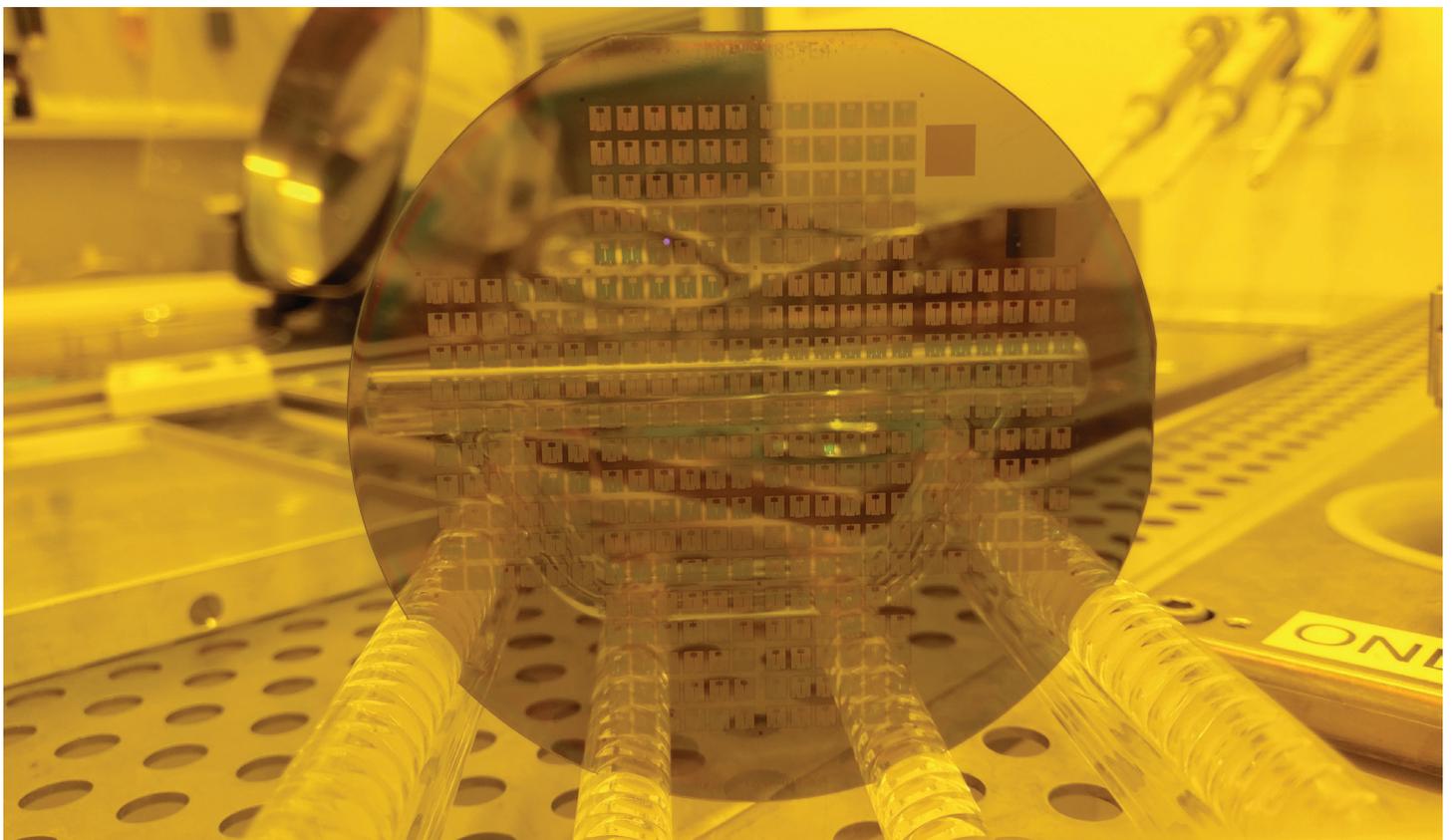


«WBG-HALBLEITER BRINGEN ENORM VIEL EFFIZIENZ»

Leistungselektronik steckt heute im Ladegerät für das Mobiltelefon ebenso wie in der SBB-Lok oder dem Wechselrichter der Solaranlage. Basis dieser elektronischen Bauteile bildet bislang meist das Halbleitermaterial Silizium. Die Forschung arbeitet seit längerem daran, Silizium durch sogenannte WBG-Halbleiter zu ersetzen, deren Bauteile geringere Schaltverluste aufweisen und damit eine höhere Energieeffizienz der mit WBG-Halbleitern gefertigten Geräte ermöglichen. Ulrike Grossner, Professorin am «Advanced Power Semiconductor Laboratory» an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich, erläutert im Interview das Potenzial der WBG-Technologie für eine effiziente Energieversorgung.



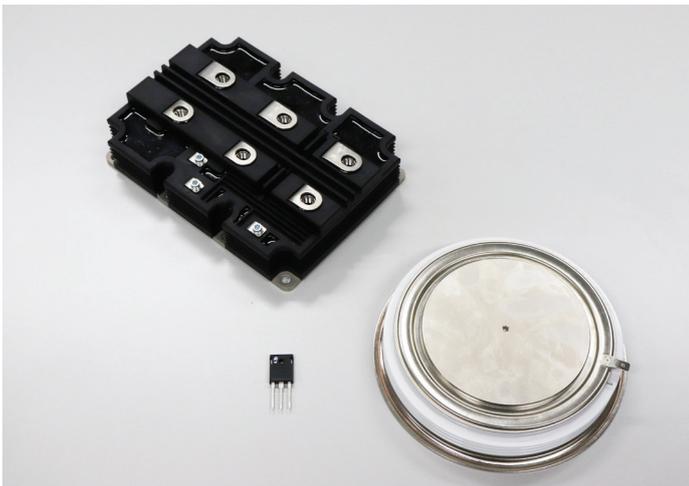
Siliziumkarbid-Wafer aus einem Projekt des ETH-Labors von Ulrike Grossner. MOSFET-Transistoren (Metal oxide semiconductor field-effect transistors) sind die derzeit vielversprechendsten Schalter auf Siliziumkarbid-Basis. Foto: Y. Ju/Copyright ETH Zürich

Frau Prof. Grossner, wenn Bauteile für Versorgung und Steuerung von Elektrogeräten mit Halbleiter-Materialien gebaut werden, spricht man von Leistungselektronik. Welche Rolle spielen leistungselektronische Bauteile für die Energieeffizienz?

Ulrike Grossner: Die Leistungselektronik ermöglicht eine effiziente Wandlung des elektrischen Stroms für die gewünschte Verwendung. Wird herkömmliche Elektrotechnik wie zum Beispiel ein Transformator durch Leistungselektronik ersetzt, erlaubt diese eine sehr effiziente Regelbarkeit speziell bei Motoren. Das bringt einen Gewinn an Energieeffizienz für das Gesamtsystem. Dank Leistungselektronik sind zum Beispiel auch Ladegeräte für Laptops und Netzteile nicht nur sparsamer, sondern auch kompakter geworden.

In welchem Umfang hat Leistungselektronik die frühere Elektrotechnik denn bereits abgelöst?

Im privaten Haushalt ist Leistungselektronik schon weit verbreitet, wie die genannten Beispiele deutlich machen. Was beim Staubsauger im Kleinen funktioniert, ist heute auch in der SBB-Lokomotive Standard. In das Antriebssystem der Loks hat die Leistungselektronik schrittweise Einzug gehalten: Erst nutzte man hier Thyristoren, ein leistungsstarkes Halbleiterelement auf der Grundlage einer Siliziumscheibe (Wafer), um diese Systeme schnell und exakt regeln zu können. Unter-



Drei Beispiele von Leistungselektronik. Oben: Modul mit 6,5 kV und 300 Ampère, das mehrere Silizium-Halbleiterelemente enthält. Es handelt sich um ein Traktionsmodul von ABB. Unten links: MOSFET-Transistor auf der Basis von Siliziumkarbid mit 1200 V, wie er zum Beispiel zur Steuerung eines Staubsaugergetriebes zum Einsatz kommt (Hersteller: Wolfspeed). Unten rechts: Thyristor aus ABB-Produktion. Es handelt sich um einen (eher langsamen) leistungselektronischen Schalter auf Silizium-Basis, der sich aber durch eine sehr hohe Stromtragfähigkeit auszeichnet. Foto: B. Vogel



ETH-Professorin Ulrike Grossner.
Foto: ETHZ

dessen verwendet man statt einzelner, grosser Bauelemente kleine Chips, die in Modulen angeordnet sind. Das spart auch massiv Platz. So wurde es möglich, Triebwagen zu bauen, in denen neben dem Antriebsteil auch Passagiere Platz haben wie in unseren modernen Doppelstockzügen.

Leistungselektronik hat viele Neuerungen gerade in der nachhaltigen Stromversorgung überhaupt erst möglich gemacht: Die Stromproduktion von Photovoltaik- oder Windkraftanlagen ist schwankend, abhängig von der aktuellen Einstrahlung und den Windverhältnissen. Erst mit Wechselrichtern auf der Basis von Halbleitern ist es möglich geworden, diese Ströme effizient auf das Spannungsniveau zu bringen, das für die Netzeinspeisung erforderlich ist.

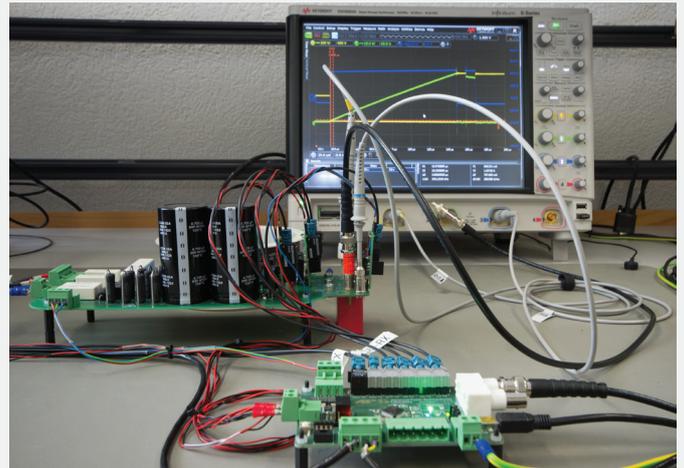
Nun ist mit den Wide-Bandgap-Halbleitern (kurz: WBG-Halbleiter) eine neue Generation von Halbleitern am Start, mit denen sich Bauteile der Leistungselektronik noch energieeffizienter herstellen lassen. Beobachter sprechen von einer «Revolution» für die Energieeffizienz. Ist diese Revolution in der Schweiz schon angekommen?

Richtig ist, dass man die Effizienz von leistungselektronischen Komponenten weiter steigern kann, indem man in elektronischen Bauteilen das bisher übliche Silizium durch WBG-Halbleiter ersetzt. Parallel zu diesem eher zukunftsorientierten Schritt der WBG-Halbleiter, sollte nicht versäumt werden, den naheliegenden, ersten Schritt konsequent umzusetzen: Wir sollten Leistungselektronik auf der Grundlage von vorhandener, Silizium-basierter Leistungselektronik bei allen Anwendungen einsetzen, wo dies heute möglich ist. Mit diesem Vorgehen können wir nämlich bereits heute ein grosses, brachliegendes Potenzial an Energieeffizienz erschliessen.

WAS SIND WBG-HALBLEITER?

Materialien wie Kupfer sind immer elektrisch leitend, Keramik hingegen nie. Ein Mittelding zwischen Leitern und Nichtleitern (Isolatoren) sind die Halbleiter: Sie leiten elektrischen Strom nur dann, wenn von aussen Energie zugeführt wird (z.B. bei Solarzellen in Form von Sonnenlicht). Man kann die Halbleiter danach unterteilen, wie viel Energie erforderlich ist, damit sie leitend werden. Bei Silizium – dem verbreitetsten Halbleiter – ist diese Energie mit 1,12 Elektronenvolt vergleichsweise gering, bei Siliziumkarbid mit 3,27 Elektronenvolt hingegen relativ gross.

Wenn einem Halbleiter von aussen Energie zugeführt wird, sorgt diese Energie dafür, dass Elektronen aus dem Atomverbund herausgelöst werden, so dass sie sich nun ausserhalb der Atome frei bewegen und (unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes) einen elektrischen Strom bilden können. Physiker beschreiben diesen Herauslösungsprozess als Wechsel des Elektrons vom Valenzband (Elektron ans Atom gebunden) ins Leitungsband (freies Elektron). Für jedes Halbleitermaterial ist die Lücke zwischen Valenz- und Leitungsband unterschiedlich gross, es braucht also unterschiedlich viel Energie, die Bandlücke (engl. bandgap) zu überwinden. Für Silizium ist diese Bandlücke mit den oben genannten 1,12 Elektronenvolt relativ gering (gering genug übrigens, dass die Energie eines Lichtteilchens ausreicht, um in Silizium-Solarzellen einen Strom anzuregen). Siliziumkarbid in der gebräuchlichsten Form hat mit 3,27 Elektronenvolt eine grosse Bandlücke. Alle Halbleiter mit einer Bandlücke grösser als 3 Elektronenvolt gehören zur Klasse der Wide-Bandgap-Halbleiter (kurz WBG-Halbleiter).



Teststand im Labor von Ulrike Grossner, mit dem sich elektrische Verluste im Schaltverhalten bestimmen lassen. Foto: T. Ziemann/ Copyright ETH Zürich

WBG-Halbleiter sind aufgrund des grossen Bandabstands und des auf der Erde herrschenden Lichtspektrums ungeeignet zum Bau von Solarzellen. Sie erlauben hingegen die Herstellung von elektronischen Bauteilen, die Schaltvorgänge mit sehr geringen elektrischen Verlusten ausführen (insbesondere auch bei hohen Spannungen und Frequenzen). Die wichtigsten WBG-Halbleiter sind Siliziumkarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN). Die Forschungsgruppe von Ulrike Grossner an der ETH Zürich untersucht, wie Siliziumkarbid und andere WBG-Halbleiter in geeignete Bauelemente verarbeitet werden können; ihre Kollegen Prof. Johann W. Kolar und Prof. Jürgen Biela arbeiten an deren Nutzung und optimierter Ansteuerung z.B. für Inverter für hochspezielle Anwendungen. Sehr stark in der Siliziumkarbid-Forschung ist Japan aktiv. Mit ihr pflegt die ETH einen regen Austausch. BV

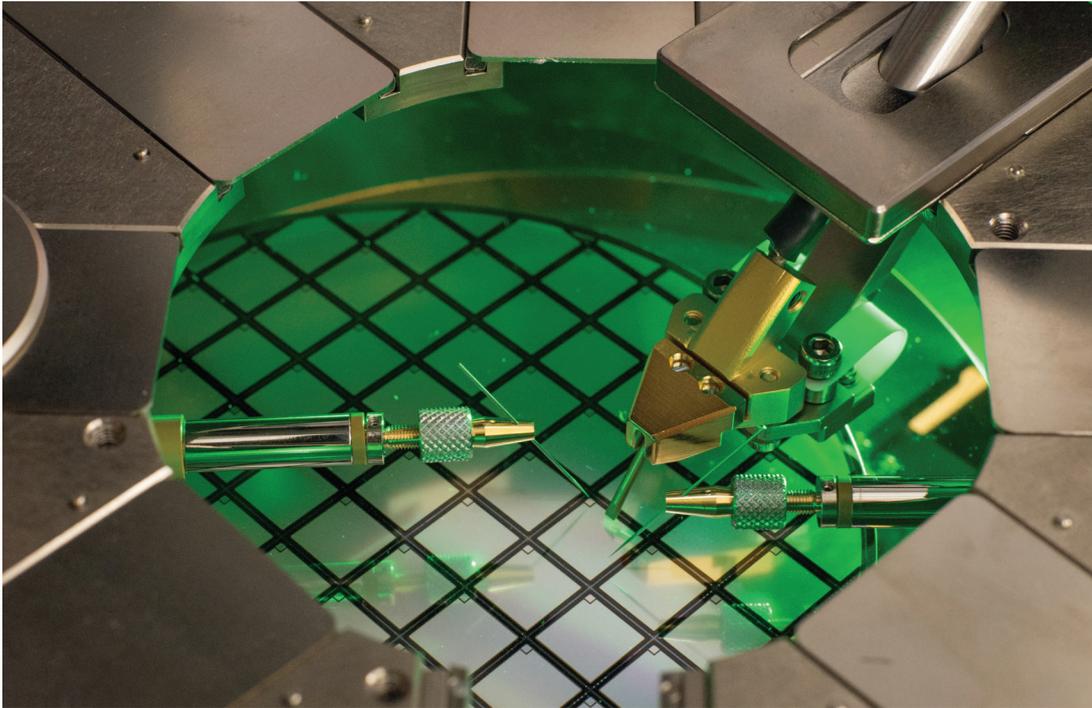
Sie erforschen an der ETH Zürich Wide-Bandgap-Halbleiter wie Siliziumkarbid. Wie gross ist das Energiesparpotenzial dieser Materialien?

Das Sparpotenzial der WBG-Halbleiter ist enorm! Nehmen wir als Beispiel das Natel: Eine Studie des US-amerikanischen «Department of Energy» aus dem Jahr 2015 beziffert den Energieverlust von Mobiltelefonen auf 37%, wobei ein erheblicher Teil auf die Silizium-gestützte Leistungselektronik im Ladegeräte entfällt. Für ein einzelnes Telefon macht das im Jahr zwar nur 4.2 kWh aus, für alle Natels weltweit aber 23,5

TWh. Durch den Einsatz von WBG-Halbleitern liessen sich die Verluste laut Studie um rund 5,5 TWh verringern. Das ist annähernd ein Zehntel dessen, was die Schweiz in einem Jahr an Strom verbraucht. Mit WBG-Halbleitern liesse sich auch der Ertrag von kommerziellen Solaranlagen erhöhen.

Tatsächlich?

Ja, denn der eingesetzte Wechselrichter hat entscheidenden Einfluss, welcher Anteil des Solarstroms im Netz ankommt. Wechselrichter auf der Grundlage von Siliziumkarbid arbei-



Ein sogenannter «Wafer-Prober» im ETH-Labor von Ulrike Grossner. Eigenschaften von Bauelementen können schon vor der endgültigen Vereinzelung und der Weiterverarbeitung in Modulen auf ihre Funktionsfähigkeit getestet werden. Foto: T. Ziemann/Copyright ETH Zürich.

ten mit einem Wirkungsgrad von bis zu 99% und damit um etwa 50% effizienter als die bisher gebräuchlichen aus Silizium. Leider werden die Siliziumkarbid-Inverter in grossen Solarfarmen heute oft nicht eingesetzt, obwohl sie auf dem Markt verfügbar sind, denn sie sind teurer als Silizium-Inverter. Damit sich das ändert, sollten Solaranlagen nicht nur aufgrund von kurzfristigen Baukosten bewertet werden, sondern es sollten Kosten und Erträge über die gesamte Betriebszeit hinweg (total cost of ownership) berücksichtigt werden. In dieser Rechnung schlagen die Mehrerträge dank der Siliziumkarbid-Inverter positiv zu Buche.

Sie haben in einer Studie im Auftrag des Bundesamts für Energie (siehe Hinweis am Ende des Interviews) das Potenzial von WBG-Halbleitern untersucht. Wo sehen Sie weitere Einsatzfelder?

Siliziumkarbid kommt heute in Elektronik-Bauteilen von Solarinvertoren und Ladestationen für Elektromobile sowie in der Stromversorgung von Telekomanwendungen zum Einsatz, ist aber auch in Leistungsfaktorkorrekturfiltern und in speziellen Bauteilen der Elektrizitätsdistribution und der unterbrechungsfreien Stromversorgung enthalten. Für den WBG-Halbleiter Galliumnitrid gibt es erste Anwendungen für Transistoren in der Automobilindustrie (z.B. Klimaanlage, Radio). Sinnvoll wäre der Einsatz überall dort, wo es um relativ kleine Leistungen geht, etwa bei Ladegeräten für Mobiltelefone oder Laptops. Weitere Einsatzgebiete für WBG-Halb-

leiter sind Leistungselektronik-Komponenten für Rechenzentren, Industriemotoren, Traktionssysteme für Eisenbahnen sowie für Hybrid- und Elektroautos. Eine Studie aus dem Jahr 2017 kam zum Schluss, dass sich in diesen Bereich mit WBG-Halbleitern bis zu 99 TWh Strom sparen liessen, also mehr als anderthalb mal soviel wie der jährliche Stromverbrauch der Schweiz.

Ein Wafer aus Siliziumkarbid ist ungefähr 25 mal teurer als ein Silizium-Wafer von derselben Grösse, allerdings sind die Silizium-Bauelemente bei gleicher Leistung auch grösser als diejenigen aus Siliziumkarbid. Wegen der höheren Kosten zögern viele Hersteller beim Einsatz von WBG-Halbleitern. Das gilt zum Beispiel für Antriebsstränge von Elektrofahrzeugen – die Autobranche ist extrem kostensensitiv. Man könnte WBG-Halbleiter auch in Ladegeräten von Laptops und Handys verbauen; aber wer ist denn heute bereit, für ein Ladegerät überhaupt Geld auszugeben? Das liesse sich vielleicht ändern, wenn solche Ladegeräte ein Energielabel wie Elektrohaushaltsgeräte hätten und sich umweltbewusste Konsumenten bewusst dafür entscheiden könnten. Denkbar wäre der Einsatz von Siliziumkarbid-Leistungselektronik auch in den Trafostationen des Stromnetzes. Die Firma ABB hatte um die Jahrtausendwende die Vision, alle Hochspannungsrichter auf Siliziumkarbid umzurüsten. Aus technischen und Kosten-Gründen sind aber andere Anwendungen damals und auch heute eher erfolgversprechend.

SCHWEIZ ENGAGIERT SICH BEI PECTA

PECTA (kurz für: Power Electronic Conversion Technology Annex) ist eine neue, international zusammengesetzte Expertengruppe unter dem Dach der Internationalen Energieagentur (IEA). Die IEA unterhält rund 40 «Technology Collaboration Programs» (TCP), darunter das Programm «Energie Efficient End-Use Equipment», kurz TCP 4E. Teil dieses Programms ist seit Frühling 2019 die PECTA-Arbeitsgruppe, in der Fachpersonen aus der ganzen Welt unter der Federführung der drei Länder Schweiz, Österreich und Schweden zusammenarbeiten.

Auf Deutsch übersetzt steht die Abkürzung PECTA für «Leistungselektronik zur Steuerung und Umwandlung elektrischer Energie». Das Fachgremium will das Effizienzpotential der Verwendung und Integration von Halbleitern mit weitem Bandabstand (Wide-Bandgap/WBG) in Leistungselektronik-Anwendungen evaluieren. PECTA versteht sich «als Basis und unabhängige Informations- und Wissensplattform für politische Entscheidungsträger und diverse sonstige Interessensgruppen zum Thema WBG».

Im ersten Schritt hat sich die Arbeitsgruppe vier Aufgaben vorgenommen: Erstens soll das Effizienzpotential verschiedener Anwendungsbereiche für WBG-Halbleiter geprüft werden. Zweitens soll eine «Roadmap for Power Devices» – ein Fahrplan für die Umsetzung effizienter Elektronikgeräte – erstellt werden. Drittes Ziel ist die Einbettung der Halbleitertechnologien in internationale Standardisierungsnormen. Schliesslich engagiert sich das Gremium in der internationalen Wissensvermittlung und Vernetzung. Damit stehen politischen Entscheidungsträgern breite Grundlagen für zielgerichtete, regulative und/oder politische Massnahmen zur Unterstützung des Markteintritts der WBG-Technologie zur Verfügung.

Bis im kommenden Frühjahr soll eine «Scoping Study» die Basis für die weitere Arbeit des Expertengremiums legen. Diese wird dann im Zeitraum 2020 bis 2024 im Austausch mit Forschungseinrichtungen und Industrie – darunter Hersteller von Halbleitermaterialien und -geräten, aber auch von Systemherstellern – erfolgen. BV

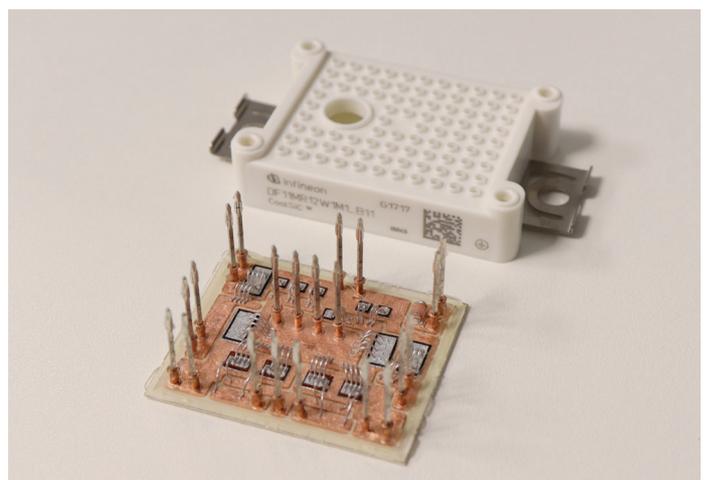
➤ Weitere Informationen zu PECTA siehe <https://pecta.iea-4e.org/> oder <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/iea/technologieprogramme/4e/iea-4e-tcp-pecta.php>

Es gibt neben Siliziumkarbid und Galliumnitrid noch weitere WBG-Halbleiter wie Diamant oder Galliumoxid. Welche Bedeutung haben sie?

An Galliumoxid wird seit ca. fünf Jahren geforscht. Es hat ein gutes Potenzial, die Grundlagen und Eigenschaften sind aber noch nicht ausreichend bekannt. Bei Diamant bin ich skeptisch, denn die Vorteile gegenüber Siliziumkarbid sind eher gering; ich zweifle, ob sich hier der Entwicklungsaufwand lohnen würde.

Siliziumkarbid wird seit den 1980er Jahren erforscht, Galliumnitrid seit der Jahrhundertwende. Was braucht es, um diesen WBG-Halbleitern auf dem Markt zum Durchbruch zu verhelfen?

Ich denke, dass die aktuelle Klimadebatte oder höhere Strompreise den Anstoss geben könnten, die sehr effizien-



MOSFET-Modul von Infineon auf Basis von Siliziumkarbid. ETH-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler untersuchen unter anderem das Packaging, also die Frage, wie man WBG-Halbleiterelemente richtig in eine Chip-Umgebung einbaut. Foto: B. Vogel

ten, aber teureren WBG-Halbleiter vermehrt einzusetzen. Toyota hatte zuerst geprüft, die vierte Generation des «Prius» beim elektrischen Antriebsstrang mit Siliziumkarbid auszurüsten, schreckte davor aber zuletzt aus Kostengründen und Zweifeln an der Zuverlässigkeit zurück. Der Druck der öffentlichen Debatte rund um die Energiewende könnte den Ausschlag geben, dass in solchen Fällen künftig zugunsten von WBG-Produkten entschieden wird. Das gilt auch bei der Beschaffung von Bussen oder Zügen mit den entsprechenden Traktionssystemen.

Technisch gesehen sind leistungselektronische Bauteile auf der Grundlage von WBG-Halbleitern schon ziemlich ausgereift. Eine Aufgabe besteht noch darin, diese Chips ins System des jeweiligen Geräts einzubauen, also das sogenannte Packaging. Auch müssen wir die Anwender – sprich die Systemhersteller – darauf vorbereiten, mit diesen Bauelementen richtig umzugehen. Ausserdem fehlen noch wesentliche Daten zur Zuverlässigkeit, wie man sie normalerweise erst durch eine Vielzahl von Produkten im Markt erhält.

Unter dem Dach der Internationalen Energieagentur (IEA) arbeitet zurzeit die PECTA-Arbeitsgruppe auf internationaler Ebene das Thema der WBG-Leistungselektronik auf. Die Arbeitsgruppe, welche die Schweiz initiiert hat und an der die Schweiz massgeblich beteiligt ist, will politischen Entscheidungsträgern Knowhow und Grundlagen zur Verfügung stellen, damit diese – wo angezeigt – politische Massnahmen zur Unterstützung des Markteintritts von WBG-Leistungselektronik ergreifen können.

- Den **Bericht** von Prof. Ulrike Grossner zum Potenzial der WBG-Technologien («New power electronic materials and devices and its impact on the energy efficiency») finden Sie unter:
<https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=40173>
- **Auskünfte** zu dem Thema erteilt Roland Brüniger (roland.brueeniger[at]brueniger.swiss), Leiter des BFE-Forschungsprogramms Elektrizitätstechnologien.
- Weitere **Fachbeiträge** über Forschungs-, Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte im Bereich Elektrizitätstechnologien finden Sie unter www.bfe.admin.ch/ec-strom.