

Zukünftige Trends bei der Wahl von Leistungshalbleiter-Bauelementen

# Technologien richtig einsetzen



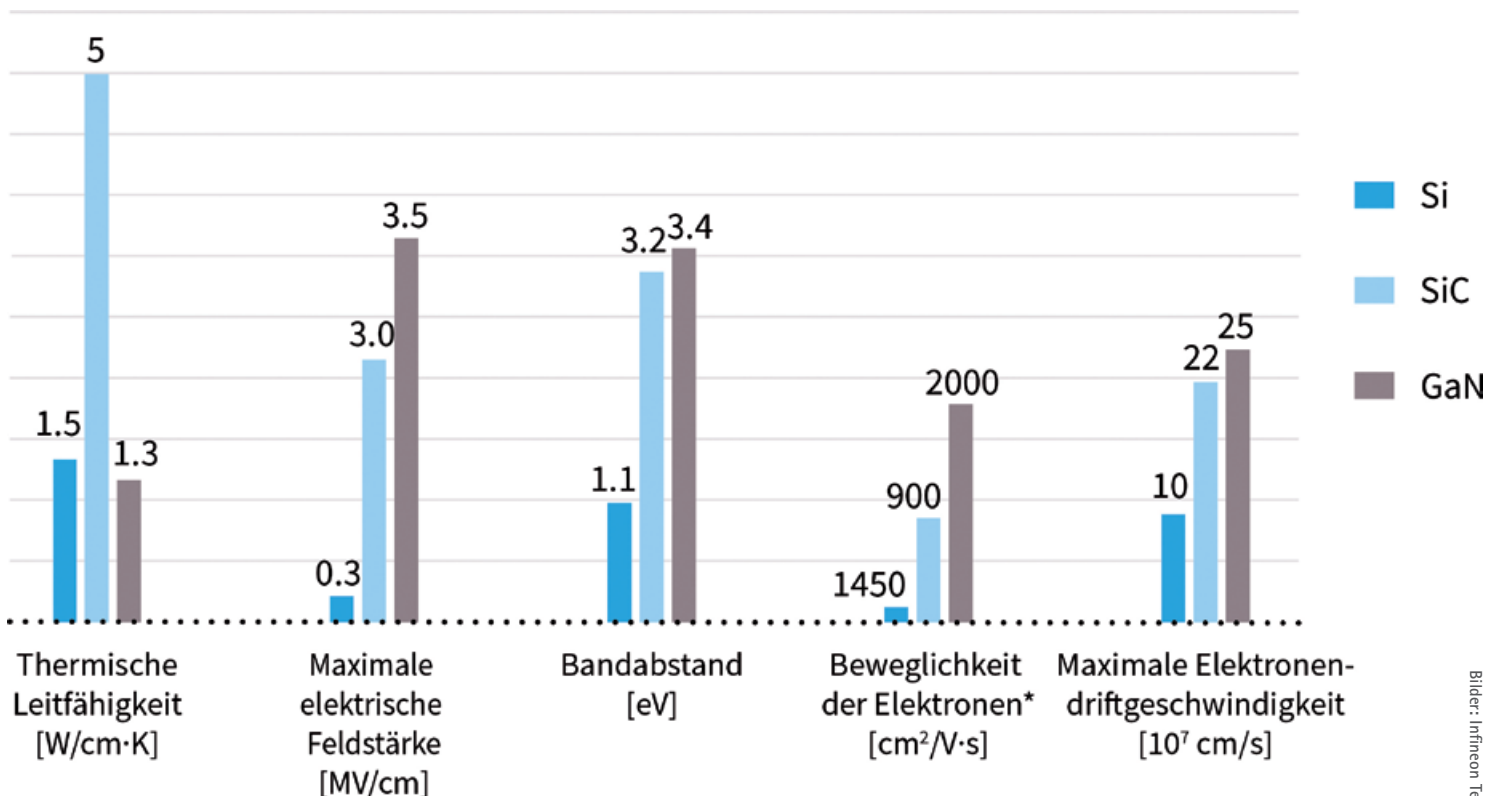
*Geht es um elektronisch getaktete Leistungswandler, steht eine große Auswahl von Halbleiterschaltern bereit, darunter IGBTs, Si-MOSFETs und Bauelemente auf Basis von Siliziumkarbid (SiC) oder Galliumnitrid (GaN), sogenannte „wide bandgap devices“. Sie sind aber nicht so einfach austauschbar.*

VON DR. GERALD DEBOY,  
SENIOR PRINCIPAL POWER DISCRETES AND SYSTEM ENGINEERING,  
UND DR. PETER FRIEDRICHS,  
SENIOR DIRECTOR SILICON CARBIDE TECHNOLOGY, BEIDE BEI INFINEON TECHNOLOGIES

**D**ie Umwandlung elektrischer Energie in verschiedene Wechsel- und Gleichspannungspegel hat im Laufe ihrer Geschichte mehrere grundlegende Paradigmenwechsel erlebt. Der vielleicht bedeutendste war die Entwicklung von Schaltnetzteilen, die einen weitaus höheren Wirkungsgrad als zuvor ermöglichen und Funktionen bieten, die bis dato

unmöglich waren, z.B. isolierte DC/DC-Wandlung ohne Motor-Generator-Sets. Heute ermöglichen Schaltleistungswandler komplexe Funktionen in Bereichen wie drahtloses Laden, Mobilfunk, erneuerbare Energien und intelligente Motoren in allen Bereichen – von der Industrie über Elektrofahrzeuge bis hin zu kleinen Haushaltsgeräten.

Bild 1:  
Vergleich der Materialeigenschaften von Si, SiC und GaN



\*Für GaN ist es 2DEG-Beweglichkeit und für Si und SiC ist es Volumens-Beweglichkeit

Halbleiterschalter sind für die Funktion eines Leistungswandlers von entscheidender Bedeutung. Neben den auf Silizium basierenden Technologien wie MOSFETs und IGBTs stehen für besonders anspruchsvolle Anwendungen heute auch SiC- und GaN-Leistungshalbleiterbauelemente zur Verfügung. Im folgenden Beitrag stellen wir die Eigenschaften der verfügbaren Halbleiter dar und diskutieren ihre jeweiligen Vorteile und Herausforderungen.

### Fortschritte bei der Verbesserung von Halbleitern

Unter der Maxime, Energie und Kosten zu sparen und die Umweltbelastung zu verringern, sind Verbesserungen der Leistungswandler in vielen Bereichen zu einem Schwerpunkt geworden. Ein höherer Wirkungsgrad spart Energie und führt zu kleineren, leichteren und günstigeren Produkten bei gleichem Leistungsdurchsatz oder liefert bei gleichem Temperaturanstieg mehr Leistung. Die Vorteile zeigen sich überall dort, wo die Energie- und Kühlkosten hoch sind oder wo – wie in Datacentern – der Druck besteht, die Rechenleistung in einer gegebenen Infrastruktur zu erhöhen. Die Vorteile von WBG-Halbleitern (Wide Bandgap) zeigen sich bereits bei der Erzeugung und Verteilung erneuerbarer Energien, Energiespeicherung und unterbrechungsfreien Stromversorgungen (USV) sowie bei traditionell frequenzgeregelten Motorantrieben. Die pro Volumen umgewandelte Leistung oder die Leistungsdichte ist auch eine wichtige Kennzahl in vielen Anwendungen wie Mobilfunkinfrastrukturen, EV/HEVs und Edge-Computing am Rand von Netzwerken. Die Entwicklung von Halbleiterschaltern hat sich an diesen Anforderungen und der Nachfrage nach Gehäusen ausgerichtet, die eine zunehmend automatisierte Serienmontage unterstützen. WBG-Halbleiter auf Basis von SiC- und GaN-Materialien sind nahezu ideale Schalter. In vielen Anwendungen sind jedoch neueste Si-MOSFETs und High-Voltage-IGBTs attraktive Alternativen in Bezug auf den Trade-off zwischen Kosten und Leistungsfähigkeit.

### Materialoptionen

Vereinfacht gesagt verwenden Leistungswandler vier wesentliche Schaltertypen: Si-IGBTs, Si-MOSFETs, SiC-MOSFETs oder GaN-HEMTs. Auch Hybridtechnologien kommen zum Einsatz. Dazu zählen IGBTs mit integrierten parallelen SiC-Schottky-Dioden oder eine Kombination aus IGBTs und SiC-Schaltern in

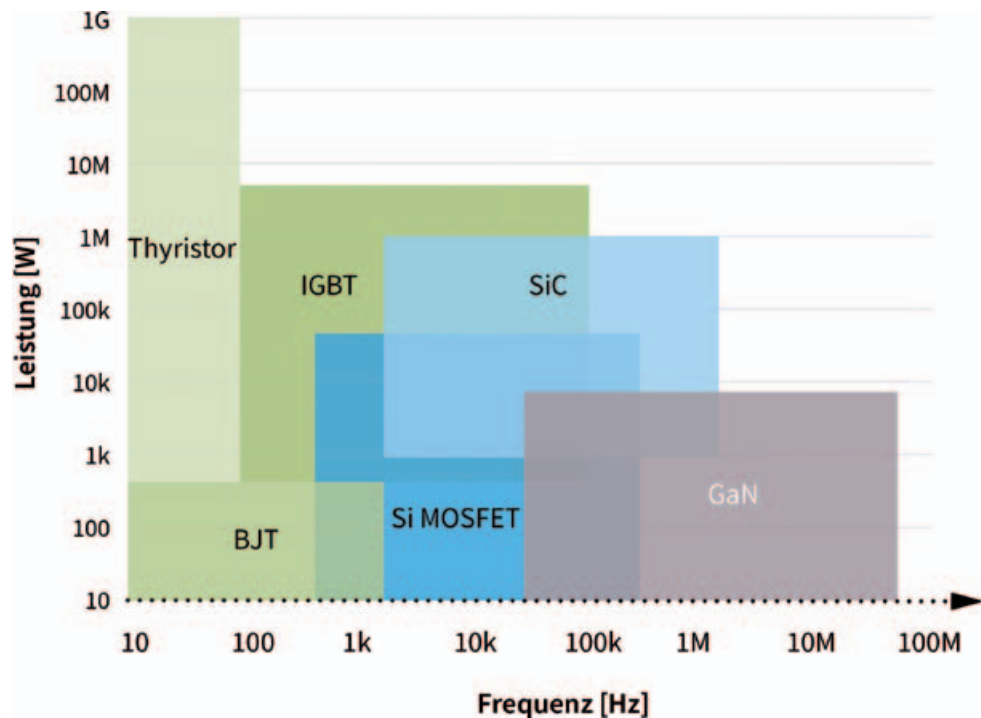


Bild 2: Mögliche Anwendungsschwerpunkte verschiedener Leistungshalbleiterbauelemente als Funktion von Leistung und Taktfrequenz

mehrstufigen Topologien wie Neutral Point Clamp (NPC oder Active NPC), bei denen für jede Schalterposition das Bauelement mit den am besten passenden Eigenschaften gewählt werden kann. Bild 1 zeigt die grundlegenden Materialeigenschaften von Si, SiC und GaN im Vergleich.

Die größere Bandlücke bei SiC und GaN führt zu einer höheren elektrischen Durchbruchfeldstärke und reduziert damit den Einschaltwiderstand bei gegebener Spannungsklasse um mehrere Größenordnungen, während die höhere Elektronenbeweglichkeit die für einen gegebenen Einschaltwiderstand erforderlichen Ladungen verringert. SiC punktet am besten bei der Wärmeleitfähigkeit. Sowohl SiC als auch GaN können theoretisch bei deutlich höheren Betriebstemperaturen als Si betrieben werden, praktische Einsatzbereiche sind jedoch oft durch das Gehäuse begrenzt. Der normierte Durchlasswiderstand (pro Fläche) ist bei SiC und GaN ebenfalls viel besser als bei vergleichbaren Si-Bauelementen.

### Die praktische Wahl

Aus dem Vergleich der Materialparameter ragen sowohl SiC als auch GaN heraus. Infineon positioniert SiC als Ergänzung zu den Silizium-Bauelementen in den Spannungsklassen oberhalb von 600 V und GaN von 100 V bis 600 V. Die höhere Schaltgeschwindigkeit die-

ser Bauelemente erlaubt typischerweise eine Anhebung der Taktfrequenz bei gleichbleibendem oder besserem Wirkungsgrad und damit eine Verkleinerung und Kostensenkung der magnetischen Komponenten.

Der Wert von GaN lässt sich am besten in neuen Designs realisieren. Der einfache Austausch von Si-MOSFETs in vorhandenen Schaltkreisen durch GaN-Bausteine ohne weitere Systemanpassungen führt in aller Regel nur zu sehr begrenzten Vorteilen. Idealerweise werden die Topologie und das Regelungsverfahren an die Fähigkeiten der neuen Halbleiterbauelemente angepasst, um die vollen Systemvorteile auszuschöpfen. In einem herkömmlichen Motorantrieb ist z.B. die Motorwicklung die wesentliche magnetische Komponente, die separat für Leistung und Drehmoment ausgelegt ist. Ein grundlegendes Redesign könnte jedoch eine sinusstromgespeiste Wechselrichtertopologie mit GaN bei hoher Frequenz verwenden oder die Bidirektionalität von GaN-Schaltern nutzen, um IGBTs und parallele Dioden in einem Stromzwischenkreis-Wechselrichter zu ersetzen, was einen wesentlich höheren Wirkungsgrad, eine verbesserte Motorsteuerung und geringere EMI zur Folge hätte und somit ein neues Motorantriebskonzept ermöglicht. Bei Austausch von Si-IGBTs durch SiC-MOSFETs ist die Situation etwas anders, da auch bestehende Topologien von der Einführung von SiC profitieren. So lassen sich auch bei gleichbleibender Taktfrequenz und

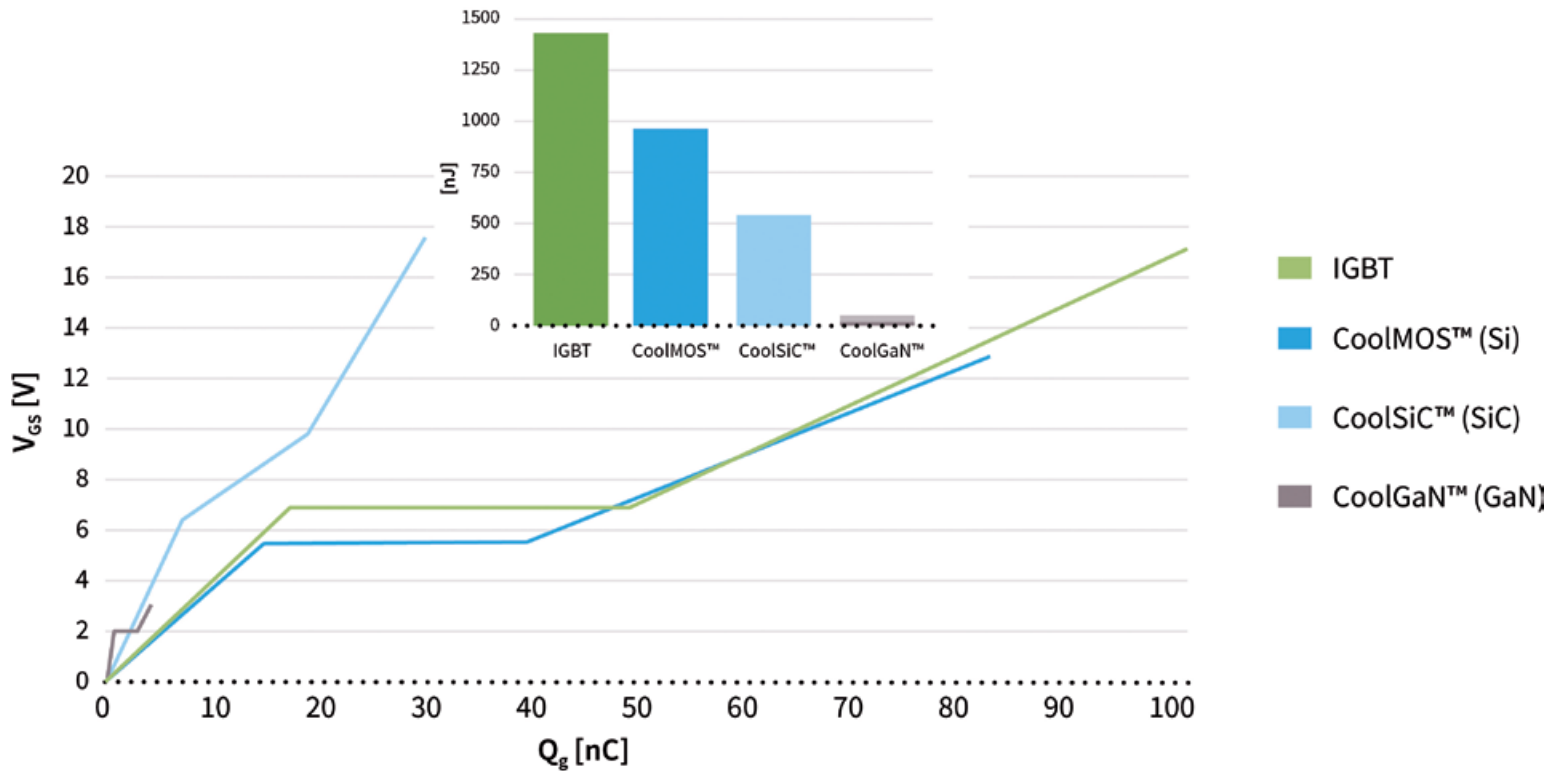


Bild 3:  
Vergleich von Gate-Ladung und -leistung für die Ansteuerung (Einschub oben rechts) eines IGBT, Superjunction-Transistors, SiC-MOSFET und einer GaN-HEMT-Zelle (mit und ohne Verluste in der RC-Schaltung)

Schaltgeschwindigkeit bereits geringere Leitungsverluste erzielen.

In einigen Anwendungen ist die bidirektionale Funktion oder der Betrieb des Bausteins in seinem dritten Quadranten ein wichtiger Faktor. Dies geschieht, wenn sowohl die Drain-Spannung (Kollektor für IGBTs) als auch der Strom in n-Kanal-Bausteinen beide negativ sind, was in Halbbrückenschaltungen in jeder Kommutierung des Laststroms auftritt. Beispiele für solche Schaltungen sind H4- oder B6-Motorantriebe, Totem-Pole-PFC-Stufen (Leistungsfaktorkorrektur) und LLC-, Phase-Shift-ZVS-Brücken oder Active-Clamp-Flyback-Wandler.

Si- und SiC-MOSFETs verfügen über integrierte Body-Dioden, die in Rückwärtsrichtung leiten und bei Beaufschlagung von Spannung jeweils charakteristische Sperrverzögerungsströme aufweisen. IGBTs enthalten keine Diode, das Freilaufelement ist daher frei wählbar. Mit SiC-Schottkydioden steht hier ein nahezu idealer Partner zur Verfügung. Andererseits weisen IGBTs aufgrund des Tail-Stroms gegenüber MOSFETs erhöhte Schaltverluste auf. Die Body-Diode von Silizium-MOSFETs, insbesondere von Superjunction-Bauelementen, weist dagegen eine vergleichsweise hohe Sperrverzögerungsladung mit abruptem Abriss der Rückstromspitze auf. SiC-MOSFETs zeigen eine vernachlässigbare Umkehr-Erholungsladung auf, aber der Durchlassspannungsabfall der Diode ist im leitenden Zustand hoch. Daher wird in der Re-

gel im Betrieb des Bauelements in Rückwärtsrichtung der Kanal eingeschaltet (synchrone Gleichrichtung), um die Leitungsverluste zu reduzieren. Dies gilt auch für GaN-HEMTs, die aufgrund ihrer fehlenden Body-Diode keinerlei Sperrverzögerungsladung aufweisen.

GaN und SiC sind daher ideale Lösungen, um in Halbbrücken-Topologien den besten Wirkungsgrad zu erzielen, sowohl unter harten als auch weichschaltenden Bedingungen. Bei weichem oder resonantem Schalten sind Superjunction-Si-MOSFETs bis etwa 250 kHz noch gut einsetzbar, bevor die Verzögerungszeiten beim Umladen des Spannungsmittelpunktes zu einer deutlichen Reduktion des Duty-Cycles führen. Aufgrund des lateralen Aufbaus ist GaN primär für kleine und mittlere Leistungsklassen bis zu sehr hohen Frequenzen prädestiniert, während IGBTs – und jetzt SiC – die dominierenden Technologien für höhere Ströme und Spannungen sind. – Bild 2 gibt einen Überblick über die Anwendungsschwerpunkte der verschiedenen Bauelemente.

#### Auf die Leistungsdichte kommt es an

Obwohl der Wirkungsgrad eindeutig wichtig ist, ist eine hohe Leistungsdichte manchmal das eigentliche Entwicklungsziel. Ein hoher Wirkungsgrad kann durch Überdimensionierung der Bauteile erreicht werden. Niederohmige Halbleiterbausteine sorgen für geringere Durchlassverluste, große Kühlkörper für

niedrige Temperaturen und entsprechend überdimensionierte Magnete und Kondensatoren für geringe Wicklungs- und ESR-Verluste (äquivalenter Serienwiderstand). Um jedoch die Leistungsdichte zu erhöhen, muss zum Beispiel der Einsatz von GaN mit hohen Taktfrequenzen und entsprechend kleineren passiven Bauelemente gegenüber einer alternativen Lösung mit Si- oder SiC-MOSFETs bei niedrigeren Frequenzen, jedoch entsprechend größeren passiven Bauelementen abgewogen werden. SiC- und GaN-Lösungen mit ihrer höheren Schaltgeschwindigkeit und ihrem Potenzial zu verbessertem Wirkungsgrad ermöglichen einen Betrieb mit kleineren Kühlkörpern und ebnen damit den Weg zu einer höheren Leistungsdichte, sofern das Gesamtsystem bezüglich der Auswahl der Topologie und des Steuerungsverfahrens auf die neuen Leistungshalbleiterbauelemente hin ausgerichtet wurde.

### Gesamtbetriebskosten und Umweltschutz

Die Gesamtbetriebskosten eines Leistungswandlers umfassen nicht nur die Anschaffungs- und die Energiekosten, sondern auch die Kosten für Entwicklung und Qualifizierung. Effizientere Leistungswandler erreichen insbesondere bei energieintensiven Anwendungen wie unterbrechungsfreien Stromversorgungen oder Hochleistungsrechenzentren im Vergleich zur Gesamteinsatzdauer attraktive Amortisationszeiten. So wird in modernen Datacentern nach dem Open-Compute-Standard die Stromversorgung ins Rack integriert und ist nicht mehr Teil des Motherboards. Damit verlängert sich die Nutzungsdauer von 2–3 Jahren auf 6–8 Jahre bei gleichzeitig besserer Ausnutzung der Leistung des Schaltnetzteils durch geringere Redundanz. Mit GaN-Leistungshalbleiterbauelementen lässt sich ein Schaltnetzteilwirkungsgrad von bis etwa 98 % erreichen, wobei sich die Mehranschaffungskosten des Schaltnetzteils durch entsprechende Einsparungen an Energie bei mittleren Stromkosten bereits in weniger als der halben Nutzungsdauer amortisieren. Durch kleinere effizientere Wandler lassen sich mehr Server pro Rack unterbringen, was sich entsprechend positiv auf die Rechenleistung auswirkt. Im Beispiel des Motorantriebs ist der Leistungswandler zwar weit von der Last entfernt, es ergeben sich jedoch auch hier Vorteile. Ein höherer Wirkungsgrad durch GaN verringert den Temperaturanstieg und/oder die Größe des Leistungswandlers, womit sich die Anzahl der Antriebe pro Schrank leicht verdoppeln lässt, was einen enormen Vorteil darstellt, wenn die Produktionsfläche begrenzt

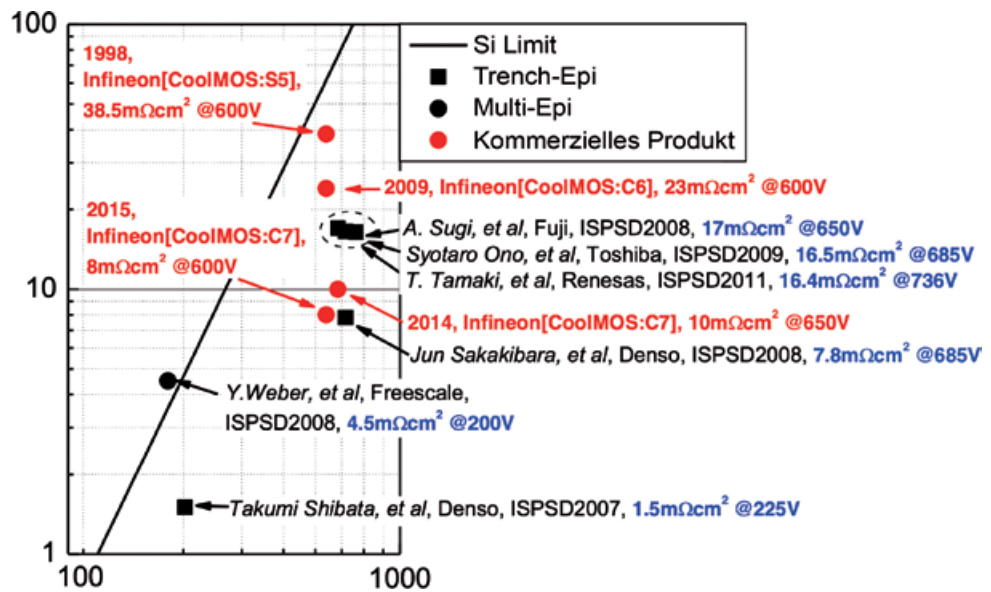


Bild 4: Im Laufe der Zeit verbesserte Si-Superjunction-MOSFETs von Infineon

ist. Im Falle einer USV konnte gezeigt werden, dass der Wechsel von IGBT-basierten Multi-Level-Topologien zu einer SiC-basierten Zwei-Level-Schaltung die Stromrechnung des Betreibers halbierte.

### Leistungskennzahlen

Das Produkt aus Durchlasswiderstand und Chipfläche ( $R_{DS(ON)} \cdot A$ ) ist ein guter Indikator für den spezifischen Widerstand des Bausteins bei gegebener Nennspannung. Ein niedriger Wert ermöglicht den Entwurf eines kleineren Chips für eine bestimmte Anwendung mit entsprechend geringeren Bauteilkapazitäten und höherer Schaltgeschwindigkeit. Ein günstiger Wert für den flächenspezifischen Widerstand erlaubt nicht zuletzt die Produktion von mehr Bauelementen pro Wafer und damit eine günstigere Kostenposition.

Die durch  $R_{DS(ON)} \cdot E_{OSS}$  angegebene Kennzahl kombiniert Leitungsverluste mit Schaltverlusten, die durch die in der Ausgangskapazität des Bauteils gespeicherte Energie  $E_{OSS}$  bei jedem harten Schalten erzeugt werden. Je kleiner dieser Wert bei gegebener Sperrspannung ist, desto besser eignet sich das Bauelement für den Betrieb bei hartem Schalten.

Die Gate-Ladung  $Q_{G(TOT)}$  beeinflusst die zur Gate-Ansteuerung erforderliche Leistung  $P_G$  gemäß

$$P_G = Q_{G(TOT)} \times \text{Frequenz} \times \text{Gate-Spannungshub}$$

Dies ist insbesondere bei hohen Taktfrequenzen wichtig, da die Leistung für die Gate-An-

steuerung hier einen merklichen Einfluss auf den Wirkungsgrad hat. GaN hat eine niedrige Gate-Schwellenspannung von ungefähr 1,5 V und eine extrem niedrige Gate-Ladung  $Q_{G(TOT)}$ , sodass selbst bei hohen Frequenzen nur wenige Milliwatt erforderlich sind. IGBTs hingegen – mit Gate-Spannungsschwankungen von +16/–9 V und Gate-Ladungen im  $\mu\text{C}$ -Bereich – können selbst bei relativ niedrigen Frequenzen mehrere Watt benötigen. SiC liegt im Leistungsbedarf dazwischen. Da bei jedem Schaltzyklus die  $Q_{G(TOT)}$ -verbundenen Kapazitäten im Baustein über den externen Gate-Widerstand geladen und entladen werden müssen, ist die Gate-Ladung  $Q_{G(TOT)}$  indirekt auch ein Maß für die erzielbare Schaltgeschwindigkeit. Bild 3 zeigt die Gate-Ansteuerladung und -leistung von IGBTs, Si-Superjunction-MOSFETs, SiC-MOSFETs und GaN-Bauelementen von Infineon.

### Alle Technologien entwickeln sich weiter

Wir gehen von einer Koexistenz und wachsenden Marktsegmenten aller Leistungshalbleiterkonzepte für einen Zeitraum von mindestens zehn Jahren aus. So soll der Markt für IGBTs laut „Research and Markets“ mehr als 8 % wachsen und bis 2023 einen Wert von fast 10 Mrd. US-\$ [2] erreichen. Auch Si-MOSFETs sind noch nicht am Ende ihrer Entwicklung angelangt und verbessern sich kontinuierlich in Schlüsselparametern wie Einschaltwiderstand, Kapazitäten und Kosten. Infineon war Pionier der Si-Superjunction-Technologie und treibt das Konzept mit dem Ziel einer weiteren Halbierung des  $R_{DS(ON)}$ -Werts in Zukunft weiter voran (Bild 4). Neue

Trenchstop-basierte IGBT-Topologien bieten kontinuierlich einen verbesserten Kompromiss zwischen  $U_{CE\_SAT}$  und  $Q_{TOT}$ .

Infineon investiert selbstverständlich auch in WBG-Halbleiterbausteine, wobei die erste Generation von GaN und SiC immer noch deutlich von den theoretischen Leistungsgrenzen für  $R_{DS(ON)}$ ·A entfernt sind und noch deutliches Verbesserungspotenzial für zukünftige Generationen aufweisen.

### Infineons Strategie

Infineon ist seit Jahrzehnten führend in der Entwicklung von Leistungshalbleiterbauelementen [3] und hat eine breite Palette innovativer Produkte auf den Markt gebracht, die

jeweils Technologiegeschichte geschrieben haben. Das Unternehmen investiert stark in alle hier beschriebenen Technologien und bietet unvoreingenommen Beratung über den optimalen Leistungsschalter für jede Anwendung, einschließlich intelligenter Kombinationen verschiedener Technologien, um das beste Preis-Leistungs-Verhältnis zu erzielen. SiC- und GaN-Schalter sowie spezielle Treiber ergänzen das IGBT- und Si-MOSFET-Angebot, um für sich rasch ändernde Anwendungsanforderungen mit der jeweils am besten passenden Technologie gewappnet zu sein.

### Fazit

Bei der Auswahl eines Leistungsschalters gibt es viele Möglichkeiten. Die in diesem Artikel

beschriebenen Technologien umfassen IGBTs, Si-MOSFETs, SiC-MOSFETs und GaN-HEMTs. Bei der Auswahl müssen neben den Gesamtbetriebskosten die Auswirkungen auf das System und die realistischen Anforderungen an die Leistungsfähigkeit berücksichtigt werden. In allen Fällen wird höchste elektrische Leistungsfähigkeit mit grundlegend neuen Designs mit WBG-Halbleitern erzielt. Infineon bietet Design-Support und branchenführende Leistungselektronikbauteile in allen Technologien, um alle Anwendungen und Kundenanforderungen zu erfüllen. (ag)

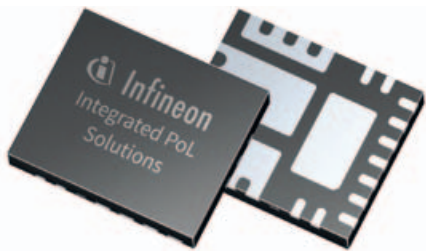
### Referenzen

- [1] [www.opencompute.org](http://www.opencompute.org)
- [2] [www.researchandmarkets.com/reports/4718358/global-igbt-market-forecasts-from-2018-to-2023](http://www.researchandmarkets.com/reports/4718358/global-igbt-market-forecasts-from-2018-to-2023)
- [3] [www.infineon.com/power](http://www.infineon.com/power)

Point-of-Load-Spannungsregler

## Viel Wirkungsgrad bei hoher Leistungsdichte

Bild: Infineon Technologies



**N**eu verfügbar im Portfolio von Infineon Technologies ist ein DC/DC-Spannungsregler mit der Bezeichnung OptiMOS IR3826(A) M, den es in Versionen für 16 und für 23 A gibt. Infineon sieht den Einsatz des Chips vor allem in Routern, Schaltern von Kommunikations- und Datennetzwerken, Basisstationen und Server-Speichern.

Der Spannungsregler kann bei einer Eingangsspannung von 12 V betrieben werden und liefert bis zu 16 A (Variante AM) bzw. 23 A (Variante M) Dauerstrom. Aufgrund der hohen Schaltfrequenz von bis zu 1,5 MHz ermöglicht er den effizienten Einsatz bei geringen Leistungsverlusten sowie ein kompaktes Design, insbesondere im Vergleich zu früheren Generationen.

Um maximale Flexibilität zu gewährleisten, werden sowohl der IR3826AM als auch der IR3826M im PQFN-Gehäuse mit der Grundfläche 5 mm × 6 mm angeboten. Die Bauteile sind pinkompatibel zur Vorgängergeneration und bieten so einen einfachen Umstieg bei minimalem Redesignaufwand.

Der IR3826 löst thermische Herausforderungen ohne oder mit minimalem Luftstrom in thermisch anspruchsvollen Anwendungen wie etwa bei hohen Ausgangsspannungen von 3,3 V oder 5 V. Zudem unterstützt der Regler Applikationen, die bei hoher Umgebungstemperatur eingesetzt werden, beispielsweise im Telekommunikationsbereich bei 85 °C.

Die hochmoderne PWM-Technologie der 3. Generation ermöglicht den Betrieb bei Festfrequenz, um Rauschstörungen in sensiblen Telekom- und High-End-Netzwerkanwendungen zu reduzieren.

Die neuen Regler entsprechen vollständig den RoHS-2-Richtlinien. (ag)

Für Ladestationen und unterbrechungsfreie Stromversorgungen

## EasyPACK-Module mit CoolSiC-MOSFETs



Bild: Infineon Technologies

**Z**wei neue EasyPACK-Module der 1200-V-Familie auf CoolSiC-MOSFET-Basis bietet Infineon insbesondere für E-Fahrzeug-Ladestationen, aber auch für USVs an.

Die Leistungsmodule sind in zwei verschiedenen Topologien erhältlich und erlauben es Ingenieuren, Systeme höchst effizient auszulegen und den Kühlaufwand zu reduzieren. Darüber hinaus ist mit ihnen ein höherfrequenter Betrieb möglich. Das Easy 1B integriert eine Viererpack-Topologie für die

DC/DC-Stufe der Ladestation. Das Easy 2B verfügt über eine dreistufige Konfiguration, die sich gut für den Vienna-Rectifier eignet, der für die PFC-Stufe in dieser Anwendung üblich ist.

Das EasyPACK-Standardgehäuse für Leistungsmodule zeichnet sich durch eine geringe Streuinduktivität aus. Dies hilft beim Aufbau gestapelter modularer Lösungen von Ladestationen bis zu 120/150 kW. Die PressFIT-Technologie reduziert die Montagezeit. (ag)