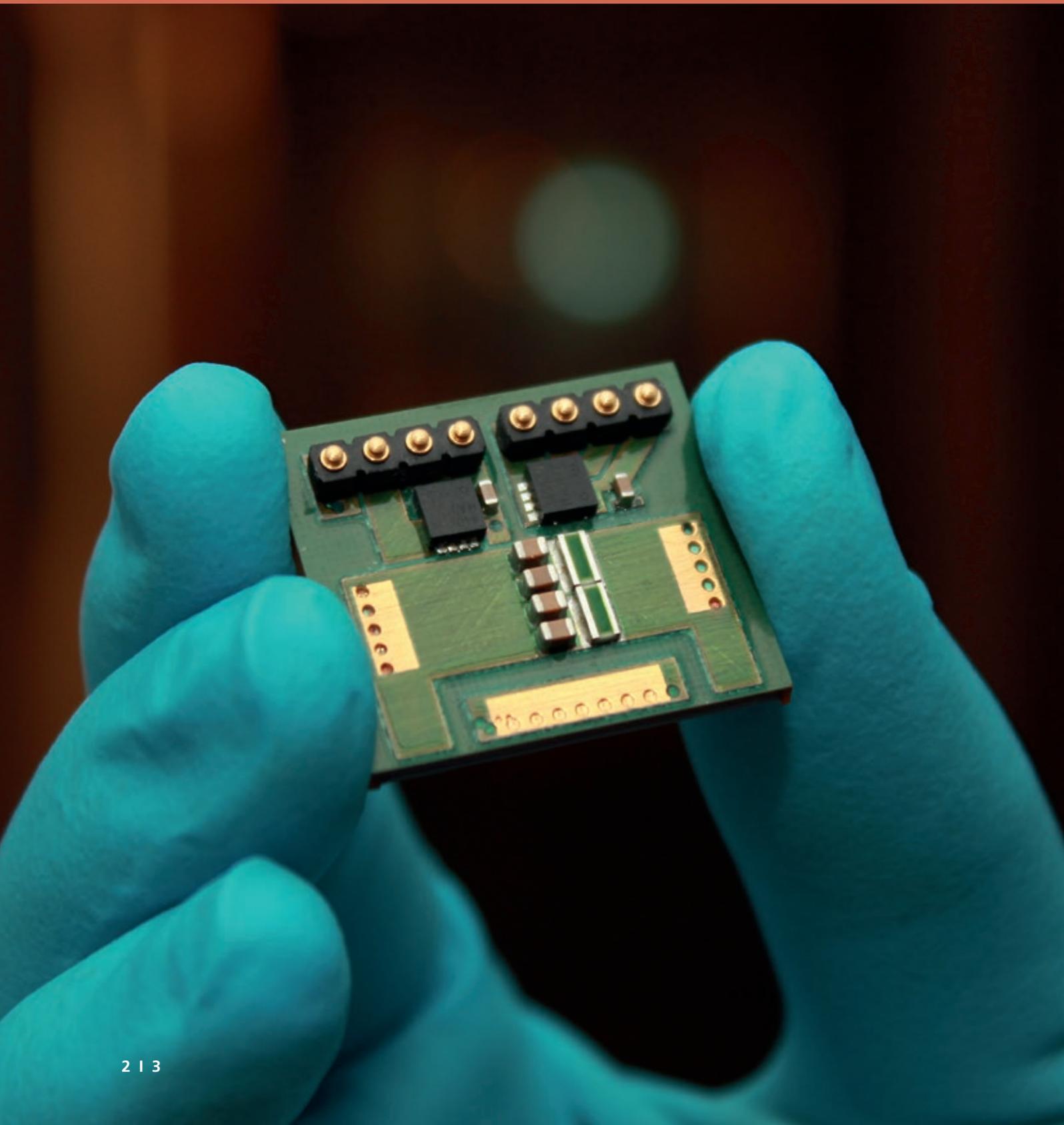
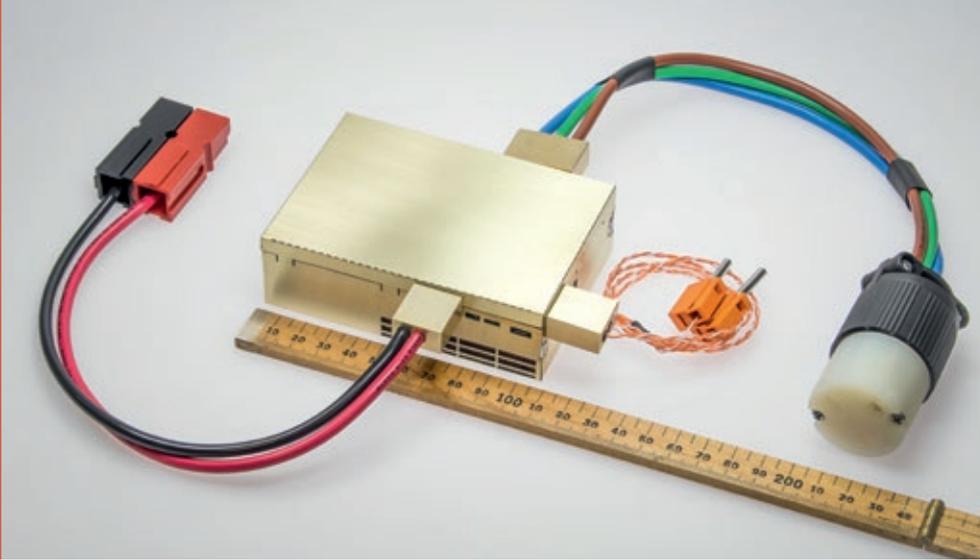


# LEISTUNGSELEKTRONIK



# LEISTUNGSELEKTRONIK VON A(VT) BIS Z(UVERLÄSSIGKEIT)





## ELEKTRISCHER SYSTEM- UND SCHALTUNGSENTWURF

Ein Leben ohne elektrische Energie mag sich wohl niemand mehr vorstellen. Doch die natürlichen Ressourcen sind begrenzt. Darum müssen wir zunehmend regenerative Energieträger intelligent und flexibel an das bestehende Energienetz ankoppeln. Elektrische Verbraucher, von Schaltnetzteilen über Elektro- bzw. Hybridautos und Bahnantriebe bis hin zu großen Industrieantrieben sollen zudem möglichst effizient und energiesparend arbeiten. Jedes dieser vielen Einsatzgebiete für leistungselektronische Komponenten stellt andere Anforderungen an das System, die beim Schaltungsentwurf und der Schaltungsauslegung, der Wahl der Aufbau- und Verbindungstechnik sowie dem Gesamtsystemdesign berücksichtigt werden müssen.

Im Rahmen der Energieeinsparung und auch im Hinblick auf die Miniaturisierung der Umrichter wird der Einsatz von Halbleitern mit hoher Bandbreite wie Siliziumcarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN) besonders attraktiv. Um die Vorteile dieser Halbleiter nutzen zu können, müssen jedoch elektrischer, thermischer und mechanischer Entwurf des gesamten Systems besonders eng vernetzt sein. Ein möglichst hoher Grad der Vernetzung gewährleistet hohe Schaltgeschwindigkeiten und die Berücksichtigung der relevanten EMV-Aspekte bei optimaler thermischer Ausnutzung der Halbleiterchips und des Packages. Dadurch geht der Trend hin zur kompletten Systemlösung, bei der die Schaltzelle bereits mit passiven Bauteilen wie Zwischenkreiskondensatoren und Ausgangsdrosseln versehen ist. Steuerung und Regelung sowie Sicherheitsfunktionen sind bereits implementiert.

Das Fraunhofer IZM verfügt über die notwendigen Kompetenzen in der gesamten Entwicklungskette vom System- und Schaltungsentwurf v.a. auch im Hinblick auf elektromagnetische Verträglichkeit, über Treiberentwicklung, thermisches Management, Aufbau- und Verbindungstechnologien, Einbetten und Verkapseln bis hin zur Zuverlässigkeits- und Schadensanalytik.

Unsere Kunden unterstützen wir bei der Entwicklung individueller leistungselektronischer Systeme mit folgendem Leistungsangebot:

- Schaltungstechnik und Prototypenbau, auch mit Wide-Band-Gap (WBG)-Halbleitern
- Ansteuerung leistungselektronischer Baugruppen, v.a. von WBG-Halbleitern
- Einsatz einer breiten Palette an Simulationswerkzeugen in allen Phasen des Entwurfs, z. B. Matlab, Simplorer, Portunus, Solid Works, FEM- und PEEC-Tools
- EMV-gerechter Entwurf durch Modellierung und Simulation elektromagnetischer Störphänomene auf Systemebene
- Entwicklung von EMV-Konzepten, Filtern und Schirmung
- Test und Charakterisierung der Prototypen im eigenen Labor

WIR ENTWICKELN  
KOMPLETTE  
LEISTUNGS-  
ELEKTRONISCHE  
SYSTEME –  
VOM ENTWURF BIS  
ZUM PROTOTYPEN

### TITEL

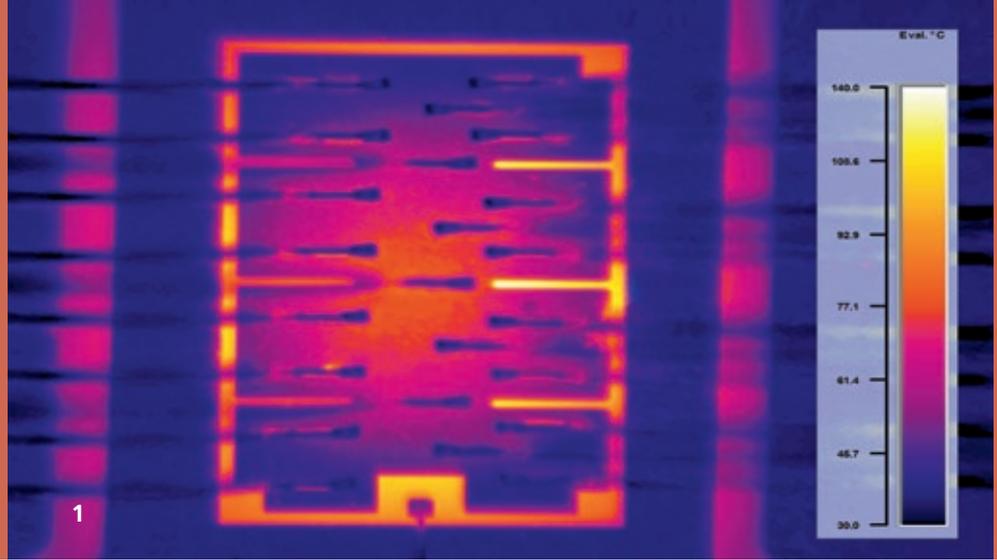
*Leistungselektronik für  
alternative Energien*

### LINKE SEITE

*Leistungsmodul mit in  
PCB-Technologie eingebetteten  
WBG-Halbleitern*

### OBEN

*GaN-basierter Photovoltaik-  
umrichter mit 2 kW Leistung  
auf 250 cm<sup>2</sup>*



## THERMISCHES MANAGEMENT

Die in leistungselektronischen Modulen entstehende Wärme muss zuverlässig abgeführt werden. Hierzu ist es nötig, den gesamten Wärmepfad in einem Systemansatz zu betrachten: Vom Chip wird die Wärme durch verschiedene Grenzschichten, thermische Interface-Materialien, Spreizer und Substrate abgeleitet, bevor sie durch einen Wärmetauscher (Kühler) an die Umgebung abgegeben wird. Alle Komponenten des Wärmepfades beeinflussen den thermischen Widerstand und müssen bedarfsgerecht optimiert werden.

ENTWÄRMUNG  
VOM CHIP  
ZUM SYSTEM

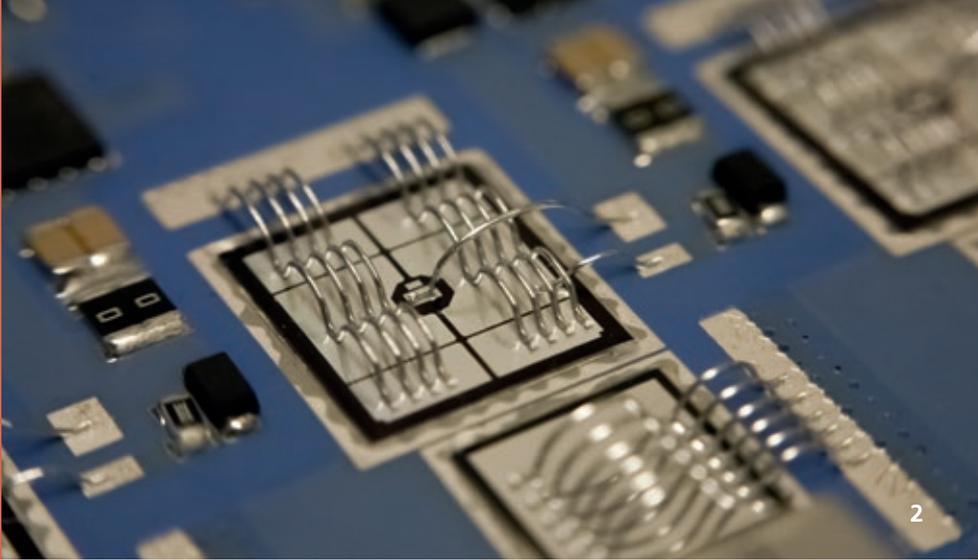
Wir bieten dazu ein umfassendes Konzept für zuverlässige und kostengünstige Entwärmungslösungen an. Dieses beinhaltet im Einzelnen:

- Technologie- und Prozess-Know-how
- Thermisches Design (gestützt durch thermische und fluidische Simulation)
- Materialcharakterisierung
- Messtechnik

In unserem Thermik-Labor stehen u. a. folgende Messmethoden zur Verfügung:

- Hochauflösende transiente Infrarot-Thermografie
- Aktives Powercycling mit optischer Temperaturüberwachung
- Wasserkühlermessplatz
- Thermische Werkstoffcharakterisierung (Klebstoff, Pads, Metallverbindungen, ...):
  - ... Grenzflächenwiderstand
  - ... Wärmeleitfähigkeit
  - ... Thermische Impedanz
- Thermo-fluidische Simulation auf Systemebene
- Windkanal

Besondere Stärken des Fraunhofer IZM liegen in der Kombination von Simulation und Experiment sowie in der engen Verkopplung mit der technologischen Ebene. So kann das thermische Management schon in einer frühen Designphase unter applikationsspezifischen Randbedingungen optimal ausgelegt werden. Die verwendeten Simulationsmodelle lassen sich durch Messungen verbessern und verifizieren. Die Vorteile der Simulation liegen in der schnellen Bewertung verschiedener thermischer Konzepte und in der Möglichkeit zur Optimierung von z. B. Kühlkörperdesign, Lüfteranordnung, Positionierung von Komponenten oder Substrataufbau. Durch das technologische Know-how des Instituts kann die Entwärmung auf allen Systemebenen bis zur Komponente sowie in der Aufbau- und Verbindungstechnik umfassend betrachtet werden.



## CHIPVERBINDUNG / DIE ATTACH

Für eine thermisch optimierte Leistungselektronik höchster Zuverlässigkeit werden heute folgende Verfahren erfolgreich eingesetzt:

- Flächiges Fügen mit Lot-Preforms oder Pasten, durch Ag-Sintern oder Diffusionslötten
- Dickdraht- und Bändchenbonden zur Kontaktierung von Leistungshalbleitern
- Anschluss zur Steuerelektronik und Gehäusung/Verkapselung
- Röntgen- und Ultraschallmikroskopie, visuelle Inspektion sowie mechanische Tests

Mit dem Ziel, den Technologietransfer zur Industrie möglichst einfach und reibungslos zu gestalten, wird jeder einzelne Prozessschritt von uns systematisch untersucht und weiterentwickelt. Die entsprechenden Aktivitäten umfassen:

- Entwicklung von Materialien und Lötverfahren, die eine Erhöhung der Wiederaufschmelztemperatur zur Folge haben (Transient Liquid Phase Soldering)
- Kooperationen mit Materialherstellern (z. B. DCB/DAB/AMB, Wärmespreizer, TIMs, Sinter- und Lotpasten) zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit, der Kühlung und der Zuverlässigkeit
- Entwicklung alternativer Technologien wie Flip-Chip, Ultraschallbonden, Cu-Dickdraht- oder Bändchenbonden, Sandwichaufbauten (doppelseitige Chipkühlung)
- Entwicklung von Ag-Sintertechnologien für die Chip- und Kühlkörpermontage
- Entwicklung innovativer Löttechnologien für Porenfreiheit bei großen Flächen
- Die-Löten mit dünnen Schichten (z. B. Au/Sn) zur Verbesserung der thermischen Performance
- Optimierung der Klebetechniken mit ICA [isotrop leitfähiger Klebstoff] und HCA [isolierender, thermisch leitfähiger Klebstoff], die für geringere Leistungsdichten eingesetzt werden
- Alternative Dickdraht- und Bändchenbondverfahren (Cu, Cu/AIX)
- 3D-Mehrlagen-Integration für erweiterte Funktionen und Modularisierung (Chip in Polymer, Stapellösungen, Embedding von Power Chips)
- Aufbautechnologien für GaAs, InP, SiC und GaN sowie gedünnte Halbleiter
- Optimierung der Verkapselungs- und Gehäusungstechnologien für thermisch optimierte Aufbauten bei hoher Durchschlagfestigkeit und Temperaturstabilität

Wesentliche Ziele sind dabei, Gewicht und Größe des Moduls zu minimieren, die eingesetzten Technologien zu vereinfachen und die Kosten zu senken, ohne dabei Einbußen im Wärmemanagement hinnehmen zu müssen. Zukünftige Herausforderungen an die AVT stellen sich vor allem auch durch angestrebte Betriebstemperaturen von mehr als 200 °C.

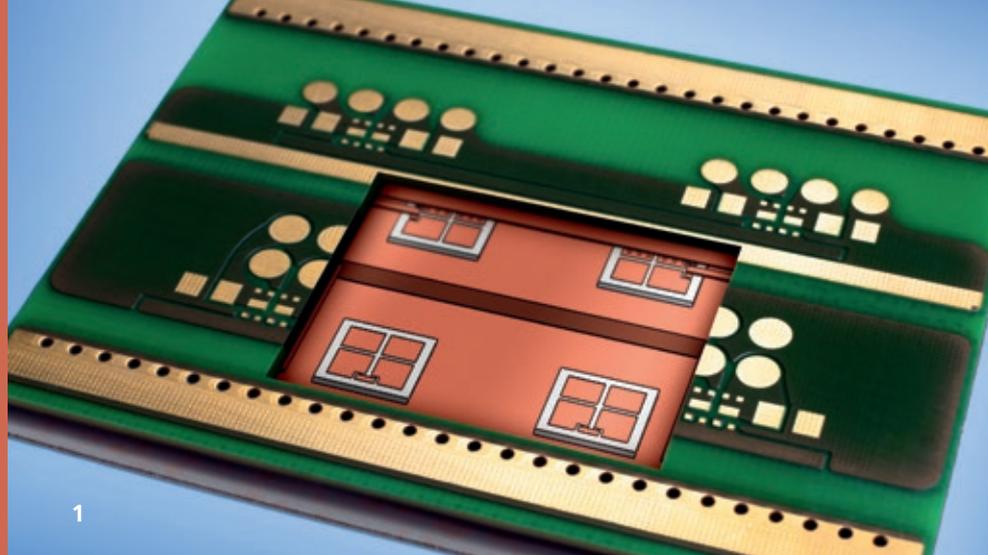
SYSTEM-  
INTEGRATION  
AUF ENGSTEM  
RAUM

1

*Infrarotaufnahme eines  
MOSFET mit Al-Bonds beim  
Lastwechseltest*

2

*18kV-Hochgeschwindigkeits-  
Schalter auf einem Dickschicht-  
Keramik-Substrat*



## VERKAPSELN UND EINBETTEN

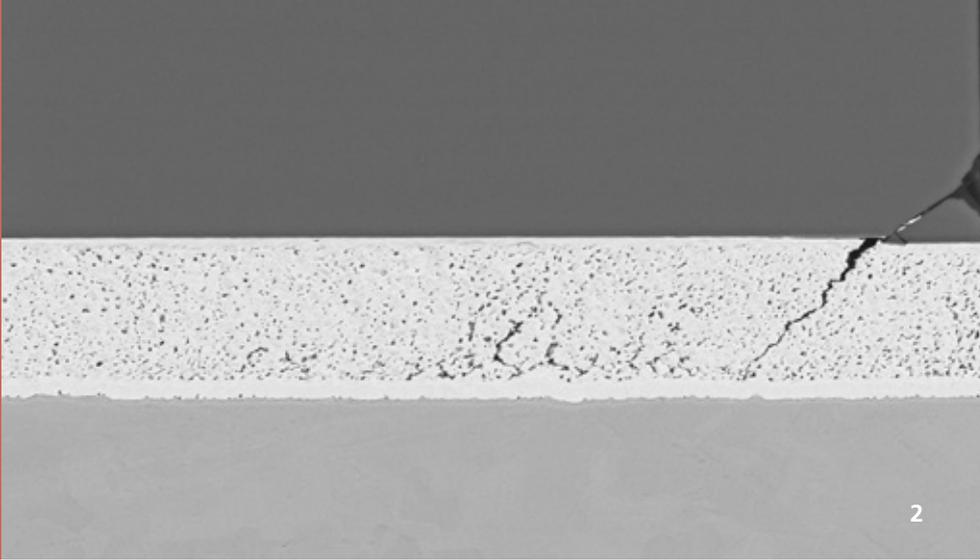
Am Fraunhofer IZM werden leistungselektronische Module mit Leistungshalbleitern auf der Basis von Si (IGBTs), SiC (JFETs) und GaN aufgebaut. Für die Verkapselung von typischen leistungselektronischen Aufbauten (DCB und Drahtbonds) sind am Institut Pottingverfahren zum Gelverguss verfügbar. Für kompakte leadframebasierende Module werden hochtemperaturstabile Molding Compounds zur Gehäusung verwendet, die einen Dauereinsatz bei Temperaturen  $> 200\text{ °C}$  erlauben. Es werden geeignete Verkapselungsprozesse – unterstützt durch Prozesssimulation – entwickelt, Verkapselungsmaterialien werden bezüglich ihrer Hochtemperaturreignung qualifiziert und die Zuverlässigkeit solcher Module nachgewiesen. Ein Schwerpunkt der Forschungsarbeiten ist hier die Korrelation des Alterungsverhaltens von Polymeren und der Packagezuverlässigkeit.

UNSER WEG  
ZUM POWER  
SYSTEM-  
IN-PACKAGE

Hochintegrierte planare Leistungselektronikmodule werden durch Chipeinbettung mittels Laminieren hergestellt. Die Kontaktierung der eingebetteten Chips an die Kupferstrukturen der Leiterplatte erfolgt durch Sintern (druckunterstützt in der Vakuumlaminierringe) der „Rück-Kontakte“ (Drain, Kollektor) bzw. durch Microvia-Kontaktierung der „Front-Kontakte“ (Gate, Source bzw. Emitter). Damit können die in der Leistungselektronik geforderten geringen Kontaktwiderstände und eine gute Wärmespreizung realisiert werden. Im Vergleich mit herkömmlichen leistungselektronischen Modulen (DCB und Drahtbond-Verbindungen) ermöglicht die „Embedding“-Technologie kürzere elektrische Verbindungen, die Platzierung von Bauteilen in unmittelbarer Nähe der Halbleiter und aufgrund der geringeren Induktivitäten höhere Schaltfrequenzen. Zudem kann der Wärmeabfluss aus der Peripherie der Leistungshalbleiter durch zusätzlich integrierte massive Kupferstrukturen oder angesinterte Kühlkörper optimiert werden. Mit Hilfe der Leiterplatteneinbettung werden so Module hergestellt, die es ermöglichen, auf beiden Seiten elektrische und/oder thermische Kontaktstrukturen anzubinden. Damit eröffnet die Embedding-Technologie eine Perspektive für modular aufgebaute leistungselektronische Systeme.

Beim Aufbau der Module werden neue leistungsfähige Lamine und Vergussmassen (Hoch-Tg, hohe thermische Leitfähigkeit) verwendet und charakterisiert. Am Fraunhofer IZM werden unterschiedliche Aufbaukonzepte und Prozessvarianten erprobt und getestet:

- Einbettung von Leistungshalbleitern – Si, SiC, GaN – in die Aufbautagen von Leiterplatten bzw. in Mold Compounds mittels Compression Molding
- Einsatz von Leading-Edge-Leiterplatten und -Mold-Materialien
- Hochkompakte Module mit kurzen Leiterzügen, um hohe Schaltfrequenzen zu ermöglichen
- Module zur optimierten Integration oder Anbindung an Kühlkörper
- Modularer Aufbau komplexer leistungselektronischer Systeme



# ZUVERLÄSSIGKEIT

Neben einem bestmöglichen thermischen Systemdesign ist das Verständnis des thermo-mechanischen Verhaltens auf AVT-, Komponenten- und Modulebene von entscheidender Bedeutung, um die Systemzuverlässigkeit ganzheitlich abzusichern. Thermisch und thermo-mechanisch induzierte Fehlermechanismen können zum frühzeitigen Versagen der AVT führen und begrenzen somit die Lebensdauer. Bereits in der frühen Designphase können entscheidende Parameter unter Berücksichtigung der auf Systemebene wirkenden (extremen) Umgebungsbedingungen wie Betriebstemperaturen und Feuchtebelastungen modellbasiert optimiert werden. Ziel ist eine möglichst hohe Zuverlässigkeit bei minimalem Ressourcenaufwand.

In Experimenten wird das Schädigungsverhalten der Materialien und Bauelemente anwendungsspezifisch analysiert und charakterisiert. In der rechnergestützten Modellierung können gezielt Material-, Prozess- und Geometrieparameter variiert werden, um deren Einfluss zu ermitteln und Optimierungsstrategien abzuleiten. Alle zuverlässigkeitsrelevanten Aspekte der Leistungselektronik können untersucht werden:

- Lot-, Sinter- oder Klebeverbindungen
- Drahtbond- und Bändchen-Verbindungen
- Einbetttechnologie
- Prozessparameter
- Thermische und elektrische Durchkontaktierungen
- Chip-, Substrat- und Kompositmaterialien

Folgende Messumgebungen stehen hierzu zur Verfügung:

- Aktive und passive thermische Lastwechsel zur Lebensdauerevaluierung
- Verfahren zur Zustandsüberwachung und Felddatenerfassung
- Teststände für kombinierte und beschleunigte Lebensdauertests (Vibration, Temperatur, Temperaturwechsel, Feuchte)
- Modellierung von Fehlermechanismen neuartiger Materialkombinationen
- Metallografie, EBSD, FIB, REM, EDX
- Ultraschall- und Röntgenmikroskopie sowie Röntgen-CT
- Hochauflösende Deformationsmessung (berührunglos und mit Temperaturvariation)
- Ermittlung von (transientem) Materialverhalten und Materialalterung

Durch ein umfassendes Systemverständnis (mikro-)elektronischer Aufbauten von der AVT- bis zur Produktebene können wir material- und prozessoptimierte Technologielösungen mit Ihnen zusammen entwickeln und so einen Beitrag zur Lebensdaueroptimierung leisten.

## DESIGN FOR RELIABILITY

1

*Leiterplatte für 90 A mit CAD-Einblick auf eingebettete Leistungshalbleiter*

2

*Ermüdungsrisse in einer Silbersinterschicht nach passiver Temperaturbelastung (1 000 Zyklen / -55 °C – 125 °C)*

3

*Messaufbau zur Bewertung der Zuverlässigkeit von thermisch leitfähigen Verbindungsmaterialien (TIM)*



# IHR PARTNER: FRAUNHOFER IZM

## SERVICES UND LEISTUNGEN DES FRAUNHOFER IZM

Die am Institut verfügbaren Technologien umfassen den Komplettaufbau von Power-Modulen in Löt-, Sinter- und Draht- bzw. Bändchenbondtechnik, Flip-Chip-, COB- oder Einbett-Technologien inklusive Isolations- und Umgebungsschutz. An alternativen Aufbautechnologien für Leistungshalbleiter wird intensiv geforscht. Bei uns sind Sie an der richtigen Adresse für:

SIE HABEN DAS  
PROBLEM –  
WIR DIE LÖSUNG.

KONTAKTIEREN  
SIE UNS

- Beratung und Machbarkeitsstudien
- Systementwurf, Entwicklung und Test
- Materialcharakterisierung
- Simulation (elektrisch, thermisch, fluidisch und mechanisch)
- Prozessentwicklung/-optimierung
- Muster- und Kleinserienaufbau
- Qualitäts- und Zuverlässigkeitsuntersuchungen
- Fehler- und Schadensanalysen
- Know-how- und Technologietransfer

**Fraunhofer Institut  
für Zuverlässigkeit  
und Mikrointegration IZM**

**Leitung:  
Prof. M. Schneider-Ramelow**

Gustav-Meyer-Allee 25  
13355 Berlin  
Fon: +49 30 46403-100  
Fax: +49 30 46403-111  
URL: [www.izm.fraunhofer.de](http://www.izm.fraunhofer.de)  
E-Mail: [info@izm.fraunhofer.de](mailto:info@izm.fraunhofer.de)

**Prof. Martin Schneider-Ramelow**  
Telefon: +49 30 46403-172  
E-Mail: [martin.schneider-ramelow@izm.fraunhofer.de](mailto:martin.schneider-ramelow@izm.fraunhofer.de)

**Elektrischer System- und Schaltungsentwurf**  
Prof. Eckart Hoene  
Telefon: +49 30 46403-146  
E-Mail: [eckart.hoene@izm.fraunhofer.de](mailto:eckart.hoene@izm.fraunhofer.de)

**Aufbau- und Verbindungstechnik**  
Dr. Matthias Hutter  
Telefon: +49 30 46403-167  
E-Mail: [matthias.hutter@izm.fraunhofer.de](mailto:matthias.hutter@izm.fraunhofer.de)

**Thermisches Management und Simulation**  
Dr. Olaf Wittler  
Telefon: +49 30 46403-240  
E-Mail: [olaf.wittler@izm.fraunhofer.de](mailto:olaf.wittler@izm.fraunhofer.de)