

Application Note

# Entwicklung einer Bootstrap-Ladepumpen-Stromversorgung für einen isolierten Verstärker



Maggie Lee

## ABSTRACT

Isolierte Verstärker bieten eine Isolierung zwischen ihrem Eingangssignal und dem Ausgangssignal, was in vielen Anwendungen nützlich ist, wie z. B. der Phasenstrommessung in Motorantrieben. Die Bereitstellung der Highside-Stromversorgung für einen isolierten Verstärker kann eine Herausforderung darstellen. Dieser Anwendungshinweis stellt einen Bootstrap-Ladepumpenschaltkreis als kleine, kostengünstige Alternative zur Erzeugung der Highside-Stromversorgung vor und geht ausführlich in Bezug auf das Design einer solchen Schaltung ein.

## Inhalt

<b>1 Einführung</b> .....	2
<b>2 Bootstrap StromversorgungenDesign</b> .....	2
2.1 Auswahl des Ladungspumpenkondensators.....	4
2.2 Simulation in TINA-TI.....	5
2.3 Hardware-Test mit AMC1311-Q1.....	8
<b>3 Zusammenfassung</b> .....	8
<b>4 Referenz</b> .....	8

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1. Bootstrap-Stromversorgung.....	2
Abbildung 2-1. Laden des Bootstrap-Kondensators.....	3
Abbildung 2-2. Entladen des Bootstrap-Kondensators.....	3
Abbildung 2-3. Simulationsmodell.....	5
Abbildung 2-4. Vergleich der Kondensatorwerte.....	5
Abbildung 2-5. Ändern der PWM-Frequenz.....	6
Abbildung 2-6. PWM-Tastverhältnis ändern.....	7

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1. Ausgangsspannung im eingeschwungenen Zustand mit verschiedenen Kondensatoren.....	5
Tabelle 2-2. Anlaufzeit und stationäre Spannung für verschiedene Frequenzen.....	6
Tabelle 2-3. Startzeit und stationäre Zustandsspannung für verschiedene Tastverhältnisse.....	7

## Marken

All trademarks are the property of their respective owners.

## 1 Einführung

Isolierte Verstärker können Spannung oder Strom mit relativ hoher Genauigkeit messen und gleichzeitig die Messungen von der Low-Side isolieren. Dies ist in Anwendungen nützlich, bei denen die High-Side-Spannung aus Sicherheitsgründen isoliert werden muss oder wenn die High-Side plötzliche Transienten erleben kann, die einen Controller auf der Low-Side beschädigen können. Gängige Anwendungen sind das Messen eines Hochspannungs-Motorbusses oder das Messen des Motorphasenstroms.

Allerdings müssen isolierte Verstärker die Highside-Stromversorgung von der Low-Side-Stromversorgung isolieren, was zu einer größeren Größe und Komplexität führen kann. Eine Alternative ist ein transformatorisoliertes Netzteil, das die High-Side-Schiene von der Low-Side erzeugt und gleichzeitig die High-Side von der Low-Side isoliert hält. Transformatoren können jedoch groß und teuer sein. Eine Bootstrap-Ladepumpen-Stromversorgung ist eine kostengünstige Alternative. Die Stromversorgung erfolgt über ein Pulsweitenmodulationssignal (PWM) und erfordert nur einen Kondensator, eine Diode und einen Strombegrenzungswiderstand. In einigen Fällen kann auch ein linearer Dropout-Regler (LDO) erforderlich sein.

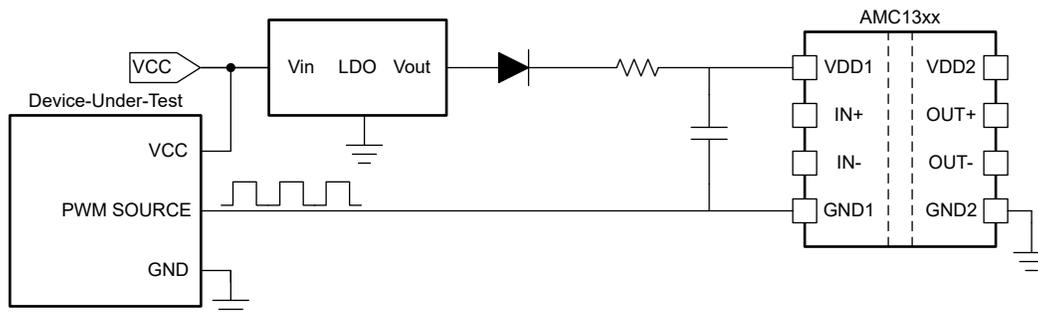
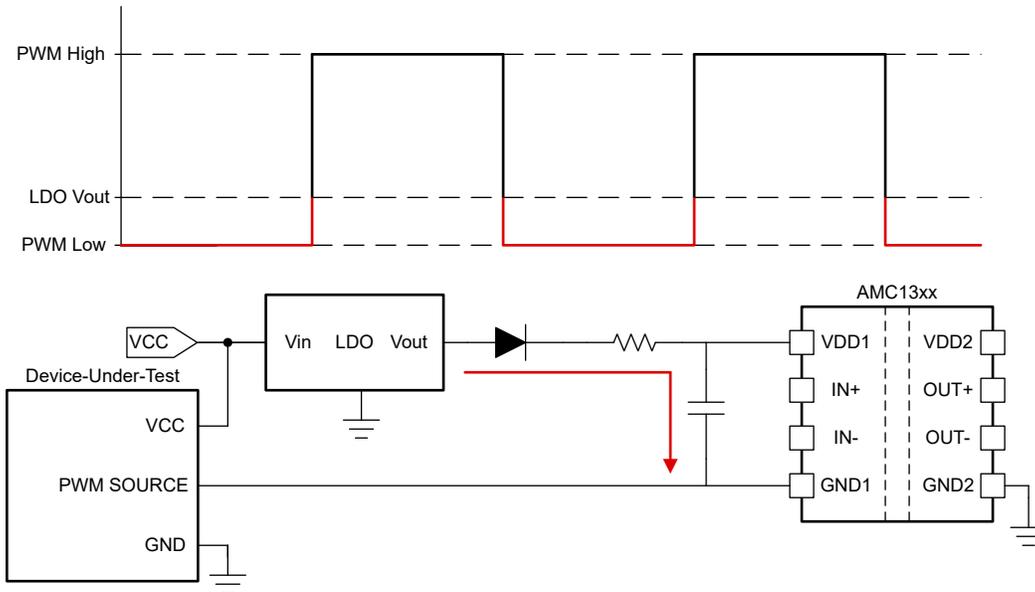


Abbildung 1-1. Bootstrap-Stromversorgung

## 2 Bootstrap StromversorgungenDesign

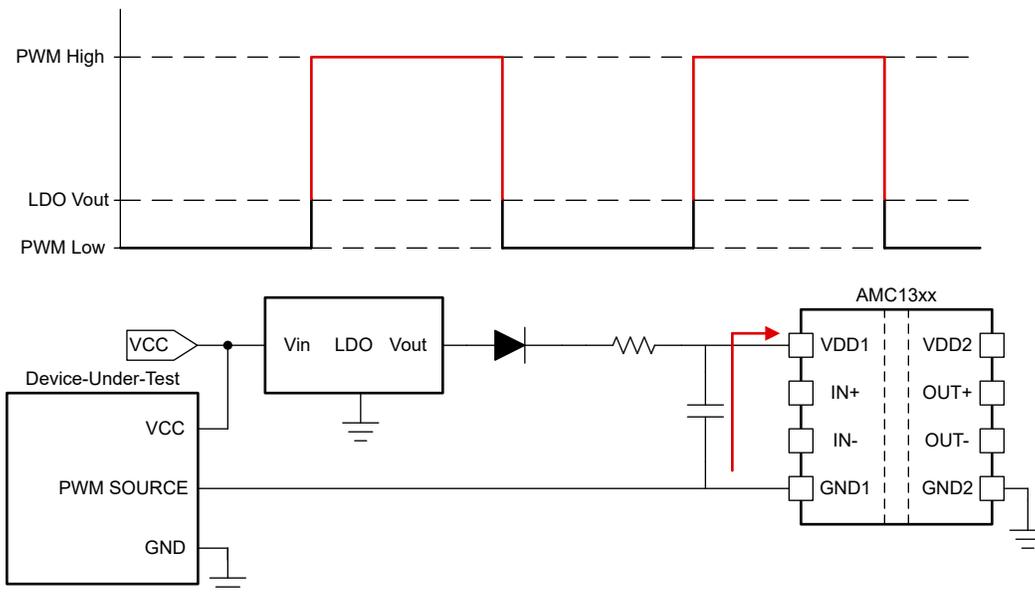
Das Bootstrap arbeitet mit einer Eingangsspannung und einem PWM-Signal. Die Eingangsspannung wird von derselben Stromversorgung gespeist, die das zu prüfende Gerät (DUT) versorgt, und die Eingangsspannung kann mit einem LDO herabgesetzt werden. Da für den Bootstrap ein PWM-Signal erforderlich ist, kann das Signal nur mit DUTs verwendet werden, die ein PWM-Signal erzeugen oder mit einem PWM-Signal arbeiten. Der DUT ist nicht notwendigerweise von der Low-Side des Verstärkers isoliert, wie in [Abbildung 1-1](#) gezeigt. Aus diesem Grund kann kein DC/DC-Spannungswandler allein verwendet werden. Die High-Side des Verstärkers hat keine Masseverbindung mit dem DUT. Das PWM-Signal ist an die High-Side-Masse des isolierten Verstärkers gebunden. Das Bootstrap stellt sicher, dass die High-Side-Stromversorgung immer über dem PWM-Signal schwebt, sodass die High-Side-Stromversorgung ein stetiges Signal hat, obwohl es sich bei der High-Side-Masse um ein PWM-Signal handelt.

Die Eingangsspannung zum Bootstrap-Schaltkreis bestimmt den stationären Ausgangswert, daher muss die Eingangsspannung nahe an der gewünschten High-Side-Versorgungsspannung liegen, um eine Verletzung der High-Side-Versorgungsspezifikationen des Verstärkers zu vermeiden. Ein LDO ist erforderlich, wenn sich der DUT-VCC-Bus außerhalb der empfohlenen Betriebsbedingungen des isolierten Verstärkers befindet. LDOs benötigen im Allgemeinen nur wenige zusätzliche externe Komponenten, und LDOs erzeugen sauberere Signale als Schaltregler, weshalb LDOs für diese Anwendung empfohlen werden. Die Eingangsspannung des Bootstrap-Schaltkreises ist größer als die DUT-Masse. Wenn also das PWM-Signal niedrig ist, kommt es zu einem positiven Spannungsabfall an der Diode, die leitet und den Kondensator lädt, wie in [Abbildung 2-1](#) dargestellt.



**Abbildung 2-1. Laden des Bootstrap-Kondensators**

Wenn das PWM-Signal hoch ist, liegt kein Spannungsabfall oder negativer Spannungsabfall am Kondensator vor und das Signal hört auf zu leiten, sodass der Kondensator in die High-Side-Stromversorgung entlädt wird, wie in [Abbildung 2-2](#) dargestellt. Die Bootstrap-Schaltung kann einen stabilen Zustand erreichen, wenn die vom Kondensator gespeicherte Spannung bei niedrigem PWM-Signal der vom Kondensator entladenen Spannung bei hohem PWM-Signal entspricht. Das bedeutet, dass die Startzeit und die Welligkeit im stationären Zustand von der RC-Zeitkonstante abhängen und durch die Frequenz und das Tastverhältnis des PWM-Signals beeinflusst werden können.



**Abbildung 2-2. Entladen des Bootstrap-Kondensators**

## 2.1 Auswahl des Ladungspumpenkondensators

Der vom Bootstrap bereitgestellte Maximalwert kann approximiert werden, indem die Eingangsspannung zum Bootstrap genommen und der Spannungsabfall der Diode subtrahiert wird. Je nach dem Wert des RC-Schaltkreises und des PWM-Signals kann das Bootstrap jedoch den stationären Zustand erreichen, bevor das Bootstrap den Maximalwert erreicht. Die RC-Zeitkonstante ist wie folgt definiert:

$$\tau = R \times C \quad (1)$$

Kondensator und Widerstand bestimmen die RC-Zeitkonstante zum Laden und Entladen des Kondensators. Es besteht ein Kompromiss zwischen Startzeit und Welligkeit im stationären Zustand. Eine kleinere Zeitkonstante bedeutet, dass der Kondensator schneller geladen und entladen kann und schneller in den stationären Zustand gelangt. Sobald der Kondensator jedoch den stationären Zustand erreicht hat, kann der Kondensator bei einer größeren Zeitkonstante pro PWM-Tastverhältnis mehr Spannung laden oder entladen als der Kondensator, was zu einer größeren Welligkeit führt. Ebenso kann eine größere Zeitkonstante aufgrund längerer Lade- oder Entladezeiten zu weniger Welligkeit führen. Der Kondensatorwert kann mit den folgenden Parametern geschätzt werden:

1. PWM-Schaltfrequenz
2. PWM-Tastverhältnis
3. Erforderlicher Strom zur Stromversorgung des isolierten Verstärkers
4. Zulässige Welligkeit

Wir können umordnen wie gezeigt in [Gleichung 2](#) [Gleichung 3](#), um die Kapazität zu berechnen.

$$Q = I \times t = \Delta V_{\text{ripple}} \times C \quad (2)$$

$$C = \frac{I \times t}{\Delta V_{\text{ripple}}} \quad (3)$$

Unter Annahme einer Schaltfrequenz von 20 kHz mit einem Tastverhältnis von 50 %, unter Verwendung der maximalen Stromaufnahme aus dem Datenblatt AMC1311-Q1 und der Anforderung einer maximalen Welligkeit von 100 mV wird der folgende Mindestkapazitätswert empfangen:

$$C = \frac{9.7\text{mA} \times 0.5 \times \frac{1}{20\text{kHz}}}{100\text{mV}} = 2.4\mu\text{F} \quad (4)$$

Von dort aus kann das Bootstrap simuliert werden, um die Startzeit zu schätzen, und ein geeigneter Kondensator und Widerstand können anhand der Anforderungen an die Startzeit ausgewählt werden. Der Widerstand muss ausgewählt werden, damit der Widerstand die Highside des Verstärkers nicht daran hindert, ausreichend Strom zu ziehen.

## 2.2 Simulation in TINA-TI

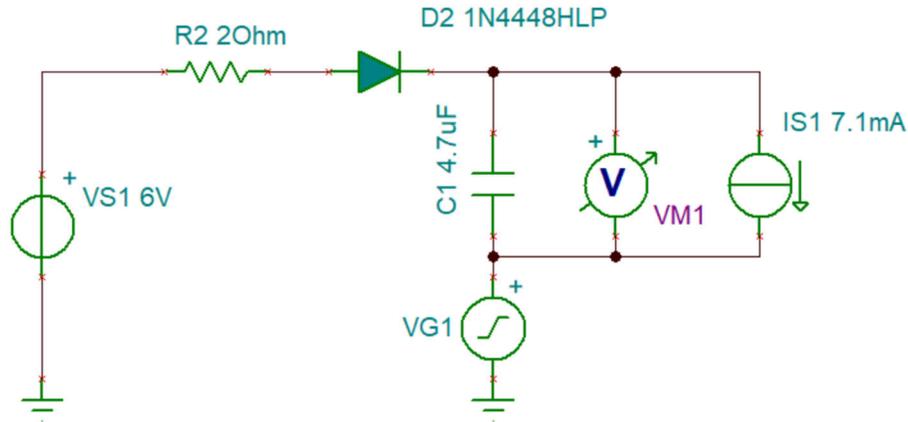


Abbildung 2-3. Simulationsmodell

VS1 ist der Ausgang des LDO, VG1 wird zur Simulation des PWM-Signals verwendet und IS1 simuliert die Lastaufnahme des isolierten Verstärkers. Da VS1 6 V beträgt und der Spannungsabfall über die Diode 300 mV beträgt, beträgt die maximale Ausgangsspannung des Bootstrap 5,4 V. VG1 liefert ein PWM-Signal von 20 kHz, 50 V<sub>pp</sub> mit einem Tastverhältnis von 50 %. C1 wird vier verschiedene Kondensatorwerte schrittweise durchlaufen.

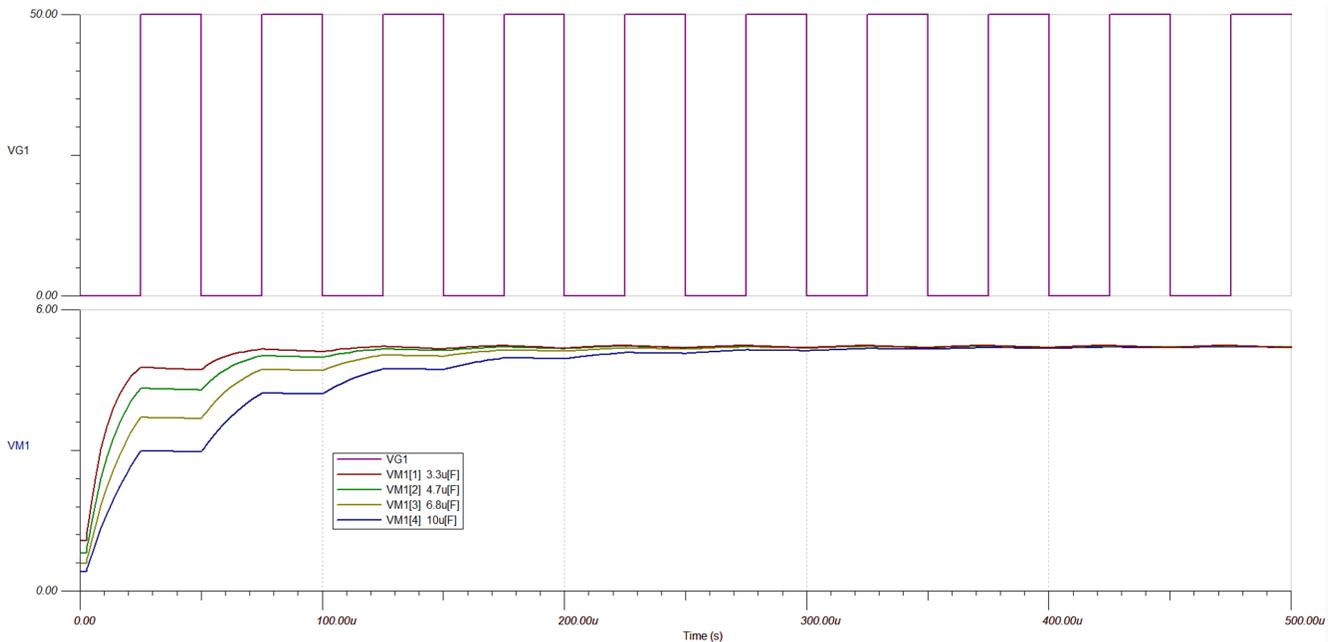


Abbildung 2-4. Vergleich der Kondensatorwerte

Tabelle 2-1. Ausgangsspannung im eingeschwungenen Zustand mit verschiedenen Kondensatoren

Kondensatorwert (μF)	Stationäre Welligkeit (mV)	Durchschnittlicher stationärer Zustand (V)
3,3	53,6	5,215
4,7	37,7	5,200
6,8	25,8	5,215
10	17,7	5,215

Abbildung 2-4 zeigt vier verschiedene Kondensatorwerte mit demselben PWM-Signal. Tabelle 2-1 zeigt die stationäre Ausgangsspannung mit den verschiedenen Kondensatoren. Beachten Sie, dass keiner der Kondensatoren den theoretischen maximalen stationären Zustand von 5,4 V erreicht. Mit abnehmender Welligkeit nimmt die Startzeit jedoch deutlich zu. Das Signal mit 4,7  $\mu\text{F}$  weist ein gutes Gleichgewicht zwischen Anlaufzeit und Welligkeit auf.

Die Startzeit und die Welligkeit des Bootstrap-Schaltkreises im stationären Zustand hängen auch von der Frequenz und dem Tastverhältnis des PWM-Eingangssignals ab. Wir können dies in der Simulation beobachten, indem wir C1 auf einen einzelnen Wert einstellen und das von VG1 erzeugte PWM-Signal ändern.

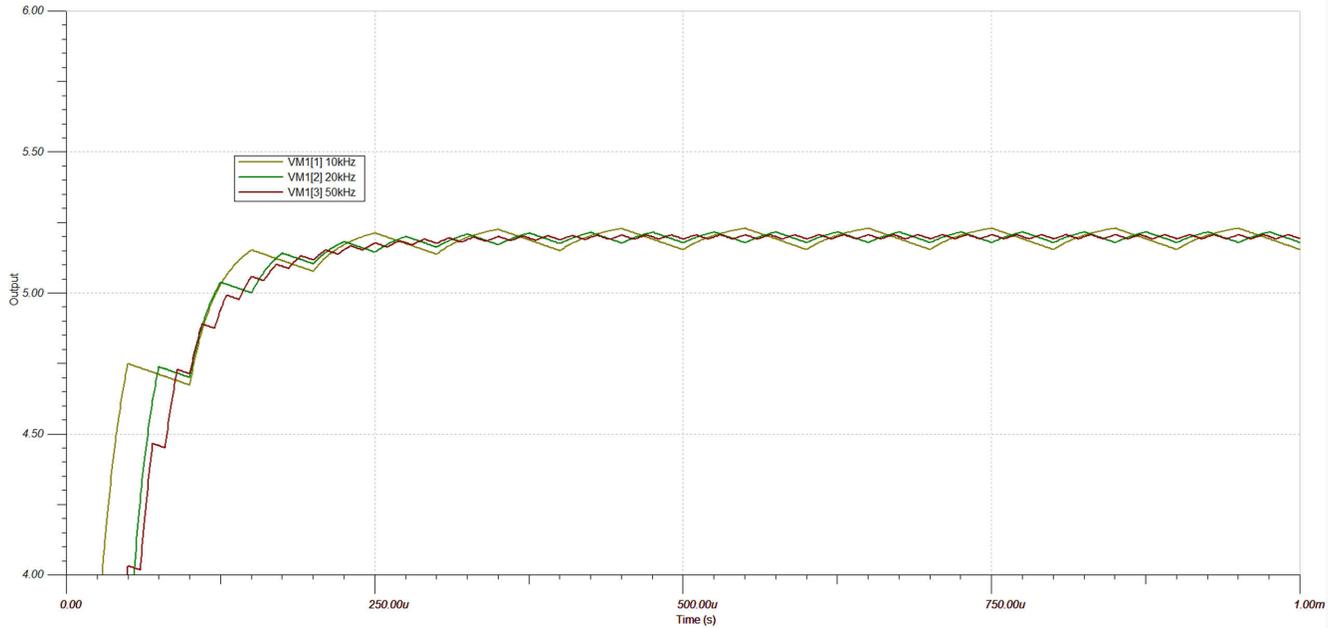


Abbildung 2-5. Ändern der PWM-Frequenz

Tabelle 2-2. Anlaufzeit und stationäre Spannung für verschiedene Frequenzen

PWM-Frequenz (kHz)	Stationäre Welligkeit (mV)	Durchschnittlicher stationärer Zustand (V)
10	75,1	5,190
20	37,7	5,200
50	14,7	5,200

C1 beträgt 4,7  $\mu\text{F}$  und das PWM-Signal hat eine Amplitude von 50 V<sub>pp</sub> und ein Tastverhältnis von 50 %. Die Frequenz hat einen viel größeren Einfluss auf die Ausgangswelligkeit, ohne die Startzeit und den durchschnittlichen stationären Zustand zu dramatisch zu beeinflussen, wie gezeigt in Tabelle 2-2.

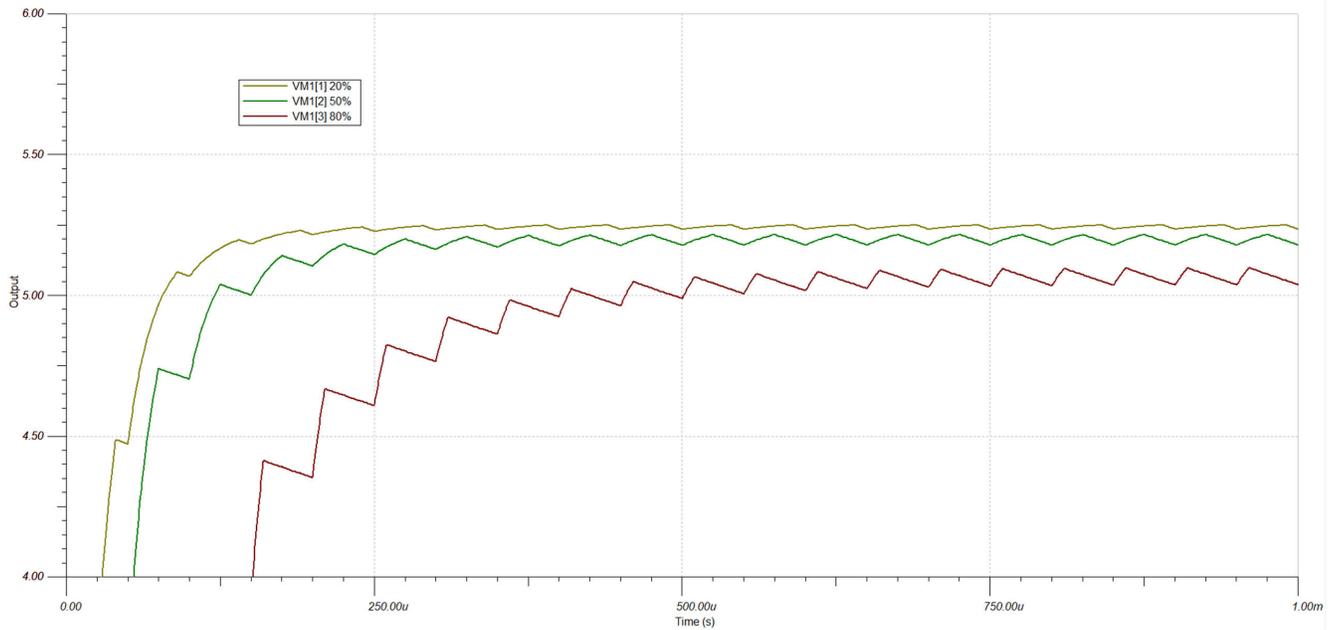


Abbildung 2-6. PWM-Tastverhältnis ändern

Tabelle 2-3. Startzeit und stationäre Zustandsspannung für verschiedene Tastverhältnisse

PWM-Tastverhältnis	Stationäre Welligkeit (mV)	Durchschnittlicher stationärer Zustand (V)
20%	14,7	5,245
50%	37,7	5,200
80%	59,9	5,070

C1 beträgt 4,7  $\mu\text{F}$  und das PWM-Signal hat eine Amplitude von 50 V<sub>pp</sub> und eine Frequenz von 20 kHz. Die Anlaufzeit und die durchschnittliche Leistung werden viel stärker beeinflusst, wie in [Abbildung 2-6](#) und [Tabelle 2-3](#) dargestellt.

Zu viel Welligkeit kann die Leistung des isolierten Verstärkers beeinträchtigen, da die prallende Stromversorgung Gleichtaktfehler am Ausgang verursachen kann. Allerdings kann die Genauigkeit des isolierten Verstärkers nicht überprüft werden, bevor der Verstärker den empfohlenen Mindestwert für die Highside-Stromversorgung des Verstärkers erreicht hat. Die Kenntnis des erwarteten PWM-Ausgangssignals ist entscheidend für den Entwurf einer effektiven Bootstrap-Schaltung innerhalb der Systemparameter. Allerdings wurde der 4,7  $\mu\text{F}$ -Kondensator unter der Annahme gewählt, dass das PWM-Signal ein Tastgrad von 50 % und eine Frequenz von 20 kHz haben kann (siehe [Sektion 2.1](#)), so dass die Mindestkapazität an die PWM-Signaleigenschaften angepasst werden kann (siehe [Gleichung 4](#)).

## 2.3 Hardware-Test mit AMC1311-Q1

Die eigentliche Schaltung wird als [Abbildung 1-1](#) erstellt, um die Simulationen zu verifizieren.  $C = 4,7 \mu\text{F}$ ,  $R = 2 \Omega$ , der Ausgang des LDO-Reglers beträgt 6 V und das PWM-Eingangssignal beträgt  $50 V_{\text{pp}}$  bei 20 kHz mit einem Tastverhältnis von 50 %. [AMC1311-Q1](#) ist der ausgewählte isolierte Verstärker und [TPS7A4101](#) der ausgewählte LDO für den großen Eingangsbereich.

Die Startzeit beträgt etwa 260  $\mu\text{s}$  und der stationäre Ausgangsstrom beträgt 5,1 V mit 29,7 mV Welligkeit, was relativ gut mit [Abbildung 2-3](#) übereinstimmt. Die Diskrepanz zwischen Simulation und Hardware ist auf die Strombegrenzungen der Ausrüstung zurückzuführen, die in einer für die Simulation entwickelten nicht berücksichtigt werden.

Die Welligkeit der Bootstrap-Stromversorgung hatte nur minimale Auswirkungen auf die Leistung von AMC1311 bis Q1 im Vergleich zur Leistung mit einer sauberen Stromversorgung. Das Clean-Signal wurde mit einem Transformator und einem LDO von der Low-Side-Stromschiene erzeugt. Dieses Transformator-Netzteil ist etwa doppelt so groß wie das Bootstrap-Netzteil und aufgrund der Transformatorkosten viel teurer als das Bootstrap-Netzteil. Wenn die Welligkeit zu hoch war, kann die Bootstrap-Stromversorgung auch mit einfachen RC-Filtern geglättet werden. Dies kann den Stromkreis minimal vergrößern und verteuern.

## 3 Zusammenfassung

Ein Bootstrap-Schaltkreis für Ladungspumpen ist eine effektive Möglichkeit zur Erzeugung einer isolierten Stromschiene für einen isolierten Verstärker in PWM-Anwendungen. Ein gut konstruiertes Bootstrap-Netzteil kann genauso effektiv wie ein sauberes Netzteil arbeiten und dabei Platz und Kosten sparen.

Bei der Entwicklung einer Bootstrap-Schaltung müssen mehrere wichtige Faktoren berücksichtigt werden. Es ist wichtig, die Stromaufnahme des isolierten Verstärkers, die Frequenz und Einschaltdauer des PWM-Signals, den zulässigen Bereich für die Anlaufzeit der Schaltung und die zulässige Welligkeit der Stromversorgung für den isolierten Verstärker zu kennen. Alle diese Spezifikationen können sich auf die Auswahl des RC-Schaltkreises im Bootstrap-Schaltkreis auswirken. Ein Bootstrap kann leicht simuliert werden, was den Auswahlprozess viel einfacher macht, da der Entwickler verschiedene RC-Werte unter verschiedenen Schaltkreisbedingungen einfach testen kann.

## 4 Referenz

1. Texas Instruments, [AMC13xx Parametric Table](#) .
2. Texas Instruments, [DC+ Bus Power-Supply Solution Using Bootstrap Charge Pump Technique](#) Anwendungshinweis.
3. Texas Instruments, [Using Isolated Comparators for Fault Detection in Electric Motor Drives](#) Analogdesignzeitschrift.
4. Texas Instruments, [Design Considerations for Isolated Current Sensing](#) Analogdesignzeitschrift.

## WICHTIGER HINWEIS UND HAFTUNGSAUSSCHLUSS

TI STELLT TECHNISCHE UND ZUVERLÄSSIGKEITSDATEN (EINSCHLIESSLICH DATENBLÄTTER), DESIGNRESSOURCEN (EINSCHLIESSLICH REFERENZDESIGNS), ANWENDUNGS- ODER ANDERE DESIGNBERATUNG, WEB-TOOLS, SICHERHEITSMITTELSCHWIERIGKEITEN UND ANDERE RESSOURCEN „WIE BESEHEN“ UND MIT ALLEN FEHLERN ZUR VERFÜGUNG, UND SCHLIESST ALLE AUSDRÜCKLICHEN UND STILLSCHWEIGENDEN GEWÄHRLEISTUNGEN AUS, EINSCHLIESSLICH UND OHNE EINSCHRÄNKUNG ALLER STILLSCHWEIGENDEN GEWÄHRLEISTUNGEN DER MARKTGÄNGIGKEIT, DER EIGNUNG FÜR EINEN BESTIMMTEN ZWECK ODER DER NICHTVERLETZUNG VON RECHTEN.

Diese Ressourcen sind für qualifizierte Entwickler gedacht, die mit TI-Produkten entwickeln. Sie allein sind verantwortlich für (1) die Auswahl der geeigneten TI Produkte für Ihre Anwendung, (2) das Design, die Validierung und den Test Ihrer Anwendung und (3) die Sicherstellung, dass Ihre Anwendung die geltenden Normen sowie alle anderen Sicherheits-, regulatorischen und sonstigen Vorgaben erfüllt.

Diese Ressourcen können jederzeit und ohne Vorankündigung geändert werden. Sie erhalten von TI die Erlaubnis, diese Ressourcen ausschließlich für die Entwicklung von Anwendungen mit den in der Ressource beschriebenen TI-Produkten zu verwenden. Jede andere Vervielfältigung und Darstellung dieser Ressourcen ist untersagt. Es wird keine Lizenz für andere Rechte am geistigen Eigentum von TI oder an Rechten am geistigen Eigentum Dritter gewährt. TI übernimmt keine Verantwortung für und Sie schützen TI und seine Vertreter gegen Ansprüche, Schäden, Kosten, Verluste und Verbindlichkeiten, die sich aus Ihrer Nutzung dieser Ressourcen ergeben.

Produkte von TI werden gemäß den [Verkaufsbedingungen von TI](#) oder anderen geltenden Bedingungen bereitgestellt, die entweder auf [ti.com](#) verfügbar sind oder in Verbindung mit diesen TI-Produkten bereitgestellt werden. Durch die Bereitstellung dieser Ressourcen durch TI werden die geltenden Garantien oder Gewährleistungsausschlüsse von TI für TI-Produkte weder erweitert noch verändert.

TI widerspricht allen zusätzlichen oder abweichenden Bedingungen, die Sie möglicherweise vorgeschlagen haben, und lehnt sie ab.

Postanschrift: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

## IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATA SHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you will fully indemnify TI and its representatives against, any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#) or other applicable terms available either on [ti.com](https://www.ti.com) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may have proposed.

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
Copyright © 2024, Texas Instruments Incorporated