

Abwägung der Vor- und Nachteile und Beschreibung der Technologien zur Verbesserung der Leistungsdichte



Jeffrey Morroni, Ph.D.
Manager - Kilby Power, Isolation and Motors
Texas Instruments

Pradeep Shenoy, Ph.D.
Manager, Power Design Services
Texas Instruments

The TI POWER logo, consisting of the text 'TI POWER' in a bold, sans-serif font, with four red dots of varying sizes positioned below the 'I' and 'P' characters.

TI POWER

Je kleiner desto besser: kleine Stromversorgungen als Erfolgsfaktor. Es gibt nie genug Platz. Statt dessen herrscht der dauerhafte Druck vor, mit immer weniger immer mehr zu erreichen. Allgemein ausgedrückt sind immer kleinere Stromversorgungen heute und künftig der Schlüssel für die Eroberung neuer Märkte und Anwendungsbereiche.

Auf einen Blick

In diesem Dokument werden die Probleme, die bei der Erhöhung der Leistungsdichte auftreten, untersucht und Technologiebeispiele bereitgestellt, die Designern dabei helfen können, diese Hindernisse zu überwinden.



1

Was ist Leistungsdichte?

Je nach Anwendung unterscheiden sich die Anforderungen an die Leistungsdichte, aber eines bleibt gleich: je kleiner die Lösung, desto höher die Leistungsdichte.



2

Wodurch wird die Leistungsdichte begrenzt?

Den Möglichkeiten der Entwickler zur Verbesserung der Leistungsdichte sind Grenzen gesetzt, vor allem durch die Verlustleistung im Wandler – Leitungsverluste, ladungsbezogene Verluste, Sperrverzögerungsverluste sowie An- und Abschaltverluste – und das Wärmeverhalten des Systems.



3

Schwierigkeiten bei der Verbesserung der Leistungsdichte überwinden

Designer müssen alle Begrenzungsfaktoren parallel angehen: Reduzierung der Schaltverluste, Verbessern der thermischen Leistung des Gehäuses, Einführung innovativer Topologien und Schaltungen und mehr passive Integration.

Der Trend hin zu größerer Leistungsdichte ist schon seit Jahrzehnten in der Branche präsent und wird wohl auch weiter andauern. **Abbildung 1** zeigt, wie stark sich die Größe von Wandlern für Stromversorgungsmodule von 6 A bis 10 A in den letzten Jahren verändert hat. Technische Entwicklungen sorgen unter Umständen für erhebliche Fortschritte bei der Verringerung der Größe oder bei der Leistungsabgabe. Jede durchgezogene Linie repräsentiert eine neue Generation von Technologien und zeigt, wie sehr sich die Leistungsdichte im Lauf der Jahre verbessert hat.

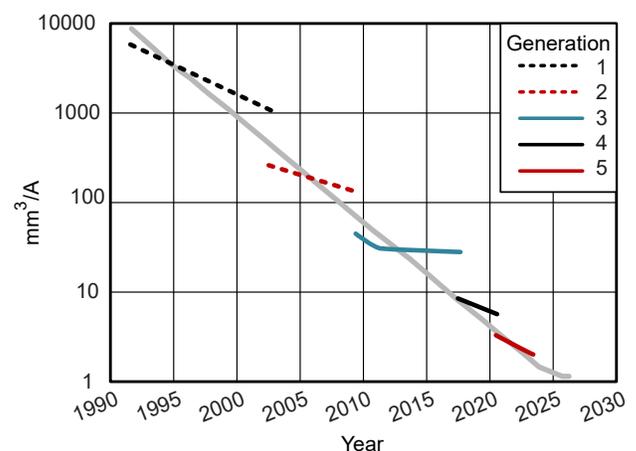


Abbildung 1. Mit jeder neuen Generation werden SV-Module im Lauf der Zeit immer kleiner.

Fortschritte bei der Leistungsdichte führen häufig zu Entwicklungen auch in anderen Bereichen, wie beispielsweise bei der Effizienz oder bei den Kosten. Allgemein gesagt führen grundlegende Effizienzverbesserungen bei der Stromumwandlung zu kleineren Lösungen. Und kleinere Lösungen zahlen

sich aus: einhergehende Materialeinsparungen, weniger Komponenten, bessere Kostenstrukturen, höhere Lösungsintegration und geringere Gesamtbetriebskosten tragen zu niedrigeren Kosten bei.

Was ist Leistungsdichte?

Leistungsdichte ist eine physikalische Größe, die bezeichnet, wie viel Leistung in einem gegebenen Raum umgesetzt werden kann. Sie steht im Verhältnis zum umgebenden Volumen und wird in Watt pro Kubikmeter (W/m^3) oder in Watt pro Kubikzoll (W/in^3) angegeben. Diese Werte ergeben sich aus der Versorgungsleistung des Wandlers und der *Gehäusegröße* (Länge mal Breite mal Höhe) der Stromversorgung, einschließlich aller enthaltenen Komponenten (siehe **Abbildung 2**). Dabei ist es möglich, die Einheiten auf den entsprechenden Leistungspegel oder die entsprechende Größe zu skalieren. Kilowatt pro Liter ist z. B. eine häufig verwendete Gütezahl (FoM, en: „Form of Merit“) für bordeigene Batterieladegeräte in Elektrofahrzeugen, weil sie Strom in Kilowatt-Einheiten (zwischen 3 kW und 22 kW) bereitstellen.

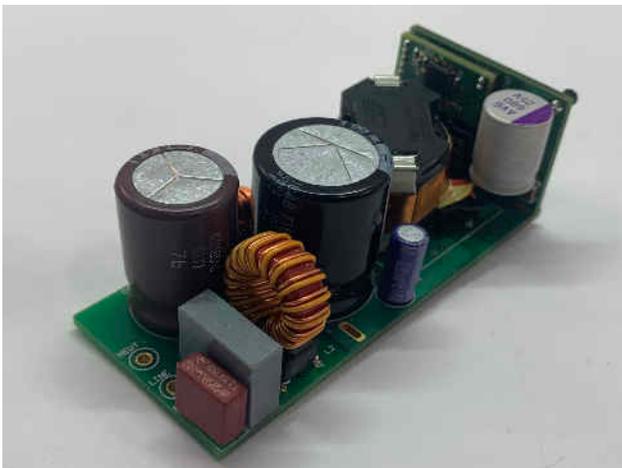


Abbildung 2. Active-Clamp-Sperrwandler mit 65 Watt in den Maßen $65 \times 28 \times 25$ mm.

Stromdichte ist eine recht sinnvolle Maßeinheit im Zusammenhang mit der Leistungsdichte und wird als Strom pro Volumeneinheit in Einheiten von Ampere pro Kubikzoll oder Ampere pro Kubikmillimeter angegeben. Dabei wird die Stromdichte anhand des Nennstrom

des Wandlers (in der Regel der Eingangs- oder Ausgangsstrom) berechnet.

Stromdichte eignet sich zumeist besser als Gütezahl für Anwendungen mit Point-of-Load-Spannungsreglern. Die Größe dieser Konstruktionen erhöht sich proportional zum Ausgangsstrom; die Ausgangsspannung ist üblicherweise niedrig und liegt bei ca. 1 V. Der Wert für die Leistungsdichte kann durch Ansetzung eines unrealistisch hohen Werts für die Ausgangsspannung künstlich erhöht werden. Da in diesem Fall die Ausgangsspannung ganz aus der Gleichung entfernt wird, ist die Stromdichte für derartige Messungen besser geeignet.

Es gibt auch Fälle, in denen die volumetrische Dichte keine wesentliche Rolle spielt. Die Leistungselektronik einer Anwendung ist möglicherweise dann nicht größenabhängig, wenn andere Elemente des Designs noch viel größer sind. Stattdessen könnte der verfügbare Platz auf der Platine der limitierende Faktor sein. Um die Leistungsdichte in einem solchen Fall zu verbessern, müssen Möglichkeiten zum Stapeln oder zur dreidimensionalen Integration von Komponenten zur Reduzierung des Platzbedarfs der Stromversorgungslösung gefunden werden. Anschließend müssen die Messwerte für den Vergleich von Lösungen auf Watt pro Quadratmillimeter bzw. Ampere pro Quadratzoll geändert werden, um das wichtigste Entwicklungsziel zu veranschaulichen (siehe **Abbildung 3**).

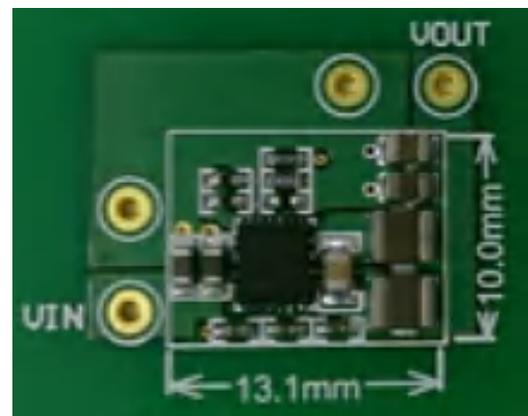


Abbildung 3. Ein Point-of-Load-Wandler mit 10 A in der Größe von $13,1 \times 10$ mm ergibt eine Stromdichte von 76 mA/mm^2 .

Je nach Anwendung kann die Leistungsdichte auf unterschiedliche Weise angegeben werden, das Ergebnis bleibt aber gleich: je kleiner die Lösung, desto höher die Leistungsdichte. Jetzt müssen wir uns die Frage stellen, was wir tun können, um die Leistungsdichte zu erhöhen.

Wodurch wird die Leistungsdichte begrenzt?

Seit Jahren bemühen sich Experten und Forscher darum, Möglichkeiten zur Steigerung der Leistungsdichte zu finden. Genau darin liegt die Herausforderung. Zumeist wurde sich darauf konzentriert, die für die Energieumwandlung verwendeten passiven Bauteile zu verkleinern. Wie aus **Abbildung 4** hervorgeht, benötigen Induktoren, Kondensatoren, Transformatoren und Kühlkörper in bei der Stromversorgung normalerweise meisten Platz. Halbleiterschalter und Steuerschaltkreise sind erheblich kleiner und besser integriert.

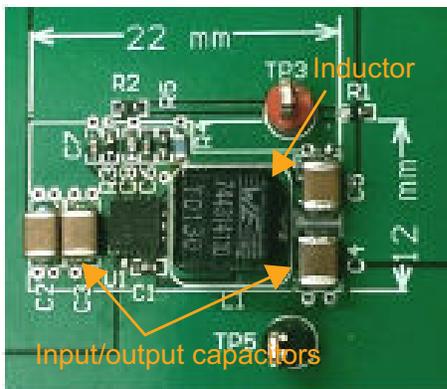


Abbildung 4. Passive Komponenten wie Induktoren und Kondensatoren können sehr viel Raum einnehmen.

Wie kann die Größe von passiven Bauteilen verringert werden? Eine einfache Lösung besteht darin, die Schaltfrequenz zu erhöhen. Die passiven Bauteile in Schaltwandlern speichern Energie und geben diese mit jedem Schaltzyklus ab. Wenn wir die Schaltfrequenzen erhöhen, wird für jeden dieser Schaltzyklen weniger Energiespeicher gebraucht. Beispiel: **Gleichung 1** als Entwicklungsgleichung für den Induktor in einem Abwärtswandler:

$$L = \frac{D \times V_L}{f_{SW} \times \Delta I_L} \quad (1)$$

Wo

- L ist die Induktivität
- D ist die relative Einschaltdauer
- ΔI_L ist die Welligkeit des Induktorstroms
- f_{SW} ist die Schaltfrequenz
- V_L ist die Spannung über den Induktor

Die benötigte Induktivität (L) ist umgekehrt proportional zur Schaltfrequenz (f_{SW}). Mit zunehmender Schaltfrequenz nimmt die Induktivität ab. Geringere Induktivität führt dazu, dass kleinere Induktoren verwendet werden können und Platz eingespart wird. **Abbildung 5** zeigt den Größenunterschied der benötigten Induktoren in einer 3-A-/36-V-Wandlerschaltung bei 400 kHz gegenüber 2 MHz.

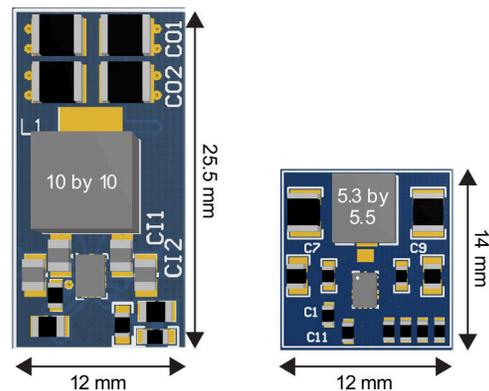


Abbildung 5. Größenvergleich eines 3-A-/36-V-Wandlers mit 400 kHz (links) und 2 MHz (rechts).

Es gibt aber auch noch andere Vorteile bei der Verwendung einer höheren Schaltfrequenz. Durch die Erhöhung der Schaltfrequenz lässt sich die Bandbreite der Regelkreise erhöhen, wodurch die Einschwingleistung mit geringerer Ausgangskapazität erreicht werden kann. Filter für elektromagnetische Störungen (EMI) mit Differenzmodus können mit weniger Induktivität und Kapazität entwickelt werden. Somit können kleinere Transformatoren verwendet werden, ohne das magnetische Kernmaterial zu sättigen.

Warum also nicht einfach die Schaltfrequenz erhöhen? Wie sich herausstellt, ist dies leichter gesagt als getan. Auch wenn Sie alle passiven Elemente,

die in Leistungswandlern verwendet werden, auf ein ganz geringes Maß verkleinert haben, gibt es auch immer noch andere Möglichkeiten, die Größe der Stromversorgungslösung zu verringern. Leistungsschalter, Gate-Treiber, Modus-Setting-Widerstände, Rückkopplungs-Netzwerkkomponenten, EMI-Filter, Stromsensor-Komponenten, Schnittstellen-Schaltungen, Kühlkörper und viele andere Komponenten besetzen wertvollen Platz. In all diesen Bereichen des Gesamtleistungsdesigns können innovative Ideen angewendet werden, um die Leistungsdichte zu erhöhen. Lassen Sie uns gemeinsam ansehen, welche Komponenten dafür verantwortlich sind, dass wir die Leistungsdichte nicht so einfach erhöhen können.

Einschränkung der Leistungsdichte: Schaltverluste

Obwohl die Erhöhung der Schaltfrequenz die Leistungsdichte erhöhen kann, gibt es einen Grund, warum Stromwandler heute normalerweise nicht höher als bis zum Megahertz-Bereich schalten. Die Erhöhung der Schaltfrequenz hat einen unerwünschten Nebeneffekt, nämlich erhöhte Schaltverluste und einen damit verbundenen Temperaturanstieg. Dies wird hauptsächlich durch einige dominante Schaltverluste verursacht.

Um diese Schaltverluste verstehen zu können, sind zunächst einige branchenübliche Begriffe zu erklären. Bei Halbleiterbauteilen hängt die Ladungsmenge üblicherweise mit dem Durchlasswiderstand zusammen. Ein geringerer Widerstand am Durchlass führt zu höherer Gate-Ladung und parasitärer Kapazität. Dieses Gleichgewicht zwischen Widerstand und Ladung wird häufig durch den als Durchlasswiderstand des Geräts definierten RQ-FoM quantifiziert, multipliziert mit der Gesamtladung, die an das Terminal geliefert werden muss, um den Baustein bei einer Betriebsspannung zu schalten. Darüber hinaus wird der Bereich, den ein Baustein einnimmt, um einen Zielwiderstand zu erreichen, oft als „Rsp“ bezeichnet. Leitungsverluste können durch Verringerung des Durchlasswiderstands

($R_{DS(on)}$) des MOSFET reduziert werden. Allerdings steigen durch die Verringerung des Einschaltwiderstands auch die durch die Schaltung bedingten Verluste des Geräts und damit auch Platzbedarf und Kosten.

Je nach Implementierung und Anwendung können sich die verschiedenen Schaltverluste unterschiedlich auf die Gesamtverlustleistung auswirken. Einzelheiten zu den einzelnen Verlustarten siehe Anwendungshinweis **Leistungsverlustberechnung unter Berücksichtigung der Common-Source-Induktivität bei Synchron-Abwärtswandlern**. Für die Zwecke des vorliegenden Dokuments werden die wichtigsten limitierenden Faktoren zu den Verlustkomponenten am Beispiel eines Abwärtswandlers erläutert.

Begrenzungsfaktor Nr. 1: Ladungsbezogene Verluste

Bei jedem festgeschalteten DC/DC-Wandler benötigt das Laden und Entladen von parasitären Kapazitäten im System eine gewisse Menge Energie. Für eine gegebene Schalttechnik und Nennspannung werden diese Verluste nach **Gleichung 2** und **Gleichung 3** wie folgt geschätzt:

$$P_{SW} = \frac{1}{2} \times C_{DS} \times (V_{DS})^2 \times f_{SW} \quad (2)$$

$$P_{GATE} = Q_G \times V_G \times f_{SW} \quad (3)$$

Wo

- C_{DS} ist die Drain-Source-Kapazität des MOSFET
- V_{DS} ist die Drain-Source-Spannung des MOSFET
- f_{SW} ist die Schaltfrequenz
- Q_G ist die Gate-Ladung
- V_G ist die Gate-Source-Spannung

Wie aus **Gleichung 2** und **Gleichung 3** hervorgeht, können diese Verluste vor allem durch die Verringerung der Schaltfrequenz gemindert (nicht erwünscht), die ladungsbedingten FoMs (Q_G und C_{DS}) des MOSFET verbessert oder ein Kompromiss zwischen Leitungsverlusten und Schaltverlusten gefunden werden.

Begrenzungsfaktor Nr. 2: Sperrverzögerungsverluste

In einem Abwärtswandler tritt eine Sperrverzögerung auf, wenn der High-Side-MOSFET eingeschaltet wird, während die Bodydiode des Low-Side-MOSFET Strom leitet, wodurch der Strom der Low-Side-Diode gezwungen wird, schnell auf den High-Side-MOSFET überzugehen. Bei diesem Übergang wird zur Entfernung der Minoritätsladung der Low-Side-Diode, die einen direkten Schaltverlust verursacht, ein Strom benötigt; siehe **Gleichung 4**.

$$E_{RR} = (V_{IN} \times I_L \times t_{RR}) + (V_{IN} \times Q_{RR}) \quad (4)$$

Einer der besten Ansätze zur Verringerung der Auswirkungen der Sperrverzögerung von Dioden besteht darin, die gespeicherte Ladung (Q_{RR}) durch ein optimiertes MOSFET-Design zu reduzieren oder die Totzeit der steigenden Flanke zu verringern bzw. zu eliminieren, sodass die Auswirkungen des Verlusts komplett rückgängig gemacht werden.

Begrenzungsfaktor 3: Verluste beim Ein- und Ausschalten

Parasitäre Schleifeninduktivität kann zu einer Reihe von schaltbedingten Verlusten führen, die den Wirkungsgrad erheblich senken können. Denken wir erneut an unseren Abwärtswandler mit dem High-Side-MOSFET, der den Induktor-Strom führt. Durch das Ausschalten des High-Side-Schalters wird der Strom durch die parasitäre Induktivität unterbrochen. Die Transientenströme (di/dt) verursachen zusammen mit der parasitären Schleifeninduktivität eine Spannungsspitze. Je höher der di/dt -Wert ist, desto niedriger sind die Schaltverluste, was zu einer höheren Spannungsbelastung der Bauteile führt. Bei manchen Abschaltgeschwindigkeiten kommt es sogar zum Ausfall des High-Side-Schalters des Abwärtswandlers. Daher müssen Sie die Schaltgeschwindigkeiten sorgfältig steuern, um den Wirkungsgrad zu maximieren und gleichzeitig den DC/DC-Wandler im sicheren Betriebsbereich zu halten. Weitere Informationen siehe

Anwendungshinweis **Verständnis der SOA-Kurven für den Betrieb bei hohen Ausgangsströmen und -temperaturen**.

Darüber hinaus kann die Verringerung der Drain-Ladung des High-Side-MOSFET auch zu zusätzlichen Spannungsspitzen führen, da im Induktor-Kondensator-Netzwerk weniger Kapazität zur Aufnahme der in der parasitären Schleifeninduktivität gespeicherten Energie vorhanden ist. Dies stellt eine zusätzliche Herausforderung dar, da es am besten ist, die Drain-Ladung so gering wie möglich zu halten, um die zuvor bereits erwähnten ladungsbedingten Verluste zu reduzieren. Die Verringerung der Gesamtverluste im Zusammenhang mit diesen Parasitäreffekten erfordert in der Regel die Reduzierung der Schleifeninduktivität selbst sowie die Verwendung anderer Gate-Treiber-Techniken.

Was schränkt Leistungsdichte ein: thermische Leistung

Auch die thermische Leistung bzw. das Wärmeverhalten des Systems wirkt sich stark auf die generelle Leistungsdichte aus. Je besser das Gehäuse Wärme abgibt, desto mehr Leistungsverluste können normalerweise toleriert werden, ohne dass starke Temperaturanstiege zu beobachten sind. Diese Faktoren werden üblicherweise zusammen mit sorgfältigen Schätzungen der Anwendungsbedingungen in Datenblattparametern wie dem Wärmewiderstand Kontaktstelle-Umgebung ($R_{\theta JA}$) erfasst. Weitere Informationen zu üblichen Wärmeimpedanzwerten in MOSFET-Datenblättern sind dem Video zu entnehmen: **MOSFET-Datenblätter verstehen: Wärmeimpedanz**

Das Ziel bei der thermischen Optimierung eines Gehäuses und einer Leiterplatte (PCB) besteht darin, den Temperaturanstieg bei vorhandener Verlustleistung des Leistungswandlers zu verringern. Im Zuge der Fortschritte bei Miniaturisierung und Kostensenkung verringert sich der Platzbedarf von Wandler, Leistungsschalter und Gate-Treiber. Dadurch wurde die thermische Auslegung auf Systemebene zunehmend schwieriger, da sich die kleineren Silizium- und

Gehäusegrößen, wie in **Abbildung 6** beschrieben, normalerweise nachteilig auf das Wärmeverhalten auswirken. Mit immer kleiner werdendem Die-Bereich verschlechtert sich der zugehörige Wärmewiderstand Kontaktstelle-Umgebung ($R_{\theta JA}$) exponentiell.

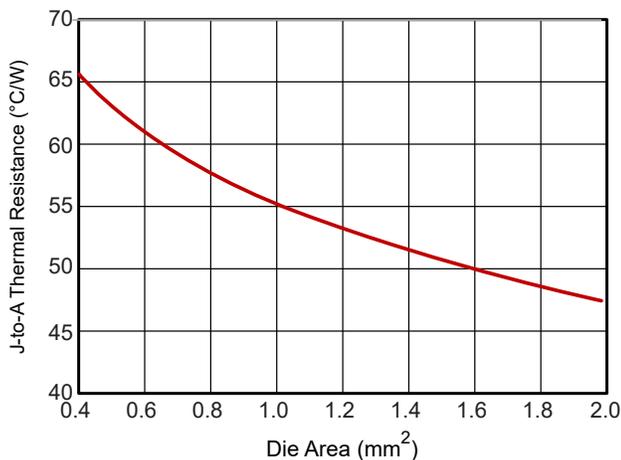


Abbildung 6. Gehäuse $R_{\theta JA}$ vs. Die-Bereich.

In dieser Abbildung ist deutlich zu erkennen, dass sich das erwartete Wärmeverhalten durch die Verbesserung von Gehäusegröße, Die-Bereich und Gesamt-Leistungsdichte rapide verschlechtert, sofern Innovationen bei der Verbesserung des Wärmeverhaltens des Gehäuses (mehr Wärme abgeben) und der Verringerung von Leistungsverlusten (weniger Wärme erzeugen) keine Priorität erhalten.

Schwierigkeiten bei der Verbesserung der Leistungsdichte überwinden

Selbst wenn Sie sich auf nur einen der Faktoren aus dem vorhergehenden Kapitel konzentrieren, können Sie eine Verbesserung der Leistungsdichte erreichen. Um früher unerreichbare Leistungsdichte-Werte zu erreichen, müssen Sie jedoch alle Begrenzungsfaktoren parallel angehen: geringere Schaltverluste, verbesserte thermische Leistung des Gehäuses, Einführung innovativer Topologien und Schaltkreise und nicht zuletzt eine gute Integration der Bauteile.

Innovationen zur Überwindung von Schaltverlusten

Sie müssen definitiv in Ihre Halbleitertechnologie investieren, um eine herausragende Geräteleistung und wirklich gute FoMs zu erreichen. Dazu gehören Innovationen zur Verbesserung vorhandener Technologien oder die Entwicklung neuer Materialien mit einer grundlegend besseren Leistung, wie z. B. die Galliumnitrid (GaN)-Technologie für Anwendungen mit höherem Spannungsbereich.

In **Abbildung 7** werden zwei Abwärtsrichter mit 3,3-V bzw. 1,8-V miteinander verglichen, bei denen verschiedene Stromversorgungs-Prozesstechnologien von Texas Instruments (TI) zum Einsatz kommen. Die Komponente **TPS54319** von TI nutzt den bisherigen Stromversorgungsknoten von TI, die **TPS62088** dagegen den neuesten Stromversorgungsknoten von TI mit niedrigeren RQ FoMs. Wie die Wirkungskurve zeigt, kann der TPS62088, im Vergleich zum TPS54319 bei 2 MHz, bei praktisch dem gleichen Wirkungsgrad bei 4 MHz umschalten. Dadurch kann die Größe des externen Induktors um die Hälfte verringert werden. Da der neue Stromversorgungsknoten von TI auch eine deutliche Verringerung des R_{sp} ermöglicht, verringert sich die gesamte Gehäusegröße von 4 auf 0,96 mm². Obwohl die somit erreichte geringere Gehäusegröße aus Sicht der Leistungsdichte sehr attraktiv ist, bringt sie Herausforderungen durch die einhergehende Temperaturerhöhung mit sich, die wir in einem der nächsten Abschnitte ansprechen werden.

Der TPS54319 schaltet bei 2 MHz um und nutzt den vorherigen Stromversorgungsknoten von TI, der TPS62088 mit dem neuesten Stromversorgungsknoten von TI mit verbesserten Schalt-FoMs schaltet dagegen bei 4 MHz um.

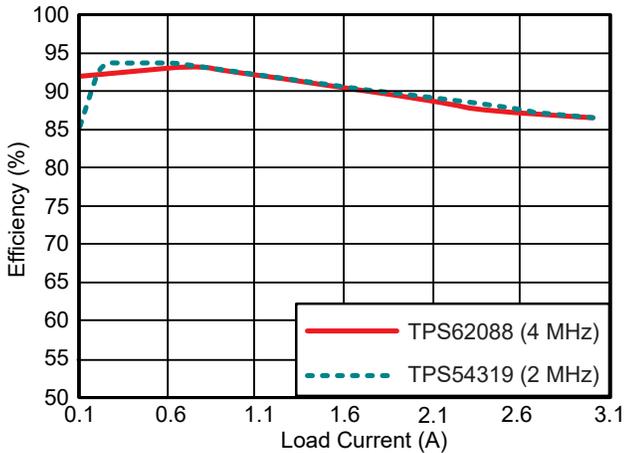
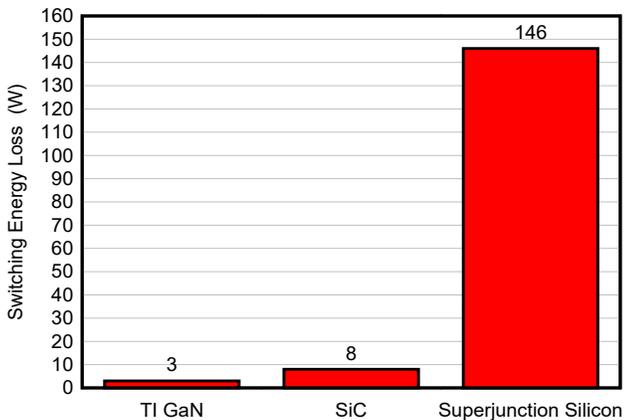


Abbildung 7. Vergleich der DC/DC-Effizienz bei einem Abwärtswandler von 3,3 V auf 1,8 V.

Die einzigartige Kombination von ausbleibender Sperrverzögerung, niedriger Ausgangsladung und hoher Anstiegsrate bei Galliumnitrid ermöglichen neue Totem-Pole-Topologien, wie z. B. brückenlose Leistungsfaktorkorrekturen. Diese Topologien weisen eine höhere Effizienz und Leistungsdichte als Silizium-MOSFETs auf. **Abbildung 8** zeigt einen direkten Vergleich der GaN-Technologie von TI bei 600 V im Vergleich mit einigen der branchenweit besten Siliziumkarbid (SiC)- und Superjunction-Halbleiterbausteine. Die GaN-Technologie von TI bietet wesentlich geringere Verluste und ermöglicht dadurch höhere Frequenzen.



$V_{in} = 400\text{ V}$

$T_j = 110\text{ °C}$

$I_{in} = 10\text{ A}$

Abbildung 8. Vergleich der Schaltenergieverluste.

Innovationen für die Thermik von Gehäusen

Die Fähigkeit, einem integrierten Schaltkreis (IC)-Gehäuse Wärme zu entziehen, wirkt sich direkt auf die Leistungsdichte aus. Wie bereits erwähnt, wird dieses Problem aufgrund der Verringerung der Gehäusegrößen in Anwendungen jeglicher Art immer wichtiger. Außerdem sind Halbleiter in typischen Stromkonverteranwendungen die Bauelemente, die sich am schnellsten erwärmen können, insbesondere dann, wenn der Rsp schnell sinkt.

TI hat in die Entwicklung von HotRod™™-Gehäusen investiert, in denen die typischen QFNs (Quad Flat No Leads-Gehäuse) mit Bond-Drähten durch ein Flip-Chip-Gehäuse ersetzt wurden. In **Abbildung 9** und **Abbildung 10** ist zu sehen, wie ein HotRod-QFN bei gleicher Fläche wie ein QFN ohne die Bonddrähte auskommt. Dies führt zu einer erheblichen Verringerung der für Flip-Chip-Gehäuse typischen parasitären Schleifeninduktivität, wobei einige der Vorteile der thermischen Leistung von QFN-Gehäusen erhalten bleiben. Im HotRod-QFN-Gehäuse besteht eine Verbindung zwischen Stanzgitter und Die.

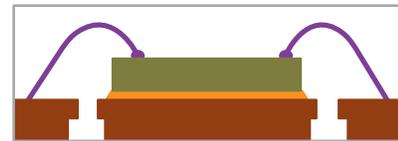


Abbildung 9. Standard-Bonddraht-QFN-Gehäuse mit exponiertem Pad.

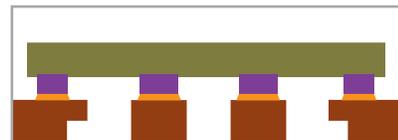


Abbildung 10. HotRod-Verbindungsgehäuse (Flip-Chip-on-Lead) im QFN-Gehäuse.

Eine der Herausforderungen, die bei der Verwendung von HotRod-Gehäusen auftritt, besteht darin, dass es schwieriger ist große Die-Attach-Pads (DAPs) zu bauen, die in der Regel sehr hilfreich bei der Verbesserung der Gehäuse-Thermik sind. Um diese Herausforderung zu meistern, hat TI seine HotRod-QFN-Gehäuse vor kurzem verbessert. So können die bestehenden Vorteile von

QFN-Gehäusen genutzt werden und gleichzeitig große Gehäuse mit DAPs gebaut werden.

Abbildung 11, **Abbildung 12** und **Abbildung 14** zeigen den Synchronwandler **LM60440** mit 4 A, bei dem mit der neuen Technologie das Wärmeverhalten verbessert werden konnte. Sie können erkennen, dass es in der Mitte des Gehäuses genug Platz für einen großen DAP gibt. Dieser DAP verkräftet einen um ca. 15% höheren Temperaturanstieg als die DAPs der vorherigen Generation. Weitere Informationen zur Entwicklung dieser Gehäuse finden Sie im Artikel unseres Analog Design Journal **Entwicklung mit kleinen DC/DC-Wandlern: HotRod™ QFN- vs. Enhanced HotRod™ QFN-Gehäuse**.

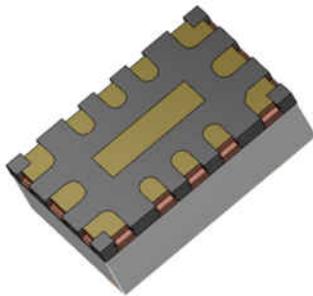


Abbildung 11. Verbessertes HotRod-QFN-Gehäuse mit großem DAP.

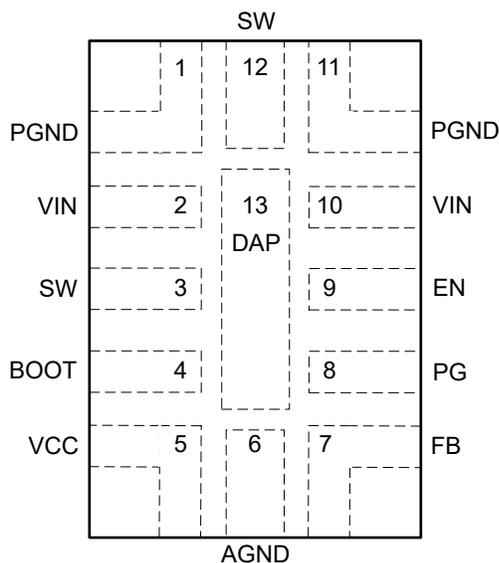


Abbildung 12. Anschlussbelegung des LM60440 in Enhanced HotRod QFN.

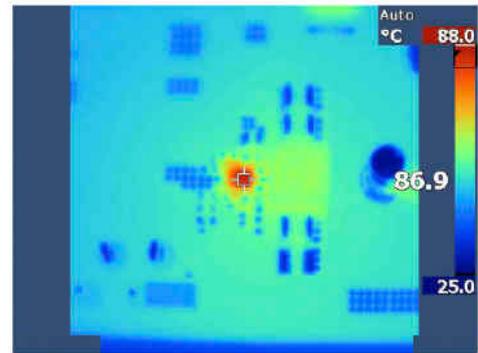


Abbildung 13. Wärmeverhalten eines herkömmlichen HotRod-Gehäuses.

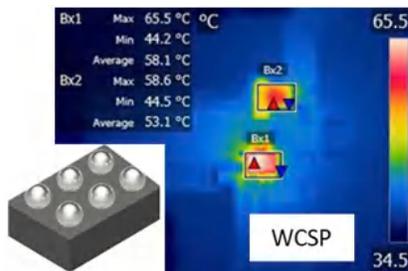


Abbildung 14. Wärmeverhalten des LM60440 mit DAP im Enhanced HotRod QFN-Gehäuse bei einer durchschnittlichen Temperatur von 71,1 °C.

Darüber hinaus bevorzugen viele Entwickler oberflächenmontierte Gehäuse mit Small-Outline Transistor (SOT), da diese in der Regel kostengünstig sind und sich die Anschlussleitungen einfacher montieren lassen. TI hat verbesserte Prozesstechnologie und Schaltkreis-IP mit dem SOT-563-Gehäuse gekoppelt, sodass die geforderte höhere Stromdichte durch eine flache, zweireihige Anordnung der Pins ermöglicht wird. Ein aktuelles Beispiel ist der synchrone Abwärtswandler **TPS566242** mit 3 bis 16 V. Das Gerät unterstützt bis zu 6 A Dauerstrom bei 98 % Tastverhältnis in einem SOT-563-Gehäuse (1,6 × 1,6 mm).

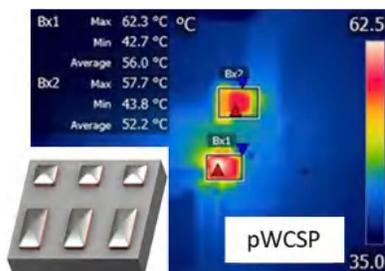
Auch bei Wafer-Chip-Scale-Gehäusen (WCSPs) wird der Großteil der Wärme direkt hinunter zur Leiterplatte geleitet. Je größer der Bump-Bereich in einem WCSP, desto besser ist die thermische Leistung. TI hat vor Kurzem ein PowerCSP™™-Gehäuse entwickelt und auf den Markt gebracht. Diese Art von Gehäusen soll

durch Ersetzen der für WCSPs typischen kreisförmigen Bumps durch große Lötstäbe Wärmeverhalten und elektrische Leistung verbessern. **Abbildung 15** zeigt die Umsetzung dieser Technologie im **TPS62088**. **Abbildung 15** zeigt das Standard-WCSP-Gehäuse, in **Abbildung 16** ist dagegen das gleiche Gerät mit einem PowerCSP-Gehäuse abgebildet. Es ist gut zu erkennen, dass der Temperaturanstieg ohne weitere Änderungen am System um etwa 5 % verringert wird.



$V_{in} = 5 \text{ V}$ $V_{out} = 1,8 \text{ V}$
 $I_{out} = 3 \text{ A}$ $T_A = 25 \text{ °C}$
 Messpunkt: Bx1

Abbildung 15. Wärmeverhalten der Version TPS62088YFP WCSP.



$V_{in} = 5 \text{ V}$ $V_{out} = 1,8 \text{ V}$
 $I_{out} = 3 \text{ A}$ $T_A = 25 \text{ °C}$
 Messpunkt: Bx1

Abbildung 16. TPS62088YWC PowerCSP-Version.

Designinnovationen für erweiterte Schaltkreise

Eine nachteilige Auswirkung von niedrigerem R_{sp} und niedrigeren RQ-FoMs ist der Einfluss, den eine geringere Drain-Ladung auf die Übergangsverluste hat. In **Abbildung 17** ist zu sehen, dass der Abschaltverlust des

hier abgebildeten Abwärtswandlers bei einer festgelegten Anzahl von Spannungsüberschüssen bei Verringerung der Drain-Ladung erheblich steigt. In Anbetracht dieser Tatsache wird geistiges Eigentum für neue und erweiterte Gate-Treiber benötigt, um die MOSFETs trotz der verstärkten Entwicklung verbesserter RQ-FoM-MOSFETs so schnell wie möglich zu schalten und gleichzeitig in einem sicheren Betriebsbereich zu halten. Mit der Reduzierung der Drain-Ladung, nimmt die Ausschalt-Energie zu, um die Drain-to-Source-Spannungsbelastung konstant zu halten.

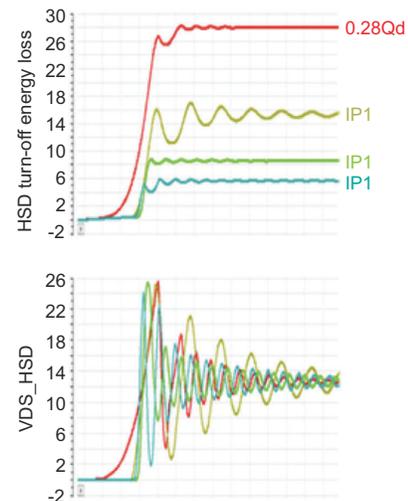


Abbildung 17. Vergleich der Abschaltverluste bei verschiedenen MOSFET-Technologien.

In diesen Bereichen hat TI vor kurzem eine Familie von Gate-Treibern entwickelt, die eine sehr schnelle Schaltung trotz MOSFETs mit niedrigem RQ-FoM ermöglicht. Dies führt zu geringeren Ladungs- und Übergangsverlusten und sorgt dafür, dass die MOSFETs in ihrem sicheren Betriebsbereich bleiben. Aus dem Vergleich von **Abbildung 18** und **Abbildung 19** geht hervor, dass der Energieverlust beim Abschalten um bei gleichmäßiger Spitzenspannung um 79 % gehalten werden kann. In einigen Entwicklungen kann, wie in **Abbildung 19** gezeigt, durch diese Verringerung einen Spitzenwirkungsgrad von bis zu 4 % erzielt werden.

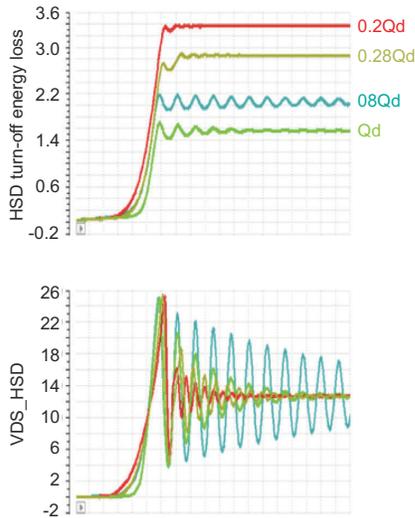


Abbildung 18. Vergleich der Gate-Treiber-IP, die eine geringe Drain-Ladung und geringe Abschaltenergie ermöglicht.

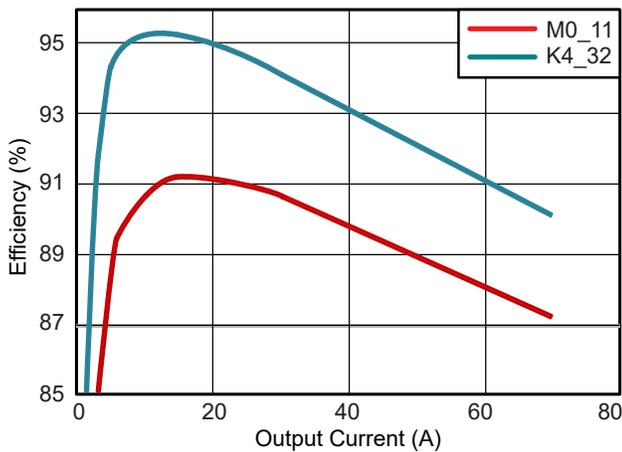


Abbildung 19. Auswirkungen der Gate-Treiber-IP auf die Systemeffizienz.

Neben der Entwicklung und Anwendung erweiterter Gate-Treiber-Technologien können mithilfe von Innovationen in der Topologie-Technologie erhebliche Verbesserungsmöglichkeiten der Werte der Leistungsdichte erzielt werden. **Abbildung 20** zeigt eine vierstufige (FC4L)-Wandlertopologie, die eine Reihe von Vorteilen für die Leistungsdichte ermöglicht, beispielsweise bessere Geräte-FoMs durch niedrigere Bauteil-Spannungswerte, geringere Magnetfilter und eine bessere thermische Verteilung. Wie aus **Abbildung 21** ersichtlich ist, können diese Vorteile in eine höhere Leistungsdichte umgesetzt werden. Im Vergleich zu anderen Topologien mit SiC bietet die Lösung von TI durch den Einsatz dieser speziellen

Topologie neben den Vorteilen durch GaN und fortschrittlichen Gehäusetechnologien eine erhebliche Größenreduzierung. Die beste Leistungsdichte bietet die FC4L-GaN-Lösung von TI.

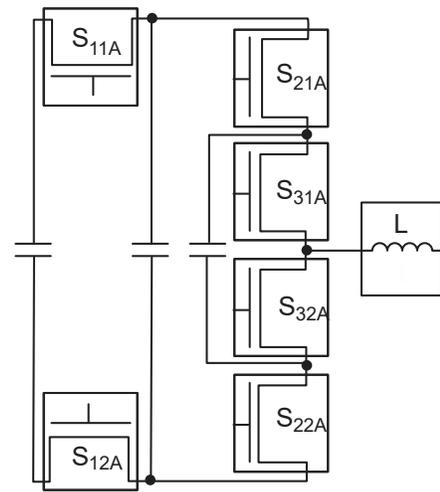


Abbildung 20. Vierstufige Wandler-Topologie mit GaN-Schaltern für fliegende Kondensatoren.

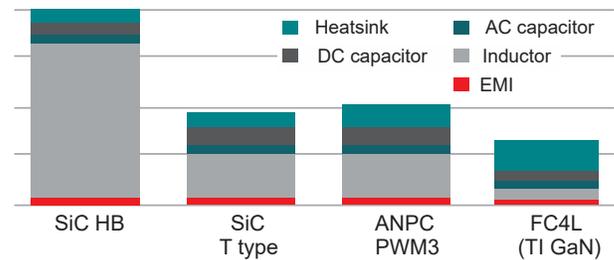


Abbildung 21. Gesamtvolumen von Topologien und Switchtypen.

Innovationen bei der Integration

Als Letztes sehen wir uns die Integration als wichtigen Faktor zur Verbesserung der Leistungsdichte an. Die kostengünstige Integration reduziert Parasitäreffekte, die Materialliste wird kürzer, sie ermöglicht höhere Effizienz und spart Platz. Integration wird auf verschiedene Aspekte des Power-Managements angewendet. Durch gute Integration können mehr elektrische Schaltungen in einen IC eingebaut, mehr Komponenten in einem Gehäuse untergebracht oder andere Elemente mithilfe von mechanischen oder physischen Mitteln einer Lösung zur Verbesserung der Leistungsdichte hinzugefügt werden. Einige Paradebeispiele in diesem Bereich sind Treiber mit integrierten GaN-FETs, Kondensator-

Integration zur Reduzierung von Schleifeninduktivität und dreidimensionales Stacking von passiven Komponenten.

Die Verwendung von Gate-Treibern mit Schaltleistungs-FETs bietet viele Vorteile. Die Induktivität der Gate-Treiber-Schleife verringert sich, was höhere Schaltgeschwindigkeiten, einen stabileren Betrieb und weniger Bauteile ermöglicht. Vor allem GaN-FETs profitieren von dieser Integration. In Geräten wie dem **LMG3522R030-Q1** sind zusätzliche Funktionen wie Überstromschutz, Übertemperaturschutz und Überwachung (siehe **Abbildung 22**) enthalten. Diese Integration vereinfacht die Power-Management-Lösung erheblich und ermöglicht es Designern, GaN-Technologie optimal zu nutzen.

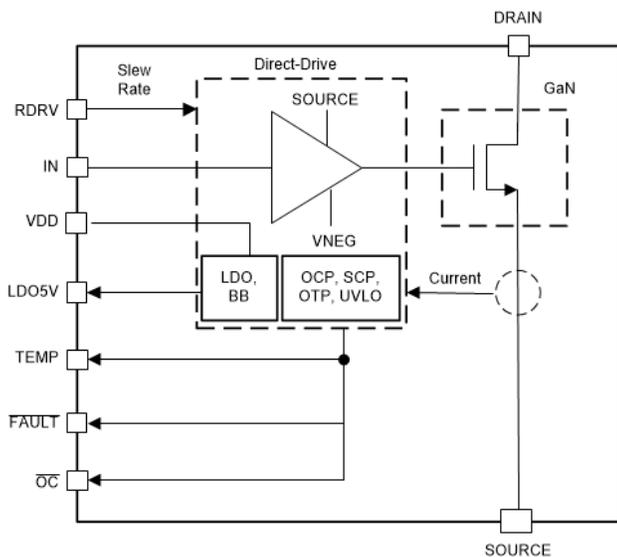


Abbildung 22. Treiber-, Schutz- und Überwachungsfunktionen integriert in einem GaN-Schalter am LMG3522R030-Q1.

Eine weitere Möglichkeit der Integration besteht darin, auch passive Komponenten im IC-Gehäuse zu integrieren. In **Abbildung 23** ist die Integration von hochfrequenten Entkopplungskondensatoren, eine der im LMQ61460-Q1 verwendeten Techniken, dargestellt. Die Integration der Kondensatoren kann die Effizienz verbessern, indem die parasitäre Induktivität der kritischen Schleifen verringert und das EMI-Verhalten reduziert wird. Diese Stromversorgungslösung kann auch die Schaltzeiten erhöhen, ohne die Stabilität des Systems zu beeinträchtigen oder thermische Grenzwerte

zu überschreiten, was zu höheren Schaltfrequenzen und kleineren Lösungen bei geringerer EMV-Filterung führt. Dank der Integration von Magnetkomponenten kann der UCC14240 eine isolierte Bias-Stromversorgung ohne externen Transformator bereitstellen. Dieser Ansatz reduziert Größe, Komplexität und EMI.

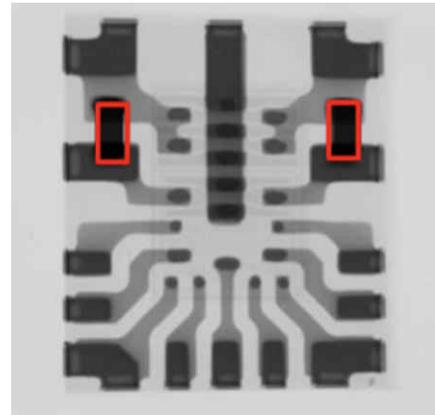


Abbildung 23. Röntgenfoto des LMQ61460-Q1, die integrierten Bypass-Kondensatoren sind hervorgehoben.

Ein letztes Beispiel für gute Integration ist die dreidimensionale Stapelung von Bauteilen, die häufig in Stromversorgungsmodulen mit integrierten passiven Bauteilen auftritt. In **Abbildung 24** wird die Komponente **TPS82671** als Beispiel verwendet. Dieser Baustein bettet den Stromversorgungs-IC in ein Laminatsubstrat ein und weist einen Induktor sowie Ein- und Ausgangskondensatoren auf der Oberseite auf. Diese unglaublich kleine Lösung benötigt keine zusätzlichen Komponenten. Wir sehen hier, wie ein einfaches Integrationskonzept erstaunliche Ergebnisse erzielen, Platz auf der Leiterplatte sparen und die Stromversorgungslösung vereinfachen kann.

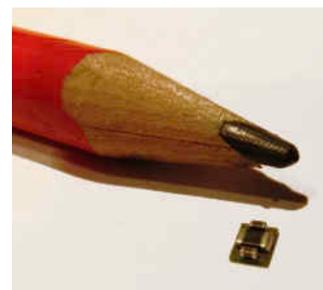


Abbildung 24. Winziges Stromversorgungsmodul mit integriertem Stromversorgungs-IC, Induktor und Kondensatoren.

Fazit

Es ist klar, dass der neueste Trend beim Stromversorgungsdesign hin zu immer größerer Leistungsdichte geht. Aber es ist zu beachten, dass es bei der Entwicklung immer kompakterer Stromversorgungslösungen wichtige Einschränkungen gibt. Die Überwindung von Leistungsverlusten und thermischen Leistungsproblemen erfordert Innovationen bei den Schalteigenschaften, IC-Gehäusen, im Schaltungsdesign und bei der Integration. Jedes dieser Elemente kann für sich genommen bereits erhebliche Verbesserungen beim Stromversorgungsdesign ermöglichen. Sie können die Leistungsdichte aber noch weiter deutlich verbessern, wenn Sie die Technologien jeder dieser Kategorien kombinieren.

Stellen Sie sich nun das beste Stromversorgungsprodukt vor: mit den besten FoMs und branchenführenden Wärmeableitungsfunktionen, das mehrstufige Topologien mit der geringsten Schleifeninduktivität durch passive Integration verwendet. Durch die perfekte Kombination verschiedener technischer Entwicklungen entstehen so Bauteile, die für bahnbrechende Innovationen im Bereich der Leistungsdichte für Anwendungen sorgen.

Mit den fortschrittlichen Prozess-, Gehäuse- und Schaltungstechnologien von TI können Sie jetzt mehr Leistung auf weniger Raum erzielen und bei geringeren Systemkosten die Systemfunktionalität verbessern. Weitere Informationen siehe [ti.com/powerdensity](https://www.ti.com/powerdensity).

Weitere Ressourcen

- [Batterielader-IC](#)
- [Abwärts/Aufwärts- und invertierende Regler](#)
- [Galliumnitrid \(GaN\) ICs](#)
- [Isolierte Bias-Stromversorgungen](#)
- [Isolierte Gate-Treiber](#)
- [LED-Treiber](#)
- [Linearregler \(LDO\)](#)
- [Mehrkanal-ICs \(PMIC\)](#)
- [AC/DC- und isolierte DC/DC-Controller und Wandler](#)
- [Leistungsschalter](#)
- [Abwärtswandler \(Buck\)](#)
- [Aufwärtswandler \(Boost\)](#)
- [USB-Typ-C- und USB-Stromversorgungs-ICs](#)

Wichtiger Hinweis: Die hier beschriebenen Produkte und Dienstleistungen von Texas Instruments Incorporated und seinen Tochterunternehmen werden unter den Standard-Verkaufsbedingungen von TI verkauft. Den Kunden wird empfohlen, aktuelle und vollständige Informationen zu TI-Produkten und Dienstleistungen einzuholen, bevor sie Bestellungen platzieren. TI übernimmt keine Haftung für Anwendungsunterstützung, Kundenanwendungen oder Produktdesigns, Softwareleistung oder Verletzung von Patenten. Die Veröffentlichung von Informationen über Produkte oder Dienstleistungen anderer Unternehmen bedeutet keine Genehmigung, Garantie oder Empfehlung seitens TI.

HotRod™™ and PowerCSP™™ are trademarks of Texas Instruments.
All trademarks are the property of their respective owners.

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

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

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

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

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

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

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