

**Analyse der thermischen Leistungsfähigkeit neuartiger
Modulkonzepte unter Verwendung anorganischer
Verkapselungsmaterialien**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)

der

Naturwissenschaftlichen Fakultät II
Chemie, Physik und Mathematik

der Martin-Luther-Universität
Halle-Wittenberg

vorgelegt von

Herrn Stefan Behrendt
geb. am 01.12.1988 in Eckernförde

Vorsitz der Promotionskommission: Prof. Dr. Jochen Balbach
1. Gutachter/-in: Prof. Dr. Kathrin Dörr
2. Gutachter/-in: Prof. Dr. Matthias Petzold
3. Gutachter/-in: Prof. Dr. Martin Schneider-Ramelow

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 20.04.2022

Abkürzungsverzeichnis

Al	Aluminium
Al₂O₃	Aluminiumoxid
AlSiCu	Aluminium-Silizium Kupfer
AVT	Aufbau- und Verbindungstechnik
CFD	computational fluid dynamics
CSH	Calciumsilicathydrate
CTE	coefficient of thermal expansion
Cu	Kupfer
DBB	Danfoss Bond Buffer®
DC	direct current
DCB	direct copper bonded
DSC	Development Sample CemPack®
DUT	device under test
EMC	Epoxid-Moldcompound
FEM	Finite Elemente Methode
GaN	Galliumnitrid
HTRB	high temperature reverse bias
H₃TRB	high temperature, high humidity reverse bias
IGBT	insulated-gate bipolar transistor
IMB	insulated metal baseplate
KZV	Kühlflächen-Volumen-Verhältnis

II

MK	Mischkristalle
MPZ	Magnesiumphosphat Zement
NTV	Niedertemperaturverbindungstechnik
PC_{sec}	fast power cycling
PC_{min}	slow power cycling
PWM	Pulsweitenmodulation
PZ	Phosphatzement
RLZ	Raumladungszone
RT	Raumtemperatur
ReT	reaktive Tonerden
Si	Silizium
SiC	Siliziumkarbid
SiO₂	Siliziumdioxid
Si₃N₄	Siliziumnitrid
SOA	safe operating area
TMC	thermal mass circuit
TO	transistor outline
TZ	Tonerdezement
WBG	wide bandgap
WZV	Wasser-Zement-Verhältnis

Symbolverzeichnis

Symbol	Größe	Einheit
A	Fläche	m^2
A_G	Diffusionskoeffizient der Grundwerkstoffatome	-
A_L	Diffusionskoeffizient der Lotatome	-
α	linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient	$\frac{ppm}{K}$
α_{enc}	linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient des Verkapselungsmaterials	$\frac{ppm}{K}$
β_i	Parameter im CIPS08-Lebensdauermodell	-
β	thermischer Spreizwinkel	°
D	Bonddrahtdurchmesser	μm
D_L	Legierungszone	μm
D_{GW}	Grundwerkstoff dominierte Zone	μm
d	Dicke	mm
d_S	Testdistanz (Schertest)	μm
E_0	elektrische Feldstärke	$\frac{V}{m}$
E_D	elektrische Durchschlagsfestigkeit	$\frac{kV}{mm}$
ε	Emissionskoeffizient	-
h	Wärmeübergangskoeffizient	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
h_S	Scherhöhe	μm
I	elektrischer Strom	A
I_C	Kollektorstrom	A
I_{CE}	Kollektor-Emitter-Strom	A
$I_{CE,S}$	Kollektor-Emitter-Sperrstrom	A
$I_{G,S}$	Gate-Leckstrom	A
$I_{GE,S}$	Gate-Emitter-Sperrstrom	A
K	Vorfaktor im CIPS08-Lebensdauermodell	-
κ	Wärmeleitfähigkeit	$\frac{W}{m \cdot K}$
N_f	number of cycles to failure	-
P_D	Durchlassverluste	W
P_S	Schaltverluste	W

IV

P_v	Verlustleitung	W
Q	Volumenstrom	$\frac{l}{min}$
\dot{Q}	Wärmestrom	W
\dot{Q}_v	vertikaler Wärmestrom	W
\dot{Q}_l	lateraler Wärmestrom	W
R_{th}	thermischer Widerstand	$\frac{K}{W}$
ρ	spezifischer Widerstand	$\mu\Omega \cdot cm$
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante	$\frac{W}{m^2 \cdot K^4}$
σ_B	Bruchspannung	MPa
$\sigma_{v,M}$	Von-Mises-Vergleichsspannung	MPa
τ_{YZ}	Scherspannung in X-Richtung	MPa
τ_{XY}	Scherspannung in Z-Richtung	MPa
T	Temperatur	$^{\circ}C$
T_g	Glasübergangstemperatur	$^{\circ}C$
T_j	Sperrschichttemperatur	$^{\circ}C$
ΔT_j	Sperrschichttemperaturhub	K
T_L	charakteristische Lebensdauer nach Weibull	-
T_{amb}	Umgebungstemperatur	$^{\circ}C$
T_A	Arbeitstemperatur	$^{\circ}C$
T_{Fl}	Fluidtemperatur	$^{\circ}C$
T_H	Homologe Temperatur	-
T_O	Oberflächentemperatur	$^{\circ}C$
$T_{Rücklauf}$	Fluidtemperatur im Rücklauf	$^{\circ}C$
T_S	Schmelztemperatur	$^{\circ}C$
T_{Zulauf}	Fluidtemperatur im Zulauf	$^{\circ}C$
t_s	Schaltzeit	s
t_{on}	Einschaltdauer	s
t_{off}	Ausschaltdauer	s
U	elektrische Spannung	V
U_d	elektrische Durchschlagsspannung	V
$U_{GE(th)}$	Threshold-Spannung	V
U_{CE}	Kollektor-Emitter-Spannung	V
V	Spannungsklasse des Bauelements im CIPS08-Lebensdauermodell	$\frac{V}{100}$
v_S	Schergeschwindigkeit	$\frac{\mu m}{s}$
Z_{th}	thermische Impedanz	$\frac{K}{W}$

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	II
Symbolverzeichnis	III
Inhaltsverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
2 Packaging von leistungselektronischen Modulen	5
2.1 Betrieb von Leistungshalbleitern	5
2.2 Aufbau- und Verbindungstechnik	8
2.2.1 Lötten	9
2.2.2 Silbersintern	11
2.2.3 Drahtbonden	12
2.3 Verkapselungstechnologien	14
2.3.1 Potting	15
2.3.2 Transfermoulding	16
2.4 Verkapselungsmaterialien	17
2.4.1 Silikongel	18
2.4.2 Epoxid-Moldcompounds	19
2.4.3 Direct potting Epoxidharze	21
2.5 Anorganische Verkapselungsmaterialien	22
3 Thermische Auslegung leistungselektronischer Module	25
3.1 Mechanismen des Wärmetransports	25
3.1.1 Konduktion	26
3.1.2 Konvektion	27
3.1.3 Wärmestrahlung	28
3.2 Kühlungsstrategien leistungselektronischer Module	29
3.2.1 Forcierte Luftkühlung	30
3.2.2 Laminare Wasserkühlung	30

3.2.3	Turbulente Wasserkühlung	31
3.2.4	2-Phasen-Kühlung	33
3.3	Thermische Pfade und Widerstände	34
4	Problemstellung und Lösungsansatz	39
5	Methodik und Versuchsaufbauten	43
5.1	Materialproben	43
5.2	Heißsperrdauertest (HTRB)	44
5.3	Aktiver Lastwechseltest (PCT)	46
5.4	R_{th} -Messung	49
5.5	Z_{th} -Messung	51
5.6	Simulationsmodell zur Analyse des Einflusses der Wärmeleitfähigkeit	53
5.7	Simulationsmodell zur Analyse des maximalinvasiven Modulansatzes	54
5.8	Simulationsmodell zur Analyse des CTE	55
5.9	Elektrische Durchschlagsfestigkeit	57
5.10	Schertest	58
6	Anwendbarkeit anorganischer Verkapselungsmaterialien	61
6.1	Definition der Anwendbarkeit	62
6.2	Bewertung der Modulebene	64
6.2.1	Verarbeitbarkeit	64
6.2.2	Mechanische Eigenschaften	66
6.2.3	Dielektrische Eigenschaften	68
6.2.4	Haftung auf Funktionsoberflächen	69
6.2.5	Chemische Kompatibilität	72
6.3	Bewertung der Halbleiterebene	73
6.3.1	Sperrfähigkeit des Halbleiters	74
6.3.2	Leitfähigkeit des Halbleiters	76
6.4	Bewertung der Anwendbarkeit anorganischer Verkapselungsmaterialien	81
7	Erweiterte Modulkonzepte zur optimalen Entwärmung	83
7.1	Einfluss der Wärmeleitfähigkeit auf den thermischen Widerstand	84
7.2	Minimalinvasiver Ansatz zur Optimierung der Modulentwärmung	86
7.2.1	Thermischer Masseschluss	86
7.2.2	Bewertung anhand von thermischer Simulation	88
7.2.3	Experimenteller Nachweis	91
7.3	Maximalinvasiver Ansatz zur Optimierung der Modulentwärmung	92
7.3.1	Untersuchung geometrischer Einflussfaktoren	93
7.3.2	Bewertung verschiedener Aufbau- und Verbindungstechniken	96
7.3.3	Bewertung anhand von thermischer Simulation	102

7.3.4	Experimenteller Nachweis	105
7.3.5	Diskussion der Ergebnisse	108
7.4	Lebensdauerbewertung der erweiterten Modulkonzepte zur optimalen Entwärmung	111
8	Zusammenfassung und Ausblick	115
	Abbildungsverzeichnis	125
	Tabellenverzeichnis	127
A	Anhang	141
A.1	Simulationsergebnisse	141
A.1.1	Abhängigkeit der Bonddrahttemperatur von der Anzahl vorhandener Bond- drähte	141
A.1.2	Maximalinvasiver Modulansatz	144
A.2	Experimentelle Ergebnisse	145
A.2.1	Ergebnisse R_{th} -Messung maximalinvasiver Modulansatz	145
A.3	Datenblätter	146
A.3.1	Heraeus Development Sample CemPack®	146

1 Einleitung

Das Erzeugen, Transportieren, Speichern und Transformieren von elektrischer Energie erfährt einen immer größer werdenden Stellenwert in der heutigen Gesellschaft. Die Fokussierung des Energiesektors auf erneuerbare Energien sowie die zunehmende Elektrifizierung des Mobilitätssektors verdeutlichen die Gewichtung dieses gesellschaftlichen Trends. Um die Ziele, welche aus besagtem Trend hervorgehen, erreichen zu können, ist die Weiterentwicklung und Optimierung von leistungselektronischen Systemen unabdingbar. Die Kernkomponente eines derartigen Systems bildet das leistungselektronische Modul.

Leistungselektronische Module werden in vielen Bereichen eingesetzt und sind für diverse Applikationen unverzichtbar. Das Wandeln des, zum Beispiel von Photovoltaikanlagen erzeugten, Gleichstromes in einen Wechselstrom, der in das Stromnetz eingespeist werden kann, erfolgt beispielsweise durch den Einsatz besagter Module. Ein weiteres Einsatzgebiet ist das Dosieren des Laststromes von elektrischen Antrieben, wie sie zum Beispiel in Aufzügen oder Elektrofahrzeugen vorzufinden sind. Damit sind leistungselektronische Module vom Bereich der Energieerzeugung über den Transport bis hin zu elektrischen Verbrauchern omnipräsent. Das Wechsel- bzw. Gleichrichten von elektrischen Strömen ist eine der wichtigsten technischen Disziplinen in Bezug auf die Energiewirtschaft der Gesellschaft.

Mit Hilfe leistungselektronischer Module können hohe elektrische Leistungen von mehreren MW umgesetzt, geführt und geregelt werden [1]. Die hierbei umgesetzte elektrische Energie verursacht eine Verlustleistung innerhalb der Baugruppe. Sie tritt in allen von elektrischem Strom durchflossenen Elementen auf und ist in Abhängigkeit der geführten Stromstärke unterschiedlich stark ausgeprägt. Zu den betroffenen Elementen gehören Leitungen und Bauteile sowie die sich dazwischen befindlichen Schnittstellen [2].

Die Halbleiter in einem Leistungsmodul sind die wesentlichen Bauteile und bilden auf Grundlage der vorliegenden Schaltungstopologie die Funktion des Moduls aus. Diese Bauteile sind insofern besonders von der auftretenden Verlustleistung betroffen, als dass der Großteil der Verlustleistung in ihnen entsteht. Die Verlustleistung setzt sich im Allgemeinen aus Leitungs- und Schaltverlusten zusammen. Während Leitungsverluste einfache ohmsche Verluste darstellen, sind Schaltverluste charakteristisch für die Halbleiterbauelemente. So muss zum Beispiel beim Schalten eines Transistors die Raumladungszone (RLZ) zwischen p- und n-Gebiet eines dotierten Halbleitermaterials auf- bzw. abgebaut werden [2]. Dies erfolgt durch einen Strom von Minoritätsladungsträgern in das jeweilige p- bzw. n-Gebiet, was zu den besagten Verlusten führt [3]. Die Verlustleistung wird in Wärme umgesetzt und erhitzt die Halbleiter sowie die übrigen Teile des Moduls.

Steigende Verlustleistungsdichten sowie reduzierte Halbleiterflächen machen das Packaging von leistungselektronischen Baugruppen zu einer stetig größer werdenden Herausforderung. Die angewandte Aufbau- und Verbindungstechnik muss in der Lage sein, hohe Ströme zu führen, hohe Spannungen zu halten und die entstehende Verlustwärme ableiten zu können. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, müssen die in einem Leistungsmodul verbauten Materialien eine gewisse Multifunktionalität aufweisen können.

So muss beispielsweise eine in einer DCB (**d**irect **c**opper **b**onded) eingesetzte Keramik sowohl eine hohe elektrische Isolation als auch einen geringen thermischen Widerstand (R_{th}) mit sich bringen. Weiterhin muss eine ausreichende mechanische Stabilität bzw. Bruchfestigkeit gegeben sein, damit die Keramik im Einsatz nicht bricht, wodurch sie sowohl die elektrische Isolation als auch die thermische Leitfähigkeit verlieren würde. Vielen Materialien eines leistungselektronischen Moduls sind demnach elektrische, mechanische sowie thermische Anforderungen zugrunde gelegt.

Die Verkapselung von Leistungsmodulen wird heutzutage mit organischen Materialien (Polymeren) umgesetzt. Diese Materialien lassen sich in zwei Hauptgruppen unterteilen, welche maßgeblich mit der eingesetzten Modulbauform verknüpft sind. Rahmenmodule werden mit einem sogenannten Weichverguss aus Silikongel vergossen, während Moldmodule mit einem Komposit verkapselt werden, das auf Epoxidharz basiert [4].

Polymere bieten im Allgemeinen sehr gute dielektrische Eigenschaften. So haben Epoxidharze beispielsweise eine elektrische Durchschlagsfestigkeit von 10 bis 25 kV/mm [5]. Thermisch betrachtet sind diese Materialien jedoch stark limitiert. Sie besitzen eine Wärmeleitfähigkeit von lediglich 0,1 - 0,2 W/m·K, was nur ein Bruchteil von den thermischen Leitfähigkeiten der übrigen keramischen und metallischen Materialien im Modul ist (Cu: 380 W/m·K; Al₂O₃, 96%: 24 W/m·K) [6].

Auch die thermomechanischen Eigenschaften sind für den Einsatz in einem leistungselektronischen Modul nicht ideal. Während eine Vielzahl der Materialien eines Leistungsmoduls einen linearen Ausdehnungskoeffizienten (CTE - coefficient of thermal expansion) unter 20 ppm/K besitzt (Cu: 16,5 ppm/K, Al₂O₃: 7,4 ppm/K, Si: 2,6 ppm/K), hat ein ungefülltes Epoxidharz beispielsweise einen linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten von 60 bis 90 ppm/K. Diese Diskrepanz in der thermischen Ausdehnung führt bei Erwärmung zu mechanischen Spannungen innerhalb lebensdauerrelevanter Komponenten (z.B. Bonddrähte). Besagte Spannungen führen zu einer stetigen Degradation von Materialien der Aufbau- und Verbindungstechnik. Das Resultat ist eine Materialermüdung an einer kritischen Komponente des Moduls, welche dieses zerstört. Somit hat das Gefüge aus den unterschiedlichen CTEs der Aufbau- und Verbindungstechnik (CTE-mismatch) einen signifikanten Einfluss auf die Lebensdauer eines leistungselektronischen Moduls [7].

Es gilt demnach ein multifunktionales Material für die Verkapselung der leistungselektronischen Baugruppen einzusetzen, das im elektrischen, mechanischen und thermischen Spektrum den Anforderungen der Baugruppe gerecht werden kann. Anorganische Materialien liefern hier einen vielversprechenden Ansatz. Auf Grund ihrer kristallinen Struktur bieten sie eine, im Vergleich zu Polymeren, hohe thermische Leitfähigkeit. Gleichzeitig bieten sie die Fähigkeit der elektri-

schen Isolation und sind niedrig dehnend, was ihrem Einsatz im Leistungsmodul zugute kommt. Allerdings handelt es sich hierbei um eine gänzlich neue Materialklasse im Bereich der Leistungselektronik. Es muss demnach hinterfragt werden, ob derartige Vergussmassen für den Einsatz als Verkapselungsmaterial einer leistungselektronischen Baugruppe geeignet sind.

In der vorliegenden Arbeit wird der Einsatz von anorganischen Vergussmassen anhand von Zuverlässigkeitsuntersuchungen analysiert und bewertet. Weiterhin wird untersucht, welchen Einfluss die erhöhte thermische Leitfähigkeit eines solchen Verkapselungsmaterials auf die Halbleitertemperatur und damit den thermischen Widerstand des Moduls hat. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse werden alternative Modulkonzepte entwickelt, welche die Entwärmung des Moduls optimieren. Hierdurch wird der thermische Widerstand der Baugruppe signifikant reduziert, was die Leistungsfähigkeit bzw. die Lebensdauer des Moduls erhöht.

2 Packaging von leistungselektronischen Modulen

Der Begriff „Packaging“ umfasst im Wesentlichen die gesamte Aufbau- und Verbindungstechnik sowie die Kühlungsstrategie eines Leistungsmoduls [8]. Das Spektrum beinhaltet hierbei nicht nur das Fügen und Verkapseln einzelner Komponenten. Vielmehr ist das „Packaging“ ein interdisziplinärer Begriff. Es inkludiert die elektrische, mechanische sowie thermische Auslegung der leistungselektronischen Baugruppe [9] [10].

Im Folgenden werden Teilgebiete des Packagings von leistungselektronischen Baugruppen beschrieben. Hierfür wird zunächst der Betrieb von Leistungshalbleitern und die daraus resultierende Herausforderung der Verlustleistung an das Packaging erläutert (siehe Kapitel 2.1). Weiterhin werden einzelne Verbindungs- sowie Verkapselungstechniken vorgestellt und die in den Verfahren eingesetzten Materialien beschrieben.

Zu den behandelten Aufbau- und Verbindungstechniken (siehe Kapitel 2.2) gehören das Lötten, das Silbersintern und das Drahtbonden. All diese Technologien besitzen eine direkte Schnittstelle zum Halbleiter. Sie sind demnach sehr stark von den thermomechanischen Auswirkungen der Verlustleistung betroffen. Dies lässt ihnen eine hohe Relevanz in Bezug auf die Zuverlässigkeit und Lebensdauer des Moduls zukommen. Die im Folgenden beschriebenen Verkapselungstechnologien (siehe Kapitel 2.3) sowie die dafür eingesetzten Materialien (siehe Kapitel 2.4) entsprechen dem Stand der Technik. Sie bilden die Gesamtheit der in der Leistungselektronik verwendeten Technologien ab.

2.1 Betrieb von Leistungshalbleitern

Leistungselektronische Module sind Baugruppen, die mit mehrfach bestückten Schaltungsträgern versehen sind. Anders als bei diskreten Bauelementen (Bsp.: TO-Gehäuse etc.) umfasst ein Modul eine Vielzahl an elektronischen Schaltern, welche die gesamte Topologie einer elektrischen Schaltung abbilden. Außerdem besitzen Leistungsmodule eine diskrete elektrische Isolation gegenüber ihrer Umgebung bzw. Kühlung [11].

Leistungshalbleiter werden überall dort eingesetzt, wo hohe Ströme (min. >10 A; typ. 150 - 200 A) bzw. hohe Spannungen (ab 12 V; typ. 600 - 1700 V) gewandelt werden müssen [12]. Die Halbleiter bilden in den meisten Fällen Dioden bzw. einen Transistor ab. Diese erzeugen auf Grund der gezielten lokalen Dotierung des Halbleitermaterials und der daraus resultierenden Zusammensetzung

aus p- und n-Gebieten innerhalb des Bauteils eine Verlustleitung im Betrieb. Im Allgemeinen setzt sich diese Verlustleistung P_v aus Durchlass- und Schaltverlusten zusammen [13].

$$P_v = P_D + P_S \quad [\text{W}] \quad (2.1)$$

Die dynamischen Schaltverluste P_S sind maßgeblich von der vorliegenden Schaltfrequenz abhängig, während die statischen Durchlassverluste P_D auf ohmschen Verlusten basieren und somit vom geführten Laststrom und dem Innenwiderstand des Transistors beeinflusst werden. Die Ursache der dynamischen Schaltverluste P_S beruht auf der Tatsache, dass beim Ein- bzw. Ausschalten eines Transistors sowohl der geführte Strom I als auch die vorhandene Spannung U für die Dauer des Schaltens t_s ungleich null sind [2]. Dieser Sachverhalt ist in der Ladungsträgerverteilung innerhalb des Halbleitermaterials begründet.

So müssen beim Ausschalten eines IGBTs (**insulated-gate bipolar transistor**) beispielsweise Ladungsträgerpaare in der Driftzone, in welcher der leitende n^+ -Kanal während des eingeschalteten Zustandes ansässig ist, rekombinieren. Dieser Vorgang benötigt Zeit, was zu Folge hat, dass der Kollektorstrom I_C nicht unmittelbar abbricht. Der sogenannte Schweifstrom (Tailstrom), welcher zeitverzögert sinkt, bildet sich aus (siehe Abbildung 2.1)[14]. Gleichermaßen steigt die Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} nicht sprunghaft auf ihr endgültiges Niveau an. Beim IGBT muss eine gewisse Spannung aufgebaut werden, bis der Strom I_C zu sinken beginnt. Dies ist ein Resultat der beim Einschalten entstandenen Minoritätsladungsträgerüberschwemmung der hochohmigen n^- -Zone, welche den Hauptteil des Kollektorstroms I_C trägt. Um diesen zu unterbrechen, müssen die Minoritätsladungsträger aus besagtem Gebiet unter Spannungseinfluss ausgeräumt werden. Auch dies ist ein zeitkritischer Prozess, welcher rückschließend zu Schaltverlusten führt [13].

Um das Maß der in einem Leistungshalbleiter entstehenden Verlustleistung einordnen zu können, wird ein Rechenbeispiel herangezogen. Wird davon ausgegangen, dass bei einem IGBT die ab-

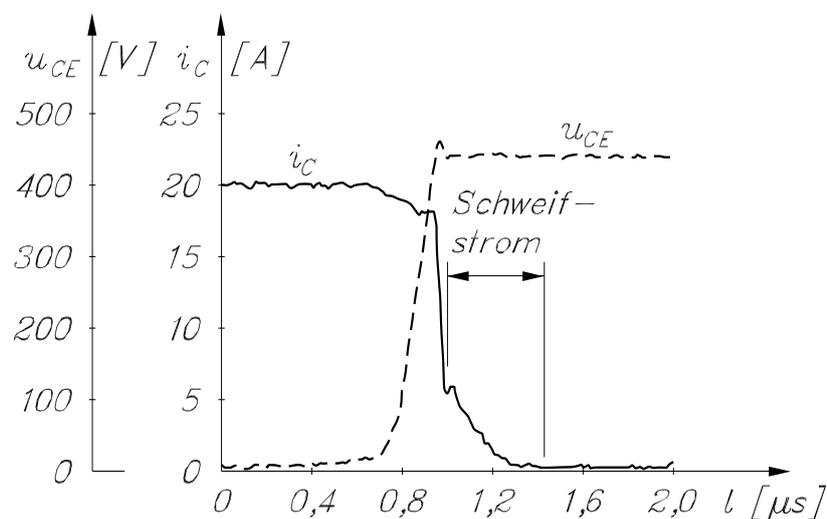


Abbildung 2.1: Oszillogramm des Ausschaltvorganges eines IGBT; zeitliche Verläufe von I_C und U_{CE} beim Ausschalten [14].

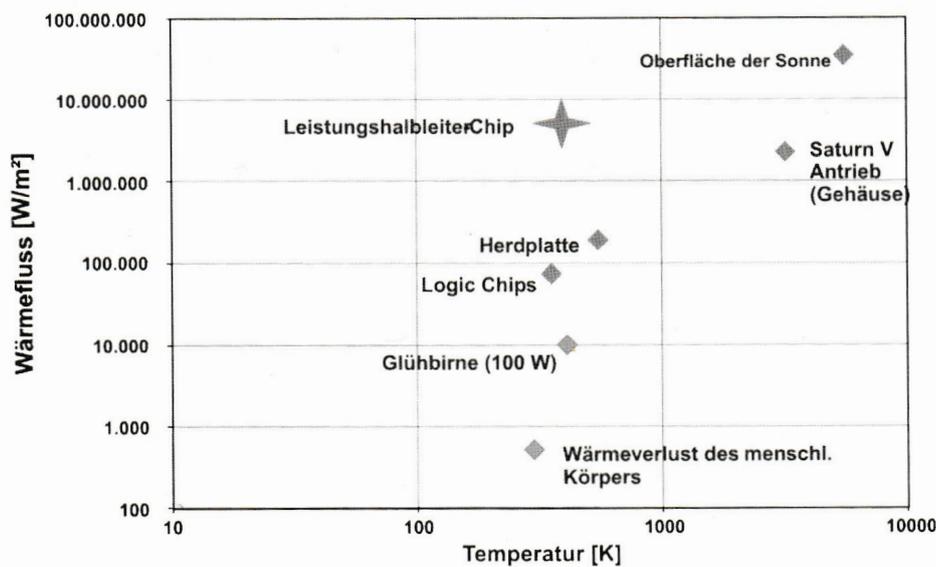


Abbildung 2.2: Wärmeflussdichte verschiedener Wärmequellen [11]

fallende Spannung im Durchlass-Fall 2,1 V beträgt (typischer Wert nach [15]), so ergibt sich bei einem Stromfluss von 100 A eine Verlustleistung von 210 W. Bei einer Halbleiterfläche von 81 mm² ergibt das eine Verlustleistungsdichte von 2,6 W/mm², was einer Wärmestromdichte von 2,6 MW/m² entspricht.

Auch wenn die reine Verlustleistung des Halbleiters zunächst nicht kritisch erscheint, erzeugt sie, bezogen auf die geringe Fläche, eine enorme Energiedichte. Wie der entstehende Verlustwärmefluss eines Leistungshalbleiters im Vergleich zu anderen Wärmequellen einzuordnen ist, ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Obgleich die Temperatur eines Halbleiters in etwa eine Zehnerpotenz kleiner ist, erreicht die entstehende Wärmestromdichte das Niveau des Antriebs einer Saturn V Rakete. Dies verdeutlicht, wie wichtig eine effektive Entwärmung des Halbleiters und der übrigen Baugruppe ist. Ohne eine ausreichend dimensionierte Kühlung können Leistungshalbleiter nicht zuverlässig betrieben werden. Weiterhin wird deutlich, wie wichtig eine mechanisch und thermisch stabile Aufbau- und Verbindungstechnik ist, um einen zuverlässigen und langlebigen Betrieb eines Leistungsmoduls zu ermöglichen.

Nachfolgend werden verschiedene Aufbau- und Verbindungstechniken eines leistungselektronischen Moduls erörtert und die grundlegende Struktur eines solchen Moduls beschrieben.

2.2 Aufbau- und Verbindungstechnik

Ein konventionelles Leistungsmodul ist zweidimensional flächenorientiert. Das bedeutet, dass sich der Aufbau aus mehreren Materiallagen von Ausragungen zweidimensionaler Flächen zusammensetzt. Hierbei kommen eine Vielzahl an Komponenten, Bauelementen und Materialien zum Einsatz. Bei Komponenten handelt es sich um passive monomaterielle Elemente, wie zum Beispiel den Bonddrähten oder der Bodenplatte (siehe Abbildung 2.3). Bauelemente sind im weitesten Sinne aktive Strukturen, die aus gezielt modifizierten Materialien bestehen. Auf Grund besagter Modifikation werden mehrere Materialeigenschaften in einem Bauelement vereint. Hierzu zählen im wesentlichen alle Halbleiterbauelemente im Modul. Die einzelnen Komponenten und Technologien können, je nach Modultyp und Anwendung, kombiniert bzw. substituiert werden. Auch das Substrat als solches kann zu einer substituierbaren Technologiekomponente werden, was in mehreren Arbeiten untersucht worden ist [16, 17]. In der vorliegenden Arbeit soll die DCB als globaler Schaltungsträger für Leistungshalbleiter gesetzt sein.

Die zentrale Komponente ist in allen Fällen der Halbleiter, welcher auf dem jeweiligen Substrat (hier: DCB) montiert ist. Demnach ist es unerheblich, welche peripheren Komponenten oder Technologien zum Einsatz kommen. Der Halbleiter bildet stets den technologischen Ursprung der Baugruppe. Er gewährleistet die Funktionalität des Moduls und ist der zentrale Gegenstand eines jeden Packagings, welches über die jeweilig eingesetzte Aufbau- und Verbindungstechnik realisiert wird. Wie bereits in Kapitel 2.1 beschrieben, entsteht der Hauptanteil der Verlustleistung in den Halbleiterbauelementen. Die daraus resultierende Wärme muss für einen zuverlässigen Betrieb des Moduls in ausreichendem Maße abgeführt werden. Die zwischen dem Halbleiter und der Kühlung (Wärmesenke) befindliche Aufbau- und Verbindungstechnik (im Folgenden: thermischer Stapel) muss demnach eine ausreichende Temperaturstabilität sowie Wärmeleitfähigkeit gewährleisten.

In den folgenden Unterkapiteln werden einige der wichtigsten Aufbau- und Verbindungstechniken innerhalb eines Leistungsmoduls beschrieben. Hierbei handelt es sich um Technologien, die auf

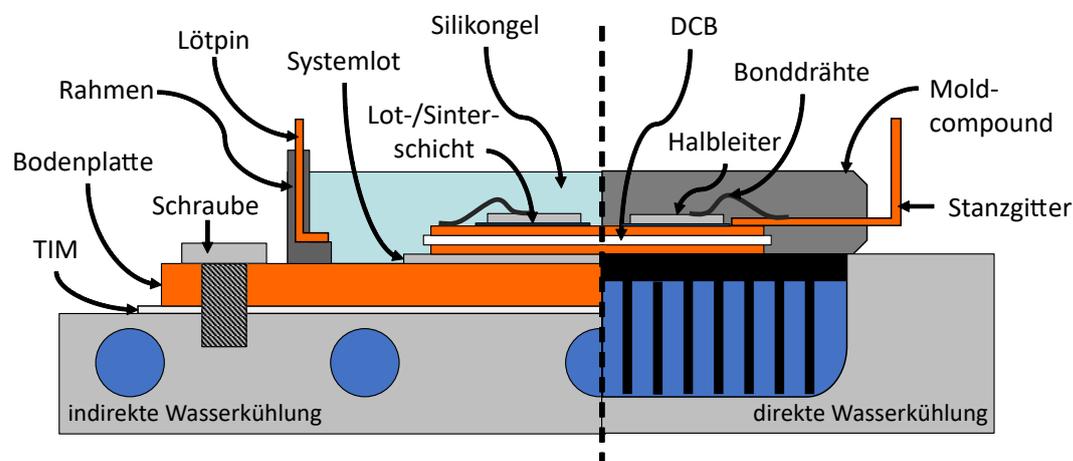


Abbildung 2.3: Schematische Schnittansicht mehrerer Leistungsmodul-Typen; links Rahmenmodul mit Silikongel und indirekter Wasserkühlung, rechts: Moldmodul mit Epoxid-Moldcompound und direkter Wasserkühlung

Grund der Nähe zum Bauteil einen direkten Einfluss auf den Halbleiter ausüben. Dementsprechend haben die beschriebenen Aufbau- und Verbindungstechniken einen signifikanten Einfluss auf die Zuverlässigkeit des Moduls. Nachfolgend werden die Grundlagen sowie besondere Aspekte der jeweiligen Technologie in Bezug auf die Leistungselektronik erläutert.

2.2.1 Löten

Der Begriff Löten beschreibt ein thermisches Verfahren, bei dem eine stoffschlüssige Verbindung zwischen zwei metallischen Fügepartnern unter Zuhilfenahme eines Fügemediums erzeugt wird. Das Fügemedium ist ein Zusatzmetall, welches als Lot bezeichnet wird. Durch gezieltes Aufschmelzen des Lotes und Erhitzen der Fügepartner auf eine definierte Arbeitstemperatur T_A wird die Verbindung hergestellt. T_A muss hierbei über der Solidustemperatur des Lotes liegen, darf die Fügepartner thermisch jedoch nicht beeinträchtigen. Bei dieser Temperatur kann das Lot die Oberfläche der Fügepartner benetzen und dort eine Bindung eingehen. Es wird unterschieden zwischen Weichlötten ($T_A < 450^\circ\text{C}$) und Hartlötten ($T_A > 450^\circ\text{C}$) [18] [19].

Die Bindung wird über Grenzflächenreaktionen bzw. Diffusionsprozesse hergestellt [18]. In Abbildung 2.4 ist eine Legierungszone einer Lotverbindung dargestellt, welche durch die Phasengrenze G in zwei Segmente unterteilt wird. Es handelt sich hierbei um die vom Lot dominierte Legierungszone D_L und die vom Grundwerkstoff dominierte Zone D_{GW} . Je höher die vorliegende Arbeitstemperatur ist, desto größer sind die vorliegenden Diffusionskoeffizienten der Grundwerkstoffatome A_G und der Lotatome A_L , wodurch die sich ausbildende Diffusionszone größer wird [20].

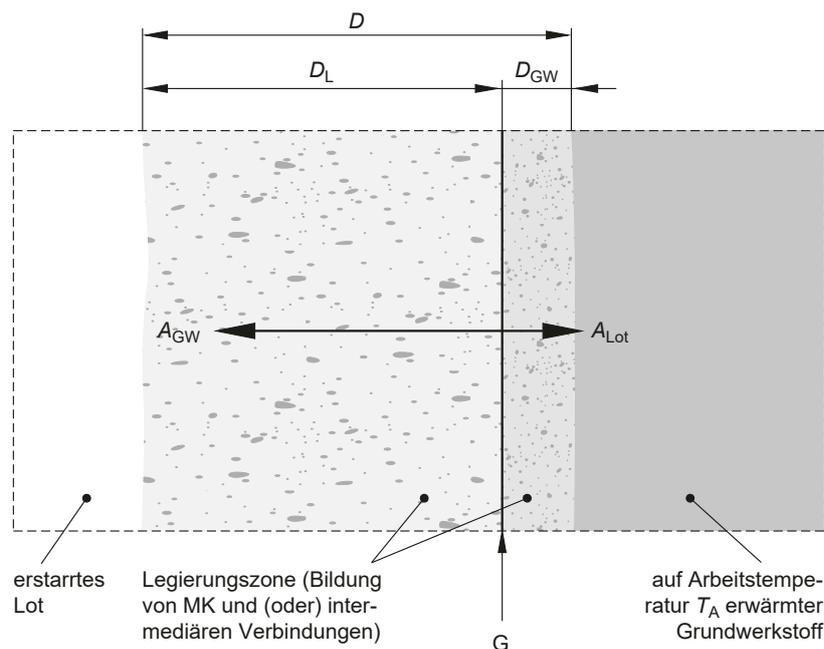


Abbildung 2.4: Legierungszone mit Mischkristallen (MK) $D = D_L + D_{GW}$ an der Phasengrenze Grundwerkstoff – erstarretes Lot (G) bei einer Hartlötverbindung; D_L Diffusionszone im Lot; D_{GW} Diffusionszone im Grundwerkstoff; A_{GW} Grundwerkstoffatome; A_{Lot} Lotatome [18]

In leistungselektronischen Modulen, die dem Standard entsprechen, wird das Lötens zur elektrischen und thermischen Kontaktierung der Halbleiter auf dem Substrat verwendet (Chiplot). Ein zweites Anwendungsgebiet ist die mechanische und thermische Kopplung des Substrates mit der Bodenplatte (Systemlot) [11][4].

Es wird zunehmend erstrebt, das Lötens als Verbindungstechnik in leistungselektronischen Modulen zu vermeiden und durch Silbersintern (siehe Kapitel 2.2.2) zu ersetzen. Dies ist zum einen mit der Fehleranfälligkeit des Verfahrens zu begründen. Jeder Schmelzprozess beinhaltet die Gefahr von Lunkerbildung. Jeder Lunker oder Luftporeneinschluss in der Verbindungsschicht muss als Störstelle im elektrischen sowie dem thermischen Pfad betrachtet werden, die die Zuverlässigkeit der Baugruppe einschränkt. Bezogen auf ein Leistungsmodul ist festzuhalten, dass die Zahl der potentiellen Fehlerquellen mit der Anzahl der Halbleiter wächst [11].

Zum anderen resultieren Probleme aus der duktilen Natur der eingesetzten Weichlote [21] [22]. Ein wichtiger Faktor ist hierbei die homologe Temperatur T_H des eingesetzten Lotmaterials, welche sich aus dem Quotienten der vorherrschenden Temperatur T und der Schmelztemperatur T_S in Kelvin zusammensetzt (siehe Formel 2.2). Die normierte Festigkeit von Metallen nimmt ab einer homologen Temperatur von ca. 0,4 progressiv ab, was zu Kriechen unter mechanischer Belastung führt [23].

$$T_H = \frac{T}{T_S} \quad [-] \quad (2.2)$$

Die maximale Betriebstemperatur gängiger Halbleiter liegt heutzutage bei 150°C [15]. Ein für leistungselektronische Applikationen ausgelegtes SnAg3,5 Weichlot hat eine Schmelztemperatur T_S von 221°C [24]. Daraus folgt, dass das Lotmaterial im Betrieb eine homologe Temperatur von ca. 0,86 erreichen kann, was zu einem starken Verlust der Festigkeit führt. Insbesondere auf Grund der thermisch zyklischen Wechselbelastung (Lastwechsel) im Betrieb kommt es neben elastischen auch zu viskoplastischen Verformungen. Letztere werden als Kriechen bezeichnet. Diese thermomechanische Belastung führt zu einer kontinuierlichen Degradation des Lotes, welche letztendlich in einer Materialermüdung mündet. Sie prägt sich in Form von Rissbildung und -wachstum aus [25]. Die Verbindung zwischen Halbleiter und Substrat ist zerstört, was das entsprechende Leistungsmodul unbrauchbar macht.

Im Rahmen einer leistungselektronischen Applikation entspricht das Lötens dem derzeitigen Stand der Technik. Auf Grund der oben beschriebenen Fehleranfälligkeit des Prozesses und der Zuverlässigkeit bzw. Lebensdauer begrenzenden mechanischen Eigenschaften wird jedoch schnell deutlich, dass eine stabilere Verbindungstechnologie für die Kontaktierung des Halbleiters von Nöten ist. Dies trifft insbesondere in Hinblick auf die stetig steigenden Leistungsdichten derartiger Module zu. Das Silbersintern bietet eine performante Alternative, welche im folgenden Kapitel beschrieben wird.

2.2.2 Silbersintern

Das Silbersintern ist eine Niedertemperaturverbindungstechnologie (NTV), welche mit zunehmender Häufigkeit zur Chipkontaktierung in leistungselektronischen Modulen angewandt wird. Beim Sintern handelt es sich um einen Diffusionsprozess, der eine stoffschlüssige Verbindung zwischen dem keramischen Substrat (DCB) und dem Halbleiter herstellt [11]. Anders als beim Löten handelt es sich beim Sintern um einen Bindungsprozess, der unter Ausschluss der flüssigen Phase stattfindet [18].

Das Drucksintern ist in der Pulvermetallurgie ein seit bereits mehreren Jahrzehnten bekanntes Verfahren. Es handelt sich hierbei um einen Bindungsprozess, der durch die Parameter Druck, Temperatur und Zeit bestimmt wird. Unter den erforderlichen Bedingungen werden einzelne Metallkörner so eng zueinander gebracht, dass die Van-der-Waal-Kraft zum Tragen kommt und sich ausgehend von den Berührstellen der Körner sogenannte Sinterhalse ausbilden (siehe Abbildung 2.5). Durch fortschreitendes Ausbilden wird das vorhandene Porenvolumen verkleinert, wodurch sich das Volumen des resultierenden Körpers reduziert (siehe Abbildung 2.6). Durch Rekristallisation, die von den Berührstellen ausgeht, wird das energetische Minimum angestrebt [18].

In leistungselektronischen Modulen wird für die Herstellung besagter Verbindung eine Paste aus Silberpartikeln und organischen Bestandteilen verwendet. Die Paste wird mittels Schablonen- oder Siebdruckverfahren auf der Substratoberfläche appliziert und anschließend getrocknet. Das Trocknen hat zur Folge, dass die organischen Bestandteile der Paste verdampfen und lediglich Silberpartikel auf der Substratoberfläche zurückbleiben. Auf der getrockneten Paste wird der Halbleiter platziert. Durch den bei geeigneten Prozessparametern durchgeführten Sinterprozess wird eine stoffschlüssige Verbindung zwischen der Unterseite des Halbleiters und der Oberseite des Substrates erzeugt [11].

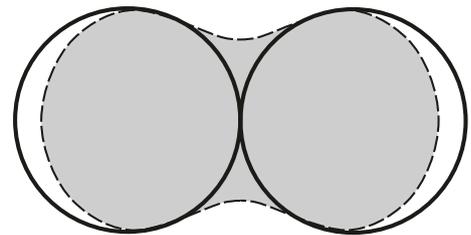


Abbildung 2.5: Ausbildung eines Sinterhalses zwischen zwei Partikeln (Einstoffsystem)[18]

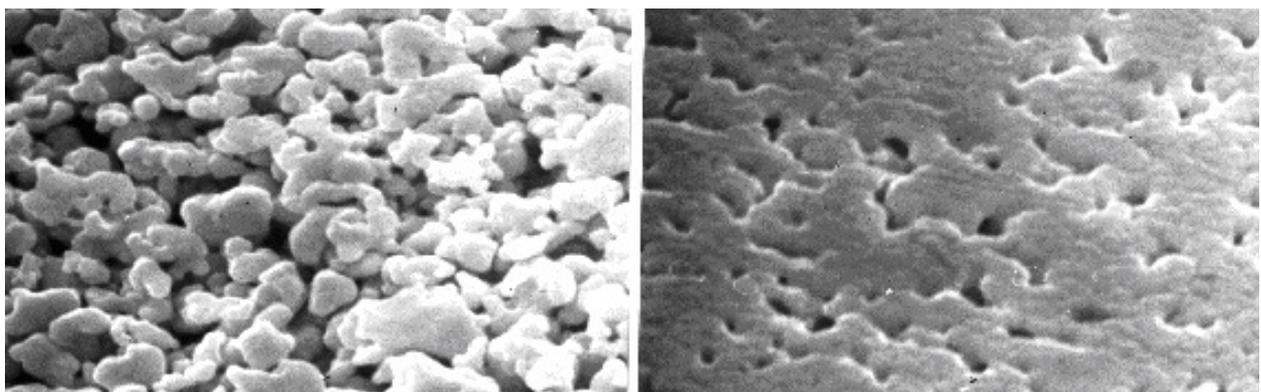


Abbildung 2.6: Sinterschicht vor (links) und nach dem Sintern (rechts)[26]

Tabelle 2.1: Vergleich der wichtigsten Eigenschaften einer Sinter- und Lotschicht [29]

Eigenschaft	Einheit	Lotschicht SnAg(3)	Ag Sinterschicht
Schmelzpunkt	°C	221	962
Wärmeleitfähigkeit	W/m·K	70	240
Elektrische Leitfähigkeit	MS/m	8	41
Typische Schichtdicke	µm	90	20
CTE	ppm/K	28	19

Im Vergleich zu einer Lotschicht bietet eine Sinterverbindung eine deutlich verbesserte elektrische sowie thermische Leitfähigkeit (siehe Tabelle 2.1). Außerdem ist die typische Schichtdicke einer Sinterschicht mit 20 µm nur in etwa ein Drittel so groß wie eine Lotschicht. Neben der mehr als 3-fachen Wärmeleitfähigkeit einer Lotschicht erzeugt dies einen sehr geringen thermischen Widerstand der Verbindungsschicht. Des Weiteren ist die Lastwechselfestigkeit auf Grund der höheren mechanischen Festigkeit im Vergleich zu einer Lotverbindung gesteigert. Mehrere Arbeiten zeigen, dass eine Degradation der Verbindungsschicht, wie sie beim Löten auftritt, ausbleibt [27] [28].

Ein weiterer Vorteil einer NTV-Verbindung ist die Tatsache, dass die Bindung ein Festkörperprozess ist, der es nicht erforderlich macht, das Fügemedium aufzuschmelzen. Dies hat zum Resultat, dass die Schmelztemperatur T_S der Verbindung deutlich höher ist als die Arbeitstemperatur T_A , bei der sie erzeugt worden ist. Dies macht eine Sinterverbindung besonders stabil, auch wenn erhöhte Halbleitertemperaturen ($> 175^\circ\text{C}$) vorliegen.

Dieser Sachverhalt kann anhand der homologen Temperatur quantifiziert werden. Bezogen auf das Rechenbeispiel aus Kapitel 2.2.1 und den Materialdaten aus Tabelle 2.1 ergibt sich für eine Sinterverbindung bei einer Betriebstemperatur von 150°C eine homologe Temperatur T_H von 0,34. Damit ist die Festigkeit des Fügemediums nicht beeinträchtigt. Selbst bei einer Temperatur von 175°C beträgt die homologe Temperatur lediglich 0,36. Somit kann mittels NTV-Verbindungstechnik die hohe Schmelztemperatur T_S des Silbers ausgenutzt werden, ohne die Verbindungspartner Temperaturen $> T_S$ beim Fügen aussetzen zu müssen. Es entsteht eine enorm stabile und zuverlässige Verbindungsschicht.

Auf Grund der oben genannten Vorteile findet das Silbersintern in immer mehr leistungselektronischen Applikationen Einzug. Hersteller von Leistungsmodulen, wie zum Beispiel Danfoss Silicon Power GmbH, Flensburg, und Semikron Elektronik GmbH & Co. KG, Nürnberg, bieten mittlerweile mehrere Produkte mit Sinterverbindungen an.

2.2.3 Drahtbonden

Während es sich bei den bisher gezeigten Verbindungstechnologien um die unterseitige Kontaktierung des Halbleiters handelt, beschreibt das Drahtbonden eine oberseitige Kontaktierungstechnologie. Beim Drahtbonden werden zwei getrennte Potentialflächen mittels eines Drahtes elektrisch

miteinander verbunden [30]. So wird beispielsweise die Oberseite des Halbleiters mit der Substratoberfläche verbunden. Das Drahtbonds lässt sich in verschiedene Kategorien und Verfahren unterteilen. Während in der Mikroelektronik das Dünndrahtbonds ($\varnothing < 100 \mu\text{m}$) zum Einsatz kommt, ist in der Leistungselektronik auf Grund der hohen geführten Leistungen ein größerer Drahtquerschnitt von Nöten. Es handelt sich hierbei um das Dickdrahtbonds ($\varnothing > 100 \mu\text{m}$)[4].

Beim Bonds handelt es sich um ein Kaltschweißverfahren. Die Verbindungspartner werden zu keinem Zeitpunkt aufgeschmolzen. Der Draht und die Funktionsoberfläche werden örtlich nahe zueinander gebracht. Durch das Einprägen von Energie wird eine stoffschlüssige Verbindung erzeugt. Dabei wird nach Art der Energiezuführung in Thermokompression (Temperatur & Druck), Thermosonic (Temperatur & Ultraschall & Druck) und Ultraschall (Ultraschall und Druck) unterschieden [31].

Auf diese Weise wird eine Vielzahl an Kontaktierungen innerhalb eines Leistungsmoduls hergestellt (siehe Abbildung 2.7). Ein großer Vorteil des Drahtbonds ist die Flexibilität des Verfahrens bei vergleichsweise geringen Kosten [13]. Das am häufigsten verwendete Drahtmaterial ist Aluminium. Die heutigen Anforderungen an die Leistungsdichte bringen das Material in Hinsicht auf die Stromtragfähigkeit ($\rho_{\text{Al}} = 2,7 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) jedoch zunehmend an seine Grenzen.

Dies ist unter anderem eine Folge des Sachverhaltes, dass die Halbleiter immer kleiner werden und immer weniger Querschnitt für die oberseitige Kontaktierung zur Verfügung steht. So können bei gleichbleibendem Strom weniger Drähte auf dem Halbleiter platziert werden, was zu einer Erhöhung des nominellen Stromes pro Draht führt. So kann es leicht dazu kommen, dass die Bonddrähte im Betrieb heißer werden als der Halbleiter selbst.

In einem Rechenbeispiel mittels FEM-Simulation, welches dem Anhang A.1.1 entnommen werden kann, ist ermittelt worden, wie sich die Bonddrahttemperatur bei sukzessiver Reduzierung der eingesetzten Bonddrähte verhält. Bei gleichbleibendem Strom und einer Reduzierung um nur einen Draht kommt es bereits zu einem ΔT von ca. 20K zwischen den Drähten und dem Halbleiter. Bei

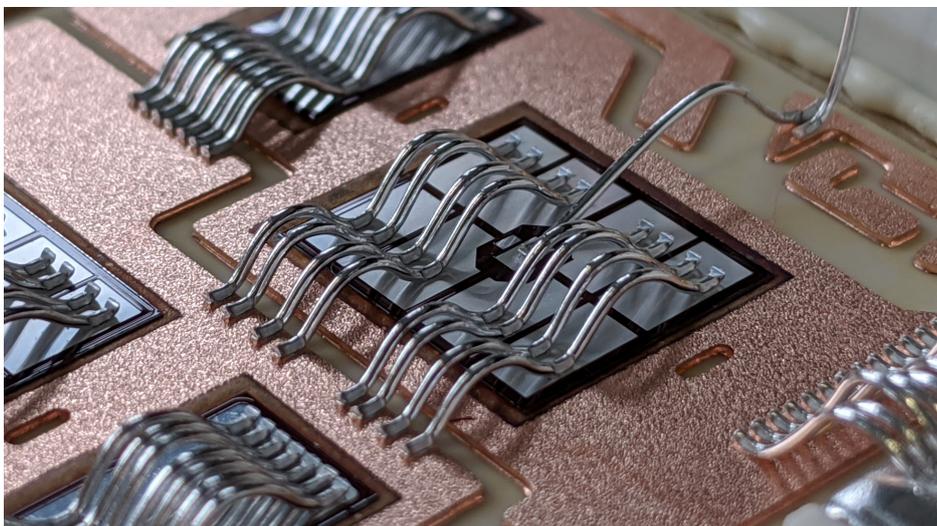


Abbildung 2.7: Aluminium-Bonddrähte auf einem IGBT in einem unverkapselten E3XL Rahmenmodul

zwei Drähten beläuft sich das ΔT bereits auf ca. 40K.

Es ist jedoch möglich, diese Grenze der Stromtragfähigkeit mit Hilfe von anorganischen Verkapselungsmaterialien zu verschieben. Bei Aluminium handelt sich, bezogen auf den elektrischen Widerstand, um ein Material mit einem positiven Temperaturkoeffizienten (Kaltleiter). Die Stromtragfähigkeit eines Aluminiumdrahtes ist demnach von der Effektivität der Entwärmung abhängig. Ein neuartiges Verkapselungsmaterial mit einer hohen Wärmeleitfähigkeit, wie es anorganische Materialien haben, kann folglich die Stromtragfähigkeit von Aluminiumbonddrähten erhöhen.

Eine Alternative in Bezug auf das Drahtmaterial bietet Kupfer. Die höhere mechanische Stabilität sowie eine erhöhte Stromtragfähigkeit auf Grund eines geringeren spez. Widerstandes ($\rho_{Cu} = 1,7 \mu\Omega \cdot cm$) machen dieses Material zu einer erstrebenswerten Substitution des Aluminiums [32]. Allerdings bringt die erhöhte mechanische Stabilität auch eine höhere Härte des Materials mit sich. Diese hat zur Folge, dass die Kraft, die zum Erzeugen einer hochwertigen Verbindung beim Bonden so groß sein muss, dass der Prozess den spröden Siliziumhalbleiter zerstören würde.

Technologien wie der Danfoss Bond Buffer® (DBB) bieten, neben weiteren thermischen und elektrischen Vorteilen, dem Halbleiter genügend mechanischen Schutz, um einen Cu-Dickdraht-Bondvorgang unversehrt zu überstehen. Mehrere Arbeiten haben sich mit dieser Technologie befasst und eine signifikante Zuverlässigkeitssteigerung durch die Kombination aus Kupfer und DBB bewiesen [33, 30, 34].

2.3 Verkapselungstechnologien

Ist die grundlegende Montage eines leistungselektronischen Moduls unter Verwendung der in Kapitel 2.2 beschriebenen Aufbau- und Verbindungstechnik abgeschlossen, wird das Packaging durch die Verkapselung der Baugruppe finalisiert. Das Verkapseln derartiger Baugruppen ist aus mehreren Gründen erforderlich. Allen voran steht die elektrische Isolation.

Räumlich eng gestaltete Schaltungsträger sowie die Leistungshalbleiter selbst verfügen über derartig kurze Isolationsstrecken, dass ein Betrieb der Baugruppe unter Atmosphäre (Luft: ca. 1-3 kV/mm Durchschlagsfestigkeit) nicht möglich ist. Eine Beispielrechnung in Kapitel 6.2.3 zeigt, dass für den sicheren Betrieb mindestens eine Durchschlagsfestigkeit von 5 kV/mm im Umfeld des Halbleiters gegeben sein muss. Weitere Aufgaben der Verkapselung umfassen [35]:

- Reduktion bzw. Abfuhr von thermischer Energie, welche entweder intern erzeugt oder durch die Umgebung auftritt
- Schutz vor (Luft-)Feuchtigkeit
- Schutz vor ionischer Kontamination
- Reduktion von thermomechanischem Stress
- mechanische Stabilisierung

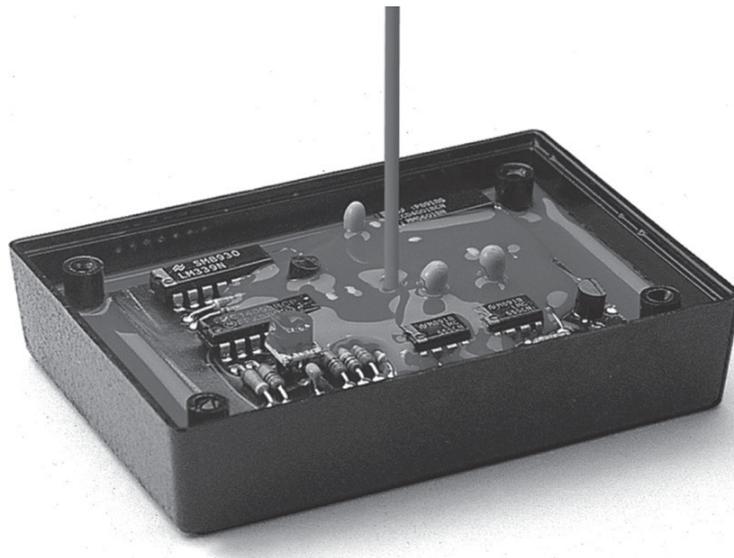


Abbildung 2.8: Beispielhafte Abbildung des Pottens einer elektronischen Baugruppe [35]

Welche Verkapselungstechnologie verwendet wird, ist bei leistungselektronischen Modulen maßgeblich von der Modulbauform abhängig. Rahmenmodule, die in industriellen Applikationen zum Einsatz kommen, werden durch einen Weichverguss verkapselt, der mittels Potting in das Modul eingebracht wird. Rahmenlose Moldmodule werden mittels Transfermoulding aufgebaut. Der hierbei eingesetzte Hartverguss besteht aus einem Epoxid-Moldcompound (EMC), welcher neben oben genannten Funktionen zusätzlich die Formgebung des Moduls darstellt. Im Folgenden werden die in der Leistungselektronik angewandten Verkapselungstechnologien erläutert und die durchgeführten Prozesse beschrieben.

2.3.1 Potting

Das sogenannte Potting (seltener: casting) wird im Allgemeinen für größere elektrische Baugruppen verwendet. Hierzu zählen unter anderem Relais, Netzteile und leistungselektronische Module [35]. Hierbei wird die elektronische Baugruppe in einer Vorrichtung, einem „pot“, platziert, welcher anschließend mit dem jeweiligen Verkapselungsmaterial gefüllt wird. Der eingesetzte „pot“ kann hierbei einem speziell hierfür vorgesehen Rahmen oder dem übergeordneten Gehäuse der Baugruppe entsprechen (siehe Abbildung 2.8).

Der Prozess kann in zwei wesentliche Schritte aufgeteilt werden, nämlich das Verfüllen und das Aushärten. Beim Verfüllen handelt es sich im Allgemeinen um einen Gießprozess, bei dem das Verkapselungsmaterial in flüssiger Form vorliegt. Dieses wird unter atmosphärischen Bedingungen oder ggf. in einem Unterdruck in die vorliegende Baugruppe vergossen. Der Unterdruck trägt hierbei zu einer sicheren Verfüllung kleinster Kavitäten innerhalb des Bauteils bei. Dadurch wird sichergestellt, dass Fehlerbilder wie Blasen und andere Hohlräume im Verguss vermieden werden. In einem zweiten Arbeitsschritt muss das applizierte Material ausgehärtet werden. Dies geschieht im Wesentlichen über einen Wärmeeintrag durch Auslagerung in einem Ofen. Die benötigten Parameter sind materialabhängig.

Ein großer Vorteil des Pottings sind die geringen Prozessanforderungen. Da der Verguss unter Atmosphärendruck stattfinden kann, bedarf es keiner speziellen Pumpen oder Werkzeuge zum Fördern des Materials. Im Bereich der Mikroelektronik kommen hauptsächlich Epoxidharze bei diesem Verfahren zum Einsatz. In leistungselektronischen Baugruppen werden beim Potting ausschließlich Silikongele verwendet. Eine genaue Beschreibung der Materialeigenschaften ist in Kapitel 2.4.1 zu finden.

2.3.2 Transfermoulding

Neben dem in Rahmenmodulen eingesetzten Potting gibt es eine weitere fundamentale Verkapselungstechnologie, welche in sogenannten Moldmodulen eingesetzt wird. Beim „resin transfer moulding“, auch „injection moulding“ genannt, wird ein mould compound unter hoher Temperatur und hohem Druck in ein Werkzeug gepresst [4]. Innerhalb des Werkzeuges befindet sich die elektronische Baugruppe, welche vom mould compound, das anschließend aushärtet, umschlossen wird [30].

Beim Transfermoulding liegt das Verkapselungsmaterial in seiner Rohform in sogenannten Preforms oder Pellets vor. Bei dem verwendeten Material handelt es sich um Duroplaste, wie zum Beispiel Epoxidharze. Im Vorlagebehälter (siehe Abbildung 2.9 'Transfer pot') wird das Rohmaterial auf eine Vorhaltetemperatur erwärmt. Weiterhin wird es mit Hilfe eines Stempels über Kanäle im Werkzeug in Richtung der formgebenden Kavität (siehe Abbildung 2.9 'Mold cavity') gefördert. Dort befindet sich das zu verkapselnde Bauteil. Unter hohem Druck (≥ 60 bar) und hoher Temperatur ($\geq 170^\circ\text{C}$) wird das Material verflüssigt und gefördert [4].

Nachdem das Werkzeug vollständig gefüllt und das Material ausgehärtet ist, wird das fertige Werkstück ausgeworfen und nachbehandelt. Das resultierende Moldmodul gestaltet sich so, dass es keinerlei zusätzlich tragende Struktur für das Verkapselungsmaterial gibt. Die Formgebung des Moduls wird durch den Verguss vorgegeben. Die Last- und Steueranschlüsse ragen seitlich aus dem Verkapselungsmaterial heraus.

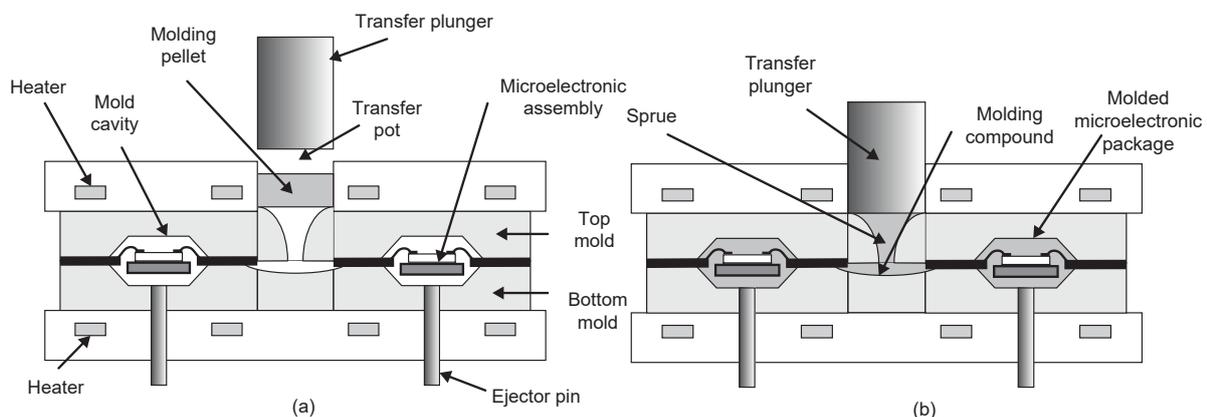


Abbildung 2.9: Schematische Darstellung des Verkapselns einer elektronischen Baugruppe durch Transfermoulding; vor dem Molden (a) und nach dem Molden (b) [35]

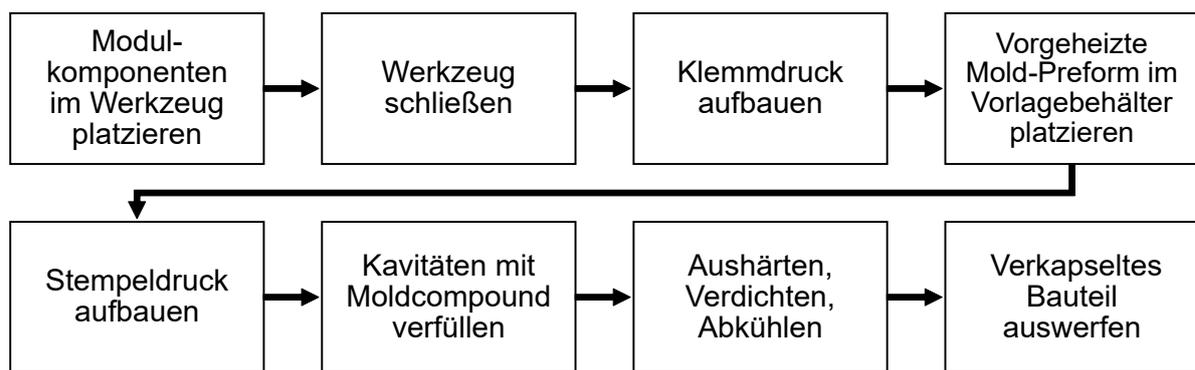


Abbildung 2.10: Prozessablaufdiagramm eines Transfermoulding-Prozesses nach [35]

Die oben beschriebenen hohen Temperaturen und Drücke, die nötig sind, um das hoch gefüllte, Verkapselungsmaterial fließfähig werden zu lassen (siehe Kapitel 2.4.2) führen zu hohen Beanspruchungen des Bauteils und der Werkzeuge. Des Weiteren sind die Werkzeuge auf Grund verschiedener Kanalstrukturen geometrisch sehr komplex. Derartige Komplexitäten von Werkstoff und Prozess führen zu wesentlichen Nachteilen beim Einsatz dieser Technologie.

Während beim Potting lediglich zwei Prozessschritte vonnöten sind, bedarf es einer Vielzahl an kritischen Teilprozessen beim Transfermoulding (siehe Abbildung 2.10). Folglich sind sowohl Prozess- als auch die Werkzeugkosten sehr hoch. Weiterhin muss auf Grund der Komplexität der Werkzeuge für eine Variante eines Moduls ein neues Werkzeug konstruiert und hergestellt werden. Dies ist ein weiterer signifikanter Nachteil im Vergleich zum Potting, welches keinerlei oder lediglich sehr günstige Werkzeuge benötigt.

Bezogen auf leistungselektronische Baugruppen ermöglicht das Transfermoulden Verkapselungen mit mechanischer Stabilität und vergleichsweise hohen Wärmeleitfähigkeiten. Heutzutage werden beim Transfermoulding weitestgehend Moldcompounds verwendet, die aus hochgefüllten Epoxidharzen bestehen. Eine genaue Beschreibung der eingesetzten Materialien ist in Kapitel 2.4.2 zu finden. Durch den Einsatz von anorganischen Verkapselungsmaterialien ist es möglich, diese positiven Eigenschaften ebenfalls zu erzeugen. Allerdings bedarf eine anorganische Vergussmasse keines hohen Drucks oder spezieller Werkzeuggeometrien. Ein einfacher Pottingprozess kann genutzt werden, wodurch Werkzeug- und Prozesskosten niedrig gehalten werden können.

2.4 Verkapselungsmaterialien

Für die Verkapselung leistungselektronischer Module werden maßgeblich polymere Werkstoffe eingesetzt. Wie bereits im vorherigen Kapitel beschrieben, werden unterschiedliche Materialien in unterschiedlichen Verfahren verarbeitet. Die verwendeten Materialien lassen sich in zwei Gruppen unterteilen: Silikongele und epoxidbasierte Komposite (compounds).

Im Allgemeinen werden Silikongele bei industriellen Rahmenmodulen verwendet, die mit dem Material mittels Potting verkapselt werden (siehe Kapitel 2.3.1). Epoxidharz-Komposite werden ausschließlich in Form eines Epoxid-Moldcompounds (EMC) in rahmenlosen Moldmodulen ver-

wendet. Seit jüngster Vergangenheit bieten einige Modulhersteller auch Epoxid-Komposite in Rahmenmodulen an [36]. Ziel hierbei ist es, die Vorteile der mechanischen Stabilisierung filigraner Bauteile eines EMC in ein Rahmenmodul zu transferieren. Die Kombination aus Epoxid-Komposit und Rahmenmodul bildet jedoch weiterhin die Ausnahme auf dem Markt und soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit nur kurz thematisiert werden.

Im Folgenden werden die einzelnen Materialien und ihre Abbindeverfahren beschrieben. Ein besonderes Augenmerk wird hierbei auf die auftretende chemische Reaktion gesetzt. Weiterhin werden die Materialeigenschaften und deren Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit bzw. Lebensdauer im Kontext von leistungselektronischen Baugruppen erläutert. Abschließend werden aus den oben genannten Eigenschaften Vor- und Nachteile für die Applikation als Verkapselungsmaterial von Leistungsmodulen abgeleitet und zusammengefasst.

2.4.1 Silikongel

Das Silikongel bzw. Silikon ist ein wichtiges technisches Material, das vielseitig eingesetzt werden kann. Chemisch betrachtet sind Silikone oder auch Polyorganosiloxane synthetische Polymere. Ihr Aufbau setzt sich aus alternierenden Silizium- und Sauerstoff-Atomen zusammen, die sich zu Molekülen verketteten bzw. vernetzen (siehe Abbildung 2.11) [37]. Sie sind damit die einzigen technisch relevanten Polymere, die eine anorganische Kernkomponente besitzen [38].

Silikongele sind gießbare Silikonkautschuke. Sie bestehen aus zwei Komponenten, einem Basispolymer und einem Vernetzer. Das Basispolymer ist ein vinylendblockiertes Polydimethylsiloxan (V-PDMS), während der Vernetzer aus einem Polymethylhydrogensiloxan (PMHS) besteht [39]. Werden beide Komponenten vermengt, kommt es unter Zuhilfenahme eines Platin-Katalysators zu einer Vernetzungsreaktion. Die bislang flüssigen Komponenten werden zu einer gallertartigen Masse. Die Reaktion findet bei Raumtemperatur (RT) statt.

Das Mischungsverhältnis beider Komponenten bestimmt die Materialeigenschaften des erzeugten Silikongels. Je mehr Vernetzer dem Gemisch beigelegt wird, desto höher ist die Vernetzungsdichte der entstehenden Masse. Die Folge ist eine erhöhte Härte. Umgekehrt wird durch einen höheren Anteil des Basispolymers eine geringere mechanische Stabilität sowie eine erhöhte Elastizität hervorgerufen [40].

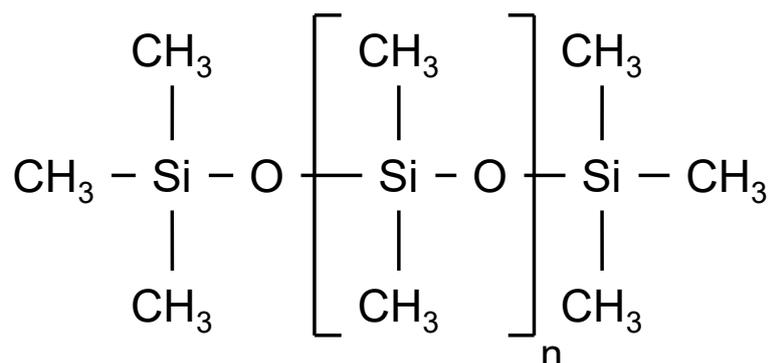


Abbildung 2.11: Struktur eines exemplarischen Silikons: Polydimethylsiloxan

Die Silikongele werden mittels Potting in leistungselektronischen Baugruppen appliziert (siehe Kapitel 2.3.1). Silikongele besitzen sehr gute dielektrische Eigenschaften. Derartige Materialien erzielen einen spez. Widerstand von $10^{15} \Omega \cdot cm$ und elektrische Durchschlagsfestigkeiten von $18 - 23 kV/mm$ [41, 42]. Eine weitere wichtige Eigenschaft für die Verwendung auf Leistungshalbleitern ist die ionische Reinheit. In einem Weichverguss muss eine ionische Kontamination zwingend verhindert werden, da es ansonsten auf Grund der erhöhten Mobilität, insbesondere unter Einfluss von Feuchte, zu Elektromigration kommen kann [13].

Bewegliche Ionen innerhalb der Verkapselung wandern entlang der elektrischen Feldlinien in Richtung des Halbleiters und sammeln sich dort an [11]. Eine derartige Ansammlung kann zum Kurzschluss des Bauelements führen, wodurch dieses zerstört wird [43]. Heute eingesetzte Silikon-Weichvergüsse haben eine Ionenkonzentration, die im Allgemeinen <10 ppm entspricht.

Neben den oben genannten Attributen besitzen Silikongele im Kontext einer leistungselektronischen Baugruppe allerdings ungünstige mechanische Eigenschaften. Im Vergleich zu den niedrig dehnenden Materialien eines Leistungsmoduls (Al: 23,9 ppm/K; Cu: 16,5 ppm/K; Si: 2,6 ppm/K) weist ein Silikongel einen CTE von ca. 300 ppm/K auf [44]. Obwohl der CTE-mismatch hier enorm groß ist, sind derartige Verkapselungsmaterialien funktional. Dies ist durch die Viskosität des Materials begründet.

Bei gleicher Erwärmung dehnt sich das Silikongel ca. 13 mal stärker aus, als ein umhüllter Aluminiumbonddraht. Anstatt den Draht abzuscheren, fließt das Silikongel um ihn und andere fragile Komponenten herum. Der Nachteil ist, dass das Silikongel diesen Komponenten im Gegenzug keinerlei mechanische Stabilität bietet. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass der oben erwähnte Draht ungehindert expandieren und kontrahieren kann. Dadurch dominiert der CTE-mismatch zwischen Aluminiumdraht und Silizium-Halbleiter, was in einer Materialermüdung und dem Abheben des Drahtes vom Halbleiter, dem sogenannten „lift-off“ mündet [45] [11].

Des Weiteren besitzen Silikongele im Allgemeinen eine sehr geringe thermische Leitfähigkeit. Die Wärmeleitfähigkeit derartiger Materialien beträgt lediglich $0,17 W/m \cdot K$ [46]. Weiterhin ist die thermische Belastbarkeit stark limitiert. Bereits ab einer Temperatur von $150^{\circ}C$ bis $200^{\circ}C$ setzt eine Materialdegradation ein. Hierbei werden polymere Strukturen abgebaut, wodurch das Silikongel seine Elastizität verliert [39]. Das Material wird spröde. Zum einen kommt es auf Grund der thermomechanischen Wechselbelastung eines Leistungsmoduls zu Rissen im Silikongel. Das Material ist nicht mehr in der Lage, hinreichend elektrisch zu isolieren. Zum anderen übt das steifer werdende Silikongel große Kräfte auf die sensiblen Bonddrähte aus, wodurch es zu einem sogenannten „heel crack“ kommen kann [7]. In beiden Fällen ist das betroffene Leistungsmodul zerstört.

2.4.2 Epoxid-Moldcompounds

Die in leistungselektronischen Modulen verwendeten Epoxid-Moldcompounds (EMC) sind Kompositwerkstoffe, die ein Epoxidharz als Matrixmaterial verwenden. Epoxidharze sind Reaktionsharze, die durch Polyaddition, ausgelöst von Härterkomponenten, zu Duroplasten vernetzen [47].

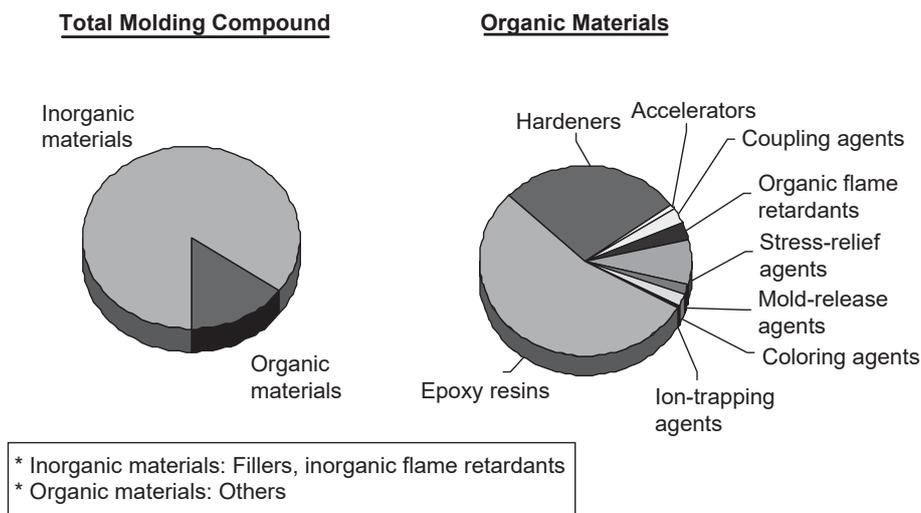


Abbildung 2.12: Bestandteile eines konventionellen EMC [35]

Ungefüllte Epoxidharze haben für die Applikation in einem Leistungsmodul ungeeignete Materialeigenschaften und funktionieren dementsprechend nur als Kompositmaterial.

Epoxidharze haben einen sehr hohen CTE von ca. 60 - 90 ppm/K [48][49]. Weiterhin ist die thermische Leitfähigkeit derartiger Harze sehr gering. Sie beläuft sich bei ungefüllten Epoxidharzen auf ca. 0,15 - 0,25 W/m·K [50]. Es sind jedoch die dielektrischen Eigenschaften der Epoxidharze hervorzuheben. Durch die Alterungsbeständigkeit der duroplasten Natur, haben Epoxidharze auch bei erhöhter Temperatur eine sehr gute Kriechstrom- und Durchschlagsfestigkeit [47].

Auf Grund der oben genannten Materialeigenschaften von Epoxidharzen werden diese nicht in Reinform als Verkapselungsmaterial für leistungselektronische Baugruppen verwendet. Die verwendeten Moldcompounds bestehen aus dem Epoxidharz und einer Vielzahl von Additiven, die die Materialeigenschaften des finalen Komposits bestimmen. Die Bestandteile lassen sich in organische und anorganische Komponenten unterteilen. Die drei wesentlichen Bestandteile der organischen Matrix-Komponente sind das Harz, Härter und Beschleuniger. Letztere führen zu einer Erhöhung der Polymerisationsrate, was die Aushärtungszeit verkürzt um Prozesskosten zu reduzieren [35].

Auffällig ist, dass der organische Anteil nur ca. 20% des Compounds umfasst (siehe Abbildung 2.12). Dementsprechend ist der anorganische Anteil dominant, was zur Folge hat, dass dieser die finalen Materialeigenschaften maßgeblich bestimmt. Durch Füllstoffe, wie SiO_2 oder Si_3N_4 , werden insbesondere die thermische Ausdehnung reduziert und die thermische Leitfähigkeit erhöht. Es werden Wärmeleitfähigkeiten von 2-3 W/m·K und CTEs von 14 - 20 ppm/K erreicht [51] [52]. Es ist anzumerken, dass für derartige Werte ein sehr hoher Füllgrad von über 90% anorganischer Komponenten erforderlich ist [53]. Dieser hohe Anteil an Füllstoffen führt während der Verarbeitung zu besonders hohen Drücken und Temperaturen, die nötig sind um das Material in der Applikation umzuformen und fördern zu können (siehe Kapitel 2.3.2).

EMCs werden im Transfermoulding-Verfahren verarbeitet, um die Verkapselung von leistungselektronischen Baugruppen auszubilden (siehe Kapitel 2.3.2). Für dieses Verfahren liegt das Com-

pound zu Beginn des Prozesses in einem vorvernetzten Zustand, dem sogenannten B-stage Zustand, vor. Hierbei handelt es sich um einen Zustand eines zweistufigen Harzsystems. Eine erste Vernetzungsreaktion ist bereits vollendet, was zur Folge hat, dass das Material bereits als Festkörper vorliegt. Die vollständige Vernetzung ist jedoch noch nicht abgeschlossen, so dass das Material unter den Prozessparametern des Transfermouldens (Druck und Hitze) umgeformt werden kann. Abschließend vernetzt das Material vollständig [54] [55].

Bezogen auf den Einsatz in leistungselektronischen Modulen bieten EMCs zwei wesentliche Vorteile gegenüber einem Silikongel. Zum einen weisen EMCs eine ca. 15 mal größere Wärmeleitfähigkeit als ein Weichverguss vor. Zum anderen bieten sie eine mechanische Stabilisierung der fragilen Bauteile des Moduls. So kann die Lebensdauer durch den Einsatz eines Hartvergusses signifikant erhöht werden [56] [57].

2.4.3 Direct potting Epoxidharze

Neben den sehr weit verbreiteten Silikongelen (siehe Kapitel 2.4.1) und den Epoxid-Moldcompounds (siehe Kapitel 2.4.2) gibt es ein weiteres Materialsystem für die Verkapselung leistungselektronischer Module. Die direct potting Epoxidharze (DP-Epoxy) werden seit der jüngsten Vergangenheit von einigen wenigen Herstellern (z.B. Mitsubishi Electric Corporation, Tokyo) in Rahmenmodulen angeboten [58].

DP-Epoxy liegen zum Zeitpunkt der Verkapselung in einem flüssigen Zustand vor. Sie können, ähnlich wie ein Silikongel, durch einen einfachen Potting-Prozess appliziert werden. Dadurch können sie ebenfalls in größeren Modulkörpern, wie beispielsweise Rahmenmodulen, eingesetzt werden [59]. Das Material wird ausschließlich in Kombination mit einer weiteren neuartigen Packaging-Technologie angeboten.

Diese Technologie besteht im Wesentlichen aus der Substitution des keramisch isolierten Schaltungsträgers durch eine organische Isolationsfolie (siehe Abbildung 2.13). Diese Technologie wird vom Hersteller Mitsubishi Electric IMB (**insulated metal baseplate**) genannt. In anderen Arbeiten, die sich mit der Technologie befassen, ist sie ebenfalls unter dem Namen „IsoPower“ aufzufinden [17].

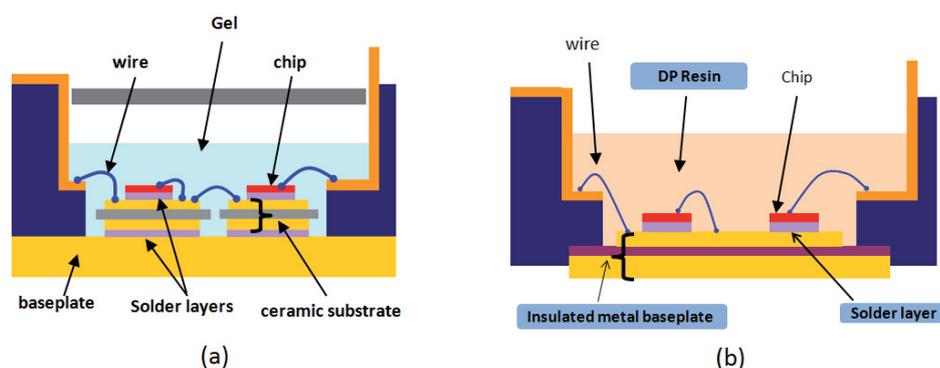


Abbildung 2.13: Schematische Darstellung eines konventionellen Modulaufbaus (a) und Aufbau mit organischem Isolator (IMB) und DP-Epoxy (b) [60]

Der größte Vorteil dieser Technologie ist das Ermöglichen des Einsatzes von dickeren Kupferlagen im Aufbau des thermischen Stapels. Auf Grund der fragilen Natur der DCB-Keramik in Bezug auf Zugspannung ist dies bei einem Aufbau mit DCB nicht möglich. Durch ein erhöhtes Volumen an Kupfer unterhalb des Halbleiters kann die auftretende Verlustwärme effektiver gespreizt und abgeführt werden, was zu einer Steigerung der Lebensdauer des Moduls führt [17].

Der Benefit, der durch den Einsatz von DP-Epoxy bei der IsoPower-Technologie erzielt wird, zielt auf die mechanischen Eigenschaften des vorliegenden Aufbaus ab. Da das Materialgefüge hier von Kupfer dominiert ist, ist der CTE der DP-Epoxy auf den CTE von Kupfer angepasst worden. Dadurch wird der CTE-mismatch zwischen den eingesetzten Komponenten minimiert, wodurch ein Bimetall-Effekt, der eine Wölbung der Bodenplatte hervorruft, verhindert wird [59]. Weiterhin wird auf Grund der Festkörperstruktur der Verkapselung eine mechanische Stabilisierung bzw. Entlastung der Bonddrähte vorgenommen [61].

Es ist festzuhalten, dass die thermische Leistungsfähigkeit dieses Verkapselungsmaterials begrenzt ist. Anders als bei EMCs werden die Eigenschaften des finalen Materials nicht durch additive Füllstoffe erzeugt. DP-Epoxy liegen als Harz ohne signifikanten Füllstoffanteil vor, wodurch die Fließfähigkeit des Materials sichergestellt wird. Durch diesen Sachverhalt ist die Wärmeleitfähigkeit derartiger Verkapselungsmaterialien mit der eines Silikongels zu vergleichen (0,1 - 0,2 W/m·K). DP-Epoxy bieten demnach neben der Möglichkeit des Einsatzes der IsoPower-Technologie und einer mechanischen Stabilisierung der Bonddrähte keinerlei Vorteile in Bezug auf die Entwärmung der leistungselektronischen Baugruppe.

2.5 Anorganische Verkapselungsmaterialien

Die in dem folgenden Kapitel erörterten Verkapselungsmaterialien gehören im Wesentlichen zu der Gruppe der keramischen Stoffe, welche wiederum der Gruppe der anorganischen nichtmetallischen Werkstoffe zuzuordnen sind. Keramische Materialien werden bereits heutzutage häufig in der Elektrotechnik eingesetzt. Der Einsatz erfolgt auf Grund der guten dielektrischen Eigenschaften ($10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ @ RT) sowie wegen der hohen Temperaturbeständigkeit dieser Werkstoffe (Schmelztemperatur $T_S > 2000^\circ\text{C}$) [62]. So sind derartige Materialien z.B. bei keramischen (Leistungs-)Widerständen oder dem Verkitten von Lampenfassungen vorzufinden [63] [64].

Eine sehr wichtige Teilgruppe der anorganischen Materialien sind die Zemente. Als Zement wird im Allgemeinen ein Gemisch fein aufgemahlener nichtmetallisch-anorganischer Bestandteile bezeichnet, das hydraulisch härtet. Für die Erhärtung durch Hydratationsreaktion ist die Hinzugabe von Wasser erforderlich, so dass ein sogenannter Zementleim entsteht [66]. Die Materialeigenschaften nach Aushärtung sowie das Verhalten des Zementleims werden maßgeblich durch das Wasser-Zement-Verhältnis (WZV) bestimmt. Kerneigenschaften wie Fließfähigkeit, Abbindegeschwindigkeit und finale Porosität sind die Folge bzw. das Resultat des vorliegenden WZV.

Zemente können in drei Hauptgruppen unterteilt werden: Portland-Zement, Tonerdezement (TZ) und Phosphatzement (PZ). Portland-Zement wird im Wesentlichen im Baugewerbe eingesetzt und

soll im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter erwähnt werden. Es werden hauptsächlich PZ sowie TZ untersucht. Eine kleine Teilmenge der untersuchten Materialien kann nicht als Zement bezeichnet werden, da die hierbei vorliegende Hydratation gänzlich anderen Mechanismen als bei Zementen unterliegt [68]. Es handelt sich hierbei um reaktive Tonerden (CE-Komposite).

Durch das Vermischen von Wasser und Zement wird die Hydratation gestartet, die durch das Entstehen wasserhaltiger Verbindungen, den sogenannten Hydratphasen, das Erstarren und Erhärten des Zementleims ermöglicht [67]. Die Phasen, die bei allen Zementen, mit Ausnahme der TZ, maßgeblich zur Festigkeitsbildung beitragen, sind die Calciumsilicathydrate (CSH). Sie bilden sich, ausgehend von einem Zementkorn, in nadelförmigen Fasern aus, die sich mit zunehmendem Wachstum ineinander verstricken (siehe Abbildung 2.14). Dies führt mit fortschreitender Zeit zur Verdichtung des Gefüges und somit zum Erstarren und Erhärten des Zementleims (siehe Abbildung 2.15).

Die resultierenden Materialeigenschaften sind vom Verlauf der oben beschriebenen Hydratation sowie der Füllstoffe abhängig. Durch diese Eigenschaften können Zemente bzw. anorganische Verkapselungsmaterialien für einen Einsatz in einem leistungselektronischen System in Betracht gezogen werden. Anorganische Materialien besitzen, wie oben erwähnt, gute dielektrische Eigenschaften, so dass sie die primäre Funktion eines Verkapselungsmaterials für leistungselektronische Baugruppen erfüllen können.

Auch die mechanischen Eigenschaften weisen auf eine Eignung für eine derartige Applikation hin. Zemente besitzen im Allgemeinen eine hohe Festigkeit und einen niedrigen CTE, welcher mit den niedrig dehrenden Materialien einer leistungselektronischen Baugruppe korrespondiert [69]. Auf diese Weise können im Betrieb entstehende thermomechanische Spannungen zwischen den Komponenten der AVT verhindert werden. Außerdem kann die mechanische Festigkeit dazu beitragen, fragile Komponenten (z.B. Bonddrähte) zu stabilisieren (vgl. EMC; siehe Kapitel 2.4.2).

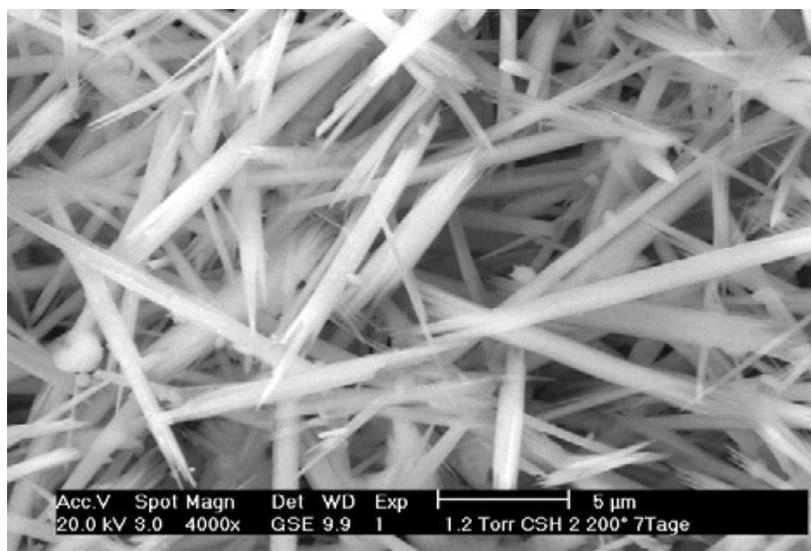


Abbildung 2.14: Exemplarische ESEM SE-Aufnahme von nadelförmigen CSH-Strukturen; Hillebrandit nach 1 Woche bei 200°C [65]

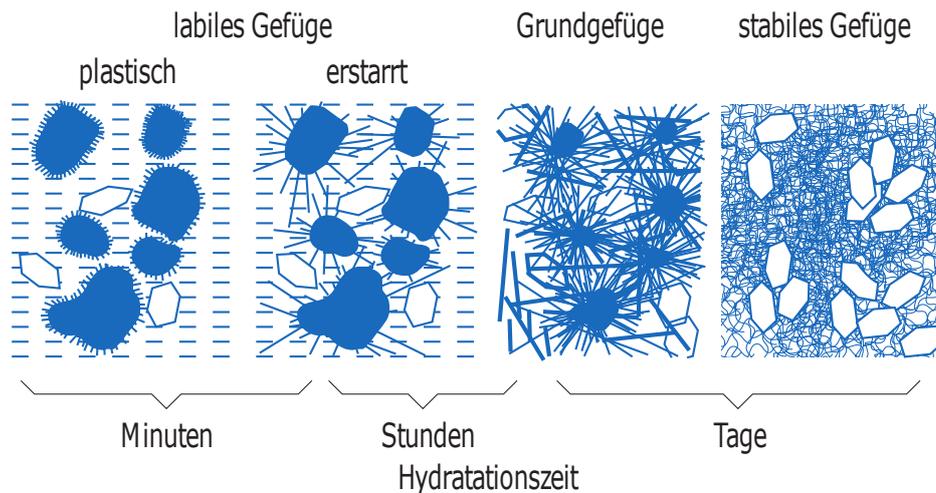


Abbildung 2.15: Stadien der Hydratation von CSH-Phasen; dunkle Partikel: Zementkörner; helle Partikel: Füllstoffe; nach [67]

Dadurch kann die Zuverlässigkeit bzw. Lebensdauer leistungselektronischer Module signifikant gesteigert werden.

Weiterhin können derartige Materialien auf Grund ihrer kristallinen Struktur eine relativ hohe Wärmeleitfähigkeit hervorbringen. So hat zum Beispiel ein kommerziell erhältlicher Magnesiumphosphatzement eine Wärmeleitfähigkeit von $2,3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ [70]. Die maximale Dauerbetriebstemperatur derartiger Materialien liegt oberhalb von 1000°C [69]. Somit ist die thermische Stabilität eines anorganischen Verkapselungsmaterials für jede leistungselektronische Anwendung mehr als ausreichend.

Das Applizieren von Zementen kann im Allgemeinen durch einen Schwerkraft- bzw. Niederdruck-Verguss (Potting; siehe Kapitel 2.3.1) erfolgen. Um sicherzustellen, dass alle Kavitäten des Werkstückes verfüllt sind, kann ein Vakuum-Verguss in Betracht gezogen werden. Somit können die oben beschriebenen Materialeigenschaften durch einen stabilen, zuverlässigen und kostengünstigen Prozess erzeugt werden. Im Verlauf dieser Arbeit gilt es zu beweisen, dass ein anorganisches Material zur Verkapselung einer leistungselektronischen Baugruppe eingesetzt werden kann.

3 Thermische Auslegung leistungselektronischer Module

Die mögliche geführte Leistung sowie die Zuverlässigkeit und Lebensdauer eines leistungselektronischen Moduls ist maßgeblich von der thermischen Leistungsfähigkeit des Systems abhängig. Je nach Aufbau- und Verbindungstechnik und der eingesetzten Materialkomposition sind die thermischen Übergänge und Widerstände des Materialstapels unterschiedlich stark ausgeprägt. Ein weiterer Einflussfaktor des thermischen Managements von Leistungsmodulen ist die Kühlungsstrategie. Allgemein wird hierbei zwischen Luft- und Wasserkühlung unterschieden.

Der Einsatz von anorganischen Verkapselungsmaterialien ermöglicht das Erschließen neuer thermischer Pfade innerhalb eines Leistungsmoduls. Die Auswirkungen einer erhöhten Wärmeleitfähigkeit in Wechselwirkung mit der jeweiligen Kühlungsstrategie muss hinreichend bewertet und diskutiert werden. Dies bildet den Kern der Analyse alternativer Modulkonzepte unter dem Einsatz von anorganischen Verkapselungsmaterialien.

Aus diesem Grund werden in den folgenden Kapiteln die Mechanismen des Wärmetransportes beschrieben, um die grundlegenden Vorgänge bei der Entwärmung leistungselektronischer Module zu erläutern. Weiterhin werden die gängigen Kühlungsstrategien und deren Wirksamkeit diskutiert. Abschließend werden die vorhandenen thermischen Pfade innerhalb eines konventionellen Leistungsmoduls beschrieben und eventuelle Vor- bzw. Nachteile erörtert.

3.1 Mechanismen des Wärmetransports

Ein wesentlicher Faktor bei der thermischen Auslegung von leistungselektronischen Modulen ist der zur Kühlung verwendete Wärmetransportmechanismus. In der Thermodynamik wird Energie, die allein auf Grund von Temperaturunterschieden ein definiertes System betritt oder verlässt, als Wärme bezeichnet [71] [72]. Der resultierende Energietransport wird Wärmestrom \dot{Q} genannt. Dieser kann sich auf verschiedene Arten ausprägen, was zu unterschiedlichen Mechanismen des Wärmetransports führt. Im Folgenden werden die drei Hauptmechanismen des Wärmetransports beschrieben und die physikalischen Grundlagen erläutert.

3.1.1 Konduktion

Die Konduktion oder Wärmeleitung in Festkörpern beschreibt den Prozess des Wärmetransports über zwei benachbarte Moleküle auf Grund eines Temperaturgradienten [72]. Die Übertragung der Energie wird hierbei von unterschiedlichen Medien bzw. Phänomenen realisiert. Im Wesentlichen wird Wärme durch Gitterschwingungen im Kristallgitter (Phononen) des jeweiligen Festkörpers übertragen. Zusätzlich kann Wärme auch durch freie Elektronen transportiert werden [3]. Aus diesem Grund geht im Allgemeinen die Qualität der thermischen Leitfähigkeit eines Festkörpers mit der elektrischen Leitfähigkeit einher.

Dies bedeutet jedoch nicht, dass elektrische Leiter grundsätzlich eine höhere thermische Leitfähigkeit haben. Bei sehr tiefen Temperaturen ist beispielsweise die thermische Leitfähigkeit von Kupfer niedriger als diejenige von kristallinen Isolatoren (z.B. Al_2O_3 , SiO_2) [3]. Grund dafür sind die oben beschriebenen unterschiedlichen Mechanismen der Konduktion und deren Temperaturabhängigkeit. Für die vorliegende Arbeit reicht die phänomenologische Erfassung der Konduktion durch die aus der Thermodynamik bekannten Größen Temperatur, Wärmestrom und Wärmestromdichte aus.

Ein Wärmestrom wird von einem Temperaturgradienten getrieben und ist demnach physikalisch betrachtet ein Nichtgleichgewichtsphänomen [3]. Ein gleichmäßiger Wärmetransport durch einen Festkörper kann in einem eindimensionalen System durch folgende Fourier-Gleichung beschrieben werden [73]:

$$\dot{Q} = -\kappa A \cdot \frac{dT}{dx} \quad [W] \quad (3.1)$$

Der resultierende Wärmestrom ist demnach abhängig von der Wärmeleitfähigkeit κ des Festkörpers, der betrachteten Querschnittsfläche A sowie dem vorliegenden Temperaturgradienten dT/dx . Kommt es folglich zu einem eingeschwungenen Wärmestrom (steady-state), liegt eine stationäre Temperaturdifferenz vor. Diese ist von der Wärmeleitfähigkeit des Materials, der vorliegenden Querschnittsfläche und der Weglänge L abhängig (siehe Gleichung 3.2).

$$(T_1 - T_2) = \dot{Q} \cdot \frac{L}{\kappa A} \quad [K] \quad (3.2)$$

Bezogen auf die Analogie von Wärmestrom und elektrischem Strom, welcher durch einen Widerstand fließt, lässt sich mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes ein thermischer Widerstand für die Wärmeleitung definieren (siehe Gleichung 3.3).

$$R_{th,cd} \equiv \frac{(T_1 - T_2)}{\dot{Q}} = \frac{L}{\kappa A} \quad [K] \quad (3.3)$$

Neben dem stationären Zustand kann ein Temperaturfeld ebenfalls eine zeitliche Abhängigkeit besitzen. Hierbei handelt es sich, analog zu der elektrischen Größe, um die thermische Impedanz. In der vorliegenden Arbeit werden sowohl stationäre Zustände als auch das dynamische Verhalten von leistungselektronischen Baugruppen bewertet und diskutiert.

3.1.2 Konvektion

Der Begriff Konvektion stammt vom lateinischen Wort „convectio“, was mit dem Ausdruck „herbeibringen“ übersetzt werden kann. Bezogen auf die Thermodynamik beschreibt Konvektion den Wärmetransport durch makroskopische Bewegung eines Fluids. Es handelt sich also um die Wärmitführung durch ein vorbeiströmendes Fluid. Der treibende Übertragungsmechanismus ist eine Kombination aus Temperaturgradient, Energie als Enthalpie und kinetischer Energie des Fluids [72].

Die Menge an abtransportierter Energie ist maßgeblich vom Wärmeübergangskoeffizienten h , der angeströmten Fläche A und der Temperaturdifferenz zwischen der angeströmten Oberfläche und dem Fluid abhängig. Dieser Zusammenhang kann durch folgende Formel dargestellt werden [74].

$$\dot{Q}_{conv} = h \cdot A \cdot (T_O - T_{Fl}) \quad [W] \quad (3.4)$$

Es wird zwischen freier (natürlicher) und erzwungener (forcierter) Konvektion unterschieden. Bei der natürlichen Konvektion entsteht ein Luftstrom entlang einer Wärmequelle auf Grund eines Druckunterschiedes. Das Fluid unmittelbar über der Oberfläche der Wärmequelle wird erwärmt, wodurch es sich ausdehnt und sich lokal eine Reduzierung der Dichte des Fluids einstellt. Es steigt auf und hinterlässt einen lokalen Unterdruck, der das Nachströmen von neuem Fluid mit der Ausgangstemperatur zur Folge hat. Dieser Prozess wiederholt sich, bis sich ein stetiger Fluidstrom einstellt (siehe Abbildung 3.1, links).

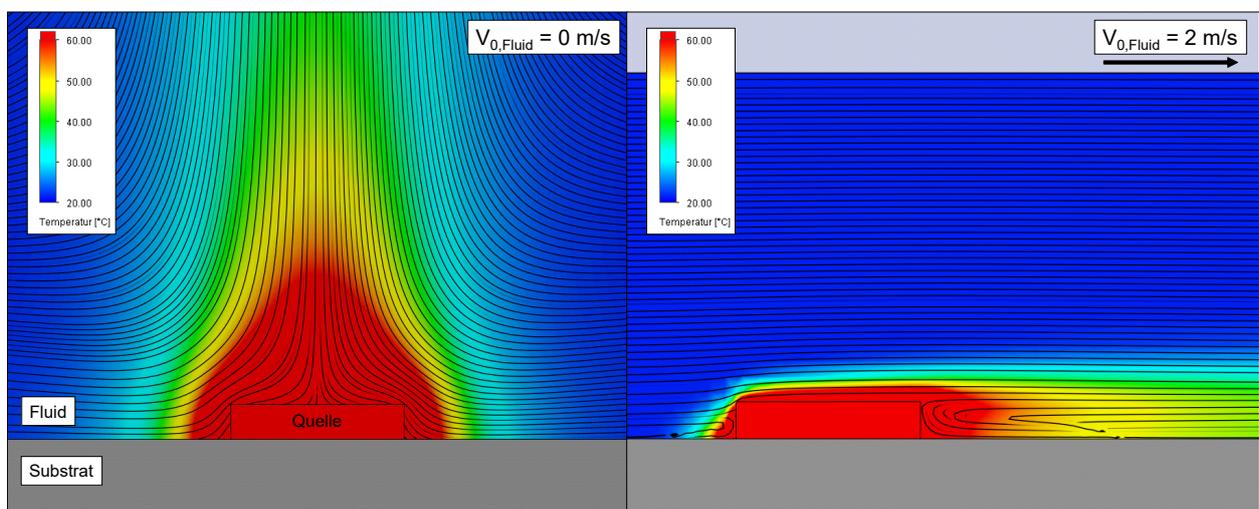


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der Ausprägungen von Konvektion anhand von CFD-Simulationen; links: natürliche Konvektion; rechts: forcierte Konvektion; Isotherme Schnittansicht der Baugruppen, Stromlinien des Fluids schwarz dargestellt

Bei der forcierten Konvektion ist die Strömungsgeschwindigkeit durch das System selbst vorgegeben. Bei der Kühlung von mechanischen oder elektrischen Systemen handelt es sich um eine der Applikation angepasste definierte Strömung, die künstlich erzeugt wird (Lüfter, Umwälzpumpe). Ein Beispiel für den Temperatur- und Strömungsverlauf von forcierter Konvektion ist in Abbildung 3.1, rechts, dargestellt. Die forcierte Konvektion ist der am weitesten verbreitete Transportmechanismus bei der Entwärmung von leistungselektronischen Systemen jenseits der Teilsystemgrenze Leistungsmodul [75]. Innerhalb des Moduls tritt ausschließlich Konduktion auf.

3.1.3 Wärmestrahlung

Der dritte Mechanismus des Wärmetransports benötigt keinerlei materielles Transportmedium. Es handelt sich hierbei um die Wärmestrahlung. Jeder Körper mit einer positiven thermodynamischen Temperatur ($> 0\text{K}$) emittiert Wärme in Form von elektromagnetischer Strahlung. Hierbei wird die innere Energie des Körpers in elektromagnetische Strahlung umgewandelt und emittiert. Trifft besagte elektromagnetische Strahlung auf einen weiteren Körper, so wird ein Teil der übertragenen Energie von diesem Körper absorbiert und wiederum in innere Energie umgewandelt. Die übrige Teilmenge wird reflektiert oder transmittiert [72].

Es ist festzuhalten, dass, anders als bei Konduktion und Konvektion, die Temperaturdifferenz zwischen einem Körper (T_1) und dessen Umgebung (T_2) eine untergeordnete Rolle auf die Menge der übertragenen Energiemenge hat. Formel 3.5 beschreibt allgemein einen radiativ transportierten Wärmestrom [73].

$$\dot{Q}_{rad} = \sigma \cdot A \cdot \varepsilon \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad [W] \quad (3.5)$$

Einer der vorliegenden Einflussfaktoren ist der Emissionskoeffizient ε , welcher den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit und Geometrie des betrachteten Körpers beinhaltet. Weitere Faktoren sind die Stefan-Boltzmann-Konstante σ , die betroffene Fläche A sowie die vorliegende Temperaturdifferenz. Letzteres kann sowohl die Differenz zwischen zwei Oberflächen als auch die Differenz zwischen einer Oberfläche und seiner Umgebung einschließen.

In der vorliegenden Arbeit wird die Auswirkung der Wärmestrahlung auf etwaige Berechnungen nicht berücksichtigt. Anhand der folgenden Beispielrechnung soll erläutert werden, warum bei den vorliegenden leistungselektronischen Applikationen die Wärmestrahlung vernachlässigt werden kann. Es ist von einem unverkapselten Halbleiter mit einer Sperrschichttemperatur T_j von 150°C auszugehen. Besagter Halbleiter hat eine Fläche von 80 mm^2 und einen angenommenen Emissionsgrad von 0,9. Die Umgebungstemperatur beträgt 21°C . Unter Verwendung von Formel 3.5 kann folgender radiativer Wärmestrom \dot{Q}_{rad} ermittelt werden:

$$\dot{Q}_{rad} = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \cdot 80 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot 0,9 \cdot (423,15K^4 - 293,15K^4)$$
$$\dot{Q}_{rad} = \underline{\underline{0,1W}}$$

Die Energiemenge, die durch Wärmestrahlung von der Halbleiteroberfläche abgegeben wird, beträgt 0,1 W. Bei einer typischen Verlustleistungsdichte von 2 W/mm² beträgt die absolute Verlustleistung des Halbleiters 160 W bei 80 mm² Fläche. Die durch Wärmestrahlung emittierte Energiemenge entspricht demnach lediglich 0,06% der Verlustleistung des Halbleiters. Daraus lässt sich folgern, dass für alle folgenden Untersuchungen der Einfluss der Wärmestrahlung zu vernachlässigen ist. Es handelt sich hierbei um zu geringe Temperaturen und zu kleine Flächen, als dass Wärmestrahlung bei den vorliegenden Randbedingungen einen signifikanten Einfluss auf die Halbleitertemperatur haben kann.

Weiterhin ist anzumerken, dass es sich bei allen betrachteten Halbleitern in dieser Arbeit um verkapselte Chips handelt. Das bedeutet, dass der unmittelbare Transportmechanismus am Halbleiter unausweichlich Konduktion ist. Wärmestrahlung kann erst wieder an der Oberfläche der Verkapselung auftreten. Auf Grund der Widerstände des vorliegenden thermischen Pfades (siehe Kapitel 3.3) ist die an der Vergussoberfläche auftretende Temperatur noch geringer als in der oben beschriebenen Beispielrechnung. Die Wärmestrahlung ist für die vorliegende Arbeit vernachlässigbar.

3.2 Kühlungsstrategien leistungselektronischer Module

Wie bereits in Kapitel 2.1 erörtert, können leistungselektronische Module auf Grund der hohen Verlustleistungsdichte der Halbleiter nur unter Einsatz einer Wärmesenke bzw. einer Kühlung verwendet werden. Diese muss dem eingesetzten Modul entsprechend dimensioniert sein, um genügend thermische Energie aus dem System abführen zu können. Je mehr Wärme abgeführt werden kann, desto niedriger ist die Halbleitertemperatur, was thermomechanische Spannungen reduziert und dementsprechend die Zuverlässigkeit bzw. Lebensdauer eines Leistungsmoduls verbessert.

Die Wärmesenke ist das letzte Element des thermischen Stapels. Über sie verlässt die thermische Energie das System, indem die Senke die Wärme an die Umgebung abgibt [4]. Unter Verwendung verschiedener Kühlungsstrategien wird versucht, den Wärmeübergangskoeffizienten h zu erhöhen, um die konvektive Übergabe an die Umgebung zu verbessern (siehe Formel 3.4). Es gibt verschiedene Ansätze und Kühlmedien, die in der Leistungselektronik zum Einsatz kommen. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Kühlungsstrategien leistungselektronischer Module beschrieben.

3.2.1 Forcierte Luftkühlung

Leistungselektronische Systeme mit kleinen bis mittleren Leistungsdichten werden häufig unter Verwendung von Luft als Kühlmedium betrieben. Im Falle von luftgekühlten Systemen kommen bestimmte Wärmesenken bzw. Kühlkörper zum Einsatz. Diese enthalten unterseitig dreidimensionale Strukturen, um die vorhandene Oberfläche für den konvektiven Wärmeübergang zu vergrößern. Je nach Ausprägung werden diese Kühlkörper Rippen- bzw. Pin Fin Kühlkörper genannt.

Rippenkühlkörper haben eine Vielzahl an Stegen, auf der dem Luftstrom zugewandten Seite. Das Leistungsmodul wird oberseitig montiert (siehe Abbildung 3.2). Die hier abgebildeten Rippen verfolgen das Ziel, die mit dem Kühlmedium (Luft) in Kontakt tretende Oberfläche bei kleinstmöglichem Volumen zu maximieren. Bei Pin Fin Kühlkörpern befinden sich einzelne Zylinder (Pins), an Stelle der hier dargestellten Rippen. Sie dienen dem gleichen Zweck wie die Rippen.

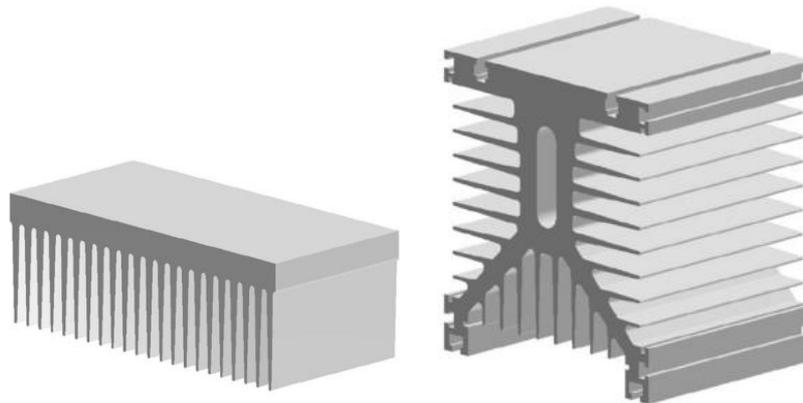


Abbildung 3.2: Exemplarische Darstellung verschiedener Rippenkühlkörper der Fa. Semikron [76]

Der resultierende Wärmeübergangskoeffizient h ist von der Strömungsgeschwindigkeit des Kühlmediums abhängig. Je höher die Geschwindigkeit, desto größer ist die Menge der abgetragenen thermischen Energie. Dies gilt bis zu einem oberen Grenzwert der Strömungsgeschwindigkeit, ab dem nicht mehr thermische Energie über das Fluid aufgenommen werden kann. Eine weitere Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit führt zu keiner signifikanten Verbesserung des Wärmeübergangskoeffizienten h [4]. Mittels forcierter Luftkühlung lassen sich Wärmeübergangskoeffizienten von bis zu $250 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ erreichen [77].

3.2.2 Laminare Wasserkühlung

Bei der Verwendung von leistungselektronischen Modulen hat die Wahl des Kühlmediums einen signifikanten Einfluss auf die Effektivität der angewandten Kühlungsstrategie. Bei mittleren bis hohen Leistungsdichten werden weitestgehend Flüssigkühler verwendet. Zum Schutz vor Frost und Korrosion wird in derartigen Kühlanlagen ein Wasser-Glykol-Gemisch verwendet [4]. Flüssigkühler erzielen auf Grund der besseren thermischen Eigenschaften von Flüssigkeiten einen deutlich wirksameren Abtrag der Verlustwärme im Vergleich zu einer forcierter Luftkühlung.



Abbildung 3.3: Exemplarische Darstellung eines Cold Plate Kühlers [79]

Zum einen hat ein Wasser-Glykol-Gemisch (Mischungsverhältnis 50:50) die 20-fache Wärmeleitfähigkeit von Luft. Zum anderen kann ein derartiges Gemisch eine deutlich höhere thermische Kapazität vorweisen als Luft. Hierbei liegt ein Faktor von ca. 3 zwischen Luft und einem Wasser-Glykol-Gemisch [78]. Laminare Wasserkühlungen prägen sich im Kontext von leistungselektronischen Baugruppen meistens in flüssigkeitsdurchströmten Metallplatten, den sogenannten cold plates, aus.

Bei cold plates wird die Grundplatte mäanderförmig von einem Rohr durchzogen (siehe Abbildung 3.3). Das Leistungsmodul wird auf der Oberseite montiert. Jede cold plate hat einen Zulauf und einen Rücklauf für das eingesetzte Kühlmedium. Da das Kühlmedium bei dieser Art Kühlern nicht direkt mit der leistungselektronischen Baugruppe in Kontakt kommt, wird hierbei auch von indirekten Wasserkühlern gesprochen. Die sich innerhalb des Kühlers ausprägende Strömung ist laminarer Natur. Das bedeutet, dass es zu keinen Turbulenzen oder Querströmungen zwischen zwei oder mehreren benachbarten Strömungsebenen bzw. -schichten kommt [80].

Neben der Strömungsgeschwindigkeit des Fluids ist der Differenzdruck im gesamten Kühlkreislauf ein wichtiger Parameter. Dabei handelt es sich um den Druckabfall, den die Pumpe aufbringen muss, um eine definierte Durchflussgeschwindigkeit zu erzeugen. Insbesondere bei der Auslegung von automotiven Kühlsystemen ist dies von großer Bedeutung, da auf Grund des eingeschränkten Bauraumes die mögliche Pumpenleistung stark limitiert ist. Beeinflusst wird der Differenzdruck u.a. von der Viskosität des Kühlmediums und der geometrischen Gestaltung der Kühlkanäle (Durchmesser, Biegungen) [81]. Unter Verwendung einer laminaren (indirekten) Wasserkühlung kann ein Wärmeübergangskoeffizient h zwischen 500 und 1.000 W/m²·K erreicht werden [82].

3.2.3 Turbulente Wasserkühlung

Viele Applikationen bringen eine sehr hohe Leistungsdichte mit sich. Um ein derartig hohes Maß an Verlustwärme abführen zu können, sind fortschrittliche Kühlmethode vonnöten. Mittels tur-

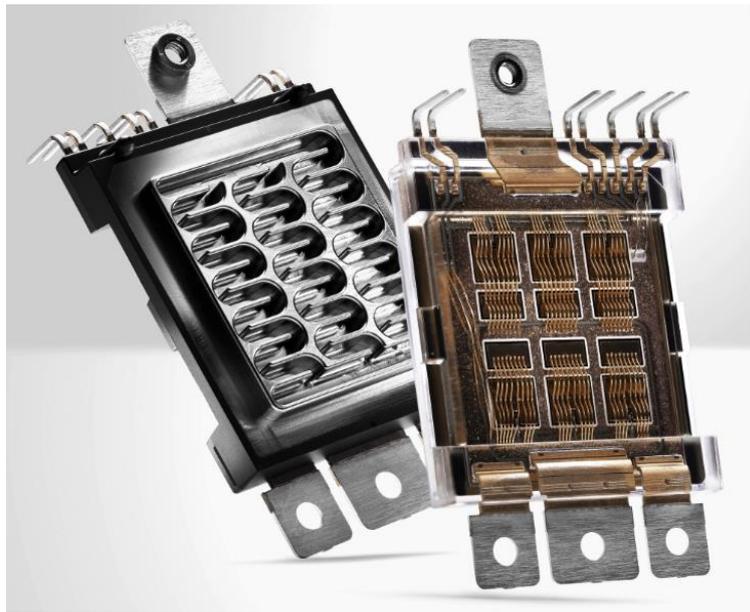


Abbildung 3.4: DCM1000-Modul; links: Unterseite mit ShowerPower3D®; rechts: Oberseite mit transparentem Verkapselungsmaterial [85]

bulenter Wasserkühlung ist es möglich, Leistungsmodule mit sehr hohen Verlustleistungsdichten betreiben zu können. Das Grundprinzip der Wasserkühlung (vgl. laminare Wasserkühlung) bleibt bestehen. Entscheidend für den erweiterten Wärmeübergangskoeffizienten h ist die Ausprägung der Strömung innerhalb des Kühlkreislaufes und insbesondere unterhalb der Leistungshalbleiter.

Bei einer turbulenten Wasserkühlung treten Verwirbelungen (Turbulenzen) unterhalb des Halbleiters auf. Anders als bei laminarer Strömung kommt es hierbei zu einer Durchmischung der einzelnen Strömungsschichten. Das bedeutet, dass neben der allgemeinen Strömungsrichtung weitere Querströmungen im Fluid vorhanden sind, die sich zu Turbulenzen ausbilden. Die hierbei entstehende lokale Vermischung führt zu einem erheblichen Quertransport von Impuls und Energie unter den Fluidteilchen [83].

Weiterhin erfahren die Moleküle im Bereich der Grenzschicht zwischen Fluid und einer heißen Oberfläche (z.B. Unterseite eines Leistungsmoduls) eine höhere Austauschfrequenz. Somit kann ein höheres Maß an thermischer Energie pro Zeiteinheit in das Fluid übertragen werden. Folglich ist der Wärmeübergangskoeffizient deutlich höher als bei laminarer Strömung [71]. Es ist zu beachten, dass turbulente Strömung einen höheren Differenzdruck im Kühler zur Folge hat [84]. Im Vergleich zu laminarer Strömung sind daher größere und kostenintensivere Pumpen vonnöten.

Ein Beispiel für eine turbulente Wasserkühlung ist das ShowerPower®-System von Danfoss Silicon Power GmbH, Flensburg [86]. Hierbei handelt es sich um eine offene Kühlerstruktur, die erst mit der Montage des Leistungsmoduls einen geschlossenen Kühlkreislauf ausbildet. Unterhalb des leistungselektronischen Moduls befinden sich mäanderförmige Kanalstrukturen. Die wiederholte Änderung der Strömungsrichtung führt zu Turbulenzen auf Grund der Impulserhaltung [87]. Die kleinen Ausmaße der Kanäle ermöglichen zwischen den Richtungsänderungen eine quasi-laminare Strömung. Dies hält den Differenzdruck trotz hoher Kühlleistung auf einem niedrigen Niveau [88].

Die Kanäle werden bei einer klassischen ShowerPower[®]-Kühlung durch ein Inlay aus Kunststoff erzeugt.

Eine weitere Konfiguration dieser Kühlungsstrategie bildet das ShowerPower3D[®]. Bei dieser Variante liegt insofern ein Paradigmenwechsel vor, als dass die mäanderförmigen Kühlkanäle nicht mehr Teil des Kühlers unterhalb des Leistungsmoduls, sondern fester Bestandteil des Moduls selbst sind. Wie in Abbildung 3.4 zu erkennen ist, ist die Kanalstruktur Teil der Bodenplatte des Moduls. Die dreidimensionale Strukturierung der Bodenplatte führt zu einer signifikanten Vergrößerung der effektiven Kühlfläche des Moduls [87].

Unter Verwendung von turbulenter Wasserkühlung, wie sie oben beschrieben ist, ist ein deutlich höherer Wärmeübergangskoeffizient h realisierbar als mit einer laminaren Wasserkühlung. Die Wärmeübergangskoeffizienten einer turbulenten Wasserkühlung liegen zwischen 5.000 und 10.000 W/m²·K [89].

3.2.4 2-Phasen-Kühlung

Neben einer reinen Gas- bzw. Flüssigkeitskühlung wird zudem eine intermediäre Kühlungsstrategie verwendet. Das Verdampfen von Flüssigkeit, also der Übergang vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand, benötigt Energie [90]. Dieser physikalische Zusammenhang wird bei einer sogenannten 2-Phasen-Kühlung verwendet. Die von einem Leistungsmodul erzeugte Verlustwärme wird als Verdampfungsenergie für das Kühlmedium verwendet [13].

Der erzeugte Dampf bewegt sich von der Wärmequelle fort und kondensiert an einer anderen Position innerhalb des Kühlsystems. Beim Vorgang der Kondensation wird die vorher aufgenommene Energie abgegeben und das Kühlmedium befindet sich erneut in seinem flüssigen Ausgangszustand. Wird der beschriebene Zyklus von Verdampfen und Kondensieren aufrecht erhalten, kann eine erhebliche Menge an thermischer Energie von der Wärmequelle abgeführt werden [91].

Ein Nachteil einer 2-Phasen-Kühlung ist die gesteigerte Komplexität des Systems im Vergleich zu einer turbulenten Wasserkühlung im Sinne eines Danfoss ShowerPower[®] (siehe Kapitel 3.2.3). Zum einen bedarf ein derartiges Kühlungssystem mehr Komponenten (Verdampfer, Kondenser, Pumpe)[92]. Zum anderen ist eine genaue Abstimmung des Systems hinsichtlich des Innendrucks und der vorherrschenden Temperaturen notwendig.

Ist beispielsweise der Druck zu niedrig, wird das Kühlmedium bei der anliegenden Quelltemperatur nicht verdampfen. Um die kritischen Größen Druck und Temperatur des Kühlmittels zu steuern, sind weitere Komponenten wie Ausgleichsbehälter und Vorwärmer nötig [92]. Auf Grund der gesteigerten Komplexität und Sensitivität werden 2-Phasen-Kühlungssysteme am häufigsten in der militärischen Luftfahrt verwendet, wo sehr hohe Wärmestromdichten auftreten, die nicht anders abgeführt werden können [93].

Im Laufe der Zeit sind jedoch auf Grund einer verbesserten technischen Umsetzbarkeit immer mehr Anwendungsgebiete von 2-Phasen-Kühlungen hervorgehoben worden. So gibt es immer mehr Anbieter für leistungselektronische Applikationen sowie Anwendungen im Bereich der umweltfreundlichen Datenverarbeitung („green“ IT) [94] [95]. Zudem gibt es Bestrebungen, passive

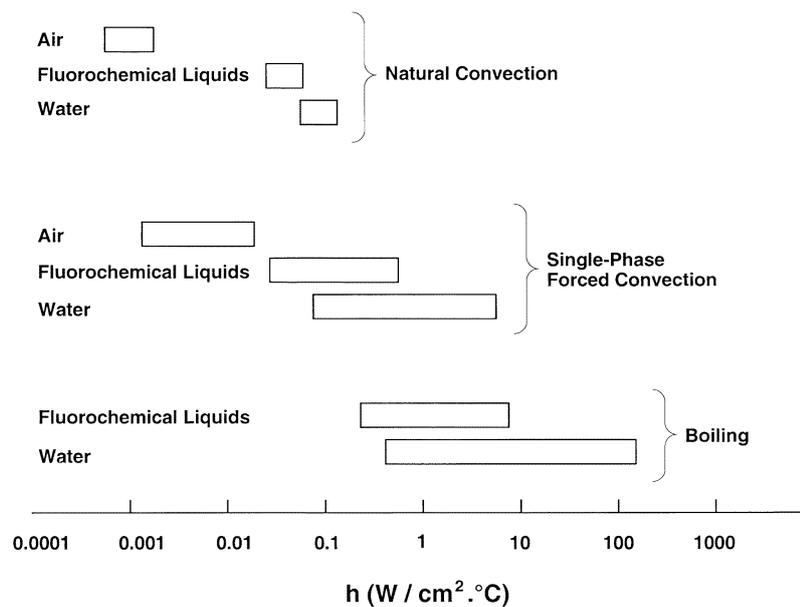


Abbildung 3.5: Wärmeübergangskoeffizienten h , die mit natürlicher Konvektion, forcierter Konvektion und einem Phasenwechsel erreicht werden können [91]

2-Phasen-Kühlsysteme für kompakte Anwendungen, wie beispielsweise im Automotive-Bereich, zu realisieren [96]. Eine Übersicht und Vergleich der erreichbaren Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit der angewandten Kühlungsstrategie ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Eine 2-Phasen-Kühlung erreicht unter Verwendung eines Frost- und Korrosionsschutzes ein h von bis zu $100.000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Weiterhin ist zu erkennen, wie groß der Einfluss der applizierten Kühlungsstrategie auf den Wärmeübergangskoeffizienten h ist. So ist beispielsweise eine Vergrößerung von h um 3 Zehnerpotenzen zwischen einer laminaren Wasserkühlung und einer 2-Phasen-Kühlung bei gleichem Kühlmedium (Wasser) zu beobachten.

Wie eingangs erörtert, beschreiben die oben genannten Kühlungsstrategien die Senke im thermischen Stapel des Systems „leistungselektronisches Modul“. Um die möglichen Wärmeübergangskoeffizienten der einzelnen Kühlungen nutzen zu können, muss genügend thermische Energie an der Systemgrenze des Leistungsmoduls anliegen. Hierfür muss die thermische Energie ausgehend von der Quelle (Leistungshalbleiter) durch den übrigen Teil des thermischen Stapels traversieren. Die Beschreibung dieses thermischen Pfads und der dazugehörigen thermischen Widerstände sind Bestandteil des folgenden Kapitels.

3.3 Thermische Pfade und Widerstände

Die Effektivität und Effizienz einer applizierten Kühlungsstrategie ist maßgeblich von den Gegebenheiten der thermischen Pfade im Leistungsmodul abhängig. Als thermischer Pfad wird fortlaufend die Strecke zwischen der Wärmequelle (Halbleiter) und der jeweiligen Wärmesenke bezeichnet. Konventionelle leistungselektronische Module richten sich in ihrem Aufbau nach den Gegebenheiten ihrer zentralen Komponente, dem Halbleiter. Sie sind zweidimensional flächenori-

entiert. Aus diesem Grund kann die Ausprägung der thermischen Pfade und Widerstände anhand eines zweidimensionalen Schnittes erörtert werden (siehe Abbildung 3.6 und 3.7).

Die im Betrieb des Halbleiters auftretende Verlustleistung wird mittels Konduktion in Richtung der Wärmesenke (hier: Kühler) transportiert. Hierbei kann der effektive Wärmefluss \dot{Q} in eine vertikale Komponente \dot{Q}_v und eine laterale Komponente \dot{Q}_l aufgeteilt werden. Der laterale Wärmefluss wird im Allgemeinen als Spreizung bezeichnet. Sie prägt sich, ausgehend von der Wärmequelle, radial symmetrisch in einer Materialschicht aus. Die Höhe der Spreizung bzw. des lateralen Wärmeflusses \dot{Q}_l ist von den thermischen Eigenschaften des vorliegenden Materials abhängig [97].

Bezogen auf Abbildung 3.6 ist demnach der laterale Wärmestrom \dot{Q}_l in einer Kupferschicht ($\lambda_{Cu} \approx 400 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) deutlich größer als in einer keramischen Schicht ($\lambda_{Al_2O_3} \approx 23 \text{ W/m} \cdot \text{K}$). In Abbildung 3.6 ist anstatt der Ausprägung der einzelnen Materialschichten die Einhüllende als effektive Wärmespreizung dargestellt. Ein Maß für den lateralen Wärmefluss in einer oder mehrerer Schichten ist der Spreizwinkel β . Er beschreibt die Höhe des Anteils des lateralen Wärmeflusses \dot{Q}_l im gesamten Wärmefluss \dot{Q} . Je mehr thermische Spreizung auftritt, desto mehr kann die thermische Kapazität der vorliegenden Materialien ausgenutzt und die effektive Kühlfläche vergrößert werden. Der Aufbau wird effektiver entwärmt.

Wie oben bereits erwähnt, ist der Transportmechanismus innerhalb des Leistungsmoduls die Konduktion. Die physikalischen Vorgänge bei der thermischen Konduktion ähneln in vielerlei Hinsicht derer bei elektrischer Konduktion, also einem elektrischen Stromfluss. Aus diesem Grund ist es gängig, bei der thermischen Beschreibung leistungselektronischer Baugruppen ein thermisch-elektrisches Ersatzschaltbild zu referenzieren [4].

In dieser Analogie entspricht die Wärmequelle der elektrischen Stromquelle sowie die Wärmesenke der Senke in einer elektrischen Schaltung. Weiterführend sind mittels dieses Vorgehens thermi-

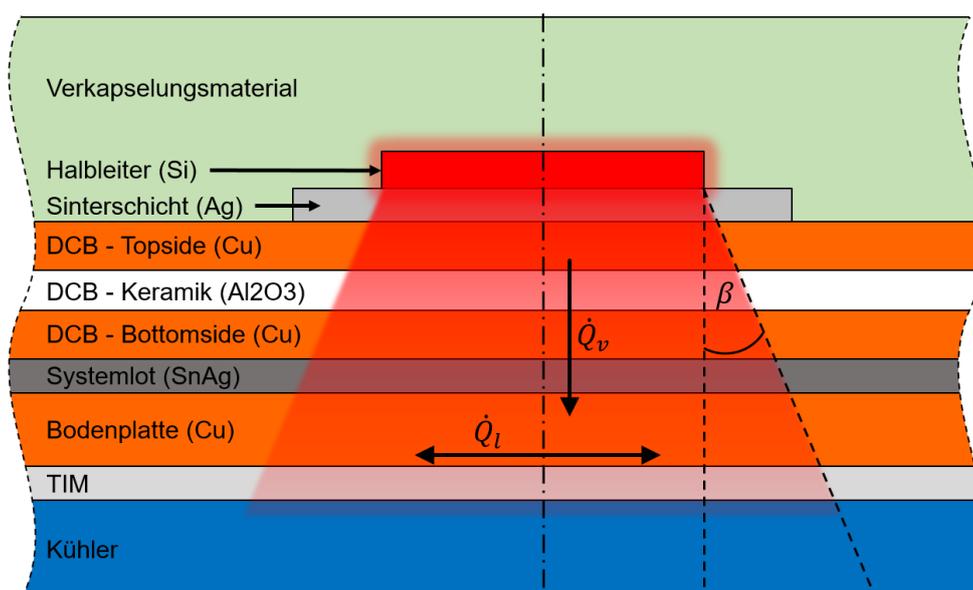


Abbildung 3.6: Schematische Schnittansicht des thermischen Stapels eines typischen Leistungsmoduls

Tabelle 3.1: Beschreibung der diskutierten thermischen Widerstände eines leistungselektronischen Moduls

Bezeichnung	Strecke	inkludierte Schichten
$R_{th,ea}$	encapsulation - ambient	-
$R_{th,je}$	junction - encapsulation	Verkapselungsmaterial
$R_{th,jc}$	junction - case	Sinterschicht, DCB, Systemlot, Bodenplatte
$R_{th,ca}$	case - ambient	TIM
$R_{th,ja}$	junction - ambient	$R_{th,jc}$ & $R_{th,ca}$ bzw. $R_{th,je}$

sche Widerstände innerhalb des thermischen Pfades zu definieren. Die Nomenklatur basiert hierbei stets auf der betrachteten Wegstrecke des thermischen Pfades. Besagte Wegstrecke beginnt für eine ganzheitliche Bewertung bei der Wärmequelle des Systems, der Sperrschicht des Halbleiters (junction).

Es ist möglich, den thermischen Widerstand jeder einzelnen Schicht im thermischen Stapel inklusive der Übergangswiderstände zu den angrenzenden Schichten zu definieren. Ebenso können mehrere Teilwiderstände zu einem Gesamtwiderstand zusammengefasst werden. Aus Gründen der Übersicht sollen hier nur die in Tabelle 3.1 definierten Widerstände betrachtet werden. Sie bilden den thermischen Widerstand der jeweiligen Teilstrecke mit allen Schicht- und Übergangswiderständen ab. Ihre Zugehörigkeit innerhalb des leistungselektronischen Systems ist in Abbildung 3.7 dargestellt. Es ist anzumerken, dass der $R_{th,je}$ das oberseitige Äquivalent zum $R_{th,jc}$ darstellt.

Anhand der in Kapitel 2.4 beschriebenen Eigenschaften konventioneller Verkapselungsmaterialien und dem in Abbildung 3.6 dargestellten Wärmefluss wird deutlich, dass es, bezogen auf den Stand der Technik, nur einen thermischen Pfad innerhalb eines Leistungsmoduls gibt. Es handelt sich hierbei um den unterseitigen Pfad in Richtung der applizierten Kühlung. Dieser besteht, mit

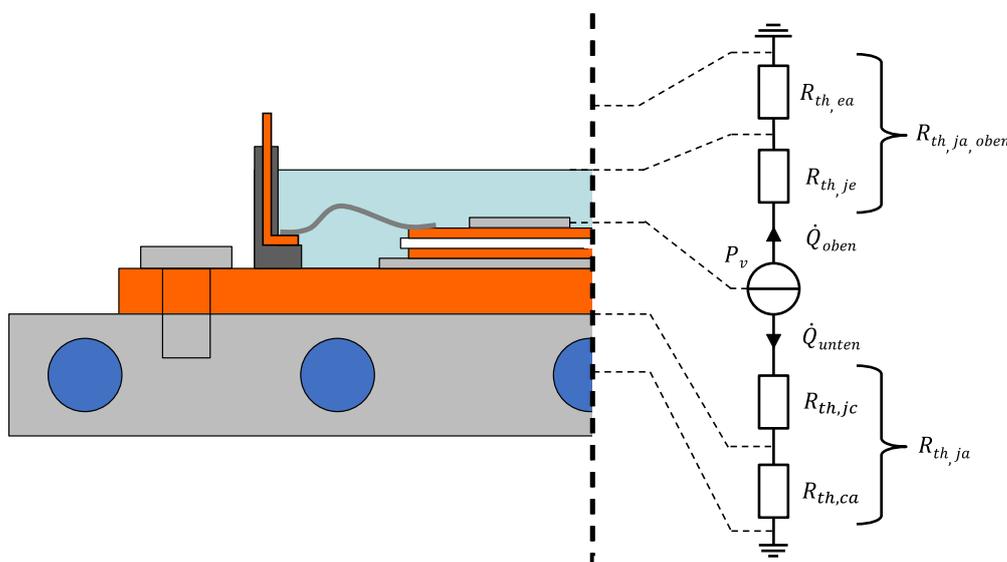


Abbildung 3.7: Schematische Schnittansicht des thermischen Stapels eines typischen Leistungsmoduls

Ausnahme der keramischen Schicht der DCB, nur aus metallischen Werkstoffen, die eine dementsprechend hohe Wärmeleitfähigkeit κ vorweisen.

Im Vergleich zu einem polymeren Verkapselungsmaterial liegt hier zum Teil eine Differenz von 10^3 W/m·K vor. Gleichmaßen gestaltet sich die Relation zwischen dem $R_{th,je}$ und dem $R_{th,jc}$. Der $R_{th,je}$ ist ca. 10^2 - 10^3 mal so groß wie sein unterseitiges Pendant, wodurch klar wird, dass sich so nur ein effizienter Entwärmungspfad ausprägen kann. Ein Ziel dieser Arbeit ist es, durch neue Modulkonzepte neue thermische Pfade zur Entwärmung zu implementieren und zu bewerten.

Es ist ein gängiges Verfahren, zur Bewertung des unterseitigen Kühlpfades eines Leistungsmoduls den $R_{th,jc}$ heranzuziehen. Dementsprechend wäre es schlüssig, den $R_{th,je}$ für die Bewertung eines oberseitigen Pfades in Betracht zu ziehen. Allerdings können nach Bicakci et al. [16] der Betrachtung des $R_{th,jc}$ kühlungsabhängige Spreizeffekte fehlinterpretiert werden. Hier wird beobachtet, dass der $R_{th,jc}$ beim Verwenden einer besseren Kühlung (2-Phasen-Kühlung) sogar größer ist, als bei einer schlechteren Kühlung (Luftkühlung).

Dies ist durch die Exklusion der case-ambient-Strecke zu begründen, welche den Einfluss der Spreizung in der letzten Materialschicht des Leistungsmoduls abbildet. Durch die reine Verwendung des $R_{th,jc}$ kann es zu einer fehlerhaften Bewertung des thermischen Stapels kommen. Ein besseres Bewertungskriterium bildet der $R_{th,ja}$, welcher die Effektivität der applizierten Kühlungsstrategie berücksichtigt. Der Nachteil gegenüber dem $R_{th,jc}$ bzw. dem $R_{th,je}$ ist, dass der $R_{th,ja}$ keinerlei Richtungsinformationen beinhaltet.

$$R_{th,ja} = \frac{\Delta T}{P_v} \quad \text{mit} \quad \Delta T = T_j - T_{amb} \quad (3.6)$$

$$R_{th,ja} = \frac{T_j - T_{amb}}{P_v} \quad [K/W]$$

Nach Formel 3.6 ist der $R_{th,ja}$ bei einer kühlungsunabhängigen Bewertung ($T_{amb} = const.$ und $P_v = const.$) lediglich von der Halbleitertemperatur abhängig. Es kann nicht differenziert werden, über welchen thermischen Pfad die Energie das System verlassen hat. Abhilfe leistet hierbei das Einführen eines wärmestromabhängigen $R_{th,ja}$. Die grundlegende Definition des thermischen Widerstandes beschreibt eine Temperaturänderung pro eingepprägter Leistung. Es ist demnach möglich, die Formel 3.3 auf den oberen Wärmestrom \dot{Q}_{oben} zu beziehen. Dadurch ergibt sich ein eindeutiges Bewertungskriterium für den oberseitigen Entwärmungspfad, welches alle Spreizeffekte korrekt abbildet.

$$R_{th,ja,oben} = \frac{\Delta T}{\dot{Q}_{oben}} \quad [K/W] \quad (3.7)$$

Dieser wärmestromabhängige $R_{th,ja}$ ist jedoch nur in theoretischen Betrachtungen (z.B. thermische Simulationen) ohne Einschränkungen anwendbar. Die messtechnische Erfassung eines Wärmestromes in Luft, wie es bei der Oberseite eines leistungselektronischen Moduls der Fall ist, gestaltet sich als schwer umsetzbar. Insbesondere die Abhängigkeit der sich ausbildenden Strömung und den daraus resultierenden Wärmeübergangskoeffizienten h vom vorliegenden Bauraum der jeweiligen Baugruppe macht eine allgemeingültige Bewertung eines Moduls nahezu unmöglich. Aus den oben genannten Gründen wird für die Bewertung der in dieser Arbeit vorgestellten Modulkonzepte der konventionelle $R_{th,ja}$ in Richtung der unterseitig applizierten Kühlung verwendet. Durch diese Maßnahme können etwaige implementierte thermische Pfade nicht exklusiv bewertet werden. Es kann jedoch die Auswirkung auf die zentrale Größe der Zuverlässigkeit eines Leistungsmoduls, der Halbleitertemperatur, erfasst werden. Weiterhin sollen die Modulkonzepte im Experiment messtechnisch evaluiert werden. Durch die Verwendung des $R_{th,ja}$ als zentrales Bewertungskriterium ist ein Vergleich unter Berücksichtigung aller thermischen Spreizeffekte verschiedener Modulkonzepte bei gleicher applizierter Kühlungsstrategie möglich.

4 Problemstellung und Lösungsansatz

Das Zusammenspiel aus den Materialien und der thermischen Auslegung leistungselektronischer Module hat einen immensen Einfluss auf die Halbleitertemperatur und somit auf die Lebensdauer des Systems. Dieser Einfluss gewinnt durch die zunehmend geforderte kompakte und hochintegrierte Bauweise leistungselektronischer Systeme (Bsp. Mobilitätssektor) immer mehr an Bedeutung. Eine weitere Folge dieser Forderung ist, dass der Bauraum für Leistungsmodule immer weiter schrumpft, was die auftretende Verlustleistungsdichte immer weiter wachsen lässt. Insbesondere das Entwärmen von kleinen Bauteilen bzw. Flächen kann zu sehr hohen Wärmeflüssen führen (siehe Kapitel 2.1).

Heute eingesetzte Halbleiterelemente haben Dauerbetriebstemperaturen von bis zu 175°C [98]. Neuartige WBG-Halbleiter (**w**ide **b**and**g**ap) wie SiC (Siliziumkarbid) oder GaN (Galliumnitrid) können technisch betrachtet sogar Dauerbetriebstemperaturen > 300°C erreichen [99] [100]. Fernab der Halbleiter selbst ist der thermische Einfluss der oberseitigen Kontaktierung (z.B. Bonddrähte) nicht zu vernachlässigen. Oftmals besitzen die Drähte auf Grund des eingeschränkten Querschnittes und der resultierenden elektrischen Stromdichte eine deutlich höhere Temperatur als der Chip selbst. So kann es, je nach Chipfläche und Anzahl der Bonddrähte, zu einem ΔT von bis zu 40K kommen (siehe Kapitel 2.2.3). Dies führt bei einer Halbleitertemperatur von 175°C zu einer Bonddrahttemperatur von 215°C.

Unter Berücksichtigung der oben genannten Trends und neuen Herausforderungen, sind die derzeit eingesetzten Verkapselungsmaterialien leistungselektronischer Module in vielerlei Hinsicht limitiert. Die in Kapitel 2.4.1 beschriebenen Silikone haben zum einen eine maximale Dauerbetriebstemperatur von ca. 200°C [101]. Das bedeutet, dass in dem oben genannten Beispiel die Bonddrahttemperatur bereits weit über der maximalen Betriebstemperatur der Verkapselung angesiedelt ist. Dies hat zur Folge, dass das Material versprödet, wodurch die Baugruppe letztendlich zerstört wird.

Zum anderen bieten die Silikone keinerlei Möglichkeit zur Entwärmung der Baugruppe. Die durchschnittliche Wärmeleitfähigkeit von 0,2 W/m·K ist vernachlässigbar klein. Darüber hinaus bieten Silikone auf Grund ihrer gallertartigen Morphologie keinerlei mechanische Stabilisierung der fragilen Bauteile innerhalb eines Moduls. So wird die thermomechanisch induzierte Expansion und Kontraktion der Bonddrähte beim Einsatz des Moduls nicht unterbunden, was zu einer Materialermüdung an der Verbindungsstelle zwischen Halbleiter und Bonddraht führt. Es kommt zu einem sogenannten Bonddraht-Liftoff, wodurch das Modul als zerstört betrachtet werden kann [102] [103].

Die mechanische Situation gestaltet sich bei Epoxyd basierten Verkapselungsmaterialien durchaus anders. Hierbei handelt es sich um ein hartes Material, welches der thermomechanischen Bewegung der Modulkomponenten in erster Näherung standhält. Allerdings sind diese Materialien ebenfalls thermisch limitiert. Es werden vergleichsweise hohe Wärmeleitfähigkeiten von 2-3 W/m·K erreicht, was allerdings nur auf Grund des hohen Füllgrades von anorganischen Komponenten möglich ist (siehe Kapitel 2.4.2). Durch besagten Füllstoffanteil sind die zur Applikation benötigten Prozesse sehr komplex und müssen unter sehr harschen Bedingungen stattfinden (siehe Kapitel 2.3.2).

Weiterhin ist die thermische Beständigkeit der Epoxyd basierten Verkapselungsmaterialien auf Grund ihrer polymeren Natur begrenzt. Die Glastemperatur T_g von gängigen EMCs liegt zwischen 150°C und 205°C [53] [104] [105]. Eine weitere Limitierung besteht darin, dass sich Epoxidharze bei einer andauernden Temperatureinwirkung oberhalb von 210°C beginnen chemisch zu zersetzen [106]. Bezogen auf das oben beschriebene Beispiel und der Perspektive einer stetig wachsenden Verlustleistungsdichte wird klar, dass hier ein technologischer Flaschenhals vorliegt.

Schlussfolgernd kann festgehalten werden, dass der heutige Stand der Technik in Bezug auf Verkapselungsmaterialien in der Leistungselektronik stark limitiert ist. Die oben beschriebenen Basismaterialien haben neben der elektrischen Isolationsfähigkeit keinen technisch relevanten Benefit. In Bezug auf die Thermik und Mechanik haben Silikone keinerlei positive Eigenschaften hinsichtlich des Einsatzes in leistungselektronischen Modulen. Epoxide erreichen den Status der Machbarkeit nur durch einen enormen Anteil an anorganischen Füllstoffen. Hierdurch werden durchaus akzeptable mechanische sowie thermische Eigenschaften erzeugt, die jedoch im Hinblick auf zukünftige Anwendungen stark limitiert sind.

Einen Lösungsansatz für das oben beschriebene Problem stellen anorganische Materialien, insbesondere Zemente, dar. Einerseits handelt es sich bei Zementen um sehr harte Materialien, welche den thermomechanischen Spannungen einer leistungselektronischen Baugruppe, ähnlich einem EMC, Stand halten sollten. Andererseits bestechen sie durch ihre exorbitant hohe Temperaturbeständigkeit jenseits von 1000°C [69]. Auch in Bezug auf die Wärmeleitfähigkeit bieten anorganische Materialien auf Grund ihrer kristallinen Struktur deutlich bessere Voraussetzungen.

Mit kommerziell erhältlichen Zementen werden ohne weitere Optimierungsmaßnahmen Wärmeleitfähigkeiten von bis zu 2,3 W/m·K erreicht [70]. Bestrebungen, die Wärmeleitfähigkeit derartiger Materialien zu optimieren, erzielen eine Wärmeleitfähigkeit von bis zu 8 W/m·K, ohne die allgemeine Verarbeitbarkeit zu beeinflussen [68]. Weiterhin besitzen Zemente einen passenden CTE in Bezug auf den Materialverbund des Systems Leistungsmodul.

Während die Basismaterialien der polymeren Verkapselungsmaterialien einen CTE zwischen 60 ppm/K und 200 ppm/K besitzen, haben anorganische Materialien einen CTE zwischen 4 ppm/K und 12 ppm/K [107] [69]. Unter Bezugnahme der CTEs der Materialien, die in einem Leistungsmodul vorkommen (z.B Si: 2,6 ppm/K, DCB: 6-7 ppm/K), wird klar, dass die thermische Ausdehnung anorganischer Materialien deutlich näher an der thermischen Ausdehnung der leistungselektronischen Baugruppe anzusiedeln ist.

All diese positiven Materialeigenschaften können mit Hilfe eines einfachen Schwerkraftvergusses, mit eventueller Unterstützung durch Vakuum, erzielt werden. Es werden demnach kein aufwendiger Prozess bzw. Werkzeuge benötigt. Anders als beim Stand der Technik, der lediglich in Bezug auf die elektrische Isolationsfähigkeit leistungsfähige Eigenschaften hervorbringt, handelt es sich bei Zementen bzw. anorganischen Materialien um multifunktionale Materialien. Neben der elektrischen Isolationsfähigkeit sind zusätzlich erstrebenswerte thermische sowie mechanische Eigenschaften inkludiert.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Bewertung der Anwendbarkeit anorganischer Verkapselungsmaterialien im leistungselektronischen Kontext. Da es sich bei Zementen um eine gänzlich neue Materialklasse in Bezug auf die Verkapselung von leistungselektronischen Komponenten handelt, gilt es zu evaluieren, ob derartige Werkstoffe die fragilen Strukturen, wie zum Beispiel die Halbleiter, negativ beeinflussen. Weiterhin sollen die Möglichkeiten und Effekte der erhöhten Wärmeleitfähigkeit in Bezug auf die Halbleitertemperatur anhand von neuartigen Modulkonzepten evaluiert werden. Um die genannten Ziele zu erreichen, werden zwei Arbeitshypothesen aufgestellt. Die erste postuliert, dass ein anorganisches Verkapselungsmaterial in einem Leistungsmodul anwendbar ist. Es gilt, dies anhand des Zustandes eines verkapselten Halbleiters unter verschiedenen Belastungsprofilen zu beweisen.

Auf Grund der hohen möglichen Wärmeleitfähigkeit anorganischer Materialien gilt es, die Auswirkungen derselbigen zu erfassen und zu evaluieren. Das Erschließen neuer thermischer Pfade innerhalb des Leistungsmoduls ist möglich, wodurch die Entwärmung des Halbleiters verbessert werden kann. Die daraus resultierende zweite Hypothese besagt, dass die vorgestellten neuartigen Modul- und Kühlkonzepte zu einer Senkung der Halbleitertemperatur führen und somit zu einer Vergrößerung der Lebensdauer beitragen.

Die Arbeitshypothesen werden in Kapitel 6 („Anwendbarkeit anorganischer Verkapselungsmaterialien“) und 7 („Erweiterte Modulkonzepte zur optimalen Entwärmung“) anhand von Simulationen und experimentellen Aufbauten evaluiert. Der Beweis der ersten Arbeitshypothese bildet die Grundlage für alle nachfolgenden Arbeiten. Für den Beweis der zweiten Arbeitshypothese werden mehrere Modulkonzepte konstruiert und sowohl simulativ als auch experimentell evaluiert. Abschließend werden die Ergebnisse der erweiterten Modulkonzepte mittels einer Lebensdauerprognose bewertet, wodurch der Beweis der zweiten Arbeitshypothese erbracht werden soll.

5 Methodik und Versuchsaufbauten

Zum Erreichen der in Kapitel 4 beschriebenen Zielstellung bedarf es einer Vielzahl von Simulationen sowie Experimenten. In den folgenden Kapiteln werden die eingesetzten Aufbauten und Methoden ausführlich beschrieben. Hierzu zählen die verwendeten Zuverlässigkeitsuntersuchungen sowie Material charakterisierende Experimente. Einleitend werden die in dieser Arbeit untersuchten Materialproben kurz beschrieben und klassifiziert. Weiterhin werden die verwendeten Simulationsmodelle und die dazugehörigen Parameter und Randbedingungen der Berechnung beschrieben.

5.1 Materialproben

Die in dieser Arbeit untersuchten Materialien können grundlegend in zwei Gruppen eingeteilt werden. Eine Gruppe bilden die Phosphatzemente (PZ). Die übrigen Massen können unter dem Begriff der „tonerde basierten Materialien“ zusammengefasst werden. Diese lassen sich wiederum in Tonerdezemente (TZ) und reaktive Tonerden (ReT) untergliedern.

Im Folgenden werden die verwendeten Materialien aufgeführt und kurz in ihren bekannten Eigenschaften beschrieben. Es ist anzumerken, dass es sich bei allen aufgeführten Materialien um Entwicklungsprodukte handelt, deren Entwicklung parallel zu der vorliegenden Arbeit durchgeführt worden ist. Aus diesem Grund liegen nicht für alle Materialien die gleichen Datensätze vor, da das betrachtete Material ggf. eine Weiterentwicklung eines zuvor untersuchten Materials darstellt. Eine Übersicht der Materialien kann der Tabelle 5.1 entnommen werden.

Der Sauereisen Zement Nr. 13 ist ein kommerziell erhältlicher Zement der Fa. Glassbond (NW) Limited, Saint Helens, UK. Dieser Zement wird in der konventionellen Applikation zum Isolieren von Thermoelementen und dem Vergießen von Sensoren verwendet. Dieses Material hat bereits in vorherigen Arbeiten [108] das Potential einer Anwendung in leistungselektronischen Baugruppen aufweisen können. In dieser Arbeit wird es hauptsächlich zur Referenzierung herangezogen.

Ein speziell für den Einsatz in Leistungsmodulen entwickeltes Material stellt das „Development Sample CemPack®“ (DSC) der Fa. Heraeus Deutschland GmbH & Co. KG, Hanau, dar. Bei diesem Zement handelt es sich um ein Entwicklungsmaterial, welches noch kein volles Qualifikationsstadium erreicht hat. Ein vorläufiges Datenblatt dieses Materials kann dem Anhang A.3.1 entnommen werden. Es ist anzumerken, dass die Materialien BI 4.3 und BI 6.12 frühere Entwicklungsstadien des Materials DSC darstellen.

Das Material CE 206 der Fa. Robert Bosch GmbH, Gerlingen-Schillerhöhe, ist eine reaktive Ton-

Tabelle 5.1: Übersicht der in dieser Arbeit verwendeten anorganischen Verkapselungsmaterialien

Bezeichnung	Kürzel	Art	Hersteller	Untersuchung
Sauereisen Zement Nr. 13	SE 13	PZ	Glassbond	Schertest
Beta-Iment 4.3	BI 4.3	PZ	Heraeus	Schertest
Beta-Iment 6.12	BI 6.12	PZ	Heraeus	HTRB el. Durchschlagsfestigkeit Schertest
Development Sample Cem-Pack®	DSC	PZ	Heraeus	PCT, Schertest
Tonerdezement 181	TZ 181	TZ	Bosch	Chemische Kompatibilität
Ceramic Encapsulation A	CE-A	ReT	Bosch	el. Durchschlagsfestigkeit
Ceramic Encapsulation B	CE-B	ReT	Bosch	el. Durchschlagsfestigkeit
Ceramic Encapsulation 202	CE 202	ReT	Bosch	Chemische Kompatibilität
Ceramic Encapsulation 206	CE 206	ReT	Bosch	Rth-Messung Zth-Messung

erde, welche auf Grund ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit von 3,8 W/m·K in allen thermischen Untersuchungen eingesetzt wird. Alle übrigen in Tabelle 5.1 aufgeführten Materialien der Fa. Bosch stellen jeweils ein früheres Entwicklungsstadium des genannten CE-206 dar.

Anhand der dargestellten Materialien gilt es die Anwendbarkeit anorganischer Vergussmassen in Bezug auf einen Einsatz als Verkapselungsmaterial für leistungselektronische Baugruppen zu bewerten (siehe Kapitel 6.2 und 6.3). Für die thermische Evaluation der vorgestellten neuartigen Modul- und Kühlkonzepte (siehe Kapitel 7) wird ausschließlich das Material CE-206 auf Grund seiner hohen Wärmeleitfähigkeit verwendet.

5.2 Heißperrdauertest (HTRB)

Der HTRB (**h**igh **t**emperature **r**everse **b**ias) ist ein Test, der sich im Wesentlichen auf die Sperrfähigkeit des Halbleiters bezieht. Weiterhin wird die Qualität der Passivierung sowie des Gateoxids überprüft. [13] Hierfür wird 80% der maximalen Sperrspannung V_{CE} des Bauteils (hier: IGBT) angelegt. Üblicherweise geschieht dies bei einer Umgebungstemperatur von 125°C. Heutzutage sind die eingesetzten Leistungshalbleiter jedoch deutlich robuster, so dass vermehrt eine Umgebungstemperatur angewendet wird, die der maximalen Sperrschichttemperatur des Halbleiters entspricht [109]. Während der Testdauer von 1000 h werden die auftretenden Leckströme kontinuierlich überwacht.

Tabelle 5.2: Versuchsparameter HTRB

Parameter	Zeichen	Wert	Einheit
Sperrspannung	U_{CE}	960	V
Gatespannung	U_{GE}	0	V
Sperrschichttemperatur	T_j	150	°C
Dauer	t	1000	h

Der in dieser Arbeit durchgeführte HTRB, wird nach IEC 60747 unter Verwendung eines HTRB 689 der Fa. Schuster Elektronik GmbH, Herzogenaurach, durchgeführt (siehe Abbildung 5.1). Die Versuchsparameter sind in Tabelle 5.2 aufgeführt.

Das verwendete Testvehikel bzw. DUT (**D**evice **U**nder **T**est) ist eine Einzelschalterbaugruppe der Fa. Siemens AG, München, dessen Aufbau aus einer DCB mit Kunststoffrahmen besteht (siehe Abbildung 5.2). Der verbaute Halbleiter ist ein 1200 V IGBT der Fa. Infineon Technologies AG, Neubiberg [110]. Vor und nach dem Test werden die statischen Parameter des Halbleiters aufgenommen und dokumentiert.

Zu den untersuchten statischen Parametern gehört der Kollektor-Emitter-Sperrstrom $I_{CE,S}$, der Gate-Leckstrom $I_{G,S}$ sowie die Threshold-Spannung $U_{GE(th)}$. Anhand dieser Kenngrößen wird die Funktionalität des Halbleiters bewertet. Nachdem die Teststunden abgelaufen sind, dürfen sich die Charakteristika nicht signifikant verändert haben. Die aufgenommenen Leckströme dürfen nur innerhalb definierter Grenzwerte steigen, welche in der Richtlinie AGQ 324 der ECPE festgehalten sind [109].

Konventionell wird dieser Test verwendet, um eine etwaige Kontamination der Passivierung durch metallische und andere Ionen zu detektieren. Unterstützt durch das angelegte elektrische Feld und

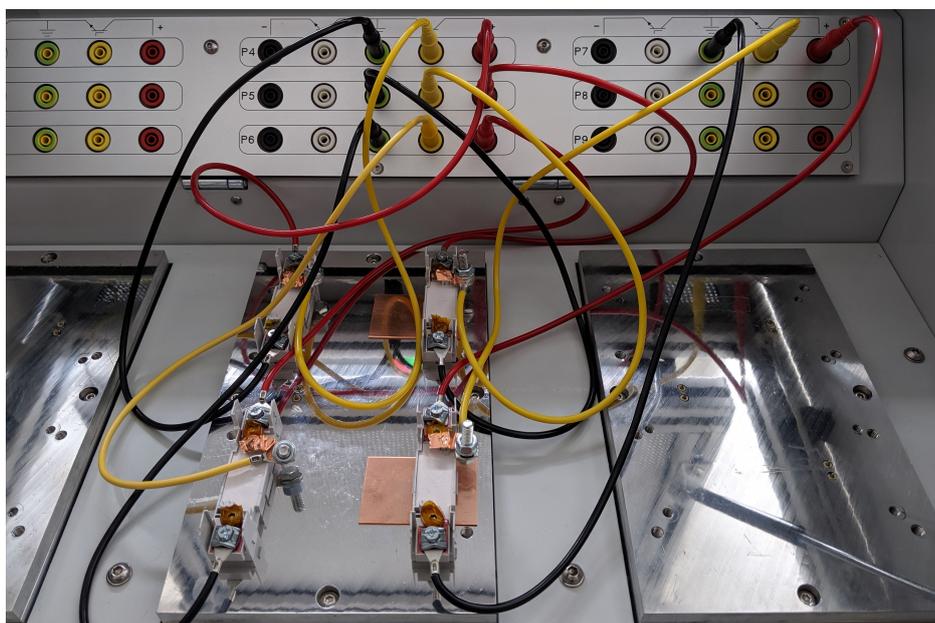


Abbildung 5.1: Prüflinge auf HTRB 689 Fa. Schuster Elektronik GmbH, Herzogenaurach

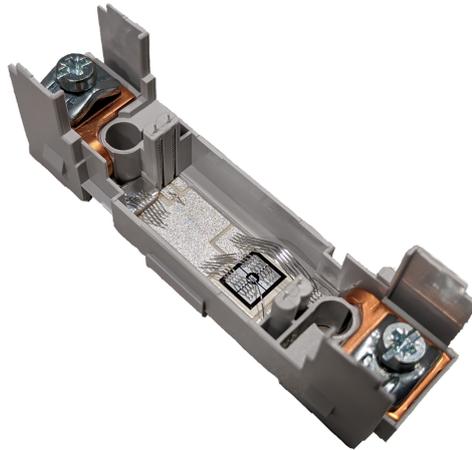


Abbildung 5.2: Testvehikel für den HTRB Fa. Siemens AG, München; DCB-Aufbau mit Kunststoffrahmen und einem Halbleiter

die erhöhte Temperatur, gewinnen diese Ionen an Mobilität, was zu Migration und Dendritenbildung führen kann. Diese Effekte wiederum können zu einem Kurzschluss führen und den Halbleiter zerstören [11].

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Test verwendet, um die elektrochemische Kompatibilität der anorganischen Vergussmasse mit den Materialien und Mikrostrukturen eines Leistungshalbleiters zu evaluieren. Ein Zement ist zu einem hohen Maß mit Ionen angereichert, da der Bindungsmechanismus, die Hydratation, auf diese angewiesen ist [111] [112]. Im ausgehärteten Zustand besitzen diese Ionen jedoch eine vernachlässigbar kleine Mobilität.

Es gilt demnach zu evaluieren, ob es eine Wechselwirkung der vorhandenen Ionen mit der Halbleiterstruktur gibt, die die Funktionalität des Halbleiters beeinträchtigen. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Kapitel 6.3.1 aufgeführt. Das verwendete Verkapselungsmaterial ist Beta-Zement 6.12 (siehe Kapitel 5.1).

5.3 Aktiver Lastwechseltest (PCT)

Die abschließende Untersuchung bezüglich der Anwendbarkeit anorganischer Verkapselungsmaterialien bildet ein aktiver Lastwechseltest (power cycling test). Beim **power cycling test** (PCT) werden die Halbleiter einer Baugruppe zyklisch belastet. Das bedeutet, dass ein definierter Laststrom für ein bestimmtes Zeitintervall (t_{on}) über den Halbleiter geleitet wird. Ist das Zeitintervall t_{on} vorüber, wird der Laststrom unterbrochen. In diesem Zeitraum fließt kein Strom über den Halbleiter (t_{off}). Diese Vorgänge werden periodisch wiederholt. Die Ergebnisgröße ist die Anzahl der Zyklen, die durchgeführt wurde, bis ein definiertes Abbruchkriterium erreicht worden ist.

Die Bezeichnung „aktiver“ Lastwechseltest bezieht sich auf die Tatsache, dass der Halbleiter, anders als bei passiven Tests, aktiv als Wärmequelle fungiert. Die während t_{on} entstehende Verlustleistung erhitzt den Chip sowie die umliegende Baugruppe. Hierbei wird eine definierte Maxi-

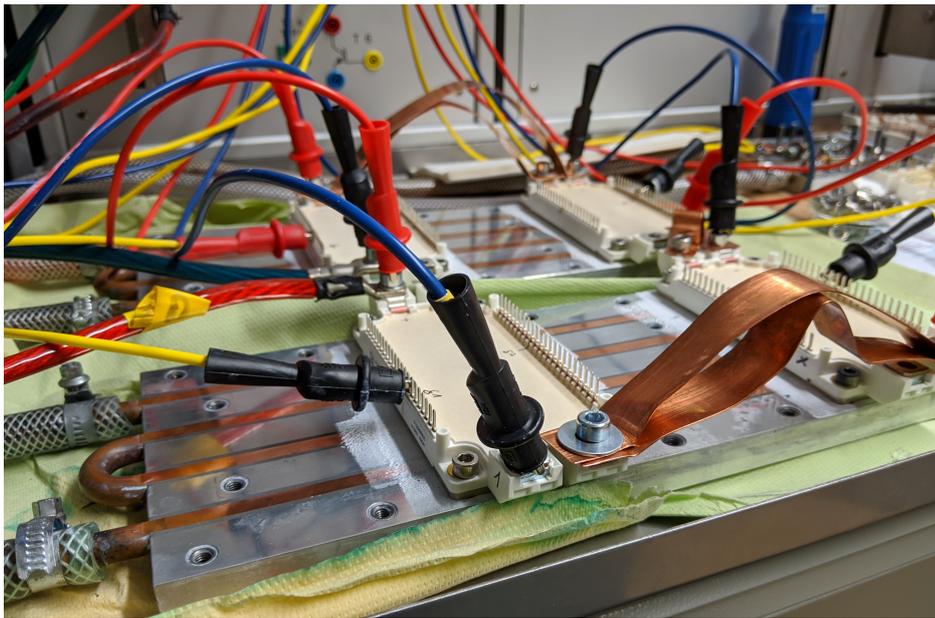


Abbildung 5.3: E3-Testvehikel auf cold plate am Lastwechselfestprüfstand

maltemperatur (T_{max}) angestrebt. Das Abschaltintervall t_{off} muss so lang gewählt werden, dass der Halbleiter wieder eine definierte Minimaltemperatur (T_{min}) erreicht. Die Differenz der beiden Extremwerte wird „Temperaturhub“ (ΔT) genannt. Sie ist einer der wichtigsten Parameter für diesen Zuverlässigkeitstest.

Es entsteht ein inhomogenes Temperaturfeld, das direkt an den realen Betrieb angelehnt ist. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse eines power cyclings zur Lebensdauerabschätzung herangezogen. Es wird zwischen „fast power cycling“ (PC_{sec}) und „slow power cycling“ (PC_{min}) unterschieden. Bei einem PC_{sec} wird eine $t_{on} < 5$ s angewendet. Hierdurch kommt es zu einer lokalen Ausprägung der Verlustwärme, wodurch lediglich die chipnahe Aufbau- und Verbindungstechnik (die-attach, top-side Kontaktierung) beansprucht wird [109].

Ein PC_{min} hat eine $t_{on} > 15$ s, wodurch sich das durch Verlustleistung entstehende Temperaturfeld weitläufiger innerhalb der Baugruppe ausprägt. Es erreicht, bezogen auf den thermischen Stapel, deutlich tiefer gelegene Schichten des Aufbaus. So wird hierbei die chipnahe sowie -ferne Aufbau- und Verbindungstechnik, wie zum Beispiel das Systemlot, beansprucht [109]. Da sich die vorliegende Untersuchung auf die Anwendbarkeit anorganischer Verkapselungsmaterialien und deren Wechselwirkungen mit Leistungshalbleitern fokussiert, hat der PC_{min} keine Relevanz und soll fortan nicht beachtet werden.

Der in dieser Arbeit durchgeführte PC_{sec} wird unter Verwendung eines TLW723 Testsystems für Lastwechselfestigkeit der Fa. Schuster Elektronik GmbH, Herzogenaurach, durchgeführt. Das Testvehikel besteht aus einem Rahmenmodul Typ E3 der Fa. Danfoss Silicon Power GmbH, Flensburg, welches hinsichtlich der Aufbau- und Verbindungstechnik dem Stand der Technik entspricht. Die Module werden auf einem „cold-plate“-Kühler montiert, um die entstehende Verlustwärme ableiten zu können (siehe Abbildung 5.3).

Das verwendete Verkapselungsmaterial ist das DSC der Fa. Heraeus Deutschland GmbH & Co.

Tabelle 5.3: Versuchsparameter PCT

Parameter	Zeichen	Wert	Einheit
Temperaturhub	ΔT	130	K
Maximaltemperatur	T_{max}	150	°C
Minimaltemperatur	T_{min}	20	°C
aktiver Intervall	t_{on}	1	s
inaktiver Intervall	t_{off}	8	s
Laststrom	I_L	100	A

KG, Hanau (siehe Kapitel 5.1). Die Referenz bilden Module, die mit einem handelsüblichen Silikon der Fa. Momentive Performance Materials GmbH, Leverkusen, verkapselt sind. Da es sich bei dieser Verkapselung um eine gänzlich neue Materialklasse im Bereich der Leistungselektronik handelt, wird kein konventionelles Abbruchkriterium auf Grundlage eines prozentualen Anstiegs einer thermischen oder elektrischen Kenngröße gewählt. Es ist unklar, wie sich die Prüflinge in Kombination mit der hier untersuchten Vergussmasse verhalten. Aus diesem Grund wird eine liberale Abbruchbedingung gewählt. Sie wird so definiert, dass ein Prüfling erst als defekt gilt, wenn kein Strom mehr über den Halbleiter fließen kann. Die Parameter des durchgeführten aktiven Lastwechseltests sind in Tabelle 5.3 aufgeführt.

Dieser Test hat bezüglich der Anwendbarkeit anorganischer Verkapselungsmaterialien eine hohe Relevanz. Er kann als eine Art Summentest betrachtet werden, welcher eine Evaluation nahezu aller grundlegenden Materialeigenschaften (siehe Kapitel 6.2) vereint. Anders als ein Silikon-Weichverguss, der eine elastoplastische Verbindung mit der darunter liegenden Baugruppe eingeht, bildet ein Zement eine starre Verbindung zweier Festkörper. Für die Funktionalität der Leistungsbaugruppe ist es von kritischer Bedeutung, dass dieser mechanische Verbund intakt bleibt.

Kommt es zu einem Defekt innerhalb der Verkapselung (Lunker, Riss), ist die Baugruppe zerstört. Thermomechanische Spannungen müssen durch einen angepassten CTE minimiert werden, während die weiterhin auftretenden Spannungen durch den Vergusskörper aufgenommen werden müssen. Zudem muss die Haftung zu Funktionsoberflächen so hoch sein, dass die nicht durch thermomechanische Spannungen kompromittiert wird. Jegliche Form von Delamination des Verkapselungsmaterials führt ebenfalls zur Zerstörung der Baugruppe. All diese mechanischen Interaktionen werden durch das power cycling geprüft. Ist eine der oben genannten Eigenschaften nicht hinreichend ausgeprägt, wird das Verkapselungsmaterial keine zufriedenstellende Zyklenzahl erreichen.

Die erreichten Zyklenzahlen des anorganischen Verkapselungsmaterials werden mit den erreichten Zyklenzahlen eines Referenzmoduls verglichen, um eine Bewertungsgrundlage zu erzeugen. Die herangezogene Referenz ist ein baugleiches Rahmenmodul mit Silikon-Weichverguss als Verkapselungsmaterial. Die übrige Aufbau- und Verbindungstechnik ist bei allen eingesetzten Modulen identisch. Die Ergebnisse sind in Kapitel 6.3.2 zu finden.

5.4 R_{th} -Messung

Die thermische Leistungsfähigkeit der in dieser Arbeit entwickelten neuartigen Modulkonzepte soll experimentell erfasst und mit einer Simulation verglichen werden. Auf diesem Weg soll das verwendete Simulationsmodell hinsichtlich seiner Prognosefähigkeit evaluiert werden. Zur experimentellen Evaluation wird eine R_{th} -Messung durchgeführt, für die ein eigener Prüfstand konzipiert worden ist. Der R_{th} -Prüfstand besteht aus drei zentralen Komponenten, welche in Abbildung 5.4 dargestellt sind.

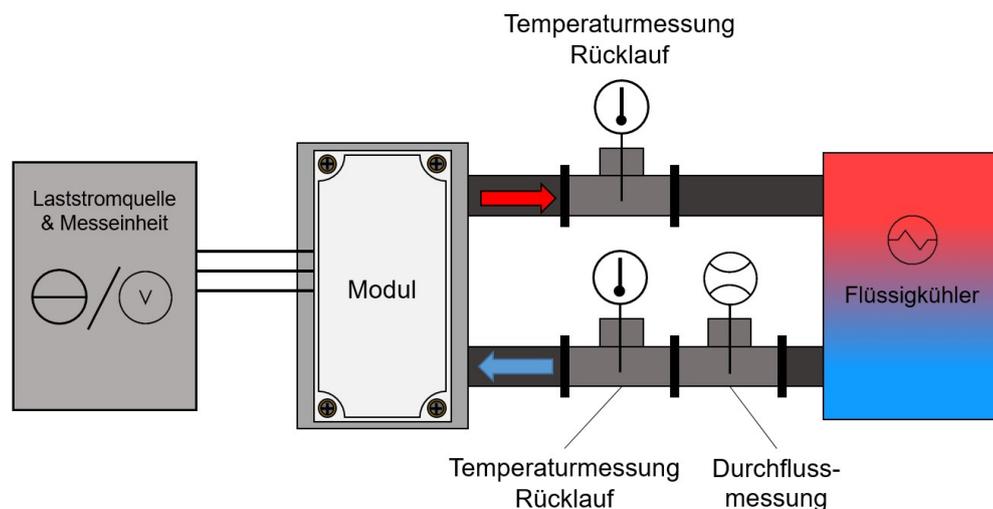


Abbildung 5.4: Schematische Darstellung des R_{th} -Prüfstandes

Die zentralen Komponenten des Prüfstandes sind der Wärmetauscher, das zu untersuchende Modul auf einem Direktwasserkühler und die Messeinheit inklusive Laststromquelle. Die Sperrschichttemperatur des Halbleiters innerhalb des Moduls wird über die V_{CE} -Methode bestimmt. Der gemessene Spannungsabfall bei definiertem Messstrom wird von der Messeinheit erfasst und ausgewertet. Die Zu- und Rücklauftemperatur des Kühlmediums wird mit Hilfe von integrierten Thermoelementen Typ K erfasst, welche im Vorfeld kalibriert werden [113]. Unter Berücksichtigung der eingepprägten Verlustleistung und der genannten Messgrößen kann mit Hilfe der Formel 5.1 bzw. 5.4 der $R_{th,ja}$ des Moduls bestimmt werden.

$$R_{th,ja} = \frac{\Delta T}{P_v} \quad (5.1)$$

mit

$$\Delta T = T_j - T_{amb} \quad (5.2)$$

und

$$T_{amb} = \frac{T_{Zulaufl} + T_{Rücklauf}}{2} \quad (5.3)$$

$$R_{th,ja} = \frac{T_j - \frac{T_{Zulaufl} + T_{Rücklauf}}{2}}{P_v} \quad (5.4)$$

Die Messeinheit mit Laststromquelle wird mit Hilfe eines Lastwechselstands TLW723 der Fa. Schuster Elektronik realisiert. Der Laststrom wird über eine Dauer von 5 min in das Modul eingepreßt, um sicherzustellen, dass sich die Temperatur in der Baugruppe eingeschwungen hat und somit ein stationäres Temperaturfeld vorliegt. Nach dem Abschalten des Laststromes erfolgt die Spannungsmessung über der Kollektor-Emitter-Strecke des IGBTs.

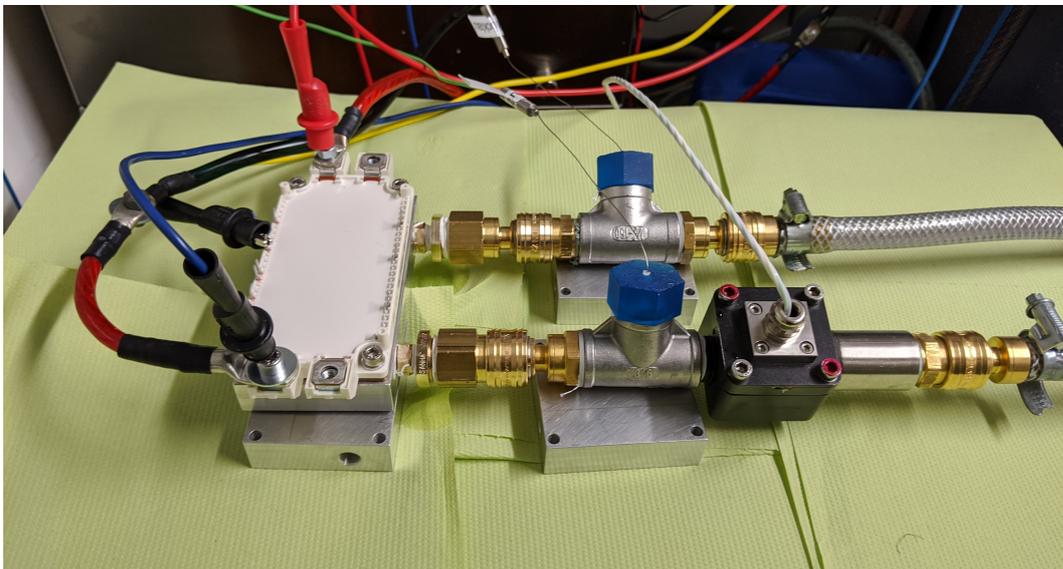


Abbildung 5.5: R_{th} -Prüfstand mit E3-Modul; reduzierte Anzahl an Messleitungen

Zwischen dem Abschalten des Laststromes und dem Einschalten des Messstromes von 100 mA ist eine definierte Totzeit von 40 μ s angesetzt. Diese ist erforderlich, um den Rippel der Spannungsmessung, welcher durch den Schaltvorgang entsteht, zeitlich zu überbrücken. Hierdurch wird sichergestellt, dass die Spannungs- und dementsprechend die Temperaturmessung nicht durch den Schaltvorgang verfälscht wird.

Der Wärmetauscher ist ein Kühler der Fa. Huber Kältemaschinenbau AG, Offenburg. Dieser wird über ein Schlauchsystem mit dem Prüfstand verbunden (siehe Abbildung 5.5). Die erforderlichen Eingangsgrößen, Kühlmitteltemperatur und Pumpenleistung werden an dem Gerät parametrisiert. Sowohl die Referenz als auch das neuartige Modulkonzept werden mit jeweils drei unterschiedlichen Belastungskonfigurationen hinsichtlich des $R_{th,ja}$ vermessen. Das erste Belastungsprofil sieht vor, dass nur ein einzelner Halbleiter belastet wird, während das zweite Lastprofil ein Einprägen der Last in zwei Halbleiter des Moduls vorsieht. Es handelt sich hierbei um zwei IGBTs auf einem Substrat, die in Reihe geschaltet sind. Ein drittes Lastprofil sieht vor, dass alle aktiven Halbleiter des Moduls bestromt werden. Das Simulationsmodell soll anhand dieser Konfigurationen evaluiert werden. Die Konfigurationen sind so gewählt, dass ein möglichst großer Stufenunterschied hinsichtlich der eingepprägten Verlustleistung erzeugt wird. Hierdurch wird die Präzision des Simulationsmodells hervorgehoben.

5.5 Z_{th} -Messung

Zur experimentellen Verifikation des minimalinvasiven Ansatzes zur Optimierung der Modulentwärmung (siehe Kapitel 7.2) ist eine Erfassung des statischen thermischen Widerstandes R_{th} nicht ausreichend. Um die Wirksamkeit dieses Modulkonzeptes zu evaluieren, muss das transiente Verhalten analysiert werden. Aus diesem Grund wird hierfür eine Messung der thermischen Impedanz (Z_{th}) durchgeführt.

Das Ziel dieser Messung ist es, die Auswirkungen des neuartigen Modulkonzeptes auf den thermisch transienten Widerstand Z_{th} zu erfassen. Hiermit soll die Wirksamkeit des neu implementierten thermischen Pfades evaluiert werden. Gleichmaßen wird anhand der Messung das Simulationsmodell verifiziert, auf Grundlage dessen das neuartige Modulkonzept entwickelt worden ist.

Das zu untersuchende Modul wird hierfür auf einem cold plate-Kühler montiert. Das Erfassen der Z_{th} -Kurve erfolgt hierbei nicht, wie häufig praktiziert, über das Invertieren einer Abkühlkurve. In diesem Experiment wird das reale Aufheizverhalten der Baugruppe abgebildet. Hierfür wird eine kumulative Z_{th} -Kurve aufgenommen.

Das untersuchte Testvehikel besteht aus einem Rahmenmodul der Fa. Danfoss Silicon Power GmbH, Flensburg (siehe Abbildung 5.6). Hierbei handelt es sich um ein E1 Bodenplattenmodul mit 600 V IGBTs und einer Aufbau- und Verbindungstechnik, die dem industriellen Standard entspricht (Al-Bonddrähte, Chiplot, Systemlot)(siehe Abbildung 2.3). Besagtes Testvehikel bildet die Basis bzw. Referenz für den minimalinvasiven Ansatz zur Optimierung der Modulentwärmung.

Die Hauptmessaufgabe liegt hierbei in der Bestimmung der Halbleitertemperatur T_j . Da alle un-

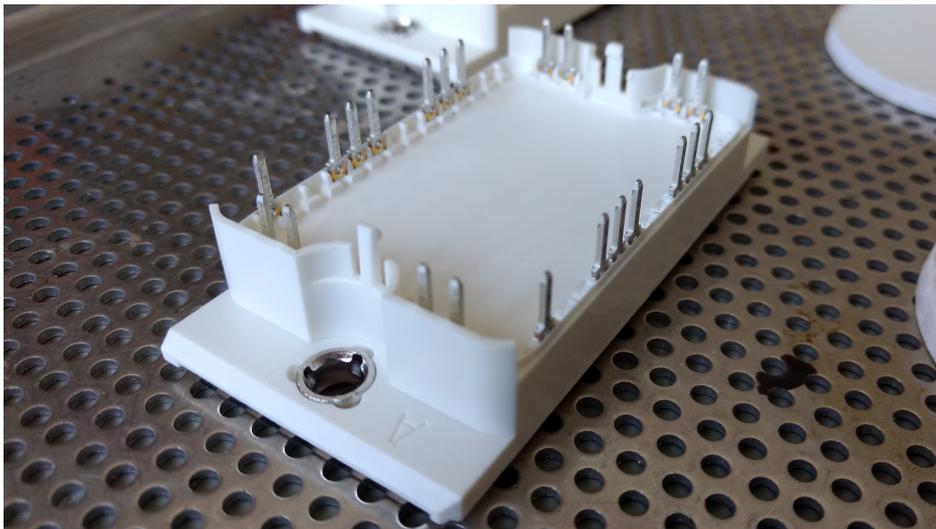


Abbildung 5.6: Testvehikel Z_{th} -Messung: E1-Rahmenmodul gefüllt mit anorganischem Verkapselungsmaterial

tersuchten Prüflinge verkapselt sind, ist eine direkte Bestimmung der Halbleitertemperatur über Thermografie nicht möglich. Folglich muss die Zielgröße über eine Hilfsgröße ermittelt werden. In diesem Experiment wird die V_{CE} -Methode verwendet. Bei dieser Methode wird die Halbleitertemperatur T_j über eine elektrische Zwischengröße bestimmt. Die über dem Halbleiter abfallende Spannung U_{CE} besitzt eine lineare Abhängigkeit der Sperrschichttemperatur T_j bei einem definierten Messstrom. Dieser ist möglichst klein zu wählen, da es ansonsten zu einer Eigenerwärmung auf Grund von eingepprägter Verlustleistung kommen kann. Diese Methode ist nur auf IGBTs anwendbar.

Da die oben beschriebene Temperaturabhängigkeit auf Grund fertigungstechnischer Toleranzen von Bauteil zu Bauteil variiert, muss jeder zu untersuchende Halbleiter kalibriert werden. Hierfür werden die Bauteile mittels Ofen einer definierten Temperatur ausgesetzt. Die Spannung U_{CE} wird bei unterschiedlichen Temperaturen aufgenommen. So kann für jedes Bauteil eine U_{CE} -Kennlinie erzeugt werden, auf die bei der späteren Temperaturmessung zurückgegriffen werden kann.

Zur Bestimmung der Halbleitertemperatur über die V_{CE} -Methode wird die messtechnische Kulisse eines TLW723 Testsystems für Lastwechselfestigkeit der Fa. Schuster Elektronik GmbH, Herzogenaurach, verwendet. Der verwendete Laststrom und dessen Steuerung wird ebenfalls von diesem Testsystem bereitgestellt. Die Abfolge der Last- und Messstromintervalle erfolgt äquivalent zu einem konventionellen Lastwechsel (siehe Kapitel 5.3). Hier erfolgt jedoch eine Pulsweitenmodulation (PWM) des Lastpulses.

Während bei einem Lastwechseltest mit einer festen Einschalt- und einer festen Ausschaltzeit (t_{on} und t_{off}) gearbeitet wird, wird für die Z_{th} -Messung die Dauer von t_{on} variiert. Das TLW723 Testsystem wird so angepasst, dass eine t_{on} von 200 ms möglich ist. Dies ist das kleinstmögliche Last- und Messintervall, das dieses System abbilden kann. Das t_{on} wird über den Verlauf der Messung iterativ vergrößert, so dass eine Vielzahl von Messpunkten zwischen 0,2 s und 1000 s generiert wird. Das inaktive Intervall t_{off} , in dem kein Strom fließt und die Testgruppe abkühlt, wird so gewählt,

dass die Dauer möglichst groß ist. Dies stellt das vollständige Abkühlen des Aufbaus sicher, um bei jedem Messintervall gleiche Randbedingungen gewährleisten zu können. Das inaktive Intervall t_{off} hat eine Dauer von 300 s.

Neben elektrischen Größen erfasst der Versuchsaufbau auch direkt thermische Größen. Die Umgebungstemperatur im direkten Umfeld des Prüflings wird aufgenommen und dokumentiert. Die Umgebungstemperatur dient als Eingangsgröße für die thermische Simulation, um ein möglichst genaues Abbild der Gegebenheiten des Versuchsstandes erzeugen zu können.

5.6 Simulationsmodell zur Analyse des Einflusses der Wärmeleitfähigkeit

Für die Analyse des thermischen Widerstandes in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Verkapselungsmaterials (siehe Kapitel 7.1) wird ein Simulationsmodell in Form eines E3 Rahmenmoduls erstellt.

Das Modul beinhaltet drei DCBs, welche mittels Systemlötung auf einer 3 mm starken Cu Bodenplatte montiert sind (siehe Abbildung 5.7). Das Layout der Schaltungsträger ist arbiträr, entspricht im Wesentlichen allerdings einer Halbbrückenschaltung. Die Halbleiter in diesem Modell sind un-terseitig mit einer NTV-Verbindung kontaktiert, während die oberseitige Kontaktierung mit Hilfe von 400 μm Aluminiumbonddrähten hergestellt wird. Die Aufbau- und Verbindungstechnik dieses Vehikels für diese Studie entspricht (mit Ausnahme der NTV-Verbindung) damit dem industriellen Standard.

Bei der vorliegenden Studie handelt es sich um eine sogenannte interne Studie. Das bedeutet, dass nur die Wärmeleitung (Konduktion) in Festkörpern berücksichtigt wird. Hierbei werden die Grenzen des Systems und dementsprechend die jeweiligen Übergänge mit Hilfe von mehreren Wärmeübergangskoeffizienten h beschrieben. Konkret erhält die Unterseite der Bodenplatte des

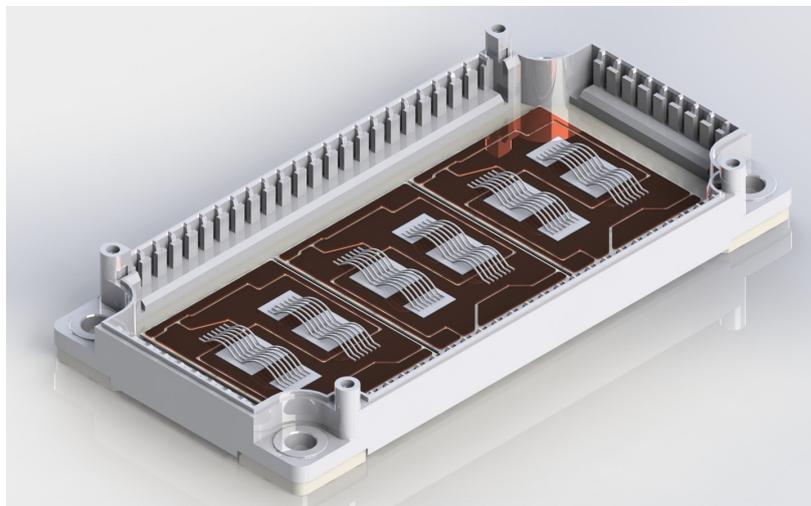


Abbildung 5.7: Simulationsmodell in Form eines E3-Rahmenmoduls; Verguss und Deckel nicht dargestellt

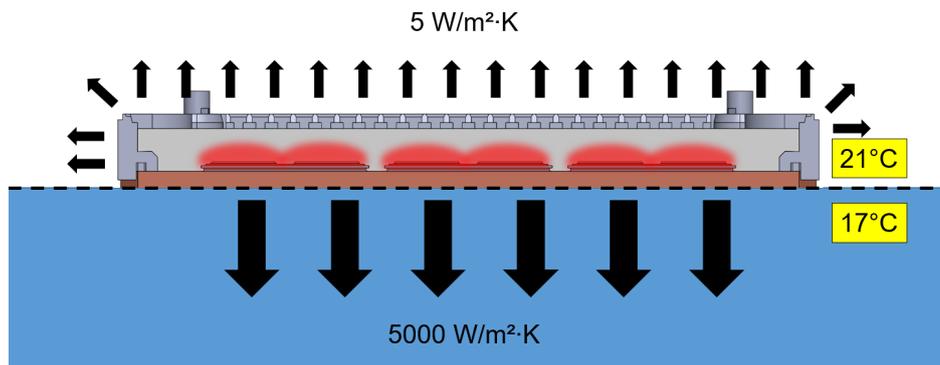


Abbildung 5.8: Schematische Schnittansicht und Darstellung der Randbedingungen der Simulation zur Analyse des Einflusses der Wärmeleitfähigkeit

Moduls, wo in der Realität ein Wasserkühler sitzt, einen Wärmeübergangskoeffizienten h von $5000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Dies entspricht dem h einer direkten turbulenten Wasserkühlung, wie z. B. einer Shower-Power Kühlung der Fa. Danfoss Silicon Power GmbH (siehe Kapitel 3.2.3). Es ist anzumerken, dass es sich bei diesem Vorgehen um die Betrachtung einer idealisierten Kühlung mit konstanter Kühlmitteltemperatur $T_{amb} = 17^\circ\text{C}$ handelt. Alle übrigen Oberflächen des Modells erhalten einen Wärmeübergangskoeffizienten von $5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ (siehe Abbildung 5.8). Dies entspricht einer unforcierten Luftkühlung durch Konvektion [82].

Die Halbleiter innerhalb des Moduls werden mit einer Verlustleistungsdichte von 2 W/mm^2 beaufschlagt. Es kommen Halbleiter mit einer Fläche von $122,77 \text{ mm}^2$ zum Einsatz. Die eingeprägte Verlustleistung pro Halbleiter entspricht demnach $245,54 \text{ W}$. Die Berechnung erfolgt transient in einem Zeitbereich von $0,001 \text{ s}$ bis 1000 s . Die Wärmeleitfähigkeit des Verkapselungsmaterials wird hierbei über den Verlauf der Studie erhöht. Beginnend bei $0,17 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, was der thermischen Leitfähigkeit eines Silikon-Weichvergusses entspricht [42], wird die Wärmeleitfähigkeit über 3 und $5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ bis hin zu $10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ erhöht. Die Berechnungen werden mit Hilfe der CFD-Software FloEFD, Fa. Mentor Graphics Corporation, Wilsonville, durchgeführt.

5.7 Simulationsmodell zur Analyse des maximalinvasiven Modulansatzes

Die in Kapitel 7.3 untersuchten Modulvarianten werden in einer externen CFD-Simulation (computational fluid dynamics) analysiert. Grundlage für die Modelle sind die geometrischen Körper der Leistungsmodule. Sowohl die Referenz, welche auf einem E3-Modul basiert, als auch der neuartige Modulansatz werden in all ihren geometrischen Abmessungen, Komponenten und Materialien dem realen Pendant nachempfunden. Weiterhin wird der für den experimentellen Nachweis (siehe Kapitel 7.3.4) verwendete Kühler gleichermaßen in den Simulationsmodellen implementiert.

Da es sich bei der durchgeführten Studie um eine externe Simulation handelt, bezieht sich der Berechnungsraum nicht ausschließlich auf die Festkörper in den vorhandenen Modellen. Es wird

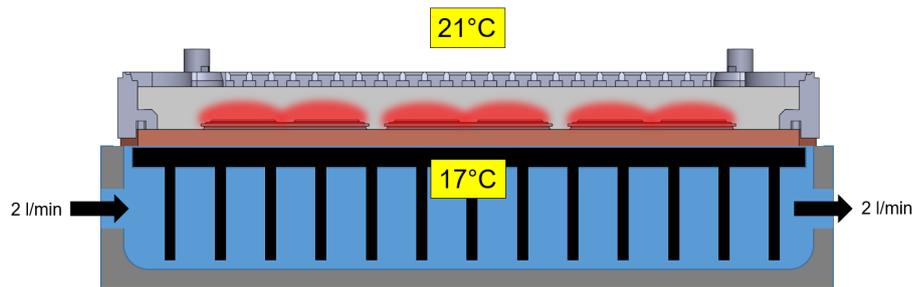


Abbildung 5.9: Schematische Schnittansicht und Darstellung der Randbedingungen der Simulation zur Analyse des maximalinvasiven Modulansatzes

ein Berechnungsraum definiert, der neben den Leistungsmodulen und den dazugehörigen Direktwasserkühlern auch einen Teil der Umgebung abbildet. Hierdurch können Umweltgrößen, wie die Temperatur und Luftströmung in die Berechnungen einbezogen werden.

Die Simulationsmodelle beinhalten die Wärmetransportmechanismen Konduktion und Konvektion. Wärmestrahlung wird aus Gründen der in Kapitel 3.1.3 beschriebenen Vernachlässigbarkeit ausgeschlossen. Weiterhin wird das Joulsche Heizen implementiert. Hierdurch wird sichergestellt, dass der elektrische Stromfluss und die dazugehörige Erwärmung stromdurchflossener Materialien realitätsgetreu abgebildet werden kann.

Die Eingangsparameter der Simulation werden für beide Module gleichermaßen dimensioniert. Das Kühlmedium wird mit einem Volumenstrom Q von 2 l/min gefördert und hat eine Temperatur von 17°C (siehe Abbildung 5.9). Die Module werden mit einem Gesamtstrom von 300 A beaufschlagt, was auf Grund der schaltungstechnischen Topologie des Moduls dazu führt, dass jeder Halbleiter von einem Strom von 100 A durchflossen wird. Zusätzlich werden die Halbleiter mit einer Oberflächenquelle beaufschlagt, um die im Halbleiter entstehende Verlustleistung abzubilden. Es wird eine Verlustleistungsdichte von 1,3 W/mm² eingepreist, welche auf alle Halbleiter in den Modulen angewendet wird. Beide Module erhalten das Komposit CE-206 der Fa. Robert Bosch GmbH, Gerlingen-Schillerhöhe, mit einer Wärmeleitfähigkeit von 3,8 W/m·K als Verkapselungsmaterial (siehe Kapitel 5.1). Die Umgebungstemperatur beträgt in beiden Modellen 21°C.

5.8 Simulationsmodell zur Analyse des CTE

In Kapitel 6.2 werden verschiedene Eigenschaften anorganischer Verkapselungsmaterialien hinsichtlich der Anwendbarkeit in einem Leistungsmodul untersucht. Unter anderem wird der CTE der Vergussmasse betrachtet. Um zu evaluieren, wie groß der CTE eines Verkapselungsmaterials sein sollte, um als funktional bewertet werden zu können, werden mechanische FEM-Simulationen zu Hilfe genommen.

Anhand eines exemplarischen Aufbaus einer leistungselektronischen Baugruppe werden mechanische Simulationen durchgeführt. Das verwendete Modell ist in Abbildung 5.10 abgebildet. Es handelt sich bei der vorliegenden Materialkomposition um einen Ausschnitt eines Rahmenmoduls

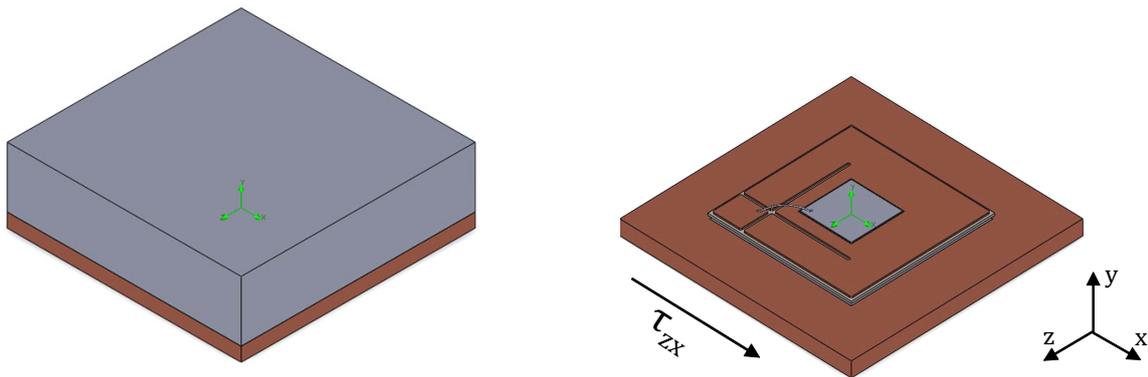


Abbildung 5.10: CAD-Modell der mechanischen Simulation; links: Vollständig, rechts: Ohne Verkapselungsmaterial

mit Bodenplatte (siehe Abbildung 5.11). Das Verkapselungsmaterial wird in seiner linearen thermischen Ausdehnung variiert. Hierbei wird ein Bereich von 1 bis 15 ppm/K mit einer Schrittweite von 1 ppm/K abgebildet.

Die Basis der mechanischen Simulation bilden thermische Berechnungen. Diese werden durchgeführt, um ein realistisches Temperaturfeld mit den dazugehörigen Extremwerten und Gradienten innerhalb der Baugruppe abbilden zu können. Es wird eine Sperrschichttemperatur T_j von 150°C erzeugt. Die mechanische Simulation verwendet diese Informationen, um die entstehenden mechanischen Verformungen und Spannungen zu ermitteln. Die Bewertungskriterien sind hierbei die Von-Mises-Vergleichspannung $\sigma_{v,M}$ sowie die Schub-/Scherspannung in X-Richtung (τ_{zx}). Alle Spannungen beziehen sich auf die Halbleiteroberfläche.

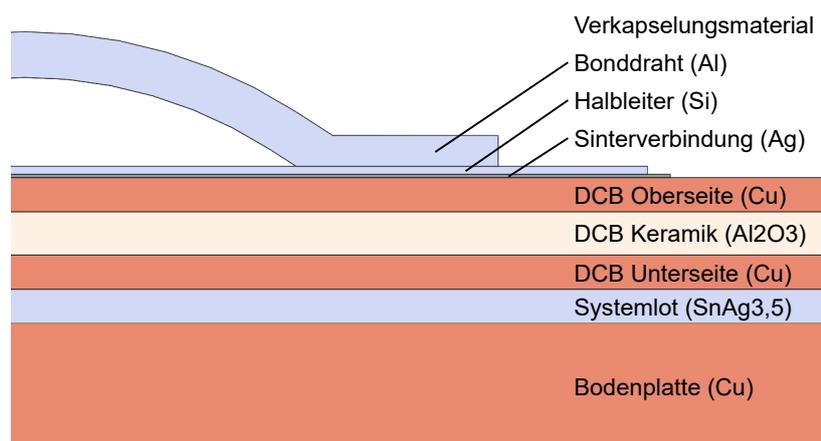


Abbildung 5.11: Schnittdarstellung des CAD-Modells der mechanischen Simulation mit Bezeichnung verwendeter Materialien

5.9 Elektrische Durchschlagsfestigkeit

Für die Verkapselung von leistungselektronischen Baugruppen sind die dielektrischen Eigenschaften des Vergussmaterials von entscheidender Bedeutung. Die in Kapitel 4 skizzierte Multifunktionalität hat im Vergleich zwischen Polymeren und anorganischen Verkapselungsmaterialien die Fähigkeit der elektrischen Isolation als kleinsten gemeinsamen Nenner. Die Basisfunktion einer leistungselektronischen Verkapselung ist die elektrische Isolationsfähigkeit, welcher ein anorganisches Material zwingend genüge tun muss.

In der vorliegenden Arbeit werden die dielektrischen Eigenschaften anhand einer Bestimmung der elektrischen Durchschlagsfestigkeit bewertet. Die Durchschlagsfestigkeit E_d beschreibt die elektrische Feldstärke E_0 , die es benötigt, um einen Spannungsdurchschlag in einer Materialprobe hervorzurufen. Sie wird in kV/cm oder kV/mm angegeben [114].

$$E_d = \frac{U_d}{d} \quad [\text{kV/mm}] \quad (5.5)$$

Die Durchschlagsfestigkeit einer Materialprobe wird über den Quotienten der angelegten Spannung zum Zeitpunkt des elektrischen Durchschlags U_d und der vorliegenden Materialstärke d bestimmt (siehe Gleichung 5.5).

Der verwendete Versuchsaufbau besteht aus zwei zylindrischen Elektroden, welche in einem Ölbad gelagert sind. Die zu untersuchende Materialprobe wird zwischen den beiden Elektroden platziert (siehe Abbildung 5.12). Das eingesetzte Isolationsöl ist notwendig, um einen elektrischen Überschlag über die Luft bzw. die Oberfläche der Materialprobe zu verhindern. Um eine valide Aussage über die dielektrischen Eigenschaften des Materials formulieren zu können, muss der Durchschlag durch die Materialprobe verlaufen.

Die Elektroden sind mit einem Wechselstrom-Generator verbunden. Dieser erhöht die angelegte 50 Hz Spannung mit einer definierten Rate von 500 V/s. Parallel wird der über die Elektroden fließende Strom gemessen und beobachtet. Kommt es zu einem Materialdurchschlag, steigt der Strom rapide an. Die Spannung wird abgeschaltet und die maximal erreichte Spannung zum Zeitpunkt des Durchschlages wird dokumentiert. Über die Stärke der Materialprobe kann mit Hilfe dieser Spannung unter Verwendung von Gleichung 5.5 die elektrische Durchschlagsfestigkeit des Materials bestimmt werden.

Um hinreichende dielektrische Eigenschaften für eine leistungselektronische Applikation aufzuweisen, müssen die untersuchten Materialproben mindestens eine Durchschlagsfestigkeit von 5 kV/mm erzielen. Diese Anforderung beruht auf einem Fallbeispiel eines gängigen Leistungshalbleiters. Es handelt sich hierbei um einen 1200 V IGBT der Fa. Infineon Technologies AG, Neubiberg [110].

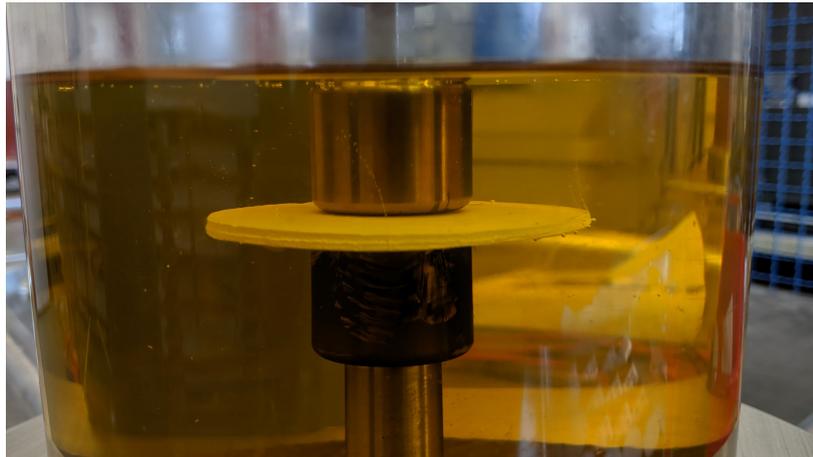


Abbildung 5.12: Materialprobe eines anorganischen Verkapselungsmaterials zwischen Prüfelektroden im Ölbad zur Bestimmung der elektrischen Durchschlagsfestigkeit

Bei einer maximalen Sperrspannung von 1200 V und einer Isolationsstrecke von 370 μm (120 μm Chipdicke + 250 μm guard Ring) ist eine Durchschlagsfestigkeit von mindestens 3,24 kV/mm erforderlich. Wird diese Mindestanforderung mit einem Sicherheitsfaktor von 1,5 beaufschlagt und eine gewisse Streuung hinsichtlich der Messmethodik berücksichtigt, resultiert dies in einer erforderlichen Durchschlagsfestigkeit von 5 kV/mm. Ein anorganisches Material muss mindestens eine derart hohe Durchschlagsfestigkeit aufweisen, um für den Einsatz in einem leistungselektronischen Modul grundlegend geeignet zu sein.

5.10 Schertest

Die Haftung von anorganischen Verkapselungsmaterialien auf Funktionsoberflächen leistungselektronischer Module wird mit Hilfe eines Schertests ermittelt. Die Zielgröße dieser Untersuchung ist die Haftfestigkeit auf besagter Oberfläche. Diese wird durch die vorliegende Scherkraft bei Versagen der Verbindung, bezogen auf die vorliegende Fläche, definiert. Generell ist festzuhalten, dass eine hohe Haftfestigkeit erstrebenswert ist. Je höher die Haftfestigkeit, desto höher kann die Robustheit des Modul eingestuft werden, da auftretende thermomechanische Verspannungen besser von der Verkapselung aufgenommen bzw. kompensiert werden können.

Der Schertest wird konventionell dafür eingesetzt, die Verbindungsqualität von Halbleiterbauelementen zum jeweiligen Substrat zu bewerten. Hierbei wird ein sogenannter Schermeißel seitlich gegen das Prüfgut (Halbleiter) gefahren (siehe Abbildung 5.13). Die auftretende Scherkraft zwischen Halbleiter und Substrat nimmt zu, bis es zu einem Versagen der Verbindung kommt. Es werden sowohl die maximal vorliegende Scherkraft als auch die erzeugte Bruchart (Kohäsiv-, Adäsiv- oder Mischbruch) dokumentiert. Die ermittelte Scherkraft wird über die effektive Fläche der Verbindung zu einer probenunabhängigen Haftfestigkeit normiert.

Für die Analyse der Eigenschaften anorganischer Verkapselungsmaterialien wird dieser Test leicht abgewandelt. Mittels quaderförmiger Zementkörper, welche auf einer unstrukturierten DCB mit

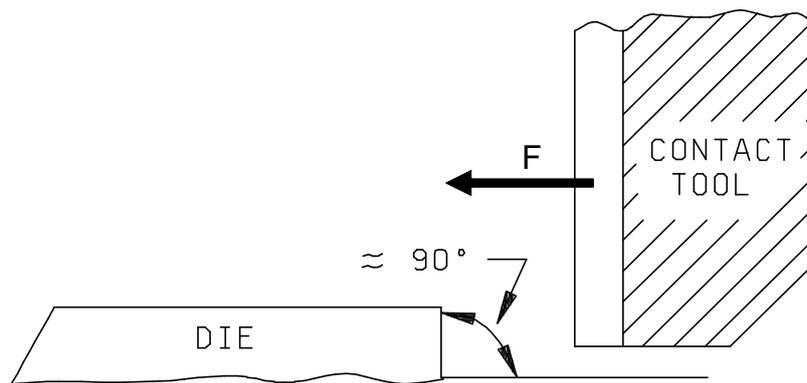


Abbildung 5.13: Schematische Darstellung eines Schertests; Kraftverlauf von Schermeißel (Contact tool) zum Halbleiter (die) dargestellt; nach [115]

Cu-Oberfläche aufgebracht worden sind, wird die Haftfestigkeit ermittelt (siehe Abbildung 5.14). Als Substrat wird eine DCB mit Cu-Oberfläche verwendet, da diese Oberfläche anteilig die größte vorhandene Funktionsoberfläche eines Leistungsmoduls ausmacht.

Die verwendeten Parameter sind in Tabelle 5.4 aufgeführt. Es ist anzumerken, dass die Scherhöhe nach MIL-STD-883E 10% der Höhe des Prüfkörpers entsprechen muss [115]. Die hier verwendeten Quader haben eine Höhe von 2,5 mm, was einer Scherhöhe h_S von 250 μm entspricht. Die Untersuchung wird mittels eines „Condor Sigma“ der Fa. xyztec bv, Panningen, Niederlande durchgeführt.

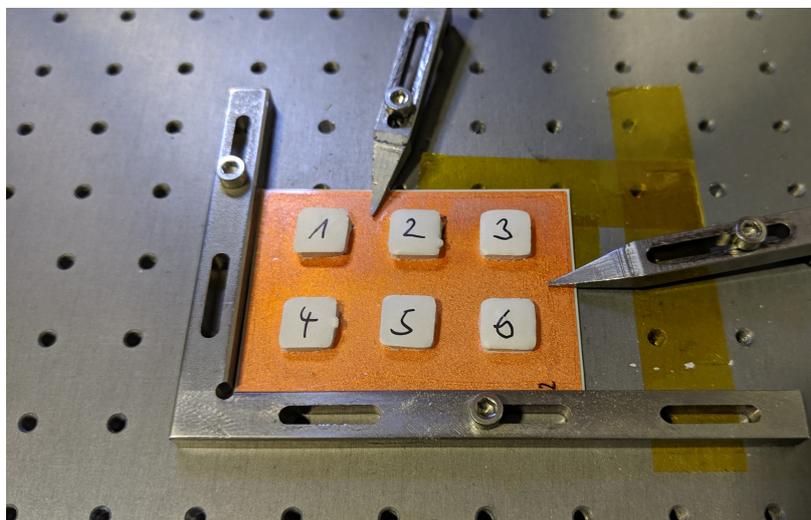


Abbildung 5.14: Schertest-Vehikel fixiert auf Teststand; sechs quaderförmige Zementquader auf der unstrukturierten Seite eine Cu-DCB

Tabelle 5.4: Versuchsparameter Schertest

Parameter	Zeichen	Wert	Einheit
Testdistanz	d_S	3500	μm
Scherhöhe	h_S	250	μm
Testgeschwindigkeit	v_S	150	$\mu\text{m/s}$

Um eine quantifizierbare Bewertungsgrundlage hervorzubringen, wird ein Vergleich zu vorherigen Arbeiten gezogen [108]. Hier sind bereits Zemente hinsichtlich Zuverlässigkeitsprüfungen untersucht worden und haben im aktiven Lastwechseltest (PC_{sec}) vereinzelt das Niveau konventioneller Verkapselungsmaterialien erreichen können. Dieser Zement hat in besagter Arbeit eine Haftfestigkeit auf Cu-DCB von 2,3 MPa erzielen können. Dieser Wert wird als Mindestanforderung für die Haftfestigkeit definiert.

6 Anwendbarkeit anorganischer Verkapselungsmaterialien

Um weiterführende Untersuchungen hinsichtlich der thermischen Optimierung anorganisch umhüllter leistungselektronischer Module durchführen zu können, muss gewährleistet werden, dass derartige Verkapselungsmaterialien für den Einsatz in Leistungsmodulen geeignet sind. Die Anwendbarkeit anorganischer Verkapselungsmaterialien in leistungselektronischen Baugruppen ist Bestandteil der ersten Arbeitshypothese dieser Arbeit (siehe Kapitel 4). Es wird postuliert, dass die in dieser Applikation neuartigen Materialien als Verkapselungsmaterial von leistungselektronischen Baugruppen anwendbar sind.

Im Folgenden wird eine Definition der besagten Anwendbarkeit gegeben. Einzelne Bestandteile dieser Definition werden genauer erläutert und Bewertungskriterien festgelegt. Weiterhin werden besagte Bewertungskriterien anhand von Experimenten mit anorganischen Verkapselungsmaterialien analysiert. Abschließend wird die Anwendbarkeit anhand eines Summentests in Form eines aktiven Lastwechsels analysiert und ein Vergleich zum Stand der Technik erstellt. Die Ergebnisse der Experimente werden zusammengefasst, um eine Bewertung der Anwendbarkeit anorganischer Verkapselungsmaterialien zu formulieren und somit einen Beweis der ersten Arbeitshypothese zu erbringen.

6.1 Definition der Anwendbarkeit

Um ein Material zur Verkapselung einer leistungselektronischen Baugruppe verwenden zu können, müssen eine Vielzahl von Materialeigenschaften gesichert sein. Diese Eigenschaften können in zwei Betrachtungsebenen unterteilt werden: Die Modulebene und die Halbleiterebene (siehe Tabelle 6.1).

Die Modulebene umfasst Eigenschaften, die für die allgemeine Applikation in einem leistungselektronischen Modul notwendig sind. Neben der allgemeinen Verarbeitbarkeit ist die mechanische Stabilität sowie die chemische Kompatibilität eine wichtige Anforderung an ein Verkapselungsmaterial. Eine hohe Wärmeleitfähigkeit eines Materials hat für die Anwendung keinen Wert, wenn das Material nicht applizierbar ist oder die Baugruppe chemisch angreift. Es handelt sich bei der Modulebene also im Wesentlichen um grundlegende Materialeigenschaften des anorganischen Verkapselungsmaterials.

Tabelle 6.1: Notwendige Materialeigenschaften anorganischer Verkapselungsmaterialien aufgeteilt auf unterschiedliche Betrachtungsebenen

Modulebene	Halbleiterebene
Verarbeitbarkeit	Sperrfähigkeit des Halbleiters
mechanische Eigenschaften	Leitfähigkeit des Halbleiters
dielektrische Eigenschaften	Schalten des Halbleiters
Haftung auf Funktionsoberflächen	
chemische Kompatibilität	

Die zweite Betrachtungsebene ist die des Halbleiters. Hier muss die grundlegende Funktion des Halbleiters in Wechselwirkung mit dem anorganischen Verkapselungsmaterial gewährleistet werden. Der Leistungshalbleiter ist die Kernkomponente einer leistungselektronischen Baugruppe, welcher die Funktion eines Transistors beherbergt. Dieser hat die Aufgabe, große Ströme und Spannungen zu führen und zu wandeln [116]. Besagte Vorgänge werden maßgeblich durch gezielt gesteuerte Schaltvorgänge realisiert. Beispielsweise wird durch das pulsweitenmodulierte Ein- bzw. Ausschalten eines Gleichstromes ein Wechselstromsignal erzeugt [1].

Ein Transistor ist in erster Näherung nichts anderes als ein Schalter. Ein Schalter hat die Aufgabe, zwei Zustände eines Signals oder einer Last in Abhängigkeit der Zeit abzubilden. In einem Beispiel sei der Zustand „1“ mit einem fließendem Strom gleichzusetzen. Der Zustand „0“ beschreibt das Ausschalten bzw. die Abwesenheit eines elektrischen Stromes. Weiterhin muss ein Schalter alle Zustände zwischen den definierten Endlagen der Zustände abbilden können ($t_{off} > t > t_{on}$).

Bezogen auf die Anwendbarkeit eines Verkapselungsmaterials muss sichergestellt werden, dass die grundlegende Funktionalität des Halbleiters nicht beeinträchtigt wird. Diese Funktionalität besteht laut der oben beschriebenen Funktionsweise aus den Teilaufgaben „leiten“, „schalten“ und „sperren“. In Bezug der elektrischen Randbedingungen des Halbleiters in der jeweiligen Teilaufgabe lassen sich die in Abbildung 6.1 dargestellten Zustände ableiten.

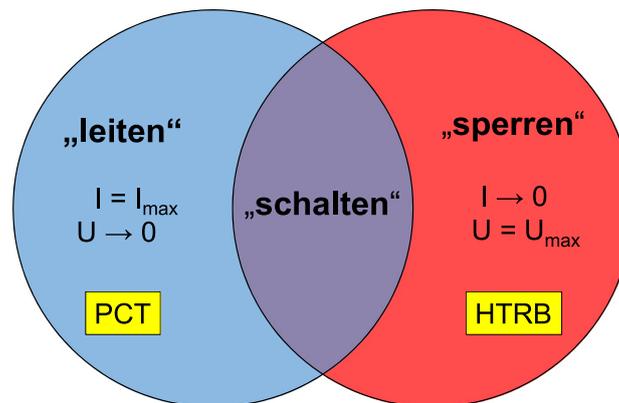


Abbildung 6.1: Mögliche Zustände eines Transistors mit den dazugehörigen elektrischen Gegebenheiten; gelb: Experiment zur Evaluierung des jeweiligen Zustandes

Um die in Kapitel 4 beschriebene Arbeitshypothese zu validieren, muss anhand von Experimenten bewiesen werden, dass ein anorganisches Verkapselungsmaterial die elektrischen Kenngrößen und Charakteristika innerhalb besagter Zustände nicht negativ beeinflusst. Hierfür werden Zuverlässigkeitsprüfungen herangezogen, welche im Allgemeinen für die Qualifikation von Leistungsmodulen verwendet werden.

Um den Zustand des „Sperrens“ zu prüfen, wird ein HTRB durchgeführt (siehe Kapitel 5.2). In diesem Test ist der sinnbildliche Schalter, den der Transistor darstellt, geöffnet. Dementsprechend kann kein Strom über den Halbleiter fließen, was zur Folge hat, dass die Halbleiterstrecke mit einer hohen elektrischen Spannung beaufschlagt ist. Für die Analyse des Zustands „leiten“ wird ein weiterer Zuverlässigkeitstest herangezogen. Beim aktiven Lastwechseln (PCT) wird ein hoher Strom über den Halbleiter geführt (siehe Kapitel 5.3). Der Laststrom wird für wenige Sekunden (t_{on}) durch den Halbleiter geführt, bevor er für eine längere „cool-down-Phase“ (t_{off}) getrennt wird. Der Zustand „schalten“ wird in beiden der oben genannten Zuverlässigkeitsprüfungen abgebildet. Nur wenn alle Eigenschaften bzw. Anforderungen der Modul- sowie der Halbleiterebene von einem anorganischem Verkapselungsmaterial erfüllt werden können, kann dies für die Applikation in einer leistungselektronischen Baugruppe als anwendbar betrachtet werden. Die Bewertung auf Modulebene wird im folgenden Kapitel 6.2 erörtert, während die Ergebnisse zur Bewertung auf Halbleiterebene in Kapitel 6.3 zu finden sind. Abschließend wird in Kapitel 6.4 eine Bewertung der gesamten Anwendbarkeit anorganischer Verkapselungsmaterialien aufgestellt.

6.2 Bewertung der Modulebene

Auf Modulebene sind bestimmte grundlegende Materialeigenschaften von hoher Bedeutung für den Einsatz eines Materials als Verkapselung einer leistungselektronischen Baugruppe. In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Materialeigenschaften kurz beschrieben. Weiterhin werden vorhandene Ergebnisse und Erkenntnisse dargestellt, um die Eignung besagter Materialklasse zu bewerten. Dies bildet die Grundlage der Bewertung derartiger Materialien auf der Ebene des Leistungshalbleiters, da die Applikation des Materials auf dem Halbleiter ohne die besagten Eigenschaften nicht möglich ist.

6.2.1 Verarbeitbarkeit

Die Verarbeitbarkeit eines Verkapselungsmaterials oder einer Vergussmasse beschreibt die Fähigkeit eines Materials, unter definierten Randbedingungen in der Zielanwendung applizierbar zu sein. Im Hinblick auf anorganische Verkapselungsmaterialien lässt sich die Verarbeitbarkeit in drei Unterpunkte gliedern:

- Aufbereitung
- Applikation
- Aushärtung

Die Aufbereitung beschreibt den Vorgang des Vermengens von Pulver und Flüssigkeit, um die Vergussmasse bzw. den Leim herzustellen. Zur Aufbereitung zählen ebenfalls Arbeitsschritte, wie zum Beispiel das Entgasen des Leims, um eingerührte Luft zu evakuieren. Die Applikation ist der eigentliche Vergussvorgang. Hierbei wird das Material in die zu füllende Vergussform gegeben. Abschließend muss die anorganische Vergussmasse ausgehärtet werden. Der Leim erstarrt und das Material erlangt seine finalen Eigenschaften.

Für die vorliegende Arbeit werden die Aufbereitung und die Aushärtung des Materials als gegeben erachtet. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Applikation. Hierbei ist das vollständige und lunkerfreie Umschließen der leistungselektronischen Komponenten von kritischer Bedeutung. Fehlstellen im Verguss führen zu dem Verlust der elektrischen Isolationsfähigkeit sowie der thermischen

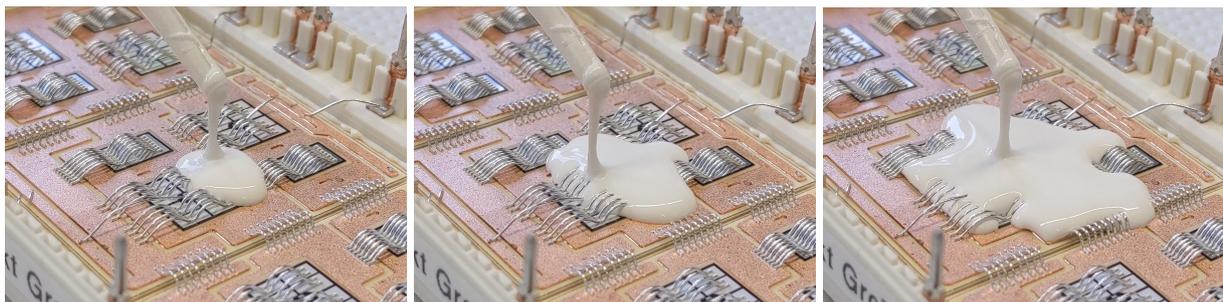


Abbildung 6.2: Manueller Verguss eines Rahmenmoduls mit reaktiver Tonerde zu verschiedenen Zeitpunkten; links: $t=0$ s, Mitte: $t=3$ s, rechts: $t=10$ s

Leitfähigkeit. Außerdem erzeugen Lufteinschlüsse ein unausgeglichenes thermomechanisches Gefüge, welches bei Erwärmung zu einer ungleichmäßigen Ausdehnung führt. Die hierbei entstehenden mechanischen Spannungen können zur Zerstörung der Verkapselung und folglich der Baugruppe führen.

Die Rheologie des aufbereiteten Leims ist für einen erfolgreichen Verguss von entscheidender Bedeutung. Eine Kombination aus Viskosität, Fließgrenze und Benetzungsfähigkeit entscheidet hierbei darüber, wie gut sich der Leim im Modul verteilt und die einzelnen Komponenten umschließt. Nur so kann überall eine hinreichende stoffschlüssige Verbindung zwischen dem Verkapselungsmaterial und der darunterliegenden Baugruppe gewährleistet werden. Die Bewertungskriterien einer hinreichenden Verarbeitbarkeit werden anhand folgender Eigenschaften des Leims definiert:

- **Selbstfließend:** Fähigkeit des Leims sich ohne Fremdeinwirkung jeglicher Art im Modul zu verteilen
- **Spaltgängig:** Fähigkeit des Leims jeglichen vorhandene Spalt bzw. Kavität innerhalb der Baugruppe zu verfüllen
- **Lunkerfrei:** Fähigkeit des Leims einen Vergusskörper ohne Lufteinschlüsse zu erzeugen

Im Verlauf dieser Arbeit sind eine Vielzahl an anorganischen Vergussmassen hinsichtlich ihrer Verarbeitbarkeit untersucht worden. Ein Beispiel ist in Abbildung 6.2 aufgeführt. Die hier applizierte Masse ist ein Entwicklungsmaterial der Fa. Robert Bosch GmbH, Gerlingen-Schillerhöhe. Anhand der Ausbreitung der Materialfront ist zu erkennen, dass das Material selbstfließend ist. Das bedeutet, die Kombination aus Viskosität und Fließgrenze des Materials ist so eingestellt, dass es sich ohne jegliche Fremdeinwirkung lateral im Modul verteilen kann.

Weiterhin ist zu erkennen, dass auch feinste Strukturen, wie beispielsweise die Bonddrähte, vollständig vom Leim benetzt und umschlossen werden. Insbesondere das vollständige Umschließen der Bondfüße ist eine kritische Komponente eines erfolgreichen Vergusses, da hierdurch die Lebensdauer des Moduls signifikant gesteigert werden kann (siehe Kap. 6.3.2). In Abbildung 6.3

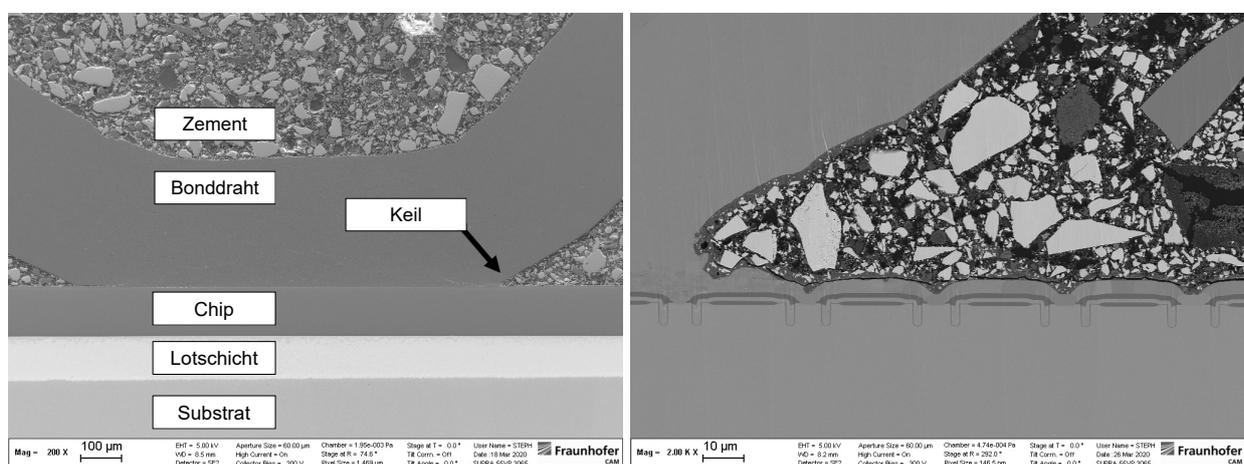


Abbildung 6.3: REM-Aufnahmen anorganisch verkapselter Leistungskomponenten; links: Diode x200, rechts: IGBT x2000; Aufnahmen zur Verfügung gestellt von Bianca Böttge, FhG IMWS

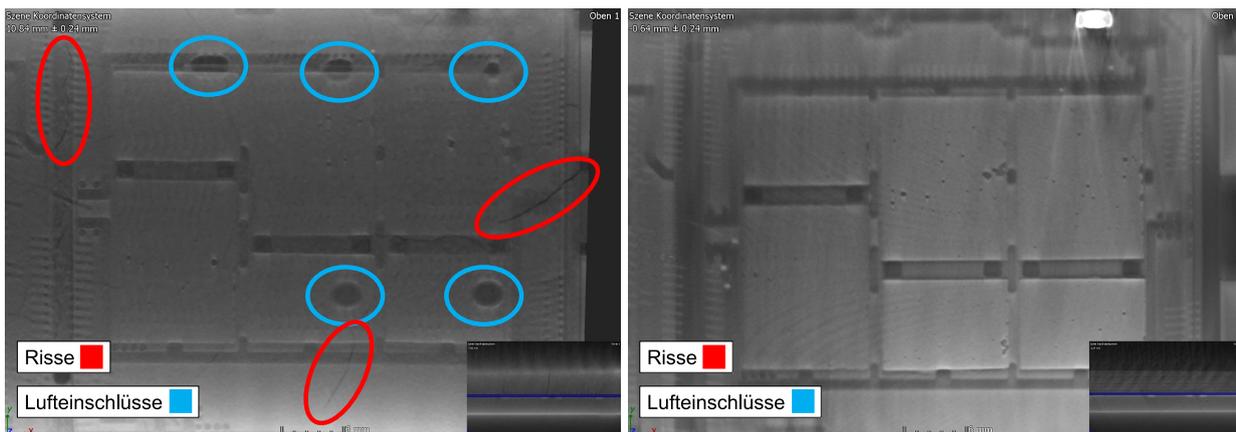


Abbildung 6.4: X-Ray Aufnahmen mehrerer anorganisch verkapselter Rahmenmodule auf Ebene des Chipnotes; links: mangelhafter Verguss mit Lufteinschlüssen und Rissen; rechts: intakter Verguss ohne Fehlstellen; Aufnahmen zur Verfügung gestellt von Bianca Böttge, FhG IMWS

ist zu erkennen, dass eine anorganische Vergussmasse in der Lage ist, den Keil zwischen einem Bonddraht und dem Substrat zu verfüllen. Bei besagtem Keil handelt es sich um die kleinste zu verfüllende Struktur innerhalb des Leistungsmoduls. Die Anforderung der Spaltgängigkeit ist hiermit erfüllt.

Um die Lunkerfreiheit eines anorganischen Verkapselungsmaterials darzustellen, wird die Analysemethode der Röntgenbestrahlung (x-ray) angewandt. In Abbildung 6.4 sind zwei Module mit anorganischem Verkapselungsmaterial dargestellt. Links ist zu erkennen, dass es bei dem angewandten Material zu Lufteinschlüssen und Rissbildung gekommen ist. Abbildung 6.4 rechts zeigt einen Verguss mit einem anderen anorganischen Material. Hier sind keinerlei Fehlstellen auszumachen. Die Verkapselung ist lunkerfrei. Anhand der oben dargestellten Eigenschaften von anorganischen Verkapselungsmaterialien ist festzuhalten, dass eine hinreichende Verarbeitbarkeit gegeben ist.

6.2.2 Mechanische Eigenschaften

Da es sich bei anorganischen Materialien nicht um einen Weichverguss (wie z.B. ein Silikon-Softgel) handelt, sind die mechanischen Eigenschaften der eingesetzten Materialien von großer Relevanz. Die Bewertungskriterien hinreichender mechanischer Eigenschaften können in die folgenden Punkte unterteilt werden:

- **CTE:** linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient; sollte den Materialien eines Leistungsmoduls möglichst nahe sein
- **Bruchfestigkeit:** Bruchspannung σ_B , bei der ein Materialversagen auf Grund mechanischer Belastung eintritt

Der in Kapitel 2.2 beschriebene thermische Stapel ist aus einer Vielzahl unterschiedlicher Materialien aufgebaut. Das eingesetzte Verkapselungsmaterial kommt mit einem Großteil der vorhandenen

Tabelle 6.2: Auflistung relevanter Komponenten eines Leistungsmoduls mit der Materialzusammensetzung und den dazugehörigen CTE

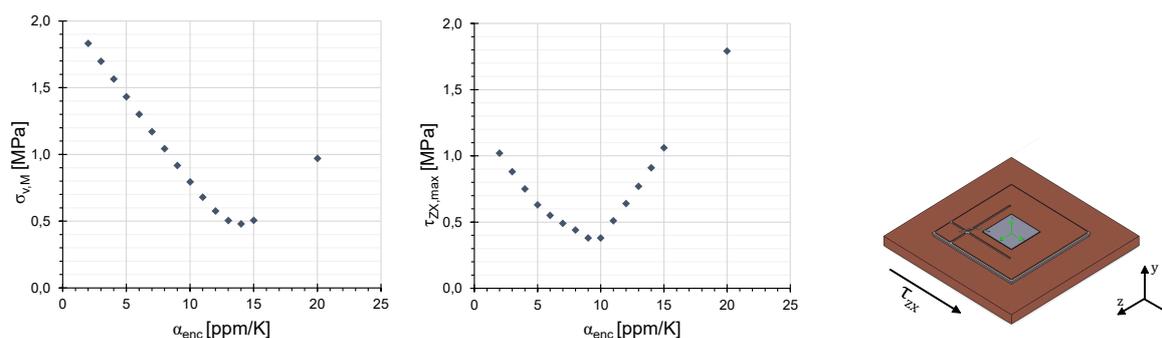
Komponente	Material	CTE [ppm/K]
Chip	Si	2,6
Bonddraht	Aluminium	23,1
DCB	Cu/Al ₂ O ₃ /Cu	6,0 - 7,0
Bodenplatte	Cu	16,5

Materialien in Kontakt und geht eine adhäsive Bindung mit diesen ein. Ein zuverlässiger Betrieb des Leistungsmoduls ist nur zu gewährleisten, wenn der Materialverbund intakt bleibt und es nicht zu fehlender Haftung bzw. Delamination zwischen Verkapselungsmaterial und der darunterliegenden Baugruppe kommt.

Dies ist durch eine Kombination aus passendem CTE α und ausreichender Haftung (siehe Kapitel 6.2.4) zu realisieren. Eine Auflistung der thermischen Ausdehnungskoeffizienten relevanter Materialien ist in Tabelle 6.2 zu finden. Es wird deutlich, dass die vorhandenen Werkstoffe im Vergleich zu Polymeren in einem Bereich niedrig dehnender Materialien einzuordnen sind.

Eine anorganische Vergussmasse sollte ebenfalls ein niedrig dehnendes Verhalten aufweisen, damit ein Werkstoffverbund möglichst ähnlicher thermomechanischer Eigenschaften erzeugt werden kann. Dies minimiert die im Betrieb eines Leistungsmoduls entstehenden thermomechanischen Spannungen. Die größte dem Verguss exponierte Fläche in einem Modul wird von den Substraten und der Bodenplatte gebildet. Demnach ist ein thermischer Ausdehnungskoeffizient des anorganischen Verkapselungsmaterials zwischen 6 und 16 ppm/K erstrebenswert.

Dieser Bereich kann mit Hilfe von mechanischen FEM-Simulationen weiter eingegrenzt werden. Anhand eines exemplarischen Aufbaus einer leistungselektronischen Baugruppe werden mechanische Simulationen durchgeführt (siehe Kapitel 5.8). Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.5 dargestellt. Es ist zu beobachten, dass die Von-Mises-Vergleichsspannung bei einem α_{enc} von 14 ppm/K ein Minimum von 0,48 MPa aufweist. Die Scherspannung in X-Richtung hingegen bringt ein Minimum von 0,38 MPa bei einem CTE von 10 ppm/K hervor.

Abbildung 6.5: Ergebnisse mechanischer Simulation; Spannungen in Abh. des CTE α des Verkapselungsmaterials

Auf Grundlage der oben diskutierten Ergebnisse ist festzuhalten, dass der vorher genannte anzustrebende CTE-Intervall zwischen 6 und 16 ppm/K um einen Bereich der minimalen auftretenden Spannungen zwischen 10 und 14 ppm/K eingegrenzt werden kann. Hierbei ist zu beachten, dass das vorgestellte Simulationsvehikel nur einen Ausschnitt eines Leistungsmoduls darstellt. Das Verhalten des Aufbaus kann zu einem gewissen Grad abgebildet werden, jedoch nicht eventuelle Wechselwirkungen auf Grund geometrischer Randbedingungen eines vollständigen Moduls.

Anders als bei Silikongelen handelt es sich bei Zementen nicht um gallertartige Massen, die sich elastoplastisch der thermomechanischen Bewegung der Leistungsbaugruppe anpassen können. Das bedeutet, dass es im Betrieb eines Leistungsmoduls immer zu thermomechanischen Spannungen zwischen dem Verkapselungsmaterial und den Komponenten des Moduls kommen wird. Dies trifft zu, obgleich der CTE eines anorganischen Verkapselungsmaterials innerhalb der oben beschriebenen Grenzen liegt. Dieser Effekt ist durch die Vielzahl der Materialpaarungen, insbesondere lokal, als kritisch zu betrachten.

Resultierend muss eine anorganische Vergussmasse ein Mindestmaß an mechanischer Stabilität bzw. Bruchfestigkeit aufweisen, um derartige Spannungen aufnehmen zu können. Kommt es während dem Betrieb zu Brüchen oder Absplitterungen des Verkapselungsmaterials, können sich etwaige keramische Partikel frei bewegen und sensible Komponenten, wie zum Beispiel Halbleiter oder Bonddrähte beschädigen. Das Modul wäre damit zerstört. Im Folgenden soll die Bruchfestigkeit anorganischer Verkapselungsmaterialien anhand der Biegefestigkeit bewertet werden.

In der Vergangenheit sind bereits Untersuchungen zum Einsatz von anorganischen Verkapselungsmaterialien unternommen worden [108]. Der in dieser Studie eingesetzte Zement wurde u.a. einem Lastwechsel (PCsec) unterzogen. Die erzielten Zyklenzahlen waren mit denen eines konventionell mit Softgel verkapselten Moduls vergleichbar. Dies zeigt, dass der eingesetzte Zement mechanisch betrachtet einen passenden CTE, ausreichende Haftung sowie eine hinreichende Bruchfestigkeit aufgewiesen hat.

Der dort untersuchte Zement hat eine Biegefestigkeit von 9 MPa. Dieser Wert ist fortan als Mindestanforderung zu betrachten, da mit einer derartigen Bruchfestigkeit eine Funktionalität als Verkapselungsmaterial nachgewiesen worden ist. Generell gilt ebenfalls: Je höher die Biegefestigkeit, desto besser ist das Material für den Einsatz im Leistungsmodul geeignet.

Das in dieser Arbeit untersuchte Entwicklungsmaterial DSC besitzt eine Biegefestigkeit von 12,3 MPa (siehe Kapitel 5.1). Nach oben formulierter Mindestanforderung hat das Material eine ausreichende Biegefestigkeit, um als funktional zu gelten. Weiterhin besitzt es einen CTE von 7 ppm/K [117]. Abschließend lässt sich festhalten, dass anorganische Materialien in der Lage sind, sowohl einen passenden CTE als auch eine ausreichende Bruchfestigkeit bereitstellen zu können. Die Anwendbarkeit hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften ist damit sichergestellt.

6.2.3 Dielektrische Eigenschaften

Im Verlauf dieser Arbeit ist eine Vielzahl an anorganischen Vergussmassen hinsichtlich ihrer elektrischen Durchschlagsfestigkeit analysiert worden. Der verwendete Versuchsaufbau ist in Kapitel

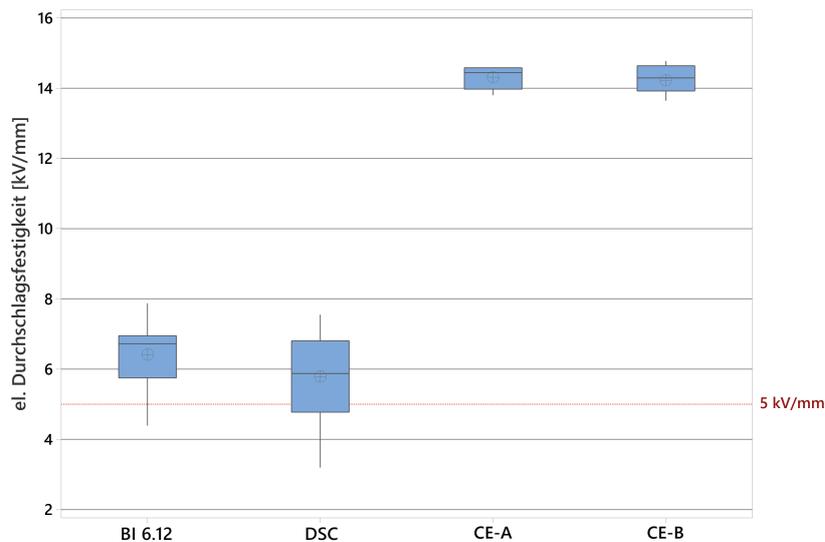


Abbildung 6.6: Vergleich der elektrischen Durchschlagsfestigkeit verschiedener anorganischer Verkapselungsmaterialien

5.9 beschrieben. Hier ist eine Anforderung von mindestens 5 kV/mm definiert worden. Ein Auszug der untersuchten Massen ist in Abbildung 6.6 dargestellt. Die aufgeführten Materialien können in zwei Gruppen unterteilt werden. Die Materialien BI 6.12 und DSC gehören der Gruppe der Phosphatzemente, während die Materialien CE-A und CE-B den reaktiven Tonerden zuzuordnen sind (siehe Kapitel 5.1).

Auffällig ist, dass die CE-Materialien eine deutlich höhere Durchschlagsfestigkeit vorweisen als die PZ-Materialien. Sie erzielen eine mittlere Durchschlagsfestigkeit von 14,3 kV/mm. Die untersuchten PZ-Materialien erreichen eine mittlere Durchschlagsfestigkeit von 6,1 kV/mm. Die hohe Differenz kann dadurch begründet werden, dass es sich hierbei um zwei unterschiedliche Materialsysteme handelt, die mit unterschiedlichen Eigenschaften, wie z.B. Porosität oder Gefügestruktur einhergehen.

Festzuhalten ist, dass beide Materialsysteme die erforderliche Durchschlagsfestigkeit von 5 kV/mm überschreiten. Weiterhin gilt allgemein, dass eine höhere Durchschlagsfestigkeit besser für den Einsatz in leistungselektronischen Modulen geeignet ist. Die für die Anwendbarkeit erforderlichen dielektrischen Anforderungen werden von den gezeigten anorganischen Verkapselungsmaterialien erfüllt.

6.2.4 Haftung auf Funktionsoberflächen

Für einen zuverlässigen Betrieb von Leistungsmodulen ist das Haftvermögen des eingesetzten Verkapselungsmaterials von essentieller Bedeutung. Da es sich bei den hier untersuchten anorganischen Vergussmassen um eine Festkörperverkapselung handelt, ist es von bedeutender Wichtigkeit, dass das Gefüge aus Baugruppe und Verkapselung intakt bleibt. Anders als bei einem Silikon-Weichverguss kann eventuell deplatziertes Material und die daraus entstehende Kavität

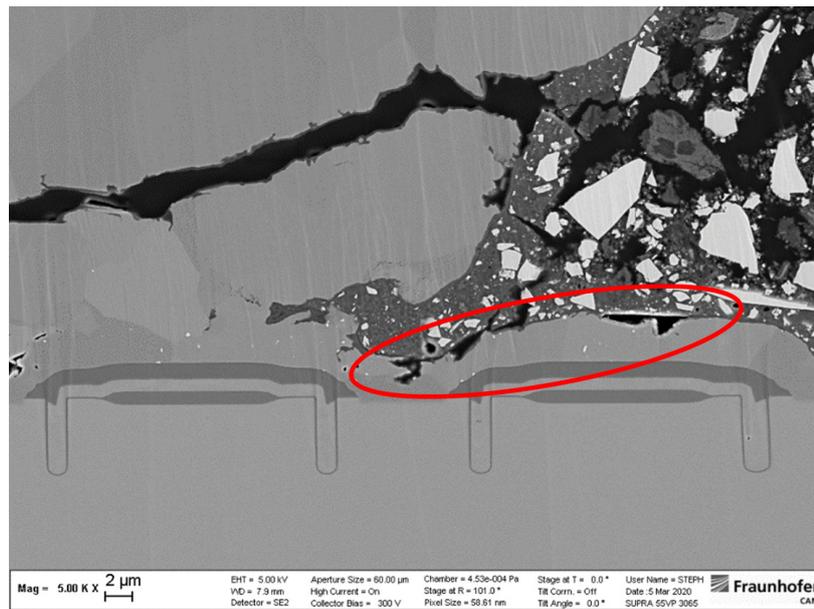


Abbildung 6.7: Elektronenmikroskopische Aufnahme der Verbindungsstelle (Keil) einer Halbleiteroberfläche mit einem Aluminiumbonddraht und einem anorganischen Verkapselungsmaterial; rot markiert: Zerstörte Halbleitermetallisierung durch abrasiven Abtrag; Aufnahmen zur Verfügung gestellt von Bianca Böttge, FhG IMWS

nicht durch Fließen kompensiert werden. Kommt es zu einer Delamination von Zement und Baugruppe, entsteht irreversibel ein Luftspalt.

Dieser kann dazu führen, dass Isolationsstrecken nicht mehr eingehalten werden oder weitere Defekte in der Verkapselung durch ein thermomechanisches Ungleichgewicht entstehen. Weiterhin handelt es sich bei den untersuchten Verkapselungsmaterialien um abrasive Feststoffe, welche unter thermischer Wechselbelastung und der daraus resultierenden thermomechanischen Bewegung des Materialstapels sensible Komponenten beschädigen können. Hierzu zählen Bauteile, wie zum Beispiel der Halbleiter oder die Bonddrähte. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 6.7 dargestellt.

Bei dieser Aufnahme handelt es sich um einen Prüfling aus einem aktivem Lastwechseltest (power cycling). Der Haftverbund aus Verkapselungsmaterial und Baugruppe ist zerstört worden, wodurch sich Mikrorisse im Material gebildet haben (dunkle Bereiche rechts). Anstatt eines uniformen Zementkörpers liegt hier eine Vielzahl abrasiver Zementpartikel vor. Diese können sich unter der vorliegenden thermomechanischen Wechselbelastung frei bewegen. Hierdurch kommt es zu einem abrasiven Abtrag der Halbleitermetallisierung (rote Markierung), was zur Zerstörung der Leistungsbaugruppe führen kann.

Aus oben genannten Gründen muss folglich die Haftung auf Funktionsoberflächen der leistungselektronischen Baugruppe gegeben sein, um eine Anwendbarkeit der anorganischen Verkapselungsmaterialien zu gewährleisten. Bewertungsgrundlage für die Haftung auf Funktionsoberflächen bildet ein sogenannter Schertest (siehe Kapitel 5.10). Eine Haftfestigkeit von mindestens 2,3 MPa ist für den erfolgreichen Einsatz anorganischer Verkapselungsmaterialien definiert worden.

Die Ergebnisse des Schertests einer Auswahl von anorganischen Verkapselungsmaterialien der Fa. Heraeus Deutschland GmbH & Co. KG, Hanau, ist in Abbildung 6.8 aufgeführt. Die mittleren

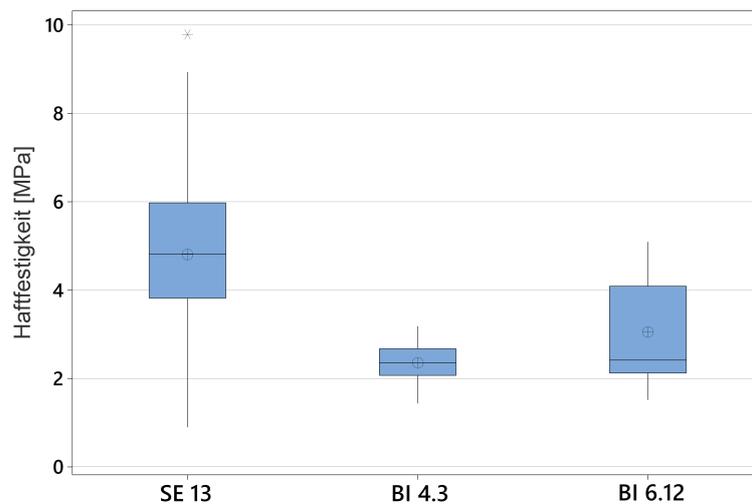


Abbildung 6.8: Ermittelte Haftfestigkeiten verschiedener Phosphatzemente auf Cu-DCBs

Haftfestigkeiten der hier dargestellten Materialien siedeln sich zwischen 2,36 und 4,81 MPa an. Sie genügen damit der zuvor aufgestellten Mindestanforderung von 2,3 MPa.

Es ist anzumerken, dass bei den Materialien BI 4.3 und BI 6.12 überwiegend Misch- bzw. Kohäsionsbrüche vorliegen. Das bedeutet, dass der Bruch innerhalb des Zementkörpers aufgetreten ist, wodurch vielmehr die Bruchfestigkeit des Zements als die Haftfestigkeit zur Cu-Oberfläche der DCB bestimmt wird. Weiterhin fällt auf, dass die ermittelten Haftfestigkeiten eine zum Teil sehr hohe Streuung aufweisen. Bei Zementen handelt es sich um harte Materialien, bei welchen sich ein Materialversagen in einem Spröbruch ausbildet. Dieser tritt je nach Dichte und Anordnung von Defekten im Material bei höheren bzw. niedrigeren Belastungen ein und erzeugt damit eine hohe Streuung der Ergebnisse.

Unter Berücksichtigung der oben beschriebenen Sachverhalte lässt sich feststellen, dass der Scher- test als alleinige Bewertungsgrundlage für die Haftung auf Funktionsoberflächen ungenügend ist. Mit diesem Experiment lässt sich zwar eine gewisse Vergleichbarkeit unter verschiedenen Materialien erzeugen, ein allgemeingültiges Bewertungskriterium für die Anwendbarkeit anorganischer Verkapselungsmaterialien lässt sich hierbei jedoch nicht ableiten.

Eine bestehende Haftung im Betrieb eines Leistungsmoduls ist von vielen Variablen abhängig. Beispielsweise treten weniger zu kompensierende mechanische Verspannungen auf, je besser der CTE des Verkapselungsmaterials auf die darunterliegende Baugruppe angepasst worden ist. Weiterhin können die geometrischen Gegebenheiten des Moduls selber einen Einfluss auf das Fortwähren des Haftverbunds nehmen. Verfüllte Kavitäten im Modul sowie Rahmenstrukturen können zu einem Form- bzw. Kraftschluss führen, welche das Interface zwischen Verkapselungsmaterial und Funktionsoberfläche entlasten können.

Um eine valide Bewertung der Haftfestigkeit zu formulieren, muss folglich ein applikationsnaher Summentest, wie beispielsweise ein aktiver Lastwechseltest (siehe Kapitel 5.3), durchgeführt werden. Ein derartiger Test berücksichtigt alle mechanischen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Materialien unter einem applikationsnahem Lastprofil. Wird in diesem Test ein positives

Ergebnis erzielt, kann schlussgefolgert werden, dass das mechanische Gefüge unter Last intakt bleibt. Das bedeutet wiederum, dass die Kombination aus mechanischen Eigenschaften des Verkapselungsmaterials (CTE, Bruchfestigkeit) und der Haftfestigkeit von hinreichender Qualität sind, um als anwendbar zu gelten.

Somit lässt sich festhalten, dass generell eine selbst erhaltende Haftfestigkeit zwischen dem Verkapselungsmaterial und der darunterliegenden Baugruppe vorliegen muss, um einer Anwendbarkeit gerecht zu werden. Es gilt: Je höher die Haftfestigkeit, desto robuster ist der Materialverbund gegenüber thermomechanischen Verspannungen und äußeren mechanischen Umwelteinflüssen. Eine finale Bewertung der Haftfestigkeit eines anorganischen Verkapselungsmaterials muss in einer applikationsnahen Zuverlässigkeitsuntersuchung, wie einem PCT, erfolgen.

Im Verlauf dieser Arbeit ist eine Vielzahl von anorganischen Verkapselungsmaterialien hinsichtlich ihrer Haftung auf Funktionsoberflächen untersucht worden. Die Haftfestigkeiten besagter Materialien reichen von 4,8 MPa bis zu 1,2 MPa. Letzteres ist die Haftfestigkeit des Materials „Development Sample CemPack®“, welches im power cycling die charakteristische Lebensdauer um einen Faktor von 2,3 vergrößert hat (siehe Kapitel 6.3.2). Auf Grundlage dieser Ergebnisse lässt sich die Anwendbarkeit derartiger Materialien hinsichtlich der Haftfestigkeit auf Funktionsoberflächen bestätigen. Anorganische Verkapselungsmaterialien sind in der Lage, eine ausreichende Haftfestigkeit zu Funktionsoberflächen einer leistungselektronischen Baugruppe herzustellen.

6.2.5 Chemische Kompatibilität

Beim Einsatz eines Verkapselungsmaterials kommt die jeweilig eingesetzte Vergussmasse mit einer Vielzahl von Komponenten des Leistungsmoduls in Kontakt. Es ist nicht nur essentiell wichtig, dass das Verkapselungsmaterial eine ausgeprägte Haftfestigkeit zu den Materialien dieser Komponenten besitzt (siehe Kapitel 6.2.4), sondern auch keinerlei chemische Wechselwirkung eingeht, die die Funktionalität der Baugruppe beeinträchtigt.

Demnach darf es zu keinen Korrosions- bzw. Reduktionserscheinungen oder Ähnlichem kommen. Es darf also kein chemischer Angriff der Vergussmasse auf die Komponenten der leistungselektronischen Baugruppe erfolgen. Durch eine derartige Reaktion können Komponenten des elektrischen Lastpfades beeinträchtigt werden, was die Leistungsfähigkeit des Moduls mindert. Weiterhin könnten kritische Isolationsstrecken innerhalb des Modul kompromittiert werden. Dies kann zu Kurzschlüssen führen, welche das Modul zerstören können. Demnach ist jegliche materialverändernde Wechselwirkung des Verkapselungsmaterials zu vermeiden.

Ein kritischer Fall einer solchen Wechselwirkung ist in Abbildung 6.9 links dargestellt. Bei der hier applizierten Vergussmasse handelt es sich um den TZ 181 der Fa. Robert Bosch GmbH, Gerlingen-Schillerhöhe. Das Verkapselungsmaterial ist eine Wechselwirkung mit der oberseitigen Metallisierung des Halbleiters eingegangen, welche zu einer Zersetzung derselbigen führt. Die hier dargestellte Metallisierung besteht aus der Legierung AlSiCu [118]. Es ist naheliegend, dass die Metallisierung auf Grund des pH-Wertes des applizierten Zementleimes angegriffen worden ist.

Die hier applizierte Schlicker hat einen pH-Wert >11 . Insbesondere der Aluminiumanteil der Le-

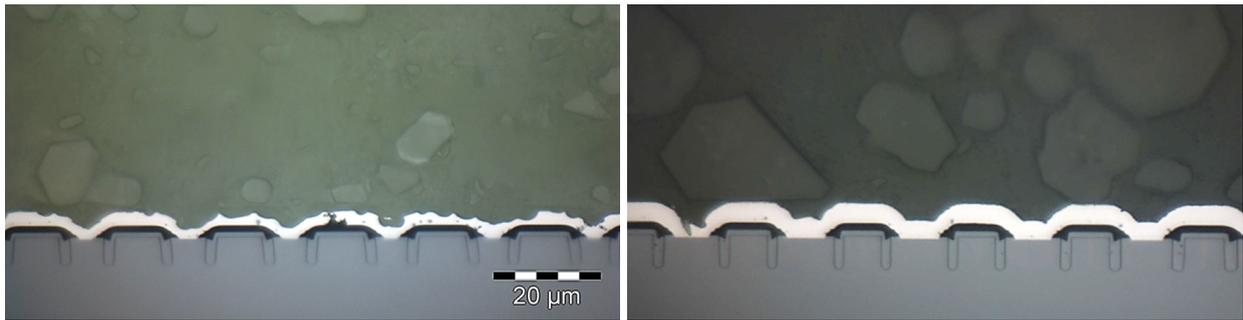


Abbildung 6.9: Vergleich einer durch anorganisches Verkapselungsmaterial angegriffene Halbleitermetallisierung (links) mit einer intakten (rechts); Ergebnisse und Abbildungen mit freundlicher Genehmigung von Bianca Böttge, FhG IMWS

gierung reagiert auf ein basisches Milieu. Unter Bildung von Wasserstoff wird das Aluminium gelöst [68]. Die Halbleitermetallisierung ist zerstört und das Modul dadurch unbrauchbar. Das in Abbildung 6.9 rechts dargestellte Vehikel zeigt, dass ein derartiger Angriff vermeidbar ist.

Hier ist das Material CE-202 der Fa. Robert Bosch GmbH, Gerlingen-Schillerhöhe, zum Einsatz gekommen. Dieses Material hat einen pH-Wert von 8-9. Es ist zu erkennen, dass die Halbleitermetallisierung vollends intakt ist, während die Mikrostrukturen der Halbleiteroberseite umfassend umhüllt worden sind. Dies zeigt, dass eine Verkapselung mit einem anorganischen Material möglich ist, ohne die Halbleitermetallisierung anzugreifen. Weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass diese Aussage auch auf die übrigen Komponenten des Leistungsmoduls zutrifft. Die erfolgreiche Durchführung des in Kapitel 5.3 beschriebenen Summentests des aktiven Lastwechsels bestätigt dies.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass an mehreren anorganischen Vergussmaterialien sichergestellt worden ist, dass kein chemischer Angriff der Komponenten eines leistungselektronischen Moduls erfolgt. Die chemische Kompatibilität derartiger Materialien ist damit sichergestellt.

6.3 Bewertung der Halbleiterebene

Die in Kapitel 6.1 erörterte Definition der Anwendbarkeit anorganischer Verkapselungsmaterialien für den Einsatz in leistungselektronischen Baugruppen beschreibt drei wesentliche Zustände, die ein Leistungshalbleiter einnehmen kann. Die Zustände „leiten“, „sperrern“ und „schalten“ dürfen durch den Einsatz besagter Vergussmaterialien nicht negativ beeinflusst werden. Andernfalls wäre die Anwendbarkeit der Materialien nicht gegeben.

Der Zustand „sperrern“ wird experimentell im Rahmen eines Heißsperrdauertests, einem sogenannten HTRB, geprüft. Ein aktiver Lastwechseltest (power cycling) wird durchgeführt, um den Zustand „leiten“ zu evaluieren. Der Zustand „schalten“ wird im weitesten Sinne in beiden Experimenten abgebildet. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsprüfungen im Einzelnen beschrieben und diskutiert.

6.3.1 Sperrfähigkeit des Halbleiters

Für die Überprüfung der Sperrfähigkeit werden anorganisch verkapselte Baugruppen einem HTRB unter den in Kapitel 5.2 beschriebenen Versuchsparametern ausgesetzt. Die Leckströme und Charakteristika des Halbleiters dürfen sich nach dem Verkapseln und nach dem Test nicht negativ verändert haben, um der Anforderung der Sperrfähigkeit des Halbleiters genüge zu tun. Während des Tests werden die über der Kollektor-Emitter-Strecke entstehenden Leckströme $I_{CE,S}$ kontinuierlich in situ gemessen. Die erfassten Leckströme sind in Abbildung 6.10 dargestellt.

Die entstehenden Sperrströme betragen im Mittel 0,65 mA. Die hierbei auftretende Streuung über die Zeit beträgt 0,14 mA. Wie in Abbildung 6.10 zu erkennen ist, unterliegen die Leckströme keinerlei positivem Trend. Das Niveau der Leckströme bleibt über die gesamte Testdauer von 1000 h konstant. Neben den Leckströmen unter Testbedingungen gilt es, beim HTRB ebenfalls die statischen elektrischen Parameter der DUTs zu evaluieren. Dies geschieht mit Hilfe eines sogenannten curve tracers, welcher die unterschiedlichen Halbleiterstrecken innerhalb des Chips gezielt ansteuern kann, um das jeweilige Verhalten bewerten zu können.

Um die korrekte Funktion der Halbleiter zu überprüfen, werden die Parameter Kollektor-Emitter-Sperrstrom $I_{CE,S}$ und Gate-Emitter-Leckstrom I_{GE} evaluiert. Weiterhin wird das Schaltverhalten anhand der Schwellwertspannung (Threshold-Spannung) U_{th} bewertet, bei der das Bauteil zu leiten beginnt.

In Abbildung 6.11 sind die Ergebnisse der $I_{CE,S}$ -Messung zu verschiedenen Zeitpunkten dargestellt. Die Messung ist vor dem Verkapseln, nach dem Verkapseln mit anorganischer Vergussmasse und nach abgeschlossenem HTRB durchgeführt worden. Ein unverkapseltes DUT bringt einen mittleren Leckstrom $I_{CE,S}$ von 0,25 μA hervor. Nachdem es mit einem anorganischem Verkapselungsmaterial vergossen worden ist, liegt ein mittlerer $I_{CE,S}$ von 0,09 μA vor. Der Leckstrom nach 1000 Stunden HTRB beträgt im Mittel 0,04 μA bei einer Testspannung von 1200V.

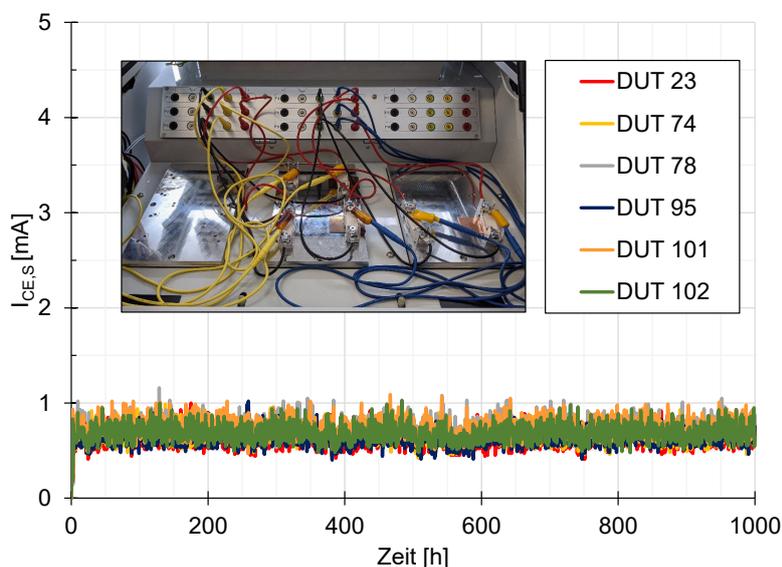


Abbildung 6.10: In situ Leckströme $I_{CE,S}$ unter HTRB Testbedingungen

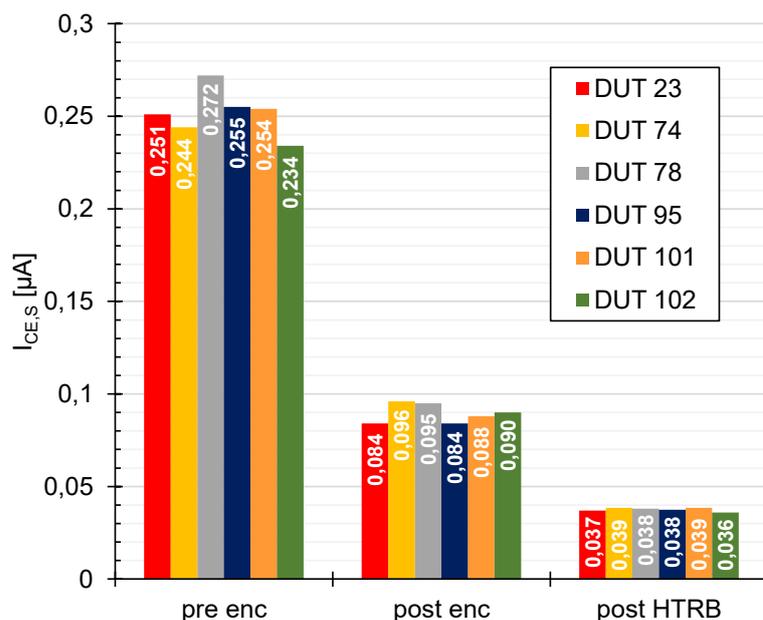


Abbildung 6.11: Zusammenfassung der erfassten statischen Leckströme $I_{CE,S}$ unter RT und 1200 V gemessen vor dem Verkapseln (pre enc), nach dem Verkapseln (post enc) und nach Beenden des HTRB-Tests (post HTRB)

Die Ergebnisse der Bestimmung der Charakteristika I_{GE} und U_{th} sind in Abbildung 6.12 am Beispiel von DUT 74 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Gate-Leckströme I_{GE} über die Prozessschritte des Vergusses und den HTRB nicht signifikant verändert haben. Sie liegen stets zwischen 2 und 4 μA . Auch die Schwellwertspannung U_{th} hat über den Verlauf der Untersuchung

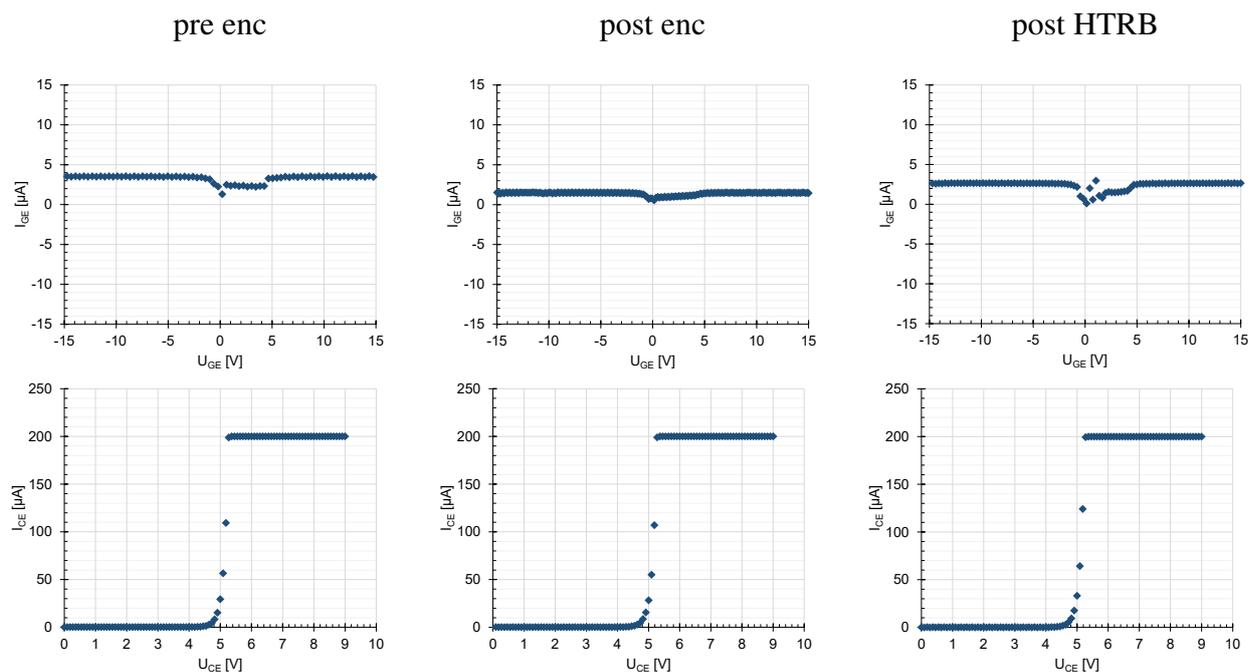


Abbildung 6.12: Ergebnisse der Halbleitercharakterisierung von DUT 74 am Curvetracer; links: Vor Verkapselung; Mitte: Nach Verkapselung; rechts: nach HTRB; oben: GE-Leak-Test; unten: Threshold-Test

keinerlei signifikante Änderung erfahren. Sie liegt zwischen 5,3 und 6,3 V, wie es vom Chiphersteller vorgegeben ist [119].

Es ist festzuhalten, dass sich die Charakteristika des Halbleiters weder nach dem Verguss noch nach dem Beenden des HTRB negativ entwickelt haben. Sowohl die Gate-Emitter-Strecke, als auch das Schalten des Halbleiters zeigen ein unverändertes Verhalten. Lediglich der Sperrstrom über der Kollektor-Emitter-Strecke $I_{CE,S}$ hat eine signifikante Änderung erfahren.

Der $I_{CE,S}$ ist nach dem Verguss mit dem anorganischen Verkapselungsmaterial ca. 65% kleiner als unvergossen. Dieser Sachverhalt kann darauf zurückgeführt werden, dass das Verkapselungsmaterial bessere dielektrische Eigenschaften als Luft besitzt. Nach der Verkapselung besteht eine Festkörper-Festkörper-Schnittstelle auf der Halbleiteroberfläche, wodurch diese nicht mehr der Umgebungsluft exponiert wird. Dadurch werden eventuelle Oberflächenströme verhindert, welche in den gesamten Leckstrom $I_{CE,S}$ einfließen. Der resultierende Leckstrom ist im Vergleich zum unverkapselten Halbleiter reduziert.

Nach Abschluss des HTRB ist der gemessene Leckstrom erneut um ca. 50% reduziert worden. Auf Grund der langen Lagerung bei erhöhter Temperatur (150 °C) kann sich das Gefüge verändert haben. Wie in Kapitel 2.5 beschrieben, schreitet die Vernetzung von CSH-Phasen unter Temperatureinfluss über Tage hinweg fort. So kann sich der Zement verdichtet haben, wodurch sich die dielektrischen Eigenschaften des Materials verbessern. Ein weiterer Effekt kann das Austreiben von Porenfeuchte sein. Diese kann im Zeitraum zwischen dem Verkapseln und dem Messen des Leckstromes vom Zementkörper aufgenommen worden sein. Wird besagte Feuchte durch einen Tempervorgang ausgetrieben, kann der resultierende Leckstrom erneut reduziert werden.

Es ist festzuhalten, dass sich die geprüften Eigenschaften des Halbleiters auf Grund des Verkapselungsmaterials nach Abschluss des HTRB nicht im negativen Sinne verändert haben. Es wird keinerlei Wechselwirkung zwischen der Halbleiterstruktur und den im Zement vorhandenen Ionen festgestellt. Die Anforderungen im Bezug auf die Sperrfähigkeit des Halbleiters sind damit erfüllt. In Bezug auf den HTRB und den hierbei abgebildeten Halbleiterzustand „sperren“ ist die Anwendbarkeit anorganischer Verkapselungsmaterialien bestätigt worden.

6.3.2 Leitfähigkeit des Halbleiters

Der aktive Lastwechsel ist einer der wichtigsten Untersuchungen bezüglich der Bewertung der Anwendbarkeit anorganischer Verkapselungsmaterialien. Im Folgenden werden die Ergebnisse des Tests beschrieben und hinsichtlich der aufgetretenen Fehlermoden diskutiert. Die Ergebnisse des aktiven Lastwechsels sind in Abbildung 6.13 dargestellt.

Leistungsmodule mit einem Silikon-Weichverguss haben eine mittlere Zyklenzahl von 31.816 Zyklen erreicht. Das Maximum der erreichten Zyklen liegt in dieser Testgruppe bei 37.564 Zyklen. Die charakteristische Lebensdauer T eines Leistungsmoduls mit Silikon-Weichverguss beträgt damit 33.617 Zyklen. Die anorganisch verkapselten Prüflinge erzielen eine mittlere Lebensdauer von 71.092 Zyklen. Das Maximum liegt hier bei 90.882 erreichten Zyklen. Bezogen auf die Zuverlässigkeit der untersuchten Module erzielen die anorganisch verkapselten Prüflinge eine charakteris-

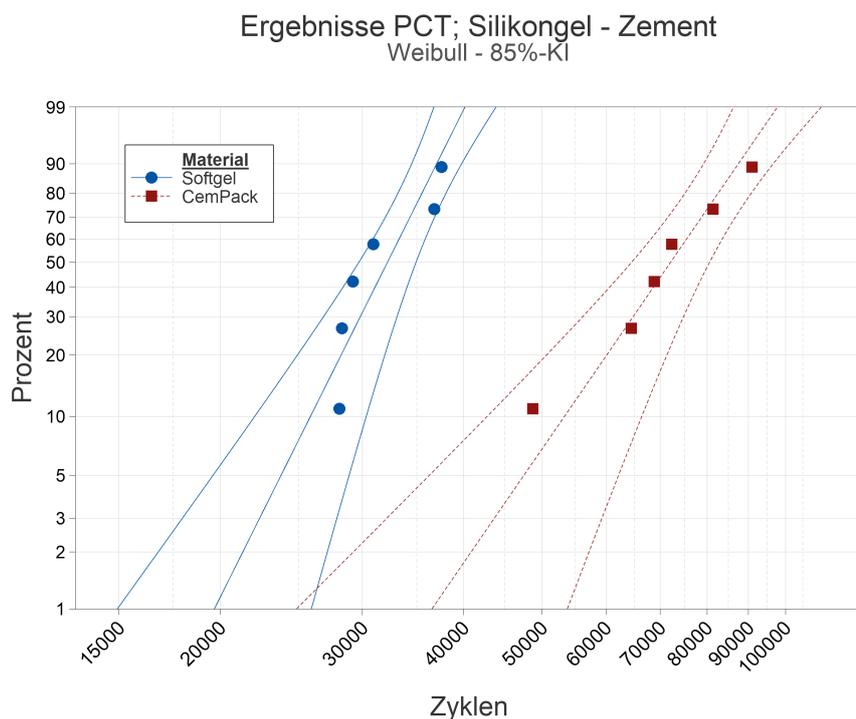


Abbildung 6.13: Ergebnisse des power cyclings „CemPack Development Sample®“ mit Vergleich zur Referenz eines Silikon-Weichgusses

tische Lebensdauer T von 76.534 Zyklen. Durch den Einsatz einer anorganischen Vergussmasse ist die Lebensdauer der Leistungsmodule um einen Faktor von 2,3 vergrößert worden.

Weiterhin fällt auf, dass sich die Verläufe des Temperaturhubes ΔT sowie der Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} beim Silikon sowie beim Zement sehr ähnlich gestalten (siehe Abbildung 6.14). Die bei ca. 15.000 Zyklen und ca. 36.000 Zyklen auftretenden lokalen Einbrüche von Temperatur und Spannung des anorganisch verkapselten Moduls sind auf parallel getestete Prüflinge zurückzuführen, die zu diesem Zeitpunkt ausgefallen sind. Diese Unregelmäßigkeiten sind zu vernachlässigen.

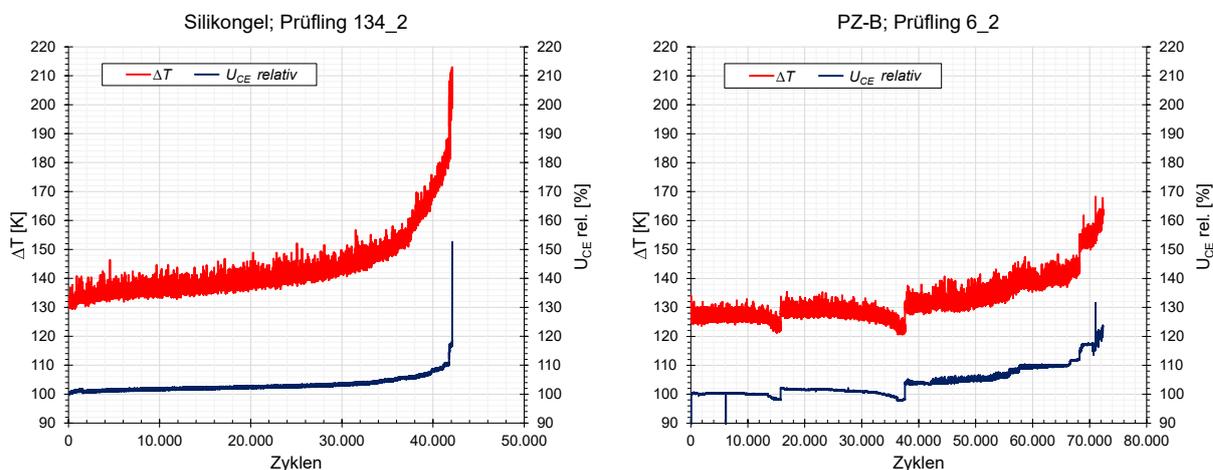


Abbildung 6.14: Vergleich der ΔT - und U_{CE} -Verläufe eines konventionell (links) und eines anorganisch verkapselten Prüflings (rechts) des power cyclings

Ein stetiger Anstieg der Messgrößen ΔT und U_{CE} , wie er hier zu sehen ist, deuten auf eine Degradation des Halbleiterlotes hin. Die mit Hilfe von Weichlot erzeugte Verbindung wird von den unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten und der daraus resultierenden thermomechanischen Bewegung beansprucht. Verstärkt wird dieser Effekt durch die Duktilität des Weichlotes, welche eine plastische Verformung des Materials in Form von Kriechen ermöglicht. Dieses Verhalten führt zu einer kontinuierlichen Materialdegradation, welche die elektrische Verbindungsqualität des Lotes stetig mindert. Das Resultat ist ein stetiger Anstieg von U_{CE} und ΔT über einen langen Zeitraum.

Auf Grundlage der beschriebenen Messkurven ist sowohl beim Silikon als auch beim Zement von einer Lotdegradation als dominanter Ausfallmechanismus auszugehen. Diese Beobachtung deckt sich jedoch nicht mit der Vergrößerung der Lebensdauer um den Faktor 2,3. Zudem ist der Fehlermode des „Bonddraht-Liftoff“ charakteristisch für das Versagen von Aufbauten mit Aluminiumbonddrähten, die mit einem Silikonweichverguß verkapselt worden sind [120] [121]. Demnach kommt es hier augenscheinlich zu einer Überlagerung von Alterungseffekten.

Abbildung 6.15 zeigt eine Überlagerung der U_{CE} -Kurven eines DUTs mit Zement und eines DUTs mit Silikon. Es ist zu erkennen, dass die Verläufe der Spannung U_{CE} zu Beginn des PCT nahezu deckungsgleich sind. Es sind bei diesem Aufbau scheinbar beide Verkapselungsmaterialien von den gleichen Alterungsmechanismen betroffen. Ab einer Zyklenzahl von ca. 15.000 beginnt die Kurve des Silikon-DUTs rapide zu steigen, während die Kurve des Zement-DUTs ihren stetigen Verlauf weiterführt. Die U_{CE} des Silikons steigt so stark, dass es frühzeitig zu einem Ausfall des Prüflings kommt. Auf Grundlage aller bestehenden Kenntnisse muss es sich bei diesem Anstieg um einen Bonddraht-Liftoff handeln, welcher sich mit einer bereits vorhandenen Lotdegradation überlagert.

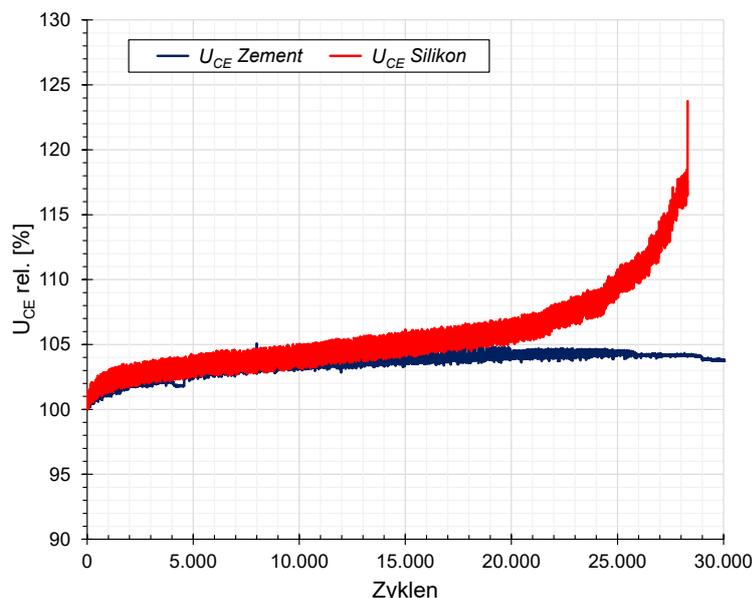


Abbildung 6.15: Überlagerung der U_{CE} -Kurven zweier DUTs; eines mit Silikon-Weichverguß und eines mit Zement

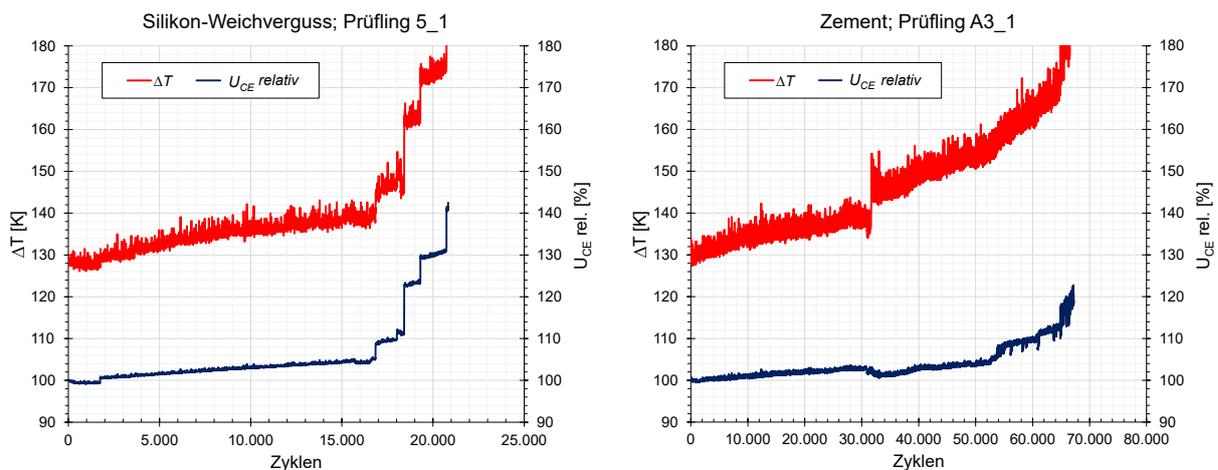


Abbildung 6.16: Vergleich der ΔT - und U_{CE} -Verläufe eines anorganisch und eines konventionell verkapselten Prüflings des power cyclings mit kleinen Halbleitern

Beim Zement wird dieser Liftoff auf Grund der mechanischen Stabilisierung der Bonddrähte zunächst verhindert. Der Prüfling wird weiter getestet, wodurch es zu einer zunehmenden Lotdegradation kommt. Das Verhindern des frühzeitigen Bonddraht-Liftoffs kann anhand eines weiteren PCTs bewiesen werden. Bei diesem Test werden deutlich kleinere Halbleiter eingesetzt. Im bisher diskutierten PCT ist ein Halbleiter mit einer Fläche von $193,16 \text{ mm}^2$ verwendet worden. Die kleinen Halbleiter haben lediglich eine Fläche von $80,82 \text{ mm}^2$. Durch die Halbierung der Halbleiterfläche kommt es zu einer Reduzierung thermomechanischer Spannungen zwischen den Komponenten Substrat, Lot und Halbleiter. Eine initiale Lotdegradation wird hierdurch verhindert.

Mit den kleinen Halbleitern wird ein vergleichbarer Lebensdauergewinn zwischen Silikon und Zement erzielt. Wie in Abbildung 6.16 zu erkennen ist, liegt hier bei dem mit Silikon verkapselten DUT eindeutig ein Bonddraht-Liftoff als dominanter Fehlermode vor. Löst sich ein Draht auf Grund des thermomechanischen Stresses von der oberseitigen Metallisierung des Halbleiters, führt dies zu einem Querschnittsverlust im elektrischen Lastpfad. Der gleiche Strom muss nun durch einen verringerten Leistungsquerschnitt fließen. Dies hat einen Anstieg des elektrischen Widerstandes zur Folge, was die über dem Halbleiter abfallende Spannung U_{CE} erhöht.

Gleichzeitig wird durch die Erhöhung des elektrischen Widerstandes die entstehende Verlustleistung vergrößert. Die maximale Halbleitertemperatur steigt, wodurch resultieren muss, dass der Temperaturhub ΔT steigt. Es handelt sich hierbei um einen unmittelbaren Vorgang, was den sprunghaften Anstieg der beiden Messgrößen (siehe Abbildung 6.16 links; ab ca. 17.000 Zyklen) erklärt. Dieser charakteristische Kurvenverlauf ist bei den großen Halbleitern auf Grund der Überlagerung mehrerer Effekte (Lotdegradation und Bonddraht-Liftoff) nicht eindeutig zu erkennen.

Wie bereits postuliert, wird auch bei den kleinen Halbleitern der frühzeitige Bonddraht-Liftoff durch die mechanische Stabilisierung durch den Zement verhindert. Dies hat einen Wechsel des dominanten Fehlermode zur Lotdegradation zur Folge. Zum einen ist dies anhand des stetigen Anstiegs der Messgrößen ΔT und U_{CE} zu erkennen (siehe Abbildung 6.16 rechts). Zum anderen kann dieser Sachverhalt anhand von Schlifffbildern belegt werden.

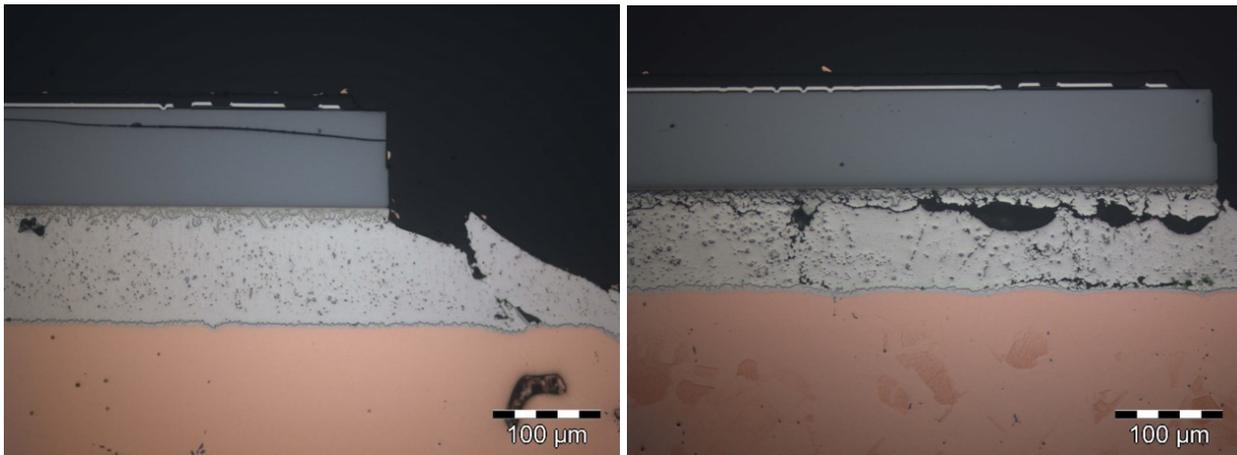


Abbildung 6.17: Vergleich des Zustandes des Chipotes nach Test; links: Silikon-Weichverguss nach 19.167 Zyklen; rechts: anorg. Verkapselung nach 67.389 Zyklen; Aufnahmen zur Verfügung gestellt von Bianca Böttge, FhG IMWS

In Abbildung 6.17 ist ein Vergleich zweier Module dargestellt. Die Aufnahme des anorganisch verkapselten Moduls (rechts) weist ein hohes Maß an Lotdegradation auf. Die Lotschicht des mit Silikongel verkapselten Prüflings ist jedoch vollständig intakt. Durch den frühzeitigen Defekt durch Bonddraht-Liftoff im Silikon-Weichverguss wird das Lot deutlich weniger belastet. Das Lot eines mit Zement vergossenen Prüflings ist so stark degradiert, dass der thermische sowie elektrische Widerstand der Verbindungsschicht immens gestiegen ist. Der Anstieg ist so verheerend, dass die gestiegene Maximaltemperatur des Halbleiters zu einem ähnlichen Bonddraht-Liftoff mit Lawinen-Effekt wie bei einem mit Silikon verkapselten Modul führt. Es ist jedoch zu beachten, dass dies erst bei einer Zyklenzahl von ca. 67.000 Zyklen eintritt.

Es ist demnach festzuhalten, dass der Einsatz eines anorganischen Verkapselungsmaterials hinsichtlich der Leistungsfähigkeit im aktiven Lastwechseltest nicht mit einer konventionellen Vergussmasse gleichzusetzen ist. Die zu erwartende Lebensdauer wird im Vergleich zu einem Silikon-Weichverguss um einen Faktor von 2,3 vergrößert. Weiterhin findet ein Wechsel des dominanten Fehlermode statt. Während bei einem konventionellem Silikongel ein Bonddraht-Liftoff für den Ausfall der Module verantwortlich ist, wird dieser bei einer anorganischen Verkapselung verhindert.

Durch die mechanische Stabilisierung des Vergussmaterials wird ein Liftoff so lange verhindert, bis es an einer anderen Position in der Baugruppe zu einem Ausfall kommt. Die dadurch hervorgerufene Chipplotdegradation ist der dominante Fehlermode bei anorganischen Verkapselungsmaterialien. Die Tatsache der Vervielfachung der Lebensdauer sowie ein Wechsel des dominanten Ausfallmechanismus bestätigen die Anwendbarkeit von anorganischen Verkapselungsmaterialien hinsichtlich der Leistungsfähigkeit im aktiven Lastwechseltest.

6.4 Bewertung der Anwendbarkeit anorganischer Verkapselungsmaterialien

Die Anwendbarkeit anorganischer Verkapselungsmaterialien in leistungselektronischen Baugruppen ist in Kapitel 6.1 beschrieben. Die Definition der Anwendbarkeit wird auf zwei Komponenten gestützt. Damit ein Material als anwendbar gelten kann, müssen grundlegende Materialeigenschaften, wie zum Beispiel Verarbeitbarkeit sowie mechanische und thermomechanische Eigenschaften, dem beschriebenen Anforderungsprofil entsprechen.

Weiterhin darf die grundlegende Funktionalität des Leistungshalbleiters nicht beeinträchtigt werden. Diese Funktionalität ist durch drei Zustände definiert worden. Diese Zustände „leiten“, „sperrern“ und „schalten“ werden über die Zuverlässigkeitsuntersuchungen HTRB und power cycling evaluiert. Das power cycling nimmt hierbei die Stellung eines Summentests ein, da hierbei nicht nur die direkten Wechselwirkungen mit dem Halbleiter, sondern auch die Erfüllung nahezu aller Anforderungen an die vorher genannten grundlegenden Materialeigenschaften berücksichtigt werden kann.

Die Anforderungen, der in Kapitel 6.2 beschriebenen Materialeigenschaften, können von den untersuchten anorganischen Vergussmassen vollständig erfüllt werden. Die mechanischen, chemischen sowie dielektrischen Eigenschaften anorganischer Materialien sind laut den durchgeführten Untersuchungen als anwendbar einzustufen. Eine anwendbare Verarbeitbarkeit ist ebenfalls gegeben. Im Vergleich zu konventionellen polymeren Verkapselungsmaterialien, insbesondere einem Silikon-Weichverguss, sind vereinzelte grundlegende Materialeigenschaften übertroffen worden. Ein Beispiel hierfür bilden die thermomechanischen Eigenschaften eines Zementes in Hinsicht auf den aktiven Lastwechseltest (siehe Kapitel 6.3.2).

Lediglich die dielektrischen Eigenschaften entsprechen zwar dem grundlegenden Anforderungsprofil eines Verkapselungsmaterials, befinden sich jedoch auf einem niedrigem Niveau im Vergleich zu Polymeren. Während ein Silikon-Weichverguss eine Durchschlagsfestigkeit von 17 kV/mm bis hin zu >30 kV/mm bieten kann [42] [44], liefern die hier untersuchten anorganischen Verkapselungsmaterialien Durchschlagsfestigkeiten von 6 kV/mm bis 14 kV/mm.

Damit sind sie, wie in Kapitel 6.2.3 beschrieben, prinzipiell in leistungselektronischen Baugruppen einsetzbar. Sie bieten jedoch einen geringeren Sicherheitsfaktor zur Mindestanforderung, wodurch diese Eigenschaft einen Einfluss auf die Gestaltung eines Leistungsmoduls nehmen kann. Es ist möglich, dass gewisse Isolationsstrecken innerhalb des Moduls nicht mehr ausreichend dimensioniert sind und neue Gestaltungsregeln abgeleitet werden müssen. Demnach ist es erstrebenswert, die dielektrischen Qualitäten anorganischer Verkapselungsmaterialien zu verbessern.

Im HTRB hat die untersuchte Vergussmasse keinen Einfluss auf die Charakteristika der Halbleiter genommen. Die statischen Parameter der Testvehikel waren vor und nach dem Versuch unverändert. Während des Tests sind die entstehenden Leckströme ($I_{CE,S}$) in-situ erfasst und dokumentiert worden. Auch hier sind keine Auffälligkeiten zu verzeichnen. Der Versuch ist im Sinne der Anwendbarkeit in Hinsicht auf die Zustände „sperrern“ und „schalten“ als erfolgreich zu betrachten.

Der aktive Lastwechseltest hat ebenfalls ein positives Ergebnis hervorgebracht. Durch den Einsatz eines anorganischen Verkapselungsmaterials konnte die charakteristische Lebensdauer eines Moduls um den Faktor 2,3 vergrößert werden. Dies ist auf die mechanische Stabilisierung der Bonddrähte durch die anorganische Vergussmasse zurückzuführen. Die Lebensdauersteigerung zwischen einem Silikongel und einem EMC entspricht nach [57] einem Faktor von ca. 2,0. Weiterhin ist beim Zement ein Wechsel des dominanten Fehlermechanismus durch die Stabilisierung hervorgerufen worden. Der Fehlermode ändert sich vom Bonddraht-Liftoff oberhalb zu einer Lotdegradation unterhalb des Halbleiters.

Hierbei kann in Ausblick gestellt werden, dass eine weitere Erhöhung der Lebensdauer durch Anpassung der Aufbau- und Verbindungstechnik möglich ist. Mittels Substitution des Chiplozes durch eine robustere Verbindungstechnik, wie zum Beispiel Silbersintern (siehe Kapitel 2.2.2), könnte das mechanische Gefüge unterhalb des Halbleiters stabiler gestaltet werden, wodurch eine Materialdegradation weitestgehend verhindert wird. Die Lebensdauer kann hierdurch erneut vergrößert werden, ohne die Oberseitenkontaktierung durch eine Alternativtechnologie, wie zum Beispiel Kupferdrähte oder -bändchen, ersetzen zu müssen [34].

Das power cycling zeigt erfolgreich die Anwendbarkeit in Hinsicht auf die Halbleiterzustände „leiten“ und „schalten“. Abschließend lässt sich zum power cycling festhalten, dass anhand dieses Versuches nicht nur die Anwendbarkeit von anorganischen Verkapselungsmaterialien bewiesen, sondern zusätzlich eine Lebensdauersteigerung erzielt worden ist.

Auf Grundlage der oben beschriebenen Ergebnisse lässt sich eine positive Aussage bezüglich der Anwendbarkeit anorganischer Verkapselungsmaterialien in leistungselektronischen Baugruppen formulieren. Die untersuchten Materialien sind allen Anforderungen des Anwendungsprofils gerecht geworden. Dies kann sowohl auf die grundlegenden Materialeigenschaften als auch auf die durchgeführten Zuverlässigkeitsuntersuchungen bezogen werden.

Folglich ist dadurch ein Beweis der Anwendbarkeit erbracht, welcher gleichzeitig einen Beweis der in Kapitel 6 aufgestellten 1. Arbeitshypothese darstellt. Es ist festzuhalten, dass anorganische Materialien als Verkapselungsmaterial leistungselektronischer Module anwendbar sind.

7 Erweiterte Modulkonzepte zur optimalen Entwärmung

Nachdem die Anwendbarkeit von anorganischen Verkapselungsmaterialien für leistungselektronische Baugruppen bewiesen worden ist, gilt es, die Möglichkeiten zur thermischen Optimierung zu analysieren. Die anorganischen Vergussmassen bieten auf Grundlage ihrer erhöhten thermischen Leitfähigkeit neue Möglichkeiten in Bezug auf das Erschließen neuer thermischer Pfade im Leistungsmodul. Im Folgenden werden erweiterte Modulkonzepte zur optimalen Entwärmung leistungselektronischer Baugruppen vorgestellt. Hierbei gilt es, die folgende 2. Arbeitshypothese zu beweisen: Die vorgestellten Modul- und Kühlungskonzepte tragen zu einer effektiveren Entwärmung der Halbleiter und somit zu einer Vergrößerung der Lebensdauer bei.

Zunächst soll anhand einer simulatorischen Grundlagenbetrachtung der Einfluss einer erhöhten Wärmeleitfähigkeit des Verkapselungsmaterials analysiert werden. Hierfür werden thermisch transiente FEM-Simulationen durchgeführt. Ein besonderes Augenmerk wird hierbei auf die für die Zuverlässigkeit und Lebensdauer kritischen Komponenten wie Halbleiter und Bonddrähte gerichtet. Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, wird als Bewertungskriterium hierfür der $R_{th,ja}$ herangezogen. Weiterhin werden hierbei Unterschiede hinsichtlich des dynamischen und stationären Verhaltens des thermischen Widerstandes hervorgehoben.

Um den Beweis der oben genannten Hypothese zu erbringen, werden zwei Ansätze zur thermischen Optimierung leistungselektronischer Module verfolgt. Der erste Ansatz ist ein minimalinvasiver. Hierbei gilt es, neue thermische Pfade zu erschließen und auszuprägen, ohne die grundlegende Struktur sowie die geometrischen Ausmaße (footprint) des Moduls zu modifizieren. Es ist hierbei zu beachten, dass sowohl die elektrische als auch die mechanische Kopplung an das übrige System unverändert bleiben soll. Aus diesen Anforderungen heraus ergibt sich die minimalinvasive Herangehensweise.

Ein weiterer Ansatz soll die grundlegenden Strukturen des leistungselektronischen Systems hinterfragen und hinsichtlich thermischer Leistungsfähigkeit neu gliedern. Die Randbedingungen, die im ersten minimalinvasiven Ansatz verfolgt werden (gleiche geometrische Abmessungen, footprint-kompatibel), haben für diesen Ansatz keine Bedeutung. In Bezug auf das leistungselektronische System soll dies ein maximalinvasiver Ansatz sein, welcher das System einzig und allein auf die thermische Leistungsfähigkeit (geringer thermischer Widerstand) ausrichten soll. Alle übrigen Teilaspekte (z.B. örtliche Anordnung der elektrischen Anschlüsse) sind unterzuordnen.

Sowohl der minimal- als auch der maximalinvasive Ansatz zur Optimierung der Entwärmung leis-

tungselektronischer Module werden zunächst anhand von thermischen FEM-Simulation grundlegend bewertet. Anschließend werden beide Ansätze konstruktiv umgesetzt und zu Prototypen verarbeitet. Anhand dieser Prototypen werden die verwendeten Simulationsmodelle verifiziert. Dies soll sicherstellen, dass die Erkenntnisse, welche aus den Ergebnissen der Modelle generiert werden, geltend sind. Abschließend wird die oben aufgestellte Hypothese anhand der Ergebnisse der Simulation sowie der Experimente hinsichtlich ihrer Gültigkeit bewertet.

7.1 Einfluss der Wärmeleitfähigkeit auf den thermischen Widerstand

Der Einfluss eines Verkapselungsmaterials mit erhöhter Wärmeleitfähigkeit wird anhand von thermischen transienten FEM-Simulationen grundlegend analysiert. Hierfür wird das in Kapitel 5.6 beschriebene Simulationsmodell mit den dazugehörigen Parametern verwendet. Im Folgenden werden die Ergebnisse in Bezug auf den $R_{th,ja}$ respektive der Halbleitertemperatur eines Leistungsmoduls analysiert.

Die Ergebnisse der Simulation sind in Abbildung 7.1 dargestellt. Der erweiterte Zeitbereich der Berechnung (bis 1000 s) ermöglicht es, die Zeitachse in zwei Bereiche einzuteilen. Der Abschnitt von 0,001 s bis 100 s ist der dynamische Bereich, in dem sich die Baugruppe aufgrund der eingprägten Verlustleistung aufheizt. Hier dargestellt ist die thermische Impedanz ($Z_{th,ja}$). Jenseits der 100 s befinden sich die Halbleitertemperaturen in einem eingeschwungenen bzw. stationären Zustand (steady state). Dieser Bereich stellt den thermischen Widerstand ($R_{th,ja}$) dar.

Das Erhöhen der thermischen Leitfähigkeit der Vergussmasse führt zu einer signifikanten Verbesserung der thermischen Impedanz. Wird von einer Wärmeleitfähigkeit von 10 W/m·K ausgegangen, so liegt der $R_{th,ja}$ bei einer Zeitkonstante von 4 s bei 0,388 K/W. Die Silikon-Referenz mit

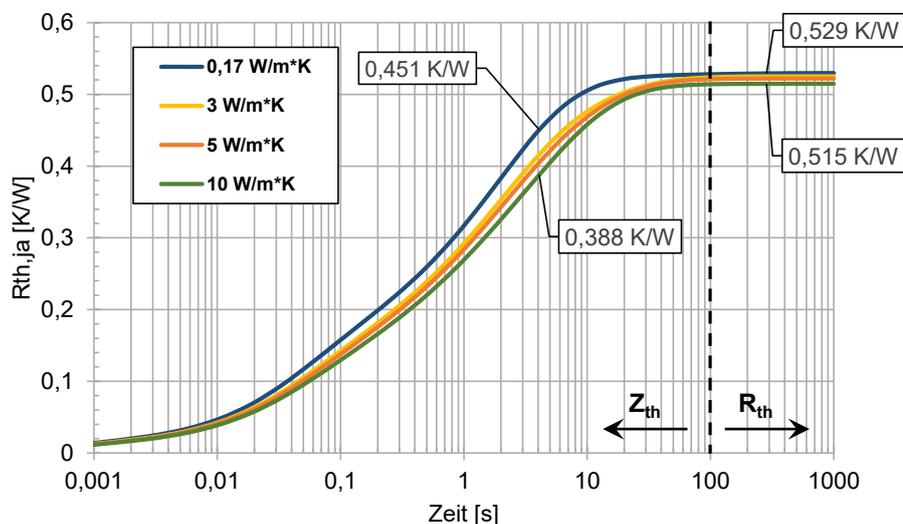


Abbildung 7.1: Ergebnisse thermisch transienter FEM-Simulation zum Einfluss der Wärmeleitfähigkeit

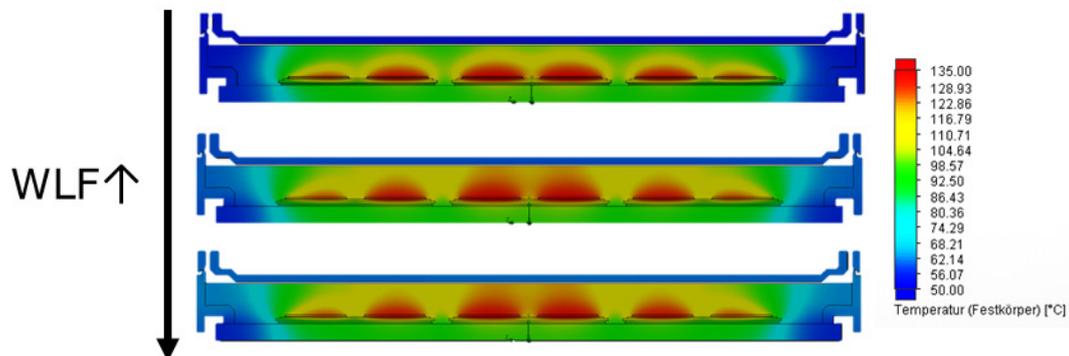


Abbildung 7.2: Schnittdiagramm des Modells mit Isothermen mit zunehmender Wärmeleitfähigkeit von oben nach unten

einer Wärmeleitfähigkeit von $0,17 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ liefert einen $R_{\text{th,ja}}$ von $0,451 \text{ K/W}$ zur gleichen Zeitkonstante. Demnach kann der $R_{\text{th,ja}}$ im dynamischen Bereich um bis zu 14% reduziert werden.

Im stationären Zustand jenseits der 100 s wird das thermische Verhalten des Moduls nur marginal verbessert. Die Referenz erzeugt einen $R_{\text{th,ja}}$ von $0,529 \text{ K/W}$, während ein Modul mit einer hypothetischen Vergussmasse mit $10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ einen $R_{\text{th,ja}}$ von $0,515 \text{ K/W}$ liefert. Obgleich die hier vorliegende Wärmeleitfähigkeit um den Faktor 60 größer ist, als das der Silikongel-Referenz, kann der R_{th} um lediglich $2,8\%$ reduziert werden. Dieses Verhalten ist durch die Abwesenheit eines geeigneten Entwärmungspfades zu begründen.

Unter Bezugnahme der Temperaturverteilung innerhalb des Moduls in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit zeigt sich, dass es eines zusätzlichen Entwärmungspfades bedarf. Die in Abbildung 7.2 dargestellten isothermen Schnittdiagramme des untersuchten Moduls zeigen, dass sich die thermische Energie mit zunehmender Wärmeleitfähigkeit des Vergusses besser in der Verkapselung verteilt. Dies ist zum einen an der erhöhten Temperatur in den Randbereichen des Moduls zu erkennen (Abbildung 7.2 Mitte und unten). Zum anderen ist zu erkennen, dass mit höherer Wärmeleitfähigkeit die Akkumulation von thermischer Energie direkt über dem Halbleiter (rote Bereiche in Abbildung 7.2) über einen erweiterten Bereich im Verguss verteilt wird.

Das bedeutet, dass sich der Wärmestau direkt über dem Halbleiter zeitlich betrachtet besser im Verguss verteilen kann. Dies führt zu dem verbesserten Z_{th} und dem allgemein verbesserten dynamischen Verhalten der Baugruppe. Sobald die thermische Energie jedoch die Grenze des Systems (Vergussoberkante) erreicht hat, besteht keine Möglichkeit für die Energie, effektiv aus dem System zu entweichen. Hierdurch kommt es zu einer erneuten Ansammlung der thermischen Energie an der Oberkante des Vergusses.

Durch die angestaute Wärme an der Baugruppengrenze ist der Temperaturgradient zwischen dem Halbleiter und der Vergussoberkante verringert worden. Der Wärmestrom in Richtung Systemgrenze wird reduziert. Das Ergebnis ist eine Rückkopplung der thermischen Energie, welche die Halbleitertemperatur und damit den $R_{\text{th,ja}}$ auf einem ähnlichen Niveau hält wie die Wärmeleitfähigkeit.

higkeit der Referenz.

Es ist festzuhalten, dass ein Zuwachs der Wärmeleitfähigkeit des Verkapselungsmaterials zu einer Verbesserung des dynamischen Verhaltens des Moduls beiträgt. Der Verlauf der in Abbildung 7.1 dargestellten Z_{th} -Kurve ist bei höheren Wärmeleitfähigkeiten deutlich abgeflacht. Die thermische Kapazität des Vergusses kann schneller gefüllt werden. Ist diese Kapazität jedoch vollends gefüllt, zeigt die erhöhte Wärmeleitfähigkeit lediglich eine marginale Verbesserung des thermischen Widerstandes.

Die geringe Reduktion des thermischen Widerstandes im stationären Bereich ist auf die fehlende Möglichkeit der Entwärmung zurückzuführen. Die thermische Energie gelangt schnell an die Systemgrenze, kann jedoch von hier nicht entweichen. Um das volle Potential der erhöhten Wärmeleitfähigkeit auszunutzen und auch den stationären thermischen Widerstand signifikant zu reduzieren, bedarf es eines zusätzlichen Entwärmungspfades. Dieser ist notwendig, um die akkumulierte thermische Energie aus der Baugruppe bzw. dem System abführen zu können.

7.2 Minimalinvasiver Ansatz zur Optimierung der Modulentwärmung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Analyse der thermischen Leistungsfähigkeit neuartiger Modulkonzepte unter Verwendung anorganischer Verkapselungsmaterialien. In einem ersten minimalinvasiven Ansatz sollen neue thermische Pfade erschlossen werden, ohne die grundlegende Struktur und Schnittstellen des leistungselektronischen Systems rund um das Modul zu modifizieren.

Die Ergebnisse aus Kapitel 7.1 haben gezeigt, dass eine schiere Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit auf Grund von fehlenden Entwärmungspfaden bzw. Wärmesenken nur marginale Auswirkungen auf den $R_{th,ja}$ hat. Diese Erkenntnis bildet die Grundlage für den minimalinvasiven Ansatz, welcher sich in dem thermischen Masseschluss manifestiert. Im Folgenden wird dieser beschrieben und analysiert.

7.2.1 Thermischer Masseschluss

Die Tatsache, dass es bei einer erhöhten Wärmeleitfähigkeit zu einer Ansammlung thermischer Energie an der oberen Grenze der Verkapselung zur Umgebung kommt, führt zu dem Schluss, dass diese Wärme durch eine konstruktive Maßnahme abgeführt werden muss. Ohne eine derartige Maßnahme kann der stationäre thermische Widerstand nicht signifikant reduziert werden.

Eine oberseitig montierte Wärmesenke (Kühler) kann Abhilfe leisten. Allerdings ist die Prämisse dieses Ansatzes minimalinvasiv in Bezug auf das leistungselektronische System zu sein. Da sich oberhalb des Moduls die periphere Steuerelektronik des Systems befindet, kann hier nicht ohne Weiteres eine zusätzliche Wärmesenke implementiert werden.

Um dieser Tatsache entgegen zu wirken, wird eine 3 mm starke Kupferplatte auf der Oberseite des Verkapselungsmaterials montiert (siehe Abbildung 7.3). Diese fungiert mit ihrer hohen ther-

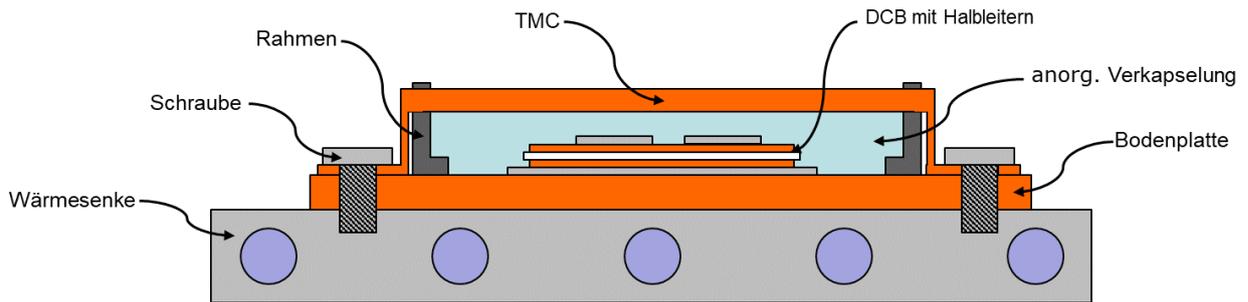


Abbildung 7.3: Schematische Darstellung Leistungsmodul mit TMC

mischen Kapazität als Puffer. Die Wärme, die die Oberseite des Vergusses erreicht, kann hier aufgenommen und zwischengespeichert werden. Weiterhin ist diese Kupferplatte sowohl mechanisch als auch thermisch mit der Bodenplatte des Moduls gekoppelt. Diese Kopplung ermöglicht das Abführen der sich in der Kupferplatte befindlichen Wärme in Richtung des Kühlers des Moduls. Die Kombination aus Kupferplatte und besagter Kopplung bildet einen thermischen Masseschluss und soll fortwährend TMC (thermal **m**ass **c**ircuit) genannt werden. Während bei einem Leistungsmodul ohne TMC der thermische Übergang zwischen der Vergussoberseite und der Umgebung mit einem niedrigen Wärmeübergangskoeffizienten h behaftet ist, kann unter Verwendung des TMC der Wärmeübergangskoeffizient der unterseitigen Kühlung genutzt werden. Hier ist das h um den Faktor 10^2 bis 10^3 größer als auf der Oberseite. Auf Grund des vorliegenden Temperaturgradienten entsteht eine Sogwirkung.

Durch diesen Sog kann die oberseitige Wärme abgetragen und über die unterseitige Senke aus dem System abgeführt werden. Die Oberseite des Verkapselungsmaterials ist mit der thermischen Senke (elektrisch: Masse) kurzgeschlossen (siehe Abbildung 7.4). Dadurch entsteht besagter thermischer

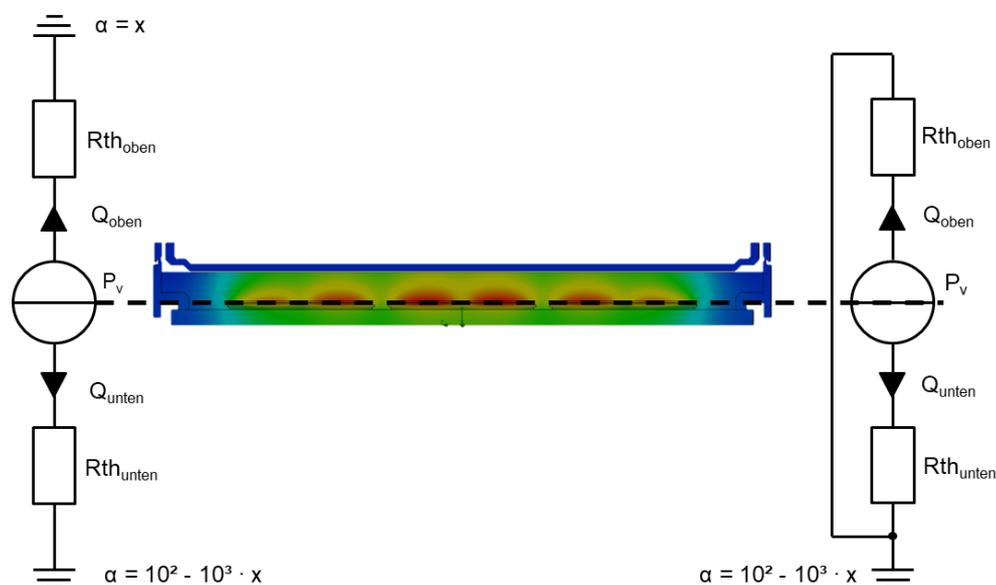


Abbildung 7.4: Vereinfachtes thermisches Ersatzschaltbild eines Leistungsmoduls mit und ohne TMC

Masseschluss. Die hohe thermische Kapazität des Kupfers kann Leistungsspitzen aufnehmen und über die mechanisch-thermische Kopplung zur Bodenplatte die akkumulierte Wärme kontinuierlich an die Umgebung abgeben.

Durch diese Maßnahme kann neben der Reduzierung der thermischen Impedanz auch eine Reduzierung des stationären thermischen Widerstandes erzielt werden, ohne die geometrischen Ausmaße des Moduls oder die periphere Elektronik zu beeinflussen. Nachfolgend soll diese Aussage anhand von thermischen FEM-Simulationen bewertet werden.

7.2.2 Bewertung anhand von thermischer Simulation

Für die thermisch transiente Analyse des TMC wird das gleiche Simulationsmodell eines E3 Moduls verwendet wie in Kapitel 7.1. Das Modell wird hierbei lediglich um den thermischen Masseschluss erweitert. Alle übrigen Randbedingungen bleiben konstant, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu wahren.

Die Ergebnisse der Simulation sind in Abbildung 7.5 dargestellt. Die Referenz, ein E3 Modul verkapselt mit Silikongel ($0,17 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), liefert weiterhin einen stationären $R_{\text{th,ja}}$ von $0,529 \text{ K/W}$. Ein Modul mit TMC und einer Wärmeleitfähigkeit des Verkapselungsmaterials von $10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ erzielt einen $R_{\text{th,ja}}$ von $0,485 \text{ K/W}$. Demnach ist unter Verwendung des TMC eine Reduzierung des stationären $R_{\text{th,ja}}$ von bis zu $8,5 \%$ möglich.

Neben dem stationären Verhalten wird ebenfalls die thermische Impedanz durch den TMC verbessert. Bei einer Zeitkonstante von 7 s wird eine maximale Reduktion $0,086 \text{ K/W}$ ermittelt. Dies entspricht einer relativen Reduktion um $17,6\%$. Weiterhin fällt auf, dass die Kurven eines Moduls mit $10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ und eines Moduls mit der gleichen Wärmeleitfähigkeit und einem TMC bis zu einer Zeitkonstante von 1 s deckungsgleich sind. Ab diesem Zeitpunkt erreicht die vom Halbleiter

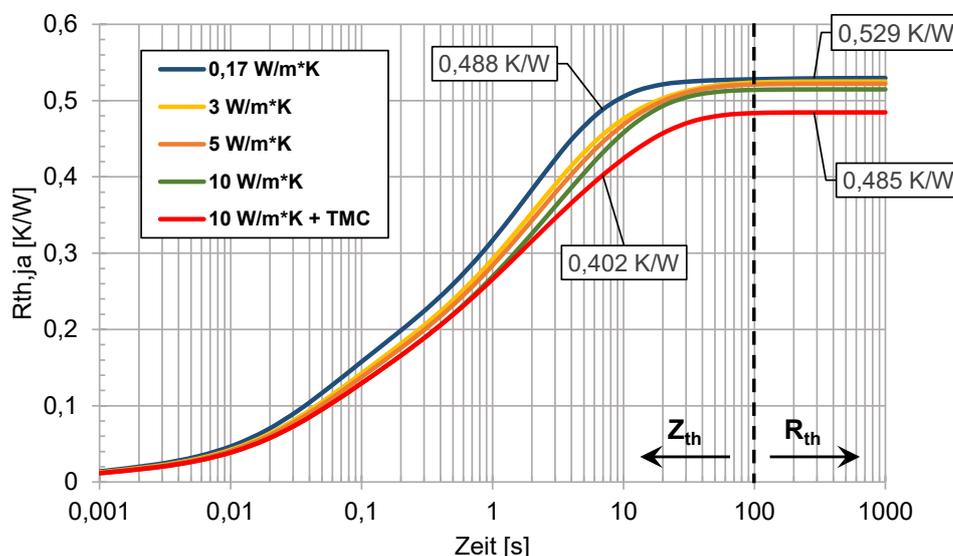


Abbildung 7.5: Ergebnisse thermisch transienter FEM-Simulation zum Einfluss der Wärmeleitfähigkeit mit TMC

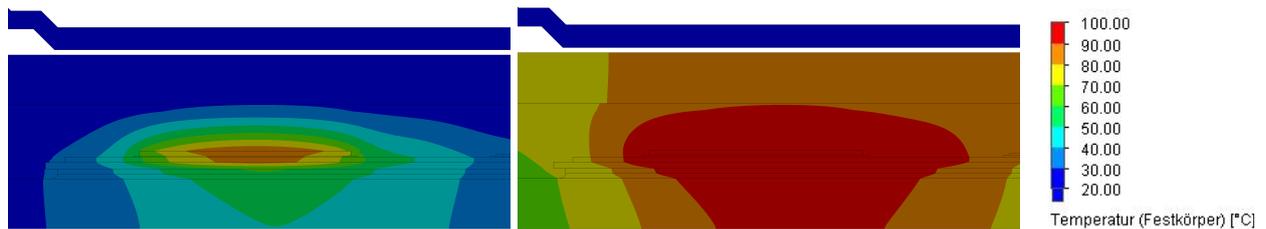


Abbildung 7.6: Isotherme Schnittdarstellungen der Simulationsergebnisse; links: $t=1$ s, rechts: $t=1000$ s

ausgehende thermische Energie die Grenze zwischen Vergussmasse und TMC. Dies wird auch in Abbildung 7.6 ersichtlich.

Jenseits dieses Zeitpunktes verläuft die Z_{th} -Kurve des TMC-Moduls deutlich flacher. Da in diesem Simulationsmodell von einer idealen Kühlung ausgegangen wird, ist die Sperrschichttemperatur T_j die einzig veränderliche Größe zur Bestimmung des $R_{th,ja}$. Somit besteht eine direkte Proportionalität der beiden Größen.

Der flachere Verlauf der Z_{th} -Kurve ist demnach mit einem flacheren Anstieg der Halbleitertemperatur T_j gleichzusetzen. Dies wiederum ist auf das Aufladen der thermischen Kapazität des TMCs zurückzuführen. Das Kupfer nimmt thermische Energie auf, wodurch das Aufheizen des Halbleiters im dynamischen Bereich gedämpft wird. Gleichzeitig fließt schon ein geringer Anteil der Wärme über den thermischen Masseschluss in Richtung der Kühlung und verlässt dort das System. Mit fortschreitender Zeit wird der Wärmestrom in die Kapazität des TMC kleiner und der abfließende Wärmestrom größer. Zu einem bestimmten Zeitpunkt erreicht das Verhältnis aus zu- und abfließendem Wärmestrom aus dem TMC ein Gleichgewicht. Der sogenannte steady-state ist erreicht und der stationäre thermische Widerstand hat sich vollständig ausgebildet. Dieser Zustand wird in Abbildung 7.7 dargestellt.

Anhand der hierigen Darstellung der Wärmestromdichte ist zu erkennen, wie es innerhalb des TMC zu einem lateralen Wärmefluss in Richtung der Verschraubung kommt. An der Verschrau-

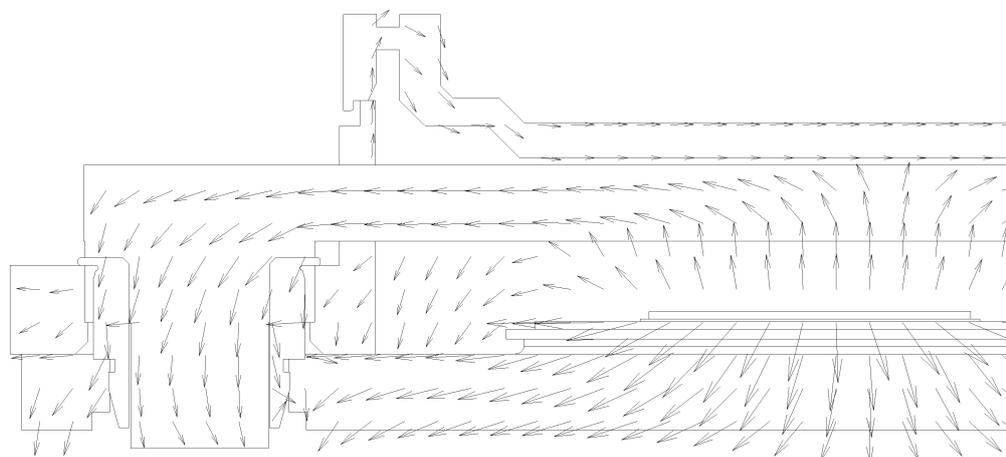


Abbildung 7.7: Vektordarstellung der Wärmestromdichte in Schnittdarstellung des Simulationsmodells, $t=1000$ s

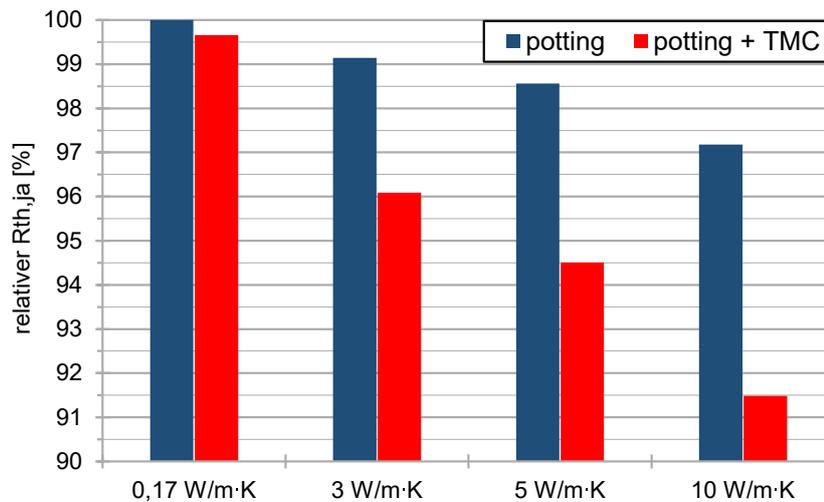


Abbildung 7.8: Relativer $R_{th,ja}$ in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit und der verwendeten thermischen Pfade

bung selbst kommt es wiederum zu einem vertikalen Wärmefluss in Richtung der Wärmesenke. Somit wird die thermische Energie von der Oberseite der Verkapselung abgetragen und seitlich am Halbleiter vorbei aus dem System abgeführt.

Weitere Berechnungen haben ergeben, dass in Bezug auf den stationären $R_{th,ja}$ des Moduls eine Korrelation zwischen der Wärmeleitfähigkeit des Verkapselungsmaterials und der Drainage-Wirkung des TMC existiert. Abbildung 7.8 zeigt, wie sich der stationäre $R_{th,ja}$ verändert, wenn die Wärmeleitfähigkeit, ausgehend von der Referenz, erhöht wird.

Hier zeigt sich erneut, dass eine hohe Wärmeleitfähigkeit der Vergussmasse allein einen marginalen Einfluss auf den stationären $R_{th,ja}$ hat (2,8% Reduktion). Ebenso gestaltet sich der Einfluss des TMC bei geringer Wärmeleitfähigkeit des Verkapselungsmaterials. Unter Verwendung des TMC mit einem Silikon-Weichverguss (0,17 W/m·K) wird eine Reduktion des stationären $R_{th,ja}$ um lediglich 0,34% erreicht. Der TMC geht eine Wechselwirkung mit der Wärmeleitfähigkeit des Verkapselungsmaterials ein.

Ohne den zusätzlich implementierten thermischen Pfad durch den TMC kann die thermische Energie, die sich an der Oberseite des Vergusses ansammelt, nicht aus dem System entweichen. Ist die Wärmeleitfähigkeit des Verkapselungsmaterials zu gering und damit der thermische Widerstand ($R_{th,je}$) zwischen dem TMC und dem Halbleiter zu groß, staut sich die thermische Energie direkt über dem Halbleiter und erreicht den TMC nicht. Für eine optimale Entwärmung unter der Prämisse des minimalinvasiven Ansatzes ist sowohl eine hohe Wärmeleitfähigkeit des Verkapselungsmaterials als auch der zusätzliche Entwärmungspfad durch den TMC notwendig.

7.2.3 Experimenteller Nachweis

Nachdem die Funktionsweise des TMC in Kapitel 7.2.1 beschrieben und die Funktionalität in Kapitel 7.2.2 anhand von thermisch transienten FEM-Simulationen gezeigt worden ist, sollen diese Erkenntnisse abschließend experimentell verifiziert werden. Der experimentelle Nachweis soll anhand eines Rahmenmoduls des Typs E1 erfolgen (siehe Abbildung 7.9). Das Modul wird hinsichtlich der vorliegenden Halbleitertemperatur charakterisiert. Der Versuchsaufbau ist in Kapitel 5.5 beschrieben.

Die Ergebnisse der Z_{th} -Messung sind in Abbildung 7.10 dargestellt. Ein Rahmenmodul, verkapselt durch einen Silikon-Weichverguss ohne TMC, erzielt eine maximale Halbleitertemperatur von 128,4°C. Wird der Silikon-Weichverguss durch eine anorganische Vergussmasse substituiert, erreicht der Halbleiter eine Maximaltemperatur von 123,1°C. Demnach liegt eine Reduktion der Halbleitertemperatur um 5,3K vor.

Durch Verwendung des TMC erreicht der untersuchte Halbleiter eine Temperatur von 115,5°C. Dies ist eine erneute Reduktion der Maximaltemperatur um 7,6K im Vergleich zum Prüfling mit anorganischer Verkapselung ohne TMC. Bezogen auf die Referenz des Silikon-Weichvergusses liegt eine Reduktion der maximalen Halbleitertemperatur von 12,9K vor.

Die Ergebnisse der Messung decken sich sehr gut mit den Ergebnissen der thermischen Simulation. Sowohl der zeitliche Verlauf der aufgenommenen Kurven als auch der erreichte Endwert sind nahezu deckungsgleich. Es liegt eine mittlere Abweichung von 2,1K zwischen der Simulation und der Messung vor. Die Ergebnisse der Simulation sind demnach als ausreichend präzise zu bewerten. Das verwendete Simulationsmodell ist als valide zu betrachten. Die Funktionalität des TMC ist hiermit bewiesen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass durch den TMC ein neuer thermischer Pfad im leistungselektronischen Modul implementiert wird. Grundlegende thermische Simulationen haben gezeigt, dass das Erhöhen der Wärmeleitfähigkeit des Verkapselungsmaterials einen Einfluss auf das

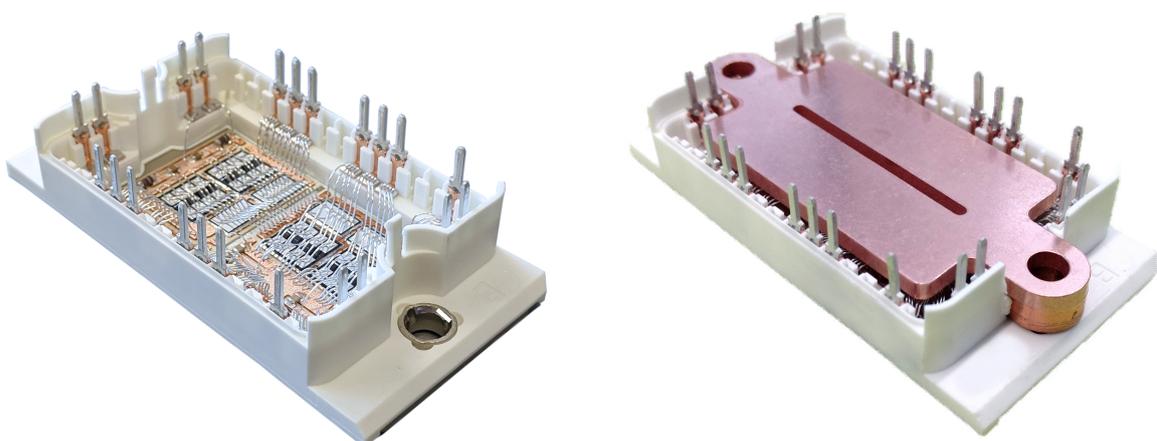


Abbildung 7.9: E1-Modul mit (rechts) und ohne TMC (links) als Vehikel zur experimentellen Verifikation des Simulationsmodells; Aufnahme vor Applikation des Verkapselungsmaterials

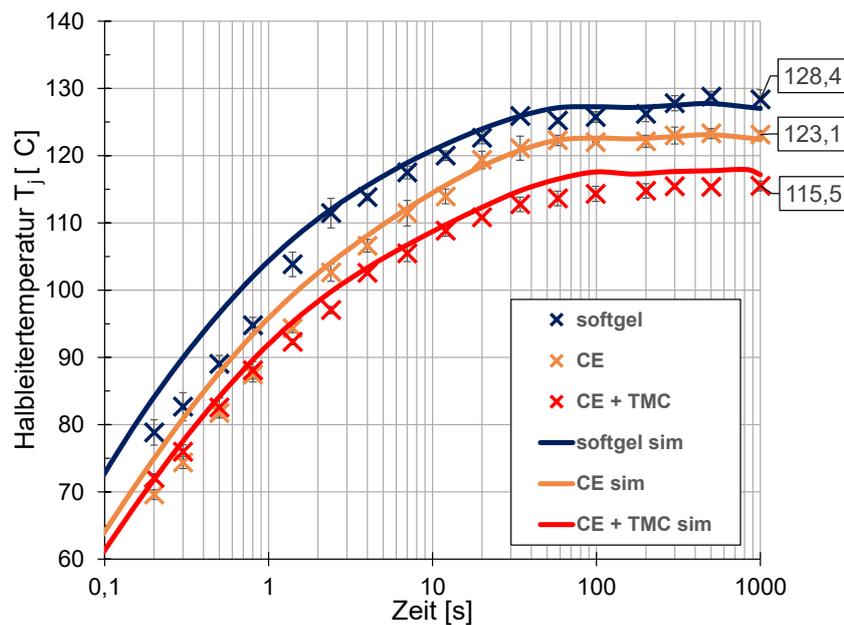


Abbildung 7.10: Ergebnisse der Z_{th} -Messung und thermisch transienter Simulation zur Verifikation des Simulationsmodells des TMC

dynamische Verhalten (Z_{th}) des Leistungsmoduls hat. Das stationäre Verhalten (R_{th}) wird jedoch keiner signifikanten Reduktion unterzogen. Durch den TMC lässt sich sowohl der dynamische als auch der stationäre $R_{th,ja}$ signifikant reduzieren, ohne die Schnittstellen zur Peripherie oder den Footprint des Moduls zu verändern.

Durch hierdurch erzeugte Reduktion der Halbleitertemperatur T_j erfährt das Modul ein geringeres Maß an thermomechanisch induziertem Stress. Somit erhöht sich bei gleichbleibender geführter Leistung die Zuverlässigkeit bzw. Lebensdauer des Moduls. Ebenso kann die geführte Leistung bei gleichbleibender Lebensdauer erhöht werden. Diese Option bietet die Möglichkeit, kleinere Halbleiterflächen zu verwenden, was effektiv die Verlustleistungsdichte des Moduls erhöht. So zeigt sich, dass der Einsatz des TMC mit anorganischen Verkapselungsmaterialien die Leistungsfähigkeit bzw. die Lebensdauer des Moduls signifikant erhöhen kann.

7.3 Maximalinvasiver Ansatz zur Optimierung der Modulentwärmung

Der TMC als minimalinvasiver Ansatz beinhaltet das Implementieren eines neuen thermischen Pfades innerhalb der vorhandenen Struktur eines Rahmenmoduls. Im Folgenden wird ein maximalinvasiver Ansatz beschrieben, welcher die Struktur sowie die geometrischen Konventionen eines leistungselektronischen Moduls zugunsten einer optimierten Entwärmung verwirft. Um diesen Ansatz zu verfolgen, werden zunächst grundlegende thermische Studien in Bezug auf die geometrische Ausprägung eines Leistungsmoduls durchgeführt. Diese werden anhand von FEM-Simulationen bewertet.

Die Ergebnisse besagter thermischer Simulationen dienen als Grundlage für den ersten konstruktionstechnischen Ansatz zur Erzeugung eines neuartigen Modulkonzepts mit optimierter Entwärmung. Nach der fundierten Ausarbeitung eines Konzepts wird dieses anhand von thermischen Simulationen analysiert und hinsichtlich der thermischen Leistungsfähigkeit bewertet.

Abschließend wird das verwendete Simulationsmodell mittels Experiment verifiziert. Für die Umsetzung des Experiments wird ein Prototyp des neuartigen Modulkonzepts gefertigt. Dieser Prototyp wird mittels R_{th} -Bestimmung mit dem Stand der Technik verglichen. Mit Hilfe der experimentell erzeugten Ergebnisse wird das Simulationsmodell verifiziert und hinsichtlich seiner Genauigkeit bewertet.

7.3.1 Untersuchung geometrischer Einflussfaktoren

Das leistungselektronische System verfolgt im Aufbau immer eine grundlegende Struktur. In dieser Arbeit steht das Leistungsmodul im Zentrum (siehe Abbildung 7.11). Um das System zu vervollständigen, wird zusätzlich eine Last, Kondensatoren sowie periphere Elektronik benötigt. Die periphere Elektronik beinhaltet Komponenten, wie zum Beispiel Treiberschaltungen und Controllerboards [4].

In einem konventionell aufgebautem System wird ausschließlich unterseitig gekühlt. Es liegt demnach eine einseitige bzw. unidirektionale Kühlung vor. Oberseitig des Moduls befindet sich die periphere Elektronik, welche auf Grund von parasitären Größen (z.B. Induktivitäten) örtlich betrachtet unmittelbar am Modul angesiedelt sein muss (siehe Abbildung 7.12). Lateral zum Leistungsmodul sind die Last und etwaige Kondensatoren angeordnet. Die örtliche Anordnung ist bei diesen Komponenten nicht so kritisch zu betrachten, wie bei der peripheren Elektronik (siehe Abbildung 7.11).

Ziel der hiesigen Untersuchung ist es, einen Vergleich der Leistungsfähigkeit einer konventionell einseitigen (unidirektionalen) Kühlung zu multidirektionalen Kühlungsstrategien herzustellen. Hierfür werden thermische FEM-Simulationen anhand von CAD-Modellen verwendet. Grundlage der Untersuchung bilden eine Vielzahl geometrischer Körper, welche repräsentativ für die verschiedenen Kühlungsstrategien sind. Basis dieser Körper sind Polygone unterschiedlicher Ord-

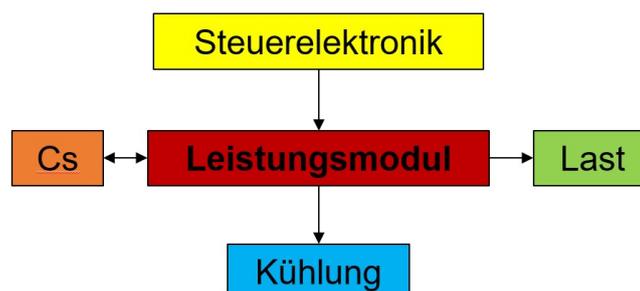


Abbildung 7.11: Schematische Darstellung eines leistungselektronischen Systems

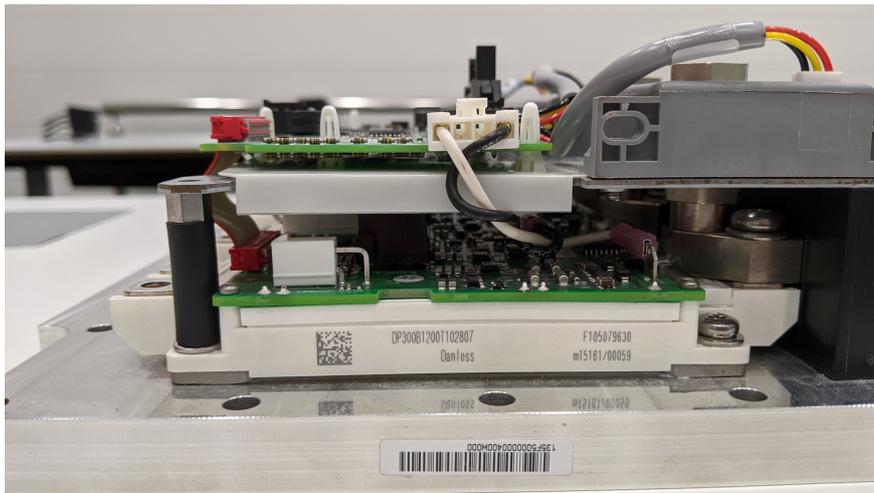


Abbildung 7.12: Seitliche Ansicht eines Umrichters ohne Gehäuse; im Zentrum: Rahmenmodul

nung, welche über eine Länge von 50 mm in die dritte Dimension ausgetragen werden (siehe Abbildung 7.13). Voruntersuchungen haben gezeigt, dass bei einer Länge von 50 mm keine thermische Energie an den Stirnflächen der Körper ankommt. Sie sind demnach als virtuell unendlich zu betrachten, wodurch sichergestellt wird, dass die Länge in Z-Richtung als Einflussfaktor der Untersuchung zu vernachlässigen ist.

Ausgehend von einer einseitigen Kühlung wird die Anzahl der möglichen Entwärmungspfade inkrementell erhöht. Dieser Zuwachs an möglichen Kühlflächen endet mit n Kühlflächen, also einem Zylinder bzw. einer omnidirektionalen Kühlung. Im Zentrum eines jeden Polygonkörpers befindet sich eine sphärische Quelle mit einem Radius von 3 mm. Diese Quelle wird in der Simulation mit einer Verlustleistung von 3 W beaufschlagt.

Die Kühlflächen der Volumenkörper werden mit einem Wärmeaustauschkoefizienten h von 500 $W/m^2 \cdot K$ beaufschlagt. Dies entspricht einer laminaren Wasserkühlung (siehe Kapitel 3.2.2).

Des Weiteren sind die Körper so ausgelegt, dass die mittlere Weglänge zwischen der Oberfläche der Quelle und der nächstgelegenen Kühlfläche 5 mm beträgt. Hierdurch wird sichergestellt, dass alle untersuchten Geometrien die gleiche Materialdicke und demnach den gleichen R_{th} zwischen der Quellenoberfläche und den jeweiligen Kühlflächen besitzen.

Anhand des dargestellten Quaders wird die uni- und bidirektionale Kühlung untersucht (siehe Abbildung 7.13 links). Das dreieckige Polynom stellt die tridirektionale Kühlung dar. Weiterhin steigt die Anzahl der Kühlflächen mit jedem weiteren Volumenkörper bis hin zur omnidirektionalen Kühlung an.

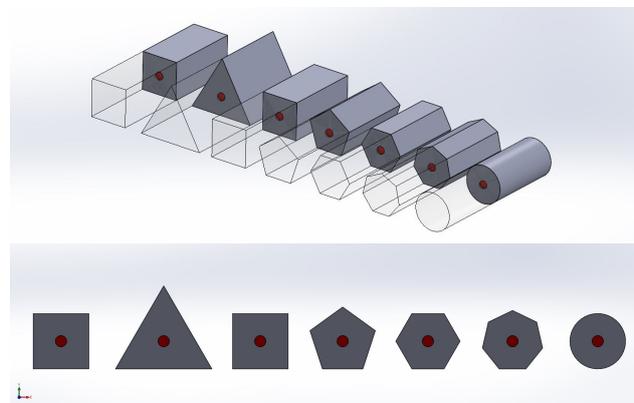


Abbildung 7.13: Schnittansichten der Volumenkörper zur Untersuchung des geometrischen Einflusses; oben: isometrische Ansicht; unten: Frontansicht

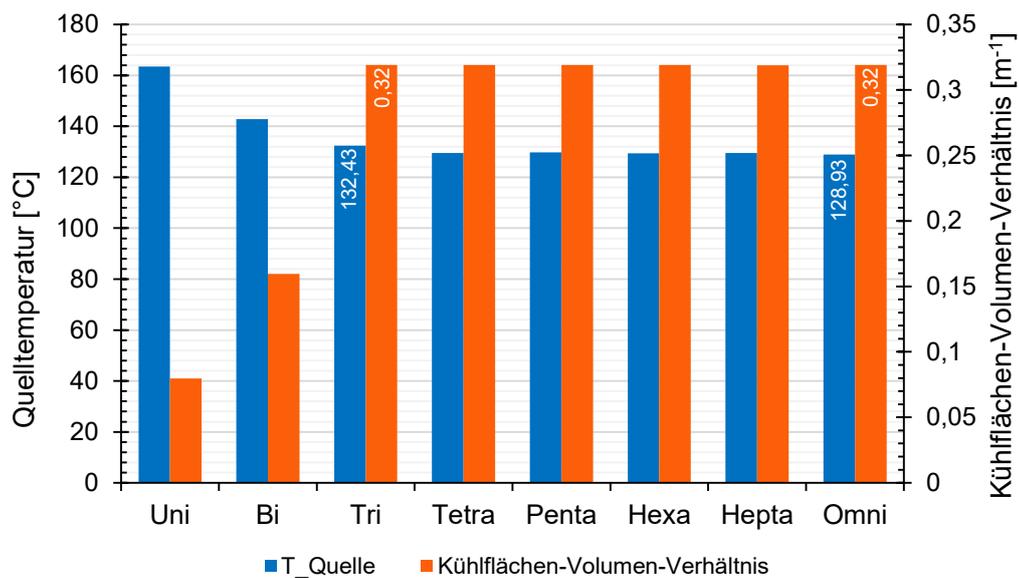


Abbildung 7.14: Ergebnisse der Analyse multidirektionaler Kühlungsstrategien

Die thermische Leistungsfähigkeit wird anhand der Quelltemperatur bei eingepprägter Verlustleitung bewertet. Je niedriger die Quelltemperatur bei einer der untersuchten Kühlungsstrategien ist, desto besser ist die thermische Leistungsfähigkeit der jeweiligen Geometrie. Zusätzlich wird das Kühlflächen-Volumen-Verhältnis (KZV) evaluiert. Bietet eine Geometrie viel Kühlfläche, steigert dies die Effizienz der angelegten Kühlung. Gleichzeitig ist ein geringes Volumen des Modulkörpers anzustreben, da dies sowohl zu einem geringeren thermischen Widerstand als auch zu einer kleineren Bauform führt. Folglich ist ein hohes KZV anzustreben.

Die Ergebnisse der thermischen Simulation sind in Abbildung 7.14 dargestellt. Die unidirektionale Kühlung erreicht die höchste Quelltemperatur von 163,46°C. Hierbei beträgt das KZV lediglich 0,08 m⁻¹. Die geringste Quelltemperatur tritt bei der omnidirektionalen Kühlung auf. Hier beträgt sie 128,93°C, während das KZV bei einem Maximum von 0,32 m⁻¹ liegt. Weiterhin ist festzustellen, dass ab einer tridirektionalen Kühlung eine Art Sättigungseffekt eintritt. Mit zunehmender Anzahl an Kühlflächen sinkt die Quelltemperatur nur marginal. Somit ergibt sich eine Quelltemperatur von 132,43°C bei einer tridirektionalen Kühlung, was zu einer Differenz von 3,5K zur omnidirektionalen Kühlung führt. Weiterhin ist anzumerken, dass die tridirektionale Kühlung das gleiche KZV von 0,32m⁻¹ wie die omnidirektionale Kühlung hervorruft.

Die in Abbildung 7.14 dargestellten Ergebnisse führen zu der Schlussfolgerung, dass eine tridirektionale Kühlung und somit ein dreieckiger Modulkörper erstrebenswert ist. Hierbei kann ein geringer thermischer Widerstand mit maximalem KZV bei einem hohen Maß der Umsetzbarkeit erzielt werden. Im weiteren Verlauf wird die konstruktive Umsetzung des Modulkörpers beschrieben.

7.3.2 Bewertung verschiedener Aufbau- und Verbindungstechniken

Die in Kapitel 7.3.1 beschriebenen Ergebnisse zeigen, dass ein tridirektional gekühlter Ansatz die beste thermische Leistungsfähigkeit bei der größten Umsetzbarkeit liefern kann. Im Folgenden wird beschrieben, wie von diesem Ansatz ein funktionales leistungselektronisches Modul abgeleitet werden kann. Hierfür wird das System Leistungsmodul zunächst in seine einzelnen Komponenten aufgeschlüsselt. Anschließend werden kritische Komponenten angepasst, indem die zur Verfügung stehenden Alternativen mittels Pugh-Matrix bewertet werden. Das resultierende Modulkonzept wird abschließend beschrieben.

Die Referenz, die es abzubilden gilt, ist ein Rahmenmodul (siehe Abbildung 7.15). Bei diesem Modul handelt es sich um ein E3-Rahmenmodul mit 3 mm starker Cu-Bodenplatte und drei DCBs. Bei der vorliegenden Schaltung handelt es sich um eine Halbbrückenschaltung aus jeweils drei parallelisierten IGBT-Dioden-Paarungen. Die Komponenten des abgebildeten Moduls sind in Tabelle 7.1 aufgeführt.

Komponenten, die einen direkten Einfluss auf den thermischen Stapel haben, gelten als thermisch relevant. Diese Komponenten müssen unverändert bleiben, da ansonsten das Gefüge des thermischen Stapels und damit auch der thermische Widerstand der Baugruppe modifiziert wird. Die Vergleichbarkeit einer Bewertung des neuen Modulkonzeptes hinsichtlich der thermischen Leistungsfähigkeit wäre nicht mehr gewährleistet.

Wie in Tabelle 7.1 zu erkennen ist, sind die einzigen Komponenten, die keine direkten Bestandteile des thermischen Stapels sind, die externen Anschlüsse sowie die schaltungsträgerübergreifende Kontaktierung. Daraus lässt sich ableiten, dass die Basis des neuartigen Modulkonzeptes aus dem thermischen Stapel der Referenz bestehen muss. Weiterhin muss beachtet werden, dass die Kühlung, bezogen auf die Referenz, kein Bestandteil des Leistungsmoduls ist. Im neuen, tridirektionalen Modulansatz soll eine Direktwasserkühlung implementiert sein.

Die Komponenten werden anschließend mit Hilfe der Konzeptauswahlanalyse nach Pugh ausgelegt. Tabelle 7.2 zeigt die Pugh-Matrix zur Umsetzung der externen Kontaktierung in einem tridi-

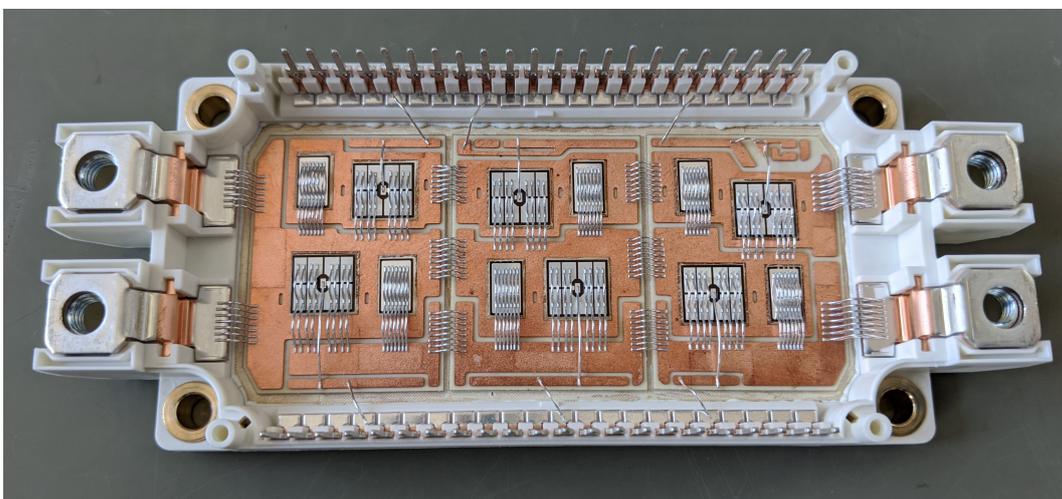


Abbildung 7.15: Referenz: E3-Rahmenmodul ohne Verkapselung und Deckel

Tabelle 7.1: Komponenten des Systems Leistungsmodul mit deren Ausprägung in der Referenz und der Zugehörigkeit zum thermischen Stapel

Komponente	Referenz	thermisch relevant
Halbleiter	IGBT/Diode	ja
Halbleiterkontaktierung	Silbersintern	ja
Schaltungsträger	DCB	ja
schaltungsträgerübergreifende Kontaktierung	Bonddraht	nein
Schaltungsträgerkontaktierung	Silbersintern	ja
Bodenplatte	Cu 3 mm	ja
Oberseitenkontaktierung	Bonddraht	ja
externe Kontaktierung	Lötpins	nein

rektional gekühltem Modulkonzept. Die aufgeführten Eigenschaften sind wie folgt definiert. Die **Flexibilität** gibt an, inwieweit die Kontaktierung von einer Variation der abgebildeten Schaltung bzw. des Schaltungsträgers beeinflusst wird. Die **Kompaktheit** gibt an, wie viel Volumen die technische Umsetzung in Anspruch nimmt. Die **Umsetzbarkeit** bewertet die Wahrscheinlichkeit, eine Variante erfolgreich zu realisieren.

Eine Kombination aus möglichem Leitungsquerschnitt und ggf. Kontaktwiderständen wird mit der Eigenschaft **elektrische Leitfähigkeit** bewertet. **Robustheit** gibt an, wie die Lebensdauer bzw. die Fehleranfälligkeit einer Variante zu bewerten ist. Wie in Tabelle 7.2 zu erkennen ist, liefert die Variante **Busbar** die höchste Punktzahl, bezogen auf die untersuchten Kriterien. Folglich wird die externe Kontaktierung der Schaltungsträger mit Hilfe von Busbars realisiert. Diese werden neben dem Schaltungsträger auf der Bodenplatte einer Basiseinheit appliziert.

Die Busbars werden aus 1 mm starken Kupferlagen hergestellt. Die Montage der Busbars erfolgt mit Hilfe von organischer Isolationsfolie, da die stromtragenden Busbars elektrisch von der Bodenplatte isoliert werden müssen. Die Busbars werden in einem mehrlagigen Aufbau realisiert.

Tabelle 7.2: Pugh-Matrix zur Konzeptauswahlanalyse zur Umsetzung der externen Kontaktierung

Eigenschaft \ Variante	Variante					
	Lötkontakt	Presskontakt	Federkontakt	Busbar	Leitung	Leadframe
Flexibilität	3	3	3	4	4	2
Kompaktheit	1	1	1	4	5	4
Umsetzbarkeit	2	3	3	4	3	3
el. Leitfähigkeit	5	4	2	5	3	5
Robustheit	3	3	2	3	2	4
Summe:	14	14	11	20	17	18

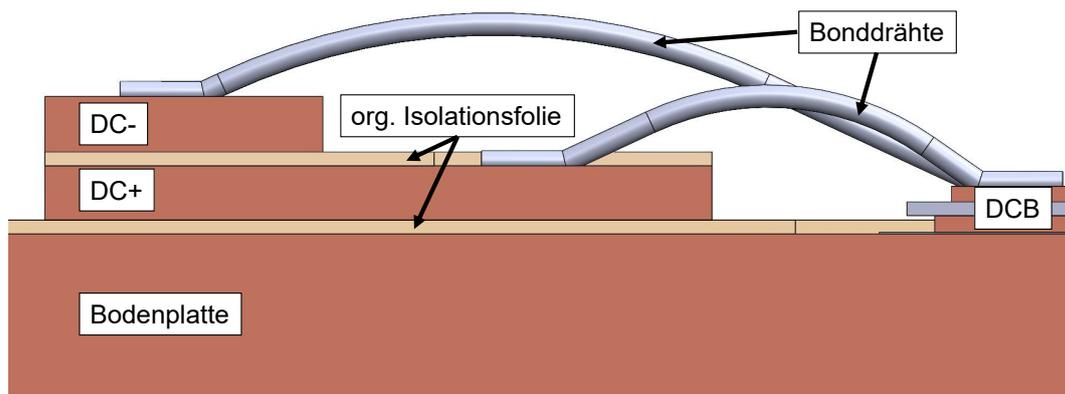


Abbildung 7.16: Schnittansicht des CAD-Modells einer Basisbaugruppe mit Kontaktierungsschiene aus Busbars und DCB

Hierbei werden mehrere Lagen Kupfer durch mehrere Lagen Isolationsfolie separiert (siehe Abbildung 7.16). Diese Maßnahme ermöglicht es, alle Lastströme (high-side und low-side) über die gleiche Kontaktierungsschiene laufen zu lassen. Hierdurch wird die auf der Bodenplatte benötigte Fläche minimiert, was die Kompaktheit des Moduls positiv beeinflusst.

Ein weiterer positiver Nebeneffekt ist die Reduktion von parasitären Induktivitäten. Durch das Übereinanderlegen von Leitern, in denen zwei entgegengesetzte Gleichströme fließen (DC+ und DC-), überlagern sich die einzelnen Magnetfelder der stromdurchgeflossenen Leiter. Auf Grund der unterschiedlichen Stromrichtungen in den Leitern sind die sich ausbildenden Magnetfelder und die damit verbundenen Induktivitäten entgegengesetzt. Die parasitären Induktivitäten heben sich gegenseitig auf, wodurch die Gesamtinduktivität des Aufbaus herabgesetzt wird [13].

Die Kontaktierungsschiene für die Lastanschlüsse wird neben der DCB auf der Bodenplatte montiert. Weitere vereinzelte Busbars für die Kontaktierung der Gate-Anschlüsse werden auf der übrigen Fläche der Bodenplatte verteilt (siehe Abbildung 7.17). Nachdem die Realisierung der exter-

Tabelle 7.3: Pugh-Matrix zur Konzeptauswahlanalyse zur Umsetzung der schaltungsträgerübergreifenden Kontaktierung

Variante					
Eigenschaft	Bonddrähte	Bondribbon	Leitung	Busbar intern	Busbar extern
Flexibilität	4	3	5	2	2
Kompaktheit	5	5	3	3	4
Umsetzbarkeit	1	1	3	2	5
el. Leitfähigkeit	4	4	3	5	5
Robustheit	3	4	2	4	5
Summe:	17	17	16	16	21

nen Anschlüsse definiert worden ist, gilt es, die elektrische Parallelisierung der einzelnen DCBs, also die schaltungsträgerübergreifende Kontaktierung, auszulegen. Hierfür wird erneut die Konzeptauswahlanalyse nach Pugh verwendet. Es werden die gleichen Eigenschaften als Bewertungsgrundlage der einzelnen Varianten, wie bei den externen Anschlüssen analysiert. Die resultierende Matrix ist in Tabelle 7.3 dargestellt.

Bezogen auf die untersuchten Kriterien liefert die Variante Busbar extern die höchste Punktzahl. Folglich werden die drei einzelnen DCBs mit Hilfe von extern montierten Busbars realisiert. Die zuvor diskutierten Kontaktierungsschienen für die externen Lastanschlüsse werden mit Hilfe einer weiteren Busbar elektrisch parallelisiert. Ein bedeutender Vorteil dieser Variante ist, dass die Parallelisierung der Basiseinheiten außerhalb des Dreieckskörpers erfolgt.

Das bedeutet einerseits, dass der besagte Dreieckskörper kompakter gestaltet werden kann. Andererseits ist diese Variante prozesstechnisch von der übrigen Baugruppe entkoppelt. Zum Zeitpunkt der Montage der externen Busbar ist der übrige Modulkörper bereist montiert und verkapselt. Die Gefahr eines Defektes auf oder an den Schaltungsträgern durch die Montage der Busbar ist im Vergleich zu anderen Varianten vernachlässigbar klein.

Das finale Design der extern montierten Busbars ist in Abbildung 7.18 dargestellt. Ein zentrales

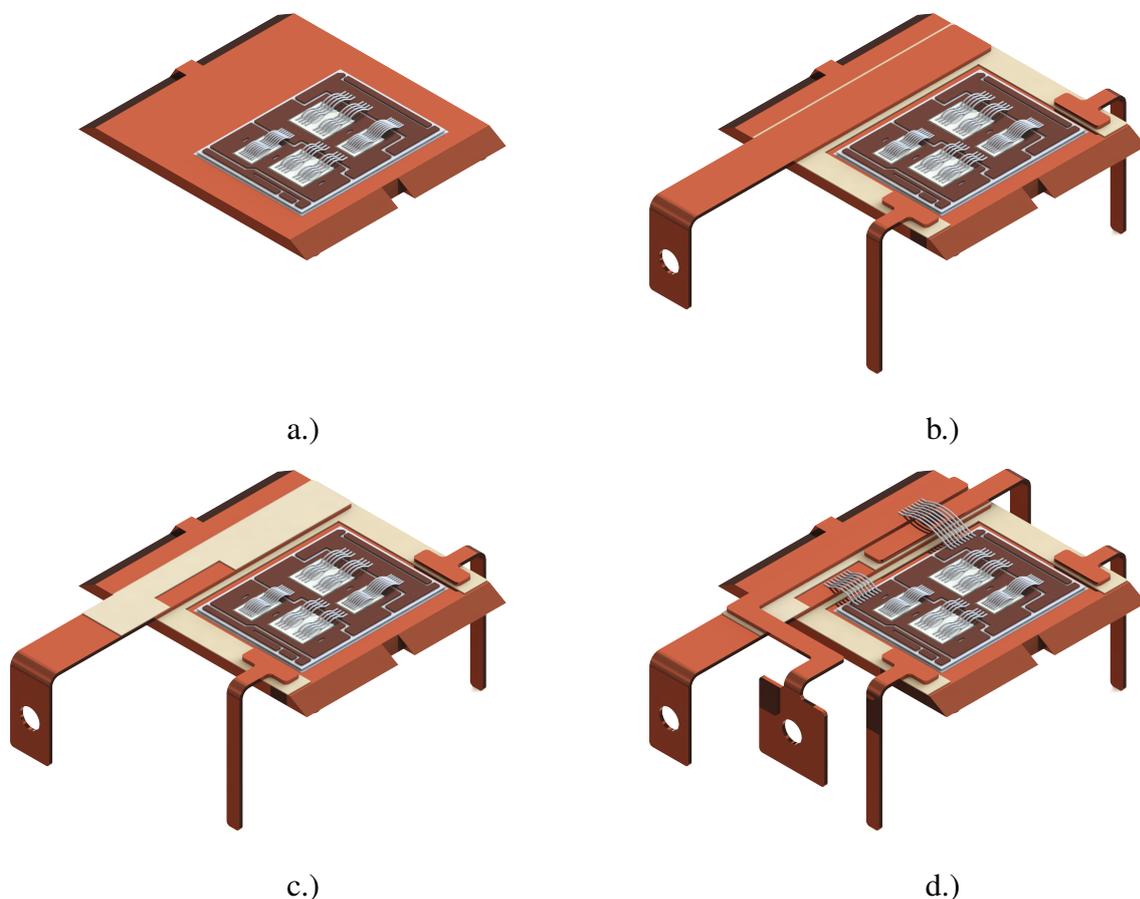


Abbildung 7.17: Verschiedene Aufbaustufen der Basiseinheit: a.) Bodenplatte mit DCB; b.) zusätzlich mit org. Isolationsschicht, Gate-Abgriffen und DC+; c.) zusätzlich mit zweiter Lage org. Isolationsschicht; d.) komplette Basiseinheit mit DC- und Phase

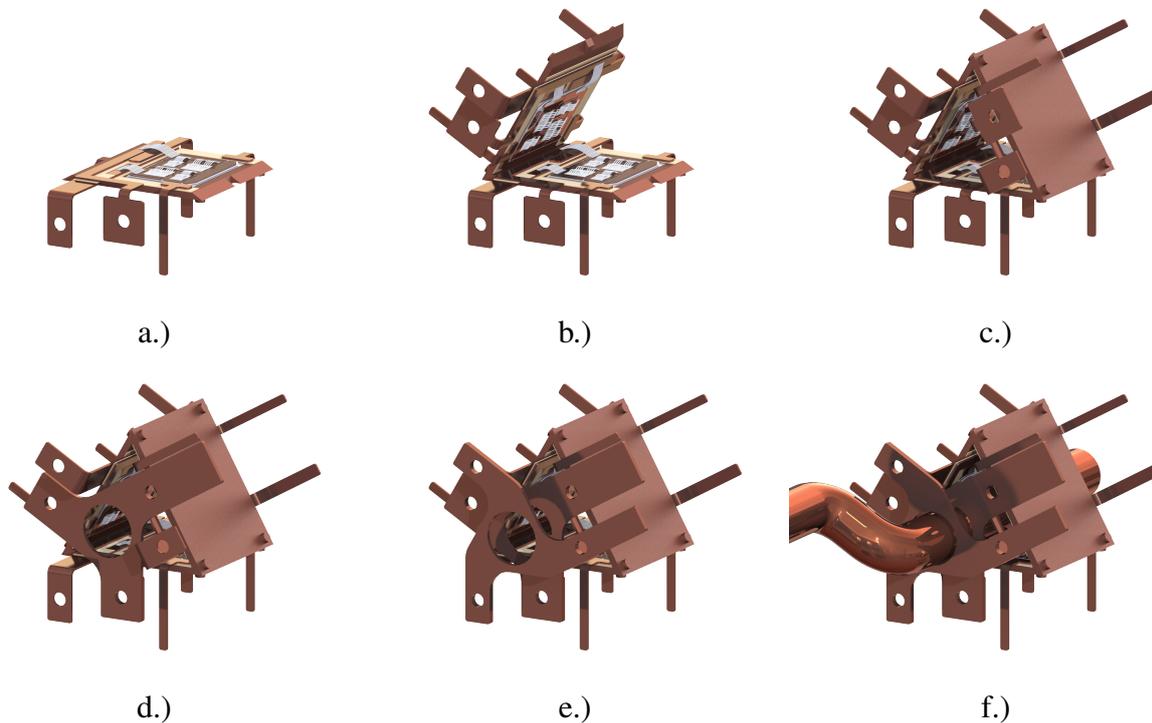


Abbildung 7.18: Verschiedene Aufbaustufen des tridirektional gekühlten Moduls: a.) Basiseinheit; b.) zwei Basiseinheiten; c.) Modulkörper aus drei Basiseinheiten; d.) zusätzlich mit ext. DC- Busbar; e.) zusätzlich mit ext. DC+ Busbar; f.) zusätzlich mit zentralem Kühlrohr

Kupferblech verbindet die einzelnen Kontaktierungsschienen der jeweiligen Basiseinheiten. Die Montage erfolgt per Verschraubung durch die vorgesehenen Bohrungen. Durch den Transfer und die Adaption der Komponenten „externe Kontaktierung“ und „schaltungsträgerübergreifende Kontaktierung“ wird eine elektrische Äquivalenz zur Referenz hergestellt. Das tridirektionale Modulkonzept bildet das Referenzmodul in seiner Funktionalität vollständig ab.

Neben der elektrischen Funktionalität gilt es weiterhin, eine direkte Wasserkühlung zu implementieren. Wie bereits erwähnt und in Tabelle 7.1 ersichtlich, ist die Kühlung kein definierter Bestandteil des Referenzmoduls. Das heißt, die Kühlung kann unabhängig vom Modul gestaltet werden. So kann besagtes Rahmenmodul sowohl auf einen direkten Wasserkühler (z.B. Danfoss Shower-Power®) als auch auf einen indirekten Wasserkühler (z.B. cold plate) montiert werden. Der hier diskutierte tridirektional gekühlte Ansatz soll die Kühlung im Modulkörper implementieren.

Dies ist erforderlich, da die dreieckige Struktur des Moduls den Einsatz konventioneller Kühlkörper nicht zulässt. Weiterhin ist in Kapitel 7.1 gezeigt worden, dass die erhöhte Wärmeleitfähigkeit eines anorganischen Verkapselungsmaterials im stationären Verhalten nur genutzt werden kann, wenn die thermische Energie auch hinreichend aus dem System abgeführt werden kann. Aus diesem Grund soll beim tridirektional gekühltem Ansatz eine Möglichkeit der oberseitigen Entwärmung der Halbleiter zur Verfügung gestellt werden.

Das Modul erhält einen zentralen Anschluss für Zu- und Rücklauf des Kühlmediums. Der Zulauf teilt sich vor dem Modulkörper in drei Pfade auf (siehe Abbildung 7.19 a). Jeder dieser Leitungen fungiert als Zulauf für einen separaten Direktwasserkühler im Sinne einer Danfoss

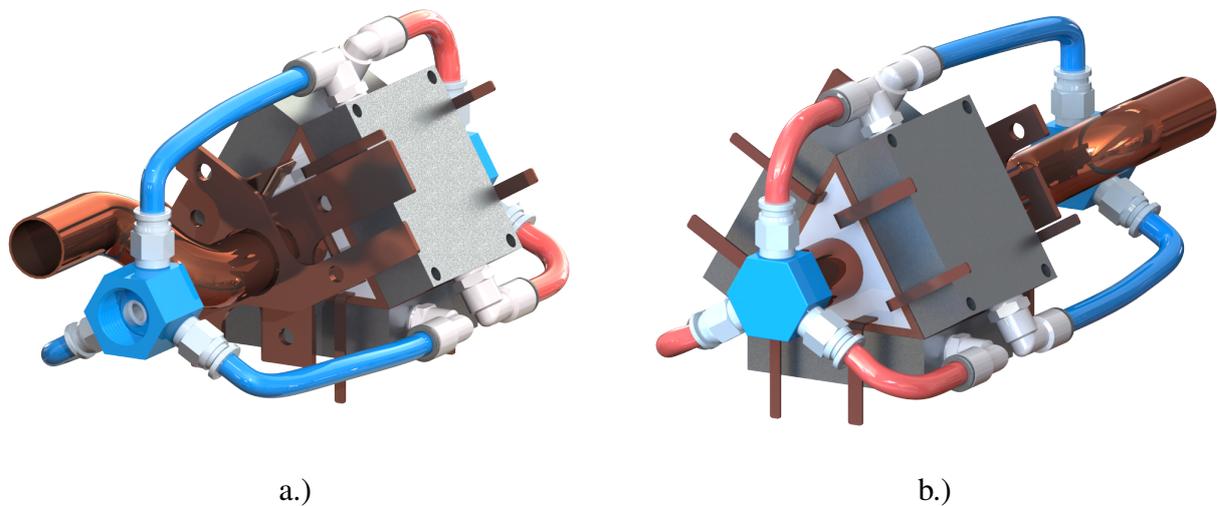


Abbildung 7.19: vollständiges CAD-Modell des TriCool-Moduls

ShowerPower®-Kühlung. Diese befindet sich unmittelbar unter der einzelnen Bodenplatte einer Basiseinheit. Nachdem das Kühlmedium einen großen Teil der Verlustwärme unterhalb der Basiseinheit aufgenommen hat, laufen die drei Rückläufe der Basiseinheiten hinter dem Modulkörper zu einem zentralen Rücklauf zusammen (siehe Abbildung 7.19 b).

Dieser zentrale Rücklauf führt durch das Zentrum des dreieckigen Modulkörpers zurück zur Front der Baugruppe. So kann das Kühlmedium, bezogen auf die jeweiligen Halbleiter, oberseitig Verlustwärme abtragen. Es ist hierbei zu beachten, dass die Effizienz dieser oberseitigen Entwärmung von der thermischen Leitfähigkeit des Verkapselungsmaterials abhängig ist. Besagtes Material verfüllt hier das Volumen zwischen dem zentralen Rücklauf und den drei Innenseiten des Modulkörpers, auf denen sich die leistungselektronischen Baugruppen befinden. Folglich ist festzuhalten, dass die Baugruppe aktiv doppelseitig gekühlt wird.

Die spezielle Führung des Kühlmittels führt nicht nur zu einer Reduktion der Halbleitertemperaturen, sondern durch die Verschaltung der Strömungswiderstände auch zu einem geringeren Differenzdruck, der über dem Modul abfällt. Durch die Aufteilung des Kühlmittels auf drei vereinzelt Kühler werden die dazugehörigen Strömungswiderstände parallelisiert. Die Summe der parallelen Strömungswiderstände ist kleiner als der Strömungswiderstand eines einzelnen Kühlers.

Durch diesen Sachverhalt kann Pumpenleistung eingespart werden, da ein geringerer Differenzdruck erforderlich ist als bei einem großen Kühler mit dem gleichen Volumen der drei Kühler des TriCool-Moduls. Andererseits kann bei gleichbleibender Pumpenleistung ein höherer Volumenstrom bei konstantem Differenzdruck erzeugt werden. Dadurch arbeitet die applizierte Kühlung effektiver, da es zu höheren Strömungsgeschwindigkeiten an der Grenzschicht zur Leistungsbau- gruppe kommt. Es kann ein höheres Maß an thermischer Energie abgeführt werden.

Nachdem die geometrische Struktur eines leistungselektronischen Moduls hinsichtlich der Effektivität einer applizierten Kühlung analysiert worden ist (Kapitel 7.3.1), ist ein tridirektional gekühltes Modulkonzept entstanden. Im Rahmen einer konstruktionsellen Ausarbeitung ist dieses Konzept in ein Modul überführt worden, das TriCool-Modul. Es gilt nun, das entstandene Modul hinsichtlich seines thermischen Widerstandes ($R_{th,ja}$) zu analysieren und einen Vergleich zum Stand der Technik zu ziehen.

7.3.3 Bewertung anhand von thermischer Simulation

Das TriCool-Modul soll hinsichtlich der thermischen Leistungsfähigkeit bewertet werden. Hierfür werden thermische Simulationen durchgeführt. Die Referenz, auf die sich bezogen wird, ist ein E3-Rahmenmodul (siehe Abbildung 7.15). Zur Durchführung des Vergleichs der thermischen Leistungsfähigkeit beider Modultypen wird für jedes Modul ein Simulationsmodell erzeugt. Beide Modelle werden mit dem gleichen anorganischen Verkapselungsmaterial aufgebaut. Die Beschreibung der Modelle kann dem Kapitel 5.7 entnommen werden. Ein Auszug der Simulationsergebnisse ist in Abbildung 7.20 dargestellt. Eine vollständige Übersicht der Ergebnisse kann dem Anhang A.1 entnommen werden.

Das E3-Rahmenmodul erzielt eine mittlere Halbleitertemperatur von $101,58^{\circ}\text{C}$ mit einer Standardabweichung von $1,87\text{K}$. Dies entspricht einer Varianz von $1,85\%$ der untersuchten Halbleitertemperaturen, welche auf das Layout der verwendeten DCBs sowie auf die Position der Halbleiter in Bezug auf die Kühlerstruktur unterhalb der Baugruppe zurückzuführen ist. Das TriCool erzielt eine mittlere Sperrschichttemperatur von $80,12^{\circ}\text{C}$. Hierbei liegt die Standardabweichung unter den einzelnen Halbleitern bei $0,98\text{K}$, was einer Varianz von $1,22\%$ entspricht. Die Varianz ist hier glei-

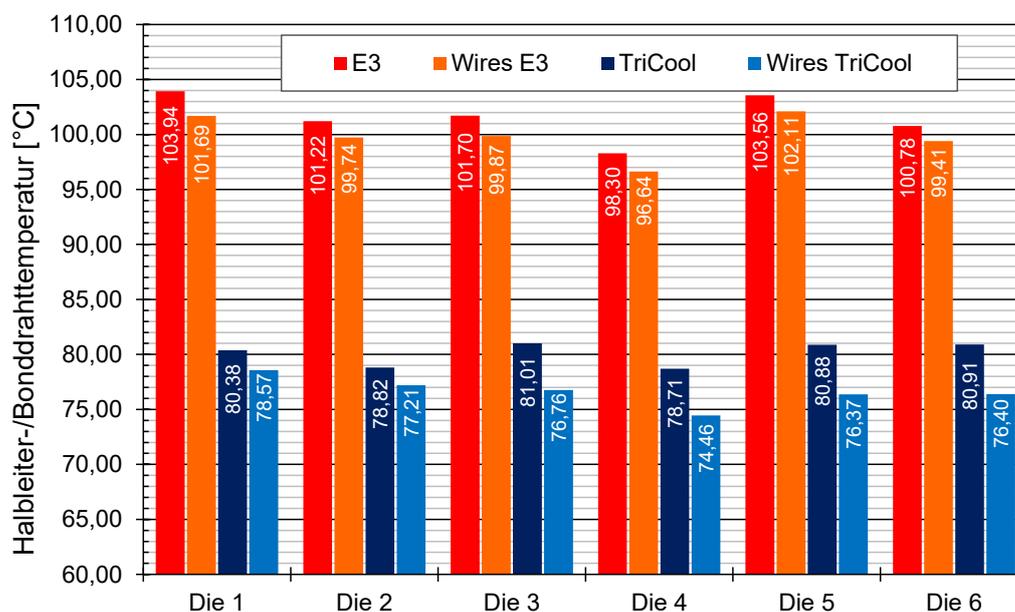


Abbildung 7.20: Ergebnisse der thermischen Simulation der Modulvarianten E3-Rahmenmodul und TriCool

chermaßen zu begründen. Es liegt demnach eine Reduktion der Halbleitertemperatur um 21,46K vor.

Weiterhin wird beobachtet, dass die mittlere Temperatur der Bonddrähte ebenfalls eine signifikante Reduktion erfährt. Sie beträgt 99,91°C beim E3-Rahmenmodul und 76,63°C beim TriCool. Es liegt demnach eine Reduktion der mittleren Bonddrahttemperatur von 23,28K vor. Es ist festzuhalten, dass die Bonddrahttemperatur in diesem Belastungsfall (100 A, 1,3 W/mm²) nur geringfügig niedriger ist als die Sperrschichttemperatur der Halbleiter. Die Belastbarkeit der Oberseitenkontaktierung ist in diesem Fallbeispiel noch nicht ausgereizt, so dass vom Halbleiter aus ein negativer Temperaturgradient vorliegt.

In einer weiteren Berechnung wird der Belastungsfall angepasst, indem sowohl die elektrische Stromstärke als auch die Verlustleistungsdichte verdoppelt wird. Somit fließt in diesem Fall ein Strom von 200 A durch jeden Halbleiter, welcher außerdem mit einer Verlustleistungsdichte von 2,6 W/mm² beaufschlagt wird. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7.21 dargestellt. Eine vollständige Übersicht der Ergebnisse kann dem Anhang A.1 entnommen werden.

In diesem Belastungsfall erreicht das E3-Rahmenmodul eine mittlere Halbleitertemperatur von 203,33°C mit einer Standardabweichung von 12,14K. Dies entspricht einer Varianz von 5,97%. Die Halbleiter im TriCool-Modul erzielen eine mittlere Sperrschichttemperatur von lediglich 145,13°C. Die Standardabweichung beträgt 2,66K, was einer Varianz von 1,83% entspricht. Bei einer Verlustleistungsdichte von 2,6 W/mm² kann beim Einsatz des TriCool-Ansatzes demnach eine Reduktion der Halbleitertemperatur um 58,21K erfolgen.

Ein besonderes Augenmerk ist auf die Temperatur der Bonddrähte zu richten. Hier zeigt sich der Einfluss des TriCool-Ansatzes in Kombination mit der thermischen Leitfähigkeit des keramischen

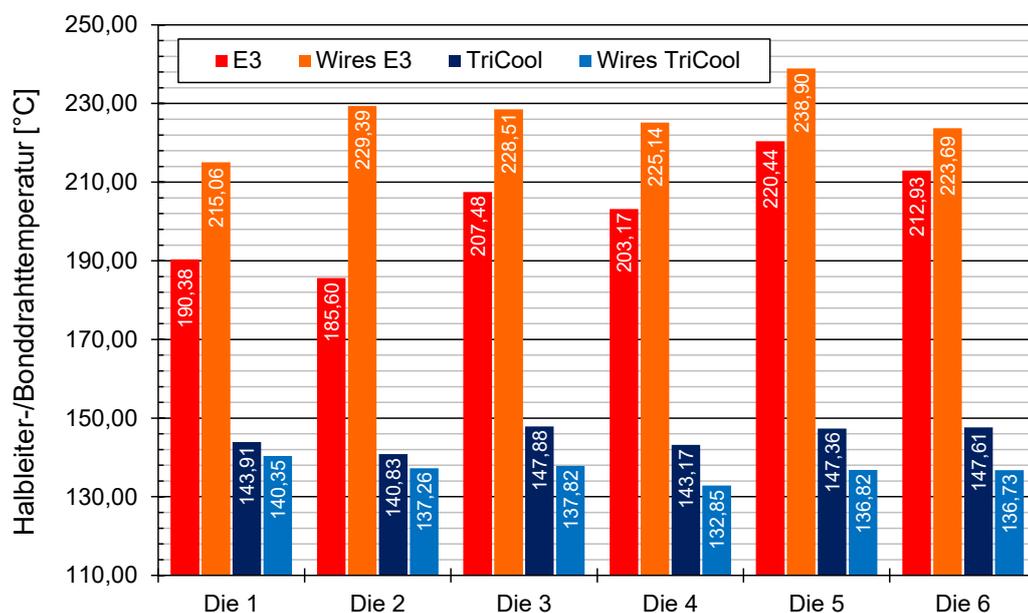


Abbildung 7.21: Ergebnisse der thermischen Simulation der Modulvarianten E3-Rahmenmodul und TriCool mit doppelter Leistung

Komposits enorm. Im E3-Rahmenmodul beträgt die mittlere Drahttemperatur $226,78^{\circ}\text{C}$, während sie im TriCool-Modul lediglich $136,97^{\circ}\text{C}$ beträgt. Eine Differenz von $89,81\text{K}$ wird verzeichnet.

Dieses Ergebnis stellt dar, wie deutlich der Einfluss des keramischen Komposits in Kombination mit dem TriCool-Ansatzes ist. Hierfür müssen die betrachteten Belastungsfälle differenziert werden. Im ersten Belastungsfall (100 A , $1,3\text{ W/mm}^2$) werden Halbleiter und Drähte im sicheren Arbeitsbereich (safe operating area - SOA) der jeweiligen Bauteile betrieben. Die SOA von gängigen Halbleitern wird unter anderem über die maximale Sperrschichttemperatur T_j definiert [11]. Bei den hier verwendeten Halbleitern liegt diese bei 175°C [98]. Die Temperaturen befinden sich mit ca. 100°C auf einem moderaten Niveau für die einzelnen Materialien (Si, Al) sowie Bauteilen (IGBT und Diode). Es liegt ein Temperaturgradient vom Halbleiter zum Bonddraht vor.

Im zweiten Belastungsfall (200 A , $2,6\text{ W/mm}^2$) befinden sich sowohl der elektrische Strom als auch die eingeprägte Verlustleistung auf einem sehr hohem Niveau, was in den Halbleiter- und Bonddrahttemperaturen ersichtlich wird. Mit einer mittleren Temperatur von über 200°C befinden sich die Halbleiter in einem Temperaturbereich, welcher außerhalb der SOA liegt. Es ist mit einer signifikanten Reduktion der Zuverlässigkeit bzw. Lebensdauer zu rechnen.

Die Bonddrähte befinden sich mit einer mittleren Temperatur von über 220°C deutlich über dem Temperaturniveau der Halbleiter. Es ist ein Temperaturgefälle vom Bonddraht zum Halbleiter zu beobachten, was deutlich zeigt, dass die Bonddrähte eine Überbelastung erfahren. Wird von Aluminiumdrähten ausgegangen, so ist bei einem erhöhten Temperaturniveau mit einer beschleunigten Rekristallisation zu rechnen, welche die Zugfestigkeit herab setzt [122]. Das Drahtmaterial versprödet und hält einer thermischen Wechselbelastung nicht mehr stand. Das Modul ist zerstört. Das Temperaturniveau im TriCool-Modul hingegen befindet sich sowohl bei den Halbleitern als auch bei den Bonddrähten auf einem Temperaturniveau innerhalb der SOA. Weiterhin ist zu beobachten, dass sich die Bonddrahttemperaturen wieder den Halbleitertemperaturen angleichen. Sie liegen leicht darunter. Das bedeutet, es liegt weiterhin ein negativer Temperaturgradient vom Halbleiter zu den Bonddrähten vor.

Der oben beschriebene Sachverhalt lässt sich in eine mögliche Steigerung der eingepägten Leistung bei konstanter Halbleitertemperatur umrechnen. Die Simulation besagt, dass ein E3-Modul mit anorganischer Verkapselung bei einer eingepägten Gesamtleistung von $1264,7\text{ W}$ eine Sperrschichttemperatur von 150°C erreicht. Ein TriCool-Modul mit gleichen Randbedingungen erreicht diese Temperatur bei einer Gesamtleistung von $1708,6\text{ W}$. Demnach ist es möglich $35,1\%$ mehr Leistung bei konstanter Halbleitertemperatur durch den Einsatz des TriCool-Moduls zu führen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Simulation eine signifikante Reduktion der Halbleitertemperatur um $21,46\text{K}$ beim Einsatz des TriCool-Moduls prognostiziert. Eine derartige Reduktion erhöht die Zuverlässigkeit und Lebensdauer eines Leistungsmoduls erheblich, da eine Reduzierung der thermomechanischen Beanspruchung mit der Reduzierung der Sperrschichttemperatur einher geht. Eine abschließende Lebensdauerberechnung ist in Kapitel 7.4 zu finden.

Weiterhin ist festzuhalten, dass das TriCool-Modul in der Lage ist, in einem Überlastfall moderate Halbleiter- und Bonddrahttemperaturen zu generieren. Während das konventionelle E3-Modul ge-

füllt mit der gleichen anorganischen Vergussmasse Temperaturniveaus erreicht, welche nach kurzer Zeit zu der Zerstörung des Leistungsmoduls führen würden, befindet sich das TriCool-Modul bei derartigen Belastungen in einem Temperaturbereich, welcher einen sicheren und zuverlässigen Betrieb des Moduls gewährleistet. Im Folgenden wird das Simulationsmodell anhand des ersten Belastungsfalles (100 A, 1,3 W/mm²) experimentell verifiziert.

7.3.4 Experimenteller Nachweis

Das thermische Simulationsmodell soll anhand eines experimentellen Nachweises verifiziert werden. Zu diesem Zweck wird eine R_{th} -Messung mittels eines eigens konstruierten Prüfstandes durchgeführt. Dieser R_{th} -Prüfstand ermittelt alle Kenngrößen, die für die Bestimmung des $R_{th,ja}$ eines leistungselektronischen Moduls notwendig sind. Der Prüfstand ist in Kapitel 5.4 beschrieben. Die Ergebnisse des ersten Lastfalles (ein Halbleiter aktiv) sind in Tabelle 7.4 und 7.5 dargestellt. Eine vollständige Übersicht der Ergebnisse kann dem Anhang A.2.1 entnommen werden.

Bei der vorliegenden eingepprägten Leistung von 131,3 W erreicht das E3-Modul eine Halbleitertemperatur von 72,48°C, was zu einem $R_{th,ja}$ von 0,419 K/W führt. Die Simulation prognostiziert eine Halbleitertemperatur von 70,18°C. Diese führt unter Berücksichtigung der übrigen relevanten Parameter (siehe Formel 5.4) zu einem $R_{th,ja}$ von 0,402 K/W. Es besteht demnach eine absolute Differenz von 2,3K bzw. 0,017 K/W zwischen der Simulation und dem Experiment.

Das TriCool-Modul erreicht in der Messung eine mittlere Sperrschichttemperatur von 66,46°C. Der $R_{th,ja}$ beläuft sich demnach auf 0,380 K/W. Das Ergebnis der Simulation ergibt bei den in dem Experiment angewandten Parametern eine Halbleitertemperatur von 64,34°C. Dies entspricht einem $R_{th,ja}$ von 0,363 K/W. Beim TriCool-Modul liegt demnach eine absolute Differenz von 2,12K bzw. 0,016 K/W zwischen der Simulation und dem Experiment vor. Die Abweichungen zwischen Simulation und Messung im Einzelfall sind durch realtechnische Bedingungen (z.B. nicht ideale thermische Übergänge) zu begründen.

Weiterhin wird beobachtet, dass die Simulation bei gleichen Bedingungen eine Reduktion des $R_{th,ja}$ von 0,039 K/W zwischen dem E3- und dem TriCool-Modul prognostiziert. Dies entspricht einer

Tabelle 7.4: Ergebnisse von Simulation und R_{th} -Messung des E3-Moduls; ein aktiver Halbleiter

E3	T_j [°C]	T_{Zulauf} [°C]	$T_{Rücklauf}$ [°C]	$R_{th,ja}$ [K/W]
Messung	72,48	16,88	17,92	0,419
Simulation	70,18	16,88	17,98	0,402

Tabelle 7.5: Ergebnisse von Simulation und R_{th} -Messung des TriCool-Moduls; ein aktiver Halbleiter

TriCool	T_j [°C]	T_{Zulauf} [°C]	$T_{Rücklauf}$ [°C]	$R_{th,ja}$ [K/W]
Messung	66,46	16,76	17,86	0,380
Simulation	64,34	16,80	17,88	0,363

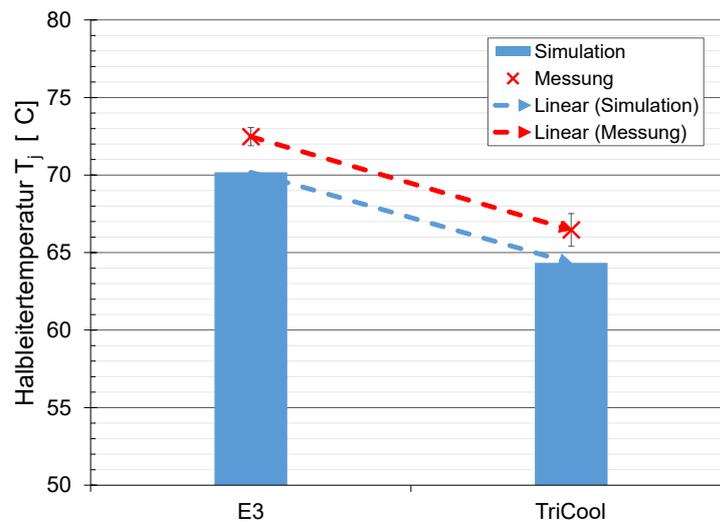


Abbildung 7.22: Darstellung der Prognosegenauigkeit des Simulationsmodells im Vgl. zur Messung; 1 Chip

Verringerung des $R_{th,ja}$ um 9,53%. Das Experiment zeigt eine Reduktion der Halbleitertemperatur T_j um 6,02K, was einer $R_{th,ja}$ -Reduktion von von 9,37% entspricht. Die prognostizierte thermische Verbesserung des TriCool-Ansatzes, bezogen auf den $R_{th,ja}$, stimmt mit einer Abweichung von 0,16% mit dem Experiment überein.

Dieses Verhalten wird ebenfalls in Abbildung 7.22 ersichtlich. Die hier dargestellte Reduktion der Halbleitertemperatur T_j , welche einen direkten Einfluss auf die $R_{th,ja}$ -Reduktion hat, prägt in Simulation und dem Experiment die gleiche Steigung aus. Obwohl in der Simulation eine absolute Abweichung der Temperatur von 2,2K vorliegt, ist das Verhältnis der Temperaturniveaus von E3- und TriCool Modul realistisch dargestellt. Das Simulationsmodell ist in diesem Belastungsfall in der Lage, die R_{th} -Reduktion realitätsnah abzubilden.

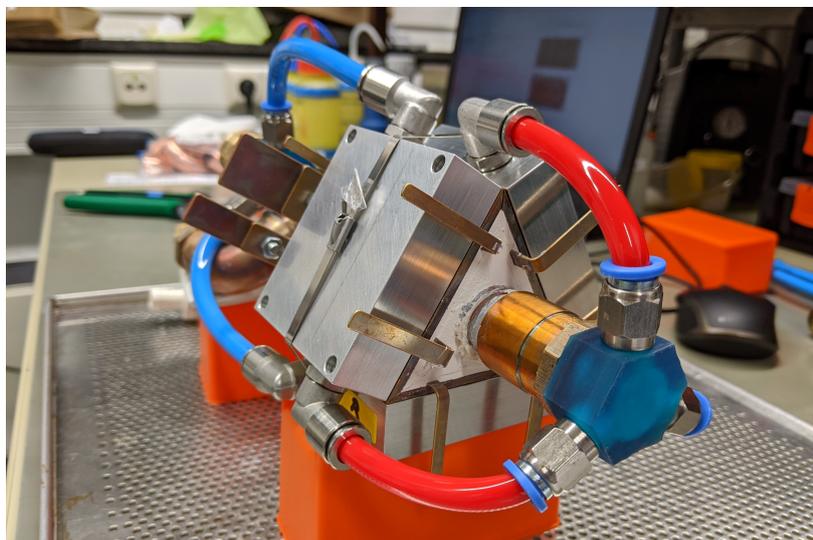


Abbildung 7.23: Prototyp des TriCool-Moduls für die R_{th} -Messung

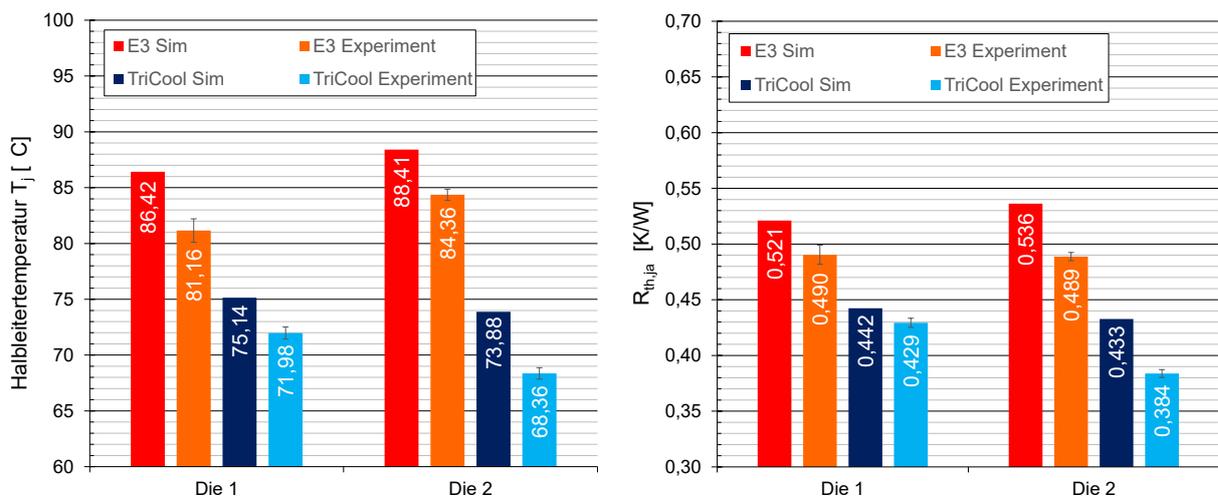


Abbildung 7.24: Ergebnisse von Simulation und R_{th} -Messung mit zwei aktiven Halbleitern; Vergleich E3- und TriCool-Modul; links: Halbleitertemperatur T_j ; rechts: thermischer Widerstand $R_{th,ja}$

Der zweite untersuchte Belastungsfall beinhaltet zwei aktive Halbleiter. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7.24 dargestellt. In der Referenz, dem E3-Modul, wird im Experiment eine mittlere Halbleitertemperatur von $82,76^\circ\text{C}$ erreicht. Der resultierende mittlere $R_{th,ja}$ liegt bei $0,490\text{ K/W}$. Die Simulation prognostiziert eine mittlere Halbleitertemperatur von $87,41^\circ\text{C}$ und einen $R_{th,ja}$ von $0,529\text{ K/W}$. Die absolute Abweichung zwischen Simulation und Experiment beträgt demnach $4,66\text{K}$ bzw. $0,039\text{ K/W}$.

Das TriCool-Modul erzielt im Experiment eine mittlere Halbleitertemperatur von $70,17^\circ\text{C}$, was zu einem $R_{th,ja}$ von $0,407\text{ K/W}$ führt. Die dazugehörige Simulation liefert eine mittlere Halbleitertemperatur von $74,51^\circ\text{C}$. Der resultierende $R_{th,ja}$ beträgt $0,438\text{ K/W}$. Die bei dieser Konfiguration vorliegende absolute Differenz zwischen Simulation und Experiment beträgt $4,34\text{K}$ bzw. $0,031\text{ K/W}$. Weiterhin ist festzuhalten, dass die durch den TriCool-Ansatz hervorgerufene $R_{th,ja}$ -Reduktion in der Simulation $17,22\%$ beträgt. Das Experiment liefert eine Reduktion der mittleren Halbleitertemperatur T_j um $12,59\text{K}$, was sich zu einer $R_{th,ja}$ -Reduktion von $16,96\%$ umrechnen lässt. Demnach beträgt die Abweichung des Simulationsmodells in Bezug auf die thermische Verbesserung durch den TriCool-Ansatz $0,26\%$. Auch in diesem Fall prognostiziert das Simulationsmodell die $R_{th,ja}$ -Reduktion mit einer hohen Genauigkeit.

Der dritte Belastungsfall umfasst alle sechs im Modul befindlichen IGBTs. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Abbildung 7.25 dargestellt. In dieser Untersuchung erreicht das E3-Referenzmodul im Experiment eine mittlere Halbleitertemperatur von $102,56^\circ\text{C}$. Unter Berücksichtigung der übrigen Messgrößen und Parameter ergibt dies einen mittleren $R_{th,ja}$ von $0,637\text{ K/W}$. Das Simulationsmodell prognostiziert einen $R_{th,ja}$ von $0,619\text{ K/W}$ bei einer mittleren Halbleitertemperatur von $101,58^\circ\text{C}$. Folglich liegt beim E3-Modul eine absolute Differenz von $1,46\text{K}$ bzw. $0,018\text{ K/W}$ vor.

Das Simulationsmodell des TriCool-Moduls gibt eine mittlere Halbleitertemperatur T_j von $80,12^\circ\text{C}$ und einen $R_{th,ja}$ von $0,463\text{ K/W}$ vor. Im Experiment wird ein $R_{th,ja}$ von $0,453\text{ K/W}$ erfasst, was einer

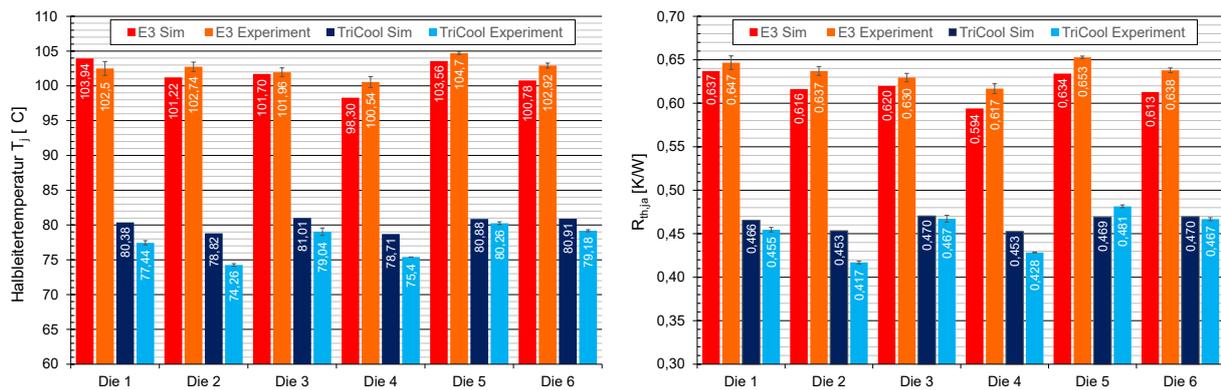


Abbildung 7.25: Ergebnisse von Simulation und R_{th} -Messung mit 6 aktiven Halbleitern; Vergleich E3- und TriCool-Modul; links: Halbleitertemperatur T_j ; rechts: thermischer Widerstand $R_{th,ja}$

Differenz von 0,01 K/W zur Simulation entspricht. Die im Experiment ermittelte durchschnittliche Halbleitertemperatur beträgt 77,60°C. Demnach weicht die Simulation um 2,52K von dem Experiment ab.

Weiterhin ist festzuhalten, dass das Simulationsmodell eine Reduktion der Halbleitertemperatur T_j um 21,46K prognostiziert (siehe auch Kapitel 7.3.3). Dieses Verhalten wird im Experiment weitestgehend abgebildet. Die mittlere Halbleitertemperatur wird durch den TriCool-Ansatz um 24,96K gesenkt. Dies entspricht einer Reduktion des $R_{th,ja}$ um 28,94%. Das Simulationsmodell errechnet eine $R_{th,ja}$ -Reduktion um 25,10%. Für den dritten Belastungsfall ist hinsichtlich der Prognosefähigkeit demnach eine Abweichung des Simulationsmodells von 3,84% festzustellen.

7.3.5 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Messungen in Kapitel 7.3.4 zeigen, dass das TriCool-Modul eine signifikante Verbesserung der Entwärmung der Halbleiter erzielt. Die mittlere Halbleitertemperatur T_j wird durch Einsatz des TriCool-Moduls um 24,96K im Vergleich zu einem herkömmlichen E3-Modul mit dem gleichen Verkapselungsmaterial gesenkt. Folglich ist dieses neuartige Modulkonzept in der Lage, das thermische Potential eines anorganischen Verkapselungsmaterials deutlich effektiver zu nutzen als ein konventionelles Rahmenmodul.

Die kompakte dreidimensionale Anordnung der mit Halbleitern bestückten Substrate in Bezug auf den zentralen Rücklauf des Kühlmediums ermöglicht eine signifikante Steigerung der aus dem Verkapselungsmaterial abgetragenen thermischen Energie. Während es bei einem konventionellen Modul auf Grund des mangelhaften thermischen Überganges von Verkapselungsmaterial zur Umgebung zu einem Wärmestau am Rand des Vergussmaterials kommt (siehe Kapitel 7.1), kann die thermische Energie beim TriCool-Modul oberseitig aus dem System abfließen. Die beschriebene effektivere Entwärmung des Halbleiters führt zu einer niedrigeren Sperrschichttemperatur T_j , was wiederum zu einer Reduktion des $R_{th,ja}$ führt.

Des Weiteren wird in Kapitel 7.3.4 das zugrundeliegende Simulationsmodell im Rahmen der vorliegenden Untersuchung mit dem Experiment verglichen. Anhand von drei Konfigurationen des

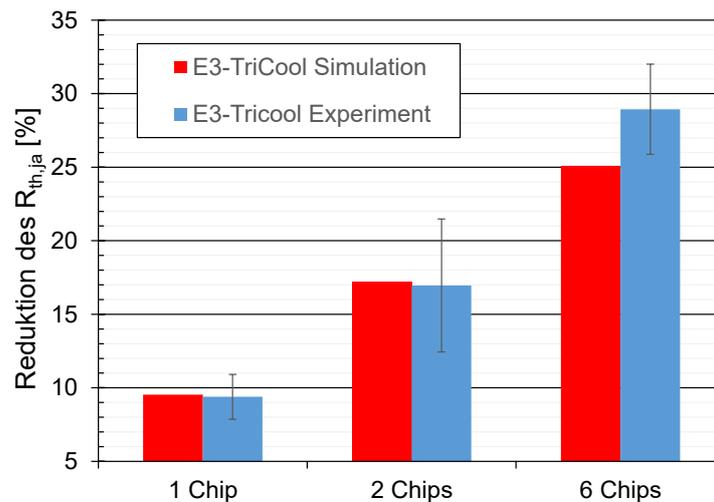


Abbildung 7.26: Darstellung der Prognosegenauigkeit des Simulationsmodells im Vgl. zur Messung

Modells und des Experiments wird dieser Vergleich erstrebt und das Simulationsmodell evaluiert. Abbildung 7.26 zeigt die R_{th} -Reduktion durch Verwendung des TriCool-Ansatzes aus Simulation und Experiment. Es ist festzuhalten, dass das Berechnungsmodell in allen drei Konfigurationen den Einfluss des TriCool-Ansatzes auf den $R_{th,ja}$ realistisch abbilden kann.

In der ersten Konfiguration beträgt die Abweichung der prognostizierten $R_{th,ja}$ -Reduktion im Vergleich zum Experiment 0,16%, während die zweite Konfiguration eine Abweichung von 0,26% vorweist. Lediglich in der dritten Konfiguration wird eine deutlich größere Abweichung von 3,84% festgestellt. Dies ist zum einen auf die gesteigerte Komplexität dieser Konfiguration zurückzuführen. Zum anderen wird bei genauerer Betrachtung der einzelnen Messwerte deutlich, dass die erhöhte Diskrepanz zwischen Simulation und Messung auf eine sehr niedrige Halbleitertemperatur beim TriCool-Modul zurückzuführen ist.

Die Simulation prognostiziert eine mittlere Halbleitertemperatur von $80,12^{\circ}\text{C}$, während das Experiment eine mittlere Halbleitertemperatur von $77,60^{\circ}\text{C}$ generiert. Somit sind die Halbleitertemperaturen im TriCool durchschnittlich $2,52\text{K}$ unter der Prognose des Simulationsmodells. Die errechneten Temperaturen der einzelnen Halbleiter weichen um bis zu $4,56\text{K}$ (Die 2) von denen des Experimentes ab.

Diese bessere thermische Leistungsfähigkeit des TriCool-Moduls gegenüber der Simulation ist zum einen durch realtechnische Bedingungen, die naturgemäß zu einer Abweichung der Realität von der Simulation führen, zu erklären. Zum anderen können durch die veränderte Struktur des TriCool-Moduls abgewandelte Aushärtebedingungen für das anorganische Verkapselungsmaterial vorliegen. Im Vergleich zu einem E3-Rahmenmodul liegt hier eine deutlich kleinere Oberfläche der Vergussmasse vor.

Dies kann zur Folge haben, dass beim Aushärten und dem anschließenden Entwässern beim TriCool-Modul weniger chemisch gebundenes Wasser aus dem Material austreten kann als bei einem konventionellem Rahmenmodul. Durch diesen Sachverhalt werden die resultierenden Ma-

terialeigenschaften beeinflusst. So kann das effektive Porenvolumen reduziert werden, was lokal die effektive Wärmeleitfähigkeit des Materials anhebt. Die Abhängigkeit der finalen thermischen Eigenschaften eines anorgansichen Verkapselungsmaterials sind zu einem hohen Maß von den Aushärtebedingungen abhängig. Dieses Phänomen ist bereits in anderen Arbeiten untersucht worden [123]. Dieser Effekt kann im TriCool zu einer lokalen Erhöhung der thermischen Leitfähigkeit des Materials führen, wodurch eine bessere Entwärmung des Halbleiters entsteht, als es in der Simulation berücksichtigt werden kann.

Weiterhin ist zu beachten, dass es sich bei der Temperaturmessung mittels V_{CE} -Methode um eine indirekte Temperaturmessung über eine Hilfsgröße handelt. Wie in Kapitel 5.5 beschrieben, müssen die Halbleiter für diese Methode im Vorfeld kalibriert werden. Die Kalibrierung erfolgt in einem Ofen, welcher mit einer Toleranz behaftet ist. Hierbei wird die über der Sperrschicht abfallende Spannung im mV-Bereich aufgenommen. Die entstehende V_{CE} -Kennlinie hat eine Steigung von ca. 0,4 K/mV. Das bedeutet, dass bereits eine elektrische Messungenauigkeit von wenigen mV eine Unschärfe der Temperatur von mehreren Kelvin hervorrufen kann.

Trotz der oben beschriebenen messtechnischen Unschärfe korreliert das Simulationsmodell sehr gut und kann als valide betrachtet werden. Darauf aufbauend ist festzuhalten, dass alle Postulate, die in Kapitel 7.3.3 formuliert worden sind, ebenfalls als valide betrachtet werden müssen. Hierzu zählt, dass das TriCool-Modul einen Betrieb unter hoher eingepprägter Leistung (hier: 200A, 2,6 W/mm²) ermöglicht. Ein konventionelles Rahmenmodul mit dem gleichen Verkapselungsmaterial hingegen erreicht derartig hohe Halbleiter- und Bonddrahttemperaturen, dass besagte Bauteile und folglich das Modul zerstört werden.

Weiterhin als valide zu betrachten ist die Berechnung, welche besagt, dass ein TriCool-Modul 35,1% mehr Verlustleistung bei konstanter Temperatur in Relation zu einem konventionellen Rahmenmodul führen kann. Diese zusätzliche Verlustleistung lässt sich in eingesetzte Halbleiterfläche umrechnen. Durch den erzielten thermischen Vorteil kann die Verlustleistungsdichte erhöht werden, indem die Halbleiterfläche verkleinert wird. Diese Tatsache stellt ein enormes Einsparungspotential dar, da insbesondere die immer weiter verbreiteten WBG-Leistungshalbleiter enorm kostenintensiv sind.

Das neuartige Modulkonzept ist demnach in der Lage, eine deutlich effektivere Entwärmung der verlustbehafteten Komponenten des Leistungsmoduls zu realisieren. Hierzu zählen sowohl die Halbleiter als auch die Bonddrähte. Durch die optimierte Entwärmung ist eine signifikante Reduktion des $R_{th,ja}$ respektive der Halbleitertemperatur T_j zu beobachten. Dieser Sachverhalt kann in eine Verlängerung der Lebensdauer oder in eine Steigerung der Leistungsdichte umgesetzt werden. Dies wiederum führt zu dem Resultat einer leistungsfähigeren und hoch robusten leistungselektronischen Baugruppe.

7.4 Lebensdauerbewertung der erweiterten Modulkonzepte zur optimalen Entwärmung

Zwei neuartige Modulkonzepte sind vorgestellt und experimentell evaluiert worden. Anhand der vorliegenden Ergebnisse gilt es abschließend festzustellen, ob die in Kapitel 7 aufgestellte Arbeitshypothese bestätigt werden kann. Zu diesem Zweck wird eine Lebensdaueranalyse angestrebt, auf Grundlage welcher eine Aussage über den Einfluss der effektiveren Entwärmung des Halbleiters durch die neuartigen Modulkonzepte formuliert werden soll.

Wie bereits in den Kapiteln 7.2 und 7.3 wird auch in diesem Kapitel stets der Vergleich zwischen einem konventionellen Rahmenmodul und den vorgestellten Modulkonzepten gezogen. Es ist anzumerken, dass beide Modultypen mit dem gleichen anorganischen Verkapselungsmaterial aufgebaut sind. Der analysierte Einfluss ist demnach nur auf den Modulkörper mit dem dazugehörigen Kühlkonzept zurückzuführen.

Für die Aufstellung einer temperaturabhängigen Lebensdauerprognose ist das verwendete Lebensdauermodell von entscheidender Bedeutung. Es gibt eine Vielzahl von Modellen, die in Abhängigkeit der Randbedingungen und der eintretenden Fehlermechanismen abweichende Genauigkeiten vorweisen. Da es sich bei anorganischen Verkapselungsmaterialien um einen mechanisch stabilen Verguss handelt, ist der dominante Fehlermechanismus im aktiven Lastwechsel die Degradation des Chip-Lotes. Dieser Sachverhalt ist bereits in der vorliegenden Arbeit erörtert worden (siehe Kapitel 6.3.2).

Für den vorliegenden Fall einer anorganischen Verkapselung wird das CIPS08-Lebensdauermodell herangezogen [124]. Dieses beinhaltet Terme, welche die Zusammenhänge der Arrhenius-Gleichung und des Coffin-Manson-Modells berücksichtigen [125]. Hierbei beschreibt Arrhenius die Änderung der Materialeigenschaften in Abhängigkeit der Temperatur, während Coffin-Manson die Ermüdung von Materialien bei zyklischer plastischer Verformung beschreibt [125]. Zusätzlich werden im CIPS08-Lebensdauermodell Vorgänge wie Kriechen und Relaxationsvorgänge berücksichtigt [125]. Dieser Sachverhalt ist insbesondere für die Lebensdauerprognose beim hier vorliegenden Fehlermechanismus der Chipplot-Degradation von essentieller Bedeutung. Aus diesem Grund ist das CIPS08-Lebensdauermodell anzuwenden, welches sich nach [124] in folgender Gleichung ausdrückt:

$$N_f = K \cdot \Delta T_j^{\beta_1} \cdot e^{\frac{\beta_2}{T_{j,min}}} \cdot t_{on}^{\beta_3} \cdot I^{\beta_4} \cdot V^{\beta_5} \cdot D^{\beta_6} \quad [-] \quad (7.1)$$

Das Ergebnis der Gleichung 7.1 liefert die Anzahl der erreichten Zyklen im aktiven power cycling bis zum Ausfall. K ist ein Vorfaktor des Modells für Module mit Al_2O_3 -Substrat, während die Koeffizienten $\beta_1 \dots \beta_6$ Modellkonstanten darstellen, die den Einfluss der korrespondierenden Einflussfaktoren abbilden [126] [127].

Tabelle 7.6: Auflistung eingesetzter Parameter zur Berechnung der Lebensdauer nach CIPS08 [11]

Parameter	Beschreibung	Wert	Einheit
ΔT_j	Sperrschichttemperaturhub	130	K
$T_{j,min}$	min. Halbleitertemperatur	293,15	K
t_{on}	Einschaltdauer	1	s
I	Strom pro Bondfuß	6,25	A
V	Spannungsklasse des Halbleiters/100	12	V
D	Durchmesser Bonddrähte	400	μm
K	Vorfaktor	$9,3 \cdot 10^{14}$	-
β_1	Modellkonstante	-4,416	-
β_2	s.o.	1285	-
β_3	s.o.	-0,463	-
β_4	s.o.	-0,716	-
β_5	s.o.	-0,761	-
β_6	s.o.	-0,5	-

Für die hiesige Untersuchung der Reduzierung der Sperrschichttemperatur T_j wird eine Beispielrechnung durchgeführt. Bei der angenommenen Konfiguration handelt es sich um einen 1200 V/200 A IGBT mit 400 μm Aluminiumdraht. Der Halbleiter ist mit 32 Bondfüßen versehen, was zu einer Strombelastung von 6,25 A pro Bondfuß führt. Der Temperaturhub findet zwischen 20°C und 150°C statt und wird über eine Einschaltdauer von 1s realisiert. Eine Zusammenfassung der hier geltenden Parameter ist in Tabelle 7.6 dargestellt. Werden diese in Gleichung 7.1 eingesetzt, ergibt sich folgender Term:

$$N_{f,Ref} = 9,3 \cdot 10^{14} \cdot 130^{-4,416} \cdot e^{\frac{1285}{293,15}} \cdot 1^{-0,463} \cdot 6,25^{-0,716} \cdot 12^{-0,761} \cdot 400^{-0,5}$$

Das Resultat des oben stehenden Terms sind die nach CIPS08 prognostizierten Zyklen im aktiven Lastwechseltest.

$$N_{f,Ref} = \underline{\underline{69.963}}$$

Das oben beschriebene Leistungsmodul erreicht nach CIPS08 69.963 Zyklen. Dieses Resultat soll für die Evaluation der Temperaturreduktion durch neuartige Modulkonzepte als Referenz herhalten. Die im Test erreichte maximale Sperrschichttemperatur T_j beeinflusst Gleichung 7.1 über den Faktor des erreichten Temperaturhubes ΔT_j in folgender Weise:

$$\Delta T_j = T_{j,max} - T_{j,min} \quad (7.2)$$

Aus Gleichung 7.2 lässt sich ableiten, dass eine Reduktion der maximalen Sperrschichttemperatur $T_{j,max}$ einen direkt proportionalen Einfluss auf den Temperaturhub ΔT_j hat. Wird die maximale Halbleitertemperatur T_j durch das Modul- bzw. Kühlkonzept reduziert, kann somit der resultierende Lebensdauerertrag anhand des ΔT_j in der CIPS08-Gleichung (Gleichung 7.1) bewertet werden.

7.4 Lebensdauerbewertung der erweiterten Modulkonzepte zur optimalen Entwärmung 113

Der thermische Masseschluss (TMC, siehe Kapitel 7.2) erzielt im Vergleich zu einem konventionellen Rahmenmodul mit anorganischer Verkapselung eine Reduktion von 7,6K. Bezogen auf die Referenz der Beispielrechnung ergibt sich demnach ein ΔT_j von 122,4K. Eingesetzt in Gleichung 7.1 resultiert die folgende Anzahl an erreichten Zyklen im aktiven Lastwechselstest:

$$N_{f,TMC} = 9,3 \cdot 10^{14} \cdot 122,4^{-4,416} \cdot e^{\frac{1285}{293,15}} \cdot 1^{-0,463} \cdot 6,25^{-0,716} \cdot 12^{-0,761} \cdot 400^{-0,5}$$

$$N_{f,TMC} = \underline{\underline{91.285}}$$

Durch die Reduktion der Sperrschichttemperatur $T_{j,max}$ unter Verwendung des TMC werden 21.322 zusätzliche Zyklen erreicht. Dies entspricht einer Verlängerung der Lebensdauer um einen Faktor von 1,3. Das in Kapitel 7.3 vorgestellte TriCool-Modul ist in der Lage, die Halbleitertemperatur um 24,96K zu reduzieren. Das Übertragen dieser Reduktion auf das ΔT_j der oben beschriebenen Referenz resultiert in einem Temperaturhub von 105,04K. Das Einsetzen in Gleichung 7.1 ergibt die folgende Anzahl an erreichten Zyklen im aktiven Lastwechselstest:

$$N_{f,TriCool} = 9,3 \cdot 10^{14} \cdot 105^{-4,416} \cdot e^{\frac{1285}{293,15}} \cdot 1^{-0,463} \cdot 6,25^{-0,716} \cdot 12^{-0,761} \cdot 400^{-0,5}$$

$$N_{f,TriCool} = \underline{\underline{179.366}}$$

Das TriCool-Modul erreicht nach dem CIPS08-Lebensdauermodell 109.403 Zyklen mehr als die korrespondierende Referenz. Die erreichte Reduktion der maximalen Halbleitertemperatur führt zu einer Verlängerung der Lebensdauer um einen Faktor von 2,6. Sowohl der TMC als auch das TriCool-Modul zeigen eine signifikante Verlängerung der Lebensdauer der Leistungsbaugruppe. Auf Grund dieses Sachverhaltes ist die im Kapitel 7 aufgestellte 2. Arbeitshypothese bestätigt. Die vorgestellten Modul- und Kühlungskonzepte tragen zu einer effektiveren Entwärmung der Halbleiter und somit zu einer Vergrößerung der Lebensdauer bei.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden anorganische Materialien hinsichtlich ihrer Eignung als Verkapselungsmaterial für leistungselektronische Baugruppen analysiert und bewertet, wodurch die grundlegende Machbarkeit bestätigt wurde. Weiterhin sind die Auswirkungen eines hoch wärmeleitfähigen Verkapselungsmaterials auf die Halbleitertemperatur respektive den thermischen Widerstand der Baugruppe untersucht worden. Aus den Ergebnissen wurden zwei neuartige Modulkonzepte abgeleitet, die auf Grundlage ihrer thermischen Leistungsfähigkeit mit dem Stand der Technik verglichen worden sind. Hierzu wurden sowohl simulative Berechnungen als auch experimentelle Untersuchungen durchgeführt.

Die Prüfung der Machbarkeit eines anorganischen Verkapselungsmaterials setzt sich aus der Analyse der Verarbeitbarkeit und der wichtigsten mechanischen, elektrischen sowie chemischen Eigenschaften zusammen. All diese Teilanalysen konnten mit einem positiven Ergebnis bewertet werden. Abgeschlossen wurde die Machbarkeit durch Untersuchungen, die sicherstellen, dass die grundlegenden Funktionen eines Leistungshalbleiters nicht beeinträchtigt werden. Hierfür wurden leistungselektronische Baugruppen, die mit einem anorganischen Material verkapselt worden sind, einem HTRB sowie einem power cycling unterzogen. Beide Tests wurden ohne negative Beeinträchtigung der Leistungshalbleiter absolviert.

Das power cycling als Summentest der oben beschriebenen Eigenschaften hat nicht nur die Machbarkeit bestätigt, sondern auch eine signifikante Erhöhung der Lebensdauer gezeigt. Neben einer Steigerung der Lebensdauer um den Faktor 2,3 wurde ein Wechsel des dominanten Fehlermode festgestellt. Der Ausfall ist bei einer anorganischen Verkapselung auf die Degradation des Chiplothes zurückzuführen, nicht mehr auf eine im „Bonddraht-Liftoff“ mündende Materialermüdung der oberseitigen Halbleiterkontaktierung.

Die oben beschriebenen Ergebnisse bestätigen auf Grundlage der formulierten Definition, dass anorganische Materialien als Verkapselungsmaterial für leistungselektronische Baugruppen anwendbar sind. Die erhöhte Wärmeleitfähigkeit derartiger Werkstoffe wurde im Hinblick auf die Sperrschichttemperaturen bzw. den thermischen Widerstand eines Leistungsmoduls simulativ analysiert. Eine erhöhte thermische Leitfähigkeit des Verkapselungsmaterials führt zu einer signifikanten Verbesserung des dynamischen Verhaltens einer Baugruppe. Bei einer hypothetischen Wärmeleitfähigkeit von $10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ konnte eine Reduktion des $Z_{\text{th,ja}}$ um bis zu 14% ermittelt werden.

Der stationäre thermische Widerstand wird jedoch nur marginal beeinflusst (-2,8%). Auf Grund der erhöhten Wärmeleitfähigkeit der Verkapselung wird die thermische Energie besser an den Rand der selbigen geleitet. Hier kann sie jedoch die Baugruppe nicht verlassen. Das Implementieren neuer

thermischer Pfade in Form von neuartigen Modulkonzepten wurde durchgeführt. Hierbei wurden zwei Ansätze verfolgt, ein minimal- und ein maximalinvasiver Konstruktionsansatz.

Der minimalinvasive Ansatz mündete in dem thermischen Masseschluss oder auch TMC genannt. Der TMC besteht aus einer 3 mm starken Cu-Platte, die auf der Oberseite der anorganischen Verkapselung montiert wird. Gleichzeitig wird diese mechanisch sowie thermisch mit der unterseitigen Bodenplatte des Rahmenmoduls verbunden. So entsteht ein thermischer Puffer, der die Verlustwärme aufnehmen und kontinuierlich an die bereits vorhandene Senke abgeben kann. Im Experiment konnte eine Reduktion der Sperrschichttemperatur um 7,6K im Vergleich zu einem konventionellen Rahmenmodul mit anorganischer Verkapselung ermittelt werden. Dies entspricht einer Reduktion des $R_{th,ja}$ um 5,9%. Diese Reduktion der Sperrschichttemperatur führt unter Bezugnahme des CIPS08-Lebensdauermodells zu einer signifikanten Vergrößerung der Lebensdauer um ca. 30%. Hierbei ist anzumerken, dass diese Verbesserung ohne eine Modifikation des Footprints oder der peripheren Anschlusskulisse des Moduls möglich ist.

Der maximalinvasive Ansatz besteht aus drei Basiseinheiten, die zu einer dreieckigen Modulstruktur zusammengesetzt werden, welche sich TriCool nennt. Das Modul ist so ausgelegt, dass ein zentraler Kühlmittelzulauf sich auf drei Direktwasserkühler für die jeweiligen Basiseinheiten (Bodenplatte mit leistungselektronischen Komponenten) aufteilt. Anschließend werden diese Einzelstränge wieder vereint, wodurch sie den zentralen Rücklauf bilden, welcher durch das Zentrum der Modulstruktur verläuft. Auf diese Weise werden die Halbleiter durch den gleichen Kühlkreislauf ober- wie unterseitig gekühlt. Die dreidimensionale und kompakte Modulstruktur in Kombination mit einem anorganischen Verkapselungsmaterial ist in der Lage, den $R_{th,ja}$ signifikant zu reduzieren. Im Experiment konnte eine Verringerung der Sperrschichttemperatur um 24,96K ermittelt werden, was einer Reduktion des $R_{th,ja}$ um 28,94% entspricht.

Anhand der oben beschriebenen Modulkonzepte und der Verringerung der Sperrschichttemperaturen ist eine Lebensdauerprognose auf Grundlage des CIPS08-Modells angestellt worden. Hierbei wurde ermittelt, dass die vorgestellten Modulkonzepte durch die Verbesserung des thermischen Widerstandes eine signifikante Vergrößerung der Lebensdauer leistungselektronischer Baugruppen hervorrufen können. So kann die Lebensdauer durch Einsatz des TMC um den Faktor 1,3 im Vergleich zu einer konventionellen Modulstruktur mit anorganischem Verkapselungsmaterial erhöht werden. Das TriCool-Modul erreicht eine Lebensdauersteigerung um den Faktor von 2,6 im Vergleich zu einem äquivalenten standardisierten Rahmenmodul.

Sowohl die Anwendbarkeit von anorganischen Verkapselungsmaterialien im leistungselektronischen Kontext als auch der Lebensdauer verlängernde Effekt der vorgestellten Modul- und Kühlkonzepte konnte in dieser Arbeit bewiesen werden. Dies zeigt das enorme Potential dieser Massen in Bezug auf den Einsatz als Verkapselungsmaterial für Leistungsmodule. Der alleinige Wechsel von einem Silikonweichverguss zu einer anorganischen Vergussmasse bringt einen Zuwachs der Lebensdauer um den Faktor 2,3 hervor. Der vorliegende dominante Fehlermechanismus ist hierbei die Chiplotdegradation. Wird ausblickend eine Substitution der Lotschicht durch eine NTV-Verbindung in Betracht gezogen, kann diese Steigerung der Lebensdauer erneut um ein

Vielfaches vergrößert werden.

Es konnte somit gezeigt werden, wie anorganische Vergussmassen in der Lage sind, den technologischen Flaschenhals der polymeren Verkapselungsmaterialien zu beseitigen. Dies hat zur Folge, dass sich neue Möglichkeiten in Bezug auf robuste und effiziente Leistungselektronik für zukünftige Anwendungen auftun. Durch den Einsatz von anorganischen Verkapselungsmaterialien sind die leistungselektronischen Baugruppen hinsichtlich ihrer maximalen Betriebstemperatur kaum limitiert. Lediglich das eingesetzte Halbleitermaterial selbst weist noch Grenzen auf. Doch auch diese erreichen durch neuartige WBG-Halbleitermaterialien ein gänzlich neues Temperaturniveau in zukünftigen Applikationen. Anorganische Verkapselungsmaterialien können diesen Temperaturanforderungen stand halten.

Durch die erhöhte thermische Leitfähigkeit anorganischer Verkapselungsmaterialien können in zukünftigen Anwendungen deutlich größerer Leistungsdichten geführt werden. Insbesondere im Hinblick auf die zunehmende Elektrifizierung des automotiven Sektors ist dies von großer Bedeutung. Der hier vorhandene Bauraum ist nur eingeschränkt verfügbar, wodurch es zu einer höheren Stufe der Integration von leistungselektronischen Baugruppen kommen wird.

Die Nachfrage eines hohen Grades der Integration von leistungselektronischen Baugruppen und deren Kühlung wird seitens der Industrie deutlich adressiert. Dies zeigen Forschungsprojekte, wie zum Beispiel InMOVE (BMW; Verbundkoordinator: Volkswagen AG, Wolfsburg) und LaSiC (BMBF; Verbundkoordinator: Volkswagen AG, Wolfsburg). Bei den in dieser Arbeit vorgestellten Modulkonzepten handelt es sich um prototypische Aufbauten. Unter Vorbehalt fertigungstechnischer Modifikationen ist eine industrielle Umsetzung jedoch denkbar.

Die vorgestellten Modulkonzepte zeigen, dass durch den Einsatz anorganischer Verkapselungsmaterialien und dem Implementieren neuer thermischer Pfade eine deutliche Reduzierung der Halbleitertemperatur erreicht werden kann. Diese Reduktion lässt sich in eingesetzte Chipfläche umrechnen bzw. Leistungsdichte. So können zukünftige Baugruppen noch kompakter und leistungsfähiger gestaltet werden. Dabei wahren sie die Robustheit und lange Lebensdauer durch die thermomechanischen Eigenschaften einer anorganischen Verkapselung. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse können weitere Materialkompositionen sowie Modulkonzepte erzeugt werden, die den Anforderungen zukünftiger leistungselektronischer Applikationen gerecht werden.

Weiterhin gilt es jedoch Fragestellungen hinsichtlich des Einsatzes in beispielsweise automotiven Umgebungen zu beantworten. So sind Aspekte wie zum Beispiel Vibrationen, Schadgasbelastung und Temperaturschocks noch nicht untersucht worden. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist das Thema Feuchtigkeit. Anorganische Verkapselungsmaterialien bzw. Zemente sind auf Grund ihres hydraulischen Abbindemechanismus poröse Materialien.

Diese Porosität gestaltet sich zum Teil offenporig, wodurch das Eindringen von Feuchtigkeit in die Verkapselung möglich wird. In weiterführenden Arbeiten muss der Grad und die Auswirkungen des Eindringens von Feuchte in das anorganische Verkapselungsmaterial analysiert und evaluiert werden. Weiterhin gilt es eventuell erforderliche Gegenmaßnahmen, wie zum Beispiel Primer oder Coatings in Betracht zu ziehen.

In der vorliegenden Arbeit ist die Bewertung der thermischen Leitfähigkeit anorganischer Verkapselungsmaterialien mit einer Fokussierung auf den Halbleiter durchgeführt worden. Wie bereits in Kapitel 2.2.3 erläutert, können jedoch die Bonddrähte im Betrieb deutlich heißer werden als der Halbleiter. Es gilt demnach, in weiterführenden Arbeiten die Auswirkungen der hohen thermischen Leitfähigkeit auf die Bonddrähte bzw. die oberseitige Kontaktierung des Halbleiters zu evaluieren. Eine in situ Messung der Bonddrahttemperatur in Abhängigkeit des Laststromes und des applizierten Verkapselungsmaterials wäre hier denkbar.

Weiterhin ist in dieser Arbeit festgestellt worden, dass bei einer Substitution von Silikongel durch ein anorganisches Verkapselungsmaterial der begrenzende Faktor im power cycling auf eine Chipdegradation zurückzuführen ist. Durch eine NTV-Verbindung des Halbleiters könnte diese Limitierung aufgehoben werden. Es gilt folglich, einen weiteren Lastwechseltest mit gesinterten Halbleitern durchzuführen, um zu ermitteln, welche Lebensdauer ein derartiger Aufbau erzielen kann. Weiterhin wäre zu ermitteln, welches der hier vorherrschende Fehlermode ist.

Durch die oben beschriebenen Maßnahmen kann das enorme Potential anorganischer Verkapselungsmaterialien weiter ausgeschöpft werden. Gleichzeitig kann ein hohes Maß an Erkenntnisgewinn über das Material und die Wechselwirkungen mit den leistungselektronischen Baugruppen erzielt werden. Auf Grundlage dieser Arbeit kann somit ein tiefgehendes Verständnis für die in diesem Gebiet völlig neue Materialklasse erzeugt werden. Dies ebnet den Weg für hochperformante und zuverlässige leistungselektronische Module für zukünftige Anwendungen.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Oszillogramm des Ausschaltvorganges eines IGBT; zeitliche Verläufe von I_C und U_{CE} beim Ausschalten [14].	6
2.2	Wärmeflussdichte verschiedener Wärmequellen [11]	7
2.3	Schematische Schnittansicht mehrerer Leistungsmodul-Typen; links Rahmenmodul mit Silikongel und indirekter Wasserkühlung, rechts: Moldmodul mit Epoxid-Moldcompound und direkter Wasserkühlung	8
2.4	Legierungszone mit Mischkristallen (MK) $D = D_L + D_{GW}$ an der Phasengrenze Grundwerkstoff – erstarrtes Lot (G) bei einer Hartlötverbindung; D_L Diffusionszone im Lot; D_{GW} Diffusionszone im Grundwerkstoff; A_{GW} Grundwerkstoffatome; A_{Lot} Lotatome [18]	9
2.5	Ausbildung eines Sinterhalses zwischen zwei Partikeln (Einstoffsystem)[18]	11
2.6	Sinterschicht vor (links) und nach dem Sintern (rechts)[26]	11
2.7	Aluminium-Bonddrähte auf einem IGBT in einem unverkapselten E3XL Rahmenmodul	13
2.8	Beispielhafte Abbildung des Pottens einer elektronischen Baugruppe [35]	15
2.9	Schematische Darstellung des Verkapselns einer elektronischen Baugruppe durch Transfermolding; vor dem Molden (a) und nach dem Molden (b) [35]	16
2.10	Prozessablaufdiagramm eines Transfermoulding-Prozesses nach [35]	17
2.11	Struktur eines exemplarischen Silikons: Polydimethylsiloxan	18
2.12	Bestandteile eines konventionellen EMC [35]	20
2.13	Schematische Darstellung eines konventionellen Modulaufbaus (a) und Aufbau mit organischem Isolator (IMB) und DP-Epoxy (b) [60]	21
2.14	Exemplarische ESEM SE-Aufnahme von nadelförmigen CSH-Strukturen; Hillebrandit nach 1 Woche bei 200°C [65]	23
2.15	Stadien der Hydratation von CSH-Phasen; dunkle Partikel: Zementkörner; helle Partikel: Füllstoffe; nach [67]	24
3.1	Schematische Darstellung der Ausprägungen von Konvektion anhand von CFD-Simulationen; links: natürliche Konvektion; rechts: forcierte Konvektion; Isotherme Schnittansicht der Baugruppen, Stromlinien des Fluids schwarz dargestellt . . .	27
3.2	Exemplarische Darstellung verschiedener Rippenkühlkörper der Fa. Semikron [76]	30
3.3	Exemplarische Darstellung eines Cold Plate Kühlers [79]	31

3.4	DCM1000-Modul; links: Unterseite mit ShowerPower3D®; rechts: Oberseite mit transparentem Verkapselungsmaterial [85]	32
3.5	Wärmeübergangskoeffizienten h , die mit natürlicher Konvektion, forcierter Konvektion und einem Phasenwechsel erreicht werden können [91]	34
3.6	Schematische Schnittansicht des thermischen Stapels eines typischen Leistungsmoduls	35
3.7	Schematische Schnittansicht des thermischen Stapels eines typischen Leistungsmoduls	36
5.1	Prüflinge auf HTRB 689 Fa. Schuster Elektronik GmbH, Herzogenaurach	45
5.2	Testvehikel für den HTRB Fa. Siemens AG, München; DCB-Aufbau mit Kunststoffrahmen und einem Halbleiter	46
5.3	E3-Testvehikel auf cold plate am Lastwechselprüfstand	47
5.4	Schematische Darstellung des R_{th} -Prüfstandes	49
5.5	R_{th} -Prüfstand mit E3-Modul; reduzierte Anzahl an Messleitungen	50
5.6	Testvehikel Z_{th} -Messung: E1-Rahmenmodul gefüllt mit anorganischem Verkapselungsmaterial	52
5.7	Simulationsmodell in Form eines E3-Rahmenmoduls; Verguss und Deckel nicht dargestellt	53
5.8	Schematische Schnittansicht und Darstellung der Randbedingungen der Simulation zur Analyse des Einflusses der Wärmeleitfähigkeit	54
5.9	Schematische Schnittansicht und Darstellung der Randbedingungen der Simulation zur Analyse des maximalinvasiven Modulansatzes	55
5.10	CAD-Modell der mechanischen Simulation; links: Vollständig, rechts: Ohne Verkapselungsmaterial	56
5.11	Schnittansicht des CAD-Modells der mechanischen Simulation mit Bezeichnung verwendeter Materialien	56
5.12	Materialprobe eines anorganischen Verkapselungsmaterials zwischen Prüfelektroden im Ölbad zur Bestimmung der elektrischen Durchschlagsfestigkeit	58
5.13	Schematische Darstellung eines Schertests; Kraftverlauf von Schermeißel (Contact tool) zum Halbleiter (die) dargestellt; nach [115]	59
5.14	Schertest-Vehikel fixiert auf Teststand; sechs quaderförmige Zementquader auf der unstrukturierten Seite eine Cu-DCB	59
6.1	Mögliche Zustände eines Transistors mit den dazugehörigen elektrischen Gegebenheiten; gelb: Experiment zur Evaluierung des jeweiligen Zustandes	63
6.2	Manueller Verguss eines Rahmenmoduls mit reaktiver Tonerde zu verschiedenen Zeitpunkten; links: $t=0$ s, Mitte: $t=3$ s, rechts: $t=10$ s	64

6.3	REM-Aufnahmen anorganisch verkapselter Leistungskomponenten; links: Diode x200, rechts: IGBT x2000; Aufnahmen zur Verfügung gestellt von Bianca Böttge, FhG IMWS	65
6.4	X-Ray Aufnahmen mehrerer anorganisch verkapselter Rahmenmodule auf Ebene des Chiplotes; links: mangelhafter Verguss mit Lufteinschlüssen und Rissen; rechts: intakter Verguss ohne Fehlstellen; Aufnahmen zur Verfügung gestellt von Bianca Böttge, FhG IMWS	66
6.5	Ergebnisse mechanischer Simulation; Spannungen in Abh. des CTE α des Verkapselungsmaterials	67
6.6	Vergleich der elektrischen Durchschlagsfestigkeit verschiedener anorganischer Verkapselungsmaterialien	69
6.7	Elektronenmikroskopische Aufnahme der Verbindungsstelle (Keil) einer Halbleiteroberfläche mit einem Aluminiumbonddraht und einem anorganischen Verkapselungsmaterial; rot markiert: Zerstörte Halbleitermetallisierung durch abrasiven Abtrag; Aufnahmen zur Verfügung gestellt von Bianca Böttge, FhG IMWS	70
6.8	Ermittelte Haftfestigkeiten verschiedener Phosphatzemente auf Cu-DCBs	71
6.9	Vergleich einer durch anorganisches Verkapselungsmaterial angegriffene Halbleitermetallisierung (links) mit einer intakten (rechts); Ergebnisse und Abbildungen mit freundlicher Genehmigung von Bianca Böttge, FhG IMWS	73
6.10	In situ Leckströme $I_{CE,S}$ unter HTRB Testbedingungen	74
6.11	Zusammenfassung der erfassten statischen Leckströme $I_{CE,S}$ unter RT und 1200 V gemessen vor dem Verkapseln (pre enc), nach dem Verkapseln (post enc) und nach Beenden des HTRB-Tests (post HTRB)	75
6.12	Ergebnisse der Halbleitercharakterisierung von DUT 74 am Curvetracer; links: Vor Verkapselung; Mitte: Nach Verkapselung; rechts: nach HTRB; oben: GE-Leak-Test; unten: Threshold-Test	75
6.13	Ergebnisse des power cyclings „CemPack Development Sample®“ mit Vergleich zur Referenz eines Silikon-Weichvergusses	77
6.14	Vergleich der ΔT - und U_{CE} -Verläufe eines konventionell (links) und eines anorganisch verkapselten Prüflings (rechts) des power cyclings	77
6.15	Überlagerung der U_{CE} -Kurven zweier DUTs; eines mit Silikon-Weichverguss und eines mit Zement	78
6.16	Vergleich der ΔT - und U_{CE} -Verläufe eines anorganisch und eines konventionell verkapselten Prüflings des power cyclings mit kleinen Halbleitern	79
6.17	Vergleich des Zustandes des Chiplotes nach Test; links: Silikon-Weichverguss nach 19.167 Zyklen; rechts: anorg. Verkapselung nach 67.389 Zyklen; Aufnahmen zur Verfügung gestellt von Bianca Böttge, FhG IMWS	80
7.1	Ergebnisse thermisch transienter FEM-Simulation zum Einfluss der Wärmeleitfähigkeit	84

7.2	Schnittansicht des Modells mit Isothermen mit zunehmender Wärmeleitfähigkeit von oben nach unten	85
7.3	Schematische Darstellung Leistungsmodul mit TMC	87
7.4	Vereinfachtes thermisches Ersatzschaltbild eines Leistungsmoduls mit und ohne TMC	87
7.5	Ergebnisse thermisch transienter FEM-Simulation zum Einfluss der Wärmeleitfähigkeit mit TMC	88
7.6	Isotherme Schnittansicht der Simulationsergebnisse; links: $t=1$ s, rechts: $t=1000$ s	89
7.7	Vektordarstellung der Wärmestromdichte in Schnittansicht des Simulationsmodells, $t=1000$ s	89
7.8	Relativer $R_{th,ja}$ in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit und der verwendeten thermischen Pfade	90
7.9	E1-Modul mit (rechts) und ohne TMC (links) als Vehikel zur experimentellen Verifikation des Simulationsmodells; Aufnahme vor Applikation des Verkapselungsmaterials	91
7.10	Ergebnisse der Z_{th} -Messung und thermisch transienter Simulation zur Verifikation des Simulationsmodells des TMC	92
7.11	Schematische Darstellung eines leistungselektronischen Systems	93
7.12	Seitliche Ansicht eines Umrichters ohne Gehäuse; im Zentrum: Rahmenmodul	94
7.13	Schnittansichten der Volumenkörper zur Untersuchung des geometrischen Einflusses; oben: isometrische Ansicht; unten: Frontansicht	94
7.14	Ergebnisse der Analyse multidirektionaler Kühlungsstrategien	95
7.15	Referenz: E3-Rahmenmodul ohne Verkapselung und Deckel	96
7.16	Schnittansicht des CAD-Modells einer Basisbaugruppe mit Kontaktierungsschiene aus Busbars und DCB	98
7.17	Verschiedene Aufbaustufen der Basiseinheit: a.) Bodenplatte mit DCB; b.) zusätzlich mit org. Isolationfolie, Gate-Abgriffen und DC+; c.) zusätzlich mit zweiter Lage org. Isolationfolie; d.) komplette Basiseinheit mit DC- und Phase	99
7.18	Verschiedene Aufbaustufen des tridirektional gekühlten Moduls: a.) Basiseinheit; b.) zwei Basiseinheiten; c.) Modulkörper aus drei Basiseinheiten; d.) zusätzlich mit ext. DC- Busbar; e.) zusätzlich mit ext. DC+ Busbar; f.) zusätzlich mit zentralem Kühlrohr	100
7.19	vollständiges CAD-Modell des TriCool-Moduls	101
7.20	Ergebnisse der thermischen Simulation der Modulvarianten E3-Rahmenmodul und TriCool	102
7.21	Ergebnisse der thermischen Simulation der Modulvarianten E3-Rahmenmodul und TriCool mit doppelter Leistung	103
7.22	Darstellung der Prognosegenauigkeit des Simulationsmodells im Vgl. zur Messung; 1 Chip	106

7.23	Prototyp des TriCool-Moduls für die R_{th} -Messung	106
7.24	Ergebnisse von Simulation und R_{th} -Messung mit zwei aktiven Halbleitern; Vergleich E3- und TriCool-Modul; links: Halbleitertemperatur T_j ; rechts: thermischer Widerstand $R_{th,ja}$	107
7.25	Ergebnisse von Simulation und R_{th} -Messung mit 6 aktiven Halbleitern; Vergleich E3- und TriCool-Modul; links: Halbleitertemperatur T_j ; rechts: thermischer Widerstand $R_{th,ja}$	108
7.26	Darstellung der Prognosegenauigkeit des Simulationsmodells im Vgl. zur Messung	109
A.1	Simulationsmodell zur Analyse der Abhängigkeit der Bonddrahttemperatur vom vorhandenen Bonddrahtquerschnitt; links: mit Verkapselungsmaterial; rechts: ohne Verkapselungsmaterial	141
A.2	Schnittansicht des CAD-Modells der mechanischen Simulation mit Bezeichnung verwendeter Materialien	142
A.3	Halbleiter- und Bonddrahttemperatur in Abhängigkeit der Bonddrahtanzahl	143
A.4	Ergebnisse der Simulationen zum maximalinvasiven Modulansatz	144
A.5	Ergebnisse der R_{th} -Messung zum maximalinvasiven Modulansatz	145

Tabellenverzeichnis

2.1	Vergleich der wichtigsten Eigenschaften einer Sinter- und Lotschicht [29]	12
3.1	Beschreibung der diskutierten thermischen Widerstände eines leistungselektronischen Moduls	36
5.1	Übersicht der in dieser Arbeit verwendeten anorganischen Verkapselungsmaterialien	44
5.2	Versuchsparameter HTRB	45
5.3	Versuchsparameter PCT	48
5.4	Versuchsparameter Schertest	60
6.1	Notwendige Materialeigenschaften anorganischer Verkapselungsmaterialien aufgeteilt auf unterschiedliche Betrachtungsebenen	62
6.2	Auflistung relevanter Komponenten eines Leistungsmoduls mit der Materialzusammensetzung und den dazugehörigen CTE	67
7.1	Komponenten des Systems Leistungsmodul mit deren Ausprägung in der Referenz und der Zugehörigkeit zum thermischen Stapel	97
7.2	Pugh-Matrix zur Konzeptauswahlanalyse zur Umsetzung der externen Kontaktierung	97
7.3	Pugh-Matrix zur Konzeptauswahlanalyse zur Umsetzung der schaltungsträgerübergreifenden Kontaktierung	98
7.4	Ergebnisse von Simulation und R_{th} -Messung des E3-Moduls; ein aktiver Halbleiter	105
7.5	Ergebnisse von Simulation und R_{th} -Messung des TriCool-Moduls; ein aktiver Halbleiter	105
7.6	Auflistung eingesetzter Parameter zur Berechnung der Lebensdauer nach CIPS08 [11]	112
A.1	Ergebnisse der Simulation zur Bestimmung der Bonddrahttemperatur in Abhängigkeit der Bonddrahtanzahl	142

Literaturverzeichnis

- [1] SCHRÖDER, Dierk: *Leistungselektronische Schaltungen: Funktion, Auslegung und Anwendung*. 3. Aufl. 2012. überarb. und erw. Berlin & Heidelberg : Springer, 2012 (Springer-Lehrbuch), S. 193, 658 ff.
- [2] SPECOVIVUS, Joachim: *Grundkurs Leistungselektronik: Bauelemente, Schaltungen und Systeme*. 9., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2018, S. 1, 43, 45
- [3] GROSS, Rudolf ; MARX, Achim: *Festkörperphysik*. 3rd ed. Berlin & Boston : De Gruyter Inc, 2018 (De Gruyter Studium Ser), S. 243 f., 517
- [4] VOLKE, Andreas ; HORNKAMP, Michael: *IGBT modules Technologies, driver and application*. 2. ed. München : Infineon Technologies AG, 2012, S. 72 ff.
- [5] ANGLHUBER, Martin J.: *Untersuchungen zum Verhalten nanoskalig gefüllter Epoxidharzformstoffe unter elektrischer Beanspruchung*. München : Universitätsbibliothek der TU München, 2012, S. 53
- [6] EPOXY TECHNOLOGY INC.: *Betrachtungen zur Auswahl eines thermisch-leitenden Epoxidharzes*. <https://www.jpkkummer.com/sites/default/files/Auswahl%20von%20thermisch-leitenden%20Epoxies.pdf>, Abruf: 14.09.2020
- [7] CIAPPA, Mauro: Selected failure mechanisms of modern power modules. In: *Microelectronics Reliability* 42 (2002), Nr. 4-5, S. 653–667
- [8] YANG, Yuhang ; DORN-GOMBA, Lea ; RODRIGUEZ, Romina ; MAK, Christopher ; EMADI, Ali: Automotive Power Module Packaging: Current Status and Future Trends. In: *IEEE Access* PP (2020)
- [9] TEXAS INSTRUMENTS, INCORPORATED: Semiconductor, Packaging, Assembly: Semiconductor Packaging Assembly Technology. (2011). <https://www.ti.com/lit/an/snoa286/snoa286.pdf>, Abruf: 10.09.2020
- [10] DOANE, Daryl A. (Hrsg.): *Multichip module technologies and alternatives: The basics*. New York : Van Nostrand Reinhold, 1993, S. 11

- [11] LUTZ, Josef ; SCHLANGENOTTO, Heinrich ; SCHEUERMANN, Uwe: *Halbleiter-Leistungsbauelemente: Physik, Eigenschaften, Zuverlässigkeit*. 2. Aufl. Berlin : Springer Vieweg, 2012, S. 211, 240, 242, 248 f., 270, 274, 278, 283
- [12] INFINEON TECHNOLOGIES AG: *Short form catalog 2018: Technologies, driver and application*. https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Shortform+Catalog-PC-v03_00-EN.pdf?fileId=db3a30431a47d73d011a529661267822, Abruf: 08.07.2020
- [13] WINTRICH, Arendt ; NICOLAI, Ulrich ; TURSKY, Werner ; REIMANN, Tobias: *Applikationshandbuch Leistungshalbleiter*. 2., überarbeitete Auflage. Ilmenau : ISLE Verlag, 2015, S. 41, 45 f., 75, 93, 121, 180, 312
- [14] ZACH, Franz: *Leistungselektronik: Ein Handbuch Band 1*. 5. Aufl. Wiesbaden : Vieweg, 2015, S. 706 f., 716
- [15] INFINEON TECHNOLOGIES AG: *SIGC8IT60NC - Technical data sheet*. 2003
- [16] BICAKCI, Aylin ; OLESEN, Klaus ; EISELE, Ronald ; OSTERWALD, Frank: Thermal characteristics and investigations of a novel power module technology using organic insulators. (2015)
- [17] BICAKCI, Aylin: *Thermische Untersuchung von Schaltungsträgern für leistungselektronische Halbleitermodule mit organischem Isolator*, Technische Universität Berlin, Diss., 2019. S. 40, 153
- [18] BARGEL, Hans-Jürgen (Hrsg.) ; SCHULZE, Günter (Hrsg.): *Werkstoffkunde*. 12., bearbeitete Auflage, korrigierter Nachdruck. Berlin : Springer Vieweg, 2018 (Springer-Lehrbuch), S. 95 f., 104 – 107
- [19] HORNBOGEN, Erhard ; EGGELER, Gunther ; WERNER, Ewald: *Werkstoffe: Aufbau und Eigenschaften von Keramik-, Metall-, Polymer- und Verbundwerkstoffen*. 12., aktualisierte Auflage. 2019, S. 480
- [20] WITKE, Klaus ; SCHEEL, Wolfgang: *Handbuch Lötverbindungen*. 1. Auflage. Leuze, 2011, S. 91
- [21] HUANG, Xiaoguang ; WANG, Zhiqiang ; YU, Yanqun: Thermomechanical properties and fatigue life evaluation of SnAgCu solder joints for microelectronic power module application. In: *Journal of Materials Research and Technology* 9 (2020), Nr. 3, S. 5533–5541
- [22] CHI, Gary ; CHEN, Ian ; LIAO, Andy: Development of TCT Life Prediction Model of Solder for Power. In: *PCIM Europe 2019; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*. Berlin : VDE Verlag, 2019, S. 1063–1068

- [23] BELL, Hans: *Reflowlöten: Grundlagen, Verfahren, Temperaturprofile und Lötfehler ; mit 41 Tabellen*. 1. Aufl. Bad Saulgau : Leuze, 2005, S. 13
- [24] HERAEUS DEUTSCHLAND GMBH & CO. KG: *Microbond® PE823: Technical Data Sheet*. https://www.heraeus.com/media/media/het/doc_het/products_and_solutions_het_documents/solder_materials_docs/microbond_smt823/TDS_Solder_Paste_F823_SA35-89M30~1.pdf, Abruf: 20.11.2020
- [25] GÖHRE, Jens: *Entwicklung und Implementierung einer verbesserten Lastwechseltestmethode zur experimentellen Bestimmung der Zuverlässigkeit von Dickdrahtbonds in Leistungsmodulen*, Technische Universität Berlin, Diss., S. 16
- [26] SCHEUERMANN, Uwe ; WIEDL, P.: Low temperature joining technology - a high reliability alternative to solder contacts. In: *Workshop on Metal Ceramic Composites for Functional Applications*. Wien, 1997, S. 181–192
- [27] SCHMIDT, Ralf ; SCHEUERMANN, Uwe: Separating Failure Modes in Power Cycling Tests. In: *7th International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS)*, 2012
- [28] RUDZKI, J. ; BECKER, M. ; EISELE, R. ; POECH, M. ; OSTERWALD, F.: Power Modules with Increased Power Density and Reliability Using Cu Wire Bonds on Sintered Metal Buffer Layers. In: *8th International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS)*, 2014
- [29] SCHEUERMANN, Uwe ; BECKEDAHL, Peter: The Road to the Next Generation Power Module - 100% Solder Free Design. In: *5th International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS)*, 2008
- [30] BECKER, Martin: *Neue Technologien für hochzuverlässige Aufbau- und Verbindungstechniken leistungselektronischer Bauteile*, Technische Universität Chemnitz, Diss., 2015. S. 16, 23
- [31] SCHEEL, Wolfgang (Hrsg.) ; HANKE, Hans-Joachim (Hrsg.): *Baugruppentehnologie der Elektronik*. 1. Aufl. Berlin : Verl. Technik, 1997, S. 417 ff.
- [32] GUTH, Karsten ; SIEPE, Dirk ; GÖRLICH, Jens ; TORWESTEN, Holger ; ROTH, Roman ; HILLE, Frank ; UMBACH, Frank: New assembly and interconnects beyond sintering methods. In: *PCIM Europe 2010; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, 2010
- [33] RUDZKI, Jacek ; OSTERWALD, Frank ; BECKER, Martin ; EISELE, Ronald: Novel Cu-bond contacts on sintered metal buffer for power module with extended capabilities. In: *PCIM Europe 2012; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, 2012

- [34] BEHRENDT, Stefan ; BECKER, Martin ; WOEHL, Robert ; BENNING, David ; OSTERWALD, Frank ; BASTOS ABIBE, Andre ; EISELE, Ronald ; ANDERSEN, Katja ; XU, Tao ; LUECHINGER, Christoph: Feasibility of copper-based ribbon bonding as an assembly method for advanced power modules. In: *PCIM Europe 2018; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, 2018
- [35] ARDEBILI, Haleh ; PECHT, Michael: *Encapsulation technologies for electronic applications*. Oxford : William Andrew, 2009, S. 7, 131, 138, 151
- [36] MITSUBISHI ELECTRIC SEMICONDUCTOR: *IPM G1-series: Application note*
- [37] BANASZCZYK, J. ; ADAMCZYK, B.: Dielectric strength measurements of silicone gel. In: *2016 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE)*, 2016
- [38] SCHLIEBS, Reinhard ; ACKERMANN, Jürgen: Chemie und Technologie der Silicone I. In: *Chemie in unserer Zeit* 21 (1987), Nr. 4, S. 121–127
- [39] BELZ, Oliver: *Mikrohohlkugelgefülltes Silikongel als Isolierstoff in der Hochspannungstechnik*, Universität Kassel, Diss., 2011. S. 12, 17
- [40] FINIS, Gernot: *Das Verhalten von Silikongel unter hohen elektrischen Feldstärken*, Universität Kassel, Diss., 2005. S. 10
- [41] WACKER CHEMIE AG: *Solutions for the semiconductor and power electronics industries*. <https://www.wacker.com/h/de-de/medias/6883-EN.pdf>, Abruf: 31.05.2020
- [42] MOMENTIVE PERFORMANCE MATERIALS, Inc.: *TSE 3062 – Technical Data Sheet*. 2007
- [43] MIDDENDORF, Andreas: *Lebensdauerprognostik unter Berücksichtigung realer Belastungen am Beispiel von Bondverbindungen bei thermomechanischen Wechselbeanspruchungen*, Technische Universität Berlin, Diss., 2009. S. 39 f.
- [44] WACKER CHEMIE AG: *Silicone Gel Solutions*. <https://www.wacker.com/h/de-se/medias/6982-EN.pdf>. Version: 2020, Abruf: 30.04.2020
- [45] PEDERSEN, K. B. ; PEDERSEN, K.: Bond wire lift-off in IGBT modules due to thermomechanical induced stress. In: *3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, IEEE, 2012, S. 519–526
- [46] MOMENTIVE PERFORMANCE MATERIALS, Inc.: *Silicone Materials for Electronic Devices and Component Assemblies*. https://www.momentive.com/docs/default-source/productdocuments/tse3331/silicone-materials-for-electronic-devices-and-component-assemblies.pdf?sfvrsn=456b6c9c_14, Abruf: 01.06.2021

- [47] WITTEN, Elmar (Hrsg.): *Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen*. 4. Auflage. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014, S. 67, 74
- [48] POLYTEC PT GMBH POLYMERE TECHNOLOGIEN: *Duralco/Durapot Epoxide*. https://www.polytec-pt.com/no_cache/de/produkte/hochtemperaturklebstoffe-und-keramische-materialien/hochtemperatur-epoxide/?cid=19332&did=16612&sechash=9e7efc2a, Abruf: 24.11.2020
- [49] ITECMA: *Epoxy Resin TO200 Technical Data Sheet*. <http://itecma.ru/upload/iblock/1ad/1adf45e1f687e66e6711b5f0676253b9.pdf>, Abruf: 02.06.2020
- [50] LEE, Henry ; NEVILLE, Kris: *Handbook of epoxy resins*. Reissue. New York : McGraw-Hill, 1982 (A McGraw-Hill classic handbook)
- [51] ZENG, Jun ; FU, Renli ; SHEN, Yuan ; HE, Hong ; SONG, Xiufeng: High thermal conductive epoxy molding compound with thermal conductive pathway. In: *Journal of Applied Polymer Science* 113 (2009), Nr. 4, S. 2117–2125
- [52] BRAUN, T. ; WUNDERLE, B. ; BECKER, K. ; KOCH, M. ; BADER, V. ; ASCHENBRENNER, R. ; REICHL, H.: Improved Reliability of Leadfree Flip Chip Assemblies Using Direct Underfilling by Transfer Molding. In: *31. IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium*, 2006, S. 27–34
- [53] SHIBUYA, M. ; NGUYEN, L.: High Thermal Conductivity Mold Compounds for Advanced Packaging Applications. In: *IEEE 67th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2017, 1334–1339
- [54] EPOXY TECHNOLOGY INC.: *B-stage Epoxy*. https://www.epotek.com/site/files/Techtips/pdfs/Tech_Tip_20_-_B-stage_Epoxy.pdf. Version: 2018, Abruf: 17.09.2020
- [55] KARCHER, Michael: Bestimmung der Aushärtekinetik eines 2-stufig aushärtenden Epoxidharzes zur Herstellung von Hochleistungsfaserverbunden. In: *Zeitschrift Kunststofftechnik* 1 (2016), S. 80–111
- [56] LEE, K. ; JEON, O. ; LIM, S. ; PARK, S. ; LEE, B. ; LEE, T.: DBC substrate based EMC Transfer Molded Power Module. In: *5th International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS)*, 2008
- [57] Y. CHEN ; H. CHEN ; W. CHI ; H. HSU ; K. LU ; H. LIAO: Epoxy Resin Encapsulated IGBT Module Characteristics and Reliability. In: *14th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT)*, 2019, S. 120–123
- [58] MITSUBISHI ELECTRIC SEMICONDUCTOR: *Mitsubishi Electric Semiconductor Power Modules 2019*. <https://www.mitsubishichips.eu/wp-content/uploads/2019/05/Mitsubishi-Electric-Semiconductor-Power-Modules-2019.pdf>, Abruf: 09.06.2020

- [59] ASADA, S. ; KONDO, S. ; KAJI, Y. ; YOSHIDA, H.: Resin Encapsulation Combined with Insulated Metal Baseplate for Improving Power Module Reliability. In: *PCIM Europe 2016 - International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, 2016
- [60] RADKE, Thomas ; LAKSHMANAN, Narender: New Horizons in Thermal Cycling Capability Realized with the 7th gen. IGBT Module Based on SLC-Technology. In: *Bodo's Power Systems* (2017), S. 48–51
- [61] OHARA, K. ; MASUMOTO, H. ; TAKAHASHI, T. ; MATSUMOTO, Manabu ; OTSUBO, Y.: A New IGBT Module with Insulated Metal Baseplate(IMB) and 7th Generation Chips. In: *PCIM Europe 2015 - International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, 2015
- [62] HÜLSENBERG, Dagmar: *Keramik: Wie ein alter Werkstoff hochmodern wird*. Berlin : Springer Vieweg, 2014 (Technik im Fokus), S. 91
- [63] PAUL, Steffen ; PAUL, Reinhold: *Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik 1*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2014, S. 95
- [64] GLASSBOND (NW) LTD: *CAPPING CEMENT SPECIFICATION: Grade Name: K12/M*. <http://www.glassbond.co.uk/wp-content/uploads/2018/03/TDS-K12M-rev03.pdf>. Version: 2020, Abruf: 28.07.2020
- [65] GARBEV, Krassimir: *Struktur, Eigenschaften und quantitative Rietveldanalyse von hydrothermal kristallisierten Calciumsilikathydraten (C-S-H-Phasen)*, Universität Heidelberg, Diss., 2004. S. 151
- [66] BOSOLT, Diethelm ; PICKERT, Roland: *Zement-Merkblatt Betontechnik B1 9.2017: Zemente und ihre Herstellung*. <https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Zementmerkblaetter/B1.pdf>, Abruf: 29.07.2020
- [67] VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE E.V.: *Zement-Taschenbuch 2002*. 50. Aufl. Düsseldorf : Verlag Bau + Technik, 2002, S. 109, 115
- [68] KÄSSNER, Stefan: *Thermisch effiziente Keramik-Komposite für die Verkapselung elektronischer Bauelemente*, Eberhard Karls Universität Tübingen, Diss., 2019. S. 21, 27, 56, 73
- [69] SEPP ZEUG GMBH & CO. KG: *Datenblatt Sauereisen-Zement Nr. 13*. http://www.seppzeug.de/data/datenblatt_nr13.pdf, Abruf: 09.09.2020
- [70] SEPP ZEUG GMBH & CO. KG: *Datenblatt Sauereisen-Zement Nr. 10*. http://www.seppzeug.de/data/datenblatt_nr10.pdf, Abruf: 09.09.2020

- [71] HANNOSCHÖCK, Nikolaus: *Wärmeleitung und -transport: Grundlagen der Wärme- und Stoffübertragung*. Berlin : Springer Vieweg, 2018, S. 3, 220
- [72] BAEHR, Hans D. ; STEPHAN, Karl: *Wärme- und Stoffübertragung: Mit zahlreichen Tabellen sowie 62 Beispielen und 94 Aufgaben*. 7., neu bearb. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010, S. 11, 28, 29
- [73] KRAUS, Allan D. ; BAR-COHEN, Avram: *Design and analysis of heat sinks*. New York : Wiley, 1995 (Wiley series in thermal management of microelectronic and electronic systems), S. 3, 13
- [74] BAEHR, Hans D. ; KABELAC, Stephan: *Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen*. 15. Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer Vieweg, 2012, S. 79
- [75] BÖCKH, Peter ; WETZEL, Thomas: *Wärmeübertragung: Grundlagen und Praxis*. 5., überarb. und erw. Aufl. Berlin : Springer Vieweg, 2014, S. 83
- [76] SEMIKRON INTERNATIONAL GMBH: *Heatsinks*:
<https://www.semikron.com/products/product-classes/accessories/heatsinks.html>.
<https://www.semikron.com/products/product-classes/accessories/heatsinks.html>.
Version: 2020, Abruf: 09.07.2020
- [77] AAMIR, Muhammad ; QIANG, Liao ; XUN, Zhu ; WANG, Hong ; ULLAH, Ramzan ; ZUBAIR, Muhammad: Study on Ultra Fast Cooling Behaviors of Water Spray Cooled Stainless Steel Plates. In: *Experimental Heat Transfer* 29 (2015), Nr. 3, S. 299–321
- [78] TYFOROP CHEMIE GMBH: *Tyfocor® Konzentrat - Technische Informationen*. https://tyfo.de/downloads/TYFOCOR_de_TI.pdf. Version: 2015, Abruf: 09.07.2020
- [79] BOYD CORPORATION: *Cold Plate*. <https://www.boydcorp.com/images/liquid-cooling/Liquid-Cooling-Product-Image.jpg>. Version: 2020, Abruf: 03.05.2020
- [80] KUNDU, Pijush K. ; COHEN, Ira M. ; DOWLING, David R.: Chapter 9 - Laminar Flow. In: KUNDU, Pijush K. (Hrsg.) ; COHEN, Ira M. (Hrsg.) ; DOWLING, David R. (Hrsg.): *Fluid Mechanics (Sixth Edition)*. Boston : Academic Press, 2016, S. 409
- [81] SOLOMON, Gedlu ; GEBREHIWET, Lijalem ; ABESELOM, Eden: Methods of Analytical Pressure Drop Calculation. In: *International European Extended Enablement in Science, Engineering & Management (IEEESEM)* 8 (2020), Nr. 8, S. 111–119
- [82] YANG, Sam ; CHALFANT, J. ; ORDONEZ, J. ; KHAN, J. ; LI, Chen ; CVETKOVIC, I. ; VARGAS, J. ; CHAGAS, Monike ; XU, Y. ; BURGOS, R. ; BOROYEVICH, D.: Shipboard PEBB Cooling Strategies. In: *IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS)*, 2019

- [83] HERWIG, Heinz ; MOSCHALLSKI, Andreas: *Wärmeübertragung: Physikalische Grundlagen und ausführliche Anleitung zum Lösen von Aufgaben*. 4., überarbeitete und erweiterte Auflage. 2019, S. 64
- [84] HERWIG, Heinz: *Turbulente Strömungen: Einführung in die Physik eines Jahrhundertproblems*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2017, S. 27
- [85] STROEBEL-MAIER, Henning: Enhanced Thermal Couple Term Model for Power Modules. In: *PCIM Europe 2019 - International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, 2019
- [86] DANFOSS SILICON POWER GMBH: *ShowerPower® cooling concept: Application Note*. http://files.danfoss.com/download/Drives/DKSPPM301A302_SP%20Application%20note_2016.pdf. Version: 2016, Abruf: 09.07.2020
- [87] DANFOSS SILICON POWER GMBH: *DCM™1000: Next Generation Automotive Traction Power Module Technology Platform*. http://files.danfoss.com/download/Drives/HiRes_DKSPPB434A102_Danfoss_DCM1000.pdf. Version: 2020, Abruf: 13.07.2020
- [88] EISELE, Ronald ; OLESEN, Klaus ; ŞENYILDIZ, Teoman: Thermal Management Concepts For Power Electronic Modules.
- [89] OLESEN, Klaus ; BREDTMANN, Rüdiger ; EISELE, Ronald: "ShowerPower" New Cooling Concept for Automotive Applications. In: *Automotive Power Electronics*. Paris, 2006
- [90] STEPHAN, Peter ; SCHABER, Karlheinz ; STEPHAN, Karl ; MAYINGER, Franz: *Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen Band 1: Einstoffsysteme*. 19., ergänzte Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg and s.l. : Springer Berlin Heidelberg, 2013 (Springer-Lehrbuch), S. 272
- [91] MUDAWAR, Issam: Assessment of high-heat-flux thermal management schemes. In: *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies* 24 (2001), Nr. 2, S. 122–141
- [92] YAKHISHI-TAFTI, Ehsan: Pumped Two-Phase-Cooling for Thermal Management of High Heat Flux Electronics. In: *Aerospace & Defense Technology Magazine* (2014). <https://www.aerodefensetech.com/component/content/article/adt/features/articles/19822>, Abruf: 18.12.2020
- [93] SHARAR, Darin ; JANKOWSKI, Nicholas ; MORGAN, Brian: Review of Two-phase Electronics Cooling for Army Vehicle Applications / Army Research Laboratory. 2010. – technischer Bericht
- [94] ELOYAN, Karapet ; KRETA, Alexey ; TKACHENKO, Egor ; MARKOVICH, D. M. ; KUIBIN, P. A. ; VOROBYEV, M. A.: Two-phase cooling system with controlled pulsations. In: *EPJ Web of Conferences* 196 (2019)

- [95] ACT - ADVANCED COOLING TECHNOLOGIES: *High Performance Power Electronics Coolers*. <https://www.1-act.com/wp-content/uploads/2017/04/HighPerformancePowerElectronicsCoolers-web.pdf>. Version: 2020, Abruf: 16.07.2020
- [96] MORENO, G. ; JEFFERS, J. R. ; NARUMANCHI, S. ; BENNION, K.: Passive two-phase cooling for automotive power electronics. In: *Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM)*, 2014, S. 58–65
- [97] CULHAM, J. ; KHAN, Waqar ; YOVANOVICH, M. ; MUZYCHKA, Yuri: The Influence of Material Properties and Spreading Resistance in the Thermal Design of Plate Fin Heat Sinks. In: *Journal of Electronic Packaging* 129 (2007), Nr. 1, S. 76–81
- [98] INFINEON TECHNOLOGIES AG: *SIGC100T65R3EA - Technical data sheet*. 2009
- [99] BHAT, Krishna ; GUO, Yuan-Bo ; XU, Yang ; BALTIS, Theodore ; HAZELMYER, Donald ; HOPKINS, D. C.: Results for an Al/AlN composite 350°C SiC solid-state circuit breaker module. In: *27. Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2012, S. 2492–2498
- [100] GEORGIA TECH PACKAGING RESEARCH CENTER: High-Power Devices, High Temperature Materials and Packaging for Electric Cars. <https://ewh.ieee.org/soc/cpmt/presentations/cpmt1703g.pdf>, Abruf: 04.06.2021. – Präsentation
- [101] MUSLIM, J. ; LESAIN, O. ; HANNA, R. ; REBOUD, J. L. ; SINISUKA, N. I.: Electrical Characterization of Dibenzyltoluene Liquid at High Temperatures up to 350°C. In: *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, 2018, S. 58–61
- [102] AMRO, Raneem ; LUTZ, J. ; RUDZKI, Jacek ; THOBEN, M. ; LINDEMANN, A.: Double-sided low-temperature joining technique for power cycling capability at high temperature. In: *European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, 2005
- [103] HU, Keting ; DU, He ; CECCARELLI, Lorenzo ; IANNUZZO, Francesco ; BLAABJERG, F. ; TASIU, Ibrahim: Cost-Effective Prognostics of IGBT Bond Wires with Consideration of Temperature Swing. In: *IEEE Transactions on Power Electronics* 35 (2019), Nr. 7, S. 6773 – 6784
- [104] KCC CORPORATION: *KCC Organic Material EMC*. <https://www.kccworld.co.kr/data/product/KCC EMC Brochure ENG.pdf>. Version: 2020, Abruf: 08.09.2020
- [105] HITACHI CHEMICALS: *EMC Characteristics*. <https://www.hitachi-chem.co.jp/english/products/srm/012.html>. Version: 2020, Abruf: 20.07.2020
- [106] CZWIENCZEK, Stefan: *Hochtemperaturstabile Gießharze für die Elektrotechnik und Mikroelektronik*, Technische Universität München, Diss., 2007. S. 6

- [107] KAESSNER, Stefan ; SCHEIBEL, Markus ; BEHRENDT, Stefan ; BOETTGE, Bianca ; BERTHOLD, Christoph ; NICKEL, K. G.: Reliability of Novel Ceramic Encapsulation Materials for Electronic Packaging. In: *Journal of Microelectronics and Electronic Packaging* 15 (2018), S. 132–139
- [108] BEHRENDT, STEFAN: *Charakterisierung der Eigenschaften einer anorganisch umhüllten, leistungselektronischen Transistorbaugruppe*, Fachhochschule Kiel, Master-Thesis, 2014. S. 85
- [109] ECPE: *ECPE Guideline AQG 324: Qualification of Power Modules for Use in Power Electronics Converter Units (PCUs) in Motor Vehicles*, 2018. S. 41, 45, 52 ff., 53
- [110] INFINEON TECHNOLOGIES AG: *IGC70T120T8RM - Technical data sheet*. 2015
- [111] WILSON, Alan D. ; NICHOLSON, John W.: *Acid-Base Cements*. Cambridge University Press, 2009, S. 76 ff.
- [112] WALLING, Sam A. ; PROVIS, John L.: Magnesia-Based Cements: A Journey of 150 Years, and Cements for the Future? In: *Chemical reviews* 116 (2016), Nr. 7, S. 4170–4204
- [113] TC MESS- UND REGELTECHNIK GMBH: *Miniatur-Mantel-Thermoelemente mit Übergangshülse 406-620 - Technical data sheet*. 2020
- [114] PLASSMANN, Wilfried (Hrsg.) ; SCHULZ, Detlef (Hrsg.): *Handbuch Elektrotechnik: Grundlagen und Anwendungen für Elektrotechniker*. 7., neu bearbeitete Auflage. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2016, S. 295
- [115] DEPARTMENT OF DEFENSE: *Test Method Standard Microcircuits: MIL-STD-883E*. 31.12.1996
- [116] HERING, Ekbert (Hrsg.) ; BRESSLER, Klaus (Hrsg.) ; GUTEKUNST, Jürgen (Hrsg.): *Elektronik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. 7., aktualisierte und verbesserte Auflage. Berlin : Springer Vieweg, 2017, S. 167
- [117] HERAEUS DEUTSCHLAND GMBH & CO. KG: *Material information sheet: Development sample CemPack®*. 2019
- [118] BOETTGE, B. ; NAUMANN, F. ; BEHRENDT, S. ; SCHEIBEL, M. G. ; KAESSNER, S. ; KLENGEL, S. ; PETZOLD, M. ; NICKEL, K. G. ; HEJTMANN, G. ; MIRIC, A. Z. ; EISELE, R.: Material Characterization of Advanced Cement-Based Encapsulation Systems for Efficient Power Electronics with Increased Power Density. In: *IEEE 68th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2018, S. 1258–1269
- [119] INFINEON TECHNOLOGIES AG: *IGC70T120T8RM Technical data sheet*. 2015

- [120] HENSLER, A. ; LUTZ, J. ; THOBEN, M. ; ZACHARIAE, J.: Power cycling tests at high temperatures with IGBT power modules for hybrid electrical vehicle applications. In: *3rd Electronics System Integration Technology Conference (ESTC)*, 2010
- [121] LUTZ, Josef ; HERRMANN, Tobias ; FELLER, M. ; BAYERER, Reinhold ; LICHT, T. ; AMRO, Raed: Power cycling induced failure mechanisms in the viewpoint of rough temperature environment. In: *5th International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS)*, 2008
- [122] MORGAN, V. T.: Effect of elevated temperature operation on the tensile strength of overhead conductors. In: *IEEE Transactions on Power Delivery* 11 (1996), Nr. 1, S. 345–352
- [123] HENNECK, Stefan: *Emailverkehr im Forschungsprojekt ReLEEB*. 16.03.2020
- [124] BAYERER, Reinhold ; HERRMANN, Tobias ; LICHT, Thomas ; LUTZ, J. ; FELLER, Marco: Model for Power Cycling lifetime of IGBT Modules - various factors influencing lifetime. In: *5th International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS)*, 2008
- [125] HENSLER, Alexander: *Lastwechselfestigkeit von Halbleiter-Leistungsmodulen für den Einsatz in Hybridfahrzeugen*, Technische Universität Chemnitz, Diss., S. 27
- [126] HUTZLER, Aaron: *Untersuchungen zur Lastwechselfestigkeit von Halbleiteranbindungen unter Hochtemperaturbelastung*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diss., 2019. S. 100 f.
- [127] LUTZ, Josef: IGBT-Modules: Design for reliability. In: *13th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, 2009

A Anhang

A.1 Simulationsergebnisse

A.1.1 Abhängigkeit der Bonddrahttemperatur von der Anzahl vorhandener Bonddrähte

Für die Berechnungen ist das in Abbildung A.1 und A.2 dargestellte CAD-Modell verwendet worden. Der Halbleiter ist mit einer Verlustleistung von 350 W beaufschlagt worden. Der Stromfluss durch Drähte und Halbleiter beträgt 200 A. Die Unterseite ist mit einem Wärmeübergangskoeffizienten h von $5000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ zu einer virtuellen Kühlung mit einer Medientemperatur von 17°C behaftet. Die eingesetzte Verkapselung entspricht einem Silikongel und besitzt eine Wärmeleitfähigkeit von $0,17 \text{ W/m} \cdot \text{K}$.

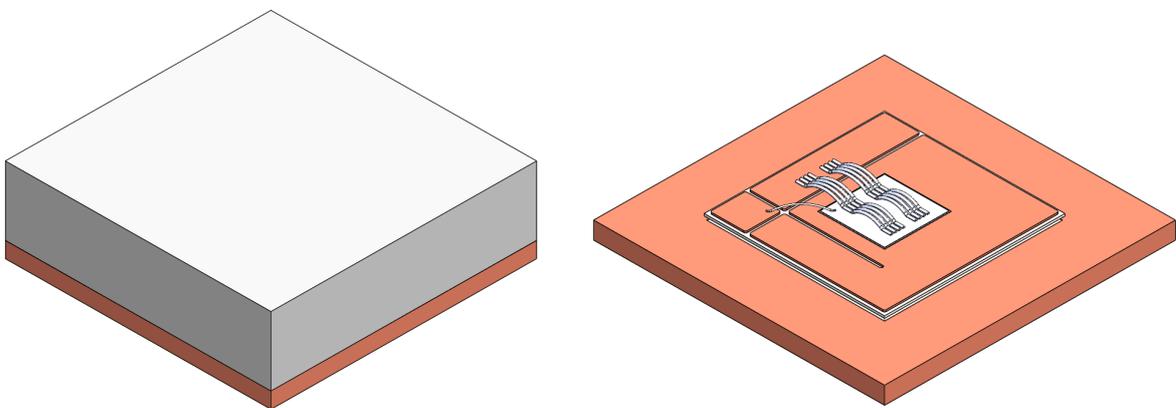


Abbildung A.1: Simulationsmodell zur Analyse der Abhängigkeit der Bonddrahttemperatur vom vorhandenen Bonddrahtquerschnitt; links: mit Verkapselungsmaterial; rechts: ohne Verkapselungsmaterial

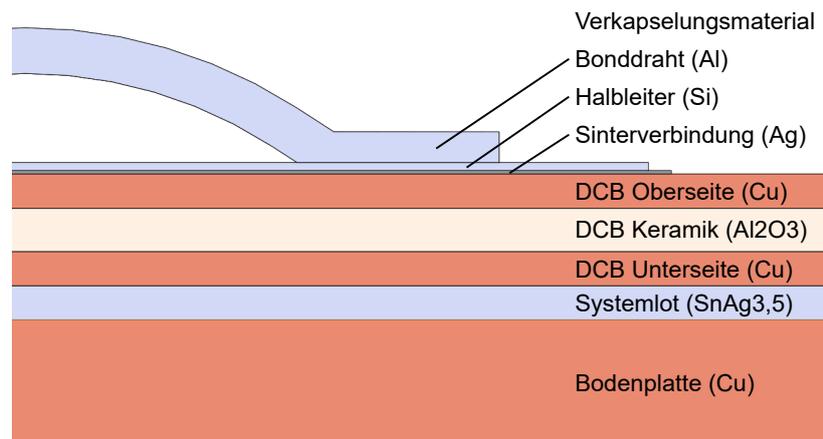


Abbildung A.2: Schnittansicht des CAD-Modells der mechanischen Simulation mit Bezeichnung verwendeter Materialien

Ergebnisse

Drähte	T_j [°C]	T_{wire} [°C]
8	146,46	149,31
7	146,93	164,54
6	147,63	192,12
5	155,93	249,45
4	184,22	412,05

Tabelle A.1: Ergebnisse der Simulation zur Bestimmung der Bonddrahttemperatur in Abhängigkeit der Bonddrahtanzahl

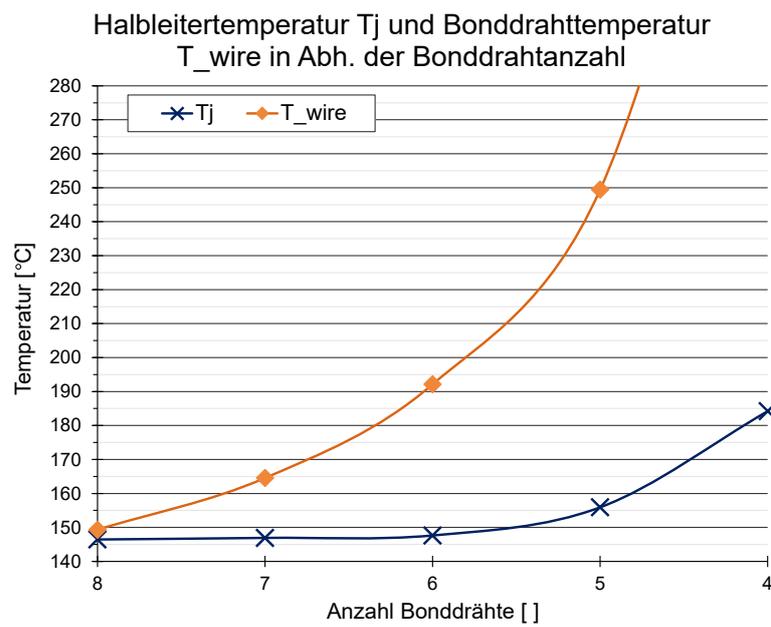


Abbildung A.3: Halbleiter- und Bonddrahttemperatur in Abhängigkeit der Bonddrahtanzahl

A.1.2 Maximalinvasiver Modulansatz

Zielname	Einheit	Simulation ein aktiver Halbleiter			Simulation zwei aktive Halbleiter			Simulation alle Halbleiter aktiv			Simulation alle Halbleiter doppelt		
		Wert	TrICool	Delta	Wert	TrICool	Delta	Wert	TrICool	Delta	Wert	TrICool	Delta
Volumenziel Max. Temperatur (Festkörper) L1	°C	70,18	64,34	5,84	86,42	75,14	11,28	103,94	80,38	23,56	190,38	143,91	46,47
Volumenziel Max. Temperatur (Festkörper) L2	°C	38,49	32,51	5,98	88,41	73,88	14,53	101,22	78,82	22,40	185,60	140,83	44,76
Volumenziel Max. Temperatur (Festkörper) M1	°C	32,23	19,61	12,62	40,20	22,80	17,41	101,70	81,01	20,69	207,48	147,88	59,60
Volumenziel Max. Temperatur (Festkörper) M2	°C	24,58	19,89	4,69	30,45	23,91	6,54	98,30	78,71	19,59	203,17	143,17	60,00
Volumenziel Max. Temperatur (Festkörper) R1	°C	19,88	20,37	-0,49	21,91	23,21	-1,30	103,56	80,88	22,68	220,44	147,56	73,09
Volumenziel Max. Temperatur (Festkörper) R2	°C	20,25	20,79	-0,54	22,78	24,29	-1,52	100,78	80,91	19,87	212,93	147,61	65,33
Oberflächenziel Wärmestrom surface potting/inner cooling	[W]	0,11	8,15	-8,04	0,42	17,02	-16,60	1,34	44,04	-42,70	4,02	108,63	-104,61
Oberflächenziel Wärmestrom Bp1	[W]	-134,56	-118,10	-16,46	-271,36	-245,77	-25,59	-812,57	-257,40	-555,17	-1979,54	-558,59	-1420,96
Oberflächenziel Wärmestrom Bp2	[W]	-	-2,32	-	-	-4,69	-	-262,55	-	-	-	-559,78	-
Oberflächenziel Wärmestrom Bp3	[W]	-	-2,56	-	-	-6,78	-	-261,39	-	-	-	-560,34	-
Oberflächenziel Stromstärke L1	[A]	-100,00	-100,00	0,00	-100,00	-100,00	0,00	-100,00	-93,72	-6,28	-200,00	-200,01	0,01
Oberflächenziel Stromstärke L2	[A]	0,00	0,00	0,00	-100,00	-100,00	0,00	-100,00	-93,72	-6,28	-200,00	-200,02	0,02
Oberflächenziel Stromstärke M1	[A]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-100,00	-105,73	5,73	-200,00	-199,98	-0,02
Oberflächenziel Stromstärke M2	[A]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-100,00	-105,73	5,72	-199,99	-199,99	0,00
Oberflächenziel Stromstärke R1	[A]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-100,00	-100,57	0,57	-199,99	-200,00	0,01
Oberflächenziel Stromstärke R2	[A]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-100,00	-100,57	0,57	-199,99	-200,04	0,05
Oberflächenziel Mittelw. Temperatur (Fluid) Einlass	°C	16,88	16,80	0,08	16,88	16,80	0,08	16,88	16,80	0,08	16,88	16,80	0,08
Oberflächenziel Mittelw. Temperatur (Fluid) Auslass	°C	17,98	17,88	0,10	19,10	19,07	0,03	23,74	23,58	0,16	32,86	31,53	1,33
Oberflächenziel Max. Temperatur (Fluid) Auslass	°C	18,82	17,99	0,82	20,38	19,21	1,17	29,40	23,93	5,48	37,88	32,46	5,41
Oberflächenziel Mittelw. statischer Druck Einlass	[mbar]	1085,35	1070,57	14,78	1084,37	1069,87	14,49	1080,92	1074,67	6,25	1076,17	1071,37	4,80
Oberflächenziel Mittelw. statischer Druck Auslass	[mbar]	1012,48	1009,42	3,06	1012,48	1009,42	3,06	1012,48	1009,42	3,06	1012,48	1009,42	3,06
Oberflächenziel Max. Statischer Druck Auslass	[mbar]	1086,07	1071,59	14,48	1085,08	1070,89	14,18	1081,62	1075,69	5,93	1076,85	1072,39	4,46
Oberflächenziel Mittelw. Statistischer Druck Auslass	[mbar]	1012,92	1010,42	2,50	1012,92	1010,42	2,50	1012,92	1010,42	2,50	1012,92	1010,42	2,50
Differenzdruck Modul Mittelw.	[mbar]	72,87	61,15	11,73	71,89	60,45	11,44	68,44	65,25	3,19	63,69	61,95	1,74
Differenzdruck Modul max.	[mbar]	73,59	61,17	12,41	72,60	60,48	12,12	69,14	65,27	3,87	64,37	61,97	2,40
Volumenziel Joule-Wärme wires L1	[W]	2,87	1,45	1,42	3,07	1,53	1,54	3,26	1,36	1,89	1,75	1,46	0,85
Volumenziel Joule-Wärme wires L2	[W]	0,00	0,00	0,00	4,50	2,31	2,19	4,70	2,07	2,63	25,54	11,24	14,30
Volumenziel Joule-Wärme wires M1	[W]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,31	1,82	1,49	18,19	7,76	10,43
Volumenziel Joule-Wärme wires M2	[W]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,93	2,41	1,53	21,60	10,18	11,42
Volumenziel Joule-Wärme wires R1	[W]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,86	1,54	1,32	16,00	7,25	8,75
Volumenziel Joule-Wärme wires R2	[W]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,17	1,71	1,46	17,41	8,04	9,37
Volumenziel Max. Temperatur (Festkörper) wires L1	°C	67,93	62,12	5,81	84,93	73,38	11,55	101,69	78,57	23,12	215,06	140,35	74,71
Volumenziel Max. Temperatur (Festkörper) wires L2	°C	36,95	31,21	5,74	87,07	72,23	14,84	99,74	77,21	22,53	229,39	137,26	92,13
Volumenziel Max. Temperatur (Festkörper) wires M1	°C	34,45	19,54	14,90	39,22	22,66	16,57	99,87	76,76	23,11	228,51	137,82	90,69
Volumenziel Max. Temperatur (Festkörper) wires M2	°C	24,18	19,78	4,40	29,89	23,96	5,93	96,64	74,46	22,18	225,14	132,85	92,29
Volumenziel Max. Temperatur (Festkörper) wires R1	°C	19,80	20,28	-0,48	21,80	23,11	-1,31	102,11	76,37	25,73	238,90	136,82	102,08
Volumenziel Max. Temperatur (Festkörper) wires R2	°C	20,14	20,80	-0,66	22,62	24,90	-2,29	99,41	76,40	23,02	223,69	136,73	86,96
Eingepörrte Verlustleistung Modul	[W]	131,30	129,30	2,00	262,60	258,60	4,00	787,80	775,80	12,00	1575,60	1551,60	24,00

Abbildung A.4: Ergebnisse der Simulationen zum maximalinvasiven Modulansatz

A.2 Experimentelle Ergebnisse

A.2.1 Ergebnisse R_{th} -Messung maximalinvasiver Modulansatz

Ein Aktiver Halbleiter

Es wird jeweils der Mittelwert aus fünf durchgeführten Messungen aufgeführt

E3				
DUT	Tj_max [°C]	T_Zulauf [°C]	T_Rücklauf [°C]	Rth_ja [K/W]
L1	72,48	16,88	17,92	0,42

TriCool				
DUT	Tj_max [°C]	T_Zulauf [°C]	T_Rücklauf [°C]	Rth_ja [K/W]
L2	64,34	16,80	17,88	0,36

Zwei aktive Halbleiter

Es wird jeweils der Mittelwert aus fünf durchgeführten Messungen aufgeführt

E3				
DUT	Tj_max [°C]	T_Zulauf [°C]	T_Rücklauf [°C]	Rth_ja [K/W]
L1	81,16	16,76	19,17	0,49
L2	84,36	16,70	19,14	0,49

TriCool				
DUT	Tj_max [°C]	T_Zulauf [°C]	T_Rücklauf [°C]	Rth_ja [K/W]
L1	71,98	17,00	19,30	0,43
L2	68,36	16,98	19,26	0,38

Sechs aktive Halbleiter

Es wird jeweils der Mittelwert aus fünf durchgeführten Messungen aufgeführt

E3				
DUT	Tj_max [°C]	T_Zulauf [°C]	T_Rücklauf [°C]	Rth_ja [K/W]
L1	81,16	16,76	19,17	0,49
L2	84,36	16,70	19,14	0,49
M1	101,96	16,24	23,60	0,63
M2	100,54	16,24	23,78	0,62
R1	104,70	16,14	23,78	0,65
R2	102,92	16,16	23,80	0,64

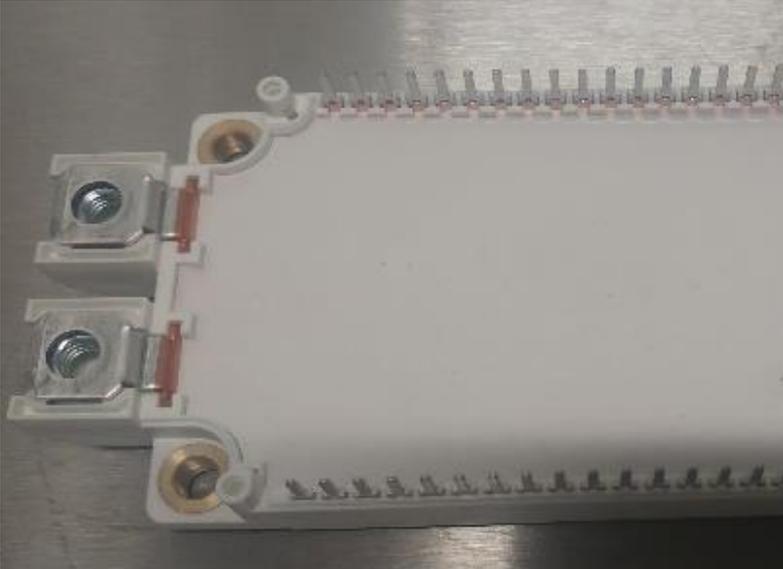
TriCool				
DUT	Tj_max [°C]	T_Zulauf [°C]	T_Rücklauf [°C]	Rth_ja [K/W]
L1	71,98	17,00	19,30	0,43
L2	68,36	16,98	19,26	0,38
M1	79,04	16,96	23,72	0,47
M2	75,40	16,90	23,70	0,43
R1	80,26	17,04	23,82	0,48
R2	79,18	17,00	23,88	0,47

Abbildung A.5: Ergebnisse der R_{th} -Messung zum maximalinvasiven Modulansatz

A.3 Datenblätter

A.3.1 Heraeus Development Sample CemPack®

Development sample CemPack®^(1,2)



CemPack®

2 component ceramic encapsulation material

Magnesium phosphate binder

Zirconium silicate filler

Key features

- Hard encapsulation developed for glob-top and potting designs
- Inorganic encapsulation with superior thermal robustness
- Application of cement paste by ambient temperatures and pressure
- Non-hazardous formulation
- Requires application of adhesion promoter primer

Main properties

	Rating	Unit
Thermal conductivity @ 20°C laser flash analysis	1.4	W/m·K
Bending strength 3 point bending test	12.3	MPa
Youngs modulus 3 point bending test	1	GPa
Coefficient of thermal expansion (Al ₂ O ₃) @ 25 °C - 300 °C dilatometer	7.0	ppm/K

The descriptions and engineering data shown here have been compiled by Heraeus using commonly-accepted procedures, in conjunction with modern testing equipment, and have been compiled as according to the latest factual knowledge in our possession. The information was up-to date on the date this document was printed (latest versions can always be supplied upon request). Although the data is considered accurate, we cannot guarantee accuracy, the results obtained from its use, or any patent infringement resulting from its use (unless this is contractually and explicitly agreed in writing, in advance). The data is supplied on the condition that the user shall conduct tests to determine materials suitability for a particular application

⁽¹⁾ Development Product Information Sheet, preliminary values

⁽²⁾ For Development purposes only

Material Properties Inorganic Encapsulation^(1,2)

Main properties

	Rating	Unit
Density	2.15	g/cm ³
Thermal conductivity Laser Flash Analysis	1.39	W/(m K)
Thermal capacity Laser Flash Analysis	0,77	J/(g K)
Maximum Working Temperature Differential Scanning Calorimetry	200	°C
Adhesion on Cu, Shearing test of 5 x 5 x 3 mm specimen on DCB surface	1.2	MPa
Adhesion on Al ₂ O ₃ , Shearing test of 5 x 5 x 3 mm specimen on ceramic surface	0.7	MPa
Adhesion on PBT-GF30, Shearing test of 5 x 5 x 3 mm specimen on top plate of frame module	0	MPa
Adhesion on Ni/Cu, Shearing test of 5 x 5 x 3 mm specimen on base plate of frame module	0.2	MPa

Cement paste properties

	Cement	Unit
Pot life	5	h
Stirring time	7	h
Viscosity, Rheometer PP-25, Rotation	3.7	Pa s
Yield point, Rheometer PP-25, Oscillation	0.024	%
Shrinkage, shrinkage cone	0.4	%

The descriptions and engineering data shown here have been compiled by Heraeus using commonly-accepted procedures, in conjunction with modern testing equipment, and have been compiled as according to the latest factual knowledge in our possession. The information was up-to date on the date this document was printed (latest versions can always be supplied upon request). Although the data is considered accurate, we cannot guarantee accuracy, the results obtained from its use, or any patent infringement resulting from its use (unless this is contractually and explicitly agreed in writing, in advance). The data is supplied on the condition that the user shall conduct tests to determine materials suitability for a particular application

⁽¹⁾ Development Product Information Sheet, preliminary values

⁽²⁾ For Development purposes only

Veröffentlichungen

Publikationen

1. S. Behrendt, R. Eisele, K. Andersen, T. Xu, C. Luechinger, M. Becker, R. Woehl, D. Benning, F. Osterwald, A. Abibe. „Feasibility of copper-based ribbon bonding as an assembly method for advanced power modules” – PCIM Europe 2018 proceedings, Nuremberg, Germany, 2018, S. 491 - 498.
2. S. Behrendt, R. Eisele, M.G. Scheibel, S. Kaessner. „Implementation of a new thermal path within the structure of inorganic encapsulated power modules” – Microelectronics Reliability, Volumes 100–101; Sept, 2019, Artikel 113430.
3. S. Behrendt, R. Eisele. “Neuartiges Modulkonzept zur verbesserten Kühlung eines anorganisch verkapselten leistungselektronischen Moduls” – Tagungsband 2. Symposium Elektronik und Systemintegration ESI, Landshut, Germany, 2020, S. 40 - 48.
4. B. Boettge, F. Naumann, S. Behrendt, M. G. Scheibel, S. Kaessner, S. Klengel, M. Petzold, K. G. Nickel, G. Hejtmann, A.Z. Miric, R. Eisele. "Material Characterization of Advanced Cement-Based Encapsulation Systems for Efficient Power Electronics with Increased Power Density", 2018 IEEE 68th ECTC proceedings, San Diego, USA, 2018, S. 1258-1269 - Best Session Paper
5. S. Käbner, M.G. Scheibel, S. Behrendt, B. Boettge, C. Berthold, K.G. Nickel. “Reliability of Novel Ceramic Encapsulation Materials for Electronic Packaging” - Journal of Microelectronics and Electronic Packaging, 2018, Volume 15, Issue 3: S. 132-139.
6. F. Naumann, B. Boettge, S. Behrendt, R. Eisele, S. Klengel. „Numerical material design for reliable power electronics with cement-based encapsulation” – CIPS 2020 proceedings, Berlin, Germany, 2020, S. 602 - 607.

Patente

1. S. Behrendt, R.Eisele - DE 10 2019 111 366 B3 - „Kompaktes Leistungselektronik-Modul mit vergrößerter Kühlfläche"

Ehrenerklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die Hilfe eines kommerziellen Promotionsberaters habe ich nicht in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorliegenden Dissertation stehen. Verwendete fremde und eigene Quellen sind als solche kenntlich gemacht. Ich habe insbesondere nicht wissentlich:

- Ergebnisse erfunden oder widersprüchliche Ergebnisse verschwiegen,
- statistische Verfahren absichtlich missbraucht, um Daten in ungerechtfertigter Weise zu interpretieren,
- fremde Ergebnisse oder Veröffentlichungen plagiiert,
- fremde Forschungsergebnisse verzerrt wiedergegeben.

Mir ist bekannt, dass Verstöße gegen das Urheberrecht Unterlassungs- und Schadensersatzansprüche des Urhebers sowie eine strafrechtliche Ahndung durch die Strafverfolgungsbehörden begründen kann.

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass die Dissertation ggf. mit Mitteln der elektronischen Datenverarbeitung auf Plagiate überprüft werden kann.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form als Dissertation eingereicht und ist als Ganzes auch noch nicht veröffentlicht.

Kiel, den 01. September 2021

Stefan Behrendt

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Ronald Eisele, welcher die vorliegende Arbeit angeregt und betreut hat. Als Leiter der Arbeitsgruppe der Forschungs- und Entwicklungszentrum Fachhochschule Kiel GmbH, an der ich während der Anfertigung der Promotion als Projektingenieur tätig war, stand er mir immer mit einem guten Rat, anregenden Diskussionen und aufmunternden Worten zur Seite. Er bot mir stets ein offenes Ohr für die kleineren sowie die größeren Probleme, die nach einem „Schnack“ bei einer Tasse Kaffee schon nicht mehr ganz so schlimm erschienen. Ronald, vielen Dank für die vielen Jahre der Zusammenarbeit und Unterstützung!

Weiterhin möchte ich Prof. Dr Matthias Petzold danken. Er hat die Arbeit seitens des Fraunhofer IMWS betreut und war zudem ein zuverlässiger Ansprechpartner bei der Organisation der akademischen Betreuung. Über die Jahre hielt er stets konstruktive Kritik und anregende Hinweise für mich parat.

Zudem möchte ich Frau Prof. Dr. Kathrin Dörr für die akademische Betreuung und Übernahme des Promotionsverfahrens danken.

Mein weiterer Dank gilt Prof. Dr Frank Osterwald, der mich stets mit guten Ratschlägen und neuen Blickwinkeln auf Problemstellungen unterstützt hat. Frank, ich danke dir für die fortwährende Unterstützung und die Einblicke, die du mir ermöglicht hast!

Außerdem gilt mein Dank dem gesamten Team der Fachhochschule Kiel: Markus Bast, Stefan Söhl, Armin Hindel, Dieter Migdalek und Prof. Dr. Kay Rethmeier. Vielen Dank für die tatkräftige Unterstützung und die vielen anregenden Diskussionen!

Weiterhin gilt mein Dank meiner Lebensgefährtin Dr. Aylin Bicakci, die für mich immer eine Stütze war auf die ich mich vollkommen blind verlassen konnte. Sowohl in den sonnigen als auch in den stürmischen Zeiten.

Zu guter Letzt aber nicht minder wertend möchte ich mich mich bei meiner Familie und vor allem bei meinen Eltern bedanken. Ohne ihre fortwährende Unterstützung in allen Lebenslagen wäre ich heute nicht dort, wo ich jetzt bin. Ich danke euch von ganzem Herzen!

Angaben zur Person

Persönliche Daten

Name Stefan Behrendt
Geburtsdatum 01.12.1988
Geburtsort Eckernförde
Staatsangehörigkeit deutsch

Lebenslauf

seit 04/2020 **Forschungsingenieur** bei der Danfoss Silicon Power GmbH

03/2015 - 03/2020 **Projektingenieur** am Institut für Mechatronik der Fachhochschule
Kiel sowie der Forschungs- und Entwicklungszentrum
Fachhochschule Kiel GmbH

03/2015 **Master of Engineering** mit Abschlussnote 1,4

Fachhochschule Kiel

Master-Thesis: Charakterisierung der Eigenschaften einer
anorganisch umhüllten, leistungselektronischen Transistorbaugruppe

09/2012 - 03/2015 **Studium der Ingenieurwissenschaften (Master)**

Fachhochschule Kiel

Studiengang: Elektrische Technologien mit Schwerpunkt
Mechatronik

07/2012 **Bachelor of Engineering** mit Abschlussnote 2,1

Fachhochschule Kiel

Bachelor-Thesis: Entwurf und Realisierung eines
Einzeltransistorgehäuses in Sinter- und Rapidprototyping-Technik

09/2009 - 07/2012 **Studium der Ingenieurwissenschaften (Bachelor)**

Fachhochschule Kiel

Studiengang: Mechatronik

05/2008 **Zivildienstleistender** bei „Die Johanniter e.V.“

06/2008 **Abitur** an der Jungmannschule in Eckernförde

Kiel, den 26.10.2021

Stefan Behrendt

