

world of solutions

Organ der **GMM** VDE/VDI-GESELLSCHAFT  
MIKROELEKTRONIK, MIKROSYSTEM-  
UND FEINWERKTECHNIK

# Elektronik

14-15 07. Juli 2020 8,00 €

## EMBEDDED TECHNOLOGY SMART AND SECURE

SiC, GaN und Silizium in der Elektromobilität

# VERDRÄNGUNG ODER KOEXISTENZ?

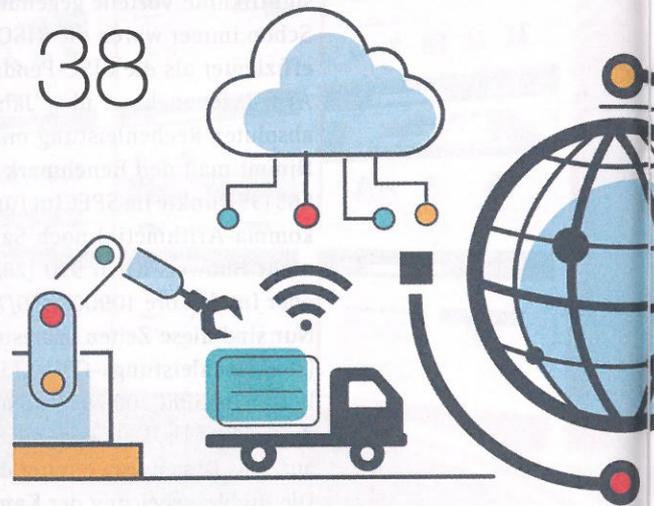
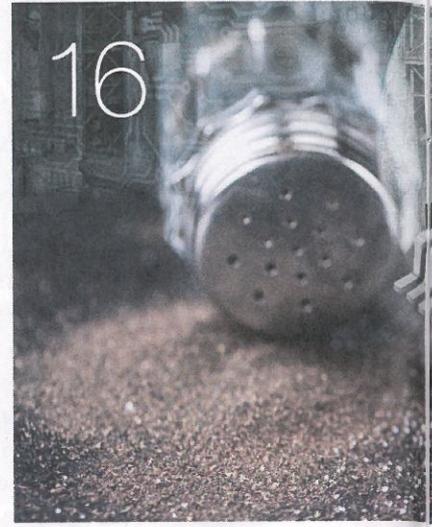


Chip-Innovation treibt  
die Suche nach dem  
universellen ML-System

IP500-Standard – die  
IoT-Plattform für  
kommerzielle Gebäude

Über  
9 Millionen  
Produkte online  
**DIGIKEY.DE**

**Digi-Key**  
ELECTRONICS



**EDITORIAL**

**3 Apple wirft Intel raus**

**GMM-NEWS**

**6 Terminverschiebung auf 2021:**  
Mit der ACTUATOR in Bewegung

**DISTRIBUTION**

**8 Deutsche Bauelemente-Distribution:**  
Corona-Krise bremst Entwicklung

**IMPULSE**

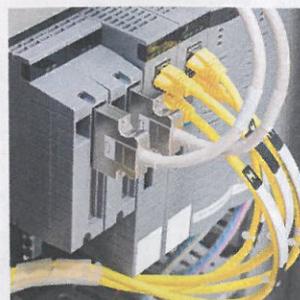
**10 Digitalisierung: Blockchain – wohin führt der Weg?**  
**14 Sicherheitsgefahr für Air-Gap-Systeme:** Malware verwandelt Netzteile in Lautsprecher

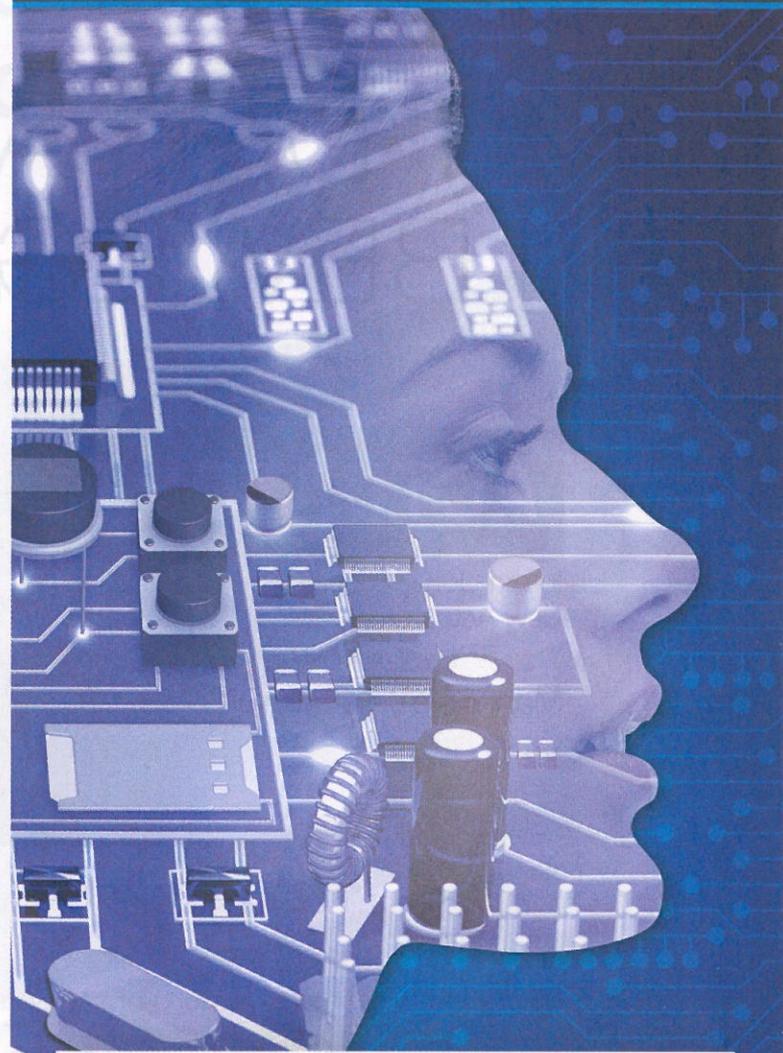
**LEISTUNGSELEKTRONIK**

**16 SiC, GaN und Silizium in der Elektromobilität:**  
Verdrängung oder Koexistenz?

**EMBEDDED TECHNOLOGY**

**24 Spannungsversorgung für Speicherprogrammierbare Steuerungen:** Strom für Mini-SPSen





## HIGHTECH- BAUELEMENTE für Ihre Innovationen

Als einer der führenden Distributoren für elektronische Bauelemente bieten wir Ihnen weltweit ein breites Produktportfolio, kompetente technische Unterstützung bei Produktentwicklung und Design, individuelle Logistik-Lösungen sowie umfangreiche Serviceleistungen.

- Semiconductors
- Passive Components
- Electromechanical Components
- Displays & Monitors
- Boards & Systems
- Storage Technologies
- Wireless Technologies

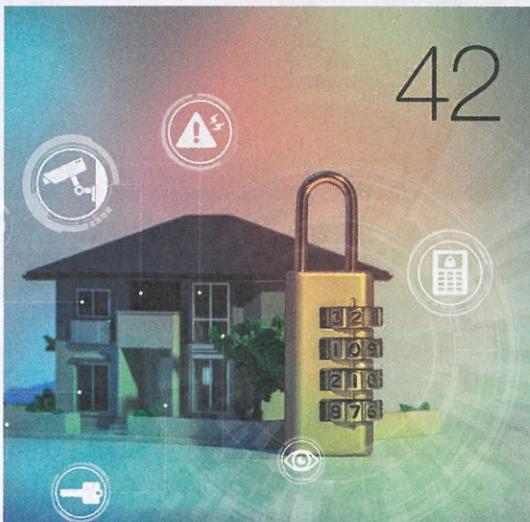
Informationen zu RUTRONIK:  
Tel. +49 (0) 7231 801-0 | [rutronik@rutronik.com](mailto:rutronik@rutronik.com)

[www.rutronik.com](http://www.rutronik.com)



COMMITTED TO EXCELLENCE

Consult | Components | Logistics | Quality



### PROCESSING & IP

- 28 **ISSCC 2020:** Chip-Innovation treibt KI-Revolution
- 36 **Interview mit Aaron Su, Advantech:** „Mit Open Source können wir IoT-Geräte erfolgreich entwickeln“

### WIRELESS

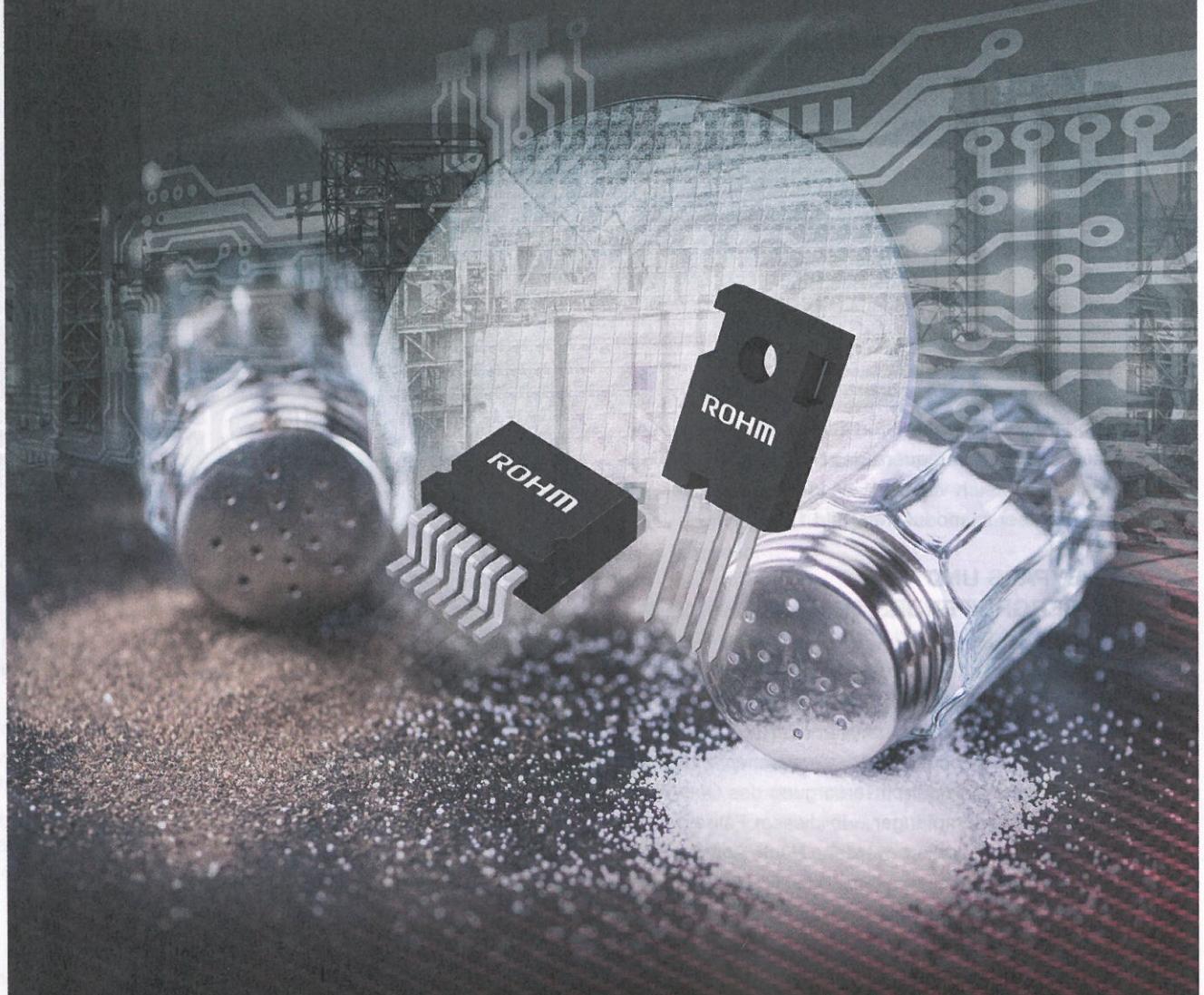
- 38 **Funkkommunikation für IoT-Anwendungen:**  
Energiesparend per WLAN kommunizieren
- 42 **IoT-Funkplattform für kommerzielle Gebäude:**  
Komfort und Sicherheit vereint

### VORSCHAU

- 50 **Ausblick:** Das kommt in Elektronik 16
- 37 **Impressum**
- 40 **Inserenten**

SiC, GaN UND SILIZIUM IN DER ELEKTROMOBILITÄT

# VERDRÄNGUNG ODER KOEXISTENZ?



Werden Wide-Bandgap-Leistungshalbleiter Silizium-basierte Halbleiter wie IGBTs oder Si-MOSFETs komplett verdrängen? Noch beherrscht Silizium mit großem Abstand den Markt. Das soll sich mit dem weltweiten Trend zur Elektromobilität grundlegend ändern. Welche Vorteile haben die jeweiligen Halbleitertechnologien und wie sehen mögliche Zukunftsszenarien für ein Zusammenleben von SiC-, GaN- und Silizium-Technologien im Auto aus? Von Aly Mashaly

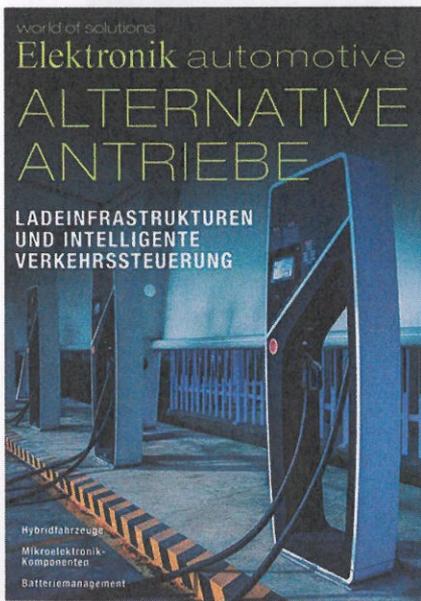
(Bild: Rohm)



# Elektronik automotive



WERDEN SIE MIT IHRER LÖSUNG TEIL DER WORLD OF SOLUTIONS



Bildhinweis: fotolia: #190897096 | r2z studio

AUF ALLEN RELEVANTEN KANÄLEN

PRINT	ONLINE
EVENTS	SOCIAL MEDIA

**JETZT BUCHEN!**

Sonja Winkler  
 swinkler@weka-fachmedien.de  
 +49 (89) 255 56-1383

elektronik.de | elektronik-automotive.de

## LEISTUNGSELEKTRONIK

### DER WIRKUNGSGRAD UND DIE ROLLE DER LEISTUNGSELEKTRONIK

Der Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren variiert für verschiedene Motorentypen deutlich, besonders stark aber hängt er von den Betriebsbedingungen ab. Bei voller Last können Ottomotoren Werte von knapp über 35 Prozent erreichen. Große Dieselmotoren erreichen auch mehr als 40 Prozent, vor allem mit Direkteinspritzung und Turboaufladung. Trotz dieses geringen Wirkungsgrads kann mit einem 60-Liter-Tank eine Reichweite von etwa 1.000 Kilometern erreicht werden. Im Gegensatz zum Verbrennungsmotor hat der Elektromotor einen wesentlich höheren Wirkungsgrad von ca. 90 Prozent. Allerdings kann aufgrund der niedrigen Energiedichte der Hochvolt-Batterie eine Reichweite von 1.000 km nur schwer zu vertretbaren Kosten erreicht werden. Dieses Dilemma führt dazu, dass der Energieverbrauch von allen im Elektrofahrzeug eingebauten Komponenten und Systemen auf ein Minimum reduziert werden muss. Mit anderen Worten: Der Wirkungsgrad aller Systeme im Auto muss ohne wesentliche Mehrkosten erhöht werden. Die Anforderungen an die Leistungselektroniksysteme sind deshalb in den vergangenen Jahren deutlich gestiegen. Platzbedarf, Gewicht und Wirkungsgrad spielen eine erhebliche Rolle.

### LEISTUNGSHALBLEITER ALS ZUGPFERDE DER ELEKTROMOBILITÄT

Die Effizienz herkömmlicher Leistungselektronik-Topologien variiert in der Regel zwischen 85 und 95 Prozent, zehn Prozent der elektrischen Energie gehen im Durchschnitt bei jeder Leistungsumwandlung als Wärme verloren. Der Wirkungsgrad der Leistungselektronik wird dabei hauptsächlich von den Merkmalen der Leistungshalbleiter selbst beschränkt, die Entwicklung von verlustarmen Hochspannungs-Leistungshalbleitern ist dementsprechend wichtig. Wird die Leistungselektronik als die Schlüsseltechnologie hinter der Elektromobilität betrachtet, ist die Halbleitertechnologie das Zugpferd für die Leistungselektronik – und somit der entscheidende Faktor für die gesamte Automobilindustrie.

Die physikalischen Eigenschaften der WBG-Halbleiter und deren Unterschiede gegenüber der Si-Halbleitertechnologie wurden in der Literatur mehrfach diskutiert. Im Vergleich zu Silizium-Halbleitern mit 0,3 MV/cm beträgt die elektrische Feldstärke von SiC 2,8 MV/cm und von GaN 3,5 MV/cm (Bild 2). Die höhere elektrische Feldstärke ermöglicht das Aufbringen einer dünneren Schichtstruktur, den sogenannten Epitaxie-Schichten auf dem Substrat. Somit verringert sich der Oberflächenwiderstand ( $R_{onA}$ ) des Bauteils, was zu einer

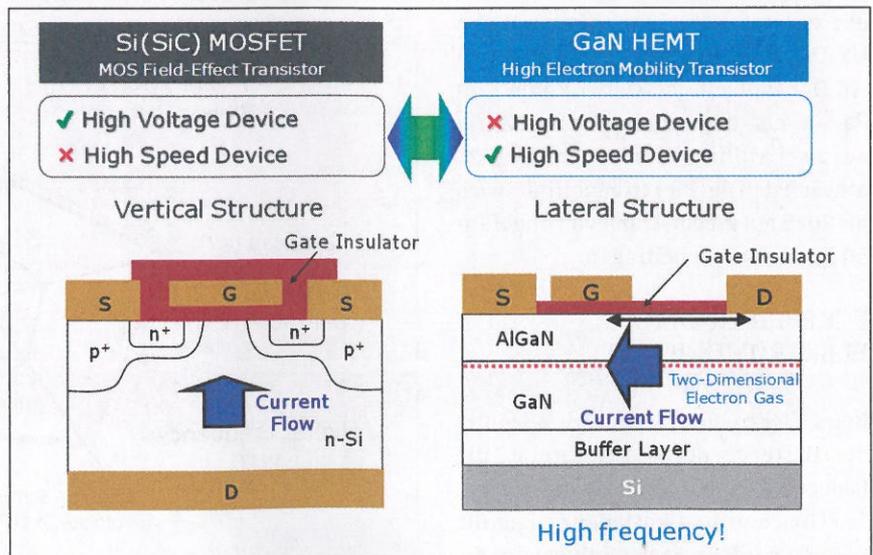


Bild 3. Die Zellenstruktur von SiC und GaN hat Einfluss auf die Spannungsfestigkeit des Bauteils. (Bild: Rohm)

beträchtlichen Reduzierung der Durchlassverluste führt. Die maximale Elektronen-Driftgeschwindigkeit bei SiC und GaN ist mehr als doppelt so hoch wie etwa bei Si-Halbleitern. Darüber hinaus weisen SiC und GaN kürzere Schaltzeiten auf, was die Energieverluste bei den Schaltvorgängen signifikant verringert. Die jeweils kurzen Schaltzeiten beider Technologien ermöglichen die Verwendung hoher Schaltfrequenzen. Somit ist die Auslegung kompakterer passiver Komponenten wie Induktivitäten oder Kondensatoren realisierbar. Dennoch bleiben in manchen Systemen innerhalb von Elektro- oder Hybridfahrzeugen neueste Si-MOSFETs und IGBTs attraktive Alternativen in Bezug auf den Trade-off zwischen Kosten und Performance.

### BATTERIESPANNUNG VERSUS HALBLEITERTECHNOLOGIE

Die Halbleiterphysik sagt, dass sich der Oberflächenwiderstand ( $R_{onA}$ ) proportional zur Sperrspannung erhöht. Durch die spezifischen Eigenschaften von SiC verringert sich der Driftschicht-Widerstand bei hoher Spannung um den Faktor 1/300 im Vergleich zu Si. Diese besonderen Eigenschaften machen SiC sehr interessant für Hochspannungs-

anwendungen, bei denen es besonders wichtig ist, die Durchlassverluste thermisch zu bewältigen. Durch die laterale Zellenstruktur von GaN ist es schwierig, Hochspannungs-GaN-Bauteile zu entwickeln (**Bild 3**). GaN-Halbleiter sind derzeit für Spannungsbereiche unterhalb von 600 V verfügbar. Auf der anderen Seite macht es technisch und kommerziell keinen Sinn, SiC-Bauteile für niedrige Spannungsbereiche unter 600 V zu entwickeln. Die Batteriespannung ist also das entscheidende Kriterium für die Auswahl des optimalen Leistungshalbleiters und dessen Spannungsfestigkeit (**Bild 4**).

In der Elektromobilität wird zwischen Mild-Hybriden, Plug-in-Hybriden, Serial-Hybriden, Brennstoffzellen und den Vollstromern, rein batteriebetriebenen Fahrzeugen, unterschieden.

### DAS MILD-HYBRID-FAHRZEUG

Mild-Hybride sind mit einem Verbrennungsmotor und einem elektrischen Antrieb ausgestattet. So kann der Motor abgestellt werden, wenn das Auto im Leerlauf fährt, bremst oder gestoppt wird, und danach dennoch schnell neu starten. Neben der herkömmlichen 12-V-Batterie ist eine

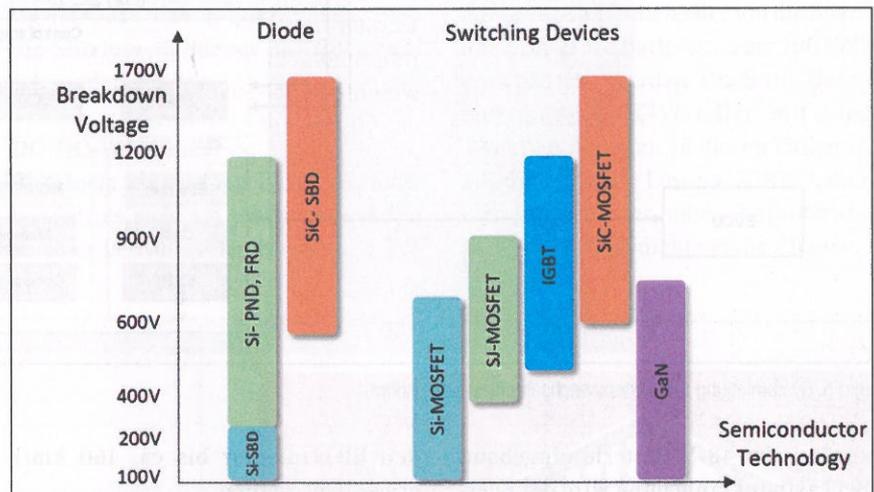


Bild 4. Leistungshalbleiter für Hybrid- und Elektrofahrzeuge. (Bild: Rohm)

## 30KW BIDIREKTIONALE POWER AUF KLEINSTEM RAUM

Neue Stromversorgung EA PSB 10000 bietet die höchste Leistungsdichte im Markt

- Bidirektionale Stromversorgung mit Autoranging-Ausgang
- Volldigitale Regelung (U, I, P, R)
- Wirkungsgrad bis zu 96 %
- Optionale hocheffektive Wasserkühlung
- Onboard-Schnittstellen (Analog, LAN, USB-Host / Device)
- Anybus-Slot für viele weitere Schnittstellen
- Simulationen (Batterie, PV, FC, Funktionsgenerator)
- 30kW, 19", 4HE



**Elektro-Automatik**



EA-PSB 10060-1000  
4U 30kW  
(wassergekühlt)

NEU

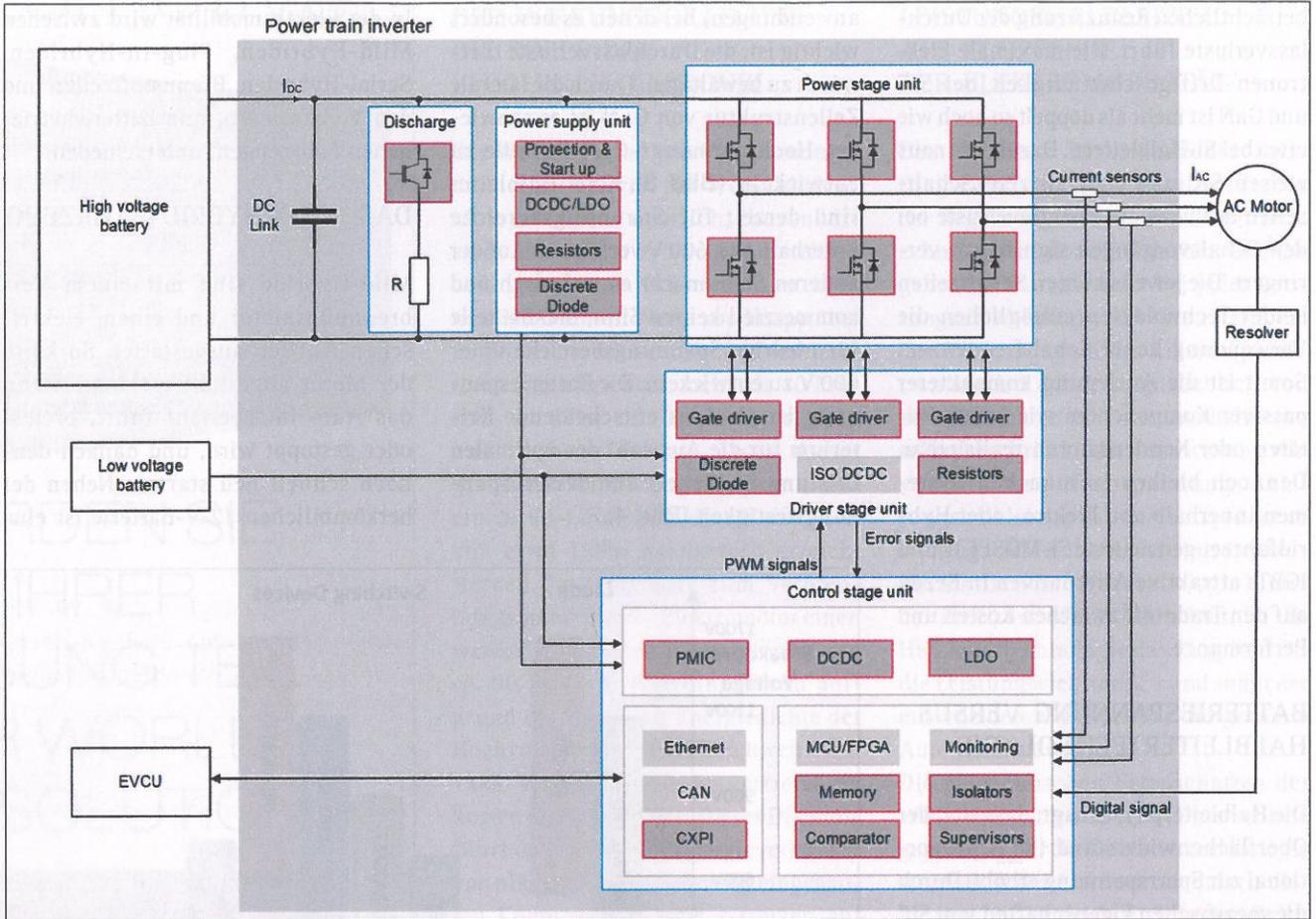


Bild 5. Systemlösung für Antriebswechselrichter. (Bild: Rohm)

zusätzliche 48-V-Batterie eingebaut. Bei Lastpunktanhebung wird der Energiefluss aus dem Verbrennungsmotor in die 48-V-Batterie verschoben (Lastpunktverschiebung). Genauso fließt die Energie beim Bremsen oder bei Schubrekuperation aus dem Verbrennungsmotor in beide Batterien. Ein Segelbetrieb kann durch

den Elektromotor bis ca. 160 km/h ermöglicht werden. SiC kann in diesen Fahrzeugtypen keine Anwendung finden, da es keine SiC-Bauteile in diesem Spannungsbereich gibt und auch aus den genannten technischen und kommerziellen Gründen nicht geben wird. Im Gegensatz dazu ist der Spannungsbereich

von 48 Volt in Mild-Hybriden für GaN und Si-MOSFETs geeignet.

### FAHRZEUGE MIT HOCHSPANNUNGSBATTERIEN

#### 400-V-BATTERIEN

400 V ist der Spannungsbereich, in dem die Massenproduktion der Elektromobilität erwartet wird. Hier muss zwischen Plug-in-Hybriden und reinen Elektrofahrzeugen unterschieden werden. Die Hersteller definieren die Batteriegröße in kWh je nach Fahrzeugmodell. Im Spannungsbereich 400 V können mehrere Halbleitertechnologien koexistieren.

#### ANTRIEBSWECHSELRICHTER

Je nach Fahrzeugtyp und Klasse wird bei Plug-in-Hybriden ein Elektromotor von bis zu 150 kW und bei Vollstromern von bis zu 300 kW eingesetzt. In diesen Leistungsklassen sowie Spannungsbereichen von ca. 450 V sollte der IGBT dank seines Preis-Leistungsverhältnis-

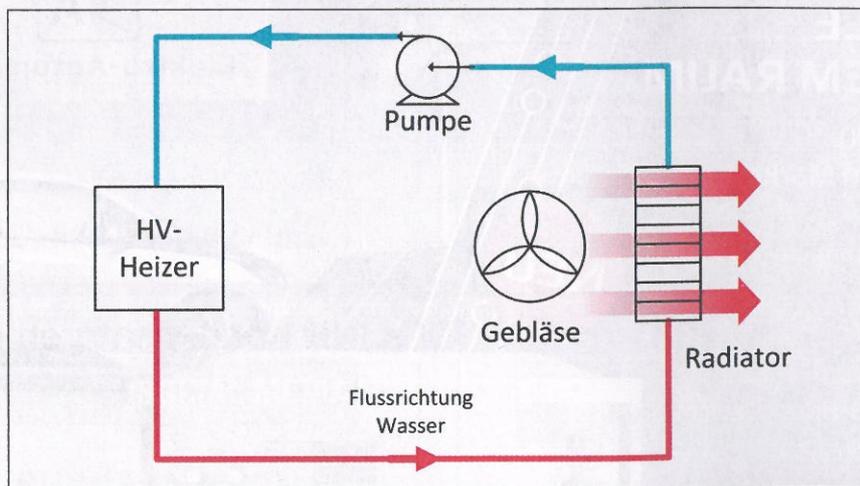


Bild 6. Funktionsweise eines HV-Heizers in einem Elektrofahrzeug. (Bild: Rohm)

ses weiterhin der dominante Halbleiter bleiben. Es dürfte schwierig sein, den IGBT in der nächsten Dekade durch andere Halbleitertechnologien komplett aus diesen Anwendungen zu verdrängen. Mit Sperrspannung von bis zu 750 V ist der IGBT die optimale Lösung für die meisten Automodelle.

Oberhalb von 80 kWh und einer Leistung über 150 kW wird der SiC MOSFET interessant für batteriebetriebene Fahrzeuge. Im Vergleich zu IGBTs kann der höhere Preis von SiC durch Einsparung von Batteriekosten kompensiert werden. Darüber hinaus kann SiC die Reichweite der Batterie erweitern. Für SiC-MOSFETs mit 750 V Sperrspannung sind mittlerweile ganze Systemlösungen erhältlich (**Bild 5**). Die Leistungselektronik-Community forscht ebenfalls daran, ob und wie auch GaN in diesem Anwendungsfeld einen Platz finden kann. Die Zeit wird zeigen, wie ausgereift GaN für die anspruchsvolle Applikation ist bzw. sein wird.

#### BATTERIELADEGERÄTE

Bei den Batterieladegeräten (On Board Charger, OBC) dominiert bis heute die Si-Technologie. Seit den 2012er-Jahren werden auch SiC-Dioden in Batterieladegeräten verbaut. SiC-SBDs (Schottky Barrier Diodes) setzen sich seitdem immer weiter gegenüber Si-Dioden durch. Seit dem vergangenen Jahr wollen auch SiC-MOSFET ihren Platz in OBC-Anwendungen finden. Der Halbleiterhersteller Rohm konnte bereits Fahrzeuge serienmäßig mit SiC-MOSFETs ausstatten.

Die erste Generation Batterielader für Plug-in-Hybridfahrzeuge war bei einem Leistungsbereich von 3,6 kW bzw. 6,6 kW begrenzt. Heute sind 11-kW- oder 22-kW-Varianten üblich. Leider steht dafür im Auto kein proportional größerer Bauraum zur Verfügung, somit sind OBC-Anwendungen eher vom Bauvolumen getrieben – auch wenn Effizienz wichtig ist, steht mehr der vordefinierte Platzbedarf und die daraus resultierende hohe Leistungsdichte im Vordergrund. OBC-Anwendungen im 400-V-Spannungsbereich sind im Vergleich zu anderen Applikationen im Auto am härtesten von allen Halbleitern

umkämpft. Sowohl IGBTs, Si-MOSFETs, SiC und GaN bieten Lösungen mit einer Sperrspannung von 650 V.

Für OBCs gibt es zwei Möglichkeiten des Energieflusses: unidirektional oder bidirektional. Bei der unidirektionalen Methode fließt die Energie aus dem Netz in die Batterie. Bei der bidirektionalen Variante fließt die Energie entweder vom Netz in die Batterie oder wird aus der Batterie ins Netz zurückgespeist. Bei diesen bidirektionalen Batterieladegeräten werden sich aufgrund der komplexen Systemanforderungen wahrscheinlich die WBG-Technologien SiC und GaN durchsetzen und den Kampf untereinander ausfechten. Langfristig ist stark davon auszugehen, dass die Silizium-Halbleiter aus OBCs verschwinden werden.

#### DC/DC-WANDLER

Bei einem klassischen DC/DC-Wandler handelt es sich um einen Umwandler in einer Leistungsklasse von ca. 3 kW.

Dieser Leistungselektronikbaustein wandelt die Spannung aus der Hochvolt-Batterie in 12 V um, um das Bordnetz und dessen Anwendungen zu versorgen, etwa für Infotainment. Bis heute prägt die Si-Technologie diese Anwendung. SiC-MOSFETs wurden bis jetzt in speziellen Fällen auf der Primärseite eingesetzt. Interessant wird es, wenn der DC/DC-Wandler zukünftig zusammen mit dem OBC in ein gemeinsames Gehäuse integriert wird. Ziel der Zusammenführung ist die Reduzierung der Gesamtkosten, die Verheiratung wird aber sicherlich auch dazu führen, dass künftig SiC- und GaN zum Einsatz kommen.

Für Brennstoffzellen oder um die Spannung für große Batterien über 100 kWh anzupassen, werden On-Bord-Hochleistungs-DC/DC-Wandler mit über 100 kW eingesetzt. In diesen Fällen ist SiC die optimale Lösung. IGBTs haben hier aufgrund der hohen Anforderung an die Leistungsdichte keine Chance.



### DC-LINK Kondensatoren

- Sehr hohe Volumenkapazität
- Hohe Bemessungsspannung pro Bauteil
- Sehr niedriger Verlustfaktor (ESR)
- Hervorragende Selbsttheileigenschaften
- Trockener Aufbau ohne Elektrolyt oder Öl
- Sichere Anschlusskonfiguration

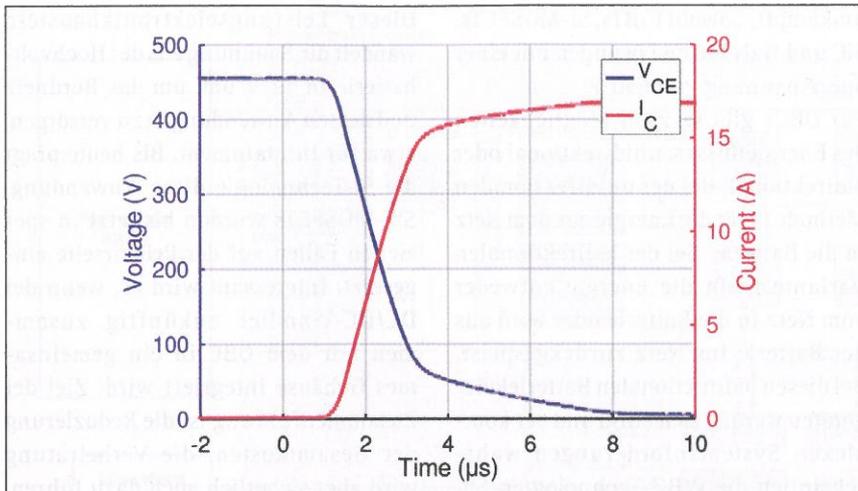


Bild 7. Einschaltvorgang eines IGBTs (RGS80TSX2DHR) bei resistiver Last und  $R_g = 1.1 \text{ k}\Omega$ . (Bild: Rohm)

### KLIMAKOMPRESSOREN

Klimakompressoren werden mit einem Elektromotor angetrieben, dessen Drehzahl durch einen dreiphasigen Wechselrichter geregelt wird. Die Leistungsklasse variiert je nach Fahrzeugtyp von 3 kW bis 10 kW. Bis jetzt wird diese Anwendung durch IGBTs dominiert. Aufgrund der stark gestiegenen Systemanforderungen, wie hohe Integration im Motorgehäuse und die daraus resultierende thermische Belastung, wird sich dies zukünftig ändern. SiC-Bauteile haben mit ihren hervorragenden physikalischen Eigenschaften, wie der hohen thermischen Leitfähigkeit, einen großen Vorteil gegenüber IGBTs und auch GaN.

### SPEZIELLE ANFORDERUNGEN VON HV-HEIZERN

Da Elektromotoren deutlich effizienter als herkömmliche Verbrennungsmotoren sind, reicht deren Motorabwärme nicht mehr aus, um den Fahrzeuginnenraum ausreichend zu beheizen. Dafür muss jetzt Batterieenergie in Wärme umgewandelt werden. Um die Heizung einstellen zu können, ohne dass sie von der Betriebstemperatur- oder Batteriespannung abhängig ist, kommen in neuen Hochvoltheizern Leistungshalbleiter (IGBT) zum Einsatz. Die IGBTs regeln den Energiefluss von der Batterie bis zum Heizelement. Das Heizelement (resistive Last) erhitzt das Kühlmittel, das mit der Klimaanlage des Fahrzeugs über einen Wärmetauscher verbunden ist. Mit einem Gebläse wird die warme

Luft in die Kabine befördert (Bild 6). Ein normales Elektrofahrzeug benötigt eine Heizleistung zwischen 5 und 7 kW, die verwendeten Leistungsschalter sind daher ausschließlich IGBTs. Die Technologie bietet eine sehr gute Durchlass-Charakteristik für hohe Ströme. Die höheren Schaltverluste sind im Vergleich zu MOSFETs nicht relevant, da die Schaltfrequenzen üblicherweise zwischen einem zweistelligen Hertz-Bereich bis zu ein paar Kilohertz liegen. Außerdem sind diese Bauteile in Spannungsklassen von 650 V und 1200 V verfügbar. Beide Klassen werden für die gängigen Heizsysteme in E-Autos benötigt. Ein spezielles Merkmal der Heizanwendung ist die Schaltgeschwindigkeit ( $dV_{CE}/dt$ ,  $dI_C/dt$ ), welche vom System vorgegeben ist. Im Gegensatz zu fast allen anderen Leistungselektronikanwendungen ist sie meist auf einen niedrigen Wert begrenzt, da das möglichst schnelle Ein- und Ausschalten nicht im Vordergrund steht. EMV-Beschränkungen und der kostensparende Verzicht auf Filter sind weitere Gründe. Für die Begrenzung werden die IGBTs einfach beim Schalten gebremst, um die Gleichtaktstörung aus dem hochfrequenten Inhalt der Schaltflanken zu reduzieren. Diese Lösung verursacht im IGBT höhere Verluste während des Schaltens, benötigt jedoch keine zusätzlichen Komponenten. Die erhöhten Verluste können mit einer Reduzierung der Schaltfrequenz kompensiert werden. Die Schaltzeiten befinden sich im Bereich von einstelligen Mikrosekunden

den (Bild 7). In seltenen Fällen werden Zeiten im unteren zweistelligen Bereich erzielt. Für HV-Heizer ist sehr unwahrscheinlich, dass WBG-Technologien aufgrund der speziellen Merkmale der Anwendung jemals eine Rolle spielen werden. Der IGBT kann hier nicht verdrängt werden.

### 800-V-BATTERIEN

Noch vor fünf Jahren wurde stark darüber diskutiert, ob die Spannungsklasse 800 V überhaupt eine Zukunft haben wird. Heute ist die 800-V-Batterie nicht mehr wegzudiskutieren. Allein um die Ladezeit auf der Autobahn zu reduzieren, ist sie derzeit die ideale Lösung, und bietet sich ausschließlich für rein batteriebetriebene Fahrzeuge an. Nach momentanem Forschungsstand wird dafür SiC das Maß aller Dinge sein. Dies gilt nicht nur für den Antriebswechselrichter, um die Effizienz des Antriebsstrangs zu erhöhen, sondern auch für weitere Systeme, wie z.B. DC/DC-Wandler auf der Batterieseite, Klima-Kompressoren und Batterieladegeräte.

### DER WEITERE PFAD

IGBTs werden in spezifischen Applikationen des Automobilbereiches durch die neuen WBG-Halbleiter verdrängt, doch sie werden sicher nicht das gleiche Schicksal wie der Bipolar-Transistor erleben. Die Elektromobilität ist wahrscheinlich die einzige Anwendung in der Leistungselektronikindustrie, in der alle Leistungshalbleitertechnologien koexistieren werden. UH



ALY MASHALY

ist Direktor der Sparte Power

Systems bei Rohm Semiconductor in Wllich. Er ist Experte für Leistungselektronik, speziell in Hochvolt-Anwendungen, und hat lange als Entwicklungsingenieur und im Bereich E-Mobility gearbeitet. Mashaly hält einen Bachelor in Elektrotechnik der Universität Ain-Shams, Kairo, und einen Master in Elektrotechnik der Leibniz-Universität Hannover.