

TI-PMLK

Power-Management-Laborkit
LDO-Experimentierbuch



GERU001B
PMLKLDOEVM REV. B



Name

Name der Universität/des Unternehmens

Adresse

Telefon

E-Mail

Viele Menschen haben mit mir bei der Realisierung des TI-TI-PMLK-Projekts zu verschiedenen Zeiten, auf verschiedenen Ebenen und auf unterschiedliche Weise zusammengearbeitet. Mein besonderer Dank gilt dem University Program Team von Texas Instruments und dem Leistungselektronik-Laborteam der Universität Salerno.

Nicola Femia

Vorwort

Felix, qui potuit rerum cognoscere causas ...
(Glücklich, wem es gelang, den Grund der Dinge zu erkennen ...)
Publius Vergilius Maro, 70 v. Chr. (Mantua) bis 19 v. Chr. (Brindisi)

Entwicklung ist eine spannende und faszinierende Kunst. Die Leistungselektronik ist aufgrund ihrer interdisziplinären Natur ein schwieriges Gebiet, auf dem das Wissen um das *Warum* erforderlich ist, um zu verstehen, *wie* Entwicklungsziele erreicht werden können. *Lernbereitschaft* und die geeigneten *Hilfsmittel zum Lernen* sind die beiden Grundvoraussetzungen, um die Fähigkeit zu entwickeln, den Sachverhalt der Probleme zu verstehen, die entsprechenden Techniken und Methoden zu deren Lösung auszuwählen, sinnvolle Entwicklungsentscheidungen zu treffen und die Lösungen auf intelligente Weise zu beurteilen.

Der Hauptzweck der TI-PMLK-Reihe von Experimentierbüchern besteht darin, den Forschungsgeist von Studenten und berufstätigen Ingenieuren anzuregen, die sich mit der Entwicklung von Stromversorgungslösungen befassen. Die Experimente decken die grundlegenden Themen und Probleme bei der Entwicklung von energieeffizienten nicht isolierten DC/DC-Stromversorgungen ab, wie z. B. Netzteiltopologien und -eigenschaften, Betriebsmodi, Wirkungsgrad, Regelung, Stabilität, Genauigkeit, Einschwingverhalten, Rauschen, Magnetik und vieles mehr. Die Experimente können mithilfe der Stromversorgungsplatinen des TI-PMLK-Pakets durchgeführt werden, das Low-Drop-Linearregler sowie Abwärts-, Aufwärts- und Abwärts-/Aufwärtsschaltregler umfasst. Die Experimentierbücher sollen keine erschöpfende Übersicht über die Fragen und Probleme bei der Entwicklung oder definitive Entwicklungshinweise geben. Sie sind vielmehr dazu vorgesehen, dem Leser eine facettenreiche aktive Lernerfahrung zu vermitteln.

Alle Experimente basieren auf einer logischen Abfolge von Schritten. Sie beginnen mit dem Abschnitt *Fallstudie*, in dem die spezifischen Eigenschaften oder Funktionen der im Experiment verwendeten Stromversorgungsplatine beschrieben sowie das Ziel und die Art der durchzuführenden Messung veranschaulicht werden. Der Abschnitt *Theoretischer Hintergrund* enthält eine kurze Zusammenfassung der Konzepte, Modelle und Gleichungen, um die Interpretation und das Verständnis der nachfolgenden experimentellen Beobachtungen zu unterstützen. Der Abschnitt *Messaufbau* enthält Anweisungen zum Anschließen der Messinstrumente, die für die Experimente mit der zu prüfenden Platine benötigt werden. Zur Vermeidung der Hauptfehler werden entsprechende Warnhinweise gegeben. Der Abschnitt *Prüfung* enthält Anweisungen zum Durchführen der Messungen sowie Richtlinien zum Analysieren und Interpretieren der Messergebnisse. Jede Prüfung enthält einen Abschnitt *Antworten*, in dem der Benutzer verschiedene Fragen beantworten und das Verhalten der geprüften Platine hinsichtlich des jeweils untersuchten Leistungsmerkmals auf Grundlage der beobachteten Messergebnisse und der Anwendung der in den verschiedenen Abschnitten des Experiments beschriebenen Konzepte und Eigenschaften erläutern muss. Der Abschnitt *Erörterung* enthält erläuternde Anmerkungen, damit die konzeptionellen und praktischen Zusammenhänge zwischen den Systemeigenschaften und der Betriebsleistung besser verstanden werden. Im letzten Abschnitt, *Experimentelle Oszilloskopkurven*, werden die Ergebnisse einiger Beispielmessungen dargestellt und erörtert.

Vorwort (Fortsetzung)

Die Experimente decken eine Vielzahl von stationären, transienten und dynamischen Prüfungen ab. Die meisten Prüfungen basieren auf zeitbezogenen Messungen. Bei manchen Prüfungen liegt jedoch der Schwerpunkt auf der Untersuchung dynamischer Eigenschaften, die durch Frequenzgangfunktionen wie dem Stromversorgungsunterdrückungsverhältnis beschrieben werden. So erlebt der Benutzer die Probleme bei Stromversorgungslösungen und erlangt ein besseres Verständnis. Für die meisten Experimente wird lediglich eine grundlegende Laborausstattung benötigt, z. B. ein Netzgerät, einige Multimeter, ein Oszilloskop und eine Last. Manche Prüfungen erfordern allerdings ausgefeiltere Messeinrichtungen, wie beispielsweise eine dynamische Quelle, eine dynamische Last und einen Vektor-Netzwerkanalysator, damit genaue Messungen vorgenommen werden können.

Die Platinen wurden speziell dafür entwickelt, dass der Einfluss der physikalischen Parameter und der Betriebsbedingungen eines Netzteils auf dessen Leistung untersucht werden kann. Es können verschiedene Kombinationen von Leistungs- und Steuerungskomponenten ausgewählt werden. Die meisten davon liefern Betriebsbedingungen, die den allgemein anerkannten technischen Standards entsprechen. Einige können aber zu Betriebsbedingungen wie Instabilität führen, die in der Regel in industriellen Anwendungen nicht erwünscht sind. Dadurch erlangt der Leser ein fundiertes Verständnis realer Phänomene dieser Art.

Für jedes Experiment werden Kombinationen von Leistungs- und Steuerungskomponenten vorgeschlagen. Bei einigen Experimenten wird der Benutzer aufgefordert, Kombinationen zu ermitteln, die zu einem bestimmten Betriebszustand oder -verhalten führen. Der Benutzer kann mithilfe der Jumper und Anschlüsse eine Vielzahl von Zuständen erzeugen. Das Buch enthält Empfehlungen und Warnhinweise zur Sicherstellung des sicheren Platinenbetriebs und zur Durchführung effektiver Messungen. Vor der Durchführung jedes

Experiments wird dringend dazu geraten, sämtliche Warnhinweise sowie den einführenden Buchabschnitt mit der spezifischen Beschreibung der Platine und den Informationen zu den Einstellungen und zur Leistung (einschließlich der unzulässigen Kombinationen und speziellen Betriebsbedingungen) sorgfältig zu lesen. Außerdem wird nachdrücklich empfohlen, die Herstellerdatenblätter aller auf den Platinen montierten Bauteile zu lesen, insbesondere die der Steuerchips, um die Kenntnisse hinsichtlich der verschiedenen Bausteine zu vertiefen.

Eine gute Kenntnis der auf den Platinen implementierten Stromversorgungslösungen, unterstützt durch heuristische Beobachtungen sowie die in diesem Buch erläuterten Modelle und Verfahren, hilft bei der Unterscheidung, was möglich ist und was nicht.

Die Detailgenauigkeit und die Vollständigkeit der im Abschnitt *Theoretischer Hintergrund* behandelten Modelle unterscheiden sich von Experiment zu Experiment. Manche Modelle enthalten bestimmte spezifische Eigenschaften, andere hingegen sind vereinfacht oder stellen eine Näherung dar. Das Erreichen einer Vertrautheit mit den Modellen ist ein elementarer Lernschritt: Ein versierter Netzteilentwickler muss in der Lage sein, die Wichtigkeit der Modellierung bestimmter Eigenschaften sowohl auf Baustein- als auch auf Systemebene einzuschätzen, um beurteilen zu können, ob die Modelle wirklich sinnvolle und maßgebliche Informationen in Bezug auf die Anforderungen der Anwendung liefern. Die wesentlichen Formeln und Ausdrücke für die grundlegende Analyse des zu untersuchenden Phänomens werden meistens ohne schrittweise theoretische Ableitungen vorgestellt, da dies den Rahmen dieses Buches sprengen würde.

Dem Leser wird empfohlen, seine Wissenslücken durch eingehende Studien der in den genannten Referenzen beschriebenen Modelle und Methoden zur Analyse und Entwicklung von Stromversorgungslösungen zu schließen.

Vorwort (Fortsetzung)

Die Parameter der Halbleiter und passiven Leistungskomponenten auf den Platinen sind im Buch enthalten, damit die Analyseformeln und Gleichungen angewendet werden können. Alle Parameter der Leistungskomponenten unterliegen aufgrund von Toleranzen, Alterung und Einflussfaktoren wie Temperatur, Strom, Spannung und Frequenz gewissen Unsicherheiten. Die in diesem Buch genannten Werte wurden den Herstellerdatenblättern entnommen und gelten für bestimmte Referenzbedingungen. Die Leistungs- und Steuerungskomponenten sowie die Teilschaltungen der integrierten Schaltkreise zur Stromversorgungssteuerung, welche die Betriebsmodi und Leistung bestimmen, werden ebenfalls durch Temperatur, Strom, Spannung und Frequenz beeinflusst. Daher können die mit den Formeln und Gleichungen in diesem Buch berechneten Werte, die auf Parametern von Leistungs- und Steuerungsbausteinen basieren, mehr oder weniger von den Ergebnissen der experimentellen Messungen abweichen.

Es wird dringend empfohlen, die in diesem Buch genannten Referenzen zu lesen, die Eigenschaften und das Verhalten der integrierten Schaltungen und Leistungskomponenten auf den Platinen zu analysieren sowie zu prüfen, ob mit anderen Parameterwerten der Komponenten eine bessere Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der Formeln

und den Ergebnissen der experimentellen Messungen erzielt werden kann. Die Untersuchung der realen Bauteileigenschaften und deren Einfluss auf die Gesamtleistung einer Stromversorgung ist ein wesentlicher Tätigkeitsbereich eines Entwicklers.

Das eigentliche Ziel dieses Buches besteht darin, den Leser durch eine aktive Erfahrung zu begleiten, die aus Beobachtungen, Anwendung von Physik und Mathematik, Untersuchung von Realität und Schlussfolgerungen auf Systemebene für ein vertieftes technisches Verständnis besteht. Der Autor hofft, dass der Leser an diesem Buch Gefallen findet und Freude daran hat, als Entwicklungsingenieur tätig zu sein, als kreativer und eigenständiger Denker, der in der Lage ist, sich Wissen anzueignen und es weiterzuentwickeln, um immer neue Entwicklungsherausforderungen zu meistern.

Gewusst warum, gewusst wie!

Nicola Femia



Nicola Femia ist Professor an der Universität von Salerno in Italien und lehrt dort Leistungselektronik und energetische Intelligenz in den Masterstudiengängen Elektrotechnik und Computertechnik. Er leitet das Labor für Leistungselektronik und erneuerbare Energiequellen. Professor Femia förderte und leitete in den letzten 25 Jahren weltweit im Hochschul- und Industriebereich zahlreiche Forschungsaktivitäten und Bildungsprogramme auf den Gebieten Leistungselektronik, Photovoltaikanlagen und Stromversorgungsdesign. Er war Gastprofessor am Electrical Engineering Department der Stanford-Universität in Stanford, Kalifornien, und lehrte dort Power Electronics Control und Energy Aware Design.

E-Mail: femia@unisa.it;

Website: www.unisa.it/docenti/nicolafemia/index

Inhalt

Vorwort	7
Für die Experimente benötigte Messeinrichtungen.	13
Beschreibung des TI-PMLK LDO TPS7A4901	
• Schaltplan	16
• Materialliste	17
• Platine	18
• Anschlüsse, Jumper und Testpins	19
Beschreibung des TI-PMLK LDO TPS7A8300	
• Schaltplan	20
• Materialliste	21
• Platine	22
• Anschlüsse, Jumper und Testpins	23
Hinweise, Warnungen und Empfehlungen	24
Experiment 1	
<i>Auswirkungen der Eingangsspannungs- und Lastbedingungen auf die Dropout-Spannung</i>	25
Experiment 2	
<i>Auswirkungen der Eingangsspannungs- und Lastbedingungen auf den Wirkungsgrad</i>	37

Experiment 3	
<i>Auswirkungen der Eingangsspannungs-/ Lastbedingungen und des Ausgangskondensators auf Stabilität und Einschwingverhalten</i>	49
Experiment 4	
<i>Auswirkungen der Kondensatoren auf das Stromversorgungsunterdrückungsverhältnis</i>	61
Experiment 5	
<i>Auswirkungen der Eingangsspannungs- und Lastbedingungen auf die Dropout-Spannung</i>	73
Experiment 6	
<i>Auswirkungen des Ausgangskondensators auf das Einschwingverhalten unter Last</i>	85
Anhang A	
<i>Referenzen</i>	97
Anhang B	
<i>Hersteller-Websites</i>	98



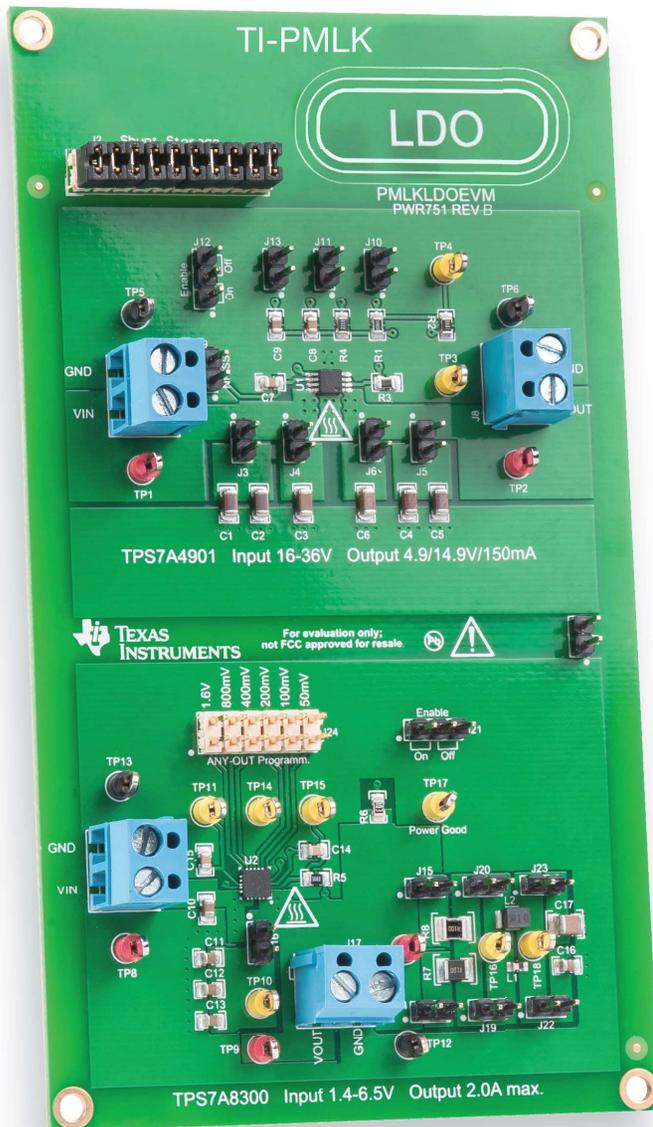
Für die Experimente benötigte Messeinrichtungen

Für die Durchführung der Experimente in diesem Buch werden die folgenden Messeinrichtungen empfohlen:

- Gleichspannungsnetzgerät (0–50 V/4 A) mit dynamischem Spannungsmodus
- Elektronische Gleichspannungslast (20 V/10 A) mit dynamischem Strommodus
- 4 digitale Multimeter mit einer Auflösung von 4½ Stellen
- Digitales 4-Kanal-Oszilloskop (250 MHz) + 2 Stromtastköpfe 20 A/50 MHz
- Vektor-Netzwerkanalysator (10 Hz –10 MHz) mit Spannungseinspeiser
- 10-MHz-Funktionsgenerator

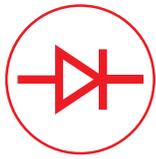
Für die experimentellen Beispielkurven in diesem Buch wurden im Labor folgende Messeinrichtungen verwendet:

- Netzgerät TTI EX354RT mit 0 –70 V/4 A (wurde in den Experimenten verwendet, in denen die zu prüfende Platine von einer konstanten Gleichspannungsquelle versorgt werden musste)
- SMU-Messgerät Keithley 2420 SourceMeter mit 63 V/3.15 A (wurde in den Experimenten verwendet, in denen die zu prüfende Platine von einer dynamischen Gleichspannungsquelle versorgt werden musste)
- Elektronische Last Sorensen SLM-4 (Haupteinheit) + elektronische Lastmodule der SLM-Serie mit 60 V/60 A
- Digitales 4-Kanal-Oszilloskop LeCroy WaveRunner 44Xi (400 MHz) mit 2 Stromtastköpfen Tektronix TCP 305 (50 A) + Verstärker Tektronix TCP A300
- Vektor-Netzwerkanalysator Omicron Bode 100 (1 Hz –40 MHz) mit Spannungseinspeiser Picotest J2120A (wurde im Experiment verwendet, in dem die zu prüfende Platine von einer statischen Gleichspannungsquelle mit eingespeisten Wechselstrom-Störeinflüssen versorgt werden musste)
- 30-MHz-Funktionsgenerator Agilent 33500B



TI-PMLK LDO

TI-PMLK LDO ist eine experimentelle Stromversorgungsplatine, die auf zwei integrierten linearen Spannungsreglern basiert, dem TPS7A8300 mit äußerst geringer Dropout-Spannung und dem extrem rauscharmen TPS7A4901.



TI-PMLK TPS7A4901 – Schaltplan

Der TI-PMLK TPS7A4901-Abschnitt der Platine akzeptiert Eingangsspannungen von 6 bis 36 V und liefert eine geregelte Ausgangsspannung von 5 V oder 15 V bei einem maximalen Laststrom von 150 mA.

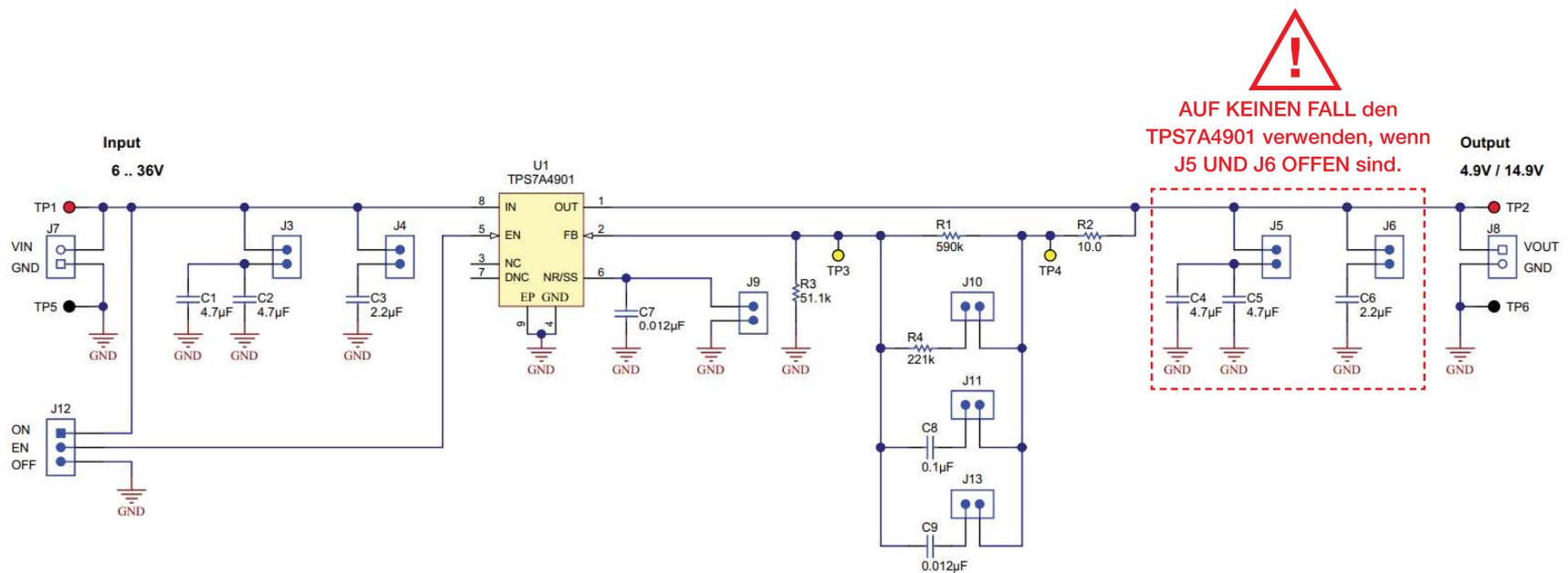


Abbildung 1: Schaltplan des LDO-Reglers TI-PMLK TPS7A4901



TI-PMLK TPS7A4901 – Materialliste

Bezeichnung	Beschreibung	Hersteller	Teilenummer
C1, C2, C4, C5	Keramikkondensator, 4.7 μ F, 50 V, +/-10 %, X7R, 1206	Taiyo Yuden	UMK316AB7475KL-T
C3, C6	Keramikkondensator, 2.2 μ F, 50 V, +/-10 %, X7R, 1206	MuRata	GRM31CR71H225KA88L
C7, C9	Keramikkondensator, 0.012 μ F, 50 V, +/-10 %, X7R, 0805	AVX	08055C123KAT2A
C8	Keramikkondensator, 0.1 μ F, 50 V, +/-10 %, X7R, 0805	Kemet	C0805C104K5RACTU
R1	Widerstand, 590 k Ω , 1 %, 0.125 W, 0805	Panasonic	ERJ-6ENF5903V
R2	Widerstand, 10 Ω , 0.1 %, 0.125 W, 0805	Yageo America	RT0805BRD0710RL
R3	Widerstand, 51.1 k Ω , 0.1 %, 0.125 W, 0805	Susumu Co Ltd	RG2012P-5112-B-T5
R4	Widerstand, 221 k Ω , 1 %, 0.125 W, 0805	Vishay-Dale	CRCW0805221KFKEA
U1	LDO-Regler mit einem Ausgang und hohem PSRR, 150 mA, Einstellbare Ausgangsspannung von 1.2 bis 33 V, 3 bis 36 V Eingangsspannung, extrem rauscharm, 8-poliges MSOP-Gehäuse (DGN)	Texas Instruments	TPS7A4901DGNR

(Anhand der Teilenummern der Komponenten kann auf den im Anhang aufgelisteten Hersteller-Websites nach näheren Informationen zu den Parametern und Daten gesucht werden, die in den Formeln für die Berechnungen in jedem Experiment verwendet werden.)



TI-PMLK TPS7A4901-Platine

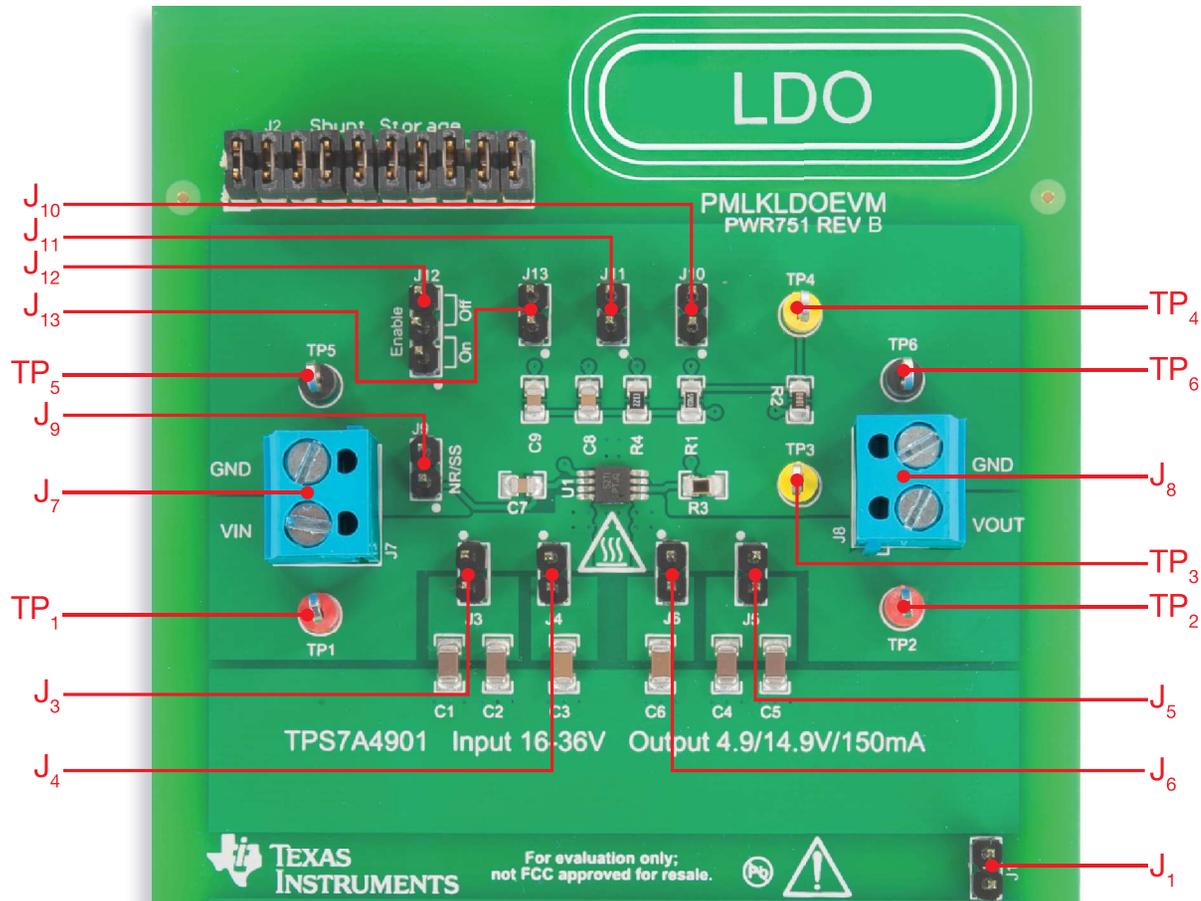


Abbildung 2: Ansicht der TI-PMLK TPS7A4901-LDO-Reglerplatine



TI-PMLK TPS7A4901 – Anschlüsse, Jumper und Testpins

Deskriptoren und Funktionen der Anschlüsse, Jumper und Testpins

Anschlüsse

J₇ – Schraubklemme für Eingangsspannung

J₈ – Schraubklemme für Ausgangsspannung

Jumper

J₁ – Verbindet die Massen der Platinenabschnitte von TPS7A4901 und TPS7A8300

J₃ – Verbindet die Eingangskondensatoren C₁ (4.7 µF) und C₂ (4.7 µF)

J₄ – Verbindet Eingangskondensator C₃ (2.2 µF)

J₅ – Verbindet die Ausgangskondensatoren C₄ (4.7 µF) und C₅ (4.7 µF)

J₆ – Verbindet Ausgangskondensator C₆ (2.2 µF)

J₉ – Verbindet den Entstör-/Softstartpin direkt mit Masse und überbrückt den Entstörkondensator C₇ (12 nF)

J₁₀ – Verbindet den Widerstand R₄ (221 kΩ) zum Einstellen der Ausgangsspannung auf 5 V

J₁₁ – Verbindet den Phasenvoreilungs-Kondensator C₈ (100 nF)

J₁₂ – Aktiviert den LDO-Betrieb, wenn der obere und mittlere Pin überbrückt werden (ON), und deaktiviert den LDO-Betrieb, wenn der mittlere und untere Pin überbrückt werden (OFF)

J₁₃ – Verbindet den Phasenvoreilungs-Kondensator C₉ (12 nF)

Testpins

TP₁ – Pluspol der Eingangsspannung

TP₅ – Massepol der Eingangsspannung

TP₂ – Pluspol der Ausgangsspannung

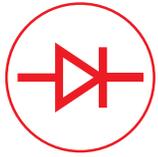
TP₆ – Massepol der Ausgangsspannung

TP₃ – Rückkopplungsspannung

TP₄ – Pin zum Messen der Schleifenverstärkung, kann zusammen mit **TP₃** verwendet werden, um das AC-Anregungssignal in den 10-Ω-Widerstand R₂ zu speisen

Spannungs- und Strommessungen

- Zum Messen der Eingangsspannung **TP₁** und **TP₅** verwenden
- Zum Messen der Ausgangsspannung **TP₂** und **TP₆** verwenden
- Zum Messen der Rückkopplungsspannung **TP₃** und **TP₆** verwenden
- Zum Messen des Eingangsstroms einen Stromtastkopf an einen der externen Stromversorgungsdrähte hängen, die mit **J₇** verbunden sind
- Zum Messen des Laststroms einen Stromtastkopf an einen der externen Stromversorgungsdrähte hängen, die mit **J₈** verbunden sind



TI-PMLK TPS7A8300 – Schaltplan

Der TI-PMLK TPS7A8300-Abschnitt der Platine akzeptiert Eingangsspannungen von 1.4 bis 6.5 V. Die Ausgangsspannung kann mit den Jumpers J_{24} bei einem maximalen Laststrom von 2 A auf 0.8 bis 3.95 V eingestellt werden.

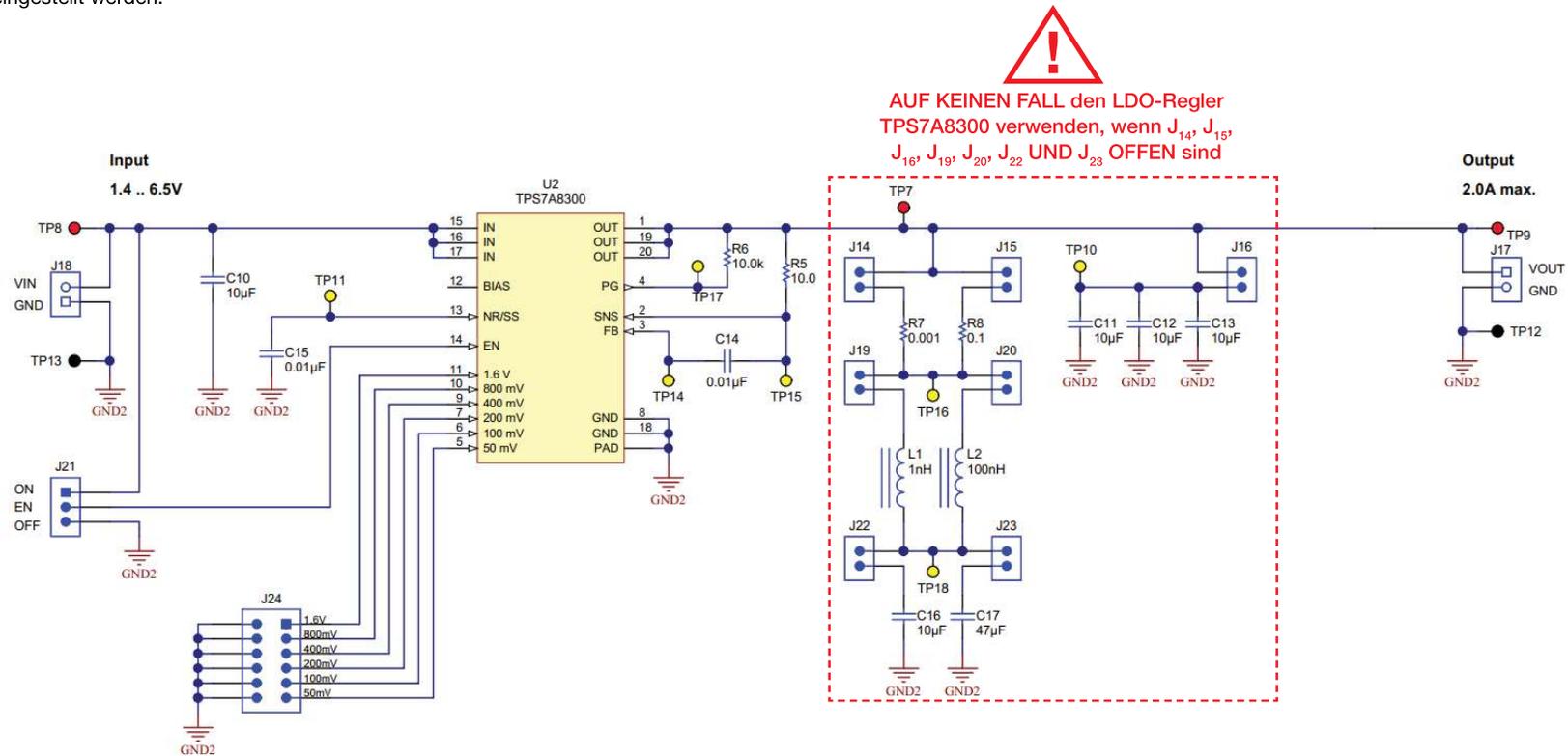


Abbildung 3: Schaltplan des LDO-Reglers TI-PMLK TPS7A8300



TI-PMLK TPS7A8300 – Materialliste

Bezeichnung	Beschreibung	Hersteller	Teilenummer
C10, C11, C12, C13, C16	Keramikkondensator, 10 μ F, 16 V, +/-10 %, X5R, 0805	MuRata	GRM21BR61C106KE15L
C14, C15	Keramikkondensator, 0.01 μ F, 50 V, +/-10 %, X7R, 0805	MuRata	GRM216R71H103KA01D
C17	Keramikkondensator, 47 μ F, 16 V, +/-20 %, X5R, 1210	MuRata	GRM32ER61C476ME15L
L1	Induktor, mehrschichtig, Keramik, 1 nH, 0.3 A, 0.015 Ω , SMD	Taiyo Yuden	HK16081N0S-T
L2	Induktor, drahtgewickelt, Ferritkern, 100 nH, 2.85 A, 0.02 Ω , SMD	TDK	NLCV32T-R10M-PFR
R5	Widerstand, 10 Ω , 1 %, 0.125 W, 0805	Yageo America	RC0805FR-0710RL
R6	Widerstand, 10 k Ω , 0.1 %, 0.125 W, 0805	Yageo America	RT0805BRD0710KL
R7	Widerstand, 0.001 Ω , 1 %, 1 W, 1210	Rohm	PMR25HZPFV1L00
R8	Widerstand, 0.1 Ω , 1 %, 0.5 W, 1210	Rohm	MCR25JZHFLR100
U2	LDO-Spannungsregler, rauscharm, HF, 2 A, 20-poliges QFP-Gehäuse	Texas Instruments	TPS7A8300RGR

(Anhand der Teilenummern der Komponenten kann auf den im Anhang aufgelisteten Hersteller-Websites nach näheren Informationen zu den Parametern und Daten gesucht werden, die in den Formeln für die Berechnungen in jedem Experiment verwendet werden.)



TI-PMLK TPS7A8300-Platine

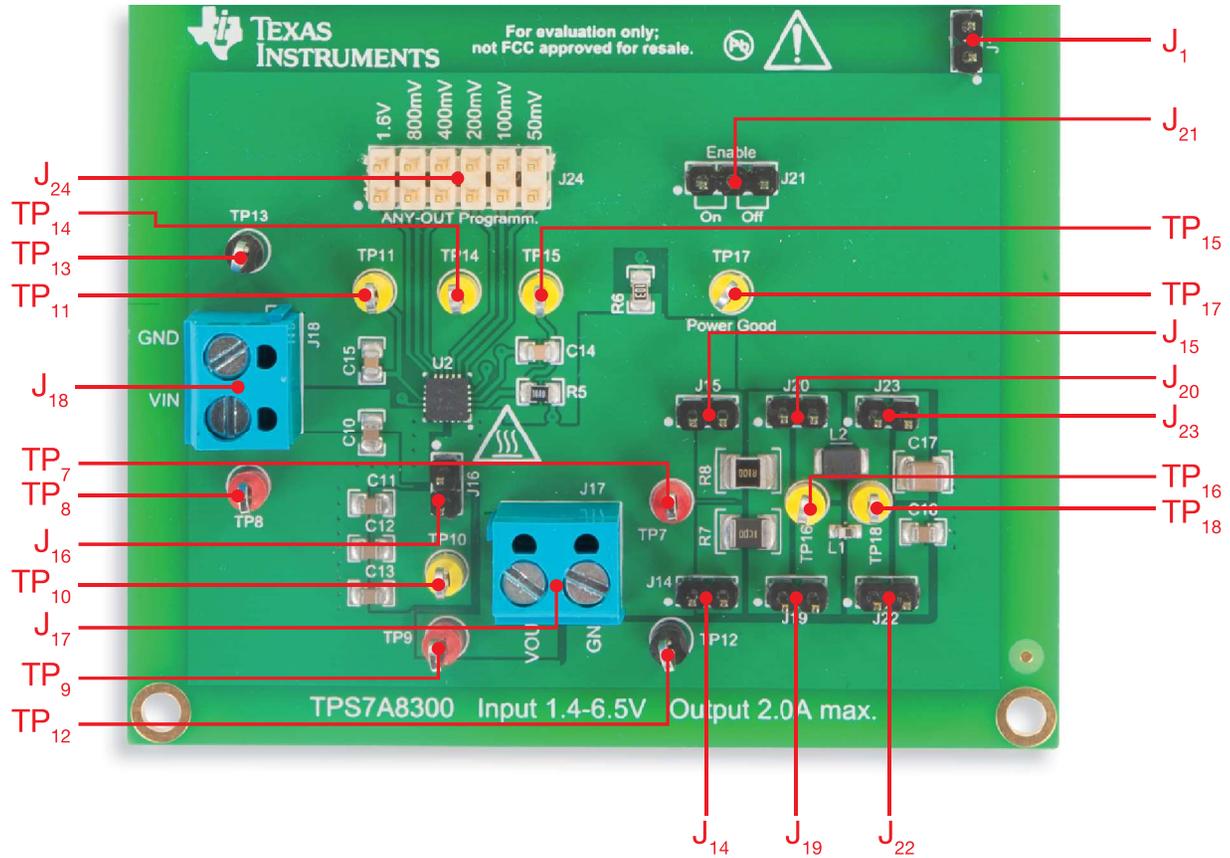


Abbildung 4: Ansicht der TI-PMLK TPS7A8300-LDO-Reglerplatine



TI-PMLK TPS7A8300 – Anschlüsse, Jumper und Testpins

Deskriptoren und Funktionen der Anschlüsse, Jumper und Testpins

Anschlüsse

- J₁₈** – Schraubklemme für Eingangsspannung
- J₁₇** – Schraubklemme für Ausgangsspannung

Jumper

- J₁₄** – Verbindet den Widerstand R_7 (1 m Ω) [simulierter ESR]
- J₁₅** – Verbindet den Widerstand R_8 (100 m Ω) [simulierter ESR]
- J₁₆** – Verbindet die Ausgangskondensatoren C_{11} – C_{13} (3 x 10 μ F)
- J₁₉** – Verbindet den Induktor L_1 (1 nH, 15 m Ω) [simulierte ESL]
- J₂₀** – Verbindet den Induktor L_2 (100 nH, 20 m Ω) [simulierte ESL]
- J₂₁** – Aktiviert den LDO-Betrieb, wenn der ON- und der EN-Pin überbrückt werden, und deaktiviert den LDO-Betrieb, wenn der EN- und der OFF-Pin überbrückt werden
- J₂₂** – Verbindet den Ausgangskondensator C_{16} (10 μ F)
- J₂₃** – Verbindet den Ausgangskondensator C_{17} (47 μ F)
- J₂₄** – Verbindet die internen Widerstände des TPS7A8300 zur Einstellung der Ausgangsspannung
- J₁** – Verbindet die Massen der Platinenabschnitte von TPS7A4901 und TPS7A8300

Testpins

- TP₈** – Pluspol der Eingangsspannung
- TP₉** – Pluspol der Ausgangsspannung
- TP₁₀** – Spannung an den Ausgangskondensatoren C_{11} – C_{13} (3 x 10 μ F)
- TP₁₁** – Spannung am Entstörkondensator
- TP₁₂** – Massepol der Ausgangsspannung
- TP₁₃** – Massepol der Eingangsspannung
- TP₁₄** – Rückkopplungsspannung
- TP₁₅** – Anschlusspin für Schleifenverstärkungsmessungen, kann zusammen mit **TP₇** verwendet werden, um das AC-Anregungssignal in den 10- Ω -Widerstand R_5 zu speisen
- TP₁₆** – Kann zusammen mit **TP₇** zum Messen des Spannungsabfalls an den Widerständen R_7 (1 m Ω) und R_8 (100 m Ω) [simulierter ESR] verwendet werden
- TP₁₇** – Power-Good-Signal
- TP₁₈** – Kann zusammen mit **TP₁₆** zum Messen der Spannung über die Induktoren L_1 (1 nH, 15 m Ω) und L_2 (100 nH, 20 m Ω) [simulierte ESL] oder über die Kondensatoren C_{16} (10 μ F) und C_{17} (47 μ F) verwendet werden

Spannungs- und Strommessungen

- Zum Messen der Eingangsspannung **TP₈** und **TP₁₃** verwenden
- Zum Messen der Ausgangsspannung **TP₉** und **TP₁₂** verwenden
- Zum Messen der Rückkopplungsspannung **TP₁₄** verwenden
- Zum Messen des Eingangsstroms einen Stromastkopf an einen der externen Stromversorgungsdrähte hängen, die mit **J₁₈** verbunden sind
- Zum Messen des Laststroms einen Stromastkopf an einen der externen Stromversorgungsdrähte hängen, die mit **J₁₇** verbunden sind



Hinweise, Warnungen und Empfehlungen

HINWEISE

- Der Jumper J_9 auf der TPS7A4901-LDO-Reglerplatine kann verwendet werden, um einen externen Kondensator parallel zum Entstör-/Softstart-Kondensator C_7 (12 nF) anzuschließen. Die Erhöhung dieser Kapazität führt zu einer längeren Softstartzeit beim Einschalten, einer Änderung des Stromversorgungsunterdrückungsverhältnisses (PSRR) und einer Verringerung der Ausgangsspannungswelligkeit.
- Der Jumper J_{10} auf der TPS7A4901-LDO-Reglerplatine kann verwendet werden, um einen externen Widerstand in Reihe mit dem Spannungsteilerwiderstand R_4 (221 k Ω) anzuschließen. Durch die Vergrößerung des Reihenwiderstands von R_3 kann die Ausgangsspannung erhöht werden. Der Wert des Widerstands R_x , der in Reihe mit R_4 geschaltet werden muss, um den Wert V_x der Ausgangsspannung V_{out} zu erhalten, wird mit folgender Formel berechnet:

$$R_x = \frac{R_1 R_3 (V_x - V_{ref})}{(R_1 + R_3) V_{ref} - R_3 V_x} - R_4$$

- Der Kondensator C_{16} (10 μ F) auf der TPS7A8300-Platine kann direkt mit dem Ausgang des LDO-Reglers TPS7A8300 verbunden werden, indem der obere Pin von Jumper J_{14} und der untere Pin von Jumper J_{22} gebrückt werden.
- Der Kondensator C_{17} (47 μ F) auf der TPS7A8300-Platine kann direkt mit dem Ausgang des LDO-Reglers TPS7A8300 verbunden werden, indem der obere Pin von Jumper J_{15} und der untere Pin von Jumper J_{23} gebrückt werden.

WARNUNGEN UND EMPFEHLUNGEN

ALLGEMEIN

- 1) **AUF KEINEN FALL** die angegebenen Nennwerte für Eingangsspannung, Ausgangsspannung und Strom überschreiten
- 2) Wenn der Ausgang der Platine an einer elektronischen Last im Konstantstrombetrieb abgeschlossen wird, ist folgende Reihenfolge einzuhalten:
 - a) Beim Einschalten: Zunächst das Netzgerät und dann die elektronische Last einschalten
 - b) Beim Ausschalten: Zunächst die elektronische Last und dann das Netzgerät ausschalten
- 3) Die Platine muss vor jeder Änderung an der Konfiguration der Jumper wie in Punkt 2) beschrieben ausgeschaltet werden.
- 4) Die Platine muss bei einer Umgebungstemperatur von 25 °C betrieben werden (maximal 27.5 °C)

LDO-REGLER TPS7A4901

- 1) **AUF KEINEN FALL** den Regler verwenden, wenn J_5 **UND** J_6 **OFFEN** sind
- 2) Damit das Einschwingverhalten unter Last genau gemessen werden kann, wird die Verwendung einer elektronischen Last mit hoher Anstiegsgeschwindigkeit (> 1 A/ μ s) und dynamischem Stromsenkenmodus empfohlen.
- 3) Damit das Einschwingverhalten bei Eingangsspannungstransienten genau gemessen werden kann, wird die Verwendung eines Netzgeräts mit hoher Anstiegsgeschwindigkeit (> 1 V/ μ s) und dynamischem Spannungsmodus empfohlen.
- 4) Wenn bei der PSRR-Prüfung ein Summierverstärker zur Einspeisung des AC-Anregungssignals verwendet wird, unbedingt darauf achten, dass die DC- und AC-Gesamteingangsspannung nie die maximale Nennspannung der Platine übersteigt und nie negativ wird.

LDO-REGLER TPS7A8300

- 1) Wenn J_{16} **OFFEN** ist, muss entweder der Kondensator C_{16} oder der Kondensator C_{17} mit dem Ausgang über J_{22} bzw. J_{23} mit dem Widerstand R_7 oder R_8 über J_{14} bzw. J_{15} und mit dem Induktor L_1 oder L_2 über J_{19} bzw. J_{20} verbunden werden.
- 2) Damit das Einschwingverhalten unter Last genau gemessen werden kann, wird die Verwendung einer elektronischen Last mit hoher Anstiegsgeschwindigkeit (> 1 A/ μ s) und dynamischem Stromsenkenmodus empfohlen.

Experiment 1

In diesem Experiment wird untersucht, wie die Fähigkeiten eines LDO-Reglers zur Regelung der Ausgangsspannung von den Eingangsspannungs- und Lastbedingungen abhängen. Dazu wird der LDO-Regler TPS7A4901 verwendet.



Fallstudie

In diesem Experiment wird untersucht, wie die Dropout-Spannung und die Genauigkeit der Ausgangsspannungsregelung eines LDO-Reglers von den Eingangsspannungs- und Lastbedingungen abhängen.

Abbildung 1 zeigt den vereinfachten Schaltplan des LDO-Reglers TPS7A4901. Zwei Faktoren kennzeichnen das **Regelvermögen** eines LDO-Reglers: der **Regelbereich** und die **Regelgenauigkeit**. Der Regelbereich wird durch den Eingangsspannungsbereich $[V_{INmin}, V_{INmax}]$ und den Ausgangsstrombereich $[I_{OUTmin}, I_{OUTmax}]$ definiert, in denen der LDO-Regler die Ausgangsspannung regeln kann. Der Ausgangsstrombereich erstreckt sich von ca. 0 A bis zu einem Höchststrom I_{OUTmax} , der sich nach der maximalen Nenntemperatur des LDO-Reglers, dem Wärmeableitvermögen des Gehäuses und der maximalen Eingangsspannung des Reglers richtet ($I_{OUTmax} = 150$ mA beim TPS7A4901). Der Ausgangsspannungsbereich reicht von der Dropout-Spannung $V_{DO} = V_{INmin}$, die sich nach den Eigenschaften des Pass-Bausteins richtet, bis zur Höchstspannung V_{INmax} , die von der Chiptechnologie abhängt ($V_{INmax} = 36$ V beim TPS7A4901). Die Regelgenauigkeit eines LDO-Reglers ist die prozentuale Toleranz $(V_{out} - V_{outnom}) / V_{outnom} \times 100$ der Ausgangsspannung V_{out} in Bezug auf den Sollwert V_{outnom} . Die Regelgenauigkeit hängt von der **Lastausregelung** und der **Eingangsspannungsausregelung** ab, definiert als Ausgangsspannungstoleranz gegenüber dem Laststrom I_{OUT} bzw. gegenüber der Eingangsspannung V_{IN} in den jeweiligen Regelbereichen $[I_{OUTmin}, I_{OUTmax}]$ und $[V_{INmin}, V_{INmax}]$.

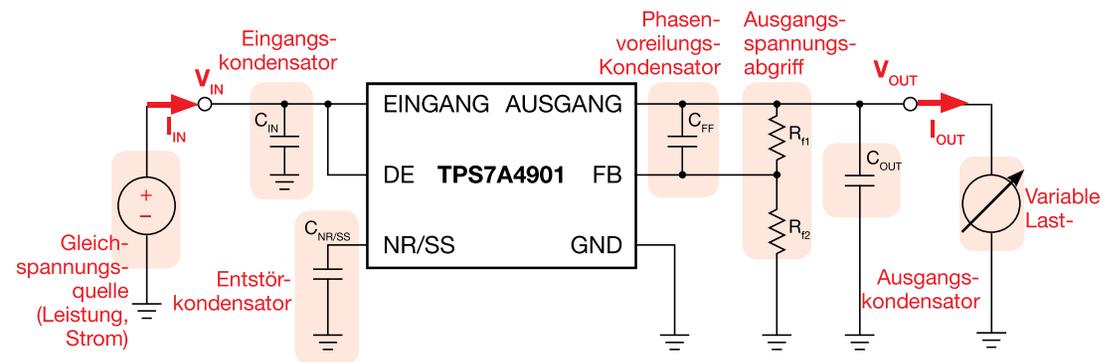


Abbildung 1: Vereinfachter Schaltplan des LDO-Reglers TPS7A4901

Prüfung 1: Wir messen die Eingangsspannung und die Ausgangsspannung des LDO-Reglers TPS7A4901, während der Laststrom geändert wird. Ziel ist es, die Dropout-Spannung des LDO-Reglers zu ermitteln. Um diesen Wert zu bestimmen, verringern wir die Eingangsspannung ab einem Anfangswert, der hinreichend größer als die Ausgangsspannung ist. Dabei beobachten wir die Ausgangsspannung, um festzustellen, wann diese niedriger als der Sollwert wird. Während der Verringerung der Eingangsspannung wird der Arbeitspunkt des LDO-Reglers entlang der Kurve in Abbildung 4 vom *Regelbereich* in den *Dropout-Bereich* verschoben.

Prüfung 2: Wir messen die Ausgangsspannung des LDO-Reglers TPS7A4901, während der Laststrom und die Eingangsspannung geändert werden. Das Ziel besteht darin, das Regelvermögen des LDO-Reglers in dessen Regelbereich zu untersuchen und festzustellen, ob und wie die Ausgangsspannung von der Eingangsspannung und vom Laststrom abhängt. Zur Überprüfung des Regelvermögens werden zwei Arten von Messungen durchgeführt. Zunächst stellen wir die Eingangsspannung des LDO-Reglers auf einen höheren Wert als die in der vorgehenden Prüfung ermittelte Dropout-Spannung ein, beobachten die Ausgangsspannung, während der Laststrom geändert wird, und bestimmen die *Lastausregelung*. Danach stellen wir den Laststrom auf einen gegebenen Wert ein, beobachten die Ausgangsspannung, während die Eingangsspannung geändert wird, und bestimmen die *Eingangsspannungsausregelung*.



Theoretischer Hintergrund

Dieser Abschnitt enthält grundlegende Informationen zu LDO-Reglern (in [1], [4], [11] und [12] sind allgemeine Informationen zum Betrieb und zu den Eigenschaften von LDO-Reglern zu finden. Weitere Details zum Betrieb und zu den Leistungsmerkmalen des TPS7A4901 können [2] entnommen werden).

Abbildung 2 zeigt die Architektur eines LDO-Reglers (Low-Dropout) mit einem PNP-Bipolartransistor als Pass-Baustein zwischen Eingang und Ausgang. Die Ausgangsspannung wird mithilfe des Spannungsteilers R_{f1} – R_{f2} gemessen, der die Rückkopplungsspannung V_{FB} erzeugt. Der Fehlerverstärker passt den Basisstrom des Pass-Bausteins an, bis die Kollektor-Emitter-Spannung V_{EC} der Differenz zwischen der Eingangsspannung V_{IN} und der gewünschten geregelten Ausgangsspannung (siehe Formel (1)) entspricht:

$$(1) \quad V_{OUT} = V_{ref} (1 + R_{f1} / R_{f2})$$

Hierbei ist V_{ref} die interne Referenzspannung. Der Basisstrom I_B fließt nach Masse und hängt von den Eingangsspannungs- und Lastbedingungen ab. Der PNP-Transistor muss im aktiven Bereich arbeiten, um die mit der Formel (1) berechnete Ausgangsspannung V_{OUT} bereitzustellen.

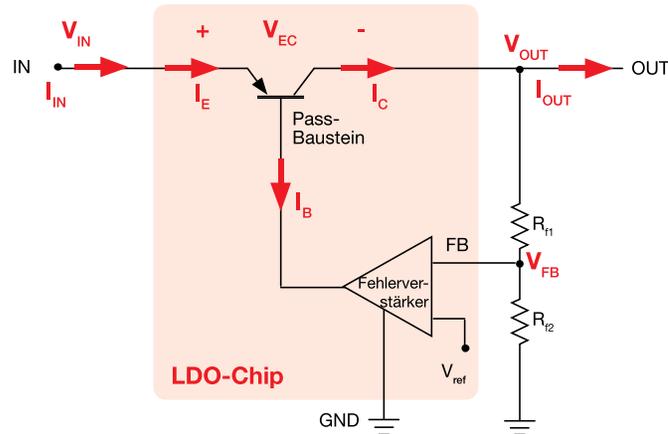


Abbildung 2

Abbildung 3 zeigt die Ausgangscharakteristik eines PNP-Bipolartransistors. Der PNP-Transistor arbeitet im aktiven Bereich und gewährleistet dadurch eine geregelte Ausgangsspannung, sofern die Eingangsspannung V_{IN} größer als $V_{INmin} = V_{OUT} + V_{EC,sat}(I_{OUT})$ ist, wobei $V_{EC,sat}(I_{OUT})$ die Emitter-Kollektor-Sättigungsspannung bei dem für die Last erforderlichen Strom I_{OUT} ist. Die Spannung V_{INmin} wird **Dropout-Spannung** genannt.

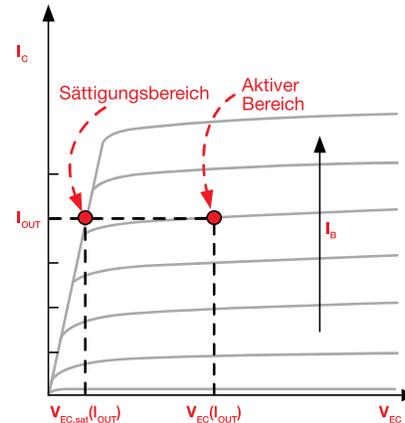


Abbildung 3

In Abbildung 4 wird gezeigt, wie die Ausgangsspannung abnimmt, wenn die Eingangsspannung V_{INmin} verringert wird. Wenn V_{IN} niedriger als die **Dropout-Spannung** V_{INmin} ist, arbeitet der PNP-Transistor im Sättigungsbereich von Abbildung 3 und kann nicht den von der Last benötigten Strom I_{OUT} liefern. Daher nimmt die Ausgangsspannung V_{OUT} gegenüber dem gewünschten Sollwert V_{OUTnom} ab. Dies entspricht dem **Dropout-Bereich** in Abbildung 4.

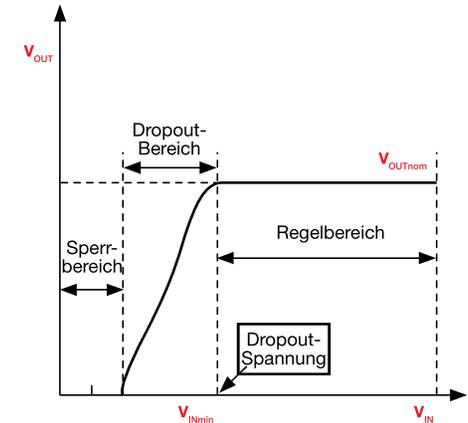


Abbildung 4

Wissenswertes

- Es ist theoretisch möglich, ein Verhältnis der Widerstände $R_{f1} / R_{f2} = V_{OUTnom} / V_{ref} - 1$ zu finden, das der gewünschten Nennausgangsspannung V_{OUTnom} entspricht. Allerdings sind die Werte handelsüblicher Widerstände standardisiert, so dass in den meisten Fällen das Nennverhältnis R_{f1} / R_{f2} mit dem Spannungsteiler aus den beiden Widerständen R_{f1} und R_{f2} nicht erreicht werden kann und daher die geregelte Spannung V_{OUT} nicht V_{OUTnom} entspricht.
- Handelsübliche Widerstände sind mit verschiedenen Toleranzen erhältlich. Widerstände mit 0.1 % Toleranz ermöglichen eine höhere Regelgenauigkeit, sind aber teurer als Widerstände mit 1 % Toleranz, die eine geringere Genauigkeit aufweisen.
- Die Referenzspannung V_{ref} des LDO-Reglers wird innerhalb des IC eingestellt und kann eine Toleranz von 1 bis 2 % aufweisen, die sich auf die geregelte Ausgangsspannung V_{OUT} auswirkt.



Versuchsaufbau: Konfiguration

Für dieses Experiment werden folgende Geräte benötigt: ein GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄT, vier MULTIMETER und eine ELEKTRONISCHE GLEICHSPANNUNGSLAST. Wie die Geräte verbunden werden, wird in Abbildung 5 gezeigt. Gehen Sie wie auf der nächsten Seite beschrieben vor, um die **Verbindungen herzustellen**.

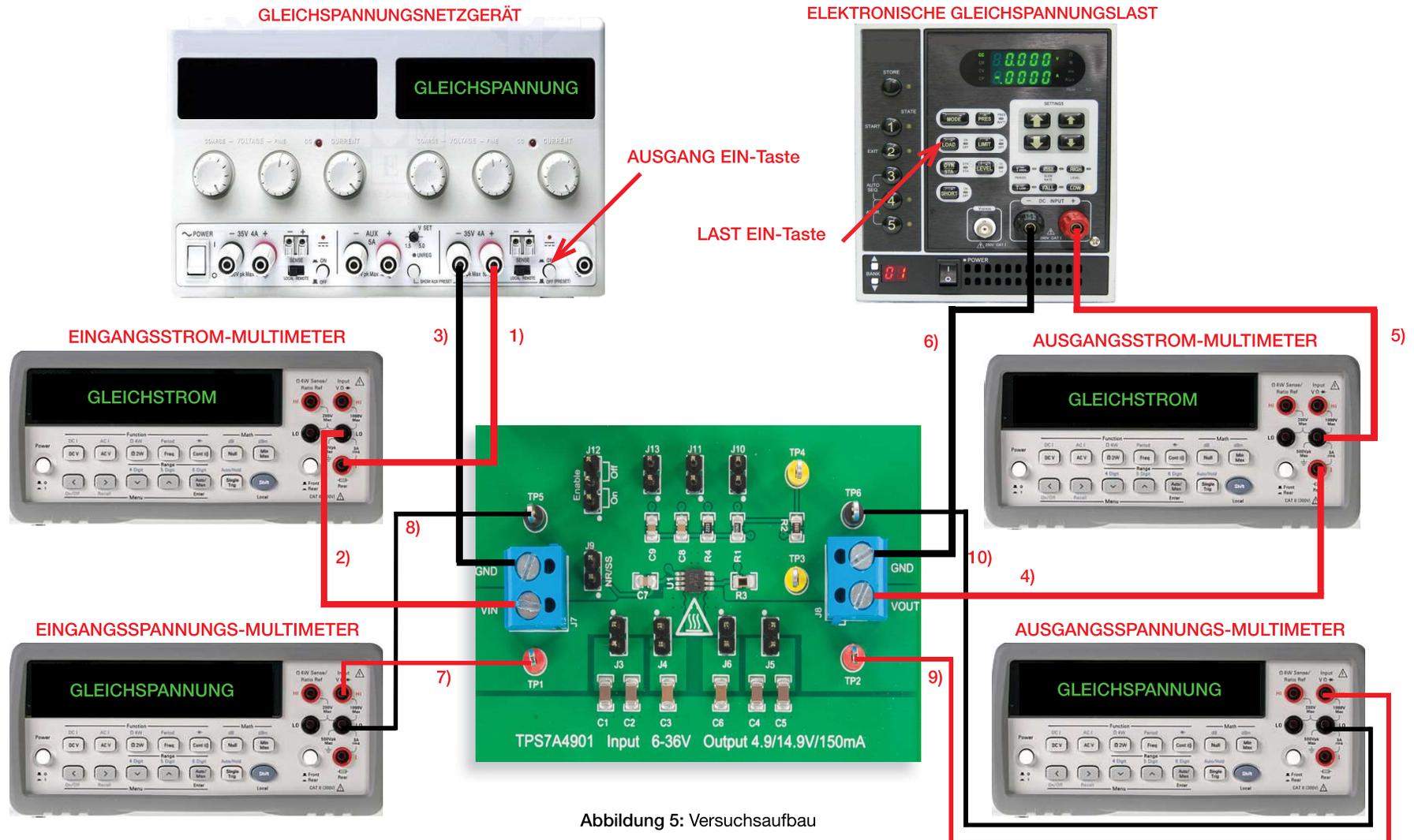


Abbildung 5: Versuchsaufbau



Versuchsaufbau: Anleitung

Vergewissern Sie sich, dass alle Geräte ausgeschaltet sind, und stellen Sie die folgenden **Verbindungen** her:

- 1) Verbinden Sie den PLUS-AUSGANG (ROT) des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS mit der PLUS-AMPEREBUCHSE (ROT) des EINGANGSSTROM-MULTIMETERS.
[**WARNUNG:** Zur Strommessung wird am Multimeter eine andere Plus-Buchse verwendet als zur Spannungsmessung.]
- 2) Verbinden Sie die MINUS-AMPEREBUCHSE (SCHWARZ) des EINGANGSSTROM-MULTIMETERS mit dem EINGANG (VIN) der Schraubklemme J_7 auf der TPS7A4901-LDO-Reglerplatine.
- 3) Verbinden Sie den MINUS-AUSGANG (SCHWARZ) des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS mit der MASSE (GND) der Schraubklemme J_7 auf der TPS7A4901-LDO-Reglerplatine.
- 4) Verbinden Sie den AUSGANG (VOUT) der Schraubklemme J_8 auf der TPS7A4901-LDO-Reglerplatine mit der PLUS-AMPEREBUCHSE (ROT) des AUSGANGSSTROM-MULTIMETERS.
[**WARNUNG:** Zur Strommessung wird am Multimeter eine andere Plus-Buchse verwendet als zur Spannungsmessung.]
- 5) Verbinden Sie die MINUS-AMPEREBUCHSE (SCHWARZ) des AUSGANGSSTROM-MULTIMETERS mit dem PLUS-EINGANG (ROT) der ELEKTRONISCHEN LAST.
- 6) Verbinden Sie den MINUS-EINGANG (SCHWARZ) der ELEKTRONISCHEN LAST mit der MASSE (GND) der Schraubklemme J_8 auf der TPS7A4901-LDO-Reglerplatine.
- 7) Verbinden Sie die PLUS-VOLTBUCHSE (ROT) des EINGANGSSPANNUNGS-MULTIMETERS mit dem TESTPIN TP_1 (VIN) der TPS7A4901-LDO-Reglerplatine.
- 8) Verbinden Sie die MINUS-VOLTBUCHSE (SCHWARZ) des EINGANGSSPANNUNGS-MULTIMETERS mit dem TESTPIN TP_5 (GND) der TPS7A4901-LDO-Reglerplatine.
- 9) Verbinden Sie die PLUS-VOLTBUCHSE (ROT) des AUSGANGSSPANNUNGS-MULTIMETERS mit dem TESTPIN TP_2 (VOUT) der TPS7A4901-LDO-Reglerplatine.
- 10) Verbinden Sie die MINUS-VOLTBUCHSE (SCHWARZ) des AUSGANGSSPANNUNGS-MULTIMETERS mit dem TESTPIN TP_6 (GND) der TPS7A4901-LDO-Reglerplatine.



Prüfung 1: Vorbereitung und Verfahren



Abbildung 6: TPS7A4901-LDO-Platine: Jumperkonfiguration für Prüfung 1

Jumperkonfiguration (siehe Abbildung 6):

- J_{12} gebrückt in Stellung ON → LDO-Betrieb aktiviert
- J_{10} gebrückt → Nennausgangsspannung $V_{out} = 5\text{ V}$
- J_{13} gebrückt → Phasenvoreilungs-Kondensator C_9 (12 nF) verbunden
- J_5 gebrückt → Ausgangskondensatoren C_4 (4.7 μF) und C_5 (4.7 μF) verbunden
- J_3 gebrückt → Eingangskondensatoren C_1 (4.7 μF) und C_2 (4.7 μF) verbunden
- J_4 offen → Eingangskondensator C_3 (2.2 μF) getrennt
- J_6 offen → Ausgangskondensator C_6 (2.2 μF) getrennt
- J_{11} offen → Phasenvoreilungs-Kondensator C_8 (100 nF) getrennt
- J_9 offen → Entstörkondensator C_7 (12 nF) getrennt

Prüfverfahren:

- 1) Die MULTIMETER einschalten.
- 2) Das EINGANGSSTROM-MULTIMETER auf GLEICHSTROMMODUS mit einem Bereich von $\leq 1\text{ A}$ einstellen.

- 3) Das AUSGANGSSTROM-MULTIMETER auf GLEICHSTROMMODUS mit einem Bereich von $\leq 1\text{ A}$ einstellen.
- 4) Das EINGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER auf GLEICHSPANNUNGSMODUS mit einem Bereich von $\geq 5\text{ V}$ einstellen.
- 5) Das AUSGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER auf GLEICHSPANNUNGSMODUS mit einem Bereich von $\geq 5\text{ V}$ einstellen.
- 6) Das NETZGERÄT einschalten (die Taste „AUSGANG EIN“ muss in der Stellung OFF sein).
- 7) Die SPANNUNG des NETZGERÄTS auf 6 V einstellen.
- 8) Die STROMBEGRENZUNG des NETZGERÄTS auf 200 mA einstellen.
- 9) Die ELEKTRONISCHE LAST einschalten (die Taste „LAST EIN“ muss in der Stellung OFF sein).
- 10) Die ELEKTRONISCHE LAST auf KONSTANTSTROMMODUS und den Gleichstrom auf 25 mA einstellen.
- 11) Die Taste „AUSGANG EIN“ des NETZGERÄTS in die Stellung ON bringen.
- 12) Nun sollten auf dem EINGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER ca. 6 V, auf dem AUSGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER etwa 5 V, auf dem AUSGANGSSTROM-MULTIMETER ca. 0 A und auf dem EINGANGSSTROM-MULTIMETER 0 A angezeigt werden (wenn die angezeigten Werte von diesen Angaben abweichen, die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen und die vorherigen Schritte überprüfen).
- 13) Die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST in die Stellung ON bringen.
- 14) Nun sollten auf dem EINGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER ca. 6 V, auf dem AUSGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER etwa 5 V, auf dem AUSGANGSSTROM-MULTIMETER 25 mA und auf dem EINGANGSSTROM-MULTIMETER ein wenig mehr als 25 mA angezeigt werden (wenn die angezeigten Werte deutlich von diesen Angaben abweichen, die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen und die vorherigen Schritte überprüfen).
- 15) Am GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄT die Spannung langsam verringern und dabei die Ausgangsspannung des LDO-Reglers TPS7A4901 auf dem AUSGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER überwachen. Aufhören, sobald die Spannung um mehr als 0.1 % sinkt, und die Werte von Ein- und Ausgangsspannung in Tabelle 1 eintragen.
- 16) Die Spannung am GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄT wieder auf 6 V einstellen und Schritt 15) für alle Laststromwerte in Tabelle 1 wiederholen.
- 17) Die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST und die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen.
- 18) Jumper J_{10} öffnen, um die Nennausgangsspannung V_{out} auf 15 V einzustellen, und die Schritte 10) bis 16) wiederholen. Diesmal jedoch das NETZGERÄT auf den Anfangswert 16 V einstellen (die Werte 6 V und 5 V lauten jetzt 16 V und 15 V). Anschließend die Spannungswerte in Tabelle 1 eintragen.
- 19) Nach den Messungen die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST und die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen und alle Geräte ausschalten.



Prüfung 1: Messungen und Berechnungen

Mit jeder Konfiguration von Jumper J_{10} (offen/gebrückt) die folgenden Schritte durchführen.

- 1) Die Nennausgangsspannung ^(a) V_{outnom} mit der Formel (1) im Abschnitt *Theoretischer Hintergrund* unter Verwendung der im Parameterfeld unten angegebenen Werte für R_{11} und R_{12} berechnen und das Ergebnis in Tabelle 1 eintragen [**HINWEIS:** Die Toleranzen der Messwiderstände können vernachlässigt werden].
- 2) Bei einem Laststrom von 25 mA die Ausgangsspannung ^(b) $V_{out,1V}$ bei $V_{IN} = V_{outnom} + 1 \text{ V}$ messen und das Ergebnis in Tabelle 1 eintragen.
- 3) Bei jedem Laststromwert in Tabelle 1 den Wert der Eingangsspannung ⁽¹⁾ V_{inmin} messen, bei dem die Ausgangsspannung ⁽²⁾ $V_{out,0.1\%}$ um mehr als 0.1 % von dem bei $V_{IN} = V_{outnom} + 1 \text{ V}$ gemessenen Wert abweicht [z. B. 5 mV bei 5 V], die Dropout-Spannung ⁽³⁾ $V_{drop} = V_{inmin} - V_{out,0.1\%}$ berechnen und die Werte V_{inmin} , $V_{out,0.1\%}$ und V_{drop} in Tabelle 1 eintragen.
- 4) Die Fragen beantworten und versuchen, die Ergebnisse der Beobachtungen anhand der Informationen im Abschnitt *Theoretischer Hintergrund* sowie in [1], [2] und [4] zu erläutern.

Tabelle 1: Dropout-Spannung des LDO-Reglers TPS7A4901 bei verschiedenen Lastströmen bei $V_{OUT} = 5 \text{ V}$ und $V_{OUT} = 15 \text{ V}$

		I_{OUT} [mA]	25	50	75	100	125	150
J_{10} gebrückt ($V_{outnom} \approx 5 \text{ V}$) ^(a) $V_{outnom} = V_{ref}(1 + R_{f1@J10sh} / R_{12}) = \dots\dots \text{ V}$ ^(b) $V_{out,1V}$ bei $\{V_{IN} = V_{outnom} + 1 \text{ V}, I_{OUT} = 25 \text{ mA}\} = \dots\dots \text{ V}$	(1)	V_{INmin} [V]	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
	(2)	$V_{OUT,0.1\%}$ [mV]	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)
	(3)	$V_{drop} = V_{INmin} - V_{OUT,0.1\%}$ [mV]	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)
J_{10} offen ($V_{outnom} \approx 15 \text{ V}$) ^(a) $V_{outnom} = V_{ref}(1 + R_{f1@J10op} / R_{12}) = \dots\dots \text{ V}$ ^(b) $V_{out,1V}$ bei $\{V_{IN} = V_{outnom} + 1 \text{ V}, I_{OUT} = 25 \text{ mA}\} = \dots\dots \text{ V}$	(1)	V_{INmin} [V]	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
	(2)	$V_{OUT,0.1\%}$ [mV]	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)
	(3)	$V_{drop} = V_{INmin} - V_{OUT,0.1\%}$ [mV]	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)

Messwiderstände:

J_{10} offen ($V_{OUT} = 15 \text{ V}$):

$$R_{11} = R_1 = 590 \text{ k}\Omega, \pm 1.0 \% \text{ Toleranz}$$

$$R_{12} = R_3 = 51.1 \text{ k}\Omega, \pm 0.1 \% \text{ Toleranz}$$

J_{10} gebrückt ($V_{OUT} = 5 \text{ V}$):

$$R_{11} = R_1(590 \text{ k}\Omega, \pm 1.0 \% \text{ Toleranz}) \text{ parallel zu } R_4 (221 \text{ k}\Omega, 1.0 \% \text{ Toleranz})$$

$$= 160.8 \text{ k}\Omega, \pm 0.5 \% \text{ Toleranz}$$

$$R_{12} = R_3 = 51.1 \text{ k}\Omega, \pm 0.1 \% \text{ Toleranz}$$

TPS7A4901-Referenzspannung:

$$V_{ref} = 1.194 \text{ V}, \pm 1.5 \% \text{ Toleranz}$$

Antworten:

1) Nimmt die Dropout-Spannung bei steigendem Laststrom zu oder ab? Nimmt zu Nimmt ab Andere: _____

2) Wie ändert sich die Dropout-Spannung bei den verschiedenen Werten von V_{out} ? Höher bei 15 V Höher bei 5 V Andere: _____



Prüfung 2: Vorbereitung und Verfahren



Abbildung 7: TPS7A4901-LDO-Platine: Jumperkonfiguration für Prüfung 2

Jumperkonfiguration (siehe Abbildung 7):

- **J₁₂ gebrückt** in Stellung **ON** → LDO-Betrieb aktiviert
- **J₁₀ gebrückt** → Nennausgangsspannung $V_{out} = 5\text{ V}$
- **J₁₃ gebrückt** → Phasenvoreilungs-Kondensator C_9 (12 nF) verbunden
- **J₅ gebrückt** → Ausgangskondensatoren C_4 (4.7 μF) und C_5 (4.7 μF) verbunden
- **J₃ gebrückt** → Eingangskondensatoren C_1 (4.7 μF) und C_2 (4.7 μF) verbunden
- **J₄ offen** → Eingangskondensator C_3 (2.2 μF) getrennt
- **J₆ offen** → Ausgangskondensator C_6 (2.2 μF) getrennt
- **J₁₁ offen** → Phasenvoreilungs-Kondensator C_8 (100 nF) getrennt
- **J₉ offen** → Entstörkondensator C_7 (12 nF) getrennt

Prüfverfahren:

- 1) Die MULTIMETER einschalten.
- 2) Das EINGANGSSTROM-MULTIMETER auf GLEICHSTROMMODUS mit einem Bereich von $\leq 1\text{ A}$ einstellen.

- 3) Das AUSGANGSSTROM-MULTIMETER auf GLEICHSTROMMODUS mit einem Bereich von $\leq 1\text{ A}$ einstellen.
- 4) Das EINGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER auf GLEICHSPANNUNGSMODUS mit einem Bereich von $\geq 10\text{ V}$ einstellen.
- 5) Das AUSGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER auf GLEICHSPANNUNGSMODUS mit einem Bereich von $\geq 20\text{ V}$ einstellen.
- 6) Das NETZGERÄT einschalten (die Taste „AUSGANG EIN“ muss in der Stellung OFF sein).
- 7) Die SPANNUNG des NETZGERÄTS auf 6 V einstellen.
- 8) Die STROMBEGRENZUNG des NETZGERÄTS auf 200 mA einstellen.
- 9) Die ELEKTRONISCHE LAST einschalten (die Taste „LAST EIN“ muss in der Stellung OFF sein).
- 10) Die ELEKTRONISCHE LAST auf KONSTANTSTROMMODUS und den Gleichstrom auf 50 mA einstellen.
- 11) Die Taste „AUSGANG EIN“ des NETZGERÄTS in die Stellung ON bringen
- 12) Nun sollten auf dem EINGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER ca. 6 V, auf dem AUSGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER etwa 5 V, auf dem AUSGANGSSTROM-MULTIMETER ca. 0 A und auf dem EINGANGSSTROM-MULTIMETER 0 A angezeigt werden (wenn die angezeigten Werte von diesen Angaben abweichen, die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen und die vorherigen Schritte überprüfen).
- 13) Die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST in die Stellung ON bringen.
- 14) Nun sollten auf dem EINGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER ca. 6 V, auf dem AUSGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER etwa 5 V, auf dem AUSGANGSSTROM-MULTIMETER 50 mA und auf dem EINGANGSSTROM-MULTIMETER ein wenig mehr als 50 mA angezeigt werden (wenn die angezeigten Werte sehr von diesen Angaben abweichen, die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen und die vorherigen Schritte überprüfen).
- 15) Die Ausgangsspannung vom AUSGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER ablesen und in Tabelle 2 eintragen. Danach diesen Schritt für alle in Tabelle 2 angegebenen Laststromwerte wiederholen, indem der Gleichstrom der ELEKTRONISCHEN LAST entsprechend eingestellt wird (die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST muss dazu nicht in die Stellung OFF gebracht werden). Den Regler des NETZGERÄTS verstellen, bis bei jedem Laststromwert 6 V auf dem EINGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER angezeigt werden.
- 16) Den Gleichstrom der ELEKTRONISCHEN LAST auf 50 mA einstellen, die Ausgangsspannung vom AUSGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER ablesen und den Wert in Tabelle 3 eintragen. Danach diesen Schritt für alle in Tabelle 3 angegebenen Eingangsspannungswerte wiederholen, indem die Gleichspannung des NETZGERÄTS entsprechend geändert wird (die Taste „AUSGANG EIN“ des NETZGERÄTS muss dazu nicht in die Stellung OFF gebracht werden). Den Regler des NETZGERÄTS verstellen, bis bei jedem Laststromwert die gewünschte Eingangsspannung auf dem EINGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER angezeigt wird.
- 17) Nach den Messungen die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST und die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen und alle Geräte ausschalten.



Prüfung 2: Messungen und Berechnungen

- 1) Die Nennausgangsspannung V_{out} mit der Formel (1) im Abschnitt *Theoretischer Hintergrund* unter Verwendung der im Parameterfeld unten angegebenen Werte für R_{f1} und R_{f2} berechnen.
- 2) Bei der Eingangsspannung $V_{in} = 6\text{ V}$ die Ausgangsspannung V_{out} bei jedem Wert des Laststroms I_{out} messen und das Ergebnis in Tabelle 2 eintragen.
- 3) Die prozentuale LASTAUSREGELUNG mit der Formel $(V_{out} - V_{outnom}) / V_{outnom} \times 100$ für jeden Wert des Laststroms I_{out} berechnen und in Tabelle 2 eintragen.
- 4) Beim Laststrom $I_{out} = 50\text{ mA}$ die Ausgangsspannung V_{out} bei jedem Wert der Eingangsspannung V_{in} messen und in Tabelle 3 eintragen.
- 5) Die prozentuale EINGANGSSPANNUNGSREGELUNG mit der Formel $(V_{out} - V_{outnom}) / V_{outnom} \times 100$ für jeden Wert der Eingangsspannung V_{in} berechnen und in Tabelle 3 eintragen.
- 6) Die Fragen beantworten und versuchen, die Ergebnisse der Beobachtungen anhand der Informationen im Abschnitt *Theoretischer Hintergrund* sowie in [1], [2] und [4] zu erläutern.

Tabelle 2: Lastausregelung des LDO-Reglers TPS7A4901 bei $V_{out} = 5\text{ V}$

$V_{in} = 6\text{ V}$	$I_{out} [\text{mA}]$					
	25	50	75	100	125	150
$V_{out} [\text{V}]$						
Lastausregelung [%]						

Tabelle 3: Eingangsspannungsausregelung des LDO-Reglers TPS7A4901 bei $V_{out} = 5\text{ V}$

$I_{out} = 50\text{ mA}$	$V_{in} [\text{V}]$					
	6	9	12	15	18	21
$V_{out} [\text{V}]$						
Leitungsregelung [%]						

Messwiderstände:

J_{10} offen ($V_{out} = 15\text{ V}$):

$R_{f1} = R_1 = 590\text{ k}\Omega, \pm 1.0\%$ Toleranz

$R_{f2} = R_3 = 51.1\text{ k}\Omega, \pm 0.1\%$ Toleranz

J_{10} gebrückt ($V_{out} = 5\text{ V}$):

$R_{f1} = R_1 (590\text{ k}\Omega, \pm 1.0\%$ Toleranz) parallel zu $R_4 (221\text{ k}\Omega, 1.0\%$ Toleranz)

$= 160.8\text{ k}\Omega, \pm 0.5\%$ Toleranz

$R_{f2} = R_3 = 51.1\text{ k}\Omega, \pm 0.1\%$ Toleranz

TPS7A4901-Referenzspannung:

$V_{ref} = 1.194\text{ V}, \pm 1.5\%$ Toleranz

Antworten:

1 Steigt die Ausgangsspannung bei zunehmendem Laststrom? Ja Nein Hängt von Folgendem ab: _____

2 Steigt die Ausgangsspannung bei zunehmender Eingangsspannung? Ja Nein Hängt von Folgendem ab: _____



Erörterung

In Prüfung 1 haben wir den Zusammenhang zwischen der Höhe der *Dropout-Spannung* und den Laststrom- und Eingangsspannungswerten untersucht.

Die Dropout-Spannung des LDO-Reglers steigt bei zunehmendem Ausgangsstrom, wie in Abbildung 8 gezeigt. Dies wird durch die Erhöhung der Kollektor-Emitter-Spannung des im Sättigungsbereich arbeitenden bipolaren PNP-Pass-Bausteins bei steigendem Strom in diesem Baustein verursacht. Ein LDO-Regler, der eine niedrigere Dropout-Spannung aufweist, kann mit einer geringeren Differenz zwischen Ein- und Ausgangsspannung arbeiten (Informationen zur Dropout-Spannung bei LDO-Reglern mit einem N-Kanal-MOSFET sind in *Experiment 5* zu finden). Dies hat zwei wichtige positive Folgen: Der Regelbereich wird vergrößert und der maximale Wirkungsgrad des LDO-Reglers steigt (Informationen zur Analyse des Wirkungsgrads von LDO-Reglern sind in *Experiment 2* zu finden).

In Prüfung 2 haben wir den Zusammenhang zwischen der Höhe der Ausgangsspannung und den Laststrom- und Eingangsspannungswerten untersucht.

Die Diagramme zur Ausregelung von Eingangsspannungs- und Lastschwankungen beim LDO-Regler TPS7A4901 werden in den Abbildungen 10 und 11 gezeigt. Eingangsspannungs- und Lastausregelung sind ein Maß für die Toleranz des LDO-Reglers im stationären Zustand. Bei einem kleineren Wert ist die geregelte Ausgangsspannung weniger empfindlich gegenüber Änderungen der Eingangsspannung bzw. des Laststroms. Anders gesagt, der LDO-Regler kann die Auswirkungen von Eingangsspannungs- und Laststromschwankungen neutralisieren. Diese Fähigkeit ist das Ergebnis verschiedener Einflussfaktoren, wie Typ und Eigenschaften des Pass-Bausteins, Typ und Eigenschaften des in der Rückkopplungsschleife als Fehlerverstärker verwendeten Operationsverstärkers, Eigenschaften des Referenzspannungsgenerators und Widerstände des Spannungsteilers. Bei einem gegebenen Pass-Baustein ist ein Operationsverstärker mit einer hohen Open-Loop-Verstärkung die wichtigste Voraussetzung für eine gute Ausregelung von Eingangsspannungs- und Lastschwankungen. Die Ausregelung ist ein Aspekt der Regelgenauigkeit eines LDO-Reglers, welche die kumulativen Auswirkungen von Eingangsspannungs-/Lastausregelung, Referenzspannung, Operationsverstärker, Spannungsteilerwiderständen und Temperatur umfasst (*in [2] sind weitere Details zu den thermischen Eigenschaften des LDO-Reglers TPS7A4901 und in [12] nähere Informationen zur Berechnung der Regelgenauigkeit zu finden*).



Experimentelle Oszilloskopkurven

Die Kurven in den Abbildungen 8 bis 11 zeigen die typischen Eigenschaften des LDO-Reglers TPS7A4901 (weitere Details sind in [2] zu finden).

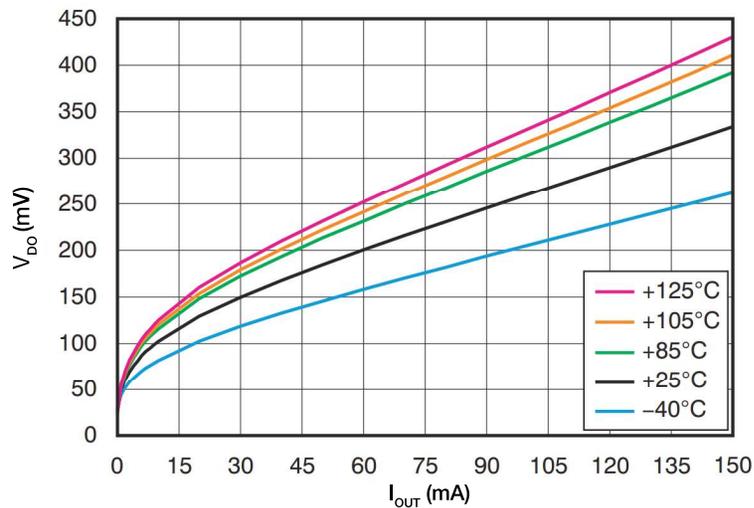


Abbildung 8: Dropout-Spannung des TPS7A4901 vs. Laststrom

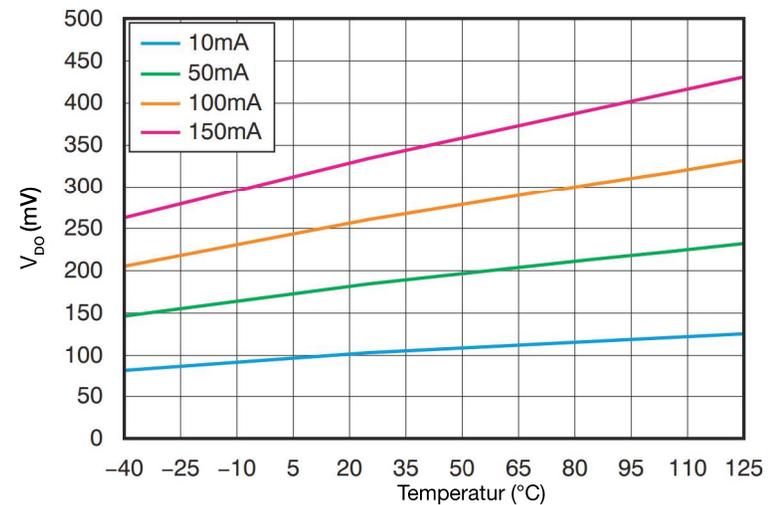


Abbildung 9: Dropout-Spannung des TPS7A4901 vs. Temperatur

Die Dropout-Spannung hängt auch von der Sperrschichttemperatur T_j des LDO-Chips ab. Die Kurven in den Abbildungen 8 und 9 zeigen, wie sich die Dropout-Spannung des TPS7A4901 mit der Sperrschichttemperatur ändert. Die Sperrschichttemperatur $T_j = T_a + R_{\theta ja} P_d$ hängt von drei Hauptfaktoren ab: der Verlustleistung P_d des LDO-Chips, die sich nach den Betriebsbedingungen (Strom/ Spannung) richtet, der Umgebungstemperatur T_a und dem Wärmewiderstand zwischen Sperrschicht und Umgebung $R_{\theta ja}$ des LDO-Reglergehäuses ($R_{\theta ja}$ beträgt beim TPS7A4901 ca. $55 \text{ }^\circ\text{C/W}$). Daher ändert sich die gemessene Dropout-Spannung mit der Umgebungstemperatur (in [2] sind weitere Details zu den thermischen Eigenschaften des LDO-Reglers TPS7A4901 und in [Experiment 2](#) nähere Informationen zur Thermoanalyse beim TPS7A4901 zu finden).



Experimentelle Oszilloskopkurven

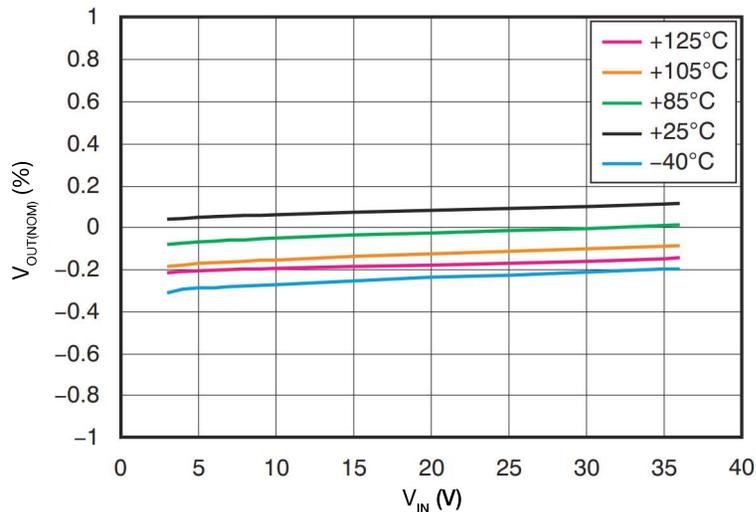


Abbildung 10: Temperaturabhängige Eingangsspannungsausregelung des TPS7A4901

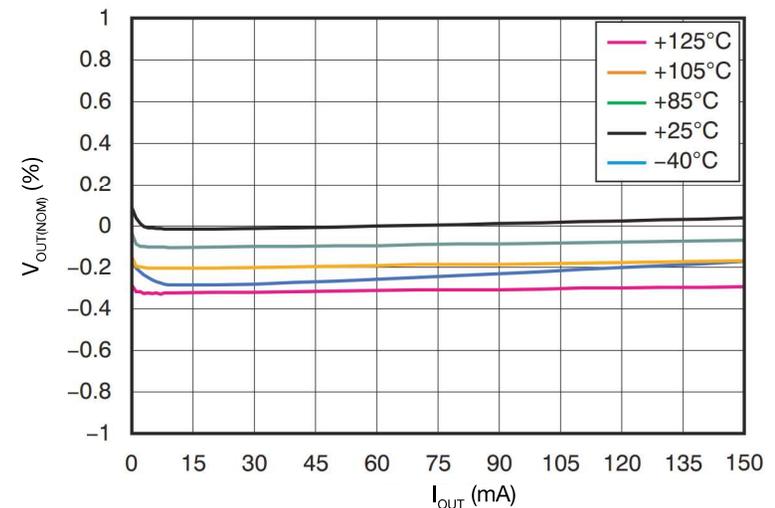


Abbildung 11: Temperaturabhängige Lastausregelung des TPS7A4901

Die Kurven in den Abbildungen 10 und 11 zeigen die Eingangsspannungs- und die Lastausregelung des LDO-Reglers TPS7A4901 und deren Abhängigkeit von der Sperrschichttemperatur des LDO-Chips. Es ist zu beobachten, dass sowohl die Eingangsspannungs- als auch die Lastausregelung bei einer sehr niedrigen Temperatur (unter 0 °C) und einer sehr hohen Temperatur (über 100 °C) schlechter sind. Die erste Situation ist für Luft- und Raumfahrtanwendungen von Bedeutung, bei denen die Umgebungstemperatur extrem niedrig ist und die Halbleiterbausteine im LDO-Reglerchip trotz ihrer Verlustleistung bei einer Sperrschichttemperatur von unter 0 °C arbeiten. Die zweite Situation ist für Anwendungen im Automobilbereich von Belang, in denen der LDO-Regler Teil der Elektronik im Motorraum ist und Umgebungstemperaturen von 80 °C oder mehr möglich sind, oder wenn der LDO-Regler bei einer großen Differenz zwischen Eingangsspannung V_{IN} und Ausgangsspannung V_{OUT} arbeiten muss, was zu einer hohen Verlustleistung im Inneren des LDO-Reglers führt (*in [2] sind weitere Details zu den thermischen Eigenschaften des LDO-Reglers TPS7A4901 und in Experiment 2 nähere Informationen zur Wirkungsgradanalyse des TPS7A4901 zu finden*). Es ist noch anzumerken, dass in den genannten Situationen die Eingangsspannungs- und die Lastausregelung negativ werden können. In diesen Fällen ist die Ausgangsspannung immer niedriger als der erforderliche Sollwert. Wenn für eine Anwendung eine hohe Genauigkeit erforderlich ist, lassen sich die Eingangsspannungs- und die Lastausregelung verbessern, indem für die Widerstände des Rückkopplungsspannungsteilers R_{F1} und R_{F2} geeignete Werte gewählt werden, um die Abnahme der Ausgangsspannung aufgrund extremer Temperaturen teilweise zu kompensieren. Dazu kann anhand der Formel (1) im Abschnitt *Theoretischer Hintergrund* der Spannungsteiler so ausgelegt werden, dass die Nennausgangsspannung ein wenig höher als der Sollwert ist und dadurch die Verringerung durch die extremen Temperaturen ausgeglichen wird. Dazu werden jedoch Widerstände mit einer Toleranz von 0.01 bis 0.1 % benötigt, was die Kosten der LDO-Lösung erhöhen kann.

Experiment 2

In diesem Experiment wird der Einfluss der Eingangsspannungs- und Laststrombedingungen auf den Wirkungsgrad eines LDO-Reglers untersucht. Dazu wird der LDO-Regler TPS7A4901 verwendet.



Fallstudie

In diesem Experiment wird der Zusammenhang zwischen dem Wirkungsgrad des LDO-Reglers und den Laststrom-/Eingangsspannungswerten untersucht.

Untersuchungsgegenstand dieses Experiments ist der Wirkungsgrad des LDO-Reglers. Abbildung 1 zeigt den vereinfachten Schaltplan des LDO-Reglers TPS7A4901. Folgende Faktoren wirken sich am meisten auf den Wirkungsgrad aus: Pass-Baustein, LDO-Reglerarchitektur und Betriebsbedingungen. Der Pass-Baustein des LDO-Reglers ist durch eine Verlustleistung gekennzeichnet, die steigt, wenn die Differenz zwischen Eingangsspannung und Ausgangsspannung zunimmt. Die LDO-Reglerarchitektur beeinflusst den Wirkungsgrad, da sie den Massestrom I_{gnd} (auch Ruhestrom genannt) bestimmt, der die Differenz zwischen dem Ein- und Ausgangsstrom des LDO-Reglers ist. Der Massestrom I_{gnd} setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen, die von der Bandabstandsreferenz, den Messwiderständen, dem Fehlerverstärker und dem Treiberstrom des Pass-Bausteins abhängig sind. Der Massestrom und der Spannungsabfall am Pass-Baustein werden durch die Eingangsspannung und den Laststrom beeinflusst. Das Berechnen des Wirkungsgrads von LDO-Reglern wird ausführlich im Abschnitt *Theoretischer Hintergrund* erläutert.

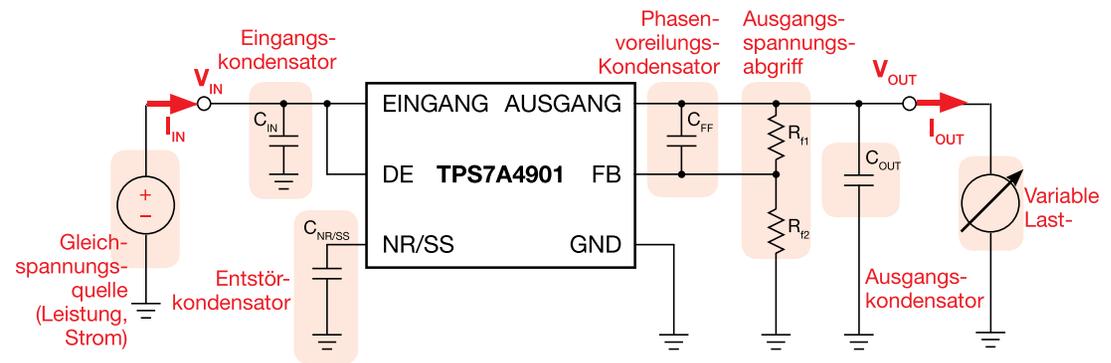


Abbildung 1: Vereinfachter Schaltplan des LDO-Reglers TPS7A4901

Prüfung 1: Wir messen die Eingangsspannung V_{IN} , den Eingangsstrom I_{IN} , die Ausgangsspannung V_{OUT} und den Ausgangsstrom I_{OUT} des LDO-Reglers TPS7A4901 bei verschiedenen Lastströmen. Ziel ist es, den prozentualen Wirkungsgrad des LDO-Reglers zu bestimmen und zu untersuchen, ob und wie dieser vom Laststrom abhängt. Die Prüfung wird mit verschiedenen Eingangsspannungswerten wiederholt, um deren Einfluss auf den Wirkungsgrad festzustellen.

Prüfung 2: Wir messen die Eingangsspannung V_{IN} , den Eingangsstrom I_{IN} , die Ausgangsspannung V_{OUT} und den Ausgangsstrom I_{OUT} des LDO-Reglers TPS7A4901 bei verschiedenen Eingangsspannungen. Ziel ist es, den prozentualen Wirkungsgrad des LDO-Reglers zu bestimmen, zu untersuchen, ob und wie dieser von der Eingangsspannung abhängt, und den gemessenen Wirkungsgrad mit dem mit den Formeln im Abschnitt *Theoretischer Hintergrund* berechneten Wirkungsgrad zu vergleichen (einschließlich einer grundlegenden thermischen Analyse). Die Prüfung wird mit verschiedenen Laststromwerten wiederholt.



Theoretischer Hintergrund

Dieser Abschnitt enthält grundlegende Informationen zur Verlustanalyse bei LDO-Reglern. (In [1], [4] und [12] sind allgemeine Informationen zum Betrieb und zu den Eigenschaften von LDO-Reglern zu finden. Weitere Details zum Betrieb und zu den Leistungsmerkmalen des TPS7A4901 können [2] entnommen werden.)

Abbildung 2 zeigt einen LDO-Regler mit einem PNP-Bipolartransistor als Pass-Baustein. Die Spannung des Pass-Bausteins V_{EC} entspricht der Differenz zwischen der Eingangsspannung V_{IN} und der Ausgangsspannung V_{OUT} . Die Gesamtverlustleistung des LDO-Reglers wird mit Formel (1) berechnet:

$$(1) P_g = P_{IN} - P_{OUT} = V_{IN} I_{IN} - V_{OUT} I_{OUT}$$

Die Verlustleistung wird durch den LDO-Chip und die Spannungsteilerwiderstände R_{F1} und R_{F2} verursacht. Der Eingangsstrom des LDO-Reglers erfüllt Gleichung (2):

$$(2) I_{IN} = I_{OUT} + I_{GND} + I_{VD}$$

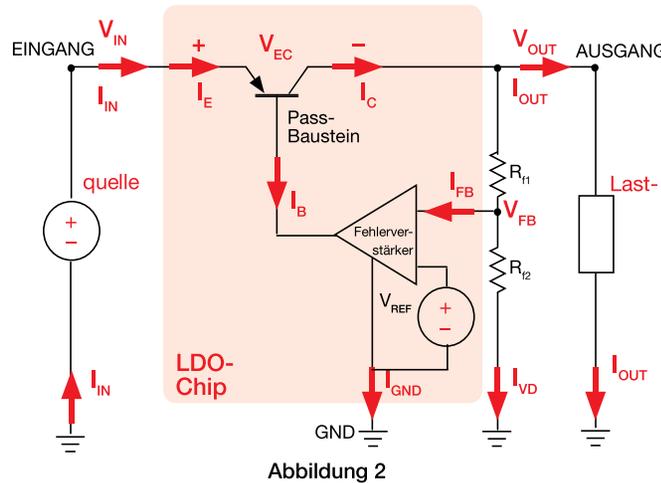


Abbildung 2

Laut Formel (1) nimmt bei gegebener Ausgangsspannung V_{OUT} und gegebenem Laststrom I_{OUT} die Verlustleistung des LDO-Reglers zu, wenn die Eingangsspannung steigt. Der PNP-Pass-Baustein trägt am meisten zur Verlustleistung bei. Abbildung 3 zeigt die Ausgangscharakteristik eines PNP-Bipolartransistors. Die Regelung der Ausgangsspannung ist gewährleistet, wenn die Eingangsspannung höher als die Dropout-Spannung ist (siehe Experiment 1). In diesem Fall arbeitet der PNP-Transistor im aktiven Bereich und seine Spannung $V_{EC}(I_{OUT}) = V_{IN} - V_{OUT}$ ist höher als die Sättigungsspannung $V_{EC,sat}(I_{OUT})$.

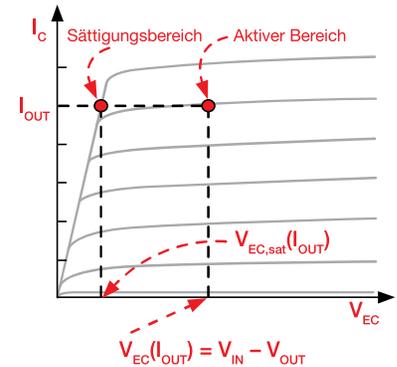


Abbildung 3

Der Wirkungsgrad des LDO-Reglers η wird mit Formel (3) berechnet:

$$(3) \eta = P_{OUT} / P_{IN} = V_{OUT} I_{OUT} / [V_{IN} (I_{OUT} + I_{GND} + I_{VD})] \times 100$$

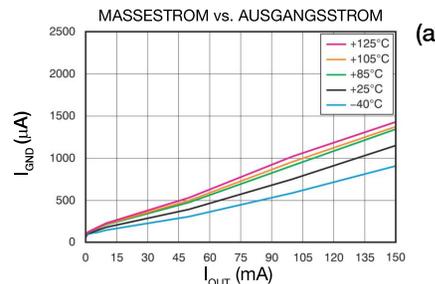
wobei $I_{VD} = V_{ref} / R_{F2}$ ist und I_{GND} von der Eingangsspannung V_{IN} , dem Laststrom I_{OUT} und der Sperrschichttemperatur T_j abhängt (siehe Abbildung 4). Die Sperrschichttemperatur T_j hängt gemäß Formel (4) wiederum von der Verlustleistung des LDO-Chips P_{LDO} ab:

$$(4) T_j = T_a + R_{\theta JA} P_{LDO}$$

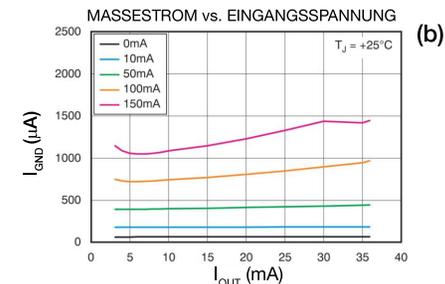
wobei $R_{\theta JA}$ der Wärmewiderstand des LDO-Chips und T_a die Umgebungstemperatur ist und Folgendes gilt:

$$(5) P_{LDO} = V_{IN} I_{IN} - V_{OUT} I_{OUT} - (R_{F1} + R_{F2}) I_{VD}^2$$

Der Massestrom des LDO-Reglers I_{GND} hängt vom Basisstrom zur Vorspannung des Pass-Bausteins, vom Fehlerverstärker, von der Spannungsreferenz und von der Sperrschichttemperatur ab. Abbildung 4 zeigt den Massestrom im Vergleich zum Ausgangsstrom und zur Eingangsspannung beim LDO-Regler TPS7A4901.



(a)



(b)

Abbildung 4

Wissenswertes

Der LDO-Regler nimmt auch dann einen Ruhestrom I_Q auf, wenn er keinen Strom an die Last abgibt (Details siehe [1], [2] und [12]).



Versuchsaufbau: Konfiguration

Für dieses Experiment werden folgende Geräte benötigt: ein GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄT, vier MULTIMETER und eine ELEKTRONISCHE GLEICHSPANNUNGSLAST. Wie die Geräte verbunden werden, wird in Abbildung 5 gezeigt. Gehen Sie wie auf der nächsten Seite beschrieben vor, um die **Verbindungen herzustellen**.

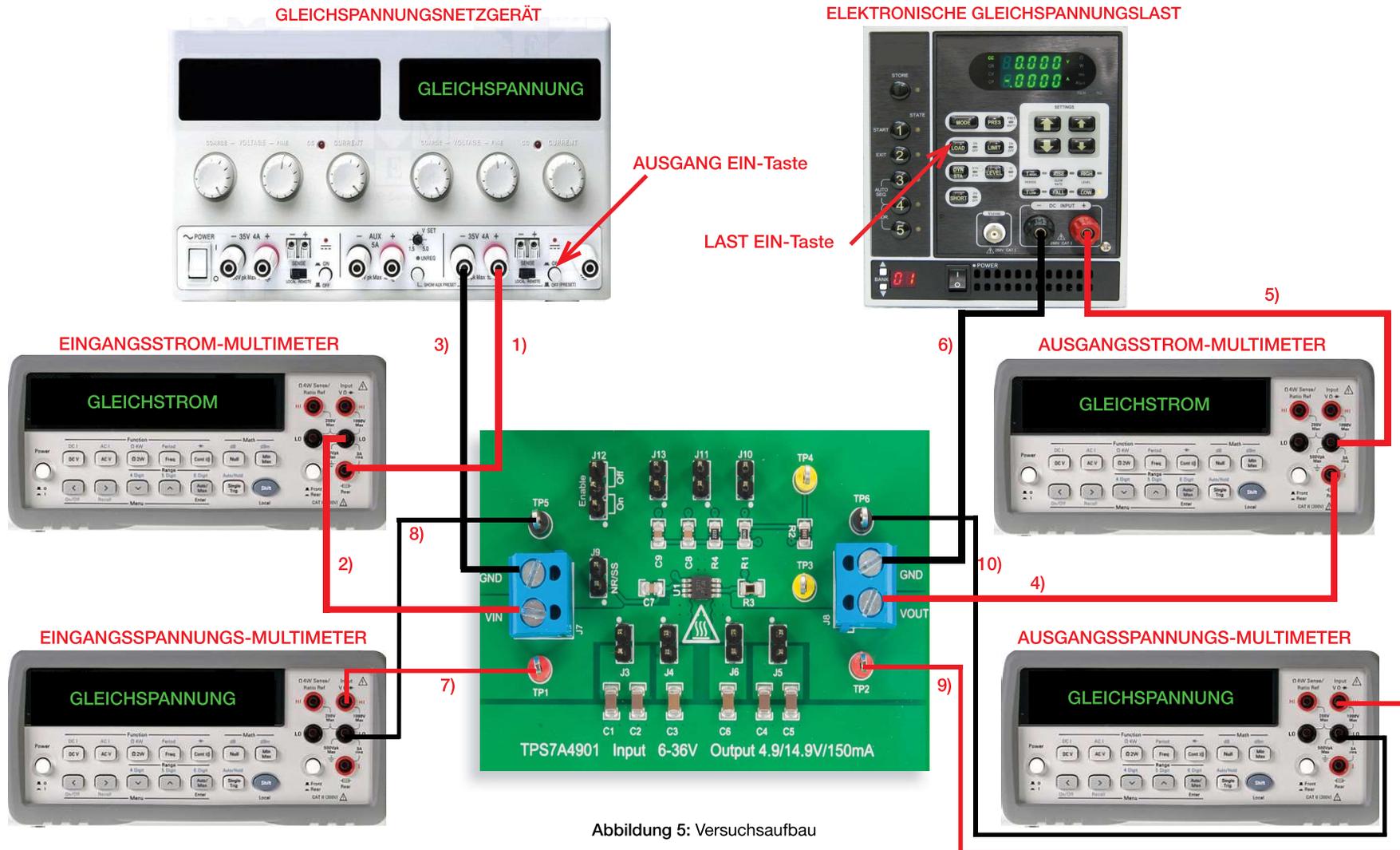


Abbildung 5: Versuchsaufbau



Versuchsaufbau: Anleitung

Vergewissern Sie sich, dass alle Geräte ausgeschaltet sind, und stellen Sie die folgenden **Verbindungen** her:

- 1) Verbinden Sie den PLUS-AUSGANG (ROT) des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS mit der PLUS-AMPEREBUCHSE (ROT) des EINGANGSSTROM-MULTIMETERS.
[**WARNUNG:** Zur Strommessung wird am Multimeter eine andere Plus-Buchse verwendet als zur Spannungsmessung.]
- 2) Verbinden Sie die MINUS-AMPEREBUCHSE (SCHWARZ) des EINGANGSSTROM-MULTIMETERS mit dem EINGANG (VIN) der Schraubklemme J_7 auf der TPS7A4901-LDO-Reglerplatine.
- 3) Verbinden Sie den MINUS-AUSGANG (SCHWARZ) des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS mit der MASSE (GND) der Schraubklemme J_7 auf der TPS7A4901-LDO-Reglerplatine.
- 4) Verbinden Sie den AUSGANG (VOUT) der Schraubklemme J_8 auf der TPS7A4901-LDO-Reglerplatine mit der PLUS-AMPEREBUCHSE (ROT) des AUSGANGSSTROM-MULTIMETERS.
[**WARNUNG:** Zur Strommessung wird am Multimeter eine andere Plus-Buchse verwendet als zur Spannungsmessung.]
- 5) Verbinden Sie die MINUS-AMPEREBUCHSE (SCHWARZ) des AUSGANGSSTROM-MULTIMETERS mit dem PLUS-EINGANG (ROT) der ELEKTRONISCHEN LAST.
- 6) Verbinden Sie den MINUS-EINGANG (SCHWARZ) der ELEKTRONISCHEN LAST mit der MASSE (GND) der Schraubklemme J_8 auf der TPS7A4901-LDO-Reglerplatine.
- 7) Verbinden Sie die PLUS-VOLTBUCHSE (ROT) des EINGANGSSPANNUNGS-MULTIMETERS mit dem TESTPIN TP_1 (VIN) der TPS7A4901-LDO-Reglerplatine.
- 8) Verbinden Sie die MINUS-VOLTBUCHSE (SCHWARZ) des EINGANGSSPANNUNGS-MULTIMETERS mit dem TESTPIN TP_5 (GND) der TPS7A4901-LDO-Reglerplatine.
- 9) Verbinden Sie die PLUS-VOLTBUCHSE (ROT) des AUSGANGSSPANNUNGS-MULTIMETERS mit dem TESTPIN TP_2 (VOUT) der TPS7A4901-LDO-Reglerplatine.
- 10) Verbinden Sie die MINUS-VOLTBUCHSE (SCHWARZ) des AUSGANGSSPANNUNGS-MULTIMETERS mit dem TESTPIN TP_6 (GND) der TPS7A4901-LDO-Reglerplatine.



Prüfung 1: Vorbereitung und Verfahren

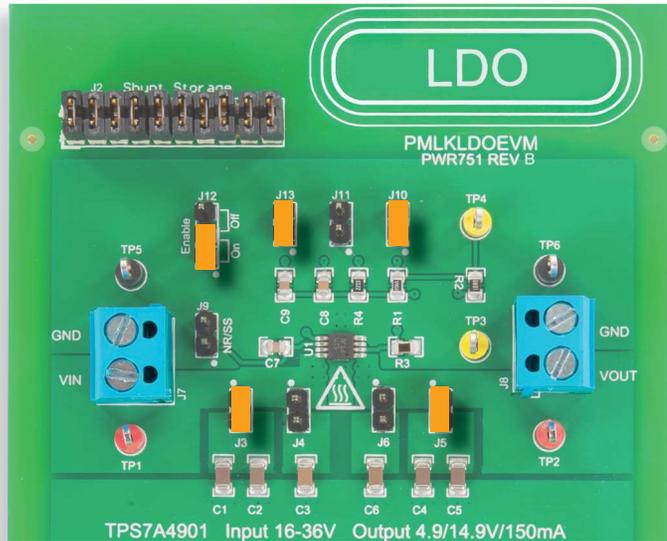


Abbildung 6: TPS7A4901-LDO-Platine: Jumperkonfiguration für Prüfung 1

Jumperkonfiguration (siehe Abbildung 6):

- **J₁₂ gebrückt** in Stellung ON → LDO-Betrieb aktiviert
- **J₁₀ gebrückt** → Nennausgangsspannung $V_{out} = 5\text{ V}$
- **J₁₃ gebrückt** → Phasenvoreilungs-Kondensator C_9 (12 nF) verbunden
- **J₅ gebrückt** → Ausgangskondensatoren C_4 (4.7 μF) und C_5 (4.7 μF) verbunden
- **J₃ gebrückt** → Eingangskondensatoren C_1 (4.7 μF) und C_2 (4.7 μF) verbunden
- **J₄ offen** → Eingangskondensator C_3 (2.2 μF) getrennt
- **J₆ offen** → Ausgangskondensator C_6 (2.2 μF) getrennt
- **J₁₁ offen** → Phasenvoreilungs-Kondensator C_8 (100 nF) getrennt
- **J₉ offen** → Entstörkondensator C_7 (12 nF) getrennt

Prüfverfahren:

- 1) Die MULTIMETER einschalten.
- 2) Das EINGANGSSTROM-MULTIMETER auf GLEICHSTROMMODUS mit einem Bereich von $\leq 1\text{ A}$ einstellen.
- 3) Das AUSGANGSSTROM-MULTIMETER auf GLEICHSTROMMODUS mit einem Bereich von $\leq 1\text{ A}$ einstellen.
- 4) Das EINGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER auf GLEICHSPANNUNGSMODUS mit einem Bereich von $\geq 5\text{ V}$ einstellen.
- 5) Das AUSGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER auf GLEICHSPANNUNGSMODUS mit einem Bereich von $\geq 5\text{ V}$ einstellen.
- 6) Das NETZGERÄT einschalten (die Taste „AUSGANG EIN“ muss in der Stellung OFF sein).
- 7) Die SPANNUNG des NETZGERÄTS auf 8 V einstellen.
- 8) Die STROMBEGRENZUNG des NETZGERÄTS auf 200 mA einstellen.
- 9) Die ELEKTRONISCHE LAST einschalten (die Taste „LAST EIN“ muss in der Stellung OFF sein).
- 10) Die ELEKTRONISCHE LAST auf KONSTANTSTROMMODUS und den Gleichstrom auf 25 mA einstellen.
- 11) Die Taste „AUSGANG EIN“ des NETZGERÄTS in die Stellung ON bringen
- 12) Nun sollten auf dem EINGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER ca. 8 V, auf dem AUSGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER 5 V, auf dem AUSGANGSSTROM-MULTIMETER 0 A und auf dem EINGANGSSTROM-MULTIMETER 0 A angezeigt werden (wenn die angezeigten Werte von diesen Angaben abweichen, die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen und die vorherigen Schritte überprüfen). Den Regler des NETZGERÄTS verstellen, bis 8 V auf dem EINGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER angezeigt werden.
- 13) Die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST in die Stellung ON bringen.
- 14) Nun sollten auf dem EINGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER ca. 8 V, auf dem AUSGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER etwa 5 V, auf dem AUSGANGSSTROM-MULTIMETER 25 mA und auf dem EINGANGSSTROM-MULTIMETER ein wenig mehr als 25 mA angezeigt werden (wenn die angezeigten Werte sehr von diesen Angaben abweichen, die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen und die vorherigen Schritte überprüfen).
- 15) Die Ausgangsspannung und den Eingangsstrom des LDO-Reglers TPS7A4901 von den jeweiligen MULTIMETERN ablesen und die Werte in Tabelle 1 eintragen. Danach diesen Schritt mit allen in Tabelle 1 angegebenen Laststromwerten wiederholen (bei jedem Laststromwert den Regler des NETZGERÄTS verstellen, bis 8 V auf dem EINGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER angezeigt werden).
- 16) Die Gleichspannung des NETZGERÄTS auf 10 V einstellen (die Taste „AUSGANG EIN“ muss dazu nicht in die Stellung OFF gebracht werden) und Schritt 15) wiederholen.
- 17) Nach den Messungen die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST und die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen und alle Geräte ausschalten.



Prüfung 1: Messungen und Berechnungen

- Bei jedem der in Tabelle 1 angegebenen Nennwerte für die Eingangsspannung und den Laststrom die Eingangsspannung V_{IN} , den Eingangsstrom I_{IN} , die Ausgangsspannung V_{OUT} und den Ausgangsstrom I_{OUT} messen und die Ergebnisse in Tabelle 1 eintragen. **[HINWEIS:** Die vom EINGANGSSPANNUNGS- und vom AUSGANGSSTROM-MULTIMETER abgelesenen Werte stimmen möglicherweise aufgrund der Auflösung des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS und der ELEKTRONISCHEN GLEICHSPANNUNGSLAST nicht genau mit den in Tabelle 1 angegebenen Nennwerten für die Eingangsspannung und den Laststrom überein. Daher sollten bei jeder Messung das GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄT und die ELEKTRONISCHE GLEICHSPANNUNGSLAST so eingestellt werden, dass die Werte auf dem EINGANGSSPANNUNGS- und dem AUSGANGSSTROM-MULTIMETER möglichst nahe an den Werten in Tabelle 1 liegen.]
- Den prozentualen Wirkungsgrad mit der Formel $\eta = V_{OUT} I_{OUT} / (V_{IN} I_{IN}) \times 100$ berechnen und in Tabelle 1 eintragen.
- Die Messergebnisse analysieren, die Fragen beantworten und versuchen, die Ergebnisse der Beobachtungen anhand der Informationen im Abschnitt *Theoretischer Hintergrund* sowie in [1], [2] und [4] zu erläutern.

Tabelle 1: Wirkungsgrad des LDO-Reglers TPS7A4901 bei verschiedenen Lastströmen bei der Ausgangsspannung $V_{OUT} = 5\text{ V}$

(1) V_{IN} [V]	(2) I_{IN} [mA]	I_{OUT} [mA]											
		25		50		75		100		125		150	
(3) V_{OUT} [V]	(4) I_{OUT} [mA]												
(5) η [%]													
$V_{IN} = 8\text{ V}$	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	
	(3)	(4)	(3)	(4)	(3)	(4)	(3)	(4)	(3)	(4)	(3)	(4)	
	(5)		(5)		(5)		(5)		(5)		(5)		
$V_{IN} = 10\text{ V}$	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	
	(3)	(4)	(3)	(4)	(3)	(4)	(3)	(4)	(3)	(4)	(3)	(4)	
	(5)		(5)		(5)		(5)		(5)		(5)		

Messwiderstände:

J_{10} offen ($V_{OUT} = 15\text{ V}$):

$$R_{11} = R_1 = 590\text{ k}\Omega, \pm 1.0\% \text{ Toleranz}$$

$$R_{12} = R_3 = 51.1\text{ k}\Omega, \pm 0.1\% \text{ Toleranz}$$

J_{10} gebrückt ($V_{OUT} = 5\text{ V}$):

$$R_{11} = R_1 (590\text{ k}\Omega, \pm 1.0\% \text{ Toleranz}) \text{ parallel zu } R_4 (221\text{ k}\Omega, 1.0\% \text{ Toleranz})$$

$$= 160.8\text{ k}\Omega, \pm 0.5\% \text{ Toleranz}$$

$$R_{12} = R_3 = 51.1\text{ k}\Omega, \pm 0.1\% \text{ Toleranz}$$

TPS7A4901-Referenzspannung:

$$V_{ref} = 1.194\text{ V}, \pm 1.5\% \text{ Toleranz}$$

Antworten:

1) Entspricht der Eingangsstrom dem Laststrom? Ja Nein Hängt von Folgendem ab: _____

2) Welche Betriebsbedingung hat den größten Einfluss auf den Wirkungsgrad? Eingangsspannung Laststrom Hängt von Folgendem ab: _____



Prüfung 2: Vorbereitung und Verfahren



Abbildung 7: TPS7A4901-LDO-Platine: Jumperkonfiguration für Prüfung 2

Jumperkonfiguration (siehe Abbildung 7):

- **J₁₂ gebrückt** in Stellung ON → LDO-Betrieb aktiviert
- **J₁₀ offen** → Nennausgangsspannung $V_{out} = 15\text{ V}$
- **J₁₃ gebrückt** → Phasenvoreilungs-Kondensator C_9 (12 nF) verbunden
- **J₅ gebrückt** → Ausgangskondensatoren C_4 (4.7 μF) und C_5 (4.7 μF) verbunden
- **J₃ gebrückt** → Eingangskondensatoren C_1 (4.7 μF) und C_2 (4.7 μF) verbunden
- **J₄ offen** → Eingangskondensator C_3 (2.2 μF) getrennt
- **J₆ offen** → Ausgangskondensator C_6 (2.2 μF) getrennt
- **J₁₁ offen** → Phasenvoreilungs-Kondensator C_8 (100 nF) getrennt
- **J₉ offen** → Entstörkondensator C_7 (12 nF) getrennt

Prüfverfahren:

- 1) Die MULTIMETER einschalten.
- 2) Das EINGANGSSTROM-MULTIMETER auf GLEICHSTROMMODUS mit einem Bereich von $\leq 1\text{ A}$ einstellen.

- 3) Das AUSGANGSSTROM-MULTIMETER auf GLEICHSTROMMODUS mit einem Bereich von $\leq 1\text{ A}$ einstellen.
- 4) Das EINGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER auf GLEICHSPANNUNGSMODUS mit einem Bereich von $\geq 15\text{ V}$ einstellen.
- 5) Das AUSGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER auf GLEICHSPANNUNGSMODUS mit einem Bereich von $\geq 30\text{ V}$ einstellen.
- 6) Das NETZGERÄT einschalten (die Taste „AUSGANG EIN“ muss in der Stellung OFF sein).
- 7) Die SPANNUNG des NETZGERÄTS auf 16 V einstellen.
- 8) Die STROMBEGRENZUNG des NETZGERÄTS auf 200 mA einstellen.
- 9) Die ELEKTRONISCHE LAST einschalten (die Taste „LAST EIN“ muss in der Stellung OFF sein).
- 10) Die ELEKTRONISCHE LAST auf KONSTANTSTROMMODUS und den Gleichstrom auf 10 mA einstellen.
- 11) Die Taste „AUSGANG EIN“ des NETZGERÄTS in die Stellung ON bringen
- 12) Nun sollten auf dem EINGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER ca. 16 V, auf dem AUSGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER 15 V, auf dem AUSGANGSSTROM-MULTIMETER 0 A und auf dem EINGANGSSTROM-MULTIMETER 0 A angezeigt werden (wenn die angezeigten Werte von diesen Angaben abweichen, die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen und die vorherigen Schritte überprüfen). Den Regler des NETZGERÄTS verstellen, bis 16 V auf dem EINGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER angezeigt werden.
- 13) Die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST in die Stellung ON bringen
- 14) Nun sollten auf dem EINGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER ca. 16 V, auf dem AUSGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER etwa 15 V, auf dem AUSGANGSSTROM-MULTIMETER 10 mA und auf dem EINGANGSSTROM-MULTIMETER ein wenig mehr als 25 mA angezeigt werden (wenn die angezeigten Werte sehr von diesen Angaben abweichen, die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen und die vorherigen Schritte überprüfen).
- 15) Die Ausgangsspannung und den Eingangsstrom des LDO-Reglers TPS7A4901 von den jeweiligen MULTIMETERN ablesen und die Werte für die Berechnungen in Tabelle 2 verwenden. Danach diesen Schritt mit allen in Tabelle 2 angegebenen Eingangsspannungswerten wiederholen (den Regler des NETZGERÄTS verstellen, bis die gewünschte Spannung auf dem EINGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER angezeigt wird).
- 16) Den Gleichstrom der ELEKTRONISCHEN LAST auf 50 mA einstellen (die Taste „LAST EIN“ muss dazu nicht in die Stellung OFF gebracht werden) und Schritt 15) wiederholen.
- 17) Nach den Messungen die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST und die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen und alle Geräte ausschalten.



Prüfung 2: Messungen und Berechnungen

- Bei jedem in Tabelle 2 angegebenen Eingangsspannungs- und Laststromwert den Eingangsstrom I_{IN} und die Ausgangsspannung V_{OUT} messen, den experimentellen prozentualen Wirkungsgrad mit der Formel $\eta_{exp} [\%] = V_{OUT} I_{OUT} / (V_{IN} I_{IN}) \times 100$ berechnen und das Ergebnis in Tabelle 2 eintragen.
- Den theoretischen prozentualen Wirkungsgrad mit der Formel (3) im Abschnitt *Theoretischer Hintergrund* berechnen und das Ergebnis in Tabelle 2 eintragen [**HINWEIS:** Anhand der Kurven in Abbildung 4(b) kann der Massestrom I_{GND} des LDO-Reglers TPS7A4901 ermittelt werden].
- Die Verlustleistung des LDO-Reglers P_{LDO} mit der Formel (5) im Abschnitt *Theoretischer Hintergrund* sowie die Sperrschichttemperatur des LDO-Chips T_j mit der Formel (4) im Abschnitt *Theoretischer Hintergrund* berechnen und die Ergebnisse in Tabelle 2 eintragen [**HINWEIS:** Entweder eine Umgebungstemperatur T_a von 25 °C verwenden oder (falls möglich) die Umgebungstemperatur in der Nähe des LDO-Chips messen und diesen Wert verwenden].
- Anhand der Kurven in Abbildung 4(a) den Wert des Massestroms I_{GND} auf Grundlage der berechneten Sperrschichttemperatur T_j aktualisieren und den Wert des unter 2) berechneten theoretischen Wirkungsgrads $\eta_{theo} [\%]$ präzisieren.
- Die Fragen beantworten und versuchen, die Ergebnisse der Beobachtungen anhand der Informationen im Abschnitt *Theoretischer Hintergrund* sowie in [1], [2] und [4] zu erläutern.

Tabelle 2: Experimenteller und theoretischer Wirkungsgrad des LDO-Reglers TPS7A4901 bei verschiedenen Eingangsspannungen bei der Ausgangsspannung $V_{OUT} = 15\text{ V}$

(1) Exp. $\eta_{exp} [\%]$	(2) Theor. $\eta_{theo} [\%]$	V_{IN}											
		16 V		18 V		20 V		22 V		24 V		26 V	
$I_{OUT} = 10\text{ mA}$	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	
	(3)	(4)	(3)	(4)	(3)	(4)	(3)	(4)	(3)	(4)	(3)	(4)	
$I_{OUT} = 50\text{ mA}$	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	
	(3)	(4)	(3)	(4)	(3)	(4)	(3)	(4)	(3)	(4)	(3)	(4)	

Messwiderstände:

J_{10} offen ($V_{OUT} = 15\text{ V}$):

$R_{11} = R_1 = 590\text{ k}\Omega, \pm 1.0\%$ Toleranz

$R_{12} = R_3 = 51.1\text{ k}\Omega, \pm 0.1\%$ Toleranz

J_{10} gebrückt ($V_{OUT} = 5\text{ V}$):

$R_{11} = R_1 (590\text{ k}\Omega, \pm 1.0\%$ Toleranz) parallel zu $R_4 (221\text{ k}\Omega, 1.0\%$ Toleranz)

$= 160.8\text{ k}\Omega, \pm 0.5\%$ Toleranz

$R_{12} = R_3 = 51.1\text{ k}\Omega, \pm 0.1\%$ Toleranz

TPS7A4901-Referenzspannung:

$V_{ref} = 1.194\text{ V}, \pm 1.5\%$ Toleranz

Antworten:

- 1) Welcher Faktor führt zur größten Verringerung des Wirkungsgrads des LDO-Reglers? Verhältnis V_{IN} / V_{OUT} Massestrom I_{GND} Rückkopplungsstrom I_{FB}
 Andere: _____

- 2) Bei welchen Eingangsspannungs- und Ausgangsstrombedingungen wird der höchste Wirkungsgrad erreicht? _____



Erörterung

In Prüfung 1 haben wir den Zusammenhang zwischen dem Wirkungsgrad des LDO-Reglers und dem Laststrom untersucht.

Sowohl die Eingangsspannung V_{IN} als auch der Laststrom I_{OUT} wirken sich auf den Wirkungsgrad des LDO-Reglers aus. Allerdings ist bei den experimentellen Messungen zu beobachten, dass die Eingangsspannung V_{IN} einen viel größeren Einfluss auf den Wirkungsgrad hat als der Laststrom I_{OUT} . Tatsächlich führt bei den gegebenen Werten von Ausgangsspannung V_{OUT} und Laststrom I_{OUT} eine Erhöhung der Eingangsspannung V_{IN} unmittelbar zu einem Anstieg der Spannung des Pass-Bausteins V_{EC} und hat somit einen starken Einfluss auf die Differenz zwischen der Eingangsleistung P_{IN} und der Ausgangsleistung P_{OUT} des LDO-Reglers, wie der Formel (1) im Abschnitt *Theoretischer Hintergrund* zu entnehmen ist. Hingegen führt bei den gegebenen Werten von Ausgangsspannung V_{OUT} und Eingangsspannung V_{IN} des LDO-Reglers eine Erhöhung des Laststroms I_{OUT} auch unmittelbar zu einem Anstieg des Eingangsstroms I_{IN} , wodurch die Auswirkungen auf die Verlustleistung auf die Zunahme des Massestroms des LDO-Chips I_{GND} begrenzt werden, wie der Formel (2) im Abschnitt *Theoretischer Hintergrund* zu entnehmen ist. (In *Experiment 5* sind Informationen zum Massestrom bei LDO-Reglern mit einem N-Kanal-MOSFET zu finden).

In Prüfung 2 haben wir den Zusammenhang zwischen dem Wirkungsgrad des LDO-Reglers und der Eingangsspannung unter Berücksichtigung der thermischen Eigenschaften des Reglers untersucht.

Die Ergebnisse der Messungen sollten verdeutlichen, dass der wichtigste Einflussfaktor auf den Wirkungsgrad das Verhältnis zwischen der Eingangsspannung V_{IN} und der Ausgangsspannung V_{OUT} ist, während der Massestrom des LDO-Chips I_{GND} aus den oben bereits für Prüfung 1 erläuterten Gründen geringere Auswirkungen hat. Anzumerken ist, dass der Massestrom I_{GND} mit der Sperrschichttemperatur des LDO-Chips T_j zunimmt, die wiederum bei einer höheren Eingangsspannung V_{IN} aufgrund der größeren LDO-Verlustleistung P_{LDO} steigt. Daher führt eine Erhöhung der Eingangsspannung V_{IN} zu einem Anstieg des Massestroms I_{GND} und hat damit einen doppelten Einfluss auf die Wirkungsgradverschlechterung (in [2] sind weitere Details zu den thermischen Eigenschaften des LDO-Reglers TPS7A4901 zu finden).



Experimentelle Oszilloskopkurven

Die Kurven in den Abbildungen 8 bis 11 zeigen die typischen Eigenschaften des LDO-Reglers TPS7A4901 (*weitere Details sind in [2] zu finden*).

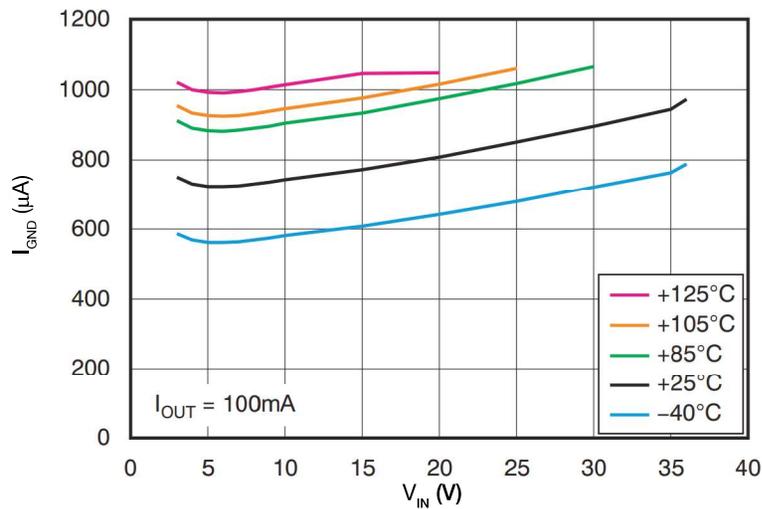


Abbildung 8: Massestrom des LDO-Reglers TPS7A4901 vs. Eingangsspannung bei 100 mA

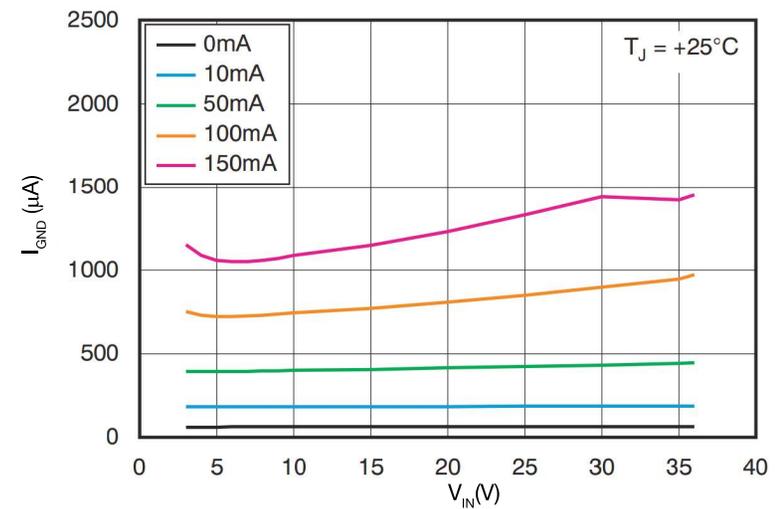


Abbildung 9: Massestrom des LDO-Reglers TPS7A4901 vs. Eingangsspannung bei 25 °C

Die Kurven in den Abbildungen 8 und 9 zeigen, wie der Massestrom des LDO-Chips I_{GND} von der Eingangsspannung V_{IN} , dem Laststrom I_{OUT} und der Sperrschichttemperatur T_J abhängt. Der Spannungsteilerstrom I_{VD} hat nur einen geringen Einfluss auf den Wirkungsgrad, wenn er wie beim LDO-Regler TPS7A4901 sehr niedrig ist. Der Spannungsteilerstrom I_{VD} hängt von der Referenzspannung V_{ref} des LDO-Chips und dem Widerstand R_{I2} des Spannungsteilers ab, wie im Abschnitt *Theoretischer Hintergrund* gezeigt wird.



Experimentelle Oszilloskopkurven

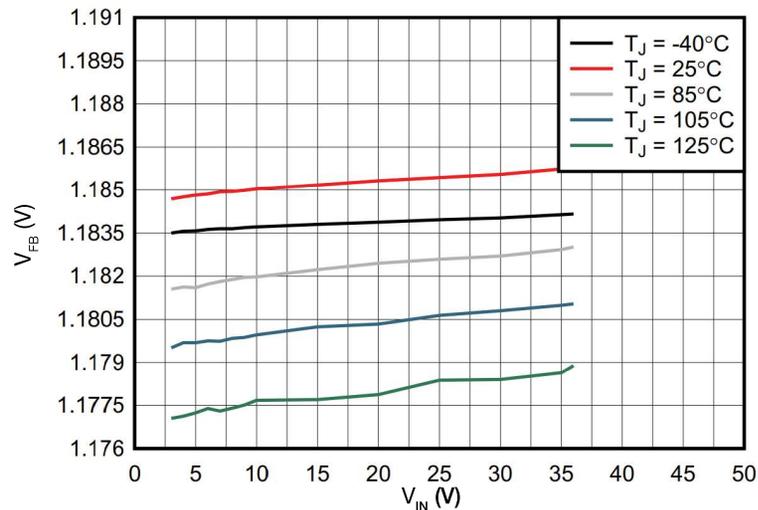


Abbildung 10: Spannung am FB-Pin des LDO-Reglers TPS7A4901 vs. Eingangsspannung

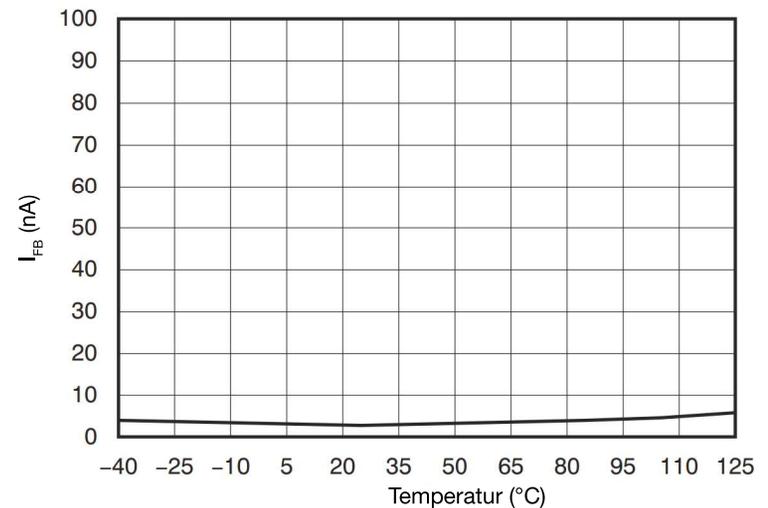


Abbildung 11: Strom am FB-Pin des LDO-Reglers TPS7A4901 vs. Temperatur

Abbildung 10 zeigt, dass die Referenzspannung des LDO-Reglers TPS7A4901 in geringem Maß von der Temperatur (typischerweise dem der Bandabstandsreferenz) und sehr wenig von der Eingangsspannung V_{IN} abhängig ist. Wie im Abschnitt *Theoretischer Hintergrund* erläutert, wird der Spannungsteilerstrom I_{VD} durch das Verhältnis V_{ref} / R_{i2} festgelegt. Der Wert des Widerstands R_{i2} darf nicht zu klein sein, da sich sonst der LDO-Wirkungsgrad verschlechtert (siehe Formel (3)). Allerdings darf der Wert von R_{i2} auch nicht zu groß sein, da sonst der Spannungsteilerstrom I_{VD} einen ähnlichen Wert wie der Rückkopplungsstrom I_{FB} des Fehlerverstärkers der Rückkopplungsschleife hat: In diesem Fall könnten die Widerstände R_{i1} und R_{i2} nicht mehr als Spannungsteiler fungieren und würden zu einer Verringerung der Regelgenauigkeit der Ausgangsspannung führen. Abbildung 11 zeigt den Rückkopplungsstrom des LDO-Reglers TPS7A4901. Damit gewährleistet ist, dass die Widerstände R_{i1} und R_{i2} als Spannungsteiler arbeiten, muss der Strom I_{VD} zwei oder drei Größenordnungen höher sein als der Rückkopplungsstrom. Wenn beispielsweise $I_{FB} = 5 \text{ nA}$ ist und der Faktor $I_{VD} / I_{FB} = 500$ lautet, gilt: $I_{VD} = 25 \text{ mA}$ und $R_{i2} = V_{ref} / I_{VD} = 48 \text{ k}\Omega$.

Experiment 3

In diesem Experiment wird die Stabilität des LDO-Reglers analysiert und untersucht, wie sich die Ausgangskondensatorconfiguration auf das Einschwingverhalten bei Eingangsspannungs- und Lasttransienten auswirkt. Dazu wird der LDO-Regler TPS7A4901 verwendet.



Fallstudie

Das Ziel dieses Experiments besteht darin, die Wellenform der Ausgangsspannung des LDO-Reglers beim Auftreten von Lasttransienten zu analysieren und die Stabilität zu überprüfen.

Untersuchungsgegenstand dieses Experiments ist die Stabilität des LDO-Reglers. Der LDO-Regler TPS7A4901 wird von einer dynamischen Spannungsquelle gespeist und an einer dynamischen Last abgeschlossen (siehe Abbildung 1). Der LDO-Regler muss eine gute Ausgangsspannungsregelung im ständigen stationären Zustand (siehe *Experiment 1* und *Experiment 2*) und beim Auftreten von Eingangsspannungs- und Laststromstörungen sicherstellen, die in vielen realen Anwendungen häufig vorkommen und viele verschiedene Eigenschaften aufweisen können. So treten beispielsweise Versorgungsspannungsstörungen oft bei Stromversorgungslösungen in Fahrzeuganwendungen auf, während Laststromstörungen häufig in Systemen mit Leistungsverstärkern und Logikbausteinen anzutreffen sind. Störeinflüsse mit schnellen, großen Schwankungen werden in Eingangsspannungs- und Lasttransienten aufgeteilt, während dauerhafte Störeinflüsse von mäßiger Größe und möglicherweise einem bestimmten dominanten harmonischen Spektrum in Leitungsruschen und Lastrauschen aufgeteilt werden.

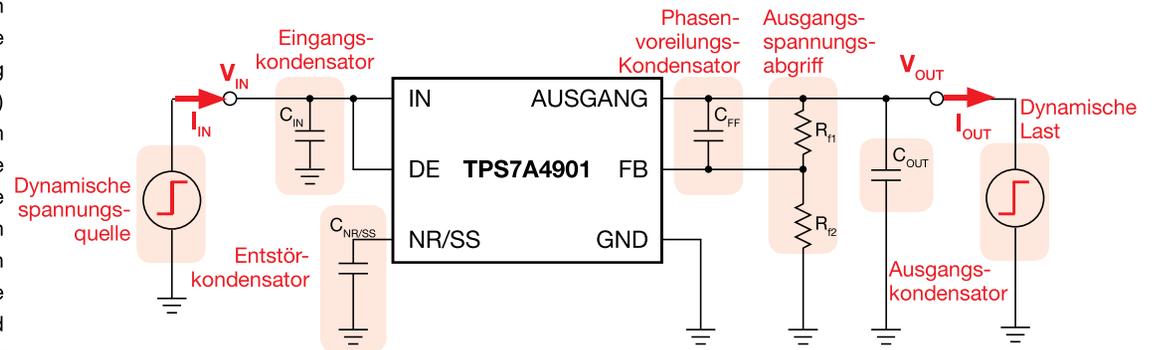


Abbildung 1: Vereinfachter Schaltplan des LDO-Reglers TPS7A4901

Prüfung 1: Wir speisen den LDO-Regler TPS7A4901 mit einer konstanten Gleichspannung und zeichnen die Wellenform der Ausgangsspannung auf, während der Laststrom zwischen zwei festen Pegeln schwingt. Es ist zu erwarten, dass die Ausgangsspannung nach jeder Laststromänderung kleine und kurze transiente Überspannungen aufweist und danach wieder nahe zu ihrem Sollwert zurückkehrt. Wir messen die Größe der transienten Überspannungen der Ausgangsspannung. Der Einfluss der Ausgangskapazität C_{OUT} auf die Größe der Ausgangsspannungsspitzen wird beobachtet und erörtert.

Prüfung 2: Wir konfigurieren den LDO-Regler TPS7A4901 mit einer festen Last und legen eine Eingangsspannung an, die zwischen zwei festen Pegeln schwingt. Es ist zu erwarten, dass die Ausgangsspannung wie im Fall der Laststromänderung nach jeder Eingangsspannungsänderung transiente Überspannungen aufweist und sich danach wieder ihrem Sollwert nähert. Wir messen die Größe der transienten Überspannungen der Ausgangsspannung. Der Einfluss der Ausgangskapazität C_{OUT} auf die Größe der Ausgangsspannungsspitzen wird beobachtet und erörtert.



Theoretischer Hintergrund

Dieser Abschnitt enthält grundlegende Informationen zur Rückkopplungskompensation bei LDO-Reglern. (In [1], [4] und [12] sind allgemeine Informationen zum Betrieb und zu den Eigenschaften von LDO-Reglern zu finden. Weitere Details zum Betrieb und zu den Leistungsmerkmalen des TPS7A4901 können [2] entnommen werden.)

Abbildung 1 zeigt einen LDO-Regler mit einem PNP-Bipolartransistor als Pass-Baustein.

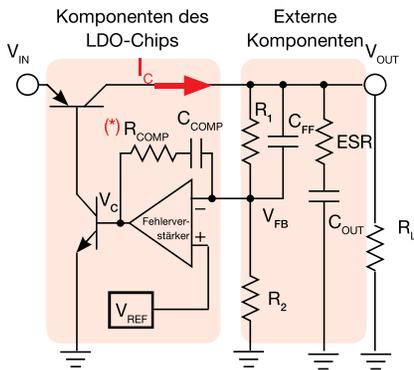


Abbildung 1

(*) Der Widerstand R_{COMP} wird typischerweise in LDO-Reglern mit keramischen Ausgangskondensatoren verwendet.

Der LDO-Regler regelt die Ausgangsspannung mithilfe des Fehlerverstärkers der Rückkopplungsschleife, der die Rückkopplungsspannung V_{FB} mit einer festen Referenzspannung V_{REF} vergleicht und den Strom des PNP-Pass-Transistors entsprechend der Last anpasst. Die Widerstände R_1 und R_2 stellen dem Fehlerverstärker die Rückkopplungsspannung bereit und legen die Verstärkung zwischen Referenz- und Ausgangsspannung $G_{VREF} = (1 + R_1 / R_2)$ fest, welche die Ausgangsspannung $V_{OUT} = G_{VREF} \cdot V_{REF}$ bestimmt. [HINWEIS: Der LDO-Regler arbeitet idealerweise als spannungsgesteuerte Spannungsquelle.]

Wenn der LDO-Regler in Abbildung 1 stabil ist, regelt er die Ausgangsspannung unabhängig von Eingangsspannungs- und Laststromschwankungen auf den gewünschten Sollwert. Die Stabilität hängt von den Eigenschaften der Spannungsrückkopplungsschleife ab, die im Blockschaltbild in Abbildung 2 rot hervorgehoben ist. Die Stabilität richtet sich insbesondere nach den Eigenschaften der Spannungsschleifenverstärkung $T = G_{VC} \cdot G_{EA}$, wobei G_{VC} die Verstärkung zwischen Steuer- und Ausgangsspannung des LDO-Reglers und G_{EA} die Verstärkung des Fehlerverstärkers ist.

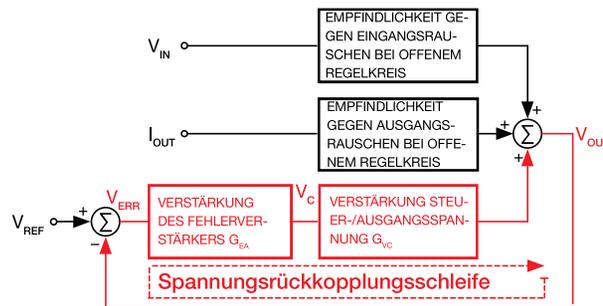


Abbildung 2

Abbildung 3 zeigt ein Bode-Diagramm der Spannungsschleifenverstärkung. Damit eine hohe Stabilität gewährleistet ist, muss die Phasenreserve f_m an der Durchtrittsfrequenz ω_c (bei der die Verstärkung 0 dB ist) etwa 50° betragen und die Phasenverschiebung ϕ_s (die Verschiebung zwischen dem Minimum der Phase und -180°) mindestens 20° im Frequenzbereich unterhalb der Durchtrittsfrequenz ω_c , wo die Verstärkung größer als 0 dB ist.

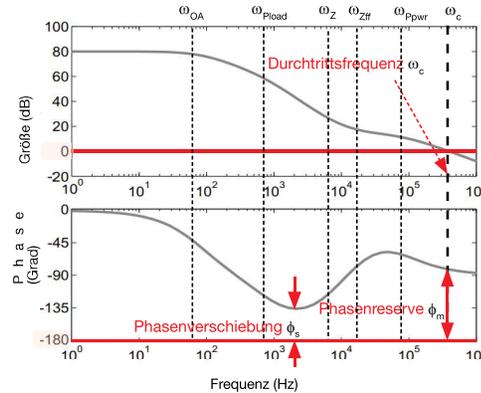


Abbildung 3

Die Verstärkungen G_{VC} und G_{EA} hängen von den internen Komponenten des LDO-Chips (Pass-Baustein, Gate-Treiber, Operationsverstärker, Rückkopplungsweig des Fehlerverstärkers $R_{COMP} - C_{COMP}$), den externen RC-Bauteilen ($R_{f1}, R_{f2}, C_{FF}, C_{OUT}$, ESR) und vom Laststrom I_{OUT} ab. Die resultierende Schleifenverstärkung ergibt sich aus Formel (1):

$$(1) \quad T = T_0 \frac{\left[1 + \frac{s}{\omega_Z}\right] \left[1 + \frac{s}{\omega_{Zff}}\right]}{\left[1 + \frac{s}{\omega_{Pload}}\right] \left[1 + \frac{s}{\omega_{PPwr}}\right] \left[1 + \frac{s}{\omega_{OA}}\right]}$$

$$\omega_{Pload} = \frac{I_{OUT}}{C_{OUT} V_{OUT}} \quad \omega_Z = \frac{1}{C_{OUT} ESR} \quad \text{(ohne } R_{COMP})$$

$$\omega_{Zff} = \frac{1}{C_{FF} R_{f1}} \quad \omega_Z = \frac{1}{C_{COMP} R_{COMP}} \quad \text{(ohne ESR)}$$

Die Phasenvoreilung der Nullstelle ω_Z verbessert die Stabilität, sofern ihre Frequenz weder zu niedrig noch zu hoch ist. Bei LDO-Reglern, die für die Verwendung keramischer Ausgangskondensatoren mit einem sehr geringen ESR ausgelegt sind, kann der Widerstand R_{COMP} vorliegen, der zusammen mit der Kapazität C_{COMP} die Nullstelle ω_Z erzeugt. Im Prinzip sollte der Kondensator C_{COMP} einen Pol in den Ursprung einbringen. Allerdings begrenzt die endliche DC-Verstärkung des Operationsverstärkers die DC-Schleifenverstärkung T_0 , die zudem durch die Basis-Kollektor-Stromverstärkung des Pass- und des Gate-Treiberbausteins beeinflusst wird, und bringt den Pol ω_{OA} ein. Die externe Kapazität C_{ff} bringt die Nullstelle ω_{Zff} ein, die zum Anpassen der Durchtrittsfrequenz und der Phasenreserve verwendet werden kann. Der Hochfrequenzpol ω_{PPwr} hängt von der Kapazität des Pass-Transistors ab. Der Pol ω_{Pload} hängt vom Laststrom ab. Während ω_{Pload} , ω_{Zff} und ω_Z (falls durch den ESR bestimmt) vom Benutzer des LDO-Chips festgelegt werden können, hängen ω_{OA} und ω_{PPwr} vom LDO-Chipentwurf ab und werden nicht in den Datenblättern angegeben.



Versuchsaufbau: Konfiguration

Für dieses Experiment werden folgende Geräte benötigt: ein NETZGERÄT mit Gleichspannungsmodus und DYNAMISCHEM MODUS, eine ELEKTRONISCHE LAST mit Gleichspannungsmodus und DYNAMISCHEM MODUS und ein OSZILLOSKOP. Wie die Geräte verbunden werden, wird in Abbildung 5 gezeigt. Gehen Sie wie auf der nächsten Seite beschrieben vor, um die **Verbindungen** herzustellen.

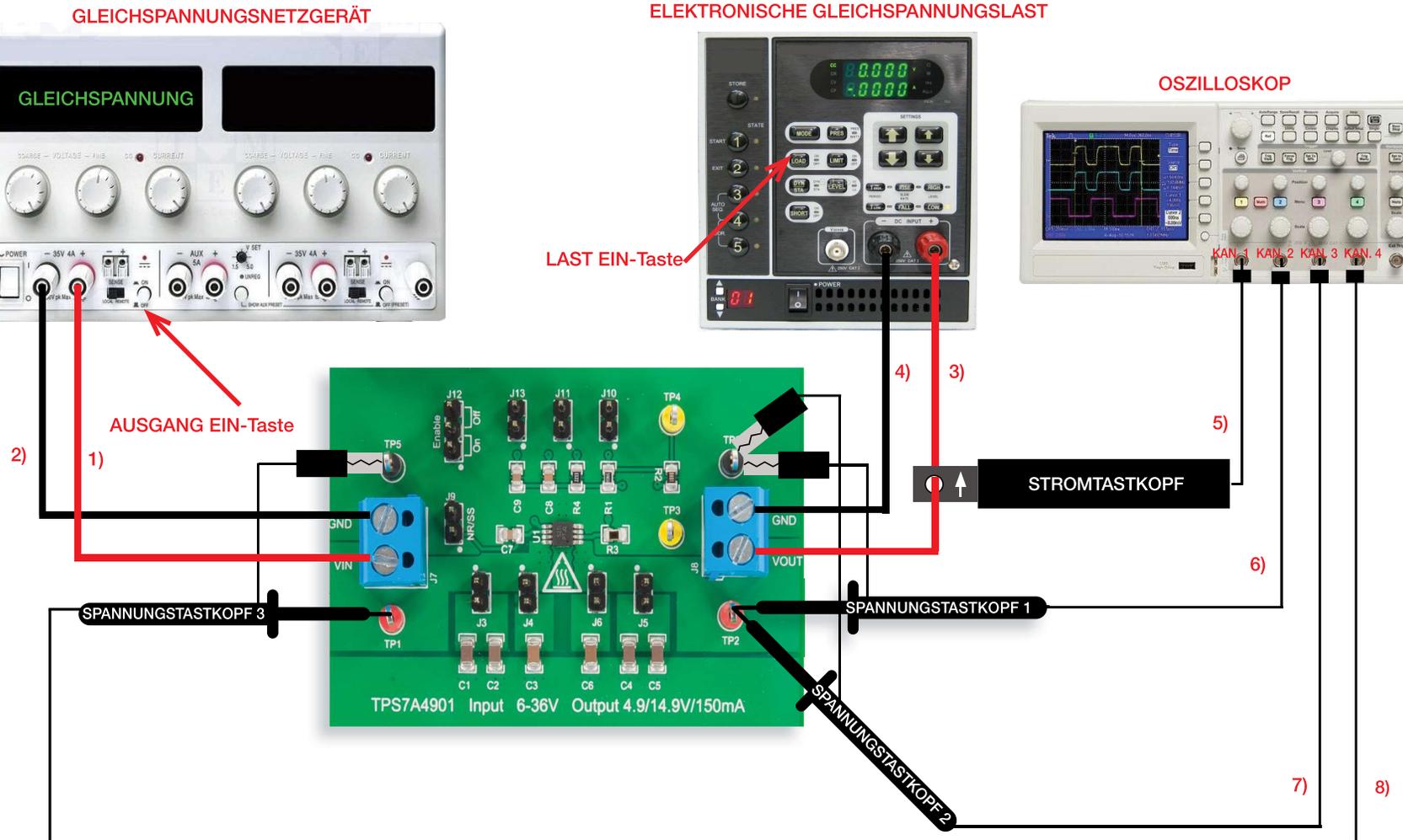


Abbildung 5: Versuchsaufbau



Versuchsaufbau: Anleitung

Vergewissern Sie sich, dass alle Geräte ausgeschaltet sind, und stellen Sie die folgenden **Verbindungen** her:

- 1) Verbinden Sie den PLUS-AUSGANG (ROT) des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS mit dem EINGANG (VIN) der Schraubklemme J_7 auf der TPS7A4901-LDO-Reglerplatine.
- 2) Verbinden Sie den MINUS-AUSGANG (SCHWARZ) des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS mit der MASSE (GND) der Schraubklemme J_7 auf der TPS7A4901-LDO-Reglerplatine.
- 3) Verbinden Sie den AUSGANG (VOUT) der Schraubklemme J_8 auf der TPS7A4901-LDO-Reglerplatine mit dem PLUS-EINGANG (ROT) der ELEKTRONISCHEN LAST.
- 4) Verbinden Sie die MASSE (GND) der Schraubklemme J_8 auf der TPS7A4901-LDO-Reglerplatine mit dem MINUS-EINGANG (SCHWARZ) der ELEKTRONISCHEN LAST.
- 5) Schließen Sie einen Stromtastkopf an Kanal 1 des OSZILLOSKOPS an, und hängen Sie ihn an das Kabel, das den AUSGANG (VOUT) der Schraubklemme J_8 auf der TPS7A4901-LDO-Reglerplatine mit dem PLUS-EINGANG (ROT) der ELEKTRONISCHEN LAST verbindet (achten Sie darauf, dass der Pfeil auf den Tastkopfklemmen in Richtung des Stromflusses zur ELEKTRONISCHEN LAST zeigt).
- 6) Schließen Sie einen Spannungstastkopf an Kanal 2 des Oszilloskops an, und hängen Sie dessen Plus-Spitze an den TESTPIN TP_2 (Ausgangsspannung) der TPS7A4901-LDO-Reglerplatine. Mit diesem Tastkopf werden die DC+AC-Anteile der Ausgangsspannung gemessen.
[WARNUNG: AUF KEINEN FALL den Plus- und den Masseanschluss des Spannungstastkopfes vertauschen.]
- 7) Schließen Sie einen Spannungstastkopf an Kanal 3 des Oszilloskops an, und hängen Sie dessen Plus-Spitze an den TESTPIN TP_2 (Ausgangsspannung) der TPS7A4901-LDO-Reglerplatine. Mit diesem Tastkopf wird der AC-Anteil der Ausgangsspannung gemessen.
[WARNUNG: AUF KEINEN FALL den Plus- und den Masseanschluss des Spannungstastkopfes vertauschen.]
- 8) Schließen Sie einen Spannungstastkopf an Kanal 4 des OSZILLOSKOPS an, und hängen Sie dessen Plus-Spitze an den TESTPIN TP_1 (Eingangsspannung) der TPS7A4901-LDO-Reglerplatine.
[WARNUNG: AUF KEINEN FALL den Plus- und den Masseanschluss des Spannungstastkopfes vertauschen.]



Prüfung 1: Vorbereitung und Verfahren



Abbildung 6: TPS7A4901-LDO-Platine: Jumperkonfiguration für Prüfung 1

Jumperkonfiguration (siehe Abbildung 6):

- **J₁₂ gebrückt** in Stellung ON → LDO-Betrieb aktiviert
- **J₁₀ gebrückt** → Nennausgangsspannung $V_{out} = 5\text{ V}$
- **J₁₃ gebrückt** → Phasenvoreilungs-Kondensator C_9 (12 nF) verbunden
- **J₅ gebrückt** → Ausgangskondensatoren C_4 (4.7 μF) und C_5 (4.7 μF) verbunden
- **J₃ gebrückt** → Eingangskondensatoren C_1 (4.7 μF) und C_2 (4.7 μF) verbunden
- **J₄ offen** → Eingangskondensator C_3 (2.2 μF) getrennt
- **J₆ offen** → Ausgangskondensator C_6 (2.2 μF) getrennt
- **J₁₁ offen** → Phasenvoreilungs-Kondensator C_8 (100 nF) getrennt
- **J₉ offen** → Entstörkondensator C_7 (12 nF) getrennt

Prüfverfahren:

- 1) Das OSZILLOSKOP einschalten, KANAL 1 auf DC 50 Ω -Kopplungsmodus einstellen, KANAL 1 als Trigger-Quelle auswählen und den Stromtastkopf entmagnetisieren, um eine mögliche DC-Biasspannung zu beseitigen, dann KANAL 2 auf DC 1 M Ω -Kopplungsmodus, KANAL 3 auf AC 1 M Ω -Kopplungsmodus und KANAL 4 auf DC 1 M Ω -Kopplungsmodus einstellen.

- 2) Das NETZGERÄT einschalten (die Taste „AUSGANG EIN“ muss in der Stellung OFF sein), dann die GLEICHSPANNUNG auf 6 V und die STROMBEGRENZUNG auf 200 mA einstellen.
- 3) Die ELEKTRONISCHE LAST einschalten (die Taste „LAST EIN“ muss in der Stellung OFF sein), den DYNAMISCHEN STROMMODUS einstellen und Folgendes festlegen:
 - niedriger Strompegel: 50 mA für 10 ms
 - hoher Strompegel: 150 mA für 10 ms
 - Flankensteilheit des Stromanstiegs und -abfalls: höchster vom Gerät unterstützter Wert
- 4) Die Taste „AUSGANG EIN“ des NETZGERÄTS in die Stellung ON bringen. Es sollten nun auf dem OSZILLOSKOP die Kurven von KANAL 1 (Laststrom) und KANAL 3 (AC-Anteil der Ausgangsspannung) als flache horizontale Linien bei 0, die Kurve von KANAL 2 (DC- und AC-Anteil der Ausgangsspannung) als flache Linie bei 5 V und die Kurve von KANAL 4 (Eingangsspannung) als flache Linie bei 6 V angezeigt werden. Mit den Cursor- oder Messfunktionen des OSZILLOSKOPS die durchschnittliche Eingangs- und Ausgangsspannung messen. Wenn die abgelesenen Werte sehr von den erwarteten Werten abweichen, die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen und die vorherigen Schritte überprüfen.
- 5) Die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST in die Stellung ON bringen. Es sollten nun die Kurve von KANAL 1 als Rechteckschwingung, die Kurve von KANAL 2 als flache Linie mit einem Durchschnittswert von 5 V, die Kurve von KANAL 3 als flache Linie mit einem Durchschnittswert von 0 V und kleinen kurzzeitigen Spannungsspitzen bei den Laststromtransienten und die Kurve von KANAL 4 als flache Linie bei 6 V angezeigt werden (siehe experimentelle Beispielkurven am Ende dieses Experiments). Die vertikale Skala erweitern sowie den Offset der vier Kanäle und die Zeitskala anpassen, damit die Wellenformen möglichst groß dargestellt werden. Den Triggerpegel auf 50 % der vertikalen Schwingung von KANAL 1 einstellen.
- 6) In Tabelle 1 die durchschnittliche Ausgangsspannung vor und nach jeder Lasttransiente sowie die Größe der Überspannungsspitzen der Ausgangsspannung bei den in Tabelle 1 angegebenen Eingangsspannungswerten eintragen (die Taste „AUSGANG EIN“ des NETZGERÄTS muss beim Ändern der Spannung nicht in die Stellung OFF gebracht werden).
- 7) Die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST und die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen, den Jumper **J₁₁** überbrücken, um den Phasenvoreilungs-Kondensator C_8 (100 nF) parallel zum Phasenvoreilungs-Kondensator C_9 (12 nF) zu schalten, die Schritte 4) bis 6) wiederholen und die Ergebnisse in Tabelle 2 eintragen.
- 8) Nach den Messungen die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST und die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen und alle Geräte ausschalten.



Prüfung 1: Messungen und Berechnungen

- Die Ausgangsgleichspannung $V_{OUTinitial}$ vor der Lasttransiente, die Ausgangsgleichspannung $V_{OUTfinal}$ nach der Lasttransiente sowie die Größe der Ausgangsspannungsspitzen ΔV_{OUT} während des Einschwingvorgangs unter Last messen und die Ergebnisse in die Tabellen 1 und 2 eintragen.
- Die Fragen beantworten und versuchen, die Ergebnisse der Beobachtungen anhand der Informationen im Abschnitt *Theoretischer Hintergrund* sowie in [1], [2] und [12] zu erläutern.

Tabelle 1: Einschwingverhalten des LDO-Reglers TPS7A4901 unter Last bei $V_{OUT} = 5\text{ V}$ und verbundenem Phasenvoreilungs-Kondensator C_9 (12 nF)

(1) $V_{OUTinitial}$ [V]	(2) $V_{OUTfinal}$ [V]	(3) ΔV_{OUT} -Überspannung [mV]	$V_{IN} = 6\text{ V}$			$V_{IN} = 12\text{ V}$			$V_{IN} = 18\text{ V}$		
			(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
$I_{OUT}: 50\text{ mA} \rightarrow 150\text{ mA}$			(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
$I_{OUT}: 150\text{ mA} \rightarrow 50\text{ mA}$			(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)

Tabelle 2: Einschwingverhalten des LDO-Reglers TPS7A4901 unter Last bei $V_{OUT} = 5\text{ V}$ und parallel geschalteten Phasenvoreilungs-Kondensatoren C_8 (100 nF) und C_9 (12 nF)

(1) $V_{OUTinitial}$ [V]	(2) $V_{OUTfinal}$ [V]	(3) ΔV_{OUT} -Überspannung [mV]	$V_{IN} = 6\text{ V}$			$V_{IN} = 12\text{ V}$			$V_{IN} = 18\text{ V}$		
			(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
$I_{OUT}: 50\text{ mA} \rightarrow 150\text{ mA}$			(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
$I_{OUT}: 150\text{ mA} \rightarrow 50\text{ mA}$			(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)

Ausgangskondensatoren:

J_5 gebrückt und J_6 offen:

$C_{out} = C_4$ und C_5 parallel = 9.4 μF

ESR ~ 35 m Ω bei 10 kHz, ~2 m Ω bei 1 MHz

Phasenvoreilungs-Kondensatoren:

J_{11} offen und J_{13} gebrückt:

$C_{FF} = C_9 = 12\text{ nF}$

J_5 offen und J_6 gebrückt:

$C_{out} = C_6 = 2.2\text{ }\mu\text{F}$

ESR ~ 50 m Ω bei 10 kHz, ~4 m Ω bei 1 MHz

J_{11} gebrückt und J_{13} offen:

$C_{FF} = C_8 = 100\text{ nF}$

J_5 gebrückt und J_6 gebrückt:

$C_{out} = C_4, C_5$ und C_6 parallel = 11.6 μF

ESR ~ 20 m Ω bei 10 kHz, 1.5 m Ω bei 1 MHz

J_{11} gebrückt und J_{13} gebrückt:

$C_{FF} = C_8$ und C_9 parallel = 112 nF

TPS7A4901:

$\omega_{OA} \sim 0.12\text{--}0.15\text{ Mrad/s}$

$\omega_z \sim 1.2\text{--}1.5\text{ Mrad/s}$ [$\omega_z = 1 / (R_{comp} C_{comp})$]

$\omega_{Pwr} \sim 12\text{--}15\text{ Mrad/s}$

Antworten:

1 Weist die Ausgangsspannung während der Lasttransienten Schwingungen auf? Ja Nein Hängt von Folgendem ab: _____

2 Ist der Wert von $V_{OUTfinal}$ mit dem von $V_{OUTinitial}$ identisch? Ja Nein Hängt von Folgendem ab: _____

3 Beschreiben Sie den Zusammenhang der Größe der Überspannung ΔV_{OUT} mit der Eingangsspannung, der Polarität der Laststromänderung und der Phasenvoreilungs-Kondensatorkonfiguration: _____



Prüfung 2: Vorbereitung und Verfahren



Abbildung 7: TPS7A4901-LDO-Platine: Jumperkonfiguration für Prüfung 2

Jumperkonfiguration (siehe Abbildung 7):

- **J₁₂ gebrückt** in Stellung ON → LDO-Betrieb aktiviert
- **J₁₀ gebrückt** → Nennausgangsspannung $V_{out} = 5\text{ V}$
- **J₁₃ gebrückt** → Phasenvoreilungs-Kondensator C_9 (12 nF) verbunden
- **J₅ gebrückt** → Ausgangskondensatoren C_4 (4.7 μF) und C_5 (4.7 μF) verbunden
- **J₃ gebrückt** → Eingangskondensatoren C_1 (4.7 μF) und C_2 (4.7 μF) verbunden
- **J₄ offen** → Eingangskondensator C_3 (2.2 μF) getrennt
- **J₆ offen** → Ausgangskondensator C_6 (2.2 μF) getrennt
- **J₁₁ offen** → Phasenvoreilungs-Kondensator C_8 (100 nF) getrennt
- **J₉ offen** → Entstörkondensator C_7 (12 nF) getrennt

Prüfverfahren:

- 1) Das OSZILLOSKOP einschalten, KANAL 2 auf DC 1 M Ω -Kopplungsmodus, KANAL 3 auf AC 1 M Ω -Kopplungsmodus und KANAL 4 auf DC 1 M Ω -Kopplungsmodus einstellen, dann KANAL 4 als Trigger-Quelle auswählen.

- 2) Das NETZGERÄT einschalten (die Taste „AUSGANG EIN“ muss in der Stellung OFF sein), den DYNAMISCHEN MODUS einstellen und Folgendes festlegen:
 - niedriger Spannungspegel: 6 V für 10 ms
 - hoher Spannungspegel: 8 V für 10 ms
 - Flankensteilheit des Spannungsanstiegs und -abfalls: höchster vom Gerät unterstützter Wert
 - Strombegrenzung: 200 mA
- 3) Die ELEKTRONISCHE LAST einschalten (die Taste „LAST EIN“ muss in der Stellung OFF sein), den GLEICHSTROMMODUS konfigurieren und den Strom auf 1 mA einstellen.
- 4) Die Taste „AUSGANG EIN“ des NETZGERÄTS und die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST in die Stellung ON bringen. Es sollten nun auf dem OSZILLOSKOP die Kurve von KANAL 2 (vollständige Ausgangsspannung) als flache Linie bei 5 V, die Kurve von KANAL 3 (AC-Anteil der Ausgangsspannung) als flache Linie mit 0 V Durchschnittswert und kleinen kurzzeitigen Spannungsspitzen bei den Eingangsspannungstransienten und die Kurve von KANAL 4 (Eingangsspannung) als Rechteckschwingung angezeigt werden. Die vertikale Skala erweitern sowie den Offset der vier Kanäle und die Zeitskala anpassen, damit die Wellenformen möglichst groß dargestellt werden. Den Triggerpegel auf 50 % der vertikalen Schwingung von KANAL 4 einstellen.
- 5) Mit den Cursor- oder Messfunktionen des OSZILLOSKOPS die durchschnittliche Ausgangsspannung vor und nach jeder Eingangsspannungstransiente sowie die Größe der Überspannungsspitzen der Ausgangsspannung bei den in Tabelle 3 angegebenen Laststromwerten messen (die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST muss beim Ändern der Spannung nicht in die Stellung OFF gebracht werden).
- 6) In Tabelle 3 die durchschnittliche Ausgangsspannung vor und nach jeder Lasttransiente sowie die Größe der Überspannungsspitzen der Ausgangsspannung bei den in Tabelle 3 angegebenen Eingangsspannungswerten eintragen (die Taste „AUSGANG EIN“ des NETZGERÄTS muss beim Ändern der Spannung nicht in die Stellung OFF gebracht werden).
- 7) Die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST und die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen, dann den Jumper **J₆** überbrücken, um den Ausgangskondensator C_6 (2.2 μF) zu verbinden, den Jumper **J₅** öffnen, um die Ausgangskondensatoren C_4 (4.7 μF) und C_5 (4.7 μF) zu trennen, die Schritte 4) bis 7) wiederholen und die Ergebnisse in Tabelle 4 eintragen.
- 8) Nach den Messungen die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST und die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen und alle Geräte ausschalten.



Prüfung 2: Messungen und Berechnungen

- Die Ausgangsgleichspannung $V_{OUTinitial}$ vor der Eingangsspannungstransiente, die Ausgangsgleichspannung $V_{OUTfinal}$ nach der Eingangsspannungstransiente sowie die Größe der Ausgangsspannungsspitzen ΔV_{OUT} während des Einschwingvorgangs bei Eingangsspannungstransienten messen und die Ergebnisse in die Tabellen 3 und 4 eintragen.
- Die Fragen beantworten und versuchen, die Ergebnisse der Beobachtungen anhand der Informationen im Abschnitt *Theoretischer Hintergrund* sowie in [1], [2] und [4] zu erläutern.

Tabelle 3: Einschwingverhalten des LDO-Reglers TPS7A4901 bei Eingangsspannungstransienten bei $V_{OUT} = 5\text{ V}$ mit verbundenen Ausgangskondensatoren C_4 (4.7 μF) und C_5 (4.7 μF)

(1) $V_{OUTinitial}$ [V]	(2) $V_{OUTfinal}$ [V]	(3) ΔV_{OUT} -Überspannung [mV]	$I_{OUT} = 1\text{ mA}$			$I_{OUT} = 50\text{ mA}$			$I_{OUT} = 100\text{ mA}$		
			(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
$V_{IN}: 6\text{ V} \rightarrow 8\text{ V}$			(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
$I_{OUT}: 8\text{ V} \rightarrow 6\text{ V}$			(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)

Tabelle 4: Einschwingverhalten des LDO-Reglers TPS7A4901 bei Eingangsspannungstransienten bei $V_{OUT} = 5\text{ V}$ mit verbundenem Ausgangskondensator C_6 (2.2 μF)

(1) $V_{OUTinitial}$ [V]	(2) $V_{OUTfinal}$ [V]	(3) ΔV_{OUT} -Überspannung [mV]	$I_{OUT} = 1\text{ mA}$			$I_{OUT} = 50\text{ mA}$			$I_{OUT} = 100\text{ mA}$		
			(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
$V_{IN}: 6\text{ V} \rightarrow 8\text{ V}$			(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
$I_{OUT}: 8\text{ V} \rightarrow 6\text{ V}$			(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)

Ausgangskondensatoren:

J_5 gebrückt und J_6 offen:

$C_{out} = C_4$ und C_5 parallel = 9.4 μF

ESR ~ 35 m Ω bei 10 kHz, ~2 m Ω bei 1 MHz

Phasenvereilungs-Kondensatoren:

J_{11} offen und J_{13} gebrückt:

$C_{FF} = C_9 = 12\text{ nF}$

J_5 offen und J_6 gebrückt:

$C_{out} = C_6 = 2.2\text{ }\mu\text{F}$

ESR ~ 50 m Ω bei 10 kHz, ~4 m Ω bei 1 MHz

J_{11} gebrückt und J_{13} offen:

$C_{FF} = C_8 = 100\text{ nF}$

J_5 gebrückt und J_6 gebrückt:

$C_{out} = C_4, C_5$ und C_6 parallel = 11.6 μF

ESR ~ 20 m Ω bei 10 kHz, 1.5 m Ω bei 1 MHz

J_{11} gebrückt und J_{13} gebrückt:

$C_{FF} = C_8$ und C_9 parallel = 112 nF

TPS7A4901:

$\omega_{OA} \sim 0.12\text{--}0.15\text{ Mrad/s}$

$\omega_z \sim 1.2\text{--}1.5\text{ Mrad/s}$ [$\omega_z = 1 / (R_{comp} C_{comp})$]

$\omega_{Pwr} \sim 12\text{--}15\text{ Mrad/s}$

Antworten:

1 Weist die Ausgangsspannung während der Eingangsspannungstransienten Schwingungen auf? Ja Nein Hängt von Folgendem ab: _____

2 Ist der Wert von $V_{OUTfinal}$ mit dem von $V_{OUTinitial}$ identisch? Ja Nein Hängt von Folgendem ab: _____

3 Beschreiben Sie den Zusammenhang der Größe der Überspannung ΔV_{OUT} mit dem Laststrom, der Polarität der Eingangsspannungsänderung und der Ausgangskondensatorkonfiguration: _____



Erörterung

In Prüfung 1 haben wir den Zusammenhang zwischen dem Einschwingverhalten des LDO-Reglers unter Last, der Eingangsspannung, der Polarität der Laststromänderung und der Phasenvoreilungskapazität untersucht.

Die Stabilität von LDO-Reglern wird in [1], [4] und [12] erläutert. Es wird dort betont, dass die Kapazität und der ESR des Ausgangskondensators innerhalb eines bestimmten Bereichs liegen müssen, um die Stabilität sicherzustellen. Die interne Kompensationsschaltung des LDO-Reglers TPS7A4901 ist so ausgelegt, dass bei einer höheren Kapazität als 2.2 μF und einem niedrigeren ESR als 200 $\text{m}\Omega$ die Stabilität gewährleistet ist [2]. Die externe Phasenvoreilungskapazität C_{FF} kann dabei helfen, das Einschwingverhalten und die AC-Leistung des LDO-Reglers TPS7A4901 zu verbessern [2]. Unter den Betriebsbedingungen in Prüfung 1 ist die Stabilität sichergestellt. Die Korrelation zwischen dem Einschwingverhalten unter Last und den Prüfbedingungen hängt von der Durchtrittsfrequenz der Spannungsschleifenverstärkung ab. Der Laststrom sowie die Kapazität und der ESR des Ausgangskondensators sind die wichtigsten Einflussfaktoren auf den Wert der Durchtrittsfrequenz. Die Durchtrittsfrequenz der Spannungsschleifenverstärkung des LDO-Reglers kann durch Anordnen der Pole und Nullstellen des in Abbildung 1 gezeigten Fehlerverstärkers der Rückkopplungskompensation angepasst werden. Wenn bei gegebenen Werten für Ausgangskapazität und ESR die Pole und Nullstellen des Fehlerverstärkers so platziert werden, dass eine hohe Durchtrittsfrequenz verwendet wird, ist die Schleifenverstärkung in einem breiteren Frequenzbereich größer, da sie mehr als 0 dB im Frequenzbereich $[0, \omega_c] \text{rad/s}$ beträgt (*Details zur Auslegung des Fehlerverstärkers sind in [7] zu finden*). Dadurch werden die Auswirkungen von Laststörungen durch den Fehlerverstärker stärker vergrößert, da er seine Ausgangsspannung, die den Basisstrom des PNP-Pass-Bausteins steuert, in größerem Umfang ändert. Dies bewirkt eine schnellere Anpassung des Stroms des Pass-Bausteins an den Lastbedarf. Daher gewährleistet eine höhere Durchtrittsfrequenz ein schnelleres Ansprechen des LDO-Reglers auf Lasttransienten. Dies führt wiederum zu einer Verringerung der Größe der transienten Überspannungen der Ausgangsspannung. Tatsächlich reagiert der LDO-Regler schneller auf Laststörungen, und dies verkürzt die Dauer des Intervalls, in dem der Ausgangskondensator das Ungleichgewicht zwischen dem Strom des Pass-Bausteins und dem Laststrom ausgleichen muss. Aus diesem Grund ist nur eine geringe Korrelation zwischen dem Einschwingverhalten des LDO-Reglers unter Last und der Eingangsspannung V_{IN} zu erwarten, da sich diese hauptsächlich auf den Arbeitspunkt und die Verluste des PNP-Pass-Bausteins auswirkt (siehe *Experiment 2*). Hingegen wird eine große Korrelation zur Phasenvoreilungskapazität erwartet, da diese die Frequenz der Nullstelle $\omega_{\text{zFF}} = 1 / (C_{\text{FF}} R_{\text{F1}})$ der Spannungsrückkopplungsschleifenverstärkung beeinflusst. Tatsächlich führt eine niedrigere Frequenz ω_{zFF} zu einer höheren Durchtrittsfrequenz der Spannungsrückkopplungsschleifenverstärkung und dadurch zu einem schnelleren Einschwingvorgang und einer geringeren Größe der Ausgangsspannungsspitzen bei Lasttransienten, wie in den Abbildungen 8 und 9 gezeigt. Laut der Formel im Abschnitt *Theoretischer Hintergrund* führt ein höherer Strom zu einer Erhöhung der Frequenz des Pols $\omega_{\text{pload}} = I_{\text{OUT}} / (C_{\text{OUT}} V_{\text{OUT}})$ und somit zu einem Anstieg der Durchtrittsfrequenz ω_c und einer geringeren Größe der Überspannungen der Ausgangsspannung. Somit könnte die Lasttransiente durch eine kleinere Spannungsspitze bei der Laststromverringerung als bei der Laststromerhöhung charakterisiert werden (siehe Abbildung 8). Im Prinzip könnte bei gegebener DC-Verstärkung T_o sowie gegebenen Polen $\{\omega_{\text{pload}}, \omega_{\text{pDWT}}, \omega_{\text{OA}}\}$ und Nullstellen $\{\omega_{\text{z1}}, \omega_{\text{zH}}\}$ der Schleifenverstärkungsformel (1) im Abschnitt *Theoretischer Hintergrund* die Durchtrittsfrequenz ω_c mit folgender Gleichung berechnet werden: $|T(\omega_c)| = 1$. Allerdings gibt es keine explizite Lösung für diese Gleichung. Wenn die oben genannten Schleifenverstärkungsparameter zur Verfügung stehen, kann die Durchtrittsfrequenz in MATLAB® [6] mithilfe der Bode-Diagramme der Übertragungsfunktionen bestimmt werden (Schnittpunkt bei 0 dB). Wenn die Parameter nicht verfügbar sind, kann die Schleifenverstärkung mit einem Vektor-Netzwerkanalysator und dem 10- Ω -Einspeisewiderstand R_2 gemessen werden [8].

In Prüfung 2 haben wir den Zusammenhang zwischen dem Einschwingverhalten des LDO-Reglers bei Eingangsspannungstransienten und den Werten von Laststrom und Ausgangskapazität untersucht.

Der Zusammenhang zwischen dem Einschwingverhalten bei Eingangsspannungstransienten und dem Laststrom ist der gleiche wie oben im Abschnitt zu Lasttransienten. Das Einschwingverhalten wird durch die Ausgangskapazität beeinflusst, da sich diese auf die Frequenz des Pols $\omega_{\text{pload}} = I_{\text{OUT}} / (C_{\text{OUT}} V_{\text{OUT}})$ der Spannungsrückkopplungsschleifenverstärkung auswirkt. Eine größere Ausgangskapazität führt zu einer niedrigeren Frequenz ω_{pload} und nachfolgend zu einer niedrigeren Durchtrittsfrequenz der Schleifenverstärkung, die eine Erhöhung der Größe der Ausgangsspannungsspitzen bei Eingangsspannungstransienten bewirkt. Hingegen sollte die Größe der Ausgangsspannungsspitzen bei der schrittweisen Erhöhung und Verringerung der Eingangsspannung identisch sein, da sich die Eingangsspannung hauptsächlich auf den Arbeitspunkt und die Verluste des PNP-Pass-Bausteins auswirkt (siehe *Experiment 2*). Anzumerken ist, dass der LDO-Regler über ein sehr gutes Einschwingverhalten bei Eingangsspannungstransienten verfügt und daher die transienten Überspannungen nicht sichtbar und messbar sind, wenn eine dynamische Quelle mit einer geringen Spannungsanstiegsgeschwindigkeit ($< 1 \text{ V}/\mu\text{s}$) verwendet wird (siehe Abbildungen 10 und 11). In den meisten praxisbezogenen Anwendungen treten keine sprunghaften schrittweisen Eingangsspannungstransienten auf, da die Anstiegsgeschwindigkeit der Ausgangsspannung der Spannungsquellen durch deren Ausgangskapazität begrenzt wird. Es ist daher möglich, dass in dieser Prüfung keine Veränderung des Einschwingverhaltens bei Eingangsspannungstransienten festzustellen ist, nachdem die Ausgangskapazität geändert wurde. Allerdings ist die Empfindlichkeit der Ausgangsspannung gegenüber hochfrequenten Eingangsspannungsstörungen eines der größten Probleme bei LDO-Reglern, da diese häufig in Schaltnetzteilen als Nachregler eingesetzt werden, um die Auswirkungen des hochfrequenten Schaltrauschens zu mindern. Die Fähigkeiten zur Störspannungsunterdrückung von LDO-Reglern und der Einfluss der Ausgangskapazität darauf werden in *Experiment 4* erläutert (*in den Experimentierbüchern zu den TI-PMLK-Platinen BUCK, BOOST und BUCK-BOOST sind eingehende Informationen zu den Problemen bei Schaltnetzteilen zu finden*).



Experimentelle Oszilloskopkurven

Die Diagramme in den Abbildungen 8 bis 11 zeigen einige Beispiele für das Einschwingverhalten des LDO-Reglers TPS7A4901 bei Last- und Eingangsspannungstransienten (*weitere Details sind in [2] zu finden*).

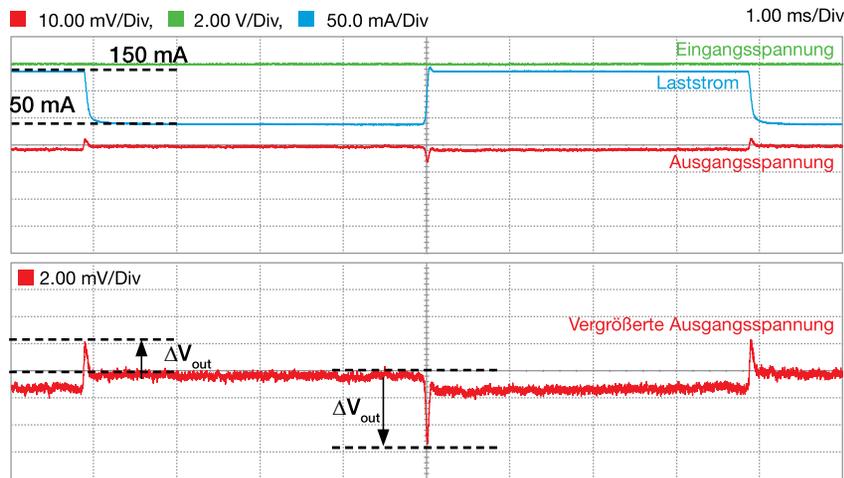


Abbildung 8: Einschwingverhalten des LDO TPS7A4901 unter Last bei: $V_{out} = 5\text{ V}$, $V_{in} = 6\text{ V}$, $C_{out} = 9.4\text{ }\mu\text{F}$, $C_{FF} = 100\text{ nF}$ und I_{OUT} zwischen 50 und 150 mA schwingend

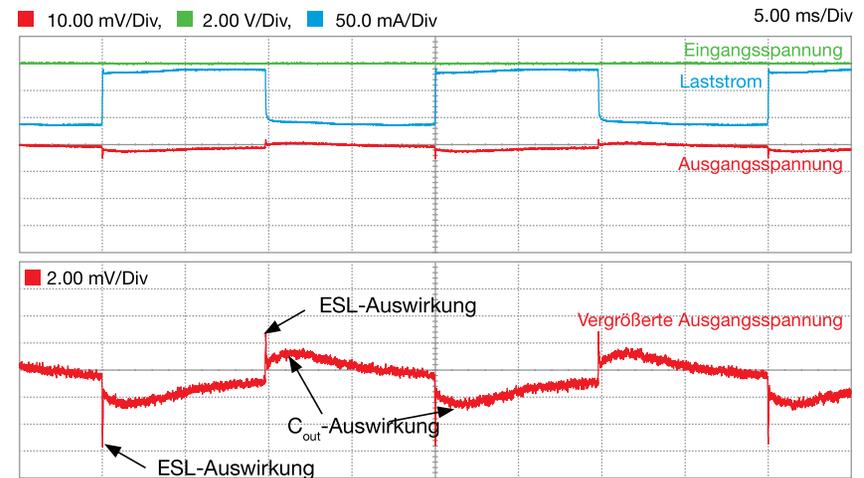


Abbildung 9: Einschwingverhalten des LDO TPS7A4901 unter Last bei: $V_{out} = 5\text{ V}$, $V_{in} = 6\text{ V}$, $C_{out} = 11.6\text{ }\mu\text{F}$, $C_{FF} = 12\text{ nF}$ und I_{OUT} zwischen 50 und 150 mA schwingend

Die Diagramme in den Abbildungen 8 und 9 zeigen den Einfluss der Phasenvorleilkapazität auf das Einschwingverhalten des LDO-Reglers TPS7A4901 unter Last. Die Größe der Ausgangsspannungsspitzen ist bei einer höheren Phasenvorleilkapazität geringer, da die Frequenz der Nullstelle ω_{ZF} niedriger ist und dadurch die Durchtrittsfrequenz ansteigt. Es zeigt sich, dass sich die Größen des Über- und Unterschwingens auf den Nullpegel des AC-Anteils der Ausgangsspannung beziehen. In den in den Abbildungen 8 und 9 abgebildeten Diagrammen mit dem Einschwingverhalten des LDO-Reglers TPS7A4901 unter Last wurde ein dynamischer Laststrom mit Rechteckschwingung und einer Frequenz von 125 Hz bzw. 50 Hz verwendet, damit die schrittweisen Erhöhungen und Verringerungen des Laststroms in einem Oszilloskop-Screenshot dargestellt werden können. Daher erfolgt jede Laststromänderung, bevor der Einschwingvorgang auf die vorhergehende Änderung vollständig abgeklungen ist. Wenn die Frequenz des dynamischen Laststroms mit Rechteckschwingung niedriger als 5 Hz ist, kann der vollständige Einschwingvorgang beobachtet werden. In Abbildung 9 sind die unterschiedlichen Auswirkungen von ESL und C_{out} auf das Über- und Unterschwingen der Ausgangsspannung hervorgehoben.



Experimentelle Oszilloskopkurven

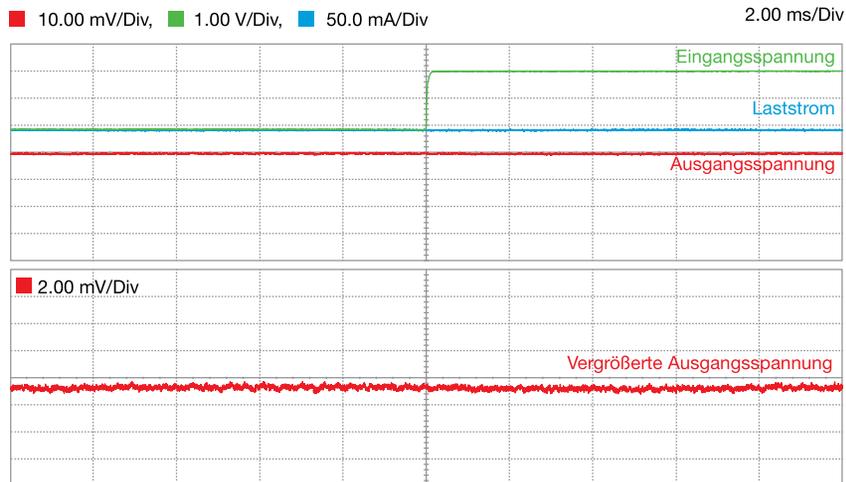


Abbildung 10: Einschwingverhalten des TPS7A4901 bei Eingangsspannungstransienten bei $V_{out} = 5\text{ V}$, $I_{OUT} = 50\text{ mA}$, $C_{FF} = 12\text{ nF}$ und V_{IN} von 6 auf 8 V ansteigend

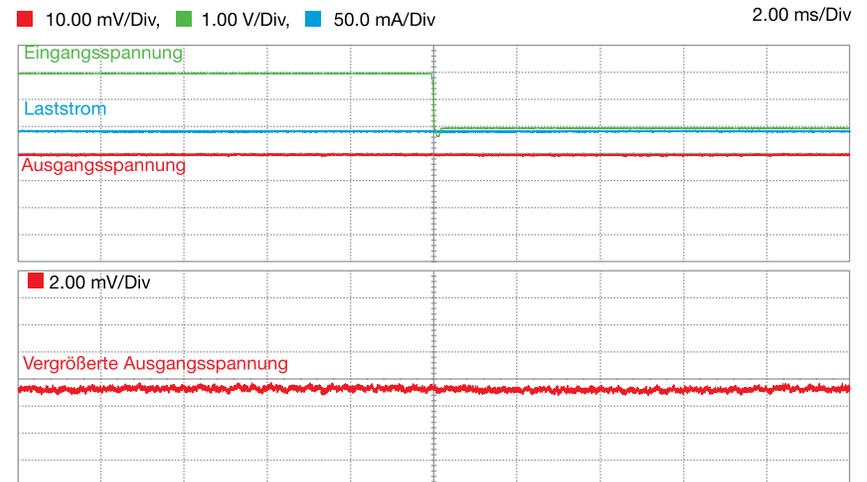


Abbildung 11: Einschwingverhalten des TPS7A4901 bei Eingangsspannungstransienten bei $V_{out} = 5\text{ V}$, $I_{OUT} = 50\text{ mA}$, $C_{FF} = 12\text{ nF}$ und V_{IN} von 8 V auf 6 V abfallend

Die Kurven in den Abbildungen 10 und 11 zeigen das Einschwingverhalten des LDO-Reglers TPS7A4901 bei Eingangsspannungstransienten. Aufgrund der geringen Flankensteilheit des Anstiegs und Abfalls der Eingangsspannung (ca. $0.01\text{ V}/\mu\text{s}$) sind keine Ausgangsspannungsspitzen festzustellen.

Experiment 4

In diesem Experiment wird das Stromversorgungsunterdrückungsverhältnis (PSRR) des LDO-Reglers analysiert, der ein Maß für die Fähigkeit des Reglers zur Unterdrückung von Störeinflüssen in der Eingangsspannung ist. Dabei wird der Einfluss des Ausgangskondensators und des Phasenvor-eilungs-Kondensators der Spannungsschleife auf das PSRR untersucht. Dazu wird der LDO-Regler TPS7A4901 verwendet.



Fallstudie

Das Ziel dieses Experiments besteht darin, die Wellenform der Ausgangsspannung des LDO-Reglers zu analysieren, während AC-Störsignale in die Eingangsspannung eingespeist werden.

Untersuchungsgegenstand dieses Experiments ist die Fähigkeit des LDO-Reglers zur Unterdrückung von Störeinflüssen in der Eingangsspannung. Der LDO-Regler stellt eine gute Ausgangsspannungsregelung im stationären Zustand (siehe *Experiment 1* und *Experiment 2*) sowie beim Auftreten von Eingangsspannungs- und Laststromstörungen (siehe *Experiment 3*) sicher. In vielen Anwendungen gibt es Störungen, die durch eine mäßige Größe und ein bestimmtes dominantes harmonisches Spektrum gekennzeichnet sind. Dies ist bei Schaltnetzteilen und Resonanzwandlern der Fall, deren Ausgangsgleichspannung eine prinzipbedingte Welligkeit mit einer Grundfrequenz von 10 kHz bis etwa 10 MHz aufweist. LDO-Regler sind ideal als Nachregler geeignet, um die hochfrequente Restwelligkeit bei der Stromversorgung von A/D-Wandlern und anderen rauschempfindlichen Bausteinen in Audio-, Mess- und HF-Anwendungen herauszufiltern, in denen eine hohe Genauigkeit erforderlich ist.

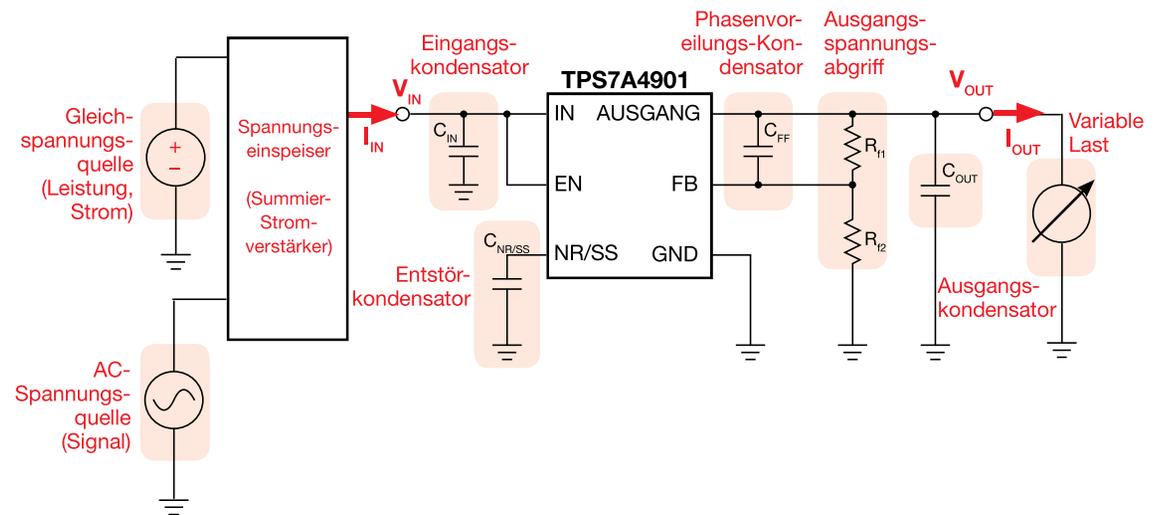


Abbildung 1: Vereinfachter Schaltplan des LDO-Reglers TPS7A4901

Prüfung 1: Wir versorgen den LDO-Regler TPS7A4901 mit einer Eingangsspannung, die aus einer von einem AC-Anteil überlagerten Gleichspannung besteht, und schließen ihn an einer Gleichspannungslast ab (siehe Abbildung 1). Der AC-Anteil der Eingangsspannung wird von einem Spannungseinspeiser eingebracht, einem Gerät, das die von der Gleichspannungsquelle erzeugte Gleichspannung mit einer Wechselfspannung überlagert. Der LDO-Regler wird an einer einstellbaren Last abgeschlossen. Danach erfassen wir das PSRR in einem breiten Frequenzbereich bei verschiedenen Werten von DC-Biasspannung und Ausgangskapazität C_{OUT} . Anschließend wird der Einfluss der Gleichspannung und der Ausgangskapazität C_{OUT} auf die Größe des PSRR beobachtet und erörtert.

Prüfung 2: Wir versorgen den LDO-Regler TPS7A4901 mit einer Eingangsspannung, die aus einer festen DC-Biasspannung und einem AC-Anteil besteht, und schließen ihn an einer einstellbaren Gleichspannungslast ab. Danach erfassen wir das PSRR in einem breiten Frequenzbereich bei verschiedenen Werten von Laststrom und Phasenvoreilungskapazität C_{FF} . Anschließend wird der Einfluss des Laststroms und der Phasenvoreilungskapazität C_{FF} auf die Größe des PSRR beobachtet und erörtert.



Theoretischer Hintergrund

Dieser Abschnitt enthält grundlegende Informationen zum Stromversorgungsunterdrückungsverhältnis (Power Supply Rejection Ratio, PSRR) bei LDO-Reglern (in [1], [4], [11] und [12] sind allgemeine Informationen zum Betrieb und zu den Eigenschaften von LDO-Reglern zu finden; In [5] sind Informationen zur PSRR-Messung und in [2] weitere Details zum Betrieb und zu den Leistungsmerkmalen des TPS7A4901 zu finden).

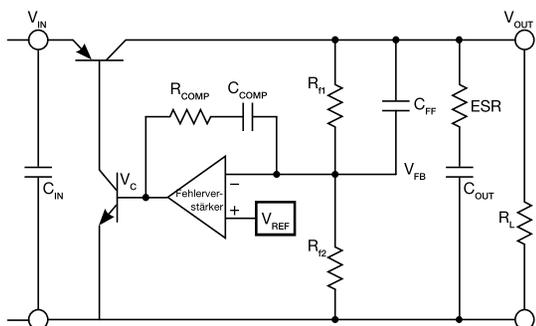


Abbildung 1

Abbildung 1 zeigt das Rückkopplungsnetzwerk eines LDO-Reglers mit einem PNP-Bipolartransistor als Pass-Baustein. Die Fähigkeit eines LDO-Reglers zur Unterdrückung von Störeinflüssen in der Eingangsspannung hängt vom Ausgangskondensator (C_{OUT} , ESR), von der Konfiguration der Rückkopplungsschleife (R_{COMP} , C_{COMP} , R_{TH} , C_{FF}) und vom Eingangskondensator C_{IN} ab. Eine hohe Durchtrittsfrequenz der Schleifenverstärkung und eine große Eingangskapazität C_{IN} verbessern die Störspannungsunterdrückung. Allerdings kann eine zu hohe Durchtrittsfrequenz die Stabilität beeinträchtigen, und eine zu große Kapazität C_{IN} kann zu unerwünschten Resonanzen mit den parasitären Induktivitäten der Leiterbahnen und Drähte am Eingang führen. **Das PSRR muss bei getrenntem Eingangskondensator C_{IN} gemessen werden, damit die inhärente Fähigkeit des LDO-Reglers zur Störspannungsunterdrückung beurteilt werden kann.**

Die Fähigkeit eines LDO-Reglers zur Unterdrückung von Störeinflüssen in der Eingangsspannung wird über das Stromversorgungsunterdrückungsverhältnis (Power Supply Rejection Ratio, PSRR) gemessen, der wie folgt definiert ist:

$$(1) \quad PSRR_{dB} = 20 \log \left[\frac{\Delta V_{IN, pk-pk}}{\Delta V_{OUT, pk-pk}} \right]$$

Abbildung 2 zeigt einen einfachen Aufbau zum Einspeisen von Wechselstrom-Störeinflüssen in die DC-Eingangsvorspannung. Er ermöglicht die Verwendung eines Oszilloskops zum Abtasten von V_{IN} und V_{OUT} und arbeitet in einem Frequenzbereich, der durch die L- und C-Werte festgelegt wird. Die PSRR-Messung mithilfe von LC-Bauteilen lässt sich zwar einfach durchführen, sie wird jedoch durch die Bandbreitenbeschränkungen beeinflusst, und die Genauigkeit ist bei niedrigen und hohen Frequenzen gering. Mit einem Summiervverstärker oder Spannungseinspeiser sind zuverlässigere Messungen über einen größeren Frequenzbereich möglich.

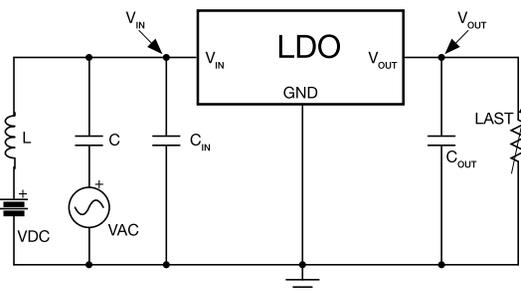
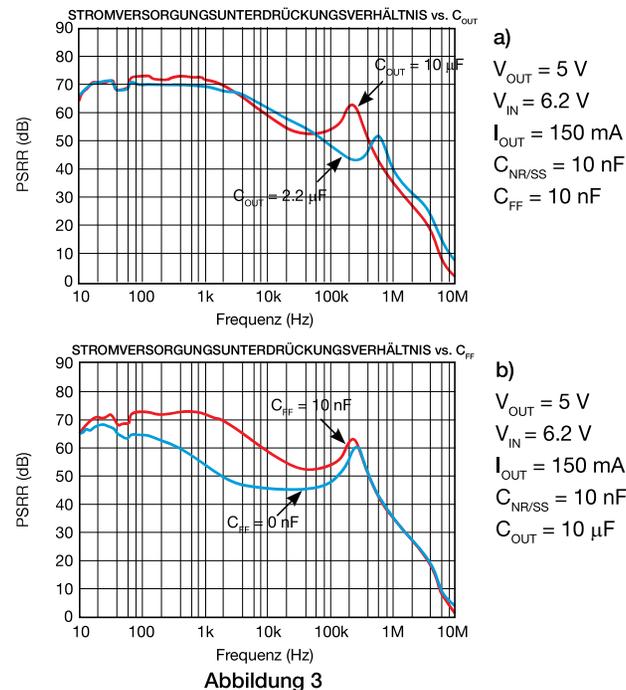


Abbildung 2

Abbildung 3 zeigt die Bode-Diagramme des PSRR bei zwei verschiedenen Werten der Ausgangskapazität C_{OUT} und Phasenvoreilungskapazität C_{FF} . Eine Erhöhung der Ausgangskapazität C_{OUT} führt aufgrund der niedrigeren Frequenz $\omega_{Pload} = I_{out} / (C_{OUT} V_{out})$ des Lastpols zu einer Senkung der Durchtrittsfrequenz und kann das PSRR bei mittleren und sehr hohen Frequenzen verschlechtern, wohingegen der PSRR jenseits der Durchtrittsfrequenz verbessert wird. Eine Erhöhung der Phasenvoreilungskapazität C_{FF} verursacht aufgrund der niedrigeren Frequenz $\omega_{Pload} = 1 / (C_{FF} R_{TH})$ der Nullstelle eine Erhöhung der Durchtrittsfrequenz und verbessert dadurch das PSRR bei niedrigen Frequenzen, während es bei hohen Frequenzen zu keiner Verbesserung kommt.





Versuchsaufbau: Konfiguration

Für dieses Experiment werden folgende Geräte benötigt: ein GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄT, eine ELEKTRONISCHE GLEICHSPANNUNGSLAST, ein VEKTOR-NETZWERKANALYSATOR und ein SPANNUNGSEINSPEISER. Wie die Geräte verbunden werden, wird in Abbildung 5 gezeigt. Gehen Sie wie auf der nächsten Seite beschrieben vor, um die **Verbindungen herzustellen**.

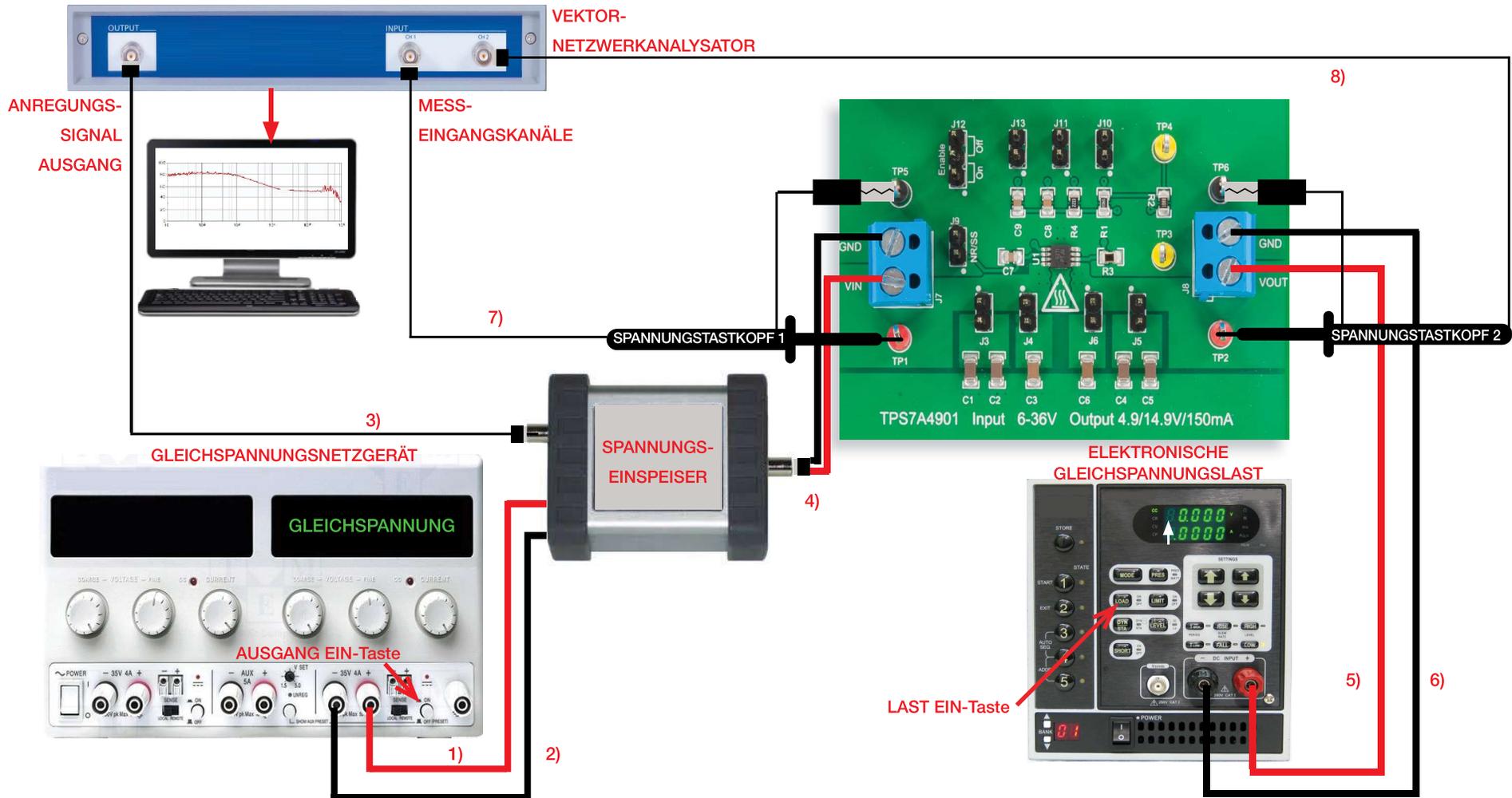


Abbildung 5: Versuchsaufbau



Versuchsaufbau: Anleitung

Vergewissern Sie sich, dass alle Geräte ausgeschaltet sind, und stellen Sie die folgenden **Verbindungen** her:

- 1) Verbinden Sie den PLUS-AUSGANG (ROT) des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS mit dem PLUS-EINGANG (ROT) des SPANNUNGSEINSPEISERS.
- 2) Verbinden Sie den MINUS-AUSGANG (SCHWARZ) des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS mit dem MINUS-EINGANG (SCHWARZ) des SPANNUNGSEINSPEISERS.
- 3) Verbinden Sie den ANREGUNGSSIGNALAUSGANG des VEKTOR-NETZWERKANALYSATORS mit dem SIGNALEINGANG des SPANNUNGSEINSPEISERS.
- 4) Verbinden Sie den PLUS-AUSGANG des SPANNUNGSEINSPEISERS mit dem EINGANG (VIN) der Schraubklemme J_7 auf der TPS7A4901-LDO-Reglerplatine und den MINUS-AUSGANG des SPANNUNGSEINSPEISERS mit der MASSE (GND) der Schraubklemme J_7 der TPS7A4901-LDO-Reglerplatine.
- 5) Verbinden Sie den AUSGANG (VOOUT) der Schraubklemme J_8 auf der TPS7A4901-LDO-Reglerplatine mit dem PLUS-EINGANG (ROT) der ELEKTRONISCHEN LAST.
- 6) Verbinden Sie die MASSE (GND) der Schraubklemme J_8 auf der TPS7A4901-LDO-Reglerplatine mit dem MINUS-EINGANG (SCHWARZ) der ELEKTRONISCHEN LAST.
- 7) Schließen Sie einen Spannungstastkopf an Kanal 1 des VEKTOR-NETZWERKANALYSATORS an, und hängen Sie ihn an den TESTPIN TP_1 (Eingangsspannung) auf der TPS7A4901-LDO-Reglerplatine.
[WARNUNG: AUF KEINEN FALL den Plus- und den Masseanschluss des Spannungstastkopfes vertauschen.]
- 8) Schließen Sie einen Spannungstastkopf an Kanal 2 des VEKTOR-NETZWERKANALYSATORS an, und hängen Sie ihn an den TESTPIN TP_2 (Ausgangsspannung) auf der TPS7A4901-LDO-Reglerplatine.
[WARNUNG: AUF KEINEN FALL den Plus- und den Masseanschluss des Spannungstastkopfes vertauschen.]

HINWEISE:

- Je nach Art des Vektor-Netzwerkanalysators ist entweder ein integriertes Oszilloskop zur Anzeige des gemessenen PSRR oder ein USB-Anschluss (bzw. ein anderer Anschluss) vorhanden, über den das Gerät mit einem PC mit entsprechender Software verbunden werden kann, um es zu konfigurieren und das PSRR darzustellen.
- Die Ausgangsimpedanz des SPANNUNGSEINSPEISERS kann leicht ohmsch sein.
- Der Eingangskondensator auf der LDO-Reglerplatine fungiert als Tiefpassfilter und wirkt sich auf das PSRR aus. Daher fallen die PSRR-Messungen, je nachdem, ob der Eingangskondensator verbunden ist oder nicht, unterschiedlich aus.



Prüfung 1: Vorbereitung und Verfahren



Abbildung 6: TPS7A4901-LDO-Platine: Jumperkonfiguration für Prüfung 1

Jumperkonfiguration (siehe Abbildung 6):

- **J₁₂ gebrückt** in Stellung ON → LDO-Betrieb aktiviert
- **J₁₀ gebrückt** → Nennausgangsspannung $V_{out} = 5\text{ V}$
- **J₁₃ gebrückt** → Phasenvoreilungs-Kondensator C_9 (12 nF) verbunden
- **J₅ gebrückt** → Ausgangskondensatoren C_4 (4.7 μF) und C_5 (4.7 μF) verbunden
- **J₆ gebrückt** → Ausgangskondensator C_6 (2.2 μF) verbunden
- **J₄ offen** → Eingangskondensator C_3 (2.2 μF) getrennt
- **J₃ offen** → Eingangskondensatoren C_1 (4.7 μF) und C_2 (4.7 μF) getrennt
- **J₁₁ offen** → Phasenvoreilungs-Kondensator C_8 (100 nF) getrennt
- **J₉ offen** → Entstörkondensator C_7 (12 nF) getrennt

Prüfverfahren:

- 1) Den VEKTOR-NETZWERKANALYSATOR einschalten.
- 2) Den Messfrequenzbereich auf 10 Hz bis 10 MHz einstellen.

- 3) Entsprechend der Bedienungsanleitung des VEKTOR-NETZWERKANALYSATORS die Größe des AC-Ausgangssignals sowie die Verstärkung der Ausgangs- und Eingangskanäle einstellen.
[HINWEIS: Eine hohe Größe des AC-Ausgangssignals verbessert die Genauigkeit der PSRR-Messung. Das Schwingen des AC-Signals muss aber dennoch begrenzt werden, um sicherzustellen, dass die Eingangsspannung des LDO-Reglers nicht niedriger als die Dropout-Spannung wird, wenn der DC-Anteil gering ist.]
- 4) Das NETZGERÄT einschalten (die Taste „AUSGANG EIN“ muss in der Stellung OFF sein), dann die Spannung auf 8 V und die STROMBEGRENZUNG auf 200 mA einstellen.
- 5) Die ELEKTRONISCHE LAST einschalten (die Taste „LAST EIN“ muss in der Stellung OFF sein), den GLEICHSTROMMODUS konfigurieren und den Strom auf 25 mA einstellen.
- 6) Die Taste „AUSGANG EIN“ des NETZGERÄTS und die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST in die Stellung ON bringen.
- 7) Nun sollte auf dem Bildschirm des VEKTOR-NETZWERKANALYSATORS bzw. des daran angeschlossenen PC eine horizontale Linie zu sehen sein: Das Gerät misst nur Rauschen.
- 8) Die Taste „DURCHLAUF EIN“ des VEKTOR-NETZWERKANALYSATORS in die Stellung ON bringen.
- 9) Nun sollte auf dem Bildschirm des VEKTOR-NETZWERKANALYSATORS bzw. des daran angeschlossenen PC eine PSRR-Kurve angezeigt werden, die der roten Linie in Abbildung 3 ähnelt. (Wenn die Kurve völlig anders aussieht, die Taste „DURCHLAUF EIN“ des VEKTOR-NETZWERKANALYSATORS, die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN GLEICHSPANNUNGSLAST und die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen und die vorherigen Schritte überprüfen.)
- 10) Mit der Cursorfunktion des VEKTOR-NETZWERKANALYSATORS den PSRR-Wert bei den in Tabelle 1 angegebenen Frequenzen messen.
- 11) Schritt 10) mit den in Tabelle 1 angegebenen Eingangsgleichspannungswerten wiederholen (die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS muss beim Ändern der Spannung nicht in die Stellung OFF gebracht werden).
- 12) Die Taste „DURCHLAUF EIN“ des VEKTOR-NETZWERKANALYSATORS, die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN GLEICHSPANNUNGSLAST und die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen, den Jumper **J₅** öffnen, um die Ausgangskondensatoren C_4 (4.7 μF) und C_5 (4.7 μF) zu trennen, und die Schritte 6) bis 11) wiederholen.
- 13) Nach den Messungen die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST und die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen und alle Geräte ausschalten.



Prüfung 1: Messungen und Berechnungen

- Das PSRR bei den in Tabelle 1 angegebenen Frequenzen mit zwei unterschiedlichen Ausgangskondensator konfigurierungen messen.
- Die Fragen beantworten und versuchen, die Ergebnisse der Beobachtungen anhand der Informationen im Abschnitt *Theoretischer Hintergrund* sowie in [2], [9] und [12] zu erläutern.

Tabelle 1: PSRR des LDO-Reglers TPS7A4901 bei $V_{OUT} = 5\text{ V}$, $I_{out} = 25\text{ mA}$, $C_{FF} = 12\text{ nF}$ und verschiedenen Ausgangskondensator konfigurierungen

(1) PSRR [dB] bei $C_{OUT} = 2 \times 4.7\ \mu\text{F} + 2.2\ \mu\text{F}$	AC-Signalfrequenz				
	100 Hz	1 kHz	10 kHz	100 kHz	1 MHz
(2) PSRR [dB] bei $C_{OUT} = 2.2\ \mu\text{F}$					
	$V_{IN,DC} = 8\text{ V}$	(1)	(1)	(1)	(1)
$V_{IN,DC} = 12\text{ V}$	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)
$V_{IN,DC} = 16\text{ V}$	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)

Ausgangskondensatoren:

J_5 gebrückt und J_6 offen:

$C_{out} = C_4$ und C_5 parallel = 9.4 μF
ESR ~ 35 m Ω bei 10 kHz, ~2 m Ω bei 1 MHz

Phasenvoreilungs-Kondensatoren:

J_{11} offen und J_{13} gebrückt:

$C_{FF} = C_9 = 12\text{ nF}$

(Nähere Informationen zu den ESR-/Frequenzkurven sind auf den Websites der Kondensatorhersteller zu finden.)

J_5 offen und J_6 gebrückt:

$C_{out} = C_6 = 2.2\ \mu\text{F}$
ESR ~ 50 m Ω bei 10 kHz, ~4 m Ω bei 1 MHz

J_{11} gebrückt und J_{13} offen:

$C_{FF} = C_8 = 100\text{ nF}$

J_5 gebrückt und J_6 gebrückt:

$C_{out} = C_4, C_5$ und C_6 parallel = 11.6 μF
ESR ~ 20 m Ω bei 10 kHz, ~1.5 m Ω bei 1 MHz

J_{11} gebrückt und J_{13} gebrückt:

$C_{FF} = C_8$ und C_9 parallel = 112 nF

Antworten:

- 1) Wie hängt die Größe des PSRR von der Ausgangskapazität ab? Kein Zusammenhang Nimmt bei höherer Kapazität zu Nimmt bei höherer Kapazität ab

Andere: _____

- 2) Wirkt sich die Eingangsgleichspannung $V_{IN,DC}$ auf die Größe der Ausgangsspannungsspitzen aus? Ja Nein Hängt vom Laststrom ab Andere:



Prüfung 2: Vorbereitung und Verfahren



Abbildung 7: TPS7A4901-LDO-Platine: Jumperkonfiguration für Prüfung 2

Jumperkonfiguration (siehe Abbildung 7):

- **J₁₂ gebrückt** in Stellung ON → LDO-Betrieb aktiviert
- **J₁₀ gebrückt** → Nennausgangsspannung $V_{out} = 5\text{ V}$
- **J₁₃ gebrückt** → Phasenvereilungs-Kondensator C_9 (12 nF) verbunden
- **J₅ gebrückt** → Ausgangskondensatoren C_4 (4.7 μF) und C_5 (4.7 μF) verbunden
- **J₆ gebrückt** → Ausgangskondensator C_6 (2.2 μF) verbunden
- **J₄ offen** → Eingangskondensator C_3 (2.2 μF) getrennt
- **J₃ offen** → Eingangskondensatoren C_1 (4.7 μF) und C_2 (4.7 μF) getrennt
- **J₁₁ offen** → Phasenvereilungs-Kondensator C_8 (100 nF) getrennt
- **J₉ offen** → Entstörkondensator C_7 (12 nF) getrennt

Prüfverfahren:

- 1) Den VEKTOR-NETZWERKANALYSATOR einschalten.
- 2) Den Messfrequenzbereich auf 10 Hz bis 10 MHz einstellen.

- 3) Entsprechend der Bedienungsanleitung des VEKTOR-NETZWERKANALYSATORS die Größe des AC-Ausgangssignals sowie die Verstärkung der Ausgangs- und Eingangskanäle einstellen.
[HINWEIS: Eine hohe Größe des AC-Ausgangssignals verbessert die Genauigkeit der PSRR-Messung. Das Schwingen des AC-Signals muss aber dennoch begrenzt werden, um sicherzustellen, dass die Eingangsspannung des LDO-Reglers nicht niedriger als die Dropout-Spannung wird, wenn der DC-Anteil gering ist.]
- 4) Das NETZGERÄT einschalten (die Taste „AUSGANG EIN“ muss in der Stellung OFF sein), dann die Spannung auf 8 V und die STROMBEGRENZUNG auf 200 mA einstellen.
- 5) Die ELEKTRONISCHE LAST einschalten (die Taste „LAST EIN“ muss in der Stellung OFF sein), den GLEICHSTROMMODUS konfigurieren und den Strom auf 25 mA einstellen.
- 6) Die Taste „AUSGANG EIN“ des NETZGERÄTS und die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST in die Stellung ON bringen.
- 7) Nun sollte auf dem Bildschirm des VEKTOR-NETZWERKANALYSATORS bzw. des daran angeschlossenen PC eine horizontale Linie zu sehen sein: Das Gerät misst nur Rauschen.
- 8) Die Taste „DURCHLAUF EIN“ des VEKTOR-NETZWERKANALYSATORS in die Stellung ON bringen.
- 9) Nun sollte auf dem Bildschirm des VEKTOR-NETZWERKANALYSATORS bzw. des daran angeschlossenen PC eine PSRR-Kurve angezeigt werden, die der roten Linie in Abbildung 3 ähnelt (wenn die Kurve völlig anders aussieht, die Taste „DURCHLAUF EIN“ des VEKTOR-NETZWERKANALYSATORS, die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN GLEICHSPANNUNGSLAST und die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen und die vorherigen Schritte überprüfen).
- 10) Mit der Cursorfunktion des VEKTOR-NETZWERKANALYSATORS den PSRR-Wert bei den in Tabelle 1 angegebenen Frequenzen messen.
- 11) Schritt 10) mit den in Tabelle 1 angegebenen Eingangsgleichspannungswerten wiederholen (die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS muss beim Ändern der Spannung nicht in die Stellung OFF gebracht werden).
- 12) Die Taste „DURCHLAUF EIN“ des VEKTOR-NETZWERKANALYSATORS, die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN GLEICHSPANNUNGSLAST und die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen, den Jumper **J₁₁** überbrücken, um den Phasenvereilungs-Kondensator C_8 (100 nF) zu verbinden, und den Jumper **J₁₃** öffnen, um den Phasenvereilungs-Kondensator C_9 (12 nF) zu trennen. Anschließend die Schritte 6) bis 11) wiederholen.
- 13) Nach den Messungen die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST und die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen und alle Geräte ausschalten.



Prüfung 2: Messungen und Berechnungen

- Den PSRR bei den in Tabelle 2 angegebenen Frequenzen mit zwei unterschiedlichen Phasenvoreilungs-Kondensator-Konfigurationen messen.
- Die Fragen beantworten und versuchen, die Ergebnisse der Beobachtungen anhand der Informationen im Abschnitt *Theoretischer Hintergrund* sowie in [2], [9] und [12] zu erläutern.

Tabelle 2: PSRR des LDO-Reglers TPS7A4901 bei $V_{OUT} = 5\text{ V}$, $I_{OUT} = 25\text{ mA}$, $C_{OUT} = 2 \times 4.7\ \mu\text{F} + 2.2\ \mu\text{F}$ und verschiedenen Phasenvoreilungs-Kondensator-Konfigurationen

(1) PSRR [dB] bei $C_{FF} = 12\text{ nF}$	AC-Signalfrequenz				
	100 Hz	1 kHz	10 kHz	100 kHz	1 MHz
(2) PSRR [dB] bei $C_{FF} = 100\text{ nF}$					
	$I_{OUT} = 25\text{ mA}$	(1)	(1)	(1)	(1)
$I_{OUT} = 75\text{ mA}$	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)
$I_{OUT} = 125\text{ mA}$	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)

Ausgangskondensatoren:

J_5 gebrückt und J_6 offen:

$C_{out} = C_4$ und C_5 parallel = $9.4\ \mu\text{F}$
ESR ~ $35\text{ m}\Omega$ bei 10 kHz , ~ $2\text{ m}\Omega$ bei 1 MHz

Phasenvoreilungs-Kondensatoren:

J_{11} offen und J_{13} gebrückt:

$C_{FF} = C_9 = 12\text{ nF}$

(Nähere Informationen zu den ESR-/Frequenzkurven sind auf den Websites der Kondensatorhersteller zu finden.)

J_5 offen und J_6 gebrückt:

$C_{out} = C_6 = 2.2\ \mu\text{F}$
ESR ~ $50\text{ m}\Omega$ bei 10 kHz , ~ $4\text{ m}\Omega$ bei 1 MHz

J_{11} gebrückt und J_{13} offen:

$C_{FF} = C_8 = 100\text{ nF}$

J_5 gebrückt und J_6 gebrückt:

$C_{out} = C_4, C_5$ und C_6 parallel = $11.6\ \mu\text{F}$
ESR ~ $20\text{ m}\Omega$ bei 10 kHz , ~ $1.5\text{ m}\Omega$ bei 1 MHz

J_{11} gebrückt und J_{13} gebrückt:

$C_{FF} = C_8$ und C_9 parallel = 112 nF

Antworten:

- Beschreiben Sie den beobachteten Zusammenhang zwischen der Kapazität C_{FF} , dem Laststrom I_{OUT} und dem PSRR im Frequenzbereich der Messung:



Erörterung

In Prüfung 1 haben wir den Zusammenhang zwischen dem PSRR des LDO-Reglers und den Eingangsgleichspannungs- und Ausgangskapazitätswerten untersucht.

Das PSRR ist ein Maß für die Fähigkeit einer Stromversorgung, die Immunität der Ausgangsspannung gegen *permanente Störeinflüsse* (Restwelligkeit) in der Eingangsspannung sicherzustellen. Dagegen ist die in *Experiment 3* untersuchte Größe der Ausgangsspannungsspitzen, die während des Einschwingvorgangs bei Eingangsspannungstransienten auftreten, ein Maß für die Fähigkeit einer Stromversorgung, die Immunität der Ausgangsspannung gegen *gelegentliche transiente Störeinflüsse* (Spannungsspitzen) in der Eingangsspannung zu gewährleisten. Ersterer basiert auf der Analyse der Frequenzdomäne und Letztere auf der Analyse der Zeitdomäne. Das frequenzbezogene Verhalten und das zeitbezogene Verhalten eines dynamischen Systems, wie z. B. eines LDO-Spannungsreglers, sind miteinander korreliert. Die Faktoren, die das frequenzbezogene Verhalten des LDO-Spannungsreglers beeinflussen, wirken sich auch auf das zeitbezogene Verhalten aus. In *Experiment 3* wurde festgestellt, dass eine höhere Ausgangskapazität zu einer niedrigeren Durchtrittsfrequenz der Spannungsrückkopplungsschleifenverstärkung führt und zu erwarten ist, dass dies den Einschwingvorgang bei Eingangsspannungstransienten verlangsamt, wodurch die Ausgangsspannungsspitzen größer werden. Es wurde auch erläutert, dass bei einer sehr hohen Durchtrittsfrequenz wie der des LDO-Reglers TPS7A4901 die Ausgangsspannungsspitzen bei Eingangsspannungstransienten nicht sichtbar sind, wenn keine dynamische Quelle mit einer sehr großen Spannungsanstiegsgeschwindigkeit ($> 1 \text{ V}/\mu\text{s}$) verwendet wird. Eine Eingangsspannungsstörung mit hoher Anstiegsgeschwindigkeit ist eine Art von Hochfrequenzrauschen (das Frequenzspektrum der Wellenform eines sprunghaften Anstiegs weist mehr Harmonische auf als das der Wellenform eines sanfteren Anstiegs). Daher lässt sich die Fähigkeit eines Spannungsreglers zur Immunisierung der Ausgangsspannung gegen schnelle Lasttransienten einfacher anhand des PSRR bestimmen, anstatt die schwierigere Analyse des Einschwingverhaltens bei Eingangsspannungstransienten durchzuführen. Das PSRR eines LDO-Reglers bei *geschlossenem Regelkreis* kann in vier Bereiche unterteilt werden (siehe Abbildungen 8 und 9). Im Bereich von DC bis zu den mittleren Frequenzen (a) sieht das PSRR bei *geschlossenem Regelkreis* nahezu flach aus und seine Größe wird durch die DC-Verstärkung des Fehlerverstärkers bei geschlossenem Regelkreis bestimmt. Im mittleren bis hohen Frequenzbereich (b) wird das PSRR bei *geschlossenem Regelkreis* durch die Pole und Nullstellen der Rückkopplungsschleifenverstärkung und durch das PSRR bei *offenem Regelkreis* (dem PSRR ohne Rückkopplungsregelung) beeinflusst. Der Ausgangskondensator spielt im Bereich (b) eine doppelte Rolle:

- 1) Er beeinflusst die Durchtrittsfrequenz der Schleifenverstärkung und die Obergrenze des mittleren zum hohen Frequenzbereich, die der Durchtrittsfrequenz entspricht (wird auch als „Systembandbreite“ bezeichnet, da der Frequenzbereich begrenzt wird, in dem die Rückkopplungsregelung des geschlossenen Regelkreises die Auswirkungen von Störeinflüssen abschwächen kann).
- 2) Er beeinflusst den PSRR bei *offenem Regelkreis* sowie die Größe des PSRR bei *geschlossenem Regelkreis* in der Nähe der Obergrenze des mittleren bis hohen Frequenzbereichs.

Eine Erhöhung der Ausgangskapazität hat insbesondere positive Auswirkungen auf das PSRR bei *offenem Regelkreis* und hohen Frequenzen, wenn die Impedanz des Ausgangskondensators geringer ist. Sie führt aber auch zu einer niedrigeren Frequenz des Pols $\omega_{\text{Pload}} = I_{\text{OUT}} / (C_{\text{OUT}} V_{\text{OUT}})$ des geschlossenen Regelkreises und dadurch zu einer Verringerung der Systembandbreite (siehe Abbildungen 8 und 9). In den Bereichen (c) und (d) jenseits der Durchtrittsfrequenz ist die Rückkopplungsregelung inaktiv, und das PSRR bei *geschlossenem Regelkreis* ist mit dem bei offenem Regelkreis identisch. Der PSRR-Anstieg im Bereich (c) wird durch die fortschreitende Abnahme der Impedanz des Ausgangskondensators verursacht, während der PSRR-Rückgang im Bereich (d) auf die Kapazität des Pass-Bausteins und auf andere parasitäre Kapazitäten zurückzuführen ist.

Die Eingangsspannung hat nur einen geringen Einfluss auf das PSRR, da sie sich hauptsächlich auf den Arbeitspunkt des PNP-Pass-Bausteins auswirkt.

In Prüfung 2 haben wir den Zusammenhang zwischen dem PSRR des LDO-Reglers und den Phasenvoreilungskapazitäts- und Laststromwerten untersucht.

Ein Zusammenhang mit dem Laststrom ist zu erwarten, da sich dieser auf den Pol ω_{Pload} der Rückkopplungsschleifenverstärkung auswirkt. Ein höherer Laststrom führt zu einer höheren Polfrequenz und dadurch zu einer höheren Durchtrittsfrequenz, einem größeren PSRR-Wert und einer größeren Systembandbreite.

Die Phasenvoreilungskapazität hat ebenfalls einen direkten Einfluss auf die Rückkopplungsschleifenverstärkung, da sie die Position der Nullstelle $\omega_{\text{ZFF}} = 1 / (C_{\text{FF}} R_{\text{ff}})$ festlegt. Eine größere Phasenvoreilungskapazität führt zu einer niedrigeren Frequenz der Nullstelle ω_{ZFF} und dadurch zu einer höheren Schleifenverstärkung und einem größeren PSRR im mittleren bis hohen Frequenzbereich.



Experimentelle Oszilloskopkurven

Die Abbildungen in diesem Abschnitt enthalten einige Beispiele für experimentelle Messungen, die mit dem LDO-Regler TPS7A4901 durchgeführt wurden. Sie zeigen das PSRR des LDO-Reglers bei verschiedenen Konfigurationen von Eingangsspannung, Laststrom und Phasenvoreilungs-Kondensator (*weitere Details sind in [4] zu finden*).

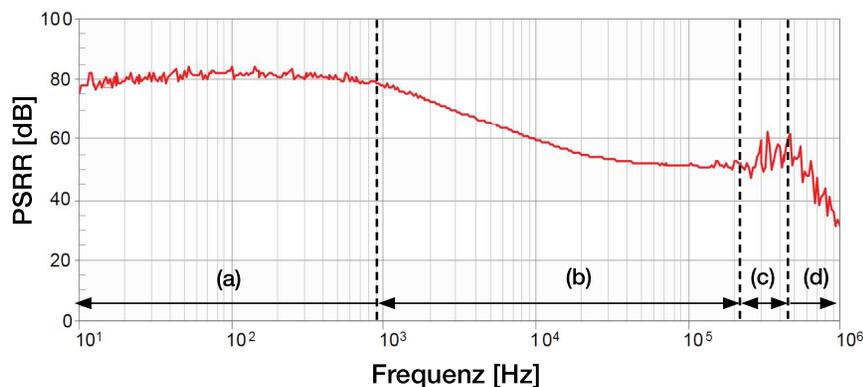


Abbildung 8: PSRR des LDO TPS7A4901 bei:

$V_{out} = 5\text{ V}$, $V_{in} = 6.5\text{ V}$, $I_{out} = 100\text{ mA}$, keine C_{in} , $C_{out} = 2 \times 4.7\text{ }\mu\text{F}$, $C_{FF} = 100\text{ nF}$

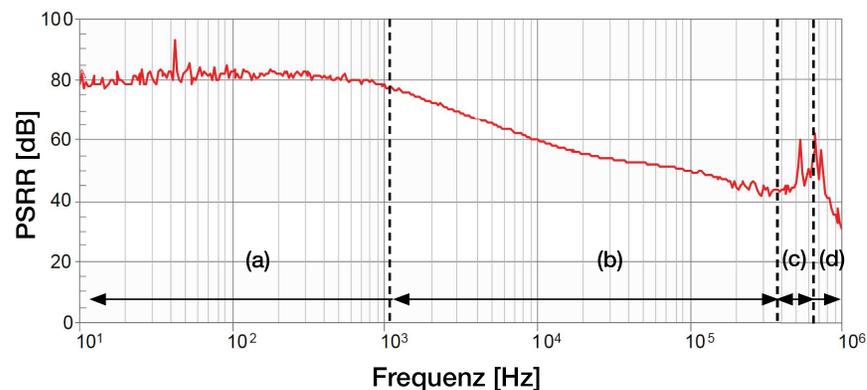


Abbildung 9: PSRR des LDO TPS7A4901 bei:

$V_{out} = 5\text{ V}$, $V_{in} = 6.5\text{ V}$, $I_{out} = 100\text{ mA}$, keine C_{in} , $C_{out} = 2.2\text{ }\mu\text{F}$, $C_{FF} = 100\text{ nF}$

Die Kurven in den Abbildungen 8 und 9 zeigen den Einfluss der Ausgangskapazität auf das PSRR des LDO-Reglers TPS7A4901 bei geschlossenem Regelkreis. In Abbildung 8 sind eine niedrigere Durchtrittsfrequenz (Obergrenze von Bereich (b)) sowie ein größeres PSRR-Wert bei den hohen Frequenzen von Bereich (b) und in Bereich (c) als in Abbildung 9 zu beobachten. Dies sind die Auswirkungen der höheren Kapazität.

HINWEIS. Die PSRR-Kurven sind im niedrigen und im hohen Frequenzbereich aufgrund der Auswirkungen der Konfiguration des Messsystems gestochen scharf. Die Kurven in den Abbildungen 8 bis 11 wurden mit einem Vektor-Netzwerkanalysator und einem Summierverstärker erstellt, der das AC-Anregungssignal des Analysators der vom Netzgerät erzeugten konstanten Spannung hinzugefügt (siehe Abbildung 1) hat. Die Frequenz des AC-Anregungssignals durchläuft den Bereich von der Untergrenze f_{min} bis zur Obergrenze f_{max} durch eine gegebene Anzahl von N_{sam} Abtastfrequenzen. Die Größe des Anregungssignals kann bei jeder Abtastfrequenz im Bereich $[f_{min}, f_{max}]$ auf verschiedene Pegel eingestellt werden. Der Vektor-Netzwerkanalysator speist bei jeder Abtastfrequenz das sinusförmige AC-Anregungssignal in die Eingangsspannung ein und misst die Größe der entsprechenden sinusförmigen Störspannung in der Ausgangsspannung. Die Durchlaufzeit T_{swp} ist die Zeitspanne, die der Vektor-Netzwerkanalysator für die Durchführung der PSRR-Messung über den gesamten Frequenzbereich $[f_{min}, f_{max}]$ benötigt. Durch das Ändern von $[f_{min}, f_{max}]$, N_{sam} , T_{swp} und der Größe des AC-Anregungssignals können verschiedene Stufen der Genauigkeit und Sanftheit in der PSRR-Kurve festgelegt werden. Die Bandbreite des Summierverstärkers kann auch den Hochfrequenzbereich der PSRR-Kurve beeinflussen. Zum Schluss muss das Grundrauschen der Ausgangsspannung ermittelt werden, um das PSRR vom Eigenrauschen des LDO-Reglers in der Messumgebung zu unterscheiden. Es wird empfohlen, zusätzlich die Informationen zu PSRR-Messungen bei LDO-Reglern in den technischen Dokumenten [2], [9] und [12] zu lesen.



Experimentelle Oszilloskopkurven

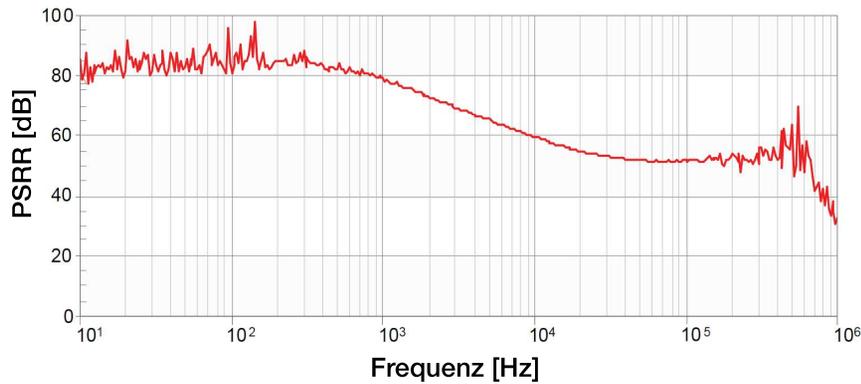


Abbildung 10: PSRR des LDO TPS7A4901 bei:
 $V_{\text{out}} = 5 \text{ V}$, $V_{\text{in}} = 12 \text{ V}$, $I_{\text{out}} = 20 \text{ mA}$, keine C_{in} , $C_{\text{out}} = 2 \times 4.7 \mu\text{F}$, $C_{\text{FF}} = 100 \text{ nF}$

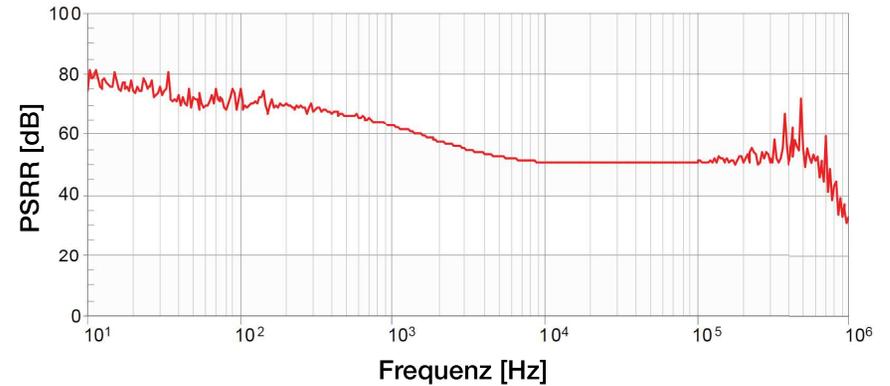


Abbildung 11: PSRR des LDO TPS7A4901 bei:
 $V_{\text{out}} = 5 \text{ V}$, $V_{\text{in}} = 12 \text{ V}$, $I_{\text{out}} = 20 \text{ mA}$, keine C_{in} , $C_{\text{out}} = 2 \times 4.7 \mu\text{F}$, keine C_{FF}

Die Kurven in den Abbildungen 10 und 11 zeigen den Einfluss der Phasenvoreilungskapazität auf das PSRR des LDO-Reglers TPS7A4901 bei geschlossenem Regelkreis. In Abbildung 10 ist das PSRR im mittleren bis hohen Frequenzbereich, in dem die durch die Phasenvoreilungskapazität eingebrachte Nullstelle einen starken Einfluss auf die Erhöhung der Durchtrittsfrequenz hat und dadurch zu einer Verbesserung des PSRR führt, größer als in Abbildung 11.

Experiment 5

In diesem Experiment werden die Dropout-Spannung und der Massestrom eines LDO-Reglers mit einem N-Kanal-MOSFET als Pass-Baustein analysiert. Dazu wird der LDO-Regler TPS7A8300 verwendet.



Fallstudie

In diesem Experiment wird untersucht, wie die Dropout-Spannung und die Genauigkeit der Ausgangsspannungsregelung eines LDO-Reglers mit einem N-Kanal-MOSFET von den Eingangsspannungs- und Lastbedingungen abhängen.

Untersuchungsgegenstand dieses Experiment ist die Messung des Spannungsabfalls am als Pass-Baustein verwendeten N-Kanal-MOSFET, wenn dieser im ohmschen Bereich arbeitet. Der Spannungsabfall am Pass-Baustein beeinflusst die Dropout-Spannung des LDO-Reglers, und zwar die Mindesteingangsspannung, bei der die Ausgangsspannung auf den gewünschten Sollwert geregelt werden kann. In diesem Experiment wird die Dropout-Spannung V_{dropout} über den Pass-Baustein auf andere Weise als in *Experiment 1* gemessen. Insbesondere wird die Spannung am FB-Pin durch einen externen DC-Signalgenerator auf einen bestimmten Wert festgelegt. Wenn dieser Wert ein wenig niedriger als die Referenzspannung von 0.8 V ist, wird simuliert, dass die Ausgangsspannung den Sollwert unterschreitet. Dadurch zwingt der interne Fehlerverstärker den Pass-Baustein, im ohmschen Bereich zu arbeiten, wodurch die Messung der Dropout-Spannung des N-Kanal-MOSFET möglich ist.

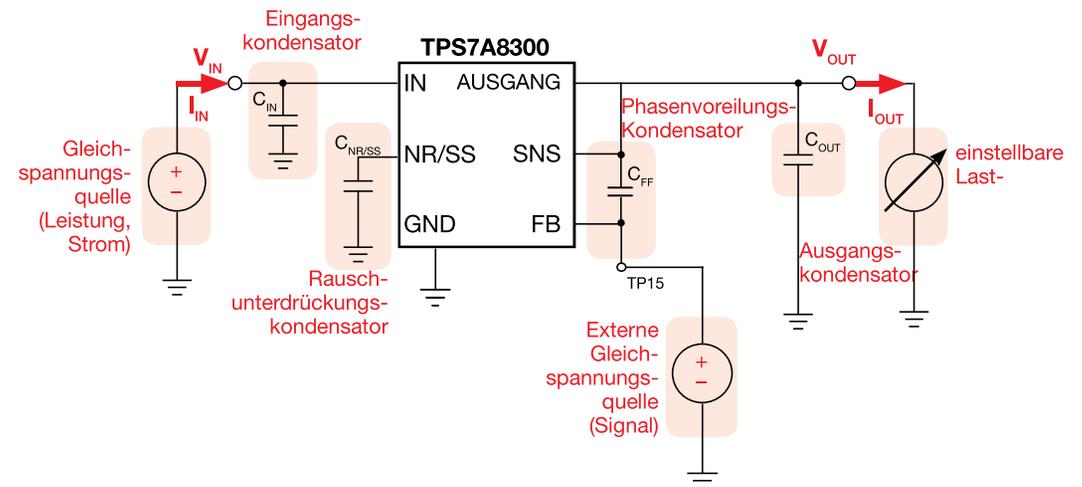


Abbildung 1: Vereinfachter Schaltplan des LDO-Reglers TPS7A8300

Prüfung 1: Wir messen die Eingangsspannung und die Ausgangsspannung des LDO-Reglers TPS7A8300 bei verschiedenen Eingangsspannungen und Lastströmen sowie mit nicht verbundenem und verbundenem Pin für die Rückkopplungsspannung. Dabei soll der Spannungsabfall an dem als Pass-Baustein verwendeten N-Kanal-MOSFET festgestellt werden, um dessen Kanalwiderstand zu berechnen und zu beobachten, wie dieser von den Betriebsbedingungen abhängt.

Prüfung 2: Wir messen den Massestrom des LDO-Reglers TPS7A8300 bei verschiedenen Eingangsspannungen und Lastströmen und beobachten, wie dieser von den Betriebsbedingungen abhängt.



Theoretischer Hintergrund

Dieser Abschnitt enthält grundlegende Informationen zu LDO-Reglern mit einem N-Kanal-MOSFET. (In [1], [4], [11] und [12] sind allgemeine Informationen zum Betrieb und zu den Eigenschaften von LDO-Reglern zu finden. In [3] sind weitere Details zum Betrieb und zu den Leistungsmerkmalen des TPS7A8300 und in Experiment 1 Informationen zur Dropout-Spannung bei LDO-Reglern mit einem PNP-Pass-Baustein zu finden.)

Abbildung 2 zeigt die interne Architektur des LDO-Reglers TPS7A8300 mit einem N-Kanal-MOSFET als Pass-Baustein.

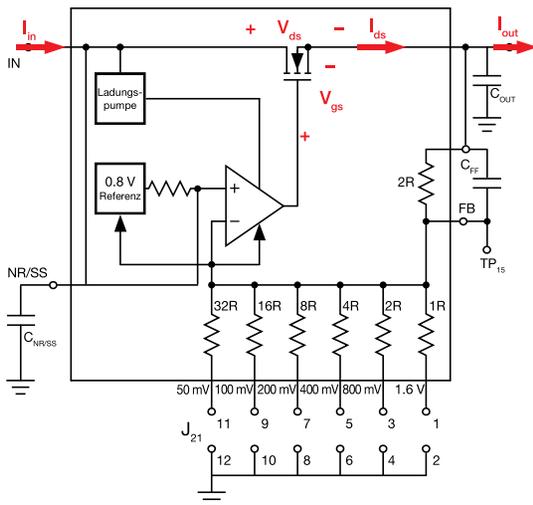


Abbildung 2

Die Ausgangsspannung kann in Schritten von 50 mV auf 0.8 bis 3.95 V eingestellt werden, indem die entsprechende Kombination der internen Widerstände 1R bis 32R über die Jumpergruppe J_{24} mit Masse verbunden wird. Im Normalbetrieb ist der Pin für die Rückkopplungsspannung nicht verbunden und die Rückkopplungsregelung in Abbildung 2 misst die Ausgangsspannung und passt die Gate-Source-Spannung des MOSFET V_{gs} an, bis die Drain-Source-Spannung V_{ds} (Formel (1)) der Differenz zwischen der Eingangsspannung und der gewünschten Ausgangsspannung V_{out} sowie der Drain-Source-Strom I_{ds} des MOSFET (Formel (2)) dem Laststrom I_{out} entsprechen:

$$(1) \quad V_{ds} = V_{drop} = V_{in} - V_{out} = V_{in} - R_{out} I_{out} = V_{in} - R_{out} I_{ds}$$

$$(2) \quad I_{ds} = (V_{in} - V_{ds}) / R_{out}$$

Die Ausgangsspannung wird geregelt, wenn der MOSFET im Sättigungsbereich arbeitet, in dem V_{ds} wie in Abbildung 3 größer als $V_{gs} - V_{th}$ ist.

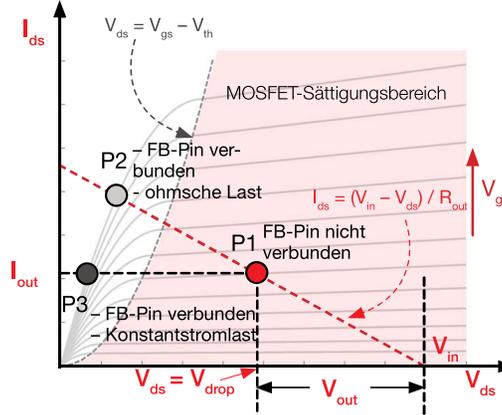


Abbildung 3

Im Sättigungsbereich wird der Drain-Source-Strom I_{ds} des MOSFET mit Gleichung (3) berechnet:

$$(3) \quad I_{ds} = \beta / 2 (V_{gs} - V_{th})^2 [1 + \lambda (V_{ds} - (V_{gs} - V_{th}))]$$

wobei V_{th} die Gate-Source-Schwellenspannung ist, λ der Kanal-längenmodulationsfaktor ist und der Faktor β von der Ladungsträgermobilität, Kanalbreite und -länge, sowie der Gate-Oxidkapazität pro Flächeneinheit abhängt. Die grauen Kurven in Abbildung 3 entsprechen Gleichung (3) (I_{ds} vs. Drain-Source-Spannung) für zunehmende Werte der Gate-Source-Spannung, während die rote gestrichelte Kurve zu Gleichung (2) gehört. Wenn der MOSFET im Sättigungsbereich arbeitet, hat die Rückkopplungsregelung den Spielraum, die Gate-Source-Spannung V_{gs} so einzustellen, dass I_{ds} und V_{ds} die beiden Gleichungen (2) und (3) erfüllen, selbst wenn sich V_{in} und I_{out} ändern. Dadurch wird sichergestellt, dass die Ausgangsspannung V_{out} dem gewünschten Sollwert und der Drain-Source-Strom I_{ds} dem gewünschten Laststrom I_{out} entsprechen.

Die Ausgangsspannung kann auch geregelt werden, wenn der MOSFET im ohmschen Bereich arbeitet, in dem V_{ds} wie in Abbildung 4 kleiner als $V_{gs} - V_{th}$ ist.

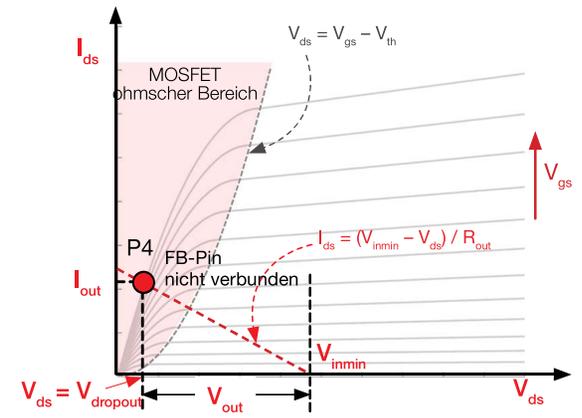


Abbildung 4

Im ohmschen Bereich wird der Drain-Source-Strom I_{ds} des MOSFET mit Gleichung (4) berechnet:

$$(4) \quad I_{ds} = \beta (V_{gs} - V_{th} - V_{ds} / 2) V_{ds}$$

Die Regelung im ohmschen Bereich wird nur erreicht, wenn die Eingangsspannung höher als der Mindestwert V_{inmin} ist, bei dem es einen geeigneten Wert der Gate-Source-Spannung V_{gs} gibt, der die beiden Gleichungen (2) und (3) erfüllt. Im ohmschen Bereich ist die Drain-Source-Spannung V_{ds} sehr niedrig und viel geringer als $V_{gs} - V_{th}$, so dass der Drain-Source-Strom vereinfacht mit Gleichung (5) berechnet werden kann:

$$(5) \quad I_{ds} \approx V_{ds} / R_{ds,on}$$

Hierbei ist $R_{ds,on} = 1 / [\beta (V_{gs} - V_{th})]$ der MOSFET-Kanalwiderstand. Der Kanalwiderstand $R_{ds,on}$ liefert ein Maß für die Dropout-Spannung $V_{dropout} = V_{inmin} - V_{out}$.



Versuchsaufbau: Konfiguration

Für dieses Experiment werden folgende Messeinrichtungen benötigt: ein GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄT, eine ELEKTRONISCHE GLEICHSPANNUNGSLAST, vier MULTIMETER und ein SIGNAL-GENERATOR. Wie die Geräte verbunden werden, wird in Abbildung 5 gezeigt. Gehen Sie wie auf der nächsten Seite beschrieben vor, um die **Verbindungen herzustellen**.

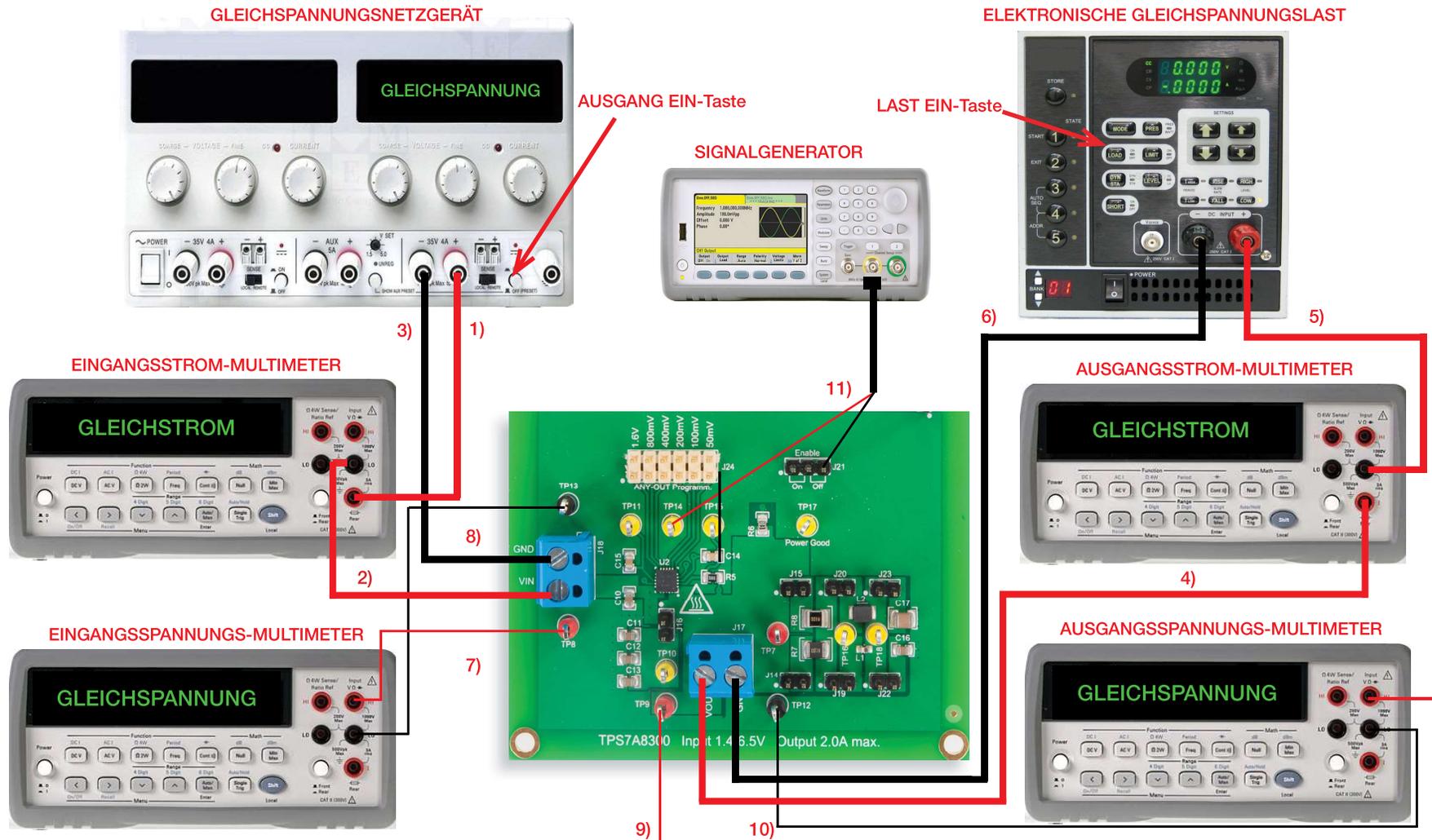


Abbildung 5: Versuchsaufbau



Versuchsaufbau: Anleitung

Vergewissern Sie sich, dass alle Geräte ausgeschaltet sind, und stellen Sie die folgenden **Verbindungen** her:

- 1) Verbinden Sie den PLUS-AUSGANG (ROT) des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS mit der PLUS-AMPEREBUCHSE (ROT) des EINGANGSSTROM-MULTIMETERS.
[**WARNUNG:** Zur Strommessung wird an den MULTIMETERN eine andere Plus-Buchse verwendet als zur Spannungsmessung.]
- 2) Verbinden Sie die MINUS-AMPEREBUCHSE (SCHWARZ) des EINGANGSSTROM-MULTIMETERS mit dem EINGANG (VIN) der Schraubklemme J_{18} auf der TPS7A8300-LDO-Reglerplatine.
- 3) Verbinden Sie den MINUS-AUSGANG (SCHWARZ) des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS mit der MASSE (GND) der Schraubklemme J_{18} auf der TPS7A8300-LDO-Reglerplatine.
- 4) Verbinden Sie den AUSGANG (VOOUT) der Schraubklemme J_{17} auf der TPS7A8300-LDO-Reglerplatine mit der PLUS-AMPEREBUCHSE (ROT) des AUSGANGSSTROM-MULTIMETERS.
[**WARNUNG:** Zur Strommessung wird an den MULTIMETERN eine andere Plus-Buchse verwendet als zur Spannungsmessung.]
- 5) Verbinden Sie die MINUS-AMPEREBUCHSE (SCHWARZ) des AUSGANGSSTROM-MULTIMETERS mit dem PLUS-EINGANG (ROT) der ELEKTRONISCHEN LAST.
- 6) Verbinden Sie den MINUS-EINGANG (SCHWARZ) der ELEKTRONISCHEN LAST mit der MASSE (GND) der Schraubklemme J_{17} auf der TPS7A8300-LDO-Reglerplatine.
- 7) Verbinden Sie die PLUS-VOLTBUCHSE (ROT) des EINGANGSSPANNUNGS-MULTIMETERS mit dem TESTPIN TP_8 (VIN) der TPS7A8300-LDO-Reglerplatine.
- 8) Verbinden Sie die MINUS-VOLTBUCHSE (SCHWARZ) des EINGANGSSPANNUNGS-MULTIMETERS mit dem TESTPIN TP_{13} (GND) der TPS7A8300-LDO-Reglerplatine.
- 9) Verbinden Sie die PLUS-VOLTBUCHSE (ROT) des AUSGANGSSPANNUNGS-MULTIMETERS mit dem TESTPIN TP_9 (VOOUT) der TPS7A8300-LDO-Reglerplatine.
- 10) Verbinden Sie die MINUS-VOLTBUCHSE (SCHWARZ) des AUSGANGSSPANNUNGS-MULTIMETERS mit dem TESTPIN TP_{12} (GND) der TPS7A8300-LDO-Reglerplatine.
- 11) Verbinden Sie den PLUSPOL des AUSGANGS des SIGNALGENERATORS mit dem TESTPIN TP_{14} der TPS7A8300-LDO-Reglerplatine und die MASSE des AUSGANGS des SIGNALGENERATORS mit der Masse der TPS7A8300-LDO-Reglerplatine (den mit Masse verbundenen J_{21} , wie in Abbildung 5 verwenden).



Prüfung 1: Vorbereitung und Verfahren

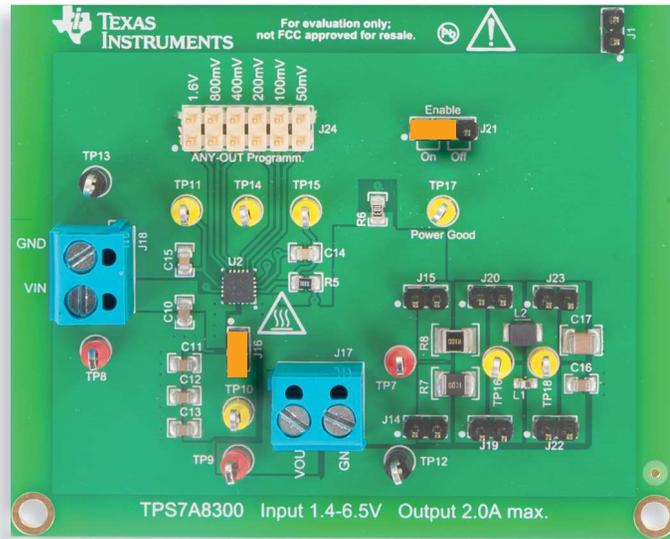


Abbildung 6: TPS7A8300-LDO-Platine: Jumperkonfiguration für Prüfung 1

Jumperkonfiguration (siehe Abbildung 6):

- **J₂₁** gebrückt in Stellung ON → LDO-Betrieb aktiviert
- **J₂₄** offen → Nennausgangsspannung $V_{out} = 0.8\text{ V}$
- **J₁₆** gebrückt → Ausgangskondensatoren $C_{11} - C_{13}$ (3 x 10 μF) verbunden
- **J₁₄** UND **J₁₅** offen → Ausgangswiderstände R_7 (1 m Ω) und R_8 (100 m Ω) getrennt
- **J₁₉** UND **J₂₀** offen → Ausgangsinduktoren L_1 (1 nH) und L_2 (100 nH) getrennt
- **J₂₂** UND **J₂₃** offen → Ausgangskondensatoren C_{16} (10 μF) und C_{17} (47 μF) getrennt

Prüfverfahren:

- 1) Die MULTIMETER einschalten.
- 2) Das EINGANGSSTROM-MULTIMETER auf GLEICHSTROMMODUS mit einem Bereich von $\leq 1\text{ A}$ einstellen.
- 3) Das AUSGANGSSTROM-MULTIMETER auf GLEICHSTROMMODUS mit einem Bereich von $\leq 1\text{ A}$ einstellen.

- 4) Das EINGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER auf GLEICHSPANNUNGSMODUS mit einem Bereich von $\leq 10\text{ V}$ einstellen.
- 5) Das AUSGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER auf GLEICHSPANNUNGSMODUS mit einem Bereich von $\leq 1\text{ V}$ einstellen.
- 6) Das NETZGERÄT einschalten (die Taste „AUSGANG EIN“ muss in der Stellung OFF sein), dann die Spannung auf 1.4 V und die Strombegrenzung auf 1 A einstellen.
- 7) Die ELEKTRONISCHE LAST einschalten (die Taste „LAST EIN“ muss in der Stellung OFF sein), den KONSTANTSTROMMODUS konfigurieren und den Strom auf 50 mA einstellen.
- 8) Den SIGNALGENERATOR einschalten (die Taste „AUSGANG EIN“ muss in der Stellung OFF sein), den GLEICHSPANNUNGSMODUS konfigurieren, dann die Ausgangskopplung auf 1 M Ω und die Spannung auf 775 mV einstellen.
- 9) Die Taste „AUSGANG EIN“ des NETZGERÄTS in die Stellung ON bringen. Nun sollten auf dem EINGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER ca. 1.4 V, auf dem AUSGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER etwa 0.8 V, auf dem AUSGANGSSTROM-MULTIMETER ca. 0 A und auf dem EINGANGSSTROM-MULTIMETER 0 A angezeigt werden (wenn die angezeigten Werte von diesen Angaben abweichen, die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen und die vorherigen Schritte überprüfen).
- 10) Die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST in die Stellung ON bringen. Nun sollten auf dem EINGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER ca. 1.4 V, auf dem AUSGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER etwa 0.8 V, auf dem AUSGANGSSTROM-MULTIMETER 50 mA und auf dem EINGANGSSTROM-MULTIMETER ein wenig mehr als 50 mA angezeigt werden (wenn die angezeigten Werte sehr von diesen Angaben abweichen, die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen und die vorherigen Schritte überprüfen).
- 11) Die Eingangs- und Ausgangsspannung bei den in Tabelle 1 angegebenen Laststromwerten messen (die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST muss beim Ändern des Laststroms nicht in die Stellung OFF gebracht werden).
- 12) Den Laststrom wieder auf 50 mA einstellen, die Taste „AUSGANG EIN“ des SIGNALGENERATORS in die Stellung ON bringen und Schritt 11) wiederholen.
- 13) Die Taste „AUSGANG EIN“ des SIGNALGENERATORS in die Stellung OFF bringen, den Laststrom wieder auf 50 mA einstellen, die Spannung des NETZGERÄTS auf 2.5 V einstellen und die Schritte 11) und 12) wiederholen.
- 14) Nach den Messungen die Taste „AUSGANG EIN“ des SIGNALGENERATORS, die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST und die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen und anschließend alle Geräte ausschalten.



Prüfung 1: Messungen und Berechnungen

- 1) Die Ausgangsspannung unter den in Tabelle 1 angegebenen Betriebsbedingungen messen und die Differenz zwischen der Eingangs- und der Ausgangsspannung berechnen.
- 2) Den entsprechenden MOSFET-Kanalwiderstand $R_{ds,on} = (V_{in} - V_{out}) / I_{ds}$ mit am Testpin TP_{14} anliegender Spannung von 0.775 V messen.
- 3) Die Fragen beantworten und versuchen, die Ergebnisse der Beobachtungen anhand der Informationen im Abschnitt *Theoretischer Hintergrund* und in den relevanten Referenzen zu erläutern.

Tabelle 1: Ausgangsspannung und Dropout-Spannung des LDO-Reglers TPS7A8300 bei verschiedenen Laststrom- und Eingangsspannungswerten mit nicht verbundenem Testpin TP_{14} bzw. angelegten 0.775 V

(1) V_{out} [V]	(2) $V_{drop} = V_{in} - V_{out}$ [mV]	I_{out} [mA]					
		50		250		500	
$V_{in} = 1.4$ V	TP_{14} nicht verbunden	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
	$TP_{14} = 0.775$ V	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
	(3) $R_{ds,on}$ bei $TP_{14} = 0.775$ V	(3)		(3)		(3)	
$V_{in} = 2.5$ V	TP_{14} nicht verbunden	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
	$TP_{14} = 0.775$ V	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
	(3) $R_{ds,on}$ bei $TP_{14} = 0.775$ V	(3)		(3)		(3)	

Ausgangskondensatoren, -widerstände, -induktoren:

J_{16} verbindet die Ausgangskondensatoren C_{11} - C_{13} ($3 \times 10 \mu\text{F}$)

J_{14} verbindet Ausgangswiderstand R_7 (1 m Ω)
 J_{15} verbindet Ausgangswiderstand R_8 (100m Ω)

J_{19} verbindet Ausgangsinduktor L_1 (1 nH)
 J_{20} verbindet Ausgangsinduktor L_2 (100 nH)

J_{22} verbindet Ausgangskondensator C_{16} (10 μF)
 J_{23} verbindet Ausgangskondensator C_{17} (47 μF)

Antworten:

1) Ist die Dropout-Spannung V_{drop} bei $TP_{15} = 0.775$ V niedriger als bei nicht verbundenem TP_{14} ? Ja Nein Hängt von Folgendem ab: _____

2) Wie beeinflussen die Eingangsspannung und der Laststrom die Dropout-Spannung und den Kanalwiderstand, wenn an TP_{14} 0.775 V anliegen? _____



Prüfung 2: Vorbereitung und Verfahren

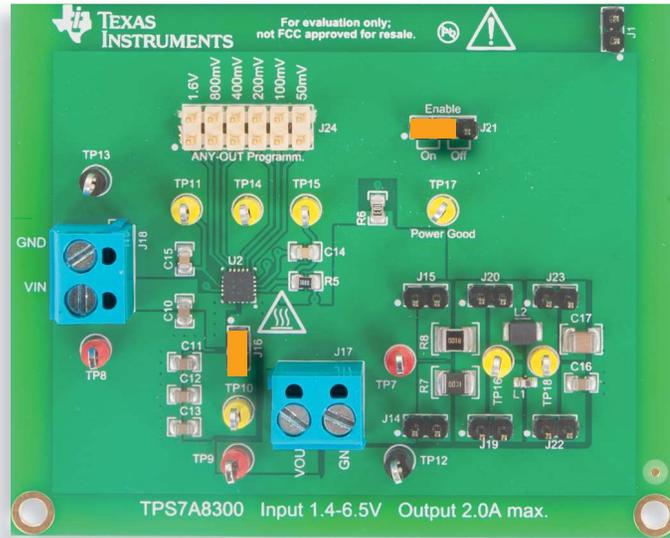


Abbildung 7: TPS7A8300-LDO-Platine: Jumperkonfiguration für Prüfung 2

Jumperkonfiguration (siehe Abbildung 7):

- **J₂₁** gebrückt in Stellung ON → LDO-Betrieb aktiviert
- **J₂₄** offen → Nennausgangsspannung $V_{out} = 0.8\text{ V}$
- **J₁₆** gebrückt → Ausgangskondensatoren C_{11} – C_{13} (3 x 10 μF) verbunden
- **J₁₄** UND **J₁₅** offen → Ausgangswiderstände R_7 (1 m Ω) und R_8 (100 m Ω) getrennt
- **J₁₉** UND **J₂₀** offen → Ausgangsinduktoren L_1 (1 nH) und L_2 (100 nH) getrennt
- **J₂₂** UND **J₂₃** offen → Ausgangskondensatoren C_{16} (10 μF) und C_{17} (47 μF) getrennt

Prüfverfahren:

- 1) Die MULTIMETER einschalten.
- 2) Das EINGANGSSTROM-MULTIMETER auf GLEICHSTROMMODUS mit einem Bereich von $\leq 1\text{ A}$ einstellen.

- 3) Das AUSGANGSSTROM-MULTIMETER auf GLEICHSTROMMODUS mit einem Bereich von $\leq 1\text{ A}$ einstellen.
- 4) Das EINGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER auf GLEICHSPANNUNGSMODUS mit einem Bereich von $\leq 10\text{ V}$ einstellen.
- 5) Das AUSGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER auf GLEICHSPANNUNGSMODUS mit einem Bereich von $\leq 1\text{ V}$ einstellen.
- 6) Das NETZGERÄT einschalten (die Taste „AUSGANG EIN“ muss in der Stellung OFF sein), dann die Spannung auf 1.4 V und die Strombegrenzung auf 1 A einstellen.
- 7) Die ELEKTRONISCHE LAST einschalten (die Taste „LAST EIN“ muss in der Stellung OFF sein), den KONSTANTSTROMMODUS konfigurieren und den Strom auf 50 mA einstellen.
- 8) Die Taste „AUSGANG EIN“ des NETZGERÄTS in die Stellung ON bringen. Nun sollten auf dem EINGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER ca. 1.4 V, auf dem AUSGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER etwa 0.8 V, auf dem AUSGANGSSTROM-MULTIMETER ca. 0 A und auf dem EINGANGSSTROM-MULTIMETER 0 A angezeigt werden (wenn die angezeigten Werte von diesen Angaben abweichen, die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen und die vorherigen Schritte überprüfen).
- 9) Die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST in die Stellung ON bringen. Nun sollten auf dem EINGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER ca. 1.4 V, auf dem AUSGANGSSPANNUNGS-MULTIMETER etwa 0.8 V, auf dem AUSGANGSSTROM-MULTIMETER 50 mA und auf dem EINGANGSSTROM-MULTIMETER ein wenig mehr als 50 mA angezeigt werden (wenn die angezeigten Werte sehr von diesen Angaben abweichen, die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen und die vorherigen Schritte überprüfen).
- 10) Den Eingangs- und Ausgangsstrom bei den in Tabelle 2 angegebenen Eingangsspannungs- und Laststromwerten messen (die Taste „AUSGANG EIN“ des NETZGERÄTS und die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST müssen während der Änderung von Eingangsspannung und Laststrom nicht in die Stellung OFF gebracht werden).
- 11) Nach den Messungen die Taste „AUSGANG EIN“ des SIGNALGENERATORS, die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST und die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen und anschließend alle Geräte ausschalten.



Prüfung 2: Messungen und Berechnungen

- 1) Unter den in Tabelle 2 angegebenen Betriebsbedingungen den Eingangsstrom I_{in} und den Ausgangsstrom I_{out} messen und den Massestrom I_{GND} berechnen.
- 2) Die Fragen beantworten und versuchen, die Ergebnisse der Beobachtungen anhand der Informationen im Abschnitt *Theoretischer Hintergrund* und in den relevanten Referenzen zu erläutern.

Tabelle 2: Eingangs- und Massestrom des LDO-Reglers TPS7A8300 LDO bei verschiedenen Laststrom- und Eingangsspannungswerten

(1) I_{in} [mA]	V_{in} [V]					
(2) $I_{GND} = I_{in} - I_{out}$ [mA]	1.4	1.8	2.2	2.6	3.0	3.2
$I_{out} = 50$ mA	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)
$I_{out} = 250$ mA	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)
$I_{out} = 500$ mA	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)

Ausgangskondensatoren, -widerstände, -induktoren:

J_{16} verbindet die Ausgangskondensatoren C_{11} - C_{13} ($3 \times 10 \mu\text{F}$)

J_{14} verbindet Ausgangswiderstand R_7 ($1 \text{ m}\Omega$)
 J_{15} verbindet Ausgangswiderstand R_8 ($100 \text{ m}\Omega$)

J_{19} verbindet Ausgangsinduktor L_1 (1 nH)
 J_{20} verbindet Ausgangsinduktor L_2 (100 nH)

J_{22} verbindet Ausgangskondensator C_{16} ($10 \mu\text{F}$)
 J_{23} verbindet Ausgangskondensator C_{17} ($47 \mu\text{F}$)

Antworten:

1) Wie ändert sich der Strom I_{GND} bei steigender Eingangsspannung? Nimmt zu Nimmt ab Andere: _____

2) Wie ändert sich der Strom I_{GND} bei steigendem Laststrom? Nimmt zu Nimmt ab Andere: _____



Erörterung

In Prüfung 1 haben wir die Dropout-Spannung des LDO-Reglers untersucht, den Betrieb des als Pass-Baustein verwendeten N-Kanal-MOSFET im ohmschen Bereich (Dropout) beobachtet und den Kanalwiderstand des MOSFET berechnet.

Bei nicht verbundenem FB-Pin verschiebt der LDO-Regler TPS7A8300 den Arbeitspunkt des als Pass-Baustein verwendeten MOSFET in den Sättigungsbereich (z. B. Punkt P_1 in Abbildung 3) oder den ohmschen Bereich (z. B. Punkt P_4 in Abbildung 4), um die Ausgangsspannung zu regeln. Die Regelung wird möglich, wenn die Differenz zwischen der Eingangsspannung und der Ausgangsspannung größer als die Dropout-Spannung des als Pass-Baustein verwendeten MOSFET ist. In *Experiment 1* haben wir die Dropout-Spannung des TPS7A4901 gemessen, indem die Eingangsspannung verringert wurde, bis die Ausgangsspannung nicht mehr geregelt wird. In diesem Experiment verwenden wir stattdessen feste Eingangsspannungswerte und erzwingen am FB-Pin eine Spannung, die niedriger als die Referenzspannung ist. Auf diese Weise simulieren wir, dass die Ausgangsspannung niedriger als der Sollwert ist. Als Folge erhöht die Rückkopplungsregelung die Gate-Source-Spannung des MOSFET bis zum zulässigen Höchstwert $V_{gs,max}$ des internen MOSFET-Treibers und versucht, die Drain-Source-Spannung zu verringern, um die Regelung der Ausgangsspannung aufrechtzuerhalten. In *Experiment 1* war ein Abfall der Ausgangsspannung zu beobachten, sobald die Eingangsspannung den durch die Dropout-Spannung des Pass-Bausteins festgelegten Mindestwert unterschritten hat. Dagegen ist in diesem Experiment ein Anstieg der Ausgangsspannung aufgrund des Rückgangs der Spannung des Pass-Bausteins auf ihren Dropout-Wert festzustellen, der durch die mit dem FB-Pin verbundene externe Spannungsquelle verursacht wird. Die mit dieser Technik gemessene Dropout-Spannung hängt von der Art der Last ab. Wenn eine Spannung an den FB-Pin angelegt ist, kann die Verschiebung des MOSFET-Arbeitspunktes auf Punkt P_2 oder Punkt P_3 in Abbildung 3 erzwungen werden, je nachdem, ob die Last ein Widerstand oder eine Konstantstromlast (wie die für die Prüfung verwendete elektronische Last) ist. Der Arbeitspunkt P_2 führt zu einer höheren Dropout-Spannung, was einem höheren Laststrom entspricht. Der an den zwei Punkten P_2 und P_3 gemessene MOSFET-Kanalwiderstand ist nahezu identisch, da diese auf derselben I_{ds}/V_{ds} -Kurve liegen, die der maximalen Gate-Source-Spannung $V_{gs,max}$ des MOSFET-Treibers entspricht. Die Ausgangsspannung wird nicht geregelt, wenn der Arbeitspunkt des Pass-Bausteins auf P_2 oder P_3 eingestellt ist: In beiden Fällen ist die Ausgangsspannung V_{out} die Differenz zwischen der Eingangsspannung und der Dropout-Spannung, $V_{out} = V_{in} - V_{dropout}$. Wenn der Laststrom bei gegebener Eingangsspannung steigt, werden die Arbeitspunkte P_2 und P_3 nach rechts oben verschoben, was zu einer höheren Dropout-Spannung führt. Wenn die Eingangsspannung bei gegebenem Laststrom steigt, wird der Arbeitspunkt P_2 nach rechts oben verschoben, was zu einer höheren Dropout-Spannung führt, während Punkt P_3 in der Theorie unempfindlich ist und die gleiche Dropout-Spannung liefert. Der Kanalwiderstand $R_{ds,on} = 1 / [\beta (V_{gs} - V_{th})]$, der gemessen wird, indem der Betrieb des MOSFET auf der I_{ds}/V_{ds} -Kurve erzwungen wird, die der maximalen Gate-Source-Spannung $V_{gs,max}$ des MOSFET-Treibers entspricht, kann bei höherem Strom zunehmen. Tatsächlich führt ein Anstieg des Stroms zu größeren ohmschen Verlusten und nachfolgend zu einer höheren Sperrschichttemperatur, wodurch die von der Temperatur abhängigen Parameter β und V_{th} geringer werden. Es ist zu erwarten, dass der Kanalwiderstand bei einer höheren Eingangsspannung größer wird und zu einer Zunahme der Dropout-Spannung führt.

In Prüfung 2 haben wir den Zusammenhang zwischen dem Massestrom des LDO-Reglers und den Laststrom- und Eingangsspannungswerten untersucht.

Der Massestrom I_{gnd} , der auch als Ruhestrom bezeichnet wird, ist die Differenz zwischen dem Ein- und Ausgangsstrom des LDO-Reglers und besteht aus mehreren Komponenten, die von der Bandabstandsreferenz, den Messwiderständen, dem Fehlerverstärker sowie dem Treiberstrom des Pass-Bausteins abhängig sind und nicht zur Ausgangsleistung beitragen. Ein geringerer Massestrom verbessert den Wirkungsgrad des Reglers, wie in *Experiment 2* gezeigt. Der Massestrom wird in hohem Maß durch den Typ des Pass-Transistors und dessen Sperrschichttemperatur beeinflusst. In *Experiment 2* wird gezeigt, dass der Massestrom I_{gnd} des LDO-Reglers TPS7A4901 stark vom Laststrom abhängt. Dies wird durch den PNP-Bipolartransistor verursacht, bei dem es sich um einen stromgesteuerten Baustein handelt, dessen Basisstrom vollständig proportional zum Kollektorstrom ist und permanent nach Masse abgeleitet wird. Der als Pass-Baustein verwendete N-Kanal-MOSFET des LDO-Reglers TPS7A8300 ist hingegen ein spannungsgesteuerter Baustein (er könnte auch als ladungsgesteuert eingestuft werden), bei dem ein größerer Laststrom zu einer höheren Gate-Source-Spannung V_{gs} führt. Im stationären Zustand beträgt der Gate-Strom des MOSFET nahezu null. Der zu beobachtende leichte Anstieg des Massestroms bei höherem Laststrom wird hauptsächlich durch den Fehlerverstärker verursacht, der für die höhere Gate-Source-Spannung sorgt, die der MOSFET benötigt, damit ein größerer Strom fließen kann (siehe Abbildung 3). Der Massestrom des LDO-Reglers TPS7A8300 ist dafür unterschiedlich empfindlich gegenüber der Eingangsspannung, wie Abbildung 3 zeigt. Insbesondere ist die Empfindlichkeit höher, wenn die Eingangsspannung nahe an dem durch die Dropout-Spannung des MOSFET festgelegten Mindestwert liegt, da dann der MOSFET wahrscheinlich im ohmschen Bereich arbeitet, in dem die zum Bereitstellen eines bestimmten Laststroms benötigte Gate-Source-Spannung V_{gs} stark mit der Drain-Source-Spannung V_{ds} variiert. Wenn die Eingangsspannung hoch genug ist, damit der MOSFET im Sättigungsbereich arbeitet, ist der Massestrom nahezu unempfindlich gegenüber der Eingangsspannung, da die I_{ds}/V_{ds} -Kurve im Sättigungsbereich fast flach verläuft.



Experimentelle Oszilloskopkurven

Die Abbildungen auf diesen Seiten enthalten einige Beispiele für experimentelle Messungen, die mit dem LDO-Regler TPS7A8300 durchgeführt wurden. Sie zeigen die Dropout-Spannung und den Massestrom des LDO-Reglers bei verschiedenen Eingangsspannungen, Lastströmen und Sperrschichttemperaturen (*weitere Details sind in [3] zu finden*).

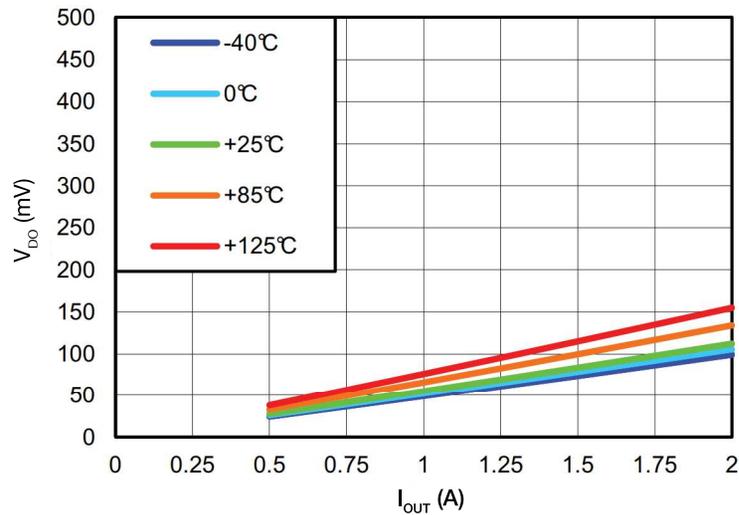


Abbildung 8: Dropout-Spannung vs. Ausgangsstrom des LDO-Reglers TPS7A8300 bei: $V_{out} = 0.8$ V und $V_{in} = 1.4$ V

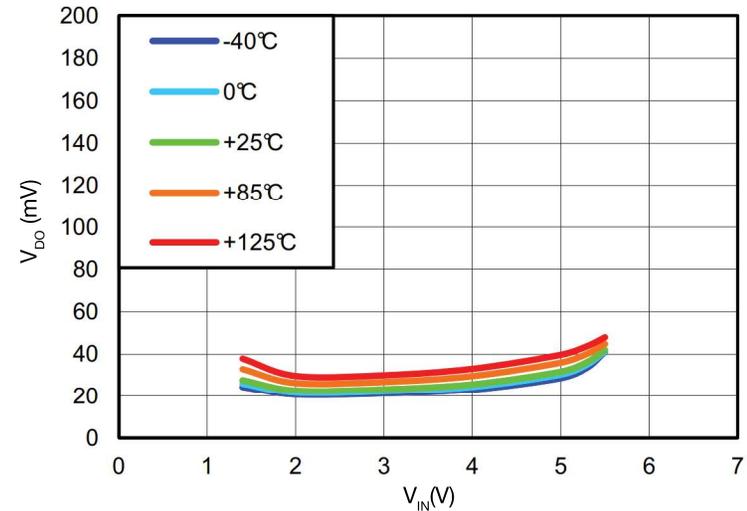


Abbildung 9: Dropout- vs. Eingangsspannung des LDO-Reglers TPS7A8300 bei: $V_{out} = 0.8$ V und $I_{out} = 0.5$ A

Die Kurven in den Abbildungen 8 und 9 zeigen den im vorhergehenden Abschnitt erläuterten Einfluss des Laststroms und der Eingangsspannung auf die Dropout-Spannung des LDO-Reglers TPS7A8300.



Experimentelle Oszilloskopkurven

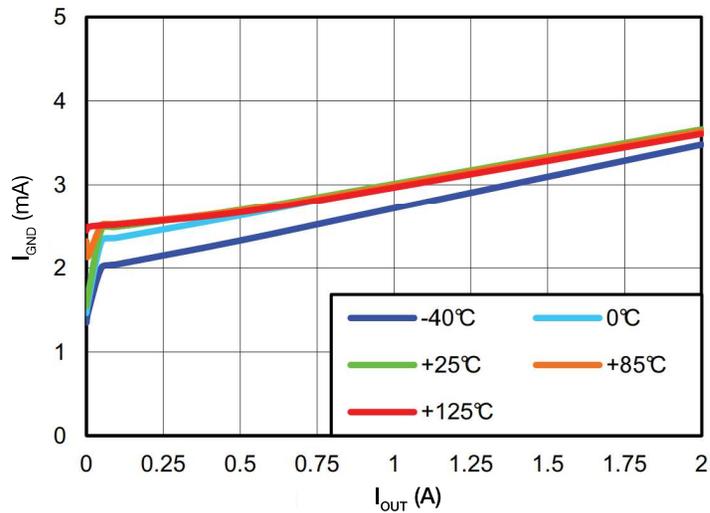


Abbildung 10: Massestrom vs. Ausgangsstrom des LDO-Reglers TPS7A8300
bei: $V_{\text{out}} = 0.8 \text{ V}$ und $V_{\text{in}} = 1.4 \text{ V}$

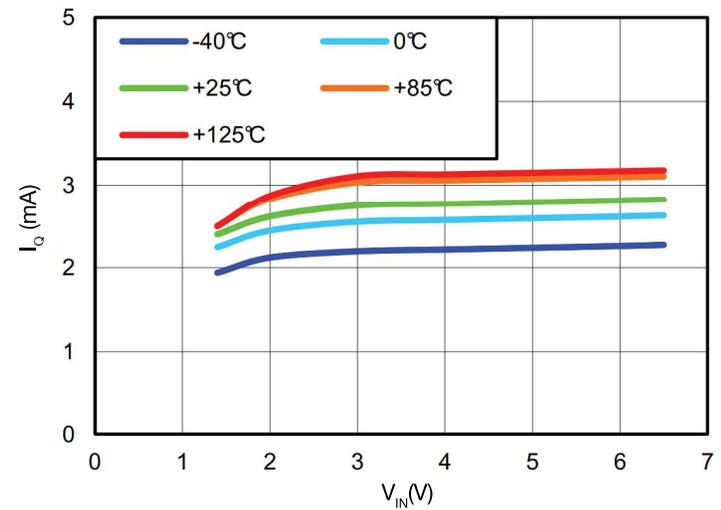


Abbildung 11: Ruhestrom vs. Eingangsspannung des LDO-Reglers TPS7A8300
bei: $V_{\text{out}} = 0.8 \text{ V}$ und $I_{\text{out}} = 5 \text{ mA}$

Die Kurven in den Abbildungen 10 und 11 zeigen den im vorhergehenden Abschnitt erläuterten Einfluss des Laststroms und der Eingangsspannung auf den Massestrom des LDO-Reglers TPS7A8300.

Experiment 6

In diesem Experiment wird untersucht, wie sich die Eigenschaften des Ausgangskondensators auf die Wellenform der Ausgangsspannung bei Lasttransienten auswirken. Dazu wird der LDO-Regler TPS7A8300 verwendet.



Fallstudie

In diesem Experiment wird untersucht, wie sich die Eigenschaften des Ausgangskondensators auf die Größe der Ausgangsspannungsspitzen bei Lasttransienten auswirken.

Untersuchungsgegenstand dieses Experiments sind die Auswirkungen der Eigenschaften des Ausgangskondensators auf die Wellenform der Ausgangsspannung des LDO-Reglers bei Lasttransienten. Abbildung 1 zeigt einen vereinfachten Schaltplan des LDO-Reglers TPS7A8300. Die Kapazität C_{out} , der ESR-Widerstand und die ESL-Induktivität des Ausgangskondensators beeinflussen das Einschwingverhalten des Reglers unter Last, da sich diese Parameter wie in *Experiment 3* beschrieben auf die Spannungsschleifenverstärkung der LDO-Regelung auswirken. Ein gutes Einschwingverhalten unter Last ist durch eine geringe Größe der Überspannungen, eine kurze Einschwingzeit und das Fehlen von Schwingungen gekennzeichnet. Die globale RLC-Ausgangskombination wird durch die RLC-Parameter des Ausgangskondensators selbst sowie durch die parasitären Induktivitäten und Widerstände der Leiterbahnen auf der Platine festgelegt. Die im Ausgangsabschnitt der TPS7A8300-LDO-Reglerplatine montierten Bauteile R_7 , R_8 , L_1 , L_2 , C_{16} und C_{17} ermöglichen die Emulation eines äquivalenten Ausgangskondensators mit verschiedenen Kombinationen von Kapazität C_{out} , Widerstand ESR und Induktivität ESL.

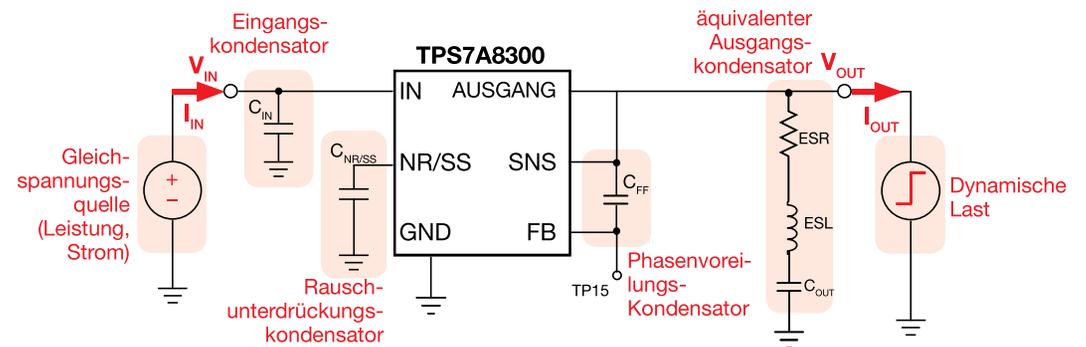


Abbildung 1: Vereinfachter Schaltplan des LDO-Reglers TPS7A8300

Prüfung 1: Wir verbinden den Ausgang des LDO-Reglers mit einer im dynamischen Modus arbeitenden elektronischen Last, deren Laststrom aus einem Gleichstromanteil von 250 mA und einem rechteckförmigen Spitze-Spitze-Wechselstrom von 750 mA bei einer Frequenz von 100 Hz besteht. Wir messen anschließend folgende Werte:

- Größe des Über- und Unterschwingens $\Delta V_{out,over}$ und $\Delta V_{out,under}$ der Ausgangsspannung
- Zeitspanne $t_{pk,over}$ vom Beginn der Laststromverringering bis zu dem Zeitpunkt, an dem die Ausgangsspannung ein Überschwingen aufweist
- Zeitspanne $t_{pk,under}$ vom Beginn der Laststromerhöhung bis zu dem Zeitpunkt, an dem die Ausgangsspannung ein Unterschwingen aufweist
- Einschwingzeiten $t_{set,over}$ und $t_{set,under}$ nach denen die Ausgangsspannung auf $\pm 10\%$ der geregelten Sollausgangsspannung eingeschwingen ist

Prüfung 2: Wir verwenden die zusätzlichen Bauteile im Ausgangsabschnitt der TPS7A8300-LDO-Reglerplatine, um verschiedene Kombinationen von RLC-Eigenschaften zu simulieren. Danach messen wir die Überspannungen der Ausgangsspannung, um die Auswirkungen von ESL, ESR und C_{out} in Verbindung mit verschiedenen Anstiegsgeschwindigkeiten des dynamischen Laststroms festzustellen.



Theoretischer Hintergrund

Dieser Abschnitt enthält grundlegende Informationen zum Einfluss des Ausgangskondensators auf das Einschwingverhalten unter Last. (In [1], [4], [11] und [12] sind allgemeine Informationen zum Betrieb und zu den Eigenschaften von LDO-Reglern zu finden. In [3] sind weitere Details zum Betrieb und zu den Leistungsmerkmalen des TPS7A8300 und in [Experiment 3](#) Informationen zu den Auswirkungen der Schleifenverstärkung auf das Einschwingverhalten von LDO-Reglern unter Last zu finden.)

Abbildung 2 zeigt das Modell eines Kondensators einschließlich der Kapazität C_{out} , des äquivalenten Reihenwiderstands (ESR) und der äquivalenten Reiheninduktivität (ESL).

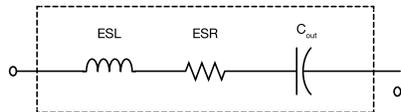


Abbildung 2

Die Werte von ESL und ESR hängen vom Kondensatortyp ab. Bei einer bestimmten Kapazität C_{out} sind ESR und ESL von Keramik Kondensatoren sehr klein, während diese Werte bei Elektrolytkondensatoren viel größer sind. Abbildung 3 zeigt eine ideale qualitative Darstellung des Lasteinschwingverhaltens des LDO-Reglers einschließlich des Einflusses der Parameter C_{out} , ESR und ESL.

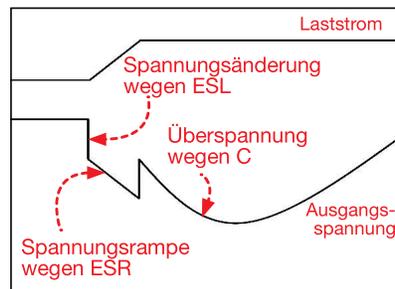


Abbildung 3

Der Effekt der Kapazität C_{out} ist in Abbildung 4 dargestellt. Ein LDO-Regler kann den Strom des Pass-Bausteins nicht sofort an schnelle Lasttransienten anpassen. Die Zeitspanne, die das Ansprechen des LDO-Reglers in Anspruch nimmt, wird durch die Konfiguration von dessen Rückkopplungsschleife festgelegt. Während dieser Zeit liefert der Ausgangskondensator die Stromdifferenz zwischen dem Strom des Pass-Bausteins und dem Laststrom. Wenn die Kapazität C_{out} eines Ausgangskondensators mit niedrigem ESR- und ESL-Wert erhöht wird, verlängert sich die Ansprechzeit des LDO-Reglers und verkleinert sich die Größe der Spannungsspitzen, da eine höhere Kapazität die Bandbreite der Schleifenverstärkung verringert, aber gleichzeitig aufgrund der an die Last abgegebenen Ladung zu einer kleineren Spannungsänderung führt.

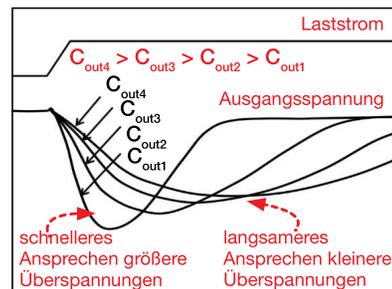


Abbildung 4

Der Effekt der ESL ist in Abbildung 5 dargestellt. Während der steigenden Flanke des Laststroms verursacht die ESL eine Spannungsspitze der Größe $V_{ESL} = ESL \Delta I_{OUT} / \Delta t$, die mit dem ESL-Wert und der Anstiegsgeschwindigkeit des Laststroms $\Delta I_{OUT} / \Delta t$ größer wird. Die parasitären Induktivitäten der Leiterbahnen tragen auch zur ESL bei. Ein höherer V_{ESL} -Wert führt zu einem stärkeren Ansprechen des Fehlerverstärkers und dadurch zu einem schnelleren Einschwingen des LDO-Reglers. Allerdings verursacht ein zu hoher V_{ESL} -Wert unerwünschtes Rauschen. Um die Auswirkungen der ESL-Gesamtkapazität bei Lasttransienten in einem akzeptablen Rahmen zu halten, muss ein gutes Platinenlayout verwendet und der Ausgangskondensator möglichst nahe am Ausgangspin des LDO-Reglers platziert werden.

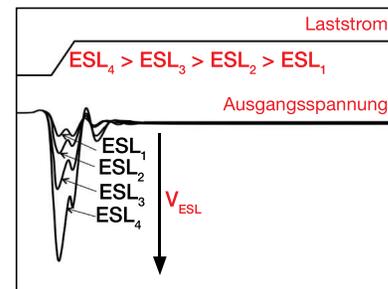


Abbildung 5

Der Effekt des ESR ist in Abbildung 6 zu sehen. Während der steigenden Flanke des Laststroms verursacht der ESR eine Spannungsrampe der Größe $V_{ESR} = ESR \Delta I_{OUT}$, die mit der Größe der Laststromänderung ΔI_{OUT} und dem ESR-Wert größer wird. Ein höherer V_{ESR} -Wert führt zu einem stärkeren Ansprechen des Fehlerverstärkers und dadurch zu einem schnelleren Einschwingen des LDO-Reglers. Allerdings kann ein zu hoher V_{ESR} -Wert zu unerwünschtem Rauschen und ein zu großer ESR zu Instabilität führen, da der ESR auch eine Nullstelle in die Schleifenverstärkung einbringt. Hinsichtlich des ESR-Wertes muss ein Kompromiss zwischen Stabilität und schnellem Einschwingverhalten eingegangen werden.

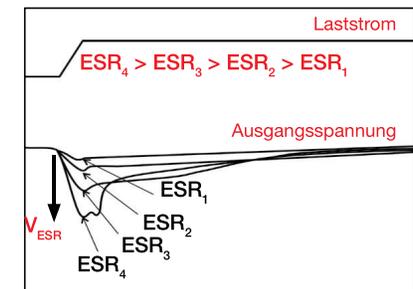


Abbildung 6



Versuchsaufbau: Konfiguration

Für dieses Experiment werden folgende Geräte benötigt: ein GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄT, eine ELEKTRONISCHE GLEICHSPANNUNGSLAST mit dynamischem Strommodus und ein OSZILLOSKOP. Wie die Geräte verbunden werden, wird in Abbildung 7 gezeigt. Gehen Sie wie auf der nächsten Seite beschrieben vor, um die **Verbindungen herzustellen**.

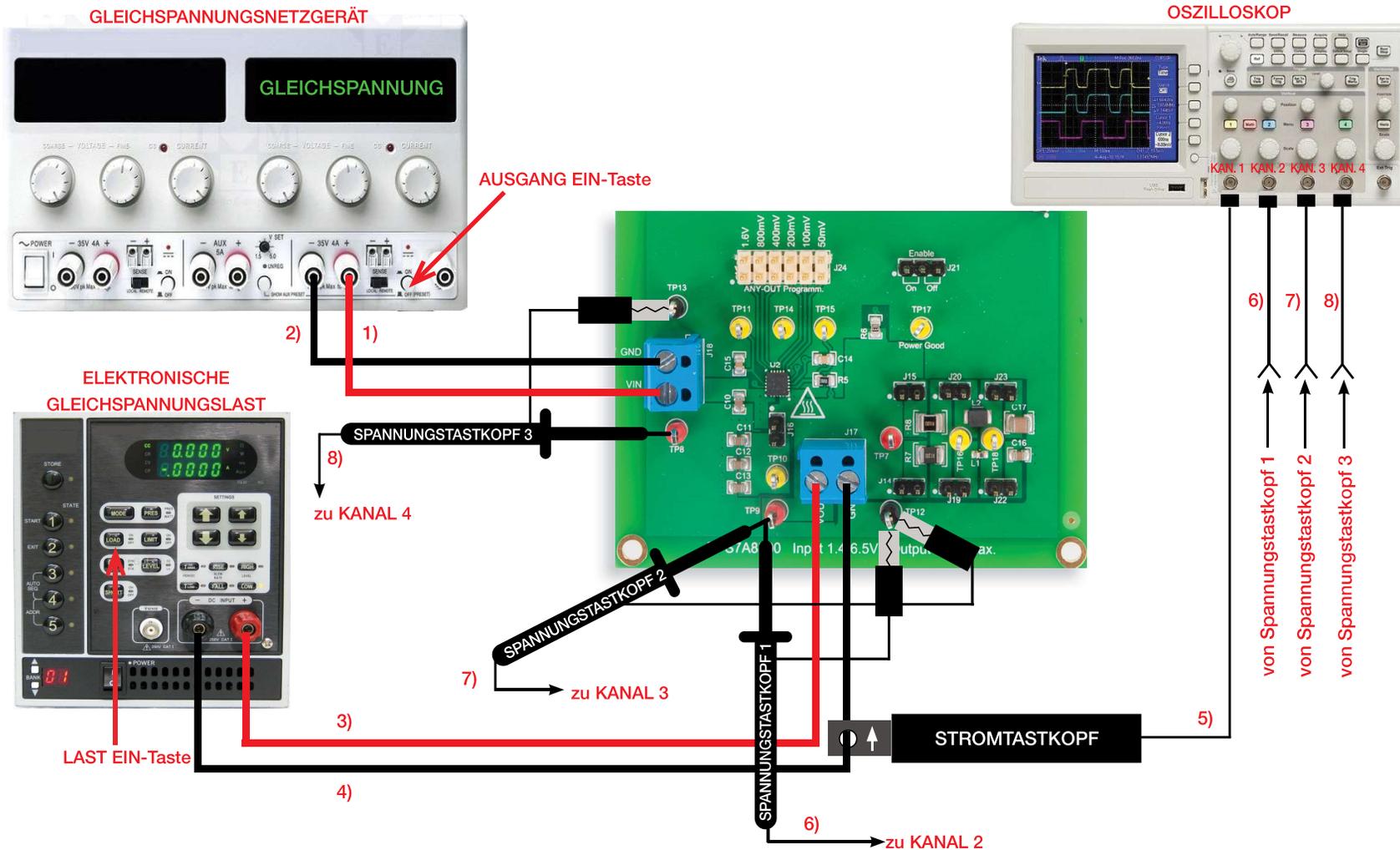


Abbildung 7: Versuchsaufbau



Versuchsaufbau: Anleitung

Vergewissern Sie sich, dass alle Geräte ausgeschaltet sind, und stellen Sie die folgenden **Verbindungen** her:

- 1) Verbinden Sie den PLUS-AUSGANG (ROT) des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS mit dem EINGANG (VIN) der Schraubklemme **J₁₈** auf der TPS7A8300-LDO-Reglerplatine.
- 2) Verbinden Sie den MINUS-AUSGANG (SCHWARZ) des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS mit der MASSE (GND) der Schraubklemme **J₁₈** auf der TPS7A8300-LDO-Reglerplatine.
- 3) Verbinden Sie den AUSGANG (VOUT) der Schraubklemme **J₁₇** auf der TPS7A8300-LDO-Reglerplatine mit dem PLUS-EINGANG (ROT) der ELEKTRONISCHEN LAST.
- 4) Verbinden Sie die MASSE (GND) der Schraubklemme **J₁₇** auf der TPS7A8300-LDO-Reglerplatine mit dem MINUS-EINGANG (SCHWARZ) der ELEKTRONISCHEN LAST.
- 5) Schließen Sie einen Stromtastkopf an Kanal 1 des OSZILLOSKOPS an, und hängen Sie ihn an das Kabel, das die MASSE (GND) der Schraubklemme **J₁₇** auf der TPS7A8300-LDO-Reglerplatine mit dem MINUS-EINGANG (SCHWARZ) der ELEKTRONISCHEN LAST verbindet (achten Sie darauf, dass der Pfeil auf den Tastkopfklemmen in Richtung des Stromflusses zur ELEKTRONISCHEN LAST zeigt).
- 6) Schließen Sie einen Spannungstastkopf an Kanal 2 des OSZILLOSKOPS an, und hängen Sie ihn an den TESTPIN **TP₉** (Ausgangsspannung) auf der TPS7A8300-LDO-Reglerplatine.
[**WARNUNG: AUF KEINEN FALL** den Plus- und den Masseanschluss des Spannungstastkopfes vertauschen.]
- 7) Schließen Sie einen Spannungstastkopf an Kanal 3 des OSZILLOSKOPS an, und hängen Sie ihn an den TESTPIN **TP₉** (Ausgangsspannung) auf der TPS7A8300-LDO-Reglerplatine.
[**WARNUNG: AUF KEINEN FALL** den Plus- und den Masseanschluss des Spannungstastkopfes vertauschen.]
- 8) Schließen Sie einen Spannungstastkopf an Kanal 4 des OSZILLOSKOPS an, und hängen Sie ihn an den TESTPIN **TP₈** (Eingangsspannung) auf der TPS7A8300-LDO-Reglerplatine.
[**WARNUNG: AUF KEINEN FALL** den Plus- und den Masseanschluss des Spannungstastkopfes vertauschen.]



Prüfung 1: Vorbereitung und Verfahren

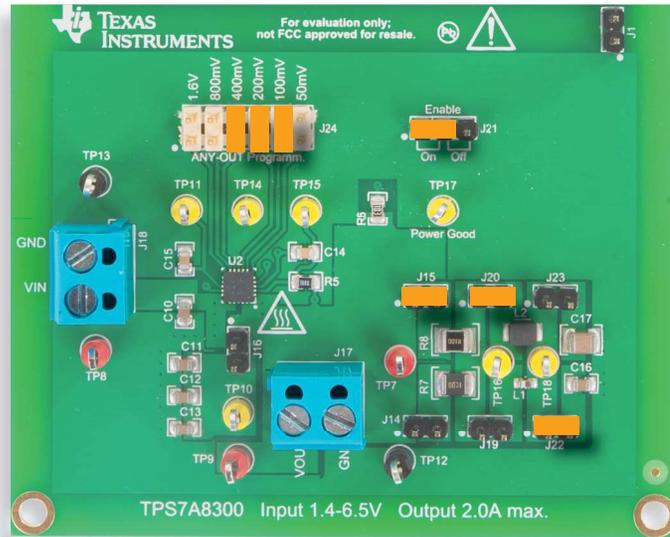


Abbildung 8: TPS7A8300-LDO-Platine: Jumperkonfiguration für Prüfung 1

Jumperkonfiguration (siehe Abbildung 8):

- **J₂₁** gebrückt in Stellung ON → LDO-Betrieb aktiviert
- **J₂₄** gebrückt (Pins mit den Beschriftungen „100mV“, „200mV“ und „400mV“) → Nennausgangsspannung $V_{out} = 1.5\text{ V}$
- **J₁₅** gebrückt → Ausgangswiderstand R_8 (100 mΩ) verbunden
- **J₂₀** gebrückt → Ausgangsinduktor L_2 (100 nH) verbunden
- **J₂₂** gebrückt → Ausgangskondensator C_{16} (10 μF) verbunden
- **J₁₆** offen → Ausgangskondensatoren C_{11} – C_{13} ($3 \times 10\text{ μF}$) getrennt
- **J₁₄** offen → Ausgangswiderstand R_7 (1 mΩ) getrennt
- **J₁₉** offen → Ausgangsinduktor L_1 (1 nH) getrennt
- **J₂₃** offen → Ausgangskondensator C_{17} (47 μF) getrennt

Prüfverfahren:

- 1) Das OSZILLOSKOP einschalten, KANAL 1 auf DC 50 Ω-Kopplungsmodus einstellen, KANAL 1 als Trigger-Quelle auswählen, KANAL 2 auf DC 1 MΩ-Kopplungsmodus einstellen, KANAL 3 auf AC

- 1 MΩ-Kopplungsmodus einstellen, KANAL 4 auf DC 1 MΩ-Kopplungsmodus einstellen und den Stromstastkopf entmagnetisieren, um eine mögliche DC-Biasspannung zu beseitigen.
- 2) Das NETZGERÄT einschalten (die Taste „AUSGANG EIN“ muss in der Stellung OFF sein), dann die Spannung auf 2.5 V und die STROMBEGRENZUNG auf 1.5 A einstellen.
- 3) Die ELEKTRONISCHE LAST einschalten (die Taste „LAST EIN“ muss in der Stellung OFF sein), den dynamischen Strommodus einstellen und Folgendes festlegen:
 - niedriger Strompegel: 100 mA für 10 ms
 - hoher Strompegel: 1 A für 10 ms
 - Flankensteilheit des Stromanstiegs und -abfalls: höchster vom Gerät unterstützter Wert
- 4) Die Taste „AUSGANG EIN“ des NETZGERÄTS in die Stellung ON bringen. Es sollten nun auf dem OSZILLOSKOP die Kurven von KANAL 1 (Laststrom) und KANAL 3 (AC-Anteil der Ausgangsspannung) als flache horizontale Linien bei 0, die Kurve von KANAL 2 (vollständige Ausgangsspannung) als flache Linie bei 1.5 V und die Kurve von KANAL 4 (Eingangsspannung) als flache Linie bei 2.5 V angezeigt werden.
- 5) Mit den Cursor- oder Messfunktionen des OSZILLOSKOPS die durchschnittliche Eingangs- und Ausgangsspannung messen. Wenn die abgelesenen Werte sehr von den erwarteten Werten abweichen, die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen und die vorherigen Schritte überprüfen.
- 6) Die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST in die Stellung ON bringen. Es sollten nun die Kurve von KANAL 1 als Rechteckschwingung, die Kurve von KANAL 2 als flache Linie mit 1.5 V Durchschnittswert, die Kurve von KANAL 3 als flache Linie mit 0 V Durchschnittswert und kleinen kurzzeitigen Spannungsspitzen bei den Laststromtransienten und die Kurve von KANAL 4 als flache Linie bei 2.5 V angezeigt werden (siehe experimentelle Beispielkurven am Ende dieses Experiments). Das OSZILLOSKOP so einstellen, dass die Wellenformen möglichst groß dargestellt werden. Den Triggerpegel auf 50 % der Kurve von KANAL 1 einstellen.
- 7) Mithilfe der Messfunktionen des OSZILLOSKOPS auf der Kurve von KANAL 3 die Größe der Ausgangsspannungsspitzen $\Delta V_{out,over}$ und $\Delta V_{out,under}$ bestimmen, die Zeiträume $t_{pk,over}$ und $t_{pk,under}$ des Auftretens von $\Delta V_{out,over}$ und $\Delta V_{out,under}$ messen sowie die Einschwingzeiten $t_{set,over}$ und $t_{set,under}$ ermitteln.
- 8) Die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST und die Taste „AUSGANG EIN“ des NETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen, die Jumper wie in Abschnitt (b) von Tabelle 1 angegeben konfigurieren, die Taste „AUSGANG EIN“ des Netzgeräts und die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST in die Stellung ON bringen und Schritt 7) wiederholen.
- 9) Nach den Messungen die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST und die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen und alle Geräte ausschalten



Prüfung 1: Messungen und Berechnungen

- Unter den in Tabelle 1 angegebenen Betriebsbedingungen die Größe der Ausgangsspannungsspitzen $\Delta V_{out,over}$ und $\Delta V_{out,under}$, die Zeiten $t_{pk,over}$ und $t_{pk,under}$ des Auftretens von $\Delta V_{out,over}$ und $\Delta V_{out,under}$ sowie die Einschwingzeiten $t_{set,over}$ und $t_{set,under}$ messen.
- Die Fragen beantworten und versuchen, die Ergebnisse der Beobachtungen anhand der Informationen im Abschnitt *Theoretischer Hintergrund* und in den relevanten Referenzen zu erläutern.

Tabelle 1: Ausgangsspannungsspitzen, Dauer des Über-/Unterschwingens und Einschwingzeiten während Lasttransienten beim LDO-Regler TPS7A8300 mit verschiedenen Ausgangskondensator-, Widerstands- und Induktorkonfigurationen sowie höchster von der elektronischen Last im dynamischen Modus unterstützter Stromanstiegsgeschwindigkeit bei $V_{in} = 2.5 \text{ V}$ und $V_{out} = 1.5 \text{ V}$

(a)	J ₁₄ offen, J ₁₅ gebr. J ₁₉ offen, J ₂₀ gebr. J ₂₂ gebr., J ₂₃ offen	I _{OUT} : 1 A→100 mA		I _{OUT} : 100 mA→1 A	
		(1)	$\Delta V_{OUT,over}$ [mV]	(1)	$\Delta V_{OUT,under}$ [mV]
(2)	$t_{pk,over}$ [ms]	(2)	$t_{pk,under}$ [ms]	(2)	
(3)	$t_{set,over}$ [ms]	(3)	$t_{set,under}$ [ms]	(3)	

(b)	J ₁₄ gebr., J ₁₅ offen J ₁₉ gebr., J ₂₀ offen J ₂₂ offen, J ₂₃ gebr.	I _{OUT} : 1 A→100 mA		I _{OUT} : 100 mA→1 A	
		(1)	$\Delta V_{OUT,over}$ [mV]	(1)	$\Delta V_{OUT,under}$ [mV]
(2)	$t_{pk,over}$ [ms]	(2)	$t_{pk,under}$ [ms]	(2)	
(3)	$t_{set,over}$ [ms]	(3)	$t_{set,under}$ [ms]	(3)	

Ausgangskondensatoren, -widerstände, -induktoren:

J₁₆ verbindet die Ausgangskondensatoren C₁₁-C₁₃ (3 x 10 μF)

J₁₄ verbindet Ausgangswiderstand R₇ (1 mΩ)

J₁₅ verbindet Ausgangswiderstand R₈ (100mΩ)

J₁₉ verbindet Ausgangsinduktor L₁ (1 nH)

J₂₀ verbindet Ausgangsinduktor L₂ (100 nH)

J₂₂ verbindet Ausgangskondensator C₁₆ (10 μF)

J₂₃ verbindet Ausgangskondensator C₁₇ (47 μF)

Antworten:

- Ist die Größe der Überspannungen in Fall (a) oder Fall (b) größer? (a) (b) Identisch Hängt von Folgendem ab: _____
- Ist die Dauer der Spannungsspitzen im Fall (a) oder im Fall (b) kürzer? (a) (b) Identisch Hängt von Folgendem ab: _____
- Ist die Einschwingzeit im Fall (a) oder im Fall (b) kürzer? (a) (b) Identisch Hängt von Folgendem ab: _____



Prüfung 2: Vorbereitung und Verfahren

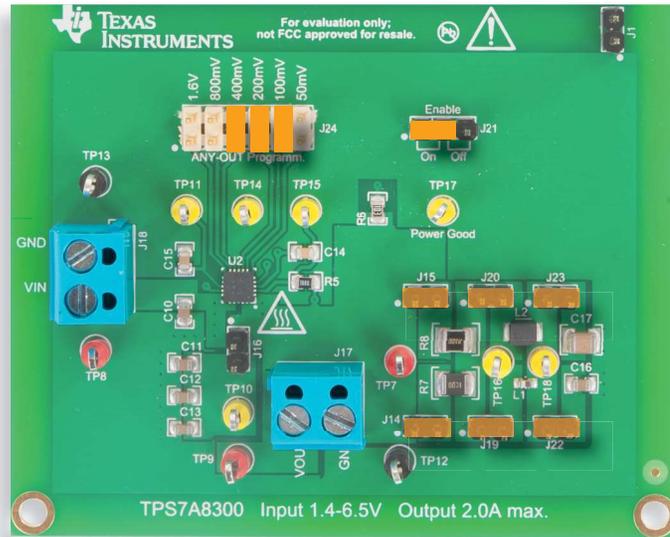


Abbildung 9: TPS7A8300-LDO-Platine: Jumperkonfiguration für Prüfung 2

Jumperkonfiguration (siehe Abbildung 9):

- **J₂₁** gebrückt in Stellung ON → LDO-Betrieb aktiviert
- **J₂₄** gebrückt (Pins mit den Beschriftungen „100mV“, „200mV“ und „400mV“) → Nennausgangsspannung $V_{out} = 1.5\text{ V}$
- **J₁₆** offen → Ausgangskondensatoren C₁₁–C₁₃ (3 x 10 µF) getrennt
- **J₁₄** ODER **J₁₅** gebrückt (*) → Ausgangswiderstand R₇ (1 mΩ) oder R₈ (100 mΩ) verbunden
- **J₁₉** ODER **J₂₀** gebrückt (*) → Ausgangsinduktor L₁ (1 nH) oder L₂ (100 nH) verbunden
- **J₂₂** ODER **J₂₃** gebrückt (*) → Ausgangskondensator C₁₆ (10 µF) oder C₁₇ (47 µF) verbunden

[*] **WARNUNG:** Zumindest einer der beiden Jumper MUSS verbunden sein.]

Prüfverfahren:

- 1) Das OSZILLOSKOP einschalten, KANAL 1 auf DC 50 Ω-Kopplungsmodus einstellen, KANAL 1 als Trigger-Quelle auswählen, KANAL 2 auf DC 1 MΩ-Kopplungsmodus einstellen, KANAL 3 auf AC 1 MΩ-Kopplungsmodus einstellen, KANAL 4 auf DC 1 MΩ-Kopplungsmodus einstellen und den Stromtastkopf entmagnetisieren, um eine mögliche DC-Biasspannung zu beseitigen.

- 2) Das NETZGERÄT einschalten (die Taste „AUSGANG EIN“ muss in der Stellung OFF sein), dann die Spannung auf 2.5 V und die STROMBEGRENZUNG auf 1.5 A einstellen.
- 3) Die ELEKTRONISCHE LAST einschalten (die Taste „LAST EIN“ muss in der Stellung OFF sein), den dynamischen Strommodus einstellen und Folgendes festlegen:
 - niedriger Strompegel: 100 mA für 10 ms
 - hoher Strompegel: 1 A für 10 ms
 - Flankensteilheit des Stromanstiegs und -abfalls: höchster vom Gerät unterstützter Wert
- 4) Die Taste „AUSGANG EIN“ des NETZGERÄTS in die Stellung ON bringen. Es sollten nun auf dem OSZILLOSKOP die Kurven von KANAL 1 (Laststrom) und KANAL 3 (AC-Anteil der Ausgangsspannung) als flache horizontale Linien bei 0, die Kurve von KANAL 2 (vollständige Ausgangsspannung) als flache Linie bei 1.5 V und die Kurve von KANAL 4 (Eingangsspannung) als flache Linie bei 2.5 V angezeigt werden.
- 5) Mit den Cursor- oder Messfunktionen des OSZILLOSKOPS die durchschnittliche Eingangs- und Ausgangsspannung messen. Wenn die abgelesenen Werte sehr von den erwarteten Werten abweichen, die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen und die vorherigen Schritte überprüfen.
- 6) Die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST in die Stellung ON bringen. Es sollten nun die Kurve von KANAL 1 als Rechteckschwingung, die Kurve von KANAL 2 als flache Linie mit 1.5 V Durchschnittswert, die Kurve von KANAL 3 als flache Linie mit 0 V Durchschnittswert und kleinen kurzzeitigen Spannungsspitzen bei den Laststromtransienten und die Kurve von KANAL 4 als flache Linie bei 2.5 V angezeigt werden (siehe experimentelle Beispielkurven am Ende dieses Experiments). Das OSZILLOSKOP so einstellen, dass die Wellenformen möglichst groß dargestellt werden. Den Triggerpegel auf 50 % der Kurve von KANAL 1 einstellen.
- 7) Mit den betreffenden Jumpfern vier verschiedene Konfigurationen für den äquivalenten Ausgangskondensator vornehmen (siehe **WARNUNGEN** im Abschnitt „Vorbereitung und Verfahren“) und die Größe der Ausgangsspannungsspitzen $\Delta V_{out,over}$ bei den in Tabelle 2 angegebenen Einstellungen für die Stromanstiegsgeschwindigkeit der ELEKTRONISCHEN LAST ablesen [**WARNUNG:** Vor dem Ändern der Jumperkonfiguration zunächst die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST und danach die Taste „AUSGANG EIN“ des NETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen. Nach der Änderung erst die Taste „AUSGANG EIN“ des NETZGERÄTS und anschließend die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST in die Stellung ON bringen.]
- 8) Nach den Messungen die Taste „LAST EIN“ der ELEKTRONISCHEN LAST und die Taste „AUSGANG EIN“ des GLEICHSPANNUNGSNETZGERÄTS in die Stellung OFF bringen und alle Geräte ausschalten.



Prüfung 2: Messungen und Berechnungen

- Die Größe der Ausgangsspannungsspitzen $\Delta V_{out,over}$ bei vier verschiedenen Konfigurationen der Jumper J_{14} , J_{15} , J_{19} , J_{20} , J_{22} und J_{23} messen und die Ergebnisse in Tabelle 2 eintragen. **[HINWEIS:** Laut der **WARNUNG** im Abschnitt *Vorbereitung und Verfahren* muss ein Pfad vom Ausgangsspannungsknoten zum Masseknoten über R_7 oder R_8 , L_1 oder L_2 und C_{16} oder C_{17} vorhanden sein].
- Die Fragen beantworten und versuchen, die Ergebnisse der Beobachtungen anhand der Informationen im Abschnitt *Theoretischer Hintergrund* und in den relevanten Referenzen zu erläutern.

Tabelle 2: Ausgangsspannungsspitzen während Lasttransienten beim LDO-Regler TPS7A8300 mit verschiedenen Ausgangskondensator-, Widerstands- und Induktorkonfigurationen bei $V_{in} = 2.5 \text{ V}$ und $V_{out} = 1.5 \text{ V}$

Laststrom Anstiegsrate	Konfiguration 1: _____		Konfiguration 2: _____		Konfiguration 3: _____		Konfiguration 4: _____	
(1) 0.01 A/ μ s	$\Delta V_{out,over}$ [mV]	(1)						
(2) 0.1 A/ μ s		(2)		(2)		(2)		(2)
(3) 1.0 A/ μ s		(3)		(3)		(3)		(3)
	ESR [m Ω]		ESR [m Ω]		ESR [m Ω]		ESR [m Ω]	
	ESL [nH]		ESL [nH]		ESL [nH]		ESL [nH]	
	C_{out} [μ F]		C_{out} [μ F]		C_{out} [μ F]		C_{out} [μ F]	

Ausgangskondensatoren, -widerstände, -induktoren:

J_{16} verbindet die Ausgangskondensatoren C_{11} - C_{13} ($3 \times 10 \mu\text{F}$)

J_{14} verbindet Ausgangswiderstand R_7 (1 m Ω)
 J_{15} verbindet Ausgangswiderstand R_8 (100m Ω)

J_{19} verbindet Ausgangsinduktor L_1 (1 nH)
 J_{20} verbindet Ausgangsinduktor L_2 (100 nH)

J_{22} verbindet Ausgangskondensator C_{16} (10 μF)
 J_{23} verbindet Ausgangskondensator C_{17} (47 μF)

Antworten:

- 1 Welche Ausgangskonfiguration führt zur kleinsten Größe der Ausgangsspannungsspitzen $\Delta V_{OUTover}$? #1 #2 #3 #4

Begründung: _____

- 2 Welche Ausgangskonfiguration führt zur höchsten Größe der Ausgangsspannungsspitzen $\Delta V_{OUTover}$? #1 #2 #3 #4

Begründung: _____



Erörterung

In Prüfung 1 haben wir den Zusammenhang zwischen dem Einschwingverhalten des LDO-Reglers TPS7A8300 unter Last und den Eigenschaften des äquivalenten Ausgangskondensators untersucht.

In *Experiment 3* wurde festgestellt, dass das Einschwingverhalten eines LDO-Reglers unter Last von der Verstärkung der Rückkopplungsschleife und den Eigenschaften des Ausgangskondensators abhängt. Der LDO-Regler TPS7A8300 verfügt über eine interne Kompensationsschaltung, die sicherstellt, dass die Durchtrittsfrequenz von einem zweistelligen kHz-Wert bis in den MHz-Bereich erhöht werden kann, wenn der Laststrom von einigen mA bis auf 2 A steigt. Wenn die elektronische Last den dynamischen Laststrom nicht mit einer sehr hohen Anstiegsgeschwindigkeit bereitstellen kann, hängt das in der Ausgangsspannung beobachtete Über- und Unterschwingen bei Lasttransienten von der Schleifenverstärkung ab. Daher richtet sich unter diesen Bedingungen der Einfluss der Ausgangskondensatoreigenschaften auf die Lasttransienten nach den Auswirkungen, die der Ausgangskondensator selbst auf die Schleifenverstärkung nimmt. Wie in *Experiment 3* erläutert wurde, führt eine größere Ausgangskapazität zu einer niedrigeren Frequenz des Schleifenverstärkungspols $\omega_{\text{load}} = I_{\text{OUT}} / (C_{\text{OUT}} V_{\text{OUT}})$ und dadurch zu einer niedrigeren Durchtrittsfrequenz sowie größerem und langsamerem Über- und Unterschwingen. Außerdem verringert ein höherer ESR die Frequenz der Schleifenverstärkungsnulstelle $\omega_z = 1 / (C_{\text{OUT}} \text{ESR})$ und führt dadurch zu einer höheren Durchtrittsfrequenz sowie geringerem und schnellerem Über- und Unterschwingen. Ein größerer ESL-Wert erhöht die Impedanz des Ausgangskondensatorzweigs, und die Auswirkungen auf die Lasttransienten sind in etwa mit einer Verringerung der Kapazität vergleichbar. Bei der Konfiguration (a) in Tabelle 1 umfasst die gesamte äquivalente Impedanz, die vom LDO-Regler als Ausgangskondensator registriert wird, Folgendes:

- Kapazität $C_{16} = 10 \mu\text{F}$
- Induktivität $L_2 = 100 \text{ nH}$ [HINWEIS: Der Widerstand R_8 kann eine parasitäre Induktivität von etwa 10 bis 50 nH aufweisen.]
- Äquivalenter ESR, der aus dem ESR des Kondensators (5 bis 20 m Ω), dem 20-m Ω -Widerstand des Induktors L_2 und dem 100-m Ω -Widerstand R_8 besteht

Bei der Konfiguration (b) in Tabelle 1 umfasst die gesamte äquivalente Impedanz, die vom LDO-Regler als Ausgangskondensator registriert wird, Folgendes:

- Kapazität $C_{17} = 47 \mu\text{F}$
- Induktivität $L_1 = 1 \text{ nH}$ [HINWEIS: Der Widerstand R_8 kann eine parasitäre Induktivität von etwa 10 bis 50 nH aufweisen.]
- Äquivalenter ESR, der aus dem ESR des Kondensators (5 bis 20 m Ω), dem 15-m Ω -Widerstand des Induktors L_1 und dem 1-m Ω -Widerstand R_7 besteht.

Wenn die Stromanstiegsgeschwindigkeit der elektronischen Last niedrig ist (unter 0.01 A/ μs), kann es aufgrund der großen Bandbreite der Rückkopplungsschleifenverstärkung schwierig sein, das Einschwingverhalten unter Last zu beobachten. Bei einer hohen Stromanstiegsgeschwindigkeit (über 10 A/ μs) lässt sich das Einschwingverhalten unter Last besser beobachten. Die Ausgangskondensator Konfiguration bestimmt die Größe und Form des Über-/Unterschwingens der Ausgangsspannung, wie in den Abbildungen 10 und 11 gezeigt. In realen Anwendungen werden die RLC-Eigenschaften der von LDO-Reglern registrierten Ausgangsimpedanz durch den Ausgangskondensator, die Impedanz der Leiterbahnen und die Impedanz der Verbindungskabel zwischen Regler und dynamischer Last beeinflusst. Jedes RLC-Element, das zum Anstieg der Ausgangsimpedanz beiträgt, führt zu einer Vergrößerung des Über-/Unterschwingens.

In Prüfung 2 haben wir den Zusammenhang zwischen dem Einschwingverhalten des LDO-Reglers TPS7A8300 unter Last, den Eigenschaften des äquivalenten Ausgangskondensators und der Anstiegsgeschwindigkeit des Laststroms untersucht.

Bei manchen Jumperkombinationen zum Konfigurieren des äquivalenten Ausgangskondensators können deutliche Veränderungen des Einschwingverhaltens des LDO-Reglers festgestellt werden, bei anderen hingegen fast keine. Wie bereits oben erläutert, hängt das Einschwingverhalten des LDO-Reglers unter Last von der Anstiegsgeschwindigkeit des Laststroms und vom Einfluss der RLC-Eigenschaften des Ausgangskondensators auf die Spannungsschleifenverstärkung des LDO-Reglers ab. Bei einer niedrigen Anstiegsgeschwindigkeit des Laststroms hat der LDO-Regler genügend Zeit, den Stromanstieg durch eine schnelle Änderung der Gate-Spannung des Pass-Bausteins zu kompensieren, sofern die Durchtrittsfrequenz der Spannungsschleifenverstärkung hoch ist. Ein geringer C_{OUT} - und ein hoher ESR-Wert vergrößern die Bandbreite der Spannungsschleifenverstärkung. Bei einer hohen Durchtrittsfrequenz und einer geringen Stromanstiegsgeschwindigkeit sind die Spannungsspitzen bei Lasttransienten sehr klein. Wenn die Anstiegsgeschwindigkeit des Laststroms hoch ist, kann der LDO-Regler den Arbeitspunkt des Pass-Bausteins nicht schnell genug ändern, und das Einschwingverhalten unter Last ist durch die Eigenschaften des äquivalenten Ausgangskondensators bestimmt (siehe oben). Somit führen bei einer hohen Stromanstiegsgeschwindigkeit ein geringer C_{OUT} -, ein hoher ESR- und ein hoher ESL-Wert zu größeren Ausgangsspannungsspitzen bei Lasttransienten.



Experimentelle Oszilloskopkurven

Die Abbildungen auf diesen Seiten enthalten einige Beispiele für experimentelle Messungen, die mit dem LDO-Regler TPS7A8300 durchgeführt wurden. Sie zeigen das Einschwingverhalten des LDO-Reglers unter Last bei verschiedenen Ausgangskondensatorkonfigurationen (in [3] sind weitere Details zum dynamischen Ansprechverhalten des LDO-Reglers TPS7A8300 zu finden).

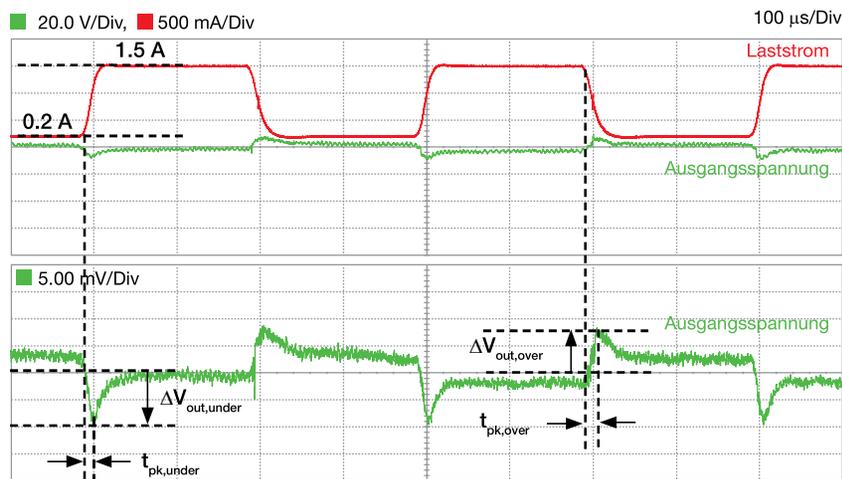


Abbildung 10: Einschwingverhalten des LDO-Reglers TPS7A8300 unter Last bei: $V_{in} = 1.8 \text{ V}$, $V_{out} = 1.5 \text{ V}$, $I_{out} = 0.2 \text{ A} \leftrightarrow 1.5 \text{ A}$, $C_{out} = C_{16} = 10 \mu\text{F}$, $L_{out} = L_2 = 100 \text{ nH}$, $\text{ESR}_{out} = R_8 = 100 \text{ m}\Omega$

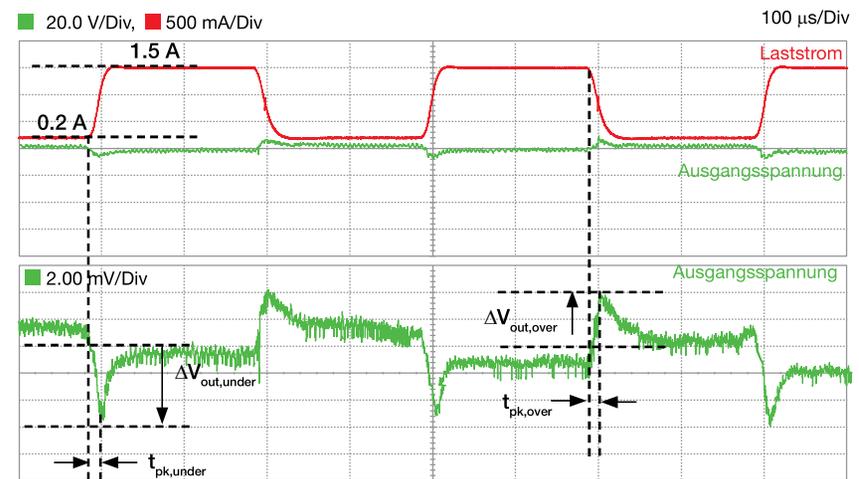


Abbildung 11: Einschwingverhalten des LDO-Reglers TPS7A8300 unter Last bei: $V_{in} = 1.8 \text{ V}$, $V_{out} = 1.5 \text{ V}$, $I_{out} = 0.2 \text{ A} \leftrightarrow 1.5 \text{ A}$, $C_{out} = C_{17} = 47 \mu\text{F}$, $L_{out} = L_1 = 1 \text{ nH}$, $\text{ESR}_{out} = R_7 = 1 \text{ m}\Omega$

Die Kurven in den Abbildungen 10 und 11 zeigen den im vorhergehenden Abschnitt erläuterten kombinierten Einfluss der Ausgangskapazität, des ESR und der ESL auf das Einschwingverhalten des LDO-Reglers TPS7A8300 unter Last. Die Anstiegsgeschwindigkeit des Laststroms beträgt hier ca. $0.35 \text{ A}/\mu\text{s}$.



Experimentelle Oszilloskopkurven

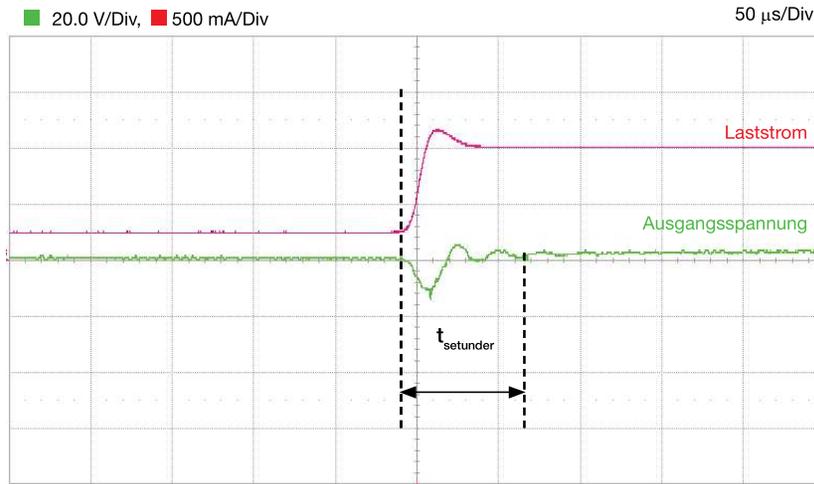


Abbildung 12: Einschwingverhalten des LDO-Reglers TPS7A8300 unter Last bei: $V_{in} = 2.5 \text{ V}$,
 $V_{out} = 1.5 \text{ V}$, $I_{out} = 0.25 \text{ A} \rightarrow 1.0 \text{ A}$, $C_{out} = C_{17} = 47 \mu\text{F}$, $L_{out} = L_1 = 1 \text{ nH}$, $\text{ESR}_{out} = R_7 = 1 \text{ m}\Omega$

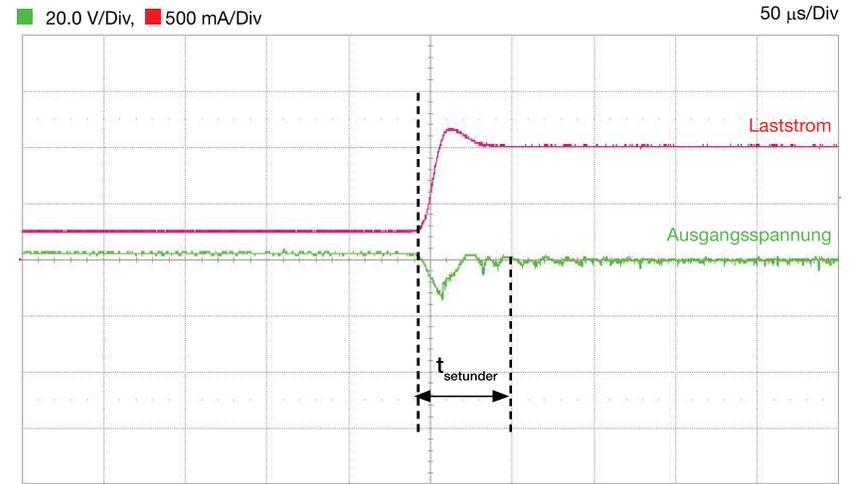


Abbildung 13: Einschwingverhalten des LDO-Reglers TPS7A8300 unter Last bei: $V_{in} = 1.8 \text{ V}$,
 $V_{out} = 1.5 \text{ V}$, $I_{out} = 0.2 \text{ A} \rightarrow 1.5 \text{ A}$, $C_{out} = C_{16} = 10 \mu\text{F}$, $L_{out} = L_1 = 1 \text{ nH}$, $\text{ESR}_{out} = R_8 = 100 \text{ m}\Omega$

Die Kurven in den Abbildungen 12 und 13 zeigen den im vorhergehenden Abschnitt erläuterten kombinierten Einfluss der Ausgangskapazität und des ESR auf das Einschwingverhalten des LDO-Reglers TPS7A8300 unter Last. In Abbildung 13 verläuft die fallende Flanke der Ausgangsspannung nahezu linear und folgt dem Laststromanstieg. Dies ist auf den höheren ESR-Wert zurückzuführen, der die Form der Transiente während der schnellen Laststromschwungung hauptsächlich bestimmt (siehe Abschnitt *Theoretischer Hintergrund*). In Abbildung 12 hat das Unterschwingen der Ausgangsspannung hingegen aufgrund des kleineren ESR und der höheren Kapazität eine andere Wellenform, die hauptsächlich von der Kapazität abhängt.

Anhang A

Referenzen

- [1] Linear Regulators: Theory of Operation and Compensation, <http://www.i.com/lit/an/snva020b/snva020b.pdf>
- [2] TPS7A4901-Datenblatt, <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps7a4901.pdf>
- [3] TPS7A8300-Datenblatt, <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps7a8300.pdf>
- [4] LDO Regulator Stability Using Ceramic Output Capacitors, <http://www.ti.com/lit/an/snva167a/snva167a.pdf>
- [5] LDO PSRR Measurement Simplified, <http://www.ti.com/lit/an/slaa414/slaa414.pdf>
- [6] www.mathworks.com
- [7] C. Basso, *Designing Control Loops for Linear and Switching Power Supplies: A Tutorial Guide*, Artech House
- [8] www.omicron-lab.com
- [9] Techniques for accurate PSRR measurements, <http://www.ti.com/lit/an/slyt547/slyt547.pdf>
- [10] Simplifying Stability Checks, <http://www.ti.com/lit/an/sbva026e/sbva026e.pdf>
- [11] A Topical Index of TI LDO Application Notes, <http://www.ti.com/lit/an/sbva026e/sbva026e.pdf>
- [12] Technical Review of Low Dropout Voltage Regulator Operation and Performance, <http://www.ti.com/lit/an/slva072/slva072.pdf>

Anhang B

Hersteller-Websites

ASJ,	http://www.asj.com.sg/
AVX,	http://www.avx.com/
Bourns,	http://www.bourns.com
Coilcraft,	http://www.coilcraft.com/
Diodes Incorporated,	http://www.diodes.com/
Kemet,	http://www.kemet.com/
Murata,	http://www.murata.com/
Nippon Chemi-Con,	http://www.chemi-con.co.jp/
ON Semiconductor,	http://www.onsemi.com/
Panasonic,	http://industrial.panasonic.com/
Philips Lumileds,	http://www.philipslumileds.com/
Rohm Semiconductor,	http://www.rohm.com/
Samsung,	http://www.samsungsem.com/
Samwha,	http://www.samwha.com/
Taiyo Yuden,	http://www.t-yuden.com/
TDK,	http://product.tdk.com/
TE Connectivity,	http://www.te.com/
Texas Instruments,	http://www.ti.com/
TT Electronics,	http://www.ttelectronics.com
Vishay,	http://www.vishay.com/
Yageo,	http://www.yageo.com/

TI-Universitätsprogramm

Texas Instruments engagiert sich seit mehr als 80 Jahren leidenschaftlich für die Entwicklung innovativer Technologielösungen. Das TI University Program wurde im Jahr 1982 ins Leben gerufen und ist ein globales Programm, das in 35 Ländern und in mehreren Sprachen umgesetzt wird und von dem jedes Jahr Hunderttausende von Studenten profitieren. Das TI-Universitätsprogramm stellt Dozenten ermäßigte Tools sowie Laborspenden und Lehrmaterialien zur Verfügung, damit den Studenten im Unterrichtsraum oder Labor leistungsfähige TI-Technologie zur Verfügung steht. Unsere fortschrittlichen Analog- und Embedded-Verarbeitungstechnologien fördern in zahlreichen Anwendungsbereichen von Unterrichtsmaterialien bis zu Entwicklungsprojekten die Begeisterung von Studenten und Pädagogen in Universitätslaboren auf der ganzen Welt.

Coilcraft ist Ihre Bezugsquelle für HF-Produkte und magnetische Leistungsbauteile

Coilcraft ist sich darüber im Klaren, dass Induktoren ein schwieriges Gebiet für Studenten sein können. Daher unterstützen wir Sie mit den gleichen Tools und Ressourcen, auf die auch professionelle Ingenieure bei der Entwicklung von Power-Management- und analogen Schaltungen vertrauen.



Kostenlose Produktmuster



Benötigen Sie Coilcraft-Bauteile für Ihr Entwicklungsprojekt? Wir versenden diese noch heute.

Branchenführende Entwicklungstools



Unsere leistungsfähigen Online-Tools führen Sie schnell und einfach zum perfekten Bauteil.

Anwendungsberichte



Unsere Anwendungsberichte und Entwicklungsleitfäden decken Themen ab, die möglicherweise nicht im Unterricht behandelt werden.

Kostenloses Power-Management-Laborkit



Mit diesem kostenlosen Toolkit können Dozenten praktische Erfahrungen im Unterricht vermitteln.

Weitere Informationen finden Sie unter
Coilcraft.com/students

WICHTIGER HINWEIS

Power-Management-Laborkit („PMLK“): Das LDO-Experimentierbuch soll Studenten mithilfe verschiedener Experimente die Grundlagen elektronischer Theorie und Schaltungen vermitteln. Die Informationen werden zwar von Texas Instruments Incorporated und deren Tochtergesellschaften (TI) regelmäßig aktualisiert, es ist aber dennoch möglich, dass sie zum Zeitpunkt der Durchführung der in diesem Buch beschriebenen Experimente nicht mehr aktuell sind. Sie erkennen an, dass die Durchführung der Experimente in diesem Buch unter Anwendungen Ihres Analyse-, Bewertungs- und Urteilsvermögens Ihrer Verantwortung unterliegt. Die Verwendung dieses Buches unterliegt neben den nachstehenden Bestimmungen den Nutzungsbedingungen von TI auf der Website <http://www.ti.com/corp/docs/legal/termsfuse.shtml>, die durch diesen Verweis Bestandteil der vorliegenden Bestimmungen sind.

DIE INFORMATIONEN IN DIESEM BUCH (DER „INHALT“) WERDEN „OHNE MÄNGELGEWÄHR“ BEREITGESTELLT. TI GIBT KEINE GARANTIE ODER ZUSICHERUNGEN, WEDER AUSDRÜCKLICHER, IMPLIZITER NOCH GESETZLICHER ART, IN BEZUG AUF DIESEN INHALT ODER DIE NUTZUNG DIESES INHALTS – EINSCHLIESSLICH GENAUIGKEIT UND VOLLSTÄNDIGKEIT. TI SCHLIESST HINSICHTLICH DIESES INHALTS UND SEINER NUTZUNG JEDLICHE RECHTSMÄNGELHAFTUNG UND STILLSCHWEIGENDE ZUSICHERUNG DER HANDELSÜBLICHEN QUALITÄT, DER EIGNUNG FÜR EINEN BESTIMMTEN ZWECK, DER UNGESTÖRTEN VERWENDUNG, DES UNGESTÖRTEN BESITZES UND DER NICHTVERLETZUNG DER RECHTE DRITTER AN GEISTIGEM EIGENTUM AUS. IN KEINEM FALL HAFTET TI FÜR TATSÄCHLICHE, SPEZIELLE, INDIREKTE, NEBEN- ODER FOLGESCHÄDEN, GLEICH WELCHER URSACHE UND UNGEACHTET DER HAFTUNGSTHEORIE, DIE AUS DIESEM INHALT ODER IN BELIEBIGER WEISE AUS DESSEN NUTZUNG ENTSTEHEN, AUCH WENN TI ÜBER DIE MÖGLICHKEIT SOLCHER SCHÄDEN INFORMIERT WAR.

Manche Bücher können Experimente enthalten, in denen Materialien von Dritten und/oder andere Materialien, die auf der Website www.ti.com verlinkt sind, verwendet werden. TI GEWÄHRT IN KEINEM SOLCHEN FALL EINE GARANTIE (OB AUSDRÜCKLICH ODER KONKLUDENT), SCHADLOSHALTUNG ODER UNTERSTÜTZUNG JEDLICHER ART IN BEZUG AUF DIE MATERIALIEN DRITTER. IM GESETZLICH MAXIMAL ZULÄSSIGEN UMFANG GELTEN AUCH SÄMTLICHE GARANTIEAUS-SCHLÜSSE UND HAFTUNGSBESCHRÄNKUNGEN IN DIESEM VERMERK FÜR DIE MATERIALIEN DRITTER.

STANDARDVERKAUFSBEDINGUNGEN FÜR EVALUIERUNGSMODULE

1. *Lieferung: TI liefert TI-Evaluierungsplatinen, -kits oder -module einschließlich der begleitenden Demosoftware, Komponenten und Dokumentation (zusammen „EVM“ oder „EVMs“) gemäß den hier festgelegten Bestimmungen an den Benutzer („Benutzer“). Die Annahme des EVM unterliegt ausdrücklich den folgenden Bestimmungen.*
 - 1.1 EVMs sind ausschließlich für Produkt- oder Softwareentwickler zur Durchführung von Machbarkeitsbewertungen, Experimenten und wissenschaftlichen Analysen mit TI-Halbleiterprodukten in Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen vorgesehen. EVMs haben keine direkte Funktion und sind keine Endprodukte. EVMs dürfen weder direkt noch indirekt als Teil oder Baugruppe in ein Endprodukt eingebaut werden. Zur Klarstellung: Mit dem EVM gelieferte Software und Softwaretools („Software“) unterliegen nicht den hier aufgeführten Bedingungen, sondern den separaten Nutzungsbedingungen für die betreffende Software.
 - 1.2 EVMs sind nicht für die Verwendung durch Endverbraucher vorgesehen. EVMs dürfen vom Benutzer weder ganz noch teilweise verkauft, unterlizenziert, verleast, vermietet, verliehen, abgetreten bzw. anderweitig für kommerzielle Zwecke weitergegeben oder in einem Endprodukt bzw. Produktionssystem verwendet werden.
2. *Eingeschränkte Garantie und diesbezügliche Rechtsbehelfe/Haftungsausschlüsse:*
 - 2.1 Diese Bedingungen gelten nicht für die Software. Falls die Software einer Garantie unterliegt, können die Garantiebestimmungen dem zugehörigen Softwarelizenzvertrag entnommen werden.
 - 2.2 TI garantiert, dass das TI-EVM ab dem Datum der Lieferung durch TI an den Benutzer für einen Zeitraum von neunzig (90) Tagen den von TI veröffentlichten Spezifikationen entspricht. Ungeachtet des Vorstehenden haftet TI nicht für Mängel, die aufgrund von Fahrlässigkeit, Missbrauch oder unsachgemäßer Behandlung durch eine andere natürliche oder juristische Person als TI entstehen, einschließlich unsachgemäßer Installation oder Prüfung, und es wird jegliche Haftung für EVMs ausgeschlossen, die von einer anderen natürlichen oder juristischen Person als TI in irgendeiner Weise verändert oder modifiziert wurden. Darüber hinaus haftet TI nicht für Mängel, die durch Entwicklungen, Spezifikationen oder Anweisungen des Benutzers in Verbindung mit solchen EVMs verursacht werden. Prüfungen und andere Qualitätskontrollverfahren werden in dem Umfang durchgeführt, den TI als notwendig erachtet bzw. der zur Erfüllung behördlicher Auflagen erforderlich ist. TI prüft nicht alle Parameter jedes EVM.
 - 2.3 Wenn ein EVM nicht die in der obigen Garantie zugesicherten Eigenschaften aufweist, besteht die ausschließliche Haftung von TI darin, das betreffende EVM nach alleinigem Ermessen zu reparieren bzw. zu ersetzen oder dem Konto des Benutzers den Kaufbetrag für dieses EVM gutzuschreiben. Die Haftung von TI im Rahmen dieser Garantie ist auf EVMs beschränkt, die während der Garantiezeit an die von TI angegebene Adresse zurückgeschickt werden und bei denen TI feststellt, dass sie nicht die in der Garantie zugesicherten Eigenschaften aufweisen. Falls sich TI dafür entscheidet, ein solches EVM zu reparieren oder zu ersetzen, steht TI eine angemessene Frist zu, die Reparatur durchzuführen oder ein Ersatz-EVM zu liefern. Für reparierte EVMs gilt der verbliebene Zeitraum der ursprünglichen Garantiezeit. Für ersetzte EVMs gilt eine neue Garantiezeit von neunzig (90) Tagen.
3. *Zulassungshinweise:*
 - 3.1 USA
 - 3.1.1 *Hinweis zu EVMs ohne FCC-Zulassung:*

Dieses Kit ist so konzipiert, dass Produktentwickler elektronische Komponenten, Schaltungen oder die zum Kit gehörige Software evaluieren können, um zu prüfen, ob diese Elemente in ein Endprodukt integriert werden können. Das Kit eignet sich auch für Softwareentwickler, um Softwareanwendungen für das Endprodukt zu erstellen. Dieses Kit ist kein Endprodukt und darf nach dem Zusammenbau nur weiterverkauft oder anderweitig vertrieben werden, wenn sämtliche erforderlichen FCC-Gerätezulassungen eingeholt wurden. Der Betrieb unterliegt der Bedingung, dass dieses Produkt keine schädlichen Störungen bei konzessionierten Radiostationen verursacht und seinerseits schädliche Störungen toleriert. Sofern das zusammengebaute Kit nicht für den Betrieb gemäß Teil 15, 18 oder 95 dieses Kapitels bestimmt ist, muss der Benutzer das Kit unter der Aufsicht eines FCC-Lizenzinhabers betreiben oder eine experimentelle Zulassung gemäß Teil 5 dieses Kapitels einholen.
 - 3.1.2 *Für EVMs, die mit Teil 15 der FCC-Bestimmungen (FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION) konform sind:*

VORSICHT

Dieses Gerät entspricht Teil 15 der FCC-Bestimmungen. Sein Betrieb unterliegt den folgenden zwei Bedingungen: (1) Dieses Gerät darf keine schädlichen Störungen verursachen. (2) Dieses Gerät muss alle empfangenen Störungen tolerieren, auch wenn diese zu Funktionsstörungen führen.

Alle Veränderungen oder Modifikationen, die nicht ausdrücklich von der für die Konformität zuständigen Partei genehmigt wurden, können zum Erlöschen der Betriebslaubnis des Benutzers führen.

Erklärung zur elektromagnetischen Verträglichkeit von EVMs gemäß FCC-Klasse A

HINWEIS: Dieses Gerät wurde geprüft und erfüllt die Grenzwerte für ein digitales Gerät der Klasse A in Teil 15 der FCC-Bestimmungen. Diese Grenzwerte sollen einen angemessenen Schutz vor schädlichen Störungen beim Gebrauch in gewerblichen Gebieten gewährleisten. Dieses Gerät erzeugt und nutzt Hochfrequenzstrahlung und kann diese ausstrahlen. Wenn es nicht gemäß den Anweisungen im Handbuch installiert und verwendet wird, kann es zu Störungen des Rundfunk- und Fernsehempfangs kommen. Der Betrieb dieses Geräts in einem Wohngebiet führt wahrscheinlich zu Störungen. In diesem Fall ist der Benutzer verpflichtet, die Störungen auf eigene Kosten zu beseitigen.

FCC-Erklärung zur Störanfälligkeit für EVMs der Klasse B

HINWEIS: Dieses Gerät wurde geprüft und erfüllt die Grenzwerte für ein digitales Gerät der Klasse B in Teil 15 der FCC-Bestimmungen. Diese Grenzwerte sollen einen angemessenen Schutz vor schädlichen Störungen beim Gebrauch in Wohngebieten gewährleisten. Dieses Gerät erzeugt und nutzt Hochfrequenzstrahlung und kann diese ausstrahlen. Wenn es nicht gemäß den Anweisungen installiert und verwendet wird, kann es zu Störungen des Rundfunk- und Fernsehempfangs kommen. Es gibt jedoch keine Garantie dafür, dass bei einer bestimmten Installation keine Störungen auftreten. Wenn dieses Gerät schädliche Störungen des Radio- oder Fernsehempfangs verursacht, was durch Ein- und Ausschalten des Gerätes festgestellt werden kann, wird dem Benutzer empfohlen, eine oder mehrere der folgenden Maßnahmen zu ergreifen:

- Die Position oder die Ausrichtung der Empfangsantenne ändern.
- Den Abstand zwischen dem Gerät und dem Empfänger vergrößern.
- Das Gerät an einen anderen Stromkreis als den des Empfängers anschließen.
- Den Verkäufer oder einen erfahrenen Radio-/Fernsehtechniker um Rat fragen.

3.2 Kanada

3.2.1 Für EVMs mit einer Industry-Canada-Konformitätsbescheinigung gemäß der Norm RSS-210

Bezüglich EVMs mit Funksendern:

Dieses Gerät erfüllt die Anforderungen für lizenzfreie Geräte der RSS-Norm(en) von Industry Canada. Sein Betrieb unterliegt den folgenden zwei Bedingungen: (1) Dieses Gerät darf keine schädlichen Störungen verursachen. (2) Dieses Gerät muss alle empfangenen Störungen tolerieren, auch wenn diese zu Funktionsstörungen führen.

Concernant les EVMs avec appareils radio:

Le présent appareil est conforme aux CNR d'Industrie Canada applicables aux appareils radio exempts de licence. L'exploitation est autorisée aux deux conditions suivantes: (1) l'appareil ne doit pas produire de brouillage, et (2) l'utilisateur de l'appareil doit accepter tout brouillage radioélectrique subi, même si le brouillage est susceptible d'en compromettre le fonctionnement.

Bezüglich EVMs mit abnehmbaren Antennen:

Gemäß den Vorschriften von Industry Canada darf dieser Sender nur mit einer Antenne betrieben werden, deren Typ und maximale (oder geringere) Verstärkung den von Industry Canada für den Sender genehmigten Werten entsprechen. Um andere Benutzer nicht durch Funkstörungen zu beeinträchtigen, müssen der Antennentyp und dessen Verstärkung so gewählt werden, dass die äquivalente isotrope Sendeleistung nicht höher ist, als dies für eine erfolgreiche Kommunikation erforderlich ist. Dieser Sender wurde von Industry Canada nur für den Betrieb mit den im Benutzerhandbuch aufgelisteten Antennentypen zugelassen. Dabei sind die maximal zulässige Verstärkung sowie die erforderliche Antennenimpedanz für jeden Antennentyp angegeben. Die Verwendung von nicht in dieser Liste enthaltenen Antennentypen mit diesem Gerät, deren Verstärkung die für den betreffenden Typ angegebene maximale Verstärkung überschreitet, ist strengstens untersagt.

Concernant les EVMs avec antennes détachables

Conformément à la réglementation d'Industrie Canada, le présent émetteur radio peut fonctionner avec une antenne d'un type et d'un gain maximal (ou inférieur) approuvé pour l'émetteur par Industrie Canada. Dans le but de réduire les risques de brouillage radioélectrique à l'intention des autres utilisateurs, il faut choisir le type d'antenne et son gain de sorte que la puissance isotrope rayonnée équivalente (p.i.r.e.) ne dépasse pas l'intensité nécessaire à l'établissement d'une communication satisfaisante. Le présent émetteur radio a été approuvé par Industrie Canada pour fonctionner avec les types d'antenne énumérés dans le manuel d'usage et ayant un gain admissible maximal et l'impédance requise pour chaque type d'antenne. Les types d'antenne non inclus dans cette liste, ou dont le gain est supérieur au gain maximal indiqué, sont strictement interdits pour l'exploitation de l'émetteur

3.3 Japan

3.3.1 Hinweis für nach Japan ausgelieferte EVMs: siehe http://www.tij.co.jp/lstds/ti_ja/general/eStore/notice_01.page 日本国内に輸入される評価用キット、ボードについては、次のところをご覧ください。 http://www.tij.co.jp/lstds/ti_ja/general/eStore/notice_01.page

3.3.2 Hinweis für Benutzer von in Japan als „Hochfrequenzprodukte“ eingestuft EVMs: Nach Japan ausgelieferte EVMs dürfen von TI nicht als konform mit den technischen Vorschriften des japanischen Funkverkehrsgesetzes zertifiziert werden. Wenn EVMs in Japan verwendet werden, die nicht gemäß den technischen Vorschriften des japanischen Funkverkehrsgesetzes zertifiziert sind, muss der Benutzer

laut dem japanischen Funkverkehrsgesetz die folgenden Anweisungen in Bezug auf die EVMs befolgen:

1. Die EVMs müssen in einem abgeschirmten Raum oder einer anderen Prüfeinrichtung verwendet werden, wie dies in der Mitteilung Nr. 173 des Ministeriums für Innere Angelegenheiten und Kommunikation vom 28. März 2006 festgelegt wird, die auf Unterabschnitt 1.1 des Artikels 6 der Vorschrift des Ministeriums zur Durchführung des japanischen Funkverkehrsgesetzes basiert.
2. Die EVMs dürfen nur verwendet werden, nachdem der Benutzer eine Lizenz für eine Testfunkstation gemäß dem japanischen Funkverkehrsgesetz erhalten hat.
3. Die EVMs dürfen nur verwendet werden, nachdem der Benutzer eine Bescheinigung über die Konformität mit den technischen Vorschriften des japanischen Funkverkehrsgesetzes erhalten hat. Außerdem dürfen die EVMs nur verkauft werden, wenn der obige Hinweis an den Käufer weitergegeben wird. Bei Nichteinhaltung der obigen Anweisungen unterliegt der Benutzer den im japanischen Funkverkehrsgesetz vorgesehenen Strafmaßnahmen.

【無線電波を送信する製品の開発キットをお使いになる際の注意事項】 開発キットの中には技術基準適合証明を受けていないものがあります。技術適合証明を受けていないもののご使用に際しては、電波法遵守のため、以下のいずれかの措置を取っていただく必要がありますのでご注意ください。

1. 電波法施行規則第6条第1項第1号に基づく平成18年3月28日総務省告示第173号で定められた電波暗室等の試験設備でご使用いただく。
2. 実験局の免許を取得後ご使用いただく。
3. 技術基準適合証明を取得後ご使用いただく。なお、本製品は、上記の「ご使用にあたっての注意」を譲渡先、移転先に通知しない限り、譲渡、移転できないものとしします。上記を遵守頂けない場合は、電波法の罰則が適用される可能性があることをご留意ください。日本テキサス・インスツルメンツ株式会社

東京都新宿区西新宿6丁目2番1号
西新宿三井ビル

3.3.3 Hinweis zu EVMs für die Powerline-Kommunikation: siehe http://www.tij.co.jp/lstds/ti_ja/general/eStore/notice_02.page

電力線搬送波通信についての開発キットをお使いになる際の注意事項については、次のところをご覧ください。 http://www.tij.co.jp/lstds/ti_ja/general/eStore/notice_02.page

4. EVM-Nutzungseinschränkungen und Warnhinweise:

- 4.1 EVMS SIND NICHT ZUR EVALUIERUNG VON FUNKTIONSSICHERHEITS- UND/ODER SICHERHEITSKRITISCHEN ANWENDUNGEN VORGESEHEN, EINSCHLIESSLICH, JEDOCH NICHT BESCHRÄNKT AUF LEBENSERHALTENDE ANWENDUNGEN.
 - 4.2 Der Benutzer muss vor der Handhabung oder Verwendung des EVM das Benutzerhandbuch und die weitere von TI zur Verfügung gestellte Dokumentation zum EVM einschließlich der Warnhinweise und Hinweise zu Nutzungsbeschränkungen lesen und die Anweisungen befolgen. Die Hinweise enthalten wichtige sicherheitsrelevante Informationen, z. B. zu Temperaturen und Spannungen.
 - 4.3 Sicherheitsrelevante Warnhinweise und Einschränkungen:
 - 4.3.1 Der Benutzer muss das EVM innerhalb der Spezifikationen und Umgebungsbedingungen betreiben, die von TI im Benutzerhandbuch und in der weiteren von TI bereitgestellten Dokumentation sowie von sonstigen relevanten Vorschriften empfohlen werden, und zusätzlich angemessene und übliche Schutzmaßnahmen treffen. Das Überschreiten der angegebenen Leistungswerte und Spezifikationen des EVM (einschließlich, aber nicht beschränkt auf Eingangs- und Ausgangsspannung, Strom, Leistung und Umgebungsbedingungen) kann zu schweren bzw. tödlichen Verletzungen oder zu Sachschäden führen. Falls es Unklarheiten in Bezug auf die Leistungswerte und Spezifikationen gibt, sollte sich der Benutzer an einen Außendienstmitarbeiter von TI wenden, bevor externe elektronische Geräte wie Netzgerät und vorgesehene Lasten angeschlossen werden. Alle Lasten außerhalb des angegebenen Leistungsbereichs können zu einem unbeabsichtigten oder ungenauen Betrieb und/oder zu möglichen dauerhaften Schäden am EVM oder an den angeschlossenen elektronischen Geräten führen. Daher sollte vor dem Anschließen einer Last an den Ausgang des EVM das Benutzerhandbuch zu Rate gezogen werden. Wenn es Unsicherheiten bezüglich der Lastspezifikationen gibt, ist, sollte sich der Benutzer an einen Außendienstmitarbeiter von TI wenden. Bei einigen Schaltungsbauteilen kann es während des normalen Betriebs auch dann zu erhöhten Gehäusetemperaturen kommen, wenn Eingangs- und Ausgangsspannung im zulässigen Bereich liegen. Zu diesen Bauteilen gehören u. a. Linearregler, Schalttransistoren, Pass-Transistoren, Strommesswiderstände und Kühlkörper, die anhand der Informationen in der zugehörigen Dokumentation identifiziert werden können. Bei der Arbeit mit dem EVM ist zu beachten, dass die Platine sehr warm werden kann.
 - 4.3.2 EVMs sind ausschließlich für den Gebrauch durch technisch qualifizierte Elektronikfachleute vorgesehen, die mit den Gefahren und Anwendungsrisiken bei der Arbeit mit elektrischen und mechanischen Bauteilen, Systemen und Subsystemen vertraut sind. Der Benutzer übernimmt die Verantwortung und Haftung für die ordnungsgemäße und sichere Handhabung und Verwendung des EVM durch den Benutzer sowie dessen Mitarbeiter, Partner, Auftragnehmer und Bevollmächtigte. Der Benutzer ist dafür verantwortlich und haftbar, dass sämtliche Schnittstellen (elektronische und/oder mechanische) zwischen dem EVM und dem menschlichen Körper mit einer geeigneten Isolierung versehen werden, um Leckströme zu begrenzen und die Stromschlaggefahr zu minimieren. Der Benutzer übernimmt die Verantwortung und Haftung für jedwede unsachgemäße oder unsichere Handhabung und Verwendung des EVM durch den Benutzer sowie dessen Mitarbeiter, Partner, Auftragnehmer und Bevollmächtigte.
 - 4.4 Der Benutzer ist dafür verantwortlich und haftbar, festzustellen, ob das EVM geltenden Gesetzen und Vorschriften auf internationaler, Bundes-, Landes- oder kommunaler Ebene bezüglich der Handhabung und Verwendung des EVM durch den Benutzer unterliegt, und ggf. sicherzustellen, dass sämtliche Aspekte solcher Gesetze und Vorschriften eingehalten werden. Der Benutzer ist dafür verantwortlich und haftbar, dass das EVM in Übereinstimmung mit allen geltenden Vorschriften auf internationaler, Bundes-, Landes- oder kommunaler Ebene ordnungsgemäß entsorgt und dem Recycling zugeführt wird.
5. **Genauigkeit der Informationen:** TI bemüht sich, möglichst exakte Informationen zur Verfügbarkeit und Funktion der EVMs bereitzustellen. TI garantiert jedoch nicht die Genauigkeit, Vollständigkeit, Zuverlässigkeit, Aktualität und Fehlerfreiheit der EVM-Beschreibungen, der Informationen zur EVM-Verfügbarkeit sowie der sonstigen Informationen auf TI-Websites.

6. **Haftungsausschlüsse:**

- 6.1 MIT AUSNAHME DES OBEN DARGELEGTEN WERDEN DIE EVMS UND DIE MIT EVMS GELIEFERTEN SCHRIFTLICHEN DESIGNMATERIALIEN SOWIE DAS DESIGN DER EVMS SELBST „OHNE MÄNGELGEWÄHR“ BEREITGESTELLT. TI SCHLIESST ALLE SONSTIGEN AUSDRÜCKLICHEN ODER KONKLUDENTEN GARANTIEEN DIESBEZÜGLICH AUS, EINSCHLIESSLICH – OHNE DARAUF BESCHRÄNKT ZU SEIN – KONKLUDENTE GARANTIEEN DER HANDELSÜBLICHEN QUALITÄT, DER EIGNUNG FÜR EINEN BESTIMMTEN ZWECK SOWIE DER NICHTVERLETZUNG VON PATENTEN, URHEBERRECHTEN, GESCHÄFTS-GEHEIMNISSEN ODER SONSTIGEN RECHTEN DRITTER AN GEISTIGEM EIGENTUM.
- 6.2 MIT AUSNAHME DES HIERIN GEWÄHRTEIN EINGESCHRÄNKTEIN RECHTS ZUR NUTZUNG DES EVM DARF KEINE BESTIMMUNG IN DIESEN VERKAUFSBEDINGUNGEN ALS ERTEILUNG ODER ÜBERTRAGUNG VON LIZENZ-, PATENT- ODER ANDEREN GEWERBLICHEN BZW. RECHTEN AN GEISTIGEM EIGENTUM VON TI, DESSEN LIEFERANTEN/LIZENZGEBERN ODER SONSTIGEN DRITTEN AUSGELEGT WERDEN, DAS EVM IN EINEM FERTIGGESTELLTEN BZW. EINSATZBEREITEN ENDPRODUKT ODER FÜR EINE ERFINDUNG, ENTDECKUNG ODER VERBESSERUNG ZU VERWENDEN, DIE VOR ODER NACH DER LIEFERUNG DES EVM GEMACHT, ERDACHT ODER ERWORBEN WIRD.

7. **FREISTELLUNGSVERPFLICHTUNGEN UND -ERKLÄRUNGEN DES BENUTZERS:** DER BENUTZER VERPFLICHTET SICH, TI, LIZENZGEBER UND DEREN BEVOLLMÄCHTIGTE GEGENÜBER ALLEN ANSPRÜCHEN, SCHÄDEN, VERLUSTEN, AUFWENDUNGEN, KOSTEN UND HAFTUNGSANSPRÜCHEN (ZUSAMMEN „ANSPRÜCHE“) KLAG- UND SCHADLOS ZU HALTEN, DIE SICH AUS ODER IN VERBINDUNG MIT EINER NICHT MIT DIESEN VERKAUFSBEDINGUNGEN ÜBEREINSTIMMENDEN HANDHABUNG ODER VERWENDUNG DES EVM ERGEBEN. DIESE VERPFLICHTUNG BESTEHT UNABHÄNGIG DAVON, OB DIE ANSPRÜCHE AUS GESETZ, SCHADENERSATZRECHT, VERTRAGSRECHT ODER EINER ANDEREN RECHTSGRUNDLAGE ERWACHSEN, UND SIE GILT AUCH, WENN DAS EVM NICHT WIE BESCHRIEBEN ODER ERWARTET FUNKTIONIERT.

8. **SCHADENERSATZ- UND HAFTUNGSBESCHRÄNKUNGEN:**

- 8.1 Allgemeine Einschränkungen: IN KEINEM FALL HAFTET TI FÜR SPEZIELLE, INDIREKTE, ZUFÄLLIGE, EXEMPLARISCHE, NEBEN- ODER FOLGESCHÄDEN SOWIE STRAFEN AUS ODER IN VERBINDUNG MIT DIESEN VERKAUFSBEDINGUNGEN ODER DER VERWENDUNG DES EVM IM RAHMEN DIESER NUTZUNGSBEDINGUNGEN, AUCH WENN TI ÜBER DIE MÖGLICHKEIT SOLCHER SCHÄDEN INFORMIERT WAR. ZU DEN AUSGESCHLOSSENEN SCHÄDEN GEHÖREN U. A. KOSTEN FÜR AUSBAU ODER ERNEUTEN EINBAU, NEBENKOSTEN FÜR DIE BESCHAFFUNG VON ERSATZPRODUKTEN ODER -LEISTUNGEN, KOSTEN FÜR ERNEUTE PRÜFUNGEN, KOSTEN FÜR EXTERNE COMPUTERRESSOURCEN, ARBEITSKOSTEN, VERLUST VON GESCHÄFTSWERT, ENTGANGENER GEWINN, ENTGANGENE EINSPARUNGEN, UNMÖGLICHKEIT DER NUTZUNG, DATENVERLUST UND BETRIEBSUNTERBRECHUNG. GEGEN TI DÜRFEN KEINE ANSPRÜCHE GELTEND GEMACHT ODER GERICHTSVERFAHREN ANGESTRENGT WERDEN, WENN DER GRUND FÜR DIESE MASSNAHME MEHR ALS EIN JAHR ZURÜCKLIEGT.
- 8.2 Spezifische Einschränkungen: DIE GESAMTHAFTUNG VON TI AUS GARANTIE- UND GEWÄHRLEISTUNGSANSPRÜCHEN UND AUS ANDEREN PFLICHTEN AUS ODER IN VERBINDUNG MIT DIESEN VERKAUFSBEDINGUNGEN ODER AUFGRUND DER VERWENDUNG EINES VON TI UNTER DIESEN VERKAUFSBEDINGUNGEN BEREITGESTELLTEN EVM IST AUF DEN GESAMTBETRAG BESCHRÄNKT, DER FÜR DIE UNTER DIESEN VERKAUFSBEDINGUNGEN ERWORBENEN ARTIKEL – SOFERN SIE GRUND DER VERLUSTE ODER SCHÄDEN SIND – GEZAHLT WURDE. MEHRERE ANSPRÜCHE IN BEZUG AUF BESTIMMTE UNTER DIESEN VERKAUFSBEDINGUNGEN AN DEN BENUTZER VERKAUFTE ARTIKEL ERWEITERN DIE ANSPRUCHSGRENZE NICHT ÜBER DAS VORSTEHENDE HINAUS.

9. **Rückgaberrichtlinie:** Soweit nichts anderes angegeben ist, schließt TI jegliche Rückerstattungen, Rückgaben und Umtausche aus. Außerdem werden EVMS zurückgewiesen, wenn die Verpackung geöffnet wurde oder die EVMS beschädigt bzw. in einem anderen nicht wiederverkaufsfähigen Zustand sind. Wenn dem Benutzer EVMS vermeintlich fälschlicherweise in Rechnung gestellt wurden oder eine Lieferung nicht der Bestellung entspricht, muss er TI davon in Kenntnis setzen. Alle Rückerstattungen werden in voller Höhe innerhalb von dreißig (30) Arbeitstagen nach der Rückgabe der Komponente(n) ohne Porto- und Verpackungskosten geleistet.

10. **Geltendes Recht:** Diese Verkaufsbedingungen unterliegen den Gesetzen des Bundesstaates Texas und werden gemäß diesen Gesetzen ausgelegt. Die Anwendung kollisionsrechtlicher Grundsätze ist ausgeschlossen. Der Benutzer erklärt sich damit einverstanden, dass die nicht ausschließliche Zuständigkeit für alle Streitigkeiten aus oder im Zusammenhang mit diesen Verkaufsbedingungen bei den Gerichten des Bundesstaates Texas liegt und der Gerichtsstand Dallas County, Texas ist. Ungeachtet des Vorstehenden kann jegliches Urteil vor jedem US-amerikanischen oder ausländischen Gericht durchgesetzt werden, und TI kann einen Unterlassungsanspruch vor jedem US-amerikanischen oder ausländischen Gericht geltend machen.

Postanschrift: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright (c) 2016 Texas Instruments Incorporated



TI-PMLK

Power-Management-Laborkit
LDO-Experimentierbuch



IMPORTANT NOTICE FOR TI DESIGN INFORMATION AND RESOURCES

Texas Instruments Incorporated ("TI") technical, application or other design advice, services or information, including, but not limited to, reference designs and materials relating to evaluation modules, (collectively, "TI Resources") are intended to assist designers who are developing applications that incorporate TI products; by downloading, accessing or using any particular TI Resource in any way, you (individually or, if you are acting on behalf of a company, your company) agree to use it solely for this purpose and subject to the terms of this Notice.

TI's provision of TI Resources does not expand or otherwise alter TI's applicable published warranties or warranty disclaimers for TI products, and no additional obligations or liabilities arise from TI providing such TI Resources. TI reserves the right to make corrections, enhancements, improvements and other changes to its TI Resources.

You understand and agree that you remain responsible for using your independent analysis, evaluation and judgment in designing your applications and that you have full and exclusive responsibility to assure the safety of your applications and compliance of your applications (and of all TI products used in or for your applications) with all applicable regulations, laws and other applicable requirements. You represent that, with respect to your applications, you have all the necessary expertise to create and implement safeguards that (1) anticipate dangerous consequences of failures, (2) monitor failures and their consequences, and (3) lessen the likelihood of failures that might cause harm and take appropriate actions. You agree that prior to using or distributing any applications that include TI products, you will thoroughly test such applications and the functionality of such TI products as used in such applications. TI has not conducted any testing other than that specifically described in the published documentation for a particular TI Resource.

You are authorized to use, copy and modify any individual TI Resource only in connection with the development of applications that include the TI product(s) identified in such TI Resource. NO OTHER LICENSE, EXPRESS OR IMPLIED, BY ESTOPPEL OR OTHERWISE TO ANY OTHER TI INTELLECTUAL PROPERTY RIGHT, AND NO LICENSE TO ANY TECHNOLOGY OR INTELLECTUAL PROPERTY RIGHT OF TI OR ANY THIRD PARTY IS GRANTED HEREIN, including but not limited to any patent right, copyright, mask work right, or other intellectual property right relating to any combination, machine, or process in which TI products or services are used. Information regarding or referencing third-party products or services does not constitute a license to use such products or services, or a warranty or endorsement thereof. Use of TI Resources may require a license from a third party under the patents or other intellectual property of the third party, or a license from TI under the patents or other intellectual property of TI.

TI RESOURCES ARE PROVIDED "AS IS" AND WITH ALL FAULTS. TI DISCLAIMS ALL OTHER WARRANTIES OR REPRESENTATIONS, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING TI RESOURCES OR USE THEREOF, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ACCURACY OR COMPLETENESS, TITLE, ANY EPIDEMIC FAILURE WARRANTY AND ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, AND NON-INFRINGEMENT OF ANY THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

TI SHALL NOT BE LIABLE FOR AND SHALL NOT DEFEND OR INDEMNIFY YOU AGAINST ANY CLAIM, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ANY INFRINGEMENT CLAIM THAT RELATES TO OR IS BASED ON ANY COMBINATION OF PRODUCTS EVEN IF DESCRIBED IN TI RESOURCES OR OTHERWISE. IN NO EVENT SHALL TI BE LIABLE FOR ANY ACTUAL, DIRECT, SPECIAL, COLLATERAL, INDIRECT, PUNITIVE, INCIDENTAL, CONSEQUENTIAL OR EXEMPLARY DAMAGES IN CONNECTION WITH OR ARISING OUT OF TI RESOURCES OR USE THEREOF, AND REGARDLESS OF WHETHER TI HAS BEEN ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGES.

You agree to fully indemnify TI and its representatives against any damages, costs, losses, and/or liabilities arising out of your non-compliance with the terms and provisions of this Notice.

This Notice applies to TI Resources. Additional terms apply to the use and purchase of certain types of materials, TI products and services. These include; without limitation, TI's standard terms for semiconductor products (<http://www.ti.com/sc/docs/stdterms.htm>), [evaluation modules](#), and [samples](http://www.ti.com/sc/docs/sampterm.htm) (<http://www.ti.com/sc/docs/sampterm.htm>).

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated