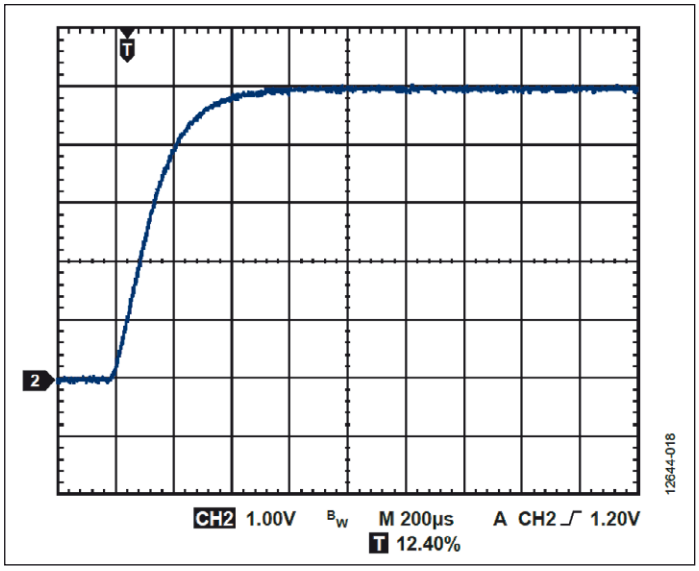

Bild 11: Ausgangsspannung nach dem Einschalten beim ADP 125 ohne Rauschverminderungs-Netzwerk

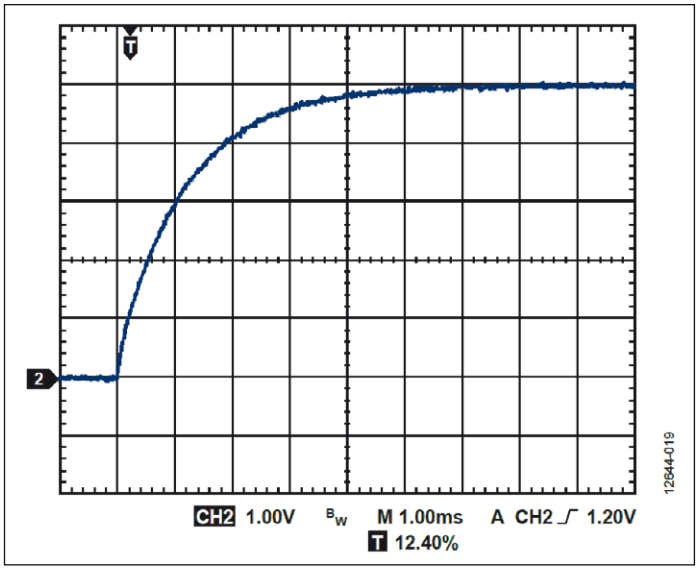

Bild 12: Ausgangsspannung nach dem Einschalten beim ADP 125 mit Rauschverminderungs-Netzwerk

sich infolge der Schaltung der Nachteil, dass der Fehlerverstärker auf die hochfrequenten Anteilen dieser unerwünschten Effekte mit keiner ausreichenden Verstärkung einwirken kann. Anders bei Einsatz des Rauschverminderungs-Netzwerks. Damit kann der Fehlerverstärker besser und schneller reagieren. Dies demonstrieren Bild 9 und 10.

Erhöhung der Start-Up-Zeit

Ein Nachteil der Einführung eines Rauschverminderungs-Netzwerks ist die Heraufsetzung der Start-Up-Zeit. Die Anlaufphase dauert nun, je nach verwendeter Kapazität, länger als bei einfacher Beschaltung. In Bild 12 ist ein Kästchen fünfmal so lang wie in Bild 11. Dennoch verläuft die Kurve flacher, und das bei einer Kapazität von nur 10 nF.

Zusammenfassung

Im Allgemeinen können mit der einfachen, hier vorgestellten Zusatzbeschaltung das Rauschverhalten, das PSRR und das Verhalten bei transienter Last deutlich verbessert werden. Rauschsensible Applikationen, wie Highspeed-Taktgeneratoren, ADCs, DACs, VCOs und PLLs können von einem derart modifizierten LDO am meisten profitieren. Die vorgestellte Technik arbeitet nur an einstellbaren LDOs erfolgreich, deren Architektur der hier angenommenen entspricht. Eine Eigenschaft dieser Architektur ist es, dass das Rauschen am Ausgang mit der eingestellten Ausgangsspannung mitgeht.

Ältere einstellbare LDOs, wie ADP 123, ADP 125, ADP 171, ADP 223, ADP 323, ADP 1741, ADP 1753, ADP 1755, ADP 7102, ADP 7104 und ADP 7105, entsprechen dieser Architektur im Prinzip und profitieren hervorragend von der Nutzung eines Rauschverminderungs-Netzwerks.

Neuere LDOs, wie etwa ADP 7118, ADP 7142, ADP 7182, ADM 7170, ADM 7171 und ADM 7172, entsprechen ebenfalls der Architektur, wenn man sie im einstellbaren Modus betreibt. Da diese LDOs den Fehlerverstärker in Einsverstärkung betreiben, ist die Referenzspannung gleich der Ausgangsspannung, wodurch gesichert wird, dass die Rauschspannung am Ausgang nahezu unabhängig von der Ausgangsspannung ist. Bei Nutzung dieser LDOs im einstellbaren Modus ist es am besten, eine Version mit fester Ausgangsspannung auszuwählen. Ultralow-Noise LDOs, wie die Typen ADM 7150, ADM 7151, ADM 7154 und ADM 7155, können von dem vorgestellten Rauschverminderungs-Netzwerk nicht profitieren. ◄