

# Elektronik *automotive*

Fachmedium für professionelle Automobilelektronik

**Sonderdruck**



*Zuverlässige SiC-Leistungshalbleiter:*

## **Jagd auf Rekorde**



[www.rohm.com/eu](http://www.rohm.com/eu)

Zuverlässige SiC-Leistungshalbleiter für Automotive-Anwendungen:

# Jagd auf Rekorde



(Bilder: Rohm)

Um die Reichweite von Elektrofahrzeugen zu verbessern, bedarf es auch neuer Halbleitermaterialien wie Siliziumkarbid. Rohm hat die Performance seiner SiC-Bausteine bereits in der Partnerschaft mit dem Formel-E-Rennstall Venturi unter Beweis gestellt. Was die Bausteine so zuverlässig und leistungsstark macht und welche Markttrends es gibt, zeigt der folgende Beitrag.



Von Felipe Filsecker, Aly Mashaly

Die Aussichten im Bereich der Elektrofahrzeuge haben sich deutlich verbessert, sodass der Elektromobilität erhebliches Interesse entgegengebracht wird. Automobilhersteller, Industrieunternehmen und Forschungsinstitute haben sich zusammengesetzt, um die geplante Massenproduktion von Hybrid- und Elektrofahrzeugen voranzubringen. Parallel dazu halten neu entwickelte Leistungselektroniksysteme Einzug in die Elektrofahrzeuge. Aufgrund der speziellen Anforderungen der Automobilhersteller werden die

Systementwickler dabei mit neuen Herausforderungen konfrontiert. Eine wichtige Rolle spielen die Vorgaben in Sachen Platzbedarf, Gewicht und Wirkungsgrad. Die gesamten Systemkosten sollten gering bleiben, während für die Produkte gleichzeitig ein Spitzenniveau in Sachen Qualität und Zuverlässigkeit garantiert werden muss.

Um Elektrofahrzeuge erfolgreich in die Mobilitätslandschaft zu integrieren, gilt es, mit neuen Konzepten die bisherigen technologischen Hindernisse aus dem Weg zu räumen. Die Automobil-

hersteller sind darin einig, dass es mit der konventionellen Herangehensweise nicht immer möglich ist, die Leistungsvorgaben für Elektrofahrzeuge zu erfüllen oder allen Design-Restriktionen gerecht zu werden. Die Reichweite eines Autos gibt direkt den Wirkungsgrad seines Antriebsstrangs und seines Energiemanagementsystems wieder. Auf der anderen Seite müssen Systeme der öffentlichen Infrastruktur, wie leistungsstarke Schnellladesysteme mit mehreren hundert Kilowatt Leistung, ebenfalls einen strikt vorgegebenen Größen- und

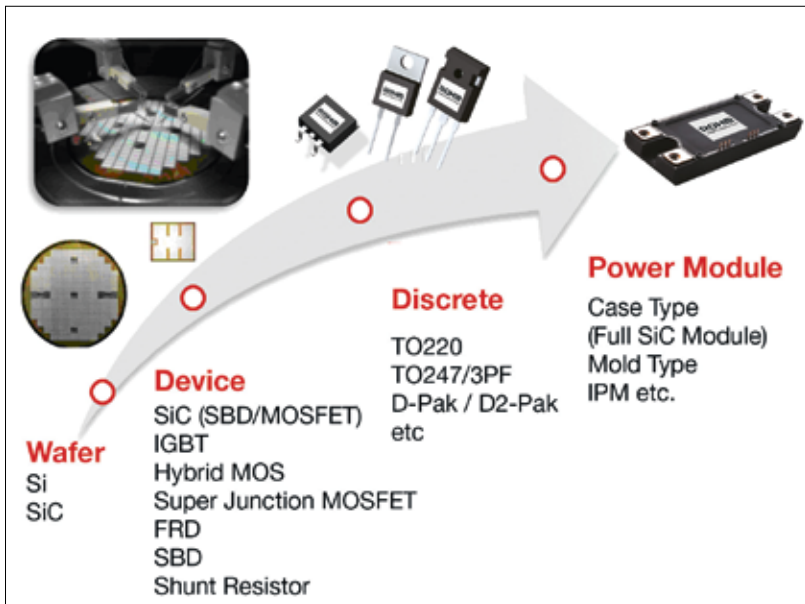


Bild 1. Das hauseigene, integrierte Fertigungssystem von Rohm für Leistungsbaulemente.

Wirkungsgradrahmen einhalten. Das Halbleitermaterial Siliziumkarbid (SiC) birgt mit seinen spezifischen physikalischen Eigenschaften das Potenzial, diese neuen Marktanforderungen zu erfüllen.

Auf dem Gebiet der SiC-basierten Leistungsbaulemente reicht die Kooperation von Rohm mit Automobilherstellern bis in das Jahr 2012 zurück, als SiC-Schottky-Dioden in Batterieladesysteme eingebaut wurden. Möglich war das nur durch das Einhalten hoher Zuverlässigkeits- und Qualitätsstandards. In den vergangenen Jahren hat die wachsende Nachfrage im Automotive-Segment Rohm dazu veranlasst, seinen Fokus auf diesen Markt zu verlagern. Ziel war es dabei, den Anforderungen dieses Industriezweigs in jeder Hinsicht gerecht zu werden. Es versteht sich, dass neue Technologien nicht nur Verbesserungen bringen, sondern auch zahlreiche Fragen aufwerfen. Themen wie Qualität und Zuverlässigkeit sind ebenso wichtig wie die erzielten Performance-Vorteile.

### Die Entwicklung von Leistungsbausteinen bei Rohm

Ausschlaggebend für das Einhalten der hohen Qualitätsmaßstäbe der SiC-Leistungshalbleiter ist, dass Rohm dank des hauseigenen, integrierten Produktionssystems die Kontrolle über jeden einzelnen Aspekt der Bauelementfertigung hat (Bild 1). Das beginnt bereits bei der Herstellung der SiC-Substrate. Aus

Rohsilizium und Kohlenstoffpulver werden qualitativ hochwertige Wafer produziert. Diese Substrate sind entscheidend für die Qualität der späteren Bauelemente, weil einige Ausfallmechanismen in direktem Zusammenhang mit Materialdefekten in Wafern minderer Qualität stehen. Dieser Fertigungsschritt wird in Deutschland durch das Tochterunternehmen SiCrystal ausgeführt. Die Substrat-Wafer ermöglichen die Entwicklung von SiC-Leistungshalbleitern, wie an der erfolgreichen Einführung von SiC-basierten Planar- und Trench-MOSFETs im Jahr 2010 bzw. 2015 deutlich wird. In einem zweiten Schritt werden die Leistungsbaulemente entweder als Bare-Die-Produkte, als diskrete Bauelemente oder integriert in Leistungsmodulen vermarktet.

Die diskreten Bausteine gibt es wahlweise für Durchsteckmontage (Through-Hole Technology, THT) oder für Oberflächenmontage (Surface-Mount Technology, SMT), während die Leistungsmodulen in den Industriestandardgemäßen Formaten C und E angeboten werden. Rohm hat die vollständige Kontrolle über die Bauelementfertigung, die Qualitätskontrolle und das Rückverfolgungssystem.

### Automotive-taugliche SiC-Leistungsbaulemente

Baulemente für den Einsatz in Automotive-Anwendungen müssen höhere Qualifikationsstandards erfüllen als diejenigen, die im industriellen Umfeld

zum Einsatz kommen. Im Fall von Leistungshalbleitern schreibt die Norm AEC-Q101 die Belastungstests vor, die diskrete Bauelemente bestehen müssen, um die Automotive-Qualifikation zu erlangen. Tabelle 1 fasst das Portfolio an SiC-Schottky-Dioden und SiC-MOSFETs von Rohm zusammen, die dieser Norm entsprechen.

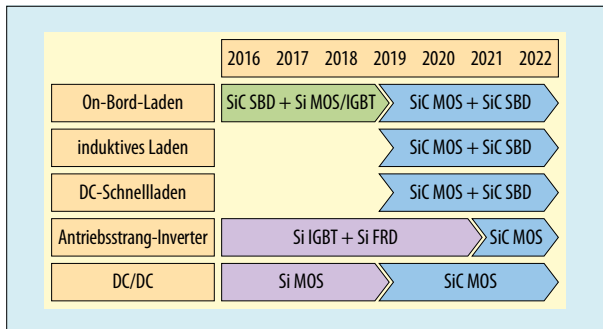
SiC-Schottky-Dioden sind in unterschiedlichen Gehäusen sowie mit verschiedenen Nennströmen für Nennspannungen von 650 und 1200 V erhältlich. Sie gehören der zweiten Generation an, die sich durch niedrige Vorwärtsspannungen und Leckströme auszeichnen und seit 2012 in Automotive-Anwendungen zum Einsatz kommen. SiC-MOSFETs werden in der 1200-V-Klasse in Planartechnologie (zweite Generation) und mit TO-247-Gehäuse angeboten. Die neuen Trench-Baulemente der dritten Generation durchlaufen derzeit den Qualifikationsprozess.

### Leistungshalbleiter-Anwendungen in Elektrofahrzeugen

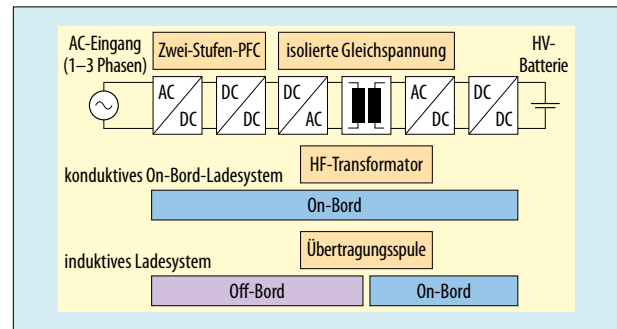
Neben der Batterie und dem Elektromotor spielen Leistungshalbleiter eine wichtige Rolle in der Elektromobilität, zum Beispiel beim konduktiven und induktiven Laden.

#### Laden per Kabel

Wie aus Bild 2 zu entnehmen ist, handelt es sich bei den ersten SiC-Baulementen, die in Automotive-Anwendungen zum Einsatz kamen, um SiC-Schottky-Dioden für Batterieladegeräte, sogenannte On-Board-Charger (OBC). Damit lässt sich das Fahrzeug aus einer herkömmlichen Haushaltsteckdose laden – mit einer Leistung, die auf 3,6 kW einphasig sowie 11 kW dreiphasig (Mode 1 gemäß IEC 62196) begrenzt ist. Die zweistufige Leistungsfaktor-Korrekturschaltung (Power Factor Correction, PFC) besteht in diesem Fall aus einem Brückengleichrichter und einem Aufwärtswandler. Der isolierte Gleichspannungswandler wird üblicherweise aus einem Vollbrückenwandler an der Primärseite des Übertragers und einer Diodenbrücke an der Sekundärseite gebildet. Um der PFC-Stufe einen optimalen Wirkungsgrad zu verleihen, werden 650-V-SiC-Schottky-Dioden bereits als Boost-Dioden eingesetzt, denn Siliziumbauelemente würden die Schaltfrequenz auf zu niedrige Werte begrenzen. Mit zunehmendem Wir-



**Bild 2.** Das Potenzial für den Einsatz von SiC-Leistungselementen in Automotive-Anwendungen.



**Bild 3.** Beispiele von Ladesystemen für Elektrofahrzeuge. Versorgung über die Haushaltssteckdose und kabelloses Laden.

kungsgrad sieht die nächste OBC-Entwicklungsstufe 650-V-SiC-MOSFETs für die PFC-Stufe und als Vollbrückenschalter im Gleichspannungswandler vor. Für Batterien mit hohen Spannungen sind 1200-V-Schottky-Dioden im Ausgangsgleichrichter ebenfalls eine attraktive Option. Als Referenz für zukünftige, rein SiC-bestückte OBCs erreichte das in [1] beschriebene System bei einer Eingangsleistung von 3,1 kW mit 1200-V-SiC-MOSFETs und SiC-Schottky-Dioden einen Wirkungsgrad von mehr als 95 Prozent.

### Kabelloses Laden

Bauart	Typ	Spannung	Strom / $R_{Dson}$	Gehäuse
SBD	SCS2xxAJ	650 V	6 bis 20 A	TO-263AB
SBD	SCS2xxAG	650 V	6 bis 20 A	TO-220AC
SBD	SCS2xxAE2	650 V	20-40 A	TO-247
SBD	SCS2xxKG	1200 V	5-20 A	TO-220AC
SBD	SCS2xxKE2	1200 V	10-40 A	TO-247
MOSFET	SCT2xxxKE	1200 V	80-450 mΩ	TO-247

**Tabelle 1.** Automotive-taugliche SiC-Leistungselemente im Rohm-Portfolio nach AEC-Q101-Qualifikation

Das kabellose Laden von Elektrofahrzeugen ist eine attraktive Lösung, auch wenn die Bequemlichkeit beim Laden mit einer höheren Systemkomplexität und einem geringeren Wirkungsgrad erkauft werden muss (**Bild 3**). SiC-Halbleiter können in diesen Wandlern eine entscheidende Rolle spielen, zumal sich die in der kommenden SAE-Norm J2954 genannten Vorgaben für den Wirkungsgrad (> 90 Prozent) und die Betriebsfrequenz (85 kHz) mit herkömmlichen Siliziumbausteinen nur schwierig erreichen lassen. In dem in [2] vorgeschlagenen optimierten Design wird mit 1.200-V-SiC-MOSFETs in einem 50-kW-System ein Wirkungsgrad von geschätzten 94 Prozent zwischen Wechselstromnetz und Batterie erreicht.

### Traktionswechselrichter

Die in den Traktionswechselrichtern verwendeten Leistungshalbleiter werden starken Temperatur- und Lastwechseln ausgesetzt. Sie müssen eine hohe Kurzschlussfestigkeit und eine große Nennleistung aufweisen. Die derzeitigen Lösungen basieren auf Silizium-IGBTs (Si), deren Technologie sehr ausgereift und kostengünstig ist. Die Wide-Bandgap-Technologie, zu deren Vorteilen das geringere Volumen und der höhere Wirkungsgrad gehören, generiert vermehrtes Interesse an SiC-MOSFETs als möglicher Ersatz für Si-IGBTs in künftigen Wechselrichtern (**Bild 2**). Zur Demonstration dieses Trends ist Rohm mit dem Formel-E-Team Venturi eine Partnerschaft eingegangen. Der Halbleiterhersteller liefert SiC-Schottky-Dioden und -MOSFETs für den Haupt-Traktionswechselrichter eines rein elektrisch betriebenen Rennwagens. Die aktuelle Rennsaison wird mit einem Fahrzeug bestritten, das mit Si-basierten IGBTs und SiC-Schottky-Dioden bestückt ist. **Bild 4** zeigt den alten Si-basierten Wechselrichter und den neuen, auf Si und SiC basierenden Hybrid-Wechselrichter. In der kommenden Saison werden die IGBTs durch SiC-MOSFETs ersetzt, was noch höhere Wirkungsgrade in Verbindung mit einem weiter reduzierten Volumen ermöglicht.

### Zuverlässigkeit von SiC-MOSFETs

Die Vorteile der SiC-Technologie in leistungselektronischen Systemen wurden im vorigen Abschnitt bereits kurz angesprochen. Damit diese Vorzüge genutzt werden können, muss die Zuverlässigkeit der SiC-Bauelemente das Niveau Si-basierter Leistungshalbleiter wie MOSFETs oder IGBTs erreichen. Hieraus ergibt sich eine Reihe technologischer Herausforderungen im Zusammenhang mit neuen

Phänomenen, die bei der traditionellen Si-Technologie unbekannt sind. Der Erfolg der Hersteller von Leistungshalbleitern hängt stark von ihrer Fähigkeit ab, diese Phänomene zu beherrschen und stabile Prozesse zu entwickeln, die zu vernünftigen Preisen ein hohes Zuverlässigkeitsniveau ermöglichen, ohne die Leistungsfähigkeit der Bauelemente aus dem Blick zu verlieren. Rohm strebt mit seinen Leistungsbauelementen einen guten Kompromiss zwischen Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit an. Die SiC-Leistungsbauweise durchlaufen dieselben Tests, die auch von standardmäßigen Si-Bauelementen verlangt werden, um sich für Industrie- oder Automotive-Anwendungen zu qualifizieren.

### Die Zuverlässigkeit des Gate-Oxids

Im Zusammenhang mit SiC-MOSFETs ist die Zuverlässigkeit des Gate-Oxids ein häufiges Thema. Bei einigen frühen Bauelementen traten gewisse Probleme auf, die oftmals als Indiz dafür gewertet wurden, dass eine geeignete Lösung schwierig zu finden wäre. Jahrelange, fortlaufende Verbesserungen haben das Gegenteil bewiesen. Kommerziell verfügbare Bauelemente von Rohm bieten eine hohe Gate-Oxid-Zuverlässigkeit mit einer Lebensdauer von deutlich über 20 Jahren (**Bild 5, 6**). **Bild 5** zeigt auf der Basis von High-Temperature-Reverse-Blocking-Tests (HTRB) Lebensdauerdiagramme für Planar- und Trench-MOSFETs der zweiten und dritten Generation. In diesem Test wird das Bauelement einer Sperrspannung und einer hohen Temperatur ausgesetzt. Das elektrische Feld, das sich in dem Bauelement aufbaut, belastet die Gate-Oxid-Grenzfläche, bis sie versagt. Das wird mit vielen Bauelementen wiederholt und die Ergebnisse werden aufgezeichnet. Die Lebensdauer des Bauelements unter Worst-Case-Betriebsbe-

dingungen von 950 V für einen 1200-V-Baustein wird durch Extrapolieren der Versuchsergebnisse ermittelt. Für die Bauelemente beider Typen ergibt sich hierbei eine Lebensdauer von mehr als 100 Jahren.

Die andere kritische Bedingung für das Gate-Oxid hat mit dem leitenden Zustand zu tun. In diesem Fall konzentriert sich die Belastung zwischen dem Gate- und dem Source-Anschluss, weil zur Bildung des MOSFET-Kanals eine positive Spannung benötigt wird. Für die MOSFETs von Rohm beträgt die empfohlene Gate-Source-Spannung +18 V. Allerdings wurden für die beschleunigten Tests Spannungen zwischen 40 und 50 V angelegt. Die Extrapolation dieser Ergebnisse zeigt, dass mit einer Gate-Source-Spannung von über 30 V eine Lebensdauer von rund 20 Jahren erreicht wird. Der Betrieb mit +18 V dürfte deshalb hinsichtlich der Oxidlebensdauer keinerlei Problem darstellen.

**Beständigkeit gegen kosmische Strahlung**

Die Erde ist fortlaufend einer kosmischen Strahlung ausgesetzt. Diese besteht aus atomaren Teilchen, die bekanntermaßen Ausfälle in Halbleiterbauelementen hervorrufen können. Einfallende Neutronen kollidieren mit dem Atomgitter des Bausteins und erzeugen stark lokal konzentrierte Ströme, die schließlich zum Ausfall führen. Dieser als Single-Event-Burn-out (SEB) bezeichnete Effekt kann allerdings nur dann auftreten, wenn der Baustein einer Spannung ausgesetzt ist, die über einem bestimmten Grenzwert liegt. Dieser liegt meist bei etwa 70 Prozent der Durchbruchspannung des Bausteins [3]. Bei traditionellen IGBTs und MOSFETs

auf Si-Basis begrenzt man die Betriebsspannung auf 80 Prozent der Nennspannung des jeweiligen Bausteins, um unterhalb von 100 FIT zu bleiben. In Anwendungen, die nach niedrigen Ausfallraten verlangen, sind Bausteine einer höheren Spannungs-kategorie üblich. Neben der angelegten Spannung haben noch weitere Parameter Einfluss auf die Ausfallrate, nämlich die Fläche des Bausteins, die Eigenschaften des Halbleitermaterials und die Umgebungsbedingungen. Studien zur Beständigkeit neuer SiC-Leistungsbausteine gegen kosmische Strahlung wurden mit Erfolg durchgeführt. Bild 7 zeigt die Ergebnisse eines Tests bei ANITA in Schweden [4]. Dieser ergab, dass SiC-Trench-MOSFETs bessere SEB-Eigenschaften bieten als vergleichbare Si-Bauelemente. Sie können deshalb mit höheren Spannungen betrieben werden als Si-Bausteine, ohne dass die FIT-Raten übermäßig ansteigen. Angesichts der Tatsache, dass die Batteriesysteme von Elektrofahrzeugen in naher Zukunft Spannungen von 800 V erreichen werden, ist das eine attraktive Eigenschaft der SiC-Bausteine.

**Stabilität der parasitären Diode**

Sowohl Kristalldefekte als auch der Fertigungsprozess von SiC-MOSFETs

haben großen Einfluss auf die Stabilität der parasitären Diode. Mit der bei einem Strom in Vorwärtsrichtung erfolgenden Rekombination von Löchern und Elektronen wird Energie frei. Hierdurch ändert sich eine bestimmte Art von Kristallversetzungen, von einem linearen zu einem planaren Typ. Das kann dazu führen, dass sich der Durchlasswiderstand der parasitären Diode und des MOSFETs verschlechtert. Basierend auf dem Know-how, das sich Rohm im Bereich des Substrats, des Epitaxiewachstums und des Bauelements angeeignet hat, tritt dieser bipolare Degradationseffekt bei den Bauelementen des Unternehmens nicht auf. Gleichstrom-Belastungstests, die mit 20 Planar-MOSFETs von Rohm durchgeführt wurden, weisen nach, dass diese Bauelemente selbst dann keine nennenswerte Beeinträch-



Bild 4. Leistungssteigerung und Größenreduzierung der Traktionswechselrichter für Formel-E-Rennwagen durch Einführung der SiC-Schottky-Dioden-Technologie.

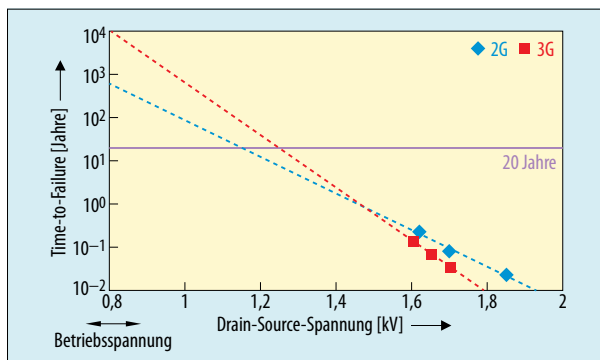


Bild 5. Lebensdauerberechnung auf Basis des HTRB-Tests an 1200-V-SiC-MOSFETs (zehn Stück pro Datenpunkt; Tj = 150 °C, 70 % Ausfallrate für 2G, 50 % Ausfallrate für 3G).

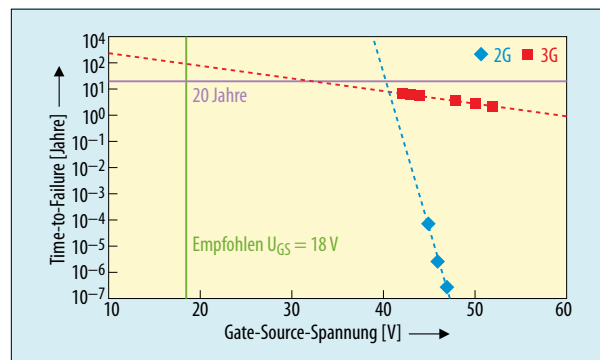


Bild 6. Lebensdauerberechnung des Gate-Oxids auf Basis des HTGB-Tests an 1200-V-SiC-MOSFETs (zehn Stück pro Datenpunkt; Tj = 175 °C, 70 % Ausfallrate für 2G, 50 % Ausfallrate für 3G).

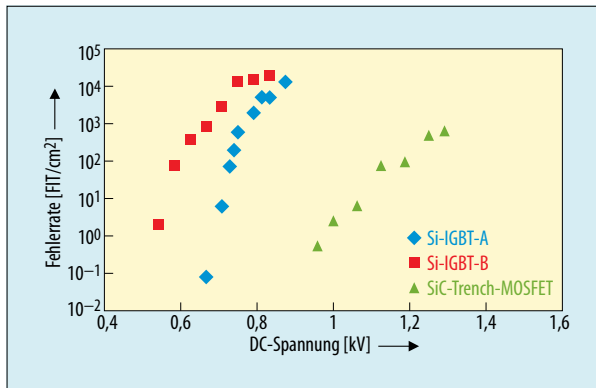


Bild 7. Durch kosmische Strahlung ausgelöste SEB-Ausfallrate an 1200-V-Si-IGBTs und Rohm SiC-Trench-MOSFETs, basierend auf Daten aus [4].

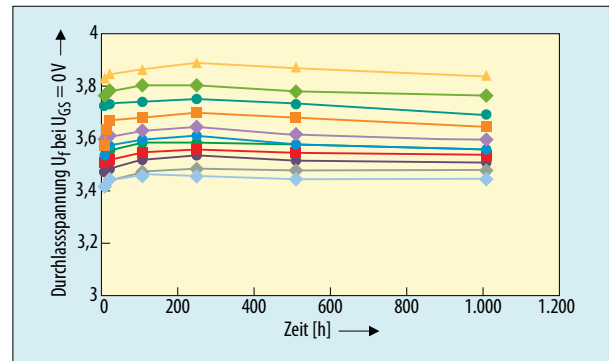


Bild 8. Vorwärtsspannung der parasitären Diode während einer Gleichstrom-Belastungsprüfung (SCT3040KL, IF = 10 A, Tj = 175 °C, 20 Stück, G-D kurzgeschlossen).

tigung aufweisen, wenn die parasitäre Diode 1.000 Stunden lang mit 10 A belastet wurde, denn die Vorwärtsspannung bleibt konstant (Bild 8).

### Avalanche-Festigkeit

Bestimmte Anwendungen setzen voraus, dass der verwendete Leistungshalbleiter den Avalanche-Modus ohne Ausfall übersteht. Meist wird dieser durch Überspannungen verursacht, die durch schnelle Stromänderungen (hohe di/dt-Werte) im Verbund mit parasitären Induktivitäten hervorgerufen werden. Ein Beispiel ist die ungewollte Unterbrechung des DC-Ladestroms in Verbindung mit langen Kabeln. Andere Anwendungen erfordern den Einsatz von Leistungsschaltern für induktive Lasten. In diesem Fall wird der Avalanche-Modus des Bausteins bereits beim Design berücksichtigt. Bauelemente ohne Avalanche-Fähigkeit, wie IGBTs, sind auf Snubber-Schaltungen und aktive Gate-Ansteuerung angewiesen, um nicht zerstört zu werden. SiC-MOSFETs mit Planar- oder Trench-Struktur sind dagegen prinzipbedingt Avalanche-fest. Bild 9 zeigt die Kurven für einen planaren MOSFET im Einzelpuls-Avalanche-

Betrieb. Das geprüfte Bauelement kann ohne Ausfall eine Energie von 1,2 J abführen. Allerdings tritt durch die hohe Durchbruchspannung der Bauelemente (>1800 V für ein 1200-V-Bauelement) dieser Betriebsmodus selten auf.

### Ausblick

Die Elektrofahrzeug-Technologie ist Gegenstand ernsthafter Entwicklungsarbeit und wird die Mobilitätslandschaft schon in wenigen Jahren verändern. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Leistungsfähigkeit wird man traditionelle Lösungen zugunsten neuer Konzepte aufgeben. SiC-Bauelemente sind mit ihren verbesserten physikalischen Eigenschaften ein zentrales Element dieser neuen Landschaft. Rohm arbeitet daran, die Zuverlässigkeit seiner SiC-Bauelemente fortlaufend zu verbessern – wie zum Beispiel an der Automotive-Qualifikation deutlich wird. eck

### Literatur:

[1] B. Whitaker et al.: „A High-Density, High-Efficiency, Isolated On-Board Vehicle Battery Charger Utilizing Silicon Carbide Power Devices,“ in IEEE

Transactions on Power Electronics, Vol. 29, Nr. 5, S. 2606-2617, Mai 2014.  
 [2] R. Bosshard und J. W. Kolar: „All-SiC 9.5 kW/dm<sup>3</sup> On-Board Power Electronics for 50 kW/85 kHz Automotive IPT System,“ in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 5, Nr. 1, S. 419-431, März 2017.  
 [3] H. Kabza et al.: „Cosmic radiation as a cause for power device failure and possible countermeasures,“ Proceedings of the 6th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs, Davos, 1994, S. 9-12.  
 [4] C. Felgemacher et al.: „Cosmic radiation ruggedness of Si and SiC power semiconductors,“ 2016 28th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), Prag 2016, S. 51-54.



### Aly Mashaly

studierte Elektrotechnik-Energie an der Universität Ain-Shams in Kairo (B.Sc.). An der Leibniz Universität Hannover absolvierte er den Master of Science in Elektrotechnik. Seine Berufslaufbahn begann er als Entwicklungsingenieur Leistungselektronik bei Liebherr Elektronik. Anschließend übernahm er die Leitung des eMobility-Bereiches bei KEB. Seit Juli 2015 ist er bei Rohm Semiconductor tätig und verantwortet die Power-Systems-Abteilung für den europäischen Markt.



### Dr.-Ing. Felipe Filsecker

studierte Elektrotechnik an der Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile. Er promovierte an der Technischen Universität Dresden im Bereich Leistungselektronik, wo er sich mit der Anwendung von hochsperrenden SiC-Leistungshalbleitern befasst hat. Im Anschluss arbeitete er an der TU Dresden als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Professur Leistungselektronik, bevor er im März 2016 als Application Engineer Power Systems bei Rohm Semiconductor begann.

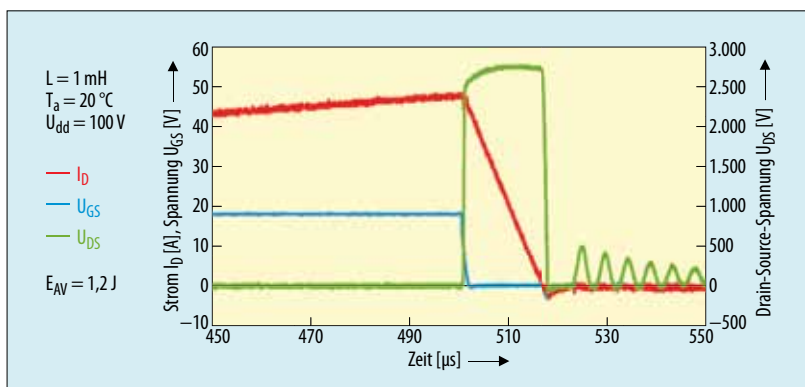


Bild 9. Kurven zum Avalanche-Betrieb für einen 2G-MOSFET vom Typ SCT2080KE (planar).