



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

VDI | VDE | IT



# Projektabschlussbericht

## Verbundprojekt „SiCool“

Hochintegrierte SiC-Leistungselektronik auf thermisch partitionierten Keramiksubstraten (SiCool)

Teilvorhaben der Fraunhofer Gesellschaft

**Lebensdauermethodik und Optimierung für die Logik und Leistungs-Integration (IISB)**

**Thermisch partitionierte Substrate für hochintegrierte SiC-Leistungselektronik (IFAM)**

Förderkennzeichen: 16EMO0267

### Laufzeit des Vorhabens

01.09.2018 - 31.08.2021 (kostenneutrale Laufzeitverlängerung bis 31.12.2021)

### **Autoren**

*Sebastian A. Letz*

Fraunhofer-Institut für integrierte Systeme und Bauelementetechnologie

Schottkystrasse 10, 91058 Erlangen

Tel.: 09131 761 619 E-Mail: Sebastian.Letz@iisb.fraunhofer.de

*Thomas Hutsch*

Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und angewandte Materialforschung

Winterbergstraße 28, 01277 Dresden

Tel.: 0351 2537 396, E-Mail: Thomas.Hutsch@ifam-dd.fraunhofer.de

### **Verbundkoordinator**

*Martin Rittner*

Robert Bosch GmbH

Robert-Bosch-Campus 1, 71272 Renningen

Tel.: 0711 811-8678 E-Mail: Martin.Rittner2@de.bosch.com

### **Ansprechpartner Fraunhofer IISB**

*Andreas Schletz*

Fraunhofer-Institut für integrierte Systeme und Bauelementetechnologie

Schottkystrasse 10, 91058 Erlangen

Tel.: 09131 761 187 E-Mail: Andreas.Schletz@iisb.fraunhofer.de.de

### **Verbundpartner**

Robert Bosch GmbH, Fraunhofer (Fraunhofer IISB und Fraunhofer IFAM), Siemens AG, SCHOTT AG, Austerlitz electronic GmbH, ISEA / RWTH Aachen

## Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellung.....	5
1.1	Aufgabenstellung.....	5
1.2	Voraussetzungen zur Projektdurchführung.....	5
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	7
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn .....	8
1.5	Zusammenarbeit.....	9
2	Eingehende Darstellung der Ergebnisse.....	11
2.1	AP 1 Spezifikation der Anforderungen .....	11
2.2	AP 2 Erforschung neuartiger Modulstrukturen und -konzepte .....	12
2.2.1	AP 2.1 Simulative Konzeptentwicklung.....	12
2.2.2	AP 2.2 Machbarkeit geeigneter Werkstoffverbunde .....	29
2.3	AP 4 Entwicklung von Methoden zur Lebensdauermodellierung.....	34
2.3.1	AP 4.1 FIT-Raten und Verschleißausfallmechanismen .....	34
2.3.2	AP 4.2 Implementierung der Methode.....	37
2.3.3	AP 4.3 Integration und Darstellung der Ergebnisse.....	40
2.3.4	AP 4.4 Test.....	41
2.4	AP5 Test und Verifikation anhand von vereinfachten Modellstrukturen.....	56
2.4.1	AP 5.1 Elektrische und thermische Charakterisierung .....	57
2.4.2	AP5.2 Optimierung der Modellstrukturen und -Konzepte .....	58
2.4.3	AP5.3: Optimierung der Modellstrukturen und –konzepte .....	59
2.1	AP 6: Demonstrator .....	59
2.1.1	AP 6.1: Proof of Concept (Demonstratorgeneration 1).....	59
2.1.2	AP 6.2: Entwicklung und Aufbau Demonstratorgeneration 2.....	61
3	Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	63
4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	64

5	Verwertbarkeit des Ergebnisses .....	64
6	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen .....	65
7	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen .....	65

# 1 Kurzdarstellung

## 1.1 Aufgabenstellung

Das Verbundprojekt SiCool hatte die Entwicklung eines hocheffizienten logik-leistungs-integrierten SiC-Halbbrückenmoduls auf Basis eines thermisch partitionierten keramischen Schaltungsträgers und flexibel einsetzbaren Flüssigkeitskühler-Konzepten zum Ziel. Darauf basierend wurden im Rahmen des Projekts verschiedene Geschäftsfelder und Einsatzszenarien (z.B.: Antriebsumrichter, DC-DC-Wandler) adressiert.

Die Hauptaufgaben des Fraunhofer IISB waren die Entwicklung eines numerisch optimierten Hochleistungskühlkörpers für das neue SiC-Halbbrückenmodul sowie ein universeller Optimierungsworkflow für Kühlkörper der Leistungselektronik und die Entwicklung einer kombinierten Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsmethode für Leistungs- und Logikkomponenten. Beide Themen spiegeln die aktuellen Bedürfnisse und Interessen der Leistungselektronik und insbesondere der Automobilindustrie wider.

Am Fraunhofer IFAM in Dresden wurde die Entwicklung eines Substrates auf Kupfer-Kohlenstoff-Basis entwickelt, welches direkt in den Gesamtaufbau integriert werden kann. Dabei waren die Randbedingungen einer Wärmeleitfähigkeit größer  $500 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ , einem angepassten Ausdehnungskoeffizienten sowie eine beidseitige Beschichtung mittels Reinkupfer zu erfüllen. Ebenso waren geometrische Toleranzen zu erfüllen, um erforderliche Lötprozesse durchführen zu können. Es sollte eine Möglichkeit aufgezeigt werden, wie die im Forschungsprojekt eingesetzten Materialien im industriellen Umfeld dargestellt werden können.

## 1.2 Voraussetzungen zur Projektdurchführung

Das Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen (IISB) befasst sich im Geschäftsfeld „Leistungselektronische Systeme“ mit Themen wie innovative Schaltungs- und Systemlösungen für hocheffiziente und kompakte Leistungswandler, aktive und passive Halbleiterbauelemente sowie deren Aufbau und Verbindungstechnik. Die Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsuntersuchungen sowie die Lebensdauermodellierung der Bauelemente bis zum System stellen einen wichtigen Bereich dar. Das IISB verfügt über umfangreiche Erfahrung auf dem Gebiet der Fehleranalyse. Dies gilt für alle Ebenen elektronischer Schaltungen, d.h. Chip, Chipkontaktierung, Gehäuse, Schaltungsträger und passive Bauelemente. Speziell in dem Förderprojekt Propower (BMBF) hat sich das IISB mit dem thermischen Management und

Lebensdauermodellierung der Leistungselektronik beschäftigt<sup>1</sup>. Im EU-Projekt CREAM konnten Kompetenzen zum Thema Lebensdauerprüfung und Hochtemperaturtests aufgebaut werden. Insbesondere die umfangreiche Testreihe an aktiven Lastwechseltests (Power Cycling) zeichnete das Projekt aus IISB-Sicht aus<sup>2,3</sup>. Zudem war das IISB unter den Finalteilnehmern der Google Little Box Challenge vertreten. Hierbei stand sowohl die kompakte Bauweise als auch das thermische Management eines Solar-Inverters im Fokus. In dem Forschungsprojekt Luftstrom (BMBF) wurde am IISB ein DC-DC-Wandler mit WBG-Halbleitern aufgebaut. Ein Fokus lag dabei auf dem thermischen Management mit Luftkühlung und der AVT, speziell mit Klebeschichten. Die Erkenntnisse aus diesen Projekten konnten auch für das Projekt SiCool verwendet werden.

Das Fraunhofer IFAM Dresden mit insgesamt 80 Mitarbeitern ist Institutsteil des Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) in Bremen. In Dresden besteht Jahrzehnte lange Erfahrung auf dem Gebiet der Pulvermetallurgie. Dabei bilden Werkstoffe für das thermische Management einen Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkt für die aktive oder passive Kühlung von Wärmequellen in der Elektronik sowie im Anlagen- und Maschinenbau. Bei der Bearbeitung der EU-Verbundvorhaben „EXTREMAT“, der Fraunhofer-Systemforschung „Elektromobilität“ und dem BMBF geförderten Verbundprojekt „PV-Pack“ wurde umfangreiches Know-how in Bezug auf die Materialherstellung sowie die Auslegung von Wärme ableitenden Strukturen erarbeitet, welches in die Entwicklung neuer Kühlstrukturen im geplanten Vorhaben einfließen wird. Durch die apparative Ausstattung am Standort Dresden ist von der Charakterisierung der entwickelten Materialien bis hin zur Fertigung von prototypischen oder kleinseriennahen Heatspreaderplatten bzw. Kühlkörpern bzw. Baugruppen möglich.

---

<sup>1</sup> N. Müller, „Aufbau- und Verbindungstechnik mit Graphit in einem Leistungsmodul,“ Plus Zeitschrift.

<sup>2</sup> A. Hutzler, A. Tokarski und A. Schletz, „High temperature die-attach materials for aerospace power electronics: Lifetime tests and modeling,“ in 2015 IEEE Aerospace Conference, 2015.

<sup>3</sup> A. Hutzler, A. Tokarski, S. Kraft, S. Zischler und A. Schletz, „Increasing the lifetime of electronic packaging by higher temperatures: Solders vs. silver sintering,“ in 2014 IEEE 64th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), Orlando, FL, 2014.

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Gesamtvorhaben wurde in sechs Arbeitspakete (AP) unterteilt, die jeweils wiederum in individuelle Teilarbeitspakete gegliedert wurden. Dabei wurde das AP 4 zur Entwicklung von Methoden zur Lebensdauermodellierung vom Fraunhofer IISB koordiniert. Darüber hinaus haben das IISB und IFAM eine entscheidende Rolle in dem von Bosch geleiteten AP 2 zur Erforschung neuartiger Modulstrukturen und -konzepte und in dem von Bosch geleiteten AP 5 zum Test und zur Verifikation anhand von vereinfachten Modellstrukturen gespielt. Das Fraunhofer IISB und IFAM waren auch in AP 1 und AP 6 aktiv beteiligt. Die nachfolgende Grafik soll die einzelnen Arbeitspakete und deren thematischen Inhalt und Wechselwirkung verdeutlichen. Die Arbeitspakete, in welchen das IISB involviert war sind grün, diejenigen Arbeitspakete mit Beteiligung des IFAM blau eingefärbt.

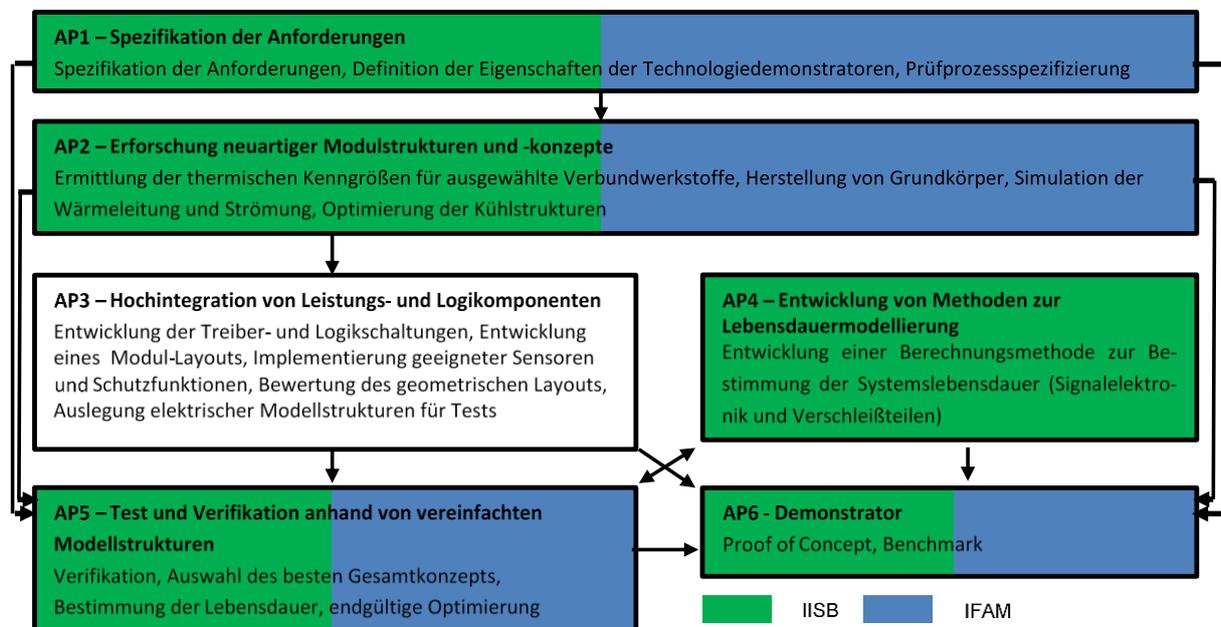


Abbildung 1-1: Aufteilung und Inhalte der Arbeitspakete für das Projekt SiCool.

Aufgrund der COVID-19-Pandemie haben sich bei beiden Instituten Arbeitsbedingungen und -abläufe ab März 2020 erschwert und einige der geplanten Arbeiten verliefen im Projekt zeitlich verzögert. Mit Hilfe einer genehmigten Partner-weiten kostenneutralen Projektlaufzeitverlängerung bis zum 31.12.2022 konnten jedoch alle für Fraunhofer geplanten Arbeiten erfolgreich bis zum Ende der Laufzeitverlängerung abgeschlossen werden.

## 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn

Ziel des ersten Hauptarbeitspakets AP 2, in welchem das Fraunhofer IISB und IFAM aktiv waren, war die Simulation und numerische Optimierung der Kühlstrukturen im Kühlkörper des entwickelten Leistungsmoduls sowie die Materialentwicklung für das Substrat mit gefordertem Eigenschaftsprofil. Der Forschungsstand zu Beginn des Projekts war auf dem Gebiet der Optimierung der Kühlstruktur von Leistungselektronik-Kühlkörpern, dass in einschlägigen Veröffentlichungen die Auswirkungen der Geometrie der Kühlstrukturen unter Beibehaltung ihrer äußeren Form und deren Abstände untereinander untersucht wurden, siehe <sup>4,5</sup>.

Entgegen der Möglichkeit zur Verwendung der Freiformoptimierungsmethode, wie in <sup>6,7</sup> gezeigt, wurde in SiCool ein praktischer und additiv-herstellungsfreundlicher Ansatz zur Optimierung der Topologie der SiCool-Kühlstrukturen verwendet. Wie in <sup>8,9</sup> erwähnt, ist das Wärmemanagement ein wesentliches Thema im Bereich der Leistungselektronik, da es die ständig wachsenden Anforderungen an Leistung, Leistungsdichte und Zuverlässigkeit sowie die Gesamteffizienz des Systems erfüllen muss.

Ziel des Arbeitspakets 4 unter der Leitung des Fraunhofer IISB war die Entwicklung eines kombinierten Lebensdauermodells, welches sowohl die Verschleißphase als auch eine konstante Ausfallrate bezüglich der üblichen Badewannenkurve für Ausfallverteilungen berücksichtigt. Zu Projektbeginn war der Stand der Technik (basierend auf den Ergebnissen des Projekts InTeLekt), die Zuverlässigkeit von Elektronikkomponenten über geeignete Alterungstests und mit Hilfe analytischer Schätzverfahren zu bewerten. Eine der ersten

---

<sup>4</sup> S. Ndao, Y. Peles und M.K. Jensen, „Multi-objective thermal design optimization and comparative analysis of electronics cooling technologies,“ in International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009

<sup>5</sup> W.A. Khan und J.R. Culham, „Optimization of pin-pin heat sinks using entropy generation minimization,“ in IEEE Trans. Compon. Packag. Technol. Bd. 28, pp. 247-254, 2005

<sup>6</sup> T. Van Oevelen, „Optimal Heat Sink Design for Liquid Cooling of Electronics,“ KU Leuven - Faculty of Engineering Science, Leuven, 2014.

<sup>7</sup> A. Husain und K.-Y. Kim, „Shape Optimization of Micro-Channel Heat Sink for Micro-Electronic Cooling,“ in IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Bd. 31, Nr. 2, pp. 322-330, 2008.

<sup>8</sup>S.R. Reddy und G. S. Dulikravich, “Multi-Objective Optimization of Micro Pin-Fin Arrays for Cooling of High Heat Flux Electronics” in International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE15, 2015

<sup>9</sup> E.M. Dede, S.N. Joshi und F. Zhou, “Topology Optimization, Additive Layer Manufacturing, and Experimental Testing of an Air-Cooled Heat Sink” in Journal of Mechanical Design, 2015

Methoden der Schätzverfahren hierzu waren der MIL Std. 217<sup>10</sup>. Deutlich moderner und anwenderfreundlicher ist die Methode nach IEC-TR-62380<sup>11</sup>.

Ein Standardtest zur Untersuchung der Lebensdauer und Zuverlässigkeit von Elektronikmodulen ist der Power Cycling Versuch. Dieser Versuch kann bei Verwendung einer Reihe verschiedener Testbedingungen unterschiedliche Fehlermoden in den Elektronikmodulen auslösen, wie in <sup>12</sup> zu sehen ist. Versuchsergebnisse liefern dabei ausschließlich empirische Zusammenhänge, welche die Extrapolationsfähigkeit der Ergebnisse stark einschränken. Durch die Verwendung von Finite-Elemente-Simulationen kann bei einer geeigneten Wahl der physikalisch relevanten Schädigungsvariablen in Kombination mit Power Cycling Experiment Ergebnissen eine präzisere Lebensdauervorhersage auch unter anderen Lastbedingung als dem Lebensdauertest erfolgen.

Zu Beginn des Projekts waren theoretische Studien auf dem Gebiet der Lebensdauermodellierung bekannt<sup>13,14</sup>, welche die Modellierung der Systemlebensdauer betrachten, jedoch keinen kombinierten simulativen und experimentellen Ansatz vorstellen.

## **1.5 Zusammenarbeit**

Eine regelmäßige und intensive Kooperation zwischen den Projektpartnern prägte die gesamte Projektlaufzeit. Der Beginn des Projekts eröffnete die Kooperationstätigkeiten durch die gemeinsame Definition eines Lastenhefts, welches die Randbedingungen für das zu entwickelnde Leistungsmodul und den Kühlkörper zusammenfasst. Dies wurde im Verbund des gesamten Konsortiums durchgeführt.

Nach der Entwicklung eines Workflows für die numerische Simulation und Optimierung des Kühlkörpers in AP 2, hat das Fraunhofer IISB intensiv mit dem Partner Bosch, welcher die

---

<sup>10</sup> MIL-HDBK-217F, „Reliability Prediction of Electronic Equipment“, Washington, D.C.: Department of Defense, 1990.

<sup>11</sup> International Electronic Council, „Reliability data handbook“, Geneva, 2004.

<sup>12</sup> R. Schmidt und U. Scheuermann, „Separating Failure Modes in Power Cycling Tests,“ in Integrated Power Electronics Systems (CIPS), Nürnberg, 2012.

<sup>13</sup> Y. Sun, T. Sun, M.G. Pecht und C. Yu, „Computing Lifetime Distributions and Reliability for Systems With Outsourced Components: A Case Study,“ in IEEE Access, Bd. 6, pp. 31359-31366, 2018

<sup>14</sup> Y. Mo, Y. Liu und L. Cui, „Performability analysis of multi-state series- parallel systems with heterogeneous components,“ in Rel. Eng. Syst. Safety, Bd. 171, pp. 48-56, 2018.

additive Fertigung der Kühlkörper im Projekt übernahm, zusammen an der Überarbeitung der numerisch optimierten Kühlstrukturen gearbeitet, um unter Berücksichtigung der Fertigungsgrenzbedingungen die technologische Umsetzbarkeit zu sichern. Alle weiteren Projektpartner brachten ebenfalls ihre Erfahrungen und Unterstützung in diesem Arbeitspunkt ein (z.B. CAD-Modellierung durch ISEA). Schließlich wurde in Zusammenarbeit mit Austerlitz ein funktionsfähiger Kühlkörper aus den numerisch optimierten Kühlstrukturen erstellt. Am Fraunhofer IFAM wurde die Entwicklung des Substrates vorangetrieben, um die geforderten Eigenschaften einer Wärmeleitfähigkeit von größer 500 W/(m\*K), angepasstem Ausdehnungskoeffizienten sowie beidseitig lötbare Kupferbeschichtung zu erreichen.

Im AP 3 hat das Fraunhofer IISB den Projektpartner ISEA durch Aufbringen von lötbaren Metallisierungstapeln auf die Halbleiter unterstützt, um eine erste SiC-Brückenschaltungsentwicklung aufbauen und vermessen zu können.

Im AP 4 hat das Fraunhofer IISB nach vorangegangener Entwicklung des kombinierten Lebensdauermodells und der entsprechenden Implementierung zusammen mit Schott und dem Fraunhofer IFAM die erforderlichen Materialdaten für die anschließenden Finite-Elemente-Analysen zusammengetragen und erarbeitet. Für die Validierung und Bewertung der Plausibilität der Simulationsergebnisse hat das Fraunhofer IISB anhand der ersten Lebensdauererprobungsdaten der Prüfkörper bei Siemens mit den Projektpartnern Bosch und Siemens erfolgreich zusammengearbeitet.

Im AP 5 wurden seitens IFAM auf Basis der entwickelten Substrate die erforderliche Anzahl an Substrate für den Aufbau von vereinfachten Modellstrukturen bereitgestellt. Dabei wurden mit Blick auf den Darstellprozess die Prozessstabilität sowie die Ausbeute gezielt verbessert.

Im AP 6 wurden seitens IFAM dann die erforderlichen Substrate für den Aufbau der Demonstratorgenerationen 1 und 2 aufgebaut. Eine einhergehende Charakterisierung der wichtigen Probenparameter wurde durchgeführt.

Sowohl in der vollständigen Projektlaufzeit inklusive der genehmigten Projektverlängerung als auch bis zur Fertigstellung der Abschlussberichte darüber hinaus sorgten regelmäßige Projekttreffen bzw. Abstimmungsrunden für gegenseitigen fachlichen Austausch sowie für konstruktive Anregungen und Hinweise zu Optimierungspotenzialen.

## 2 Eingehende Darstellung der Ergebnisse

### 2.1 AP 1 Spezifikation der Anforderungen

#### Fraunhofer IFAM

Mit Blick auf die im Gesamtaufbau zu verwendenden Substrate wurden die erreichbaren Eigenschaften für den reinen Verbundwerkstoff Kupfer/Diamant zusammengestellt und durch geeignete Charakterisierungsmethoden ermittelt. Die Daten sind in Tabelle 1 gezeigt und stehen im Projekt als Eingangsgröße für Simulationen zur Verfügung.

Tabelle 1: Zusammenstellung von erreichbaren Eigenschaften für Kupfer/Diamant Verbundwerkstoffe

Material	Temperatur [°C]	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	spezifische Wärmekapazität [J/gK]	Temperaturleitfähigkeit [mm <sup>2</sup> /s]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Fehler-Wärmeleitfähigkeit plus/minus [W/mK]	technischer CTE [ppm/K], 20 bis 250°C	Bending strength [MPa]	Young's Modulus [GPa]	G-modulus [GPa]	Poissonzahl Matrix	Poissonzahl Verstärkungskomponente	Poissonzahl Verbundwerkstoff, Mischungsregel, Volumenanteile	Elektrische Leitfähigkeit [MS/m]
Cu / 60Vol.% Diamant	20	5,3	0,4	282	597	59,7	8,4	240	228	85	0,35	0,2	0,26	9,3
	100		0,51	202	545	54,5								
	200		0,62	158	520	52,0								
	300		0,71	129	487	48,7								
	400		0,78	109	449	44,9								
	500		0,83	95	418	41,8								
	600		0,87	83	384	38,4								

Um eine mechanische Bearbeitung der Substrate zu ermöglichen, ist eine gezielte Umhüllung mit Kupfer angestrebt. Auf diesem Wege ist auch die Möglichkeit einer lokal eingebrachten Komponente mit verringerter Wärmeleitfähigkeit direkt neben dem hoch wärmeleitfähigen Verbundwerkstoff möglich. Die finale Auslegung ist nach erfolgten Simulationen angestrebt.

Das Ziel des Arbeitspaketes wurde erreicht.

#### Fraunhofer IISB

Um die Anforderungen an einzelne Komponenten und Baugruppen für die Erstellung des Lastenhefts festlegen zu können, wurden CAD-Modelle erstellt und erste numerische Simulationen mit einer Referenzkühlkörpergeometrie am IISB durchgeführt. Zusätzlich wurden mehrere numerische Simulationen neben der Referenzgeometrie auch für vorläufige Benchmark-Geometrievarianten durchgeführt.

Für die Berechnungen am IISB wurde die Fluidodynamik-Software 6Sigma ET von Future Facilities aufgrund ihres kartesischen Elementintegrationsschemas verwendet, welches erheblich verkürzte Rechenzeiten ermöglicht. Die Randbedingungen für diesen Simulationen und der Lebensdauerprüfungen wurden ebenfalls in diesem AP definiert.

Der Hauptmeilenstein 1 wurde gemäß dem Zeitplan erreicht.

## 2.2 AP 2 Erforschung neuartiger Modulstrukturen und -konzepte

### Fraunhofer IISB

#### 2.2.1 AP 2.1 Simulative Konzeptentwicklung

Ziel dieses Teilarbeitspakets war die simulative Auslegung und Validierung von ortsangepassten Flüssigkeitskühlstrukturen, die durch ein additiv hergestelltes 3D-Flow-Field und hochwärmeleitfähige Werkstoffe eine deutlich verbesserte Performance gegenüber dem Stand der Technik besitzen sollen. Zusätzlich wurde unter Verwendung eines Finite-Elemente-Modells der zu entwickelnden Halbbrücke und angenäherter Randbedingungen eine Schätzung der Temperaturverteilung während des Betriebs berechnet.

##### 2.2.1.1 AP 2.1.1 Entwicklung Simulationsworkflow

Der erste Schritt zur Optimierung der Kühlstruktur bestand darin, einen geeigneten Simulationsworkflow zu entwickeln. Basierend auf den Ergebnissen einer zu Beginn durchgeführten Literaturrecherche, wurden Pin-Flüssigkeitskühlkörper wegen ihres begrenzten Herstellungsaufwands und guter Kühlleistung als in der Leistungselektronik am häufigsten eingesetztes Kühlkonzept identifiziert. Das entsprechende repräsentative Referenzmodul, demgegenüber die Verbesserung durch Verwendung der optimierten Kühlstrukturen darzustellen sind, war ein Modul der Firma CREE mit der Bezeichnung CCS050M12CM2, siehe Abbildung 2-1. Die Auswahl des Referenzsystems erfolgte auch aufgrund von experimentellen Vorerfahrungen beim Projektpartner ISEA.

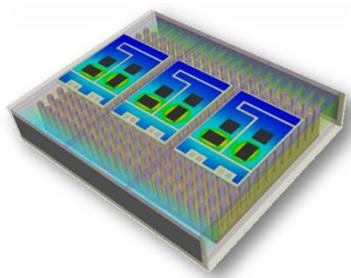


Abbildung 2-1: Selektiertes Referenzleistungsmodul nach <sup>15</sup> inklusive des Kühlkörpers.

<sup>15</sup> A. Sewergin, A. Stippich, A.H. Wienhausen und R.W. de Doncker, „Comparison of High Performance Cooling Concepts for SiC Power Modules,“ in 2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), pp. 2822-2825, 2019.

Um Berechnungszeiten zu verkürzen, wurde in diesem Schritt auf die Berücksichtigung der globalen räumlichen Effekte verzichtet und eine Vereinfachung über die Nutzung der Symmetrieeigenschaften des Modells vorgenommen. Kohärent zum Einheitszellenkonzept in der FEA-gestützten Materialmodellentwicklung wurde eine Einheitszelle als Referenzgeometrie, wie sie auch im Referenzmodul eingesetzt wird, definiert, siehe Abbildung 2-2 (links).

Die Freiheitsgrade zur Optimierung des Pins wurden folgendermaßen festgelegt. Der Pin wird durch zehn virtuelle Ebenen geschnitten, welche in identischen Abständen angeordnet sind. Die geometrische Projektion der Körperkanten auf den Ebenen ergeben zehn Kreise, welche durch Verwendung von jeweils zwei Radien elliptisch verzerrt werden können, was in Abbildung 2-2 (rechts) dargestellt ist. Die zehn Ellipsenquerschnitte mit ihren jeweils zwei Radien ergeben eine Anzahl von 20 Parametern, welche zur Optimierung genutzt wurden. Zur Erstellung von Volumenkörpern wurden die Ellipsen durch lineare Interpolation zwischen den Ebenen in Teilkörper umgewandelt und anschließend miteinander verbunden.

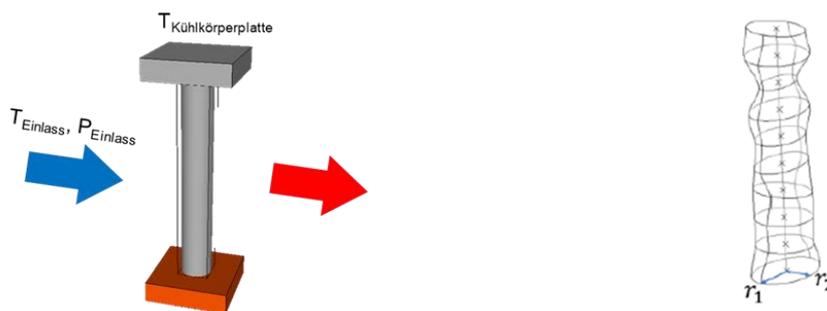


Abbildung 2-2: Einheitszelle der Referenzgeometrie des Pins und Optimierungsfreiheitsgrade.

Die im vorherigen Absatz beschriebene Geometrie wurde mit der Open-Source CAD-Software Blender generiert. Anschließend wurde diese in 6Sigma für die CFD-Simulation importiert. Die folgenden Randbedingungen wurden für das Finite-Volumen-Modell verwendet:

- Durchflussrandbedingung an der Flüssigkeitseinlassfläche
- Temperaturrendbedingung für die Flüssigkeit am Einlass
- Temperaturrendbedingung auf der oberen Platte des Pins

Unter Variation der Höhe der Werte für die Randbedingungen erfolgte ein Vergleich der Simulationsergebnisse hinsichtlich des Druckverlusts und Wärmewiderstands für den zylindrischen Pin mit Daten aus dem VDI-Wärmeatlas<sup>16</sup> und einer themenverwandten Veröffentlichung<sup>17</sup>, siehe Abbildung 2-3 und Tabelle 2-2. Der Vergleich bestätigt die physikalisch erwarteten Trends und zeigt eine vertretbare Genauigkeit des unkalibrierten Modells.

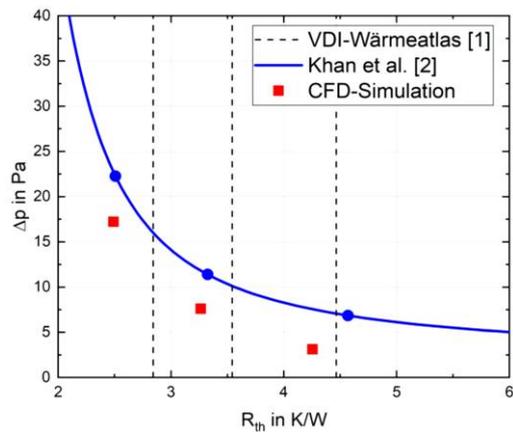


Abbildung 2-3: Trend der Simulationsergebnisse für zylindrische Pins im Vergleich zur Literatur<sup>16,17</sup>.

Tabelle 2-2: Berechnete Werte zu Druckverlust und Wärmewiderstand einzelner zylindrischer Pins i. Vgl. zu <sup>16,17</sup>.

Durchmesser Pin in mm	$R_{th}$ in K/W Khan et al. [2]	$\Delta p$ in Pa Khan et al. [2]	$R_{th}$ in K/W CFD	$\Delta p$ in Pa CFD	Rel. Abweichung $R_{th}$	Rel. Abweichung $\Delta p$
1,5	4,57	6,85	4,26	3,10	-6,85%	-54,75%
2	3,33	11,38	3,27	7,60	-1,83%	-33,23%
2,5	2,51	22,26	2,49	17,20	-0,64%	-22,72%

Die in den Abbildungen angegebenen Parameter  $\Delta P$  und  $R_{th}$  sind wie folgt definiert:

$\Delta P = P_{Einlass} - P_{Auslass}$ , wobei P der Flüssigkeitsdruck ist.

$R_{th} = \Delta T / \dot{Q}$ , wobei  $\Delta T$  die Temperaturdifferenz und  $\dot{Q}$  die Leistung ist.

Mit dem Einheitszellenmodell wurde eine Analyse der Sensitivität zur Wirkung der Eingangsparameter auf die Ausgangsparameter und eine anschließende Optimierung durchgeführt. Dazu wurden die Eingangsgrößen innerhalb der in Tabelle 2-3 angegebenen Grenzen variiert und entsprechende Modelllösungen berechnet. Die zwei nicht voneinander unabhängigen Ausgangsparameter führen dann zu einem Problem, welches mittels einer Pareto-Optimierung gelöst werden soll.

<sup>16</sup> Verein Deutscher Ingenieure VDI e.V., „VDI-Wärmeatlas,“ Springer, Berlin, 2016

<sup>17</sup> W.A. Khan, J.R. Culham und M.M. Yovanovich, „Optimization of Pin-Fin Heat Sinks Using Entropy Generation Minimization,“ in 2004 Inter Society Conference on Thermal Phenomena, Bd. 28, pp. 247-254, 2005

Tabelle 2-3: Eingangs- und Ausgangsparameter für die Optimierungsrechnungen.

Konstante Eingangsparameter	Wert
Temperatur Kühlkörperplatte ( $T_{\text{Kühlkörperplatte}}$ )	90 °C
Durchflussrate Einlass ( $P_{\text{Einlass}}$ )	0.32 l/min
Temperatur Einlass ( $T_{\text{Einlass}}$ )	65 °C
Pin Höhe	10 mm
Pin Abstand x	2 mm
Pin Abstand y	0.6 mm
Größe der Kühlkörperplatte	4 mm x 4 mm
variierte Eingangsparameter	Wert
r1	0.6 mm - 2 mm
r2	0.6 mm - 3.4 mm
Ausgangsparameter	
$R_{\text{th}}$	
$\Delta P$	

Der Parameterraum innerhalb der Grenzen aus Tabelle 2-3 wurde durch ein statistisches Latin Hypercube Sampling untersucht. Es wurden 1000 Parameterkombinationen erstellt, deren Lösungen anschließend mit der Finite-Volumen-Software berechnet wurden. Zusätzlich wurden zwei Berechnungsvarianten mit internen, auf SPEA2 – basierenden, genetischen Optimierungsalgorithmen (GA) durchgeführt. Die Zielfunktion (COP) für die Optimierungen wurde dahingehend formuliert, die beiden Ausgabeparameter ungewichtet zu minimieren:

$$COP = \frac{\dot{Q}}{P_{\text{pump}}} = \frac{1}{R_{\text{th}} \Delta p \dot{V}}$$

Final wurde außerdem ein Metamodell optimaler Prognose (MOP) basierend auf den bereits berechneten Ergebnissen erstellt. Das MOP ist ein auf Regression basierendes Ersatzmodell, welches eine Interpolation und geringfügige Extrapolation auch außerhalb der Parametergrenzen ermöglicht und damit eine klarere Darstellung der Grenzverläufe erlaubt.

Die Lösungen des Latin Hypercube Sampling sind durch schwarze Punkte, die Lösungen der Suchläufe der genetischen Algorithmen durch blaue und rote Punkte und die Grenzlösungen des Metamodells durch grüne Punkte in Abbildung 2-4 dargestellt.

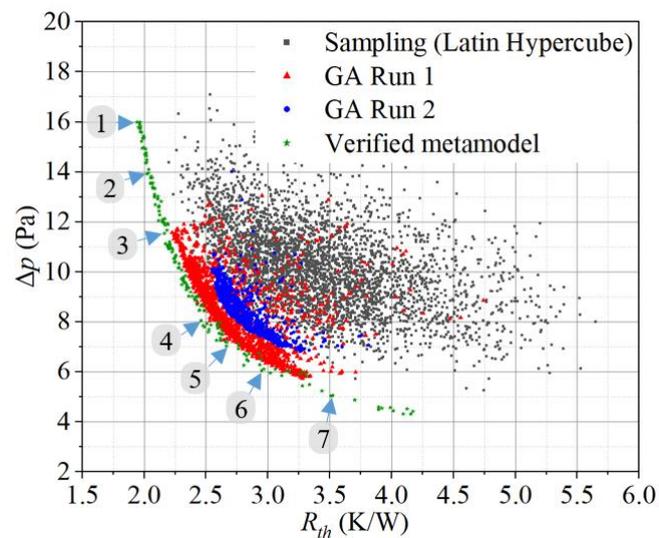


Abbildung 2-4: Ergebnisse der Optimierungsrechnungen mit dem Einheitszellenmodell.

Während die Lösungen des Latin Hypercube Samplings den Parameterraum im Allgemeinen gut erschließen und eine Pareto-Grenze erahnen lassen, wird jedoch der Bereich an den Rändern der Zielgrößen nur unbefriedigend aufgelöst. Die Ergebnisse der beiden GA-Suchläufe zeigen hingegen klarere Trends entlang der Pareto-Grenze, liefern jedoch unterschiedliche Positionen der Grenze. Die Ergebnisse des Metamodells zeigen schlussendlich am klarsten den Pareto-Grenztrend und erweitern seine Lage nochmal in Richtung geringerer Druckabfall und Wärmewiderstand.

Verschiedene Pin-Topologien entlang der Pareto-Front (durch Zahlen gekennzeichnet in Abbildung 2-4) wurden selektiert und sind in Tabelle 2-4 gezeigt.

Tabelle 2-4: Optimierte Pin-Topologien aus verschiedenen Lagen auf der Pareto-Grenze aus Abbildung 2-4.

Number	1	2	3	4	5	6	7	2 mm
Side								
3D								
Front								
Pressure drop (Pa)	16	15	11.5	8.1	7	6.1	5	20.5
Thermal resistance (K/W)	2	2	2.2	2.5	2.7	3	3.5	3.7
COP (1/K)	6010	6267	7494	9468	10004	10488	10641	2506
COP ratio	2.40	2.50	2.99	3.78	3.99	4.18	4.25	1.00
Name		lowR <sub>th</sub>			highCOP			2 mm reference

Die Formen entwickeln sich entlang der Pareto-Front von breiteren Strukturen (Probe 1), welche einen geringen thermischen Widerstand aber hohen Druckverlust aufweisen, hin zu dünneren Profilen (Probe 7) mit geringem Druckverlust aber höherem  $R_{th}$ . Bezogen auf den oben definierten COP ist ein möglichst hoher Wert erstrebenswert. Gegenüber dem zylindrischen Referenzdesign besitzen alle Geometrien entlang der Pareto-Grenze einen größeren COP. Der höchste Wert wird für Probe 7 erreicht. In normalisierter Darstellung ergibt sich für den COP Ratio eine mehr als Vervielfachung für das beste Design gegenüber der Referenz.

Die Ergebnisse aus den Einheitszellensimulationen sind nicht quantitativ übertragbar auf die Situation in realen vollständigen Kühlkörpern. Deshalb wurden die Designs 1, 4 und die Referenz ausgewählt, um die gleiche Analyse für einen vollständigen Kühlkörper durchführen zu können. Zusätzlich ergab sich in Absprache mit den Projektpartnern eine Probe 8 aus der Notwendigkeit einer herstellungsfreundlicheren Pin-Geometrie, die sowohl durch additive als

auch durch herkömmliche Verfahren (z.B. Fräsen) hergestellt werden kann. Die Ergebnisse für die vier vollständigen Kühlkörpersimulationen sind in Tabelle 2-5 gezeigt.

Tabelle 2-5: Pin-Geometrien und daraus resultierende  $\Delta T$  und  $\Delta P$  für vollständige Kühlplatten.

	Probe 1	Probe 4	Probe 8	Referenz
$\Delta T$ (K)	102	109	98	103
$\Delta P$ (Pa)	51	35	71	131
COP (1/K)	2299	3176	1710	891
COP Verhältnis	2.6	3.6	1.9	1.00

Um die mittels numerischer Simulation erhaltenen Trends zu validieren, wurden Probe 1, 4, 8 und die Referenzgeometrie von der Firma FITprototyping GmbH aus dem Material AlSi10Mg additiv hergestellt. Alle Kühlkörper enthalten dabei linear in Reihe angeordnete Pins. Die gefertigten Proben und ihre entsprechenden Pin-Geometrien sind in Abbildung 2-5 zu sehen.

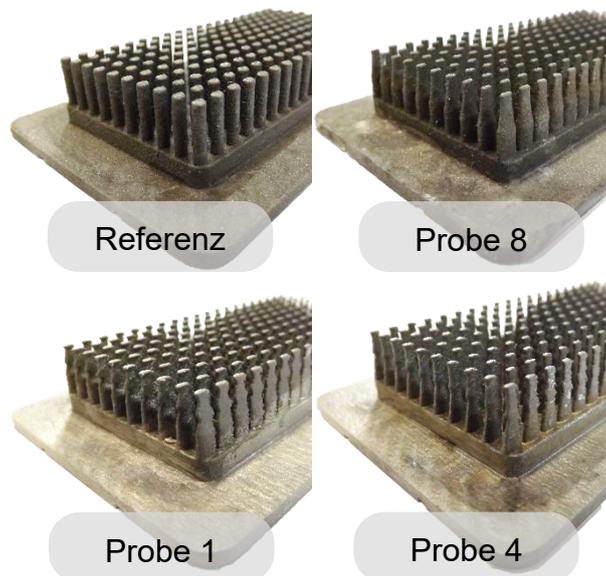


Abbildung 2-5: Additiv hergestellte Proben zur Verifizierung der Simulationsergebnisse.

Zur Validierung der Simulationen wurde ein Versuchsaufbau realisiert, welcher in Abbildung 2-6 zu sehen ist. Die Wärmequelle wird über eine TIM-Folie (Thermal Interface Material) auf

den Kühlkörper aufgebracht und Thermolemente messen die Temperatur an verschiedenen Stellen des Kühlkörpers. Ein ST3000-Differenzdrucksensor von Honeywell und ein Kobold DF-Durchflusssensor messen den Durchfluss. Die Wärmequelle hat eine Leistung von 44 W und die Einlasstemperatur wurde konstant auf 35°C eingestellt.

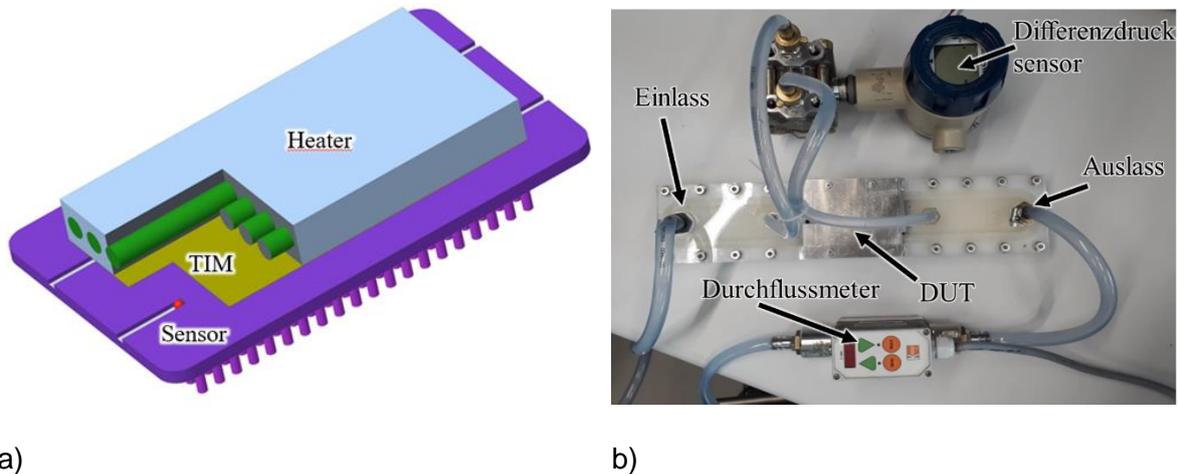


Abbildung 2-6: a) 3D-CAD-Zeichnung des Versuchsaufbaus (im Bild rechts als Device Under Test (DUT) beschrieben). b) Versuchsaufbau mit angeschlossenem Durchflussmesser.

In den Experimenten wurden die Durchflussraten von 2 bis 10 l/min variiert. Die Eigenschaften der als Kühlflüssigkeit verwendeten Wasser-Glykol-Emulsion sind in Tabelle 5 gezeigt.

Tabelle 2-6: Eigenschaften der Wasser-Glykol-Emulsion zum Einsatz als Kühlmedium.

Eigenschaft	35 °C	65 °C
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	0.387	0.373
Spezifische Wärmekapazität [J/kg K]	3406	3287
Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	1062	1080
Dynamische Viskosität [kg/ms]	0.0014	0.0029

Die Ergebnisse der experimentellen Durchflussvariationen zusammen mit den Simulationsergebnissen für die Kühlkörper mit dem zylindrischen Referenzdesign und der Probe 8, welche hier als „Pin Ellipse“ gekennzeichnet ist, sind in Abbildung 2-7 dargestellt.

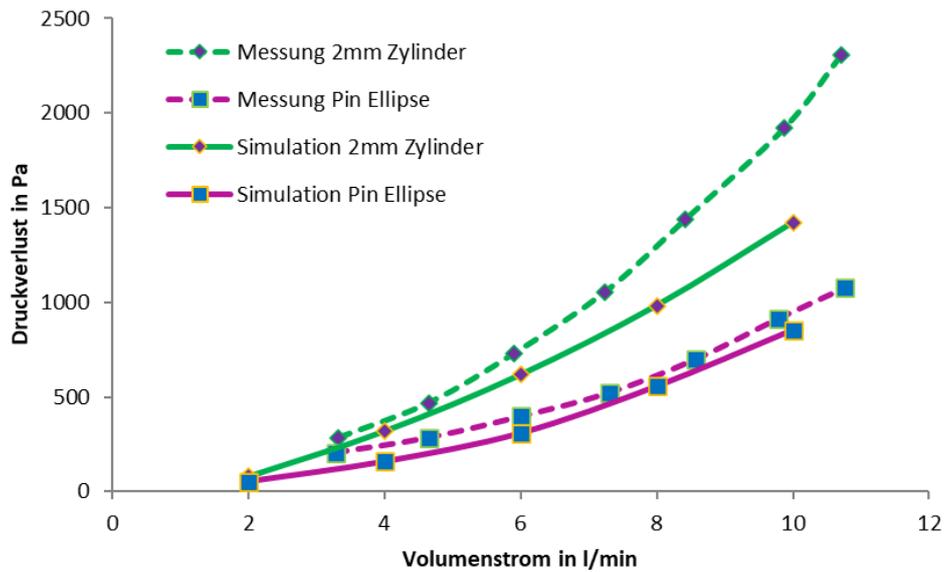


Abbildung 2-7: Ergebnisse der Durchflussraten-Tests und Simulationen zur Validierung.

Zunächst fällt dabei die gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment für die Variante Pin Ellipse über den gesamten Bereich des Volumenstroms auf. Für das Referenzdesign ergeben sich größere Abweichungen für größere Volumenströme. Sind diese jedoch gering, ist die Abweichung ebenfalls gering. Das entscheidende Ergebnisse ist jedoch, dass mit dem verbesserten Design von Probe 8 die simulativen Trends auch experimentell bestätigt werden können und die Druckverluste gerade bei höheren Volumenströmen gegenüber dem Referenzdesign erheblich verringert werden können. Der erarbeitete Simulationsworkflow ist abschließend für dieses Arbeitspaket in Abbildung 2-8 zu sehen. Das Ziel des Arbeitspaketes wurde somit erreicht.

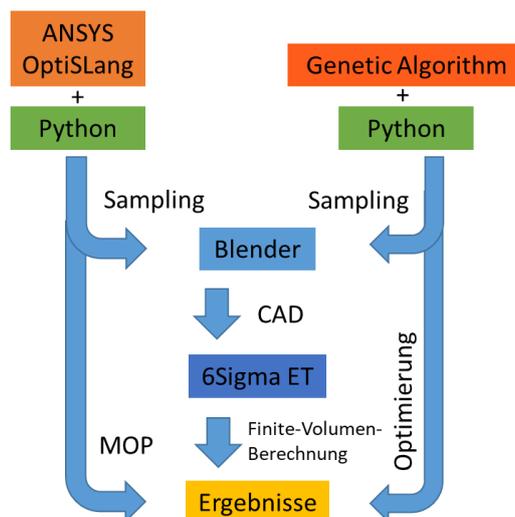


Abbildung 2-8: Entwickelte Simulations- und Optimierungskette für Kühlstrukturen.

### 2.2.1.2 AP 2.1.2 Simulation des Kühleraufbaus

Dem Projektpartner Robert Bosch GmbH wurde ein CAD-Entwurf einer Grundplatte mit daran versetzt angebrachten Pins im Design von Probe 8 für anschließende additive Fertigungs- und Durchflussratenprüfungen zur Verfügung gestellt. Die Geometrie ist in Abbildung 2-9 zu sehen, wobei die Abmessungen der Grundplatte 70 x 40 x 2.5 mm<sup>3</sup> betragen.

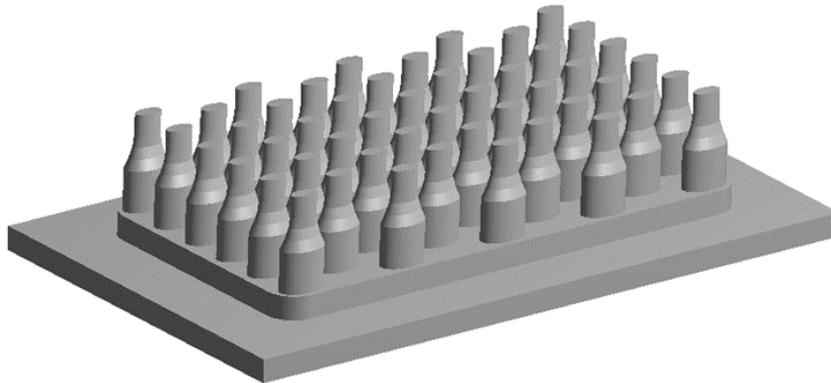


Abbildung 2-9: Geometrie für die additive Fertigung und Durchflussratenprüfung bei Robert Bosch GmbH.

Parallel zur Optimierung der Kühlstruktur wurde auch ein globaler Simulationsansatz verfolgt. Der Meilenstein M2.2 ist definiert als „Erste Abschätzung des maximal möglichen Temperaturgradienten auf der Oberseite des Keramiksubstrats“. Um diesen Meilenstein zu erreichen und um die Ziele für die Wärmeübergangskoeffizienten der neuen Kühlstrukturen festlegen zu können, wurde ein thermisch-stationäres Finite-Elemente-Modell eines ersten Entwurfs der Halbrücke auf Grundlage der CAD-Daten des Partners ISEA in der kommerziellen Software ANSYS Workbench erstellt. Die Geometrie des Modells ist in Abbildung 2-10 dargestellt.

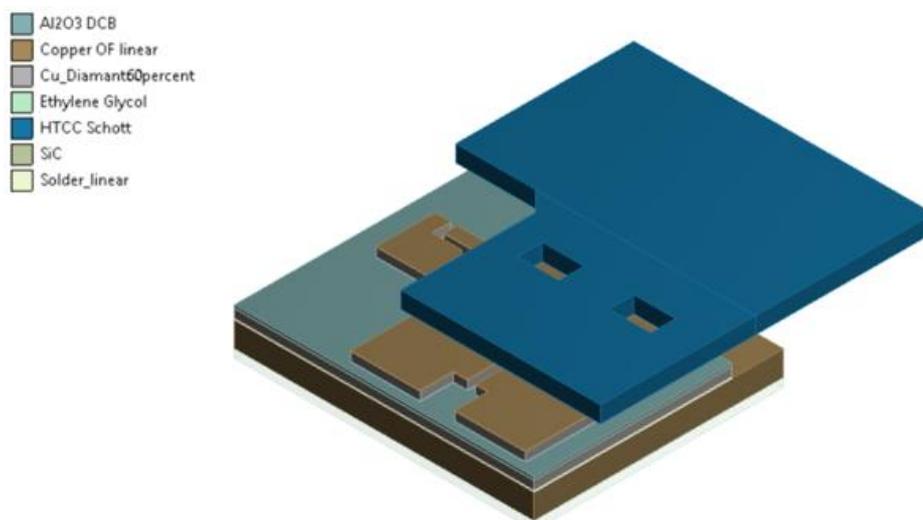


Abbildung 2-10: Modellaufbau der thermischen Simulation mit Kennzeichnung der Materialien.

Ein Explosionsbild mit dem genauen Schichtaufbau und den Schichtabmessungen ist dazu in Abbildung 2-11 zu sehen. Zusätzlich zu den visualisierten Schichten wurden eine Kühlkörperplatte und eine Schicht einer Wasser-Glykol-Kühlflüssigkeit modelliert.

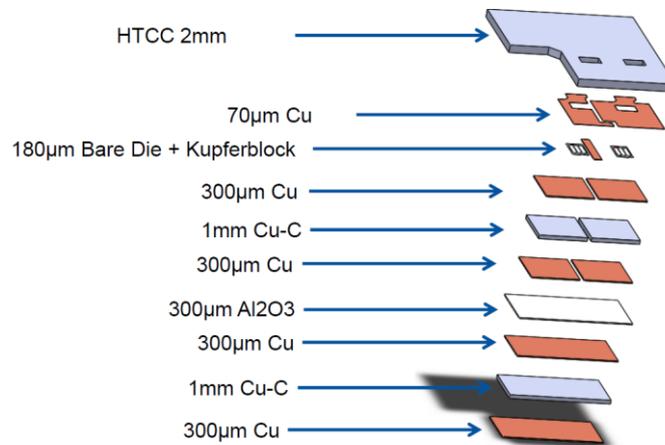


Abbildung 2-11: Schichtaufbau und Dickenabmessungen des thermischen Halbbrückenmodells.

Die Finite-Elemente-Diskretisierung des Modells ist in Abbildung 2-12 dargestellt. Es wurden ungefähr 550 000 Knoten und 160 000 quadratisch-integrierte Elemente generiert.

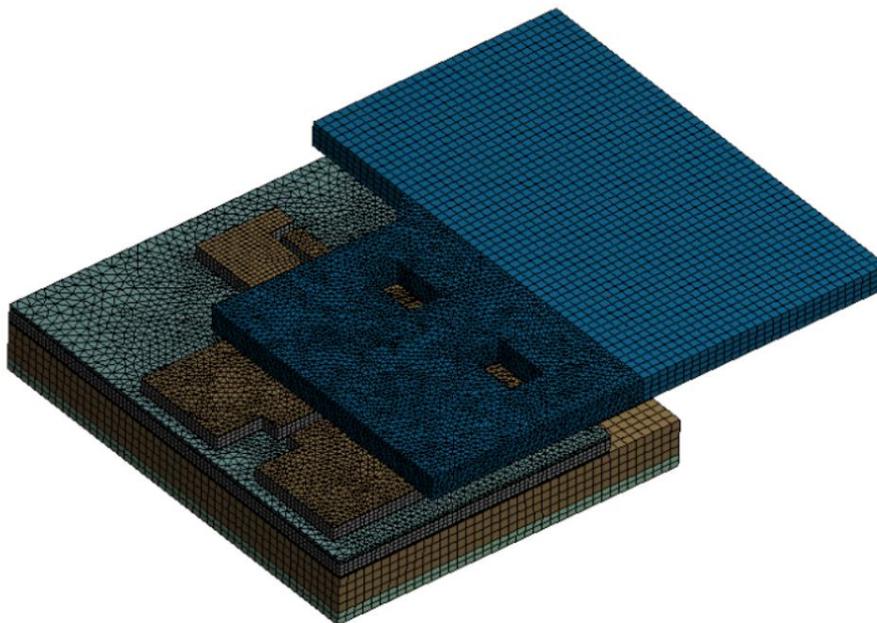


Abbildung 2-12: Darstellung der Vernetzung des thermischen Halbbrückenmodells.

Für das Modell wurden als Randbedingungen eine freie Luftkonvektion mit einem Koeffizienten von  $5e^{-6}$  W/(mm<sup>2</sup>K), eine Kühlflüssigkeitstemperatur von 65°C und eine interne Wärme-erzeugung von 55,31 W/mm<sup>3</sup> in den zwei verbauten Leistungshalbleitern definiert. Die Ergebnisse hinsichtlich der globalen Temperaturverteilung sind in Abbildung 2-13 zu sehen.

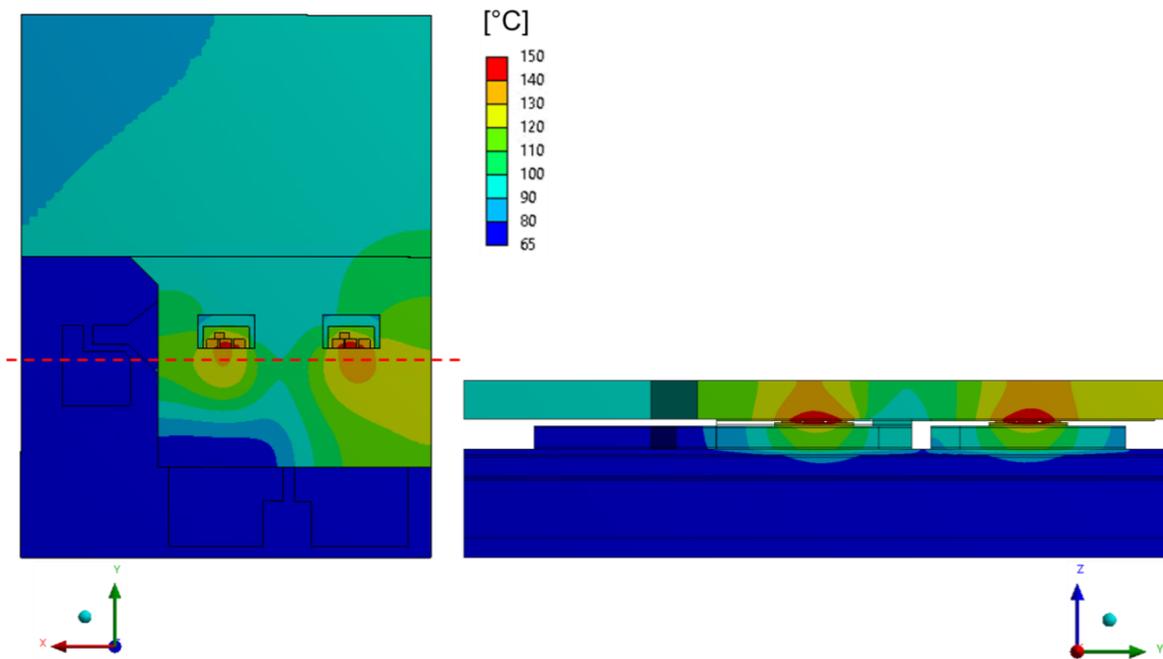
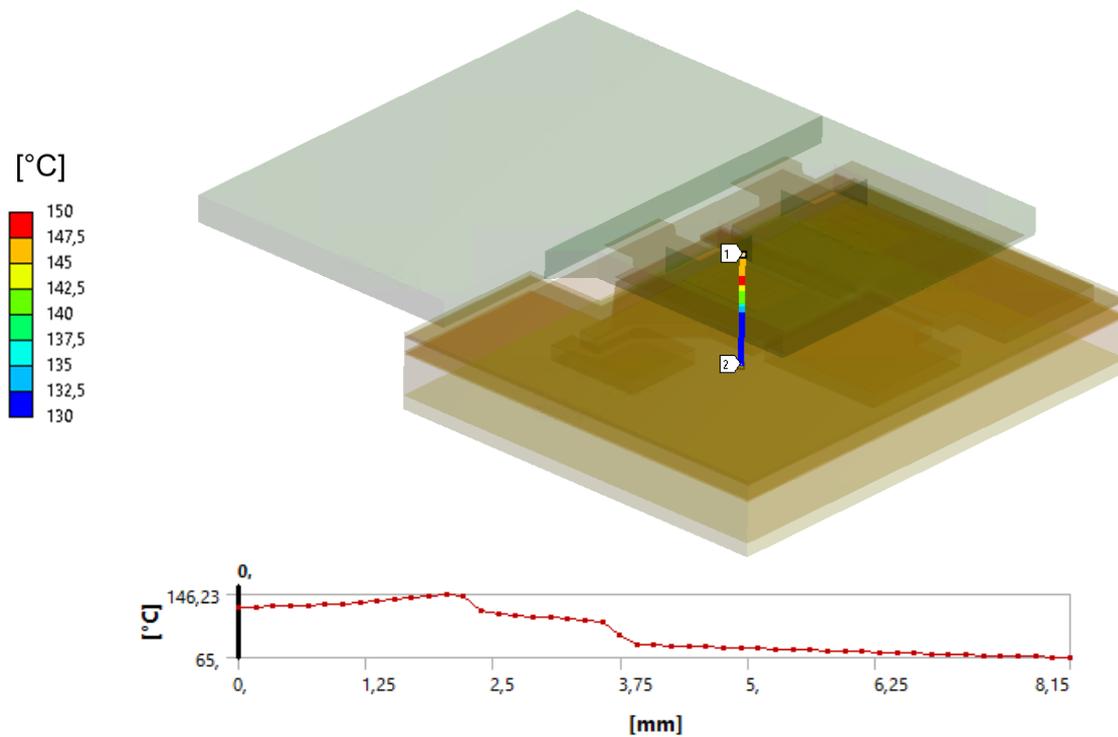
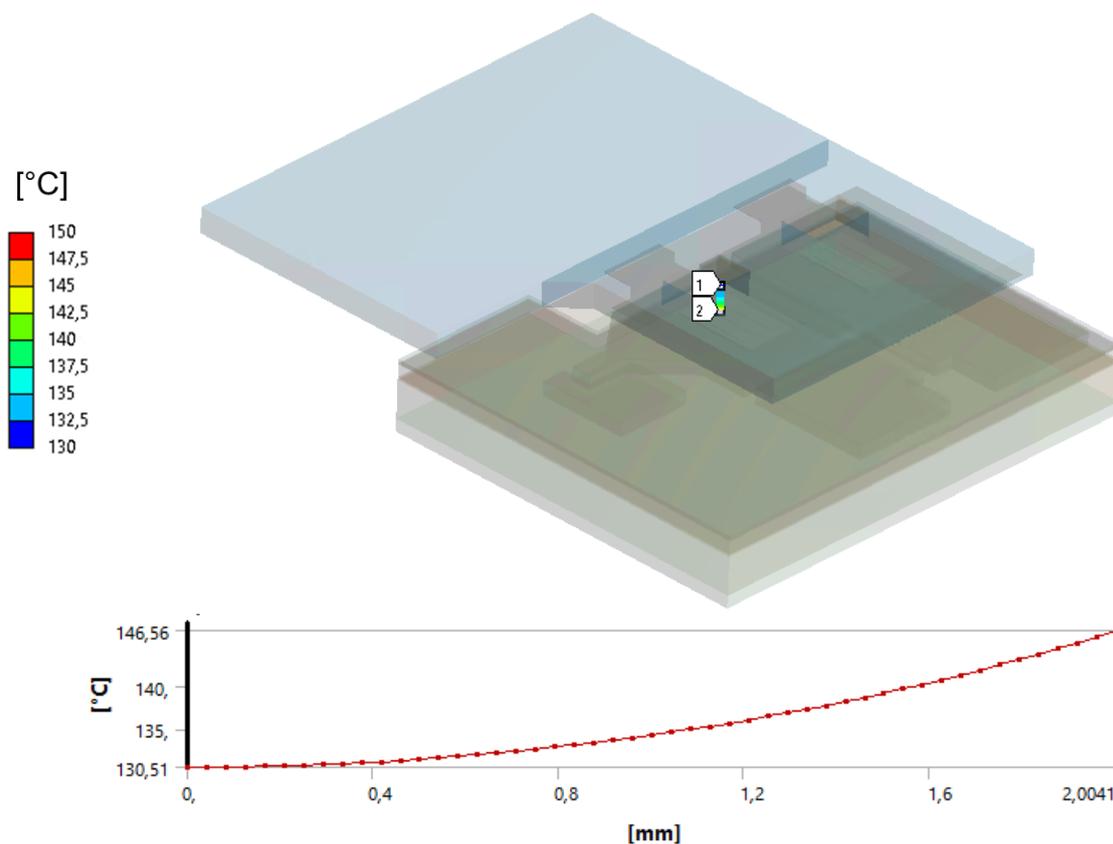


Abbildung 2-13: Ergebnisse der globalen Temperaturverteilung für das thermische Halbbrückenmodell.

Aus der Simulation ergibt sich eine globale  $T_{\max} = 147^{\circ}\text{C}$  in den Leistungshalbleitern. Die maximale Temperatur auf der HTCC beträgt etwa  $135^{\circ}\text{C}$ . Basierend auf Pfadergebnissen, wurde jeweils der vertikale Temperaturgradient von der Oberseite der HTCC bis zum Fluid und bis zum SiC-MOSFET berechnet. Beide Pfadergebnisse sind in Abbildung 2-14 zu sehen.



a)



b)

Abbildung 2-14: Vertikaler Temperaturgradient für a) HTCC bis Kühlflüssigkeit und b) HTCC bis SiC MOSFET.

Die Temperaturgradienten entlang des Pfades wurden folgendermaßen berechnet:

$$\nabla_V T = \frac{\partial T}{\partial n} n$$

wobei  $\partial T$  die Temperaturdifferenz und  $n$  die Pfadlänge ist. Die Werte für die beiden Pfade betragen 10.05 K/mm und 7.5 K/mm.

Im weiteren Projektfortschritt haben sich die technischen Details der Halbbrücke zwischenzeitlich weiterentwickelt, wodurch neue Größenanforderungen an den Kühlkörper entstanden. An der Oberseite des Kühlkörpers waren zwei CuC-Pads mit einer Abmessung von 12 x 12 mm<sup>2</sup> und einem Abstand von 1 mm anzubringen. Dadurch wurde die Mindestgröße für die Kühlkörperplatte auf 12 x 25 mm<sup>2</sup> adjustiert.

In Anbetracht der ursprünglich größeren Kühlfläche sollten die Pins mit einem Abstand von 2 mm zueinander (wie im Lastenheft definiert) auf der oberen Platte des Kühlkörpers verteilt werden. Aufgrund der nun verringerten Kühlfläche wurde jedoch entschieden, einen Abstand von 0.6 mm zwischen den Pins zu realisieren.

Der erste Entwurf eines Kühlkörpergehäuses wurde vom Projektpartner Austerlitz electronic GmbH erstellt. Eine gemeinsame iterative Verbesserung des Gehäuse-Konzepts wurde sowohl auf Grundlage simulativer als auch experimenteller Untersuchungen vorgenommen. Faktoren wie Pin-Abrasion und Strömungsverhalten, die durch die Pin-Verteilung und die Form der Einlass- und Auslass-Tülle hervorgerufen werden, wurden berücksichtigt.

Abbildung 2-15 zeigt das Ergebnis einer CFD-Simulation eines ersten Gehäuse-Konzepts hinsichtlich der Flüssigkeitgeschwindigkeit. Die Simulationsergebnisse fanden Verwendung bei der Bestimmung der Strömungseigenschaften, der Maximierung der Wärmeübertragung und zur Minimierung des Druckverlusts für den Kühlkörper bei fester Pin-Geometrie.

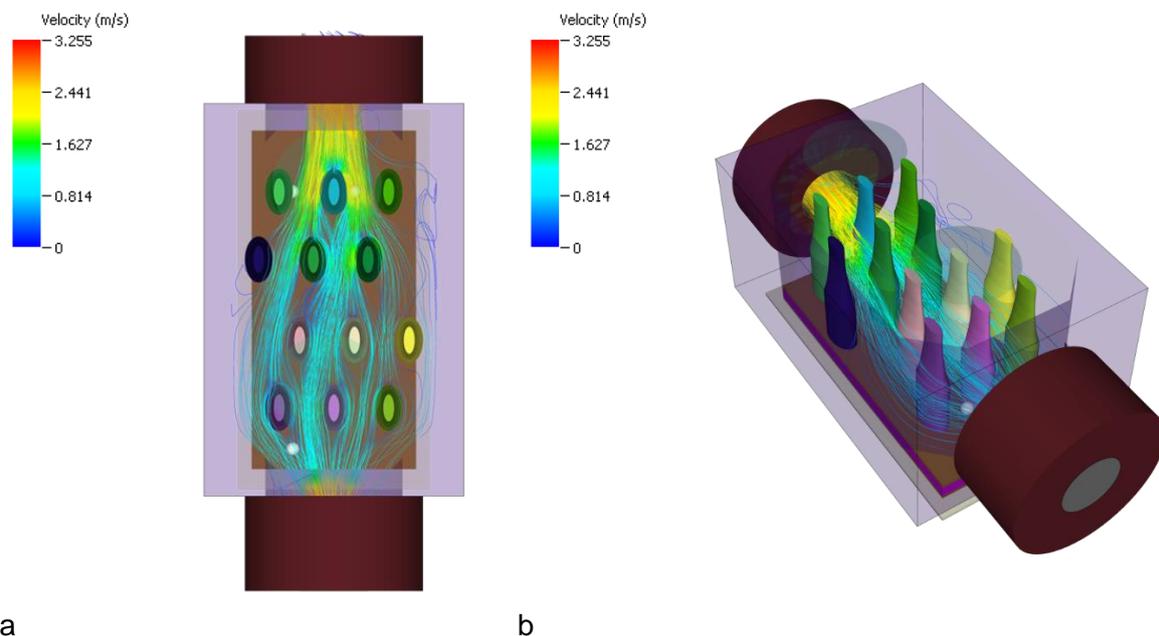


Abbildung 2-15: Verschiedene Ansichten des Simulationsmodells mit Darstellung des Geschwindigkeitsfelds.

Nach mehreren Iterationen geometrischer Änderungen für den Kühlkörper wurde eine finale Geometrievariante identifiziert. Ein Bild der oberen Platte des Kühlkörpers einschließlich der Pin-Strukturen ist in Abbildung 2-16 zu sehen.

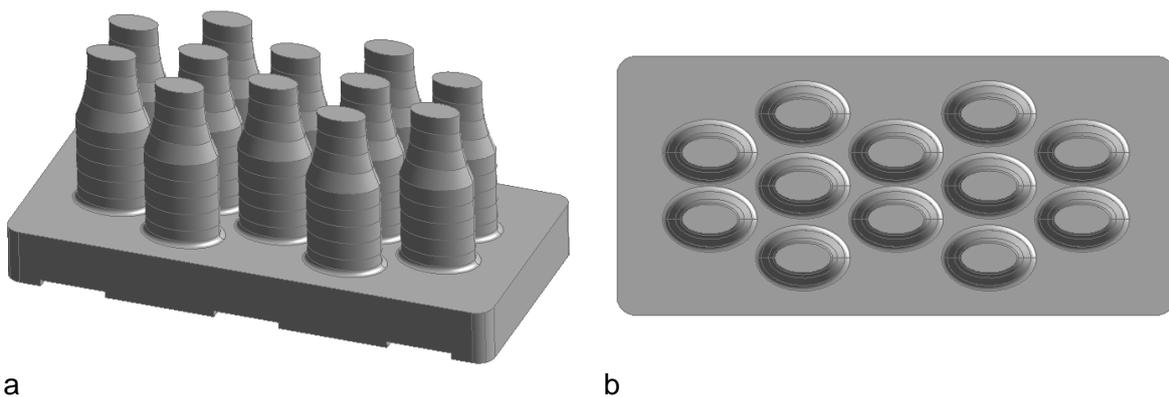


Abbildung 2-16: Flächenreduzierte Kühlkörper-Oberplatte mit finaler Kühlstrukturanordnung.

Anschließend wurde ein weiteres Simulationsmodell erstellt, um die Strömung und die Temperaturverteilung für das neue Kühlkörperkonzept bewerten zu können. Die Randbedingungen für das Simulationsmodell waren eine Durchflussrate von 3 l/min bei 65 °C Einlasstemperatur und jeweils 250 W Verlustleistung an den Halbleitern. Die entsprechenden Simulationsergebnisse für das endgültige geometrische Kühlkörperdesign sind in Abbildung 2-17 zu sehen.

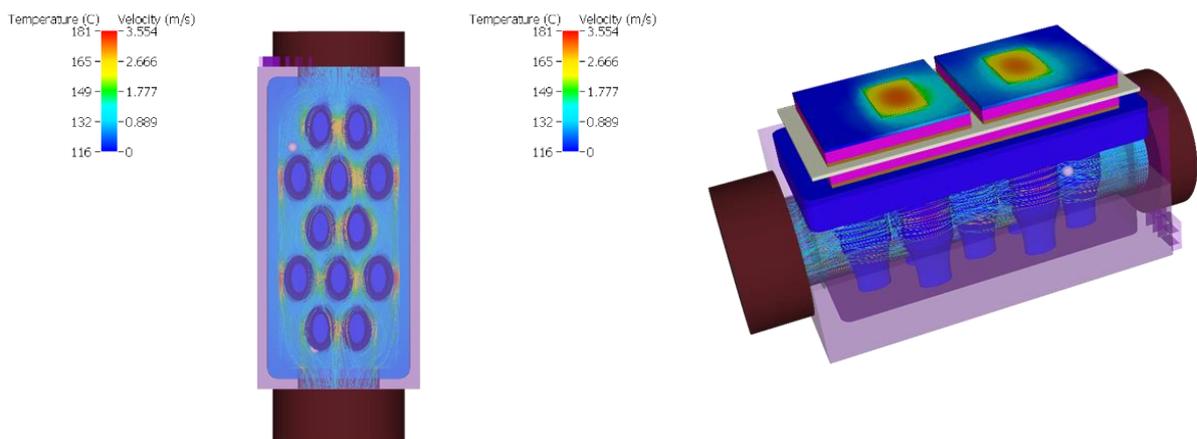


Abbildung 2-17: Verteilung der Temperatur und Flüssigkeitsgeschwindigkeit der finalen Kühlkörpergeometrie.

Die maximale Temperatur an den beiden Halbleitern beträgt 175°C, was eine Verringerung um 6°C gegenüber der vorherigen Version der Kühlkörpergeometrie entspricht. Der Druckverlust hat sich jedoch dabei auf 60 mbar erhöht, was 42 mbar mehr als in der vorherigen Kühlkörperversion darstellt.

Um abschätzen zu können, welche Kühlleistung zur Vermeidung der Überhitzung der Treiberschaltung erforderlich ist, haben die Projektpartner gemeinsam einen erforderlichen Wärmeübergangskoeffizient an der Unterseite der Halbrücke definiert, welcher in Kontakt mit dem Kühlkörper ist. Der Wärmeübergangskoeffizient wurde vom Partner Robert Bosch GmbH mittels stationärer thermischer Simulationen des aktuellen Halbrückendesigns analog zu der

in AP2.1.1 vorgestellten numerischen Studie geschätzt. Der geschätzte Wert für die erforderliche Kühlleistung liegt zwischen 35.000 bis 45.000 W/(m<sup>2</sup>K). Basierend auf der folgenden Formel und den Ergebnissen der CFD-Simulation zur finalen Kühlkörpertopologie war es möglich, den vorhandenen Wärmeübergangskoeffizienten zu berechnen:

$$\alpha = \frac{\dot{Q}}{A \delta T} = \frac{500 \text{ W}}{\frac{300 \text{ mm}^2}{1000000} (101 \text{ K} - 65 \text{ K})} = 46296 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

Dabei ist  $\dot{Q}$  der Wärmestrom, A die Fläche der Unterseite der Halbrücke und  $\delta T$  der Temperaturunterschied. Der Wärmeübergangskoeffizient für die finale Geometrie liegt mit 46296 W/(m<sup>2</sup>K) deutlich höher als der Wert der ursprünglichen Geometrie mit ca. 5500 W/(m<sup>2</sup>K) und verdeutlicht die erhebliche Verbesserung der Kühlsituation.

Der Einfluss der Materialschichten kann durch Extrahieren der Temperatur entlang eines vertikalen Pfades vom Halbleiter zum Kühlfluid sichtbar gemacht werden. Das Diagramm der Temperatur gegenüber dem Abstand relativ zur Oberseite ist in Abbildung 2-18 dargestellt.

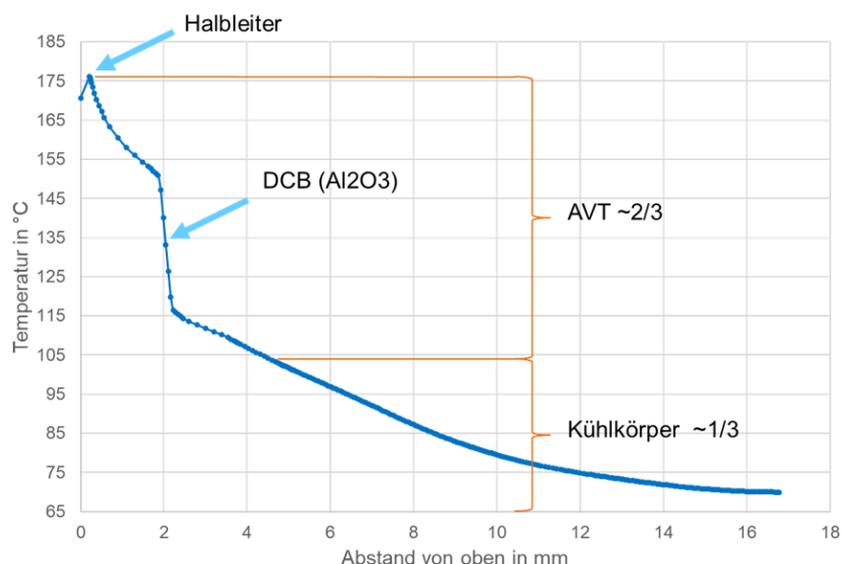


Abbildung 2-18: Temperatur entlang eines vertikalen Pfades vom Halbleiter bis zum Kühlmedium.

Gut erkennbar ist dabei der große Einfluss der Aufbautechnologie in der Nähe der Leistungshalbleiter. Vor allem kommt dem DCB-Substrat aus Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hier eine besondere Bedeutung zu. Um die Entwärmung des Leistungsmoduls weiter zu verbessern, wurde das auf Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> basierende DCB-Substrat durch ein AMB-Substrat mit Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Keramik ersetzt. Zusätzlich wurde auch eine Cu/C-Grundplatte anstelle der gewöhnlichen Kupfergrundplatte berücksichtigt, da das Fh-IFAM mittlerweile in der Lage war, die im Projekt designten Cu-HTC-Elemente in einer eigenen AM-Route auf der Cu/C-Grundplatte aufzubauen, die sonst als Kaschierungselemente auf

dem Leistungssubstrat (AMB-Derivat) genutzt wurden. Die Wärmeleitfähigkeit der Materialien unterscheidet sich erheblich, wobei  $\text{Al}_2\text{O}_3$  einen  $\lambda$ -Wert von  $28 \text{ W}/(\text{mK})$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  einen  $\lambda$ -Wert von  $90 \text{ W}/(\text{mK})$  und die am Fh-IFAM gefertigte Cu/C-Grundplatte eine effektive Wärmeleitfähigkeit von  $550 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  aufweist. Die Ergebnisse der Simulationen für die neuen Materialeigenschaften unter Beibehaltung der Randbedingungen sind in Abbildung 2-19 dargestellt.

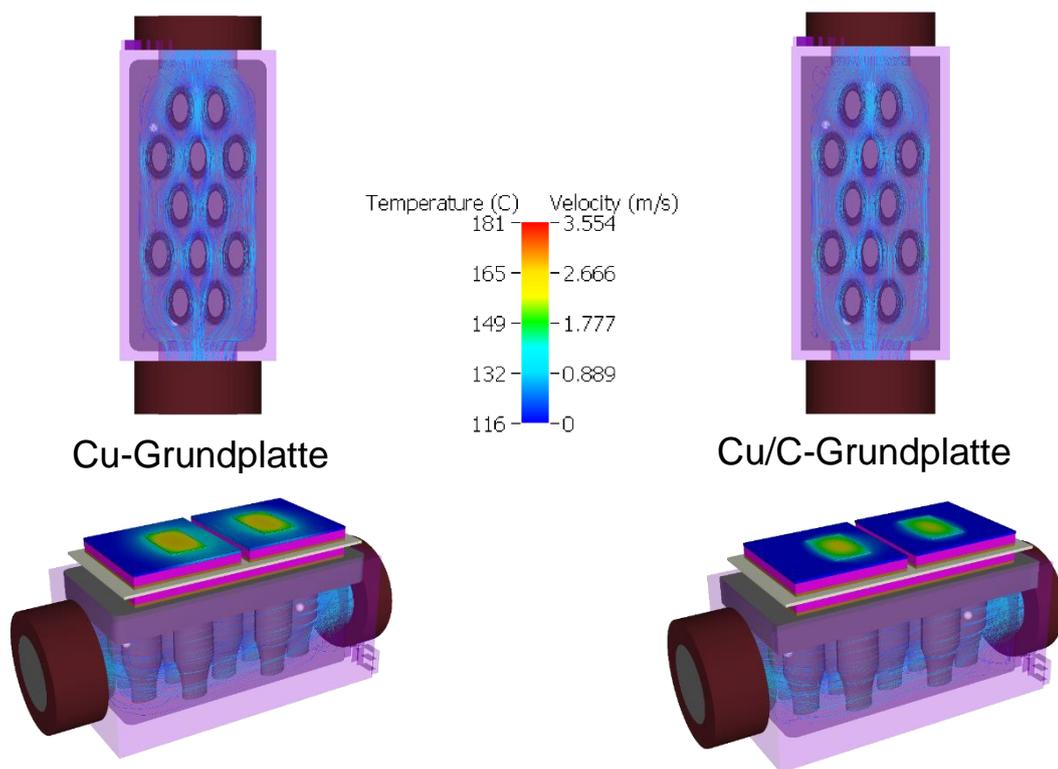


Abbildung 2-19: Simulationsergebnisse der thermischen Performance der ursprünglichen Variante mit Cu-Grundplatte des  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -AMB-Derivats (links) und der am Fh-IFAM entwickelten Cu/C-Grundplatte (rechts).

Der Druckverlust zwischen Einlass und Auslass ergibt sich für beide Varianten zu 23 mbar und ist damit um 37 mbar geringer gegenüber der vorherigen Iteration. Im thermischen Zustand der Halbleiter zeigen sich besonders auffällige Unterschiede. Für die Cu-Grundplatte ergeben sich maximale Halbleitertemperaturen von  $163^\circ\text{C}$  und  $161^\circ\text{C}$  (Auslassseite und Einlassseite) und unter Verwendung einer Cu/C-Grundplatte können diese Werte auf  $158^\circ\text{C}$  und  $156^\circ\text{C}$  dabei jeweils nochmal um 5 K gesenkt werden. Das bedeutet eine Reduzierung der maximalen Temperatur um  $12^\circ\text{C}$  bzw. um  $17^\circ\text{C}$ . Damit ergibt sich ein effektiver Wärmeübergangskoeffizient bezogen auf die Grundfläche des Moduls von  $42\,735 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  und ein  $R_{\text{th}}$  von  $0.392 \text{ K/W}$  von der maximalen Halbleitertemperatur bis zur Kühlmitteltemperatur am Einlass für die Cu-Grundplatte und ein effektiver Wärmeübergangskoeffizient von  $48\,169 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  und ein  $R_{\text{th}}$  von  $0.372 \text{ K/W}$  für die Cu/C-Grundplatte. Die thermische Performance kann durch den

Einsatz einer Cu/C-Grundplatte nochmal mindestens um weitere 5,1% verbessert werden bei gleichbleibendem minimalem Druckverlust. Das Potenzial der in diesem Projekt entwickelten Technologie kann damit aus rechnerischer Sicht als sehr vielversprechend bewertet werden.

Die bisher berechneten Modelle enthielten eine Substratgeometrie mit zwei Cu-Pads auf der Oberseite der Keramik und einem Cu-Pad auf der Unterseite der Keramik. Um die mechanische Performance und Lebensdauer des Systems zu optimieren, wurde anschließend eine partitionierte AMB-Konfiguration gewählt, welche in Abbildung 2-20 dargestellt ist.

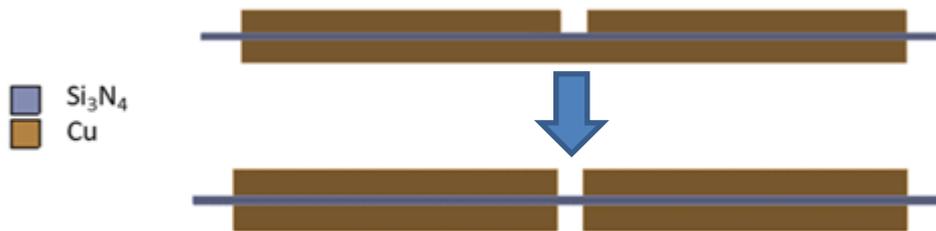


Abbildung 2-20: AMB-Substratkonfiguration für die thermische Partitionierung.

Für das Modell mit einem gewöhnlichen partitionierten AMB-Substrat wurde ein Wärmeübergangskoeffizient von  $44\,515\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  berechnet, was eine Steigerung um  $1\,780\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  gegenüber der Variante mit Kupfergrundplatte entspricht. Somit kann auch die thermische Partitionierung einen positiven Effekt für die Gesamtentwärmung darstellen.

## 2.2.2 AP 2.2 Machbarkeit geeigneter Werkstoffverbunde

### Fraunhofer IFAM

#### 2.2.2.1 AP 2.2.1 Herstellung Modellstrukturen

Um die in AP 1 formulierte Verkopplung von unterschiedlich wärmeleitfähigen Werkstoffen zu untersuchen, wurden in Absprache mit dem Projektpartner SIEMENS eine Testgeometrie zur thermischen Vermessung abgestimmt (Abbildung 2-21, links). Dabei markieren rote Felder die Lage der zur thermischen Vermessung genutzten IGBT Testmodule. Mit Hilfe der Testgeometrie können die in Abbildung 2-21 (rechts) aufgelisteten Variationen vermessen werden.

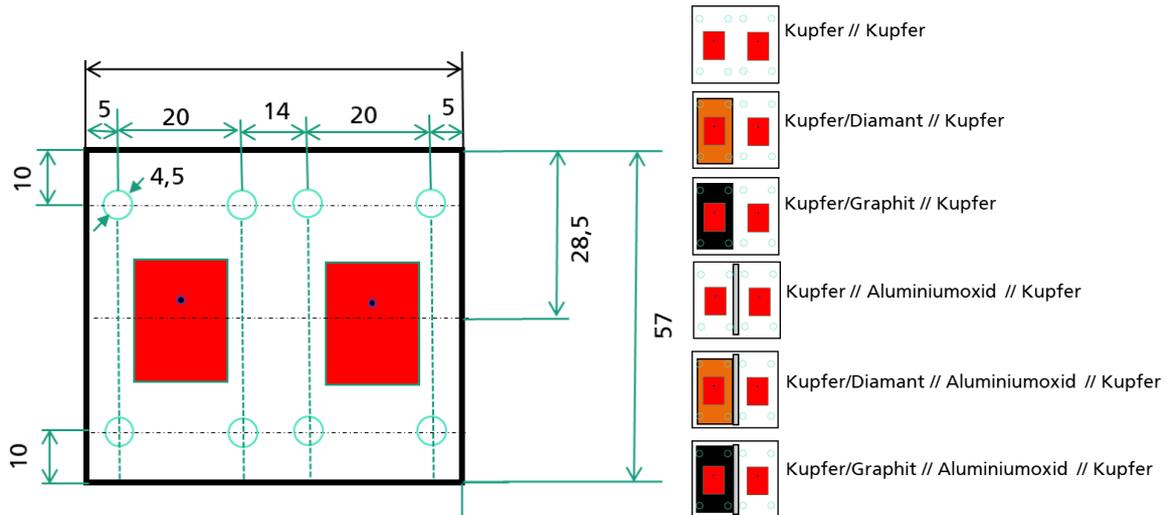


Abbildung 2-21: Links: Abgestimmte Testgeometrie zur thermischen Vermessung der Verkopplung unterschiedlich wärmeleitfähiger Werkstoffe. Rechts: Variationen für die thermische Vermessung.

Zur Umsetzung der Variationen wurde ein auf pulvermetallurgischen Methoden basierendes Vorgehen entwickelt, welches einen Einleger als Einfüllhilfe der pulverförmigen Ausgangsstoffe nutzt. Dabei wurde die Testgeometrie in vier Bereiche aufgeteilt, in die jeweils lokal der entsprechende Werkstoff pulverförmig eingefüllt werden kann. Die entstandene Einlegergeometrie ist in Abbildung 2-22 (links) gezeigt. Diese wurde im CAD erstellt und mittels 3D-Druck in Polypropylen umgesetzt (Abbildung 2-22, rechts).

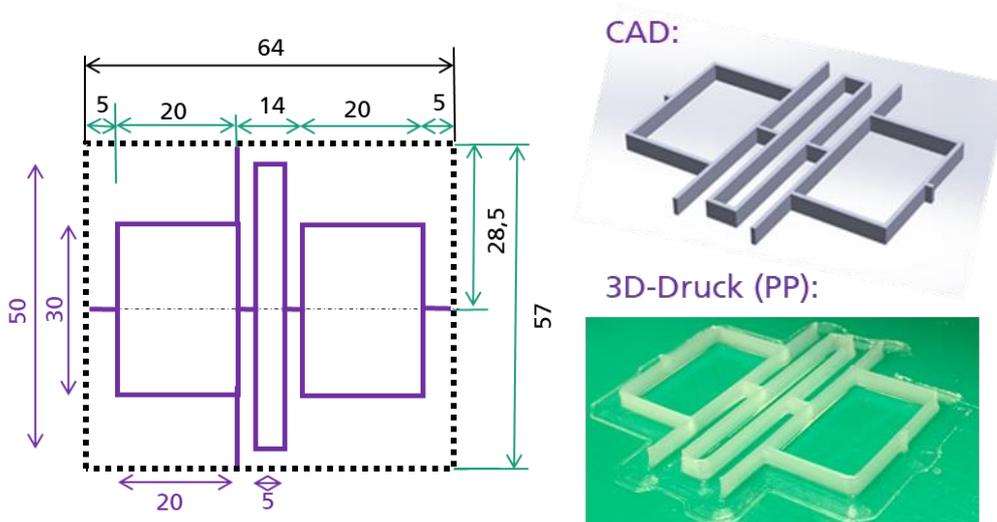


Abbildung 2-22: Einlegergeometrie, links: Lage in Testgeometrie; rechts: Umsetzung mittels CAD und 3D-Druck.

Erste Sinterversuche mittels Spark Plasma Sinterns wurden durchgeführt. In Abbildung 2-23 ist das Vorgehen beim Füllen des Sinterwerkzeugs beispielhaft an einer Kupferplatte mit lokal

eingebachtem Kupfer/Diamant Verbundwerkstoff dargestellt. Ebenso ist der gesinterte Rohk6rper direkt nach dem Sinterprozess zu sehen.

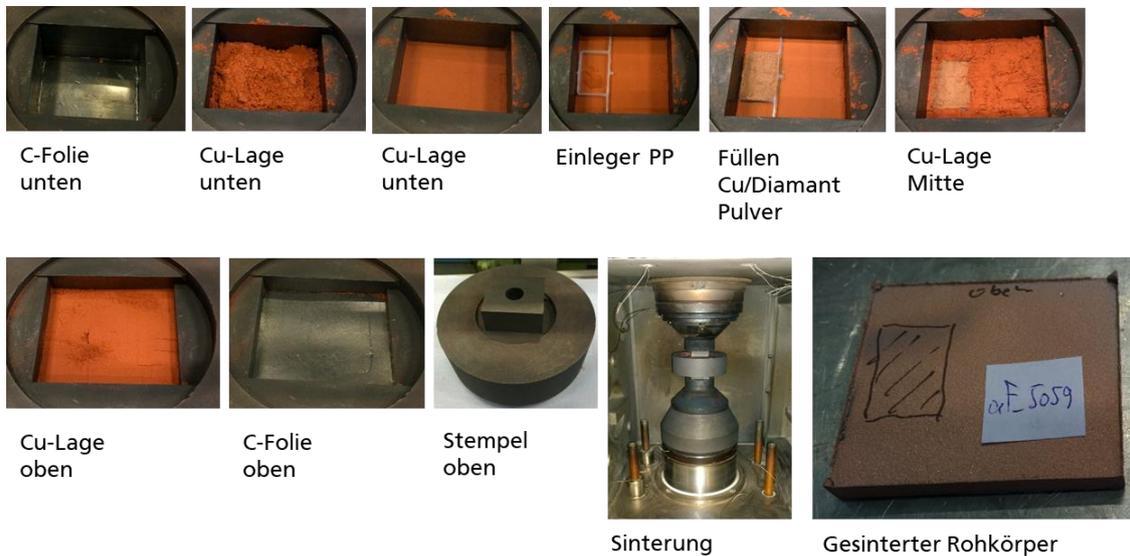


Abbildung 2-23: Vorgehen beim Füllen des Sinterwerkzeuges unter Nutzung des Einlegers am Beispiel einer Kupferplatte mit lokal eingebachtem Kupfer/Diamant Verbundwerkstoff.

Ebenso wurden Testsinterungen der in Abbildung 2-21 angedachten Variationen durchgeföhrt. Dabei konnte die Machbarkeit erster partitionierter Substrate gezeigt werden (Abbildung 2-24).

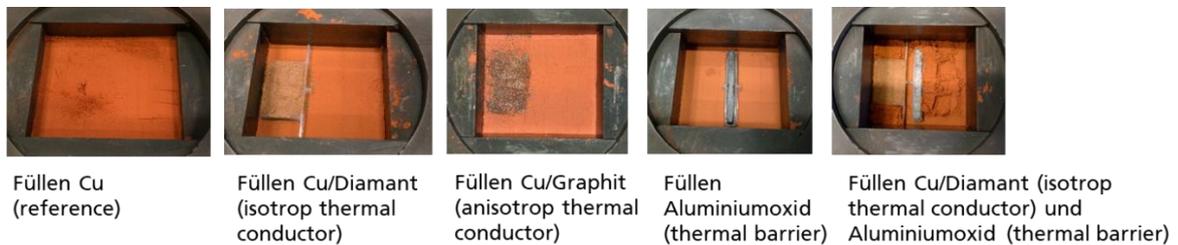


Abbildung 2-24: Einsatz des Einlegers zur Umsetzung verschiedener Variationen der Testgeometrie.

Die finale Dicke der Testgeometrie soll über Drahterodieren eingestellt werden. Dafür wurden erste Tests durchgeföhrt. Abbildung 2-25 zeigt eine Testgeometrie nach dem Drahterodieren mit eingestellter finaler Dicke.

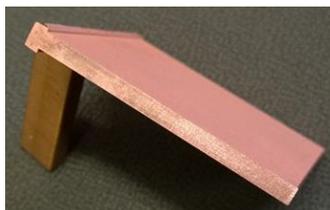


Abbildung 2-25: Einstellen des finalen Dicken der Testgeometrie mittels Drahterodieren.

Seitens Fraunhofer IFAM wurden für den Aufbau von Modellstrukturen die benötigten Cu-C-Pads bereitgestellt. Die thermische Partitionierung wurde im Gesamtdesign durch eine lokale Entwärmung der SiC-Chips planerisch umgesetzt. Dadurch kann der Einsatz an hoch wärmeleitfähigem Material reduziert werden. Ebenso eröffnete dieser Schritt die Erarbeitung einer Wafer-basierten Prozesskette zur Fertigung von Cu-C-Pads.

### 2.2.2.2 AP 2.2.2 Charakterisierung und Optimierung

Für die erste Bewertung der Lötbarkeit wurden Proben aus reinem Verbundwerkstoff den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Als Ergebnis zeigte sich, dass für ein erfolgreiches Löten der Verbundwerkstoff mit einer Kupferkaschierung ausgebildet werden müsste. Diesem Ansatz folgend wurde eine Strategie entwickelt und umgesetzt, die es in der ersten Stufe ermöglicht Rechteckplatten mit den Abmaßen von 64 x 57 mm<sup>2</sup> zu realisieren. Der Lagenaufbau wurde gewählt mit 1. Lage Kupfer 3mm, 2. Lage Cu/Diamant 1mm und 3. Lage Kupfer 3mm. Durch Drahterosion wurden die beidseitigen Kupferlagen auf eine Dicke von jeweils ca. 0,2 mm abgedünnt. So dass im Anschluss mittels Wasserstrahlschneiden die benötigten Cu-C-Pads herausgeschnitten werden konnten (Abbildung 2-26). Eine Herausforderung war die Entfernung der Mikrostege nach dem Wasserstrahlschneiden, um die geforderten Toleranzen von 50 µm in Länge und Breite einhalten zu können. Hier wurde eine Kombination aus mechanischer Bearbeitung und Feinstrahlen als effektivste Methode evaluiert.

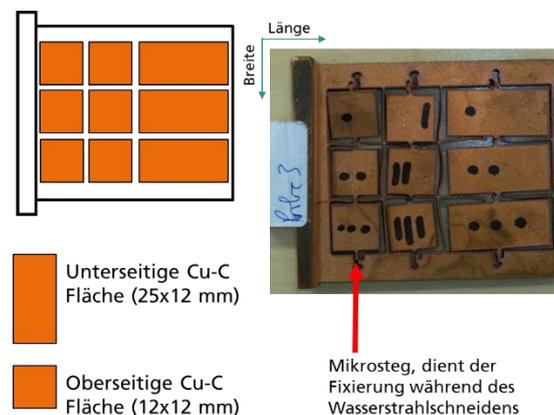


Abbildung 2-26: Realisierung von Cu-C-Pads (12x12mm<sup>2</sup> und 12x25mm<sup>2</sup>) aus Rechteckplatten mittels Spark Plasma Sintern, Drahterodieren und Wasserstrahlschneiden.

Zur Dokumentation wurden folgende Parameter von jedem Cu-C-Pads aufgenommen:

- Geometrische Abmessungen (mittels Messschraube)
- Dicke von Kupferkaschierung und Cu/Diamantdicke (mittels Stereomikroskopie)
- Effektive Wärmeleitfähigkeit durch den Dreilagenaufbau (mittels Flash-Methode)

Mit Blick auf die effektiven Wärmeleitfähigkeiten von ca. 350 W/(mK) durch den Lagenaufbau wurden weiterführende Optimierungen bei den Sinterparametern und der Geometrie des Sinterkörpers unternommen, so dass die effektive Wärmeleitfähigkeit durch den Lagenaufbau auf ca. 520 W/(mK) bei Raumtemperatur gesteigert werden konnte (Abbildung 2-27).

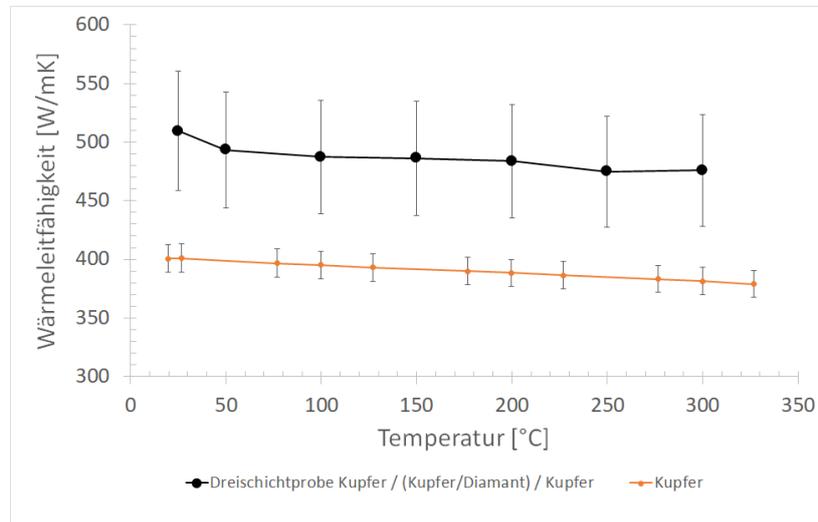


Abbildung 2-27: Dokumentierter Verlauf der Wärmeleitfähigkeit von Kupfer und den Cu-C-Pads.

Die Dicke der Kupferkaschierung konnte bei einer Gesamtdicke des Dreilagenaufbaus von ca. 1 mm auf je ca. 80  $\mu\text{m}$  reduziert werden (Abbildung 2-28). Ebenfalls wurde zur Verbesserung der Lötbarkeit gezielt Wärmebehandlungsschritte eingeführt, die zum einen Eigenspannungen abbauen und zum anderen die finale Dicke sowie Wärmeleitfähigkeit einstellen.

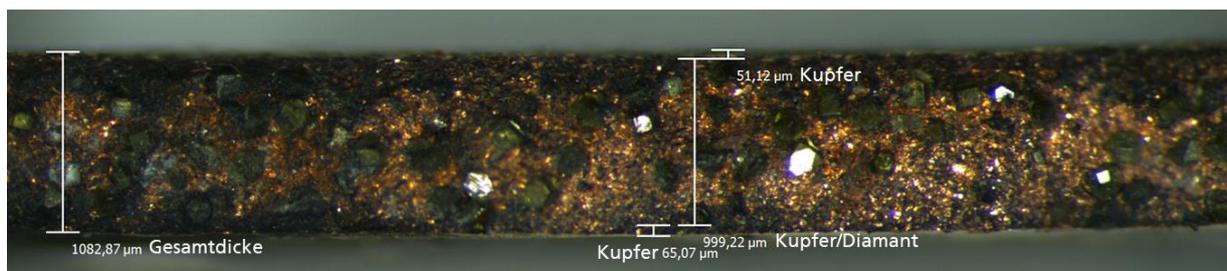


Abbildung 2-28: Stereomikroskopische Aufnahme eines Cu-C-Pads zur Bestimmung der Lagendicken.

Seitens Fraunhofer IFAM wurden die Modellstrukturen zur Bewertung des Fügeverfahrens von Cu-C-Pads auf Kupfer thermisch charakterisiert. Dabei konnte festgestellt werden, dass die thermische Leitfähigkeit nach dem Fügen für den weiteren Projektlauf geeignet ist. Beispielhaft ist in Abbildung 2-29 eine stereomikroskopische Aufnahme der Modellstruktur aus Cu-C-Pad, Lotschicht und Kupfer abgebildet. Das Kupfer mit einer Dicke von 2314  $\mu\text{m}$  wurde mittels Binder-Jetting gefertigt und spiegelt damit den im Projekt angestrebten Fügeschritt zwischen Cu-C-Pad und dem additiv mittels Binder-Jet gefertigten Kühlkörper wieder.

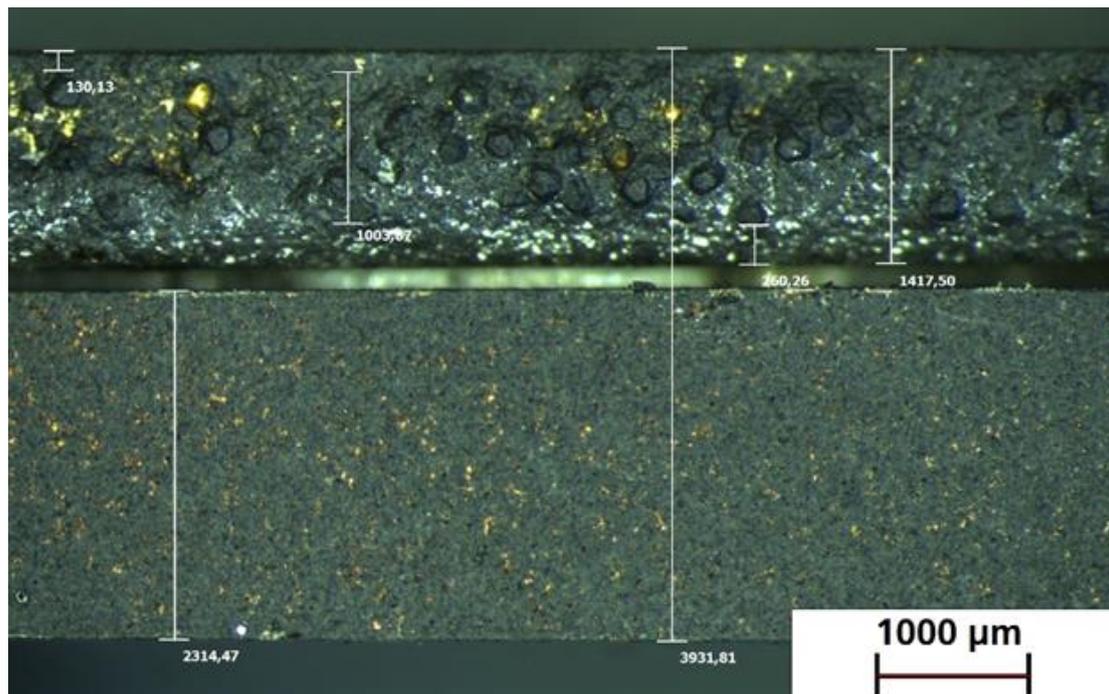


Abbildung 2-29: Stereomikroskopische Aufnahme der Modellstruktur aus Cu-C-Pad, Lötchicht und Kupfer zur Charakterisierung und Bewertung des Fügeprozesses.

## **2.3 AP 4 Entwicklung von Methoden zur Lebensdauermodellierung**

### **Fraunhofer IISB**

Im AP 4 wurde eine Methode zur Bestimmung der Systemlebensdauer entwickelt. Die Herausforderung für die im Projekt entwickelte Technologie waren zu erwartende Ausfälle der Signalelektronikkomponenten aufgrund passiver Schädigung durch ihre räumliche Nähe zu den aktiven Verlustleistungsquellen. Zunächst wurden in einer Literaturrecherche zu Normen und Vorschriften die existierenden Failure-In-Time (FIT) Werte für die Signalelektronik untereinander abgeglichen und eine geeignete Variante für das Gesamtmodell identifiziert. Anschließend wurde ein Gesamtmodell definiert, welches die FIT-Methodik mit Verschleißausfällen kombiniert und so eine geschlossene Beschreibung der Zuverlässigkeit erlaubt. Das Modell wurde in Python implementiert und abschließend in einer Fallstudie für den SiCool Leistungsmodul-Demonstrator angewendet.

### **2.3.1 AP 4.1 FIT-Raten und Verschleißausfallmechanismen**

In diesem Teilarbeitspaket wurden die Methoden für die zufälligen Ausfälle (FIT-Raten) und für Verschleißausfälle analysiert, um deren jeweilige Eignung im Rahmen des Projekts disku-

tieren und die jeweiligen Kombinationsmöglichkeiten erarbeiten zu können. Der Workflow für die Entwicklung des Modells ist in Abbildung 2-30 dargestellt.

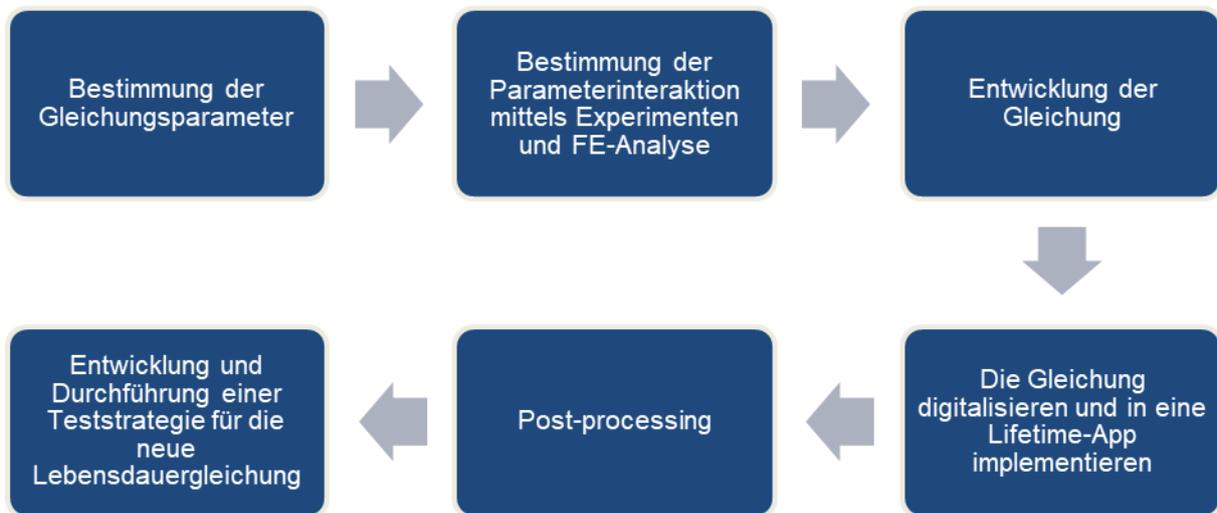


Abbildung 2-30: Workflow zur Entwicklung der Methodik im Arbeitspaket 4.

Die Grundlage für die Beschreibung der Zuverlässigkeit von Elektronikkomponenten ist die sogenannte Badewannenkurve, welche in Abbildung 2-31 dargestellt ist. Während die Frühausfälle meist auf sich einführende Prozessbedingungen zurückzuführen sind, werden in diesem Projekt ausschließlich der zweite (konstante Ausfallrate) und dritte Teil (Verschleißausfälle) der Kurve zur Modellierung der Zuverlässigkeit der Signalelektronik- und Verschleißkomponenten verwendet.

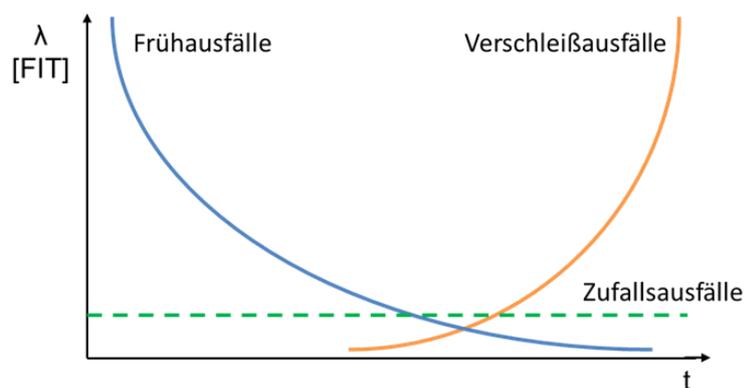


Abbildung 2-31: Badewannenkurve zur Beschreibung der Zuverlässigkeitsverteilung von Elektronikkomponenten.

Die grundsätzlichen Unterschiede zwischen den Methoden der Zuverlässigkeitsabschätzung für Zufalls- und Verschleißausfälle sind in Tabelle 2-7 dargestellt.

Tabelle 2-7: Vergleich der Beschreibung von Zufalls- und Verschleißausfälle.

Attribut	Zufälliger Ausfall	Verschleißausfall
Industriestandard	FIDES, MIL HDBK 217, Siemens FIT	z.B. ECPE AQG 324
Anwendungsbereich	Zufallsausfall	Physikalischer oder chemischer Mechanismus
Statistisches Modell	Exponentielle Verteilungsfunktion	Weibull Verteilungsfunktion
Fehlerrate	konstant	Positiv abhängig von t
Berechnungsgrundlagen	$\lambda \rightarrow \dot{\lambda} = 0$	$N_i(T, \sigma, \Delta T, \dots) \rightarrow \lambda(t), \dot{\lambda}(t)$

Basierend auf der Literaturrecherche konnten die etabliertesten Methoden zur analytischen Beschreibung der konstanten Ausfallrate für Komponenten der Leistungselektronik identifiziert werden und sind nachfolgend in Tabelle 2-8 gezeigt.

Tabelle 2-8: Etablierte Methoden zur Beschreibung der konstanten Ausfallrate in der Leistungselektronik.

Methode	Grundgleichungen
MIL HDBK 217	$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_A \cdot \pi_R \cdot \pi_S \cdot \pi_C \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$
Siemens FIT	$\lambda = \lambda_{ref} \cdot \pi_U \cdot \pi_I \cdot \pi_T$
FIDES	$\lambda = (\Sigma_{Phys}) \cdot (\Pi_{Prozess})$ $\lambda_{physical} = [\Sigma_{Phys}(\lambda_0 \cdot \Pi_{Beschleunigung})] \cdot \Pi_{induziert}$

In Tabelle 2-8 beschreibt  $\lambda_p$  die Bauteilfehlerrate,  $\lambda_b$  die Basisfehlerrate,  $\pi_{T...E}$  Umgebungs- und Anwendungsfaktoren,  $\lambda_{ref}$  die Ausfallrate bei Referenzbedingungen,  $\pi_U$  den Faktor für eine Spannungsabhängigkeit,  $\pi_I$  den Faktor für eine Stromabhängigkeit,  $\pi_T$  den Faktor für eine Temperaturabhängigkeit,  $\Sigma_{Phys}$  physikalische und technologische Beiträge,  $\Pi_{Prozess}$  Auswirkungen des Entwicklungs-, Produktions- und Betriebsprozesses,  $\lambda_0$  die Basisfehlerrate,  $\Pi_{Beschleunigung}$  einen Beschleunigungsfaktor, der die Empfindlichkeit auf die Einsatzbedingungen überträgt und  $\Pi_{induziert}$  den Beitrag induzierter Faktoren eines Anwendungsfeldes. Aufgrund ihrer umfas-

senderen Darstellungsmöglichkeiten unter den drei relevanten Varianten wurde die FIDES-Systematik für die Entwicklung der gemischten Zuverlässigkeitsbeschreibung gewählt. Die übliche Methodik für Verschleißausfälle in der Elektronik ist in Tabelle 2-9 dargestellt.

Tabelle 2-9: Ausfallrate und Lebensdauer von Verschleißausfällen.

Schritt	Beschreibung
Beschleunigter Lebensdauertest	Power Cycling Test (PCT), Thermal Cycling Test (TCT), etc.
Bestimmung der Ausfallrate	Weibull-Verteilung $\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1}$
Fehlermechanismus: Thermomechanische Ermüdung	Anzahl der Zyklen bis Ausfall nach Coffin-Manson $N_f = c_1 \Delta \varepsilon_p^{-c_2}$ Schädigungsakkumulation nach Palmgren-Miner $D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_{fi}}$

### 2.3.2 AP 4.2 Implementierung der Methode

Basierend auf einer Weibull-Verteilung für Verschleißausfälle und der FIDES-Methodik aus Tabelle 2-8, wurde eine kombinierte Beschreibung der Zuverlässigkeit erarbeitet. Die zugrunde liegende Weibull-Verteilung in der Darstellungsvariante einer Fehlerrate ist:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1}$$

Darin ist  $\beta$  der Formfaktor, welcher ein Maß für die Streuung darstellt,  $\alpha$  der Skalierungsfaktor, welcher als mittlere Lebensdauer betrachtet wird und  $\gamma$  der Lokationsparameter, welcher den Beginn der Verschleißphase markiert. Die Werte für  $\alpha$  und  $\beta$  können aus den Ergebnissen eines Lebensdauertests für leistungselektronische Module (z. B. aktive Lastwechseltest) extrahiert werden. Um die Ergebnisse eines Lebensdauertests mit einem Schädigungsmechanismus in Beziehung setzen zu können, kann eine parallel zum Experiment durchgeführte numerische Untersuchung hilfreich sein. Der Parameter  $\gamma$  wurde als  $t_{\text{wear}}$  definiert. Dieser gibt die Anzahl der Zyklen an, ab wann der Prüfkörper in die Verschleißphase übergeht. Davor unterliegt der Prüfkörper einer konstanten Ausfallwahrscheinlichkeit. Konsequenterweise ergibt sich die Ausfallrate einer Komponente in der Verschleißphase dann aus der Summation der konstanten Ausfallrate und der Weibull-Funktion für die Ausfallrate in der Verschleißphase.

Die entsprechende Funktion für die Ausfallrate einer Komponente ist dann:

$$\lambda_i(t) = \begin{cases} \sum \lambda_{phys} \cdot \Pi_{Prozessbeiträge} & t < t_{wear} \\ \sum \lambda_{phys} \cdot \Pi_{Prozess} + \frac{\beta}{\alpha} \left( \frac{t-t_{wear}}{\alpha} \right)^{\beta-1} & t \geq t_{wear} \end{cases}$$

Für die Berechnung der Systemausfallrate wird nun das System in einzelne Komponenten zerlegt, deren Definition nicht zwangsläufig mit einem einzigen Bauteil zusammenfallen muss. So kann es sinnvoller sein, beispielsweise eine Komponente für ein DCB-Substrat zu definieren als jeweils für die Metallisierung und die Keramik des Substrats eine eigene Komponente zu erstellen. Für die Funktion des Systems spielt das Substrat in seiner Gesamtheit die übergeordnete Rolle. Die Entscheidung ist jedoch individuell abzuwägen. Die Verlinkung der Komponenten kann seriell oder parallel erfolgen, was die Rolle einer Komponente relativ zum gesamten System darstellt. Der Ausfall einer seriellen Komponente führt zum Ausfall des gesamten Systems. Der Ausfall einer parallelen Komponente verringert hingegen die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems entsprechend der Werte der Parameter in der Gleichung.

Die Berechnung der Zuverlässigkeit für serielle und parallele Komponenten erfolgt analog zur bekannten Vorgehensweise aus elektrischen Netzwerken:

$$\lambda_{seriell}(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t)$$

$$\frac{1}{\lambda_{parallel}(t)} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i(t)}$$

Die Systemlebensdauer ergibt sich dann aus der Summation der seriellen Komponenten und der parallelen Ersatzkomponenten durch folgende Gleichung:

$$\lambda_{system}(t) = \lambda_{seriell}(t) + \lambda_{parallel}(t)$$

Die Gleichungen wurden in Python implementiert. Die Vorgehensweise zur Nutzung der Implementierung, beziehungsweise des Modells, ist in der nachfolgenden Abbildung 2-32 zu sehen.

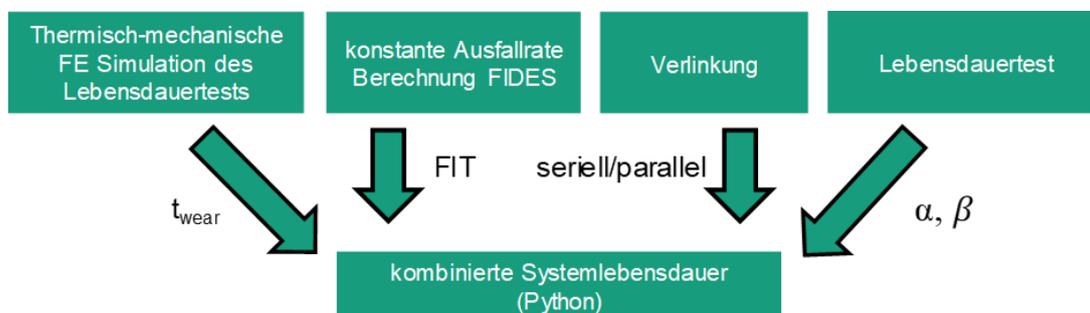


Abbildung 2-32: Prinzipielle Schritte zur Nutzung des kombinierten Systemlebensdauer-Modells.

Die Parameter der Weibull-Ausfallfunktion ( $\alpha$ ,  $\beta$  und  $t_{\text{wear}}$ ) müssen für jede Komponente des Systems definiert werden. Der Skalierungsfaktor  $\alpha$  kann beispielsweise als Funktion der plastischen Dehnungsamplitude  $\Delta\varepsilon_p$  definiert werden:

$$\alpha = \alpha(\Delta\varepsilon_p) \quad (9)$$

So kann erreicht werden, dass große plastische Dehnungsamplituden zu größeren Ausfallraten führen, was der physikalischen Erwartung entspricht. Der Wert des Formfaktors  $\beta$  kann für den Bereich von 1 bis unendlich definiert werden, wobei ein Wert von 1 einer Exponentialverteilung für Zufallsausfälle entspricht. In aktiven Lastwechselexperimenten werden jedoch üblicherweise Werte zwischen 1 und 10 beobachtet. Der Wert ist prinzipiell eine Funktion der Geometrie-, Test- und Materialunsicherheiten:

$$\beta = \beta(\delta_{Geo}, \delta_{P(t)}, \delta_{Mat}) \quad (10)$$

$t_{\text{wear}}$  repräsentiert den zeitlichen Übergang in das Verschleißregime. Sie kann aus der Kombination von Simulation und Lebensdauertest für die entsprechende Komponente ermittelt werden. Eine schematische Darstellung ist in Abbildung 2-33 dazu gezeigt.

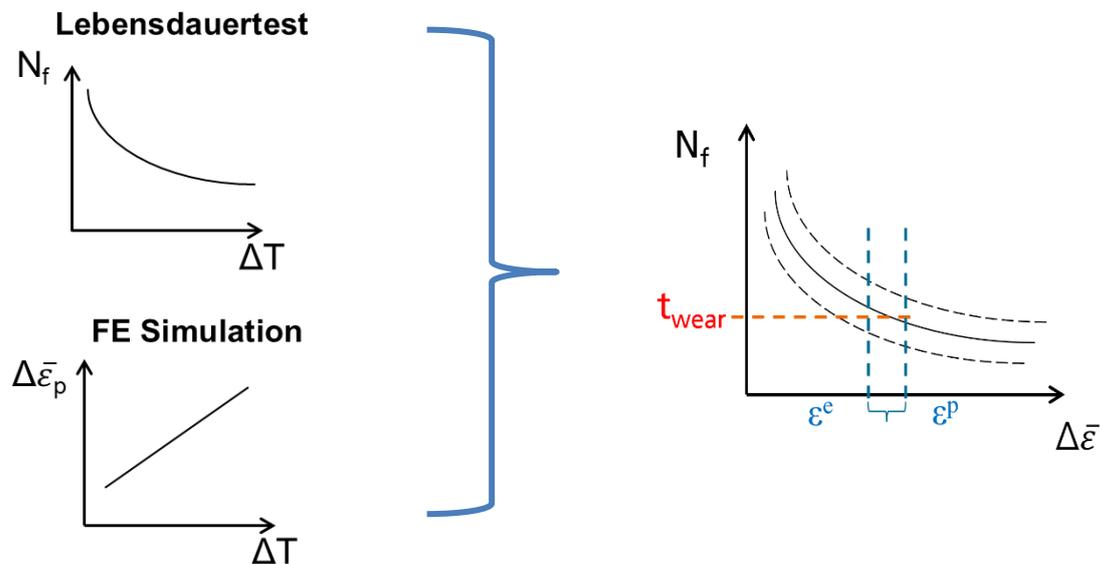


Abbildung 2-33: Vorgehen zur Bestimmung des Beginns der Verschleißphase über den Parameter  $t_{\text{wear}}$ .

Im üblichen Lastwechsellast wird als ein Ergebnis eine Darstellung der Anzahl der Zyklen bis zum Ausfall der Probe  $N_f$  über den angelegten Temperaturhub  $\Delta T$  erhalten. In einer kalibrierten Simulation kann parallel dazu der Zusammenhang zwischen der erreichten plastischen Dehnungsamplitude  $\Delta\varepsilon_p$  und dem angelegten Temperaturhub  $\Delta T$  ermittelt werden. Für geringe  $\Delta T$  wird  $\Delta\varepsilon_p \rightarrow 0$  und es liegen ausschließlich elastische Dehnungsamplituden vor. Durch die

Kombination beider Graphen zu einer Darstellung von  $N_f$  über  $\Delta\varepsilon$  wird die bekannte Darstellung der zyklischen Ermüdung in Form einer Wöhlerkurve erreicht. Da die elastischen und plastischen Dehnungsanteile durch die Simulation bekannt sind, kann der Übergang auf der Dehnungsachse eingezeichnet werden. Der Schnittpunkt des Übergangs mit der Lebensdauerkurve ergibt dann den Zeitpunkt  $t_{\text{wear}}$  für den Übergang in die Verschleißphase. Innerhalb dieser Vorstellung wird dementsprechend ein Versagen durch High Cycle Fatigue nicht als Verschleißausfall gewertet. Zusätzlich funktioniert diese Vorgehensweise nur für Materialien, welche plastischer Verformung im Betrieb unterliegen und eine niederzyklische thermo-mechanische Ermüdung als Ausfallmechanismus erwartet werden kann.

### **2.3.3 AP 4.3 Integration und Darstellung der Ergebnisse**

Wie in den vorherigen Unterarbeitspaketen erwähnt, wurde eine Methode zur gemeinsamen Beschreibung der Zuverlässigkeit von Leistungs- und Logikkomponenten für ein Elektronikmodul entwickelt und in der Programmiersprache Python implementiert. Die Integration erfordert Daten, welche aus experimentellen (Lebensdauertest) und simulativen (Finite-Elemente-Analyse) Untersuchungen sowie aus Zuverlässigkeitsstandards (FIDES) stammen.

Die Erzeugung und Integration einer zusammenhängenden Datenbank zur Auswahl der Parameter wurde mit Blick auf die vielfältigen Wechselwirkungen der Parameter, welche es zu Berücksichtigen gilt, wenn Daten nicht aus einer konsistenten Erzeugungsroutine stammen, zugunsten einer flexiblen vektoriiellen Parameter-Eingabesektion substituiert.

Im Python-Code wurde ein Diagrammdesign programmiert, welches sowohl die individuelle Ausfallrate für die definierten Komponenten als auch die Systemausfallrate in Abhängigkeit von der Beanspruchungszeit darstellt. Die Zeitbasis kann dabei flexibel gewählt werden, muss jedoch konsistent sein. Die Visualisierung einer Berechnung für ein Modellsystem aus fünf Komponenten mit drei seriellen und zwei parallelen Beiträgen ist in Abbildung 2-34 zu sehen.

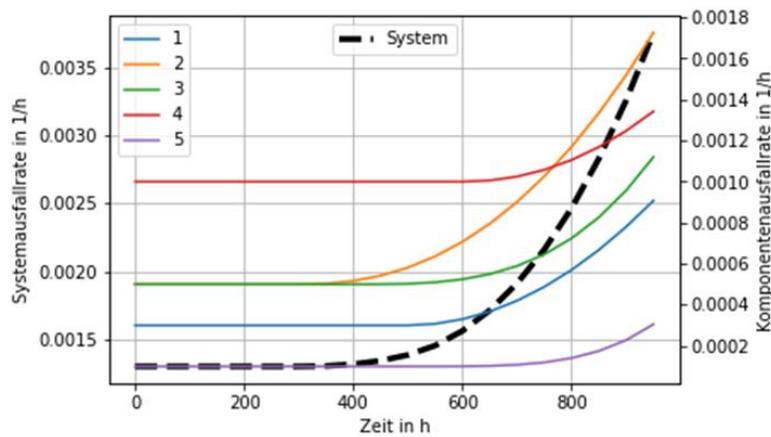


Abbildung 2-34: Darstellung der mit der Python-Integration berechneten Zuverlässigkeit in Abhängigkeit von der Beanspruchungszeit für ein Modellsystem aus fünf Komponenten.

### 2.3.4 AP 4.4 Test

Ziel dieses Unterarbeitspakets war für die neu entwickelte Methode einen Testfall zu berechnen, welcher die generelle Funktionsfähigkeit der Methode unter möglichst realistischen Bedingungen zeigt. Die generelle Funktionsfähigkeit wurde bereits in den vorherigen Arbeitspaketen demonstriert. Die Arbeitsanteile des IISB im AP 5 wurden zu Projektbeginn für die Durchführung von aktiven Lastwechselexperimenten mit den Demonstrator-Strukturen und im AP 6 für die Interpretation und Nutzung der Ergebnisse aus AP 5 unter Einsatz der in AP 4 entwickelten Methodik geplant. Im Projektverlauf hat sich jedoch gezeigt, dass nicht ausreichend Prüfkörper rechtzeitig für die Lastwechselexperimente sowohl beim Projektpartner Siemens als auch für das IISB bereitgestellt werden können. Daher wurde entschieden, die Arbeiten des IISB aus AP 5 und AP 6 zugunsten einer konsistenten Betrachtung der Methodik am Beispiel des SiCool-Demonstrators durchzuführen und in dieses Unterarbeitspaket zu investieren. Die nachfolgende Darstellung der Arbeiten und Ergebnisse des IISB vereint damit die verschiedenen Teilarbeitspakete.

Die Arbeiten umfassen zunächst die Entwicklung eines digitalen Zwillings für den SiCool-Demonstrator im Power Cycling Test (PCT), wobei die Simulationsergebnisse anschließend zur teilweisen Parametrisierung der entwickelten Lebensdauermethodik genutzt werden.

Die Simulation des Demonstrators unter aktiven Lastwechselbedingungen erfolgte in der kommerziellen Finite-Elemente-Methode Software ANSYS. Zu Beginn wurde eine CAD-Geometrie des Demonstrators generiert und notwendige Vereinfachungen getroffen. Die angewandte Modellierungsstrategie ist eine schwach gekoppelte transient thermische - statisch mechanische Simulation, weshalb keine elektrischen Phänomene oder die Fluidströmungsphysik im

Kühlkörper explizit berücksichtigt werden. Die vereinfachte finale CAD-Geometrie des Demonstrators ist mit farbcodierten Materialien in Abbildung 2-35 und Abbildung 2-36 dargestellt.

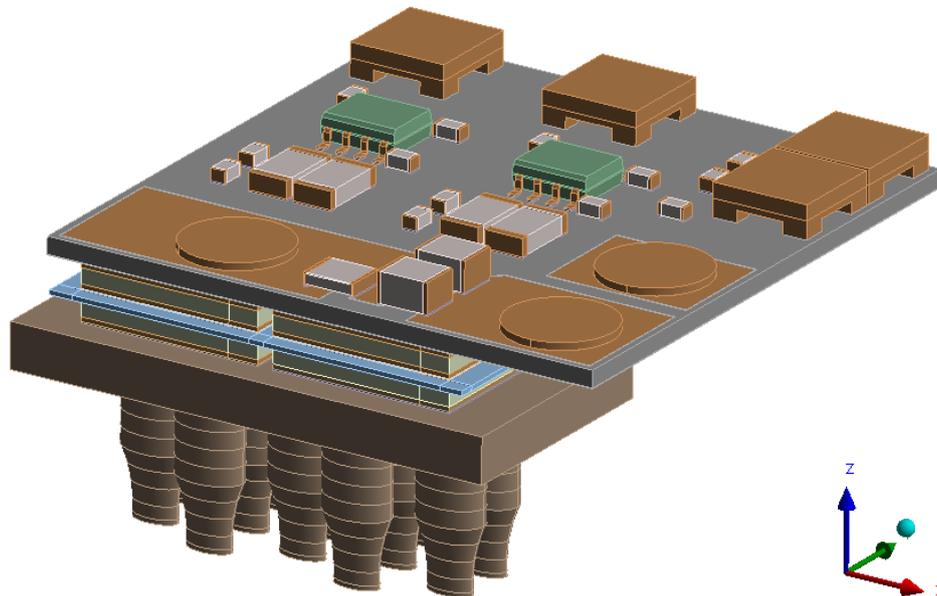


Abbildung 2-35: Finale vereinfachte CAD Geometrie des SiCool Demonstrators für den digitalen Zwilling.

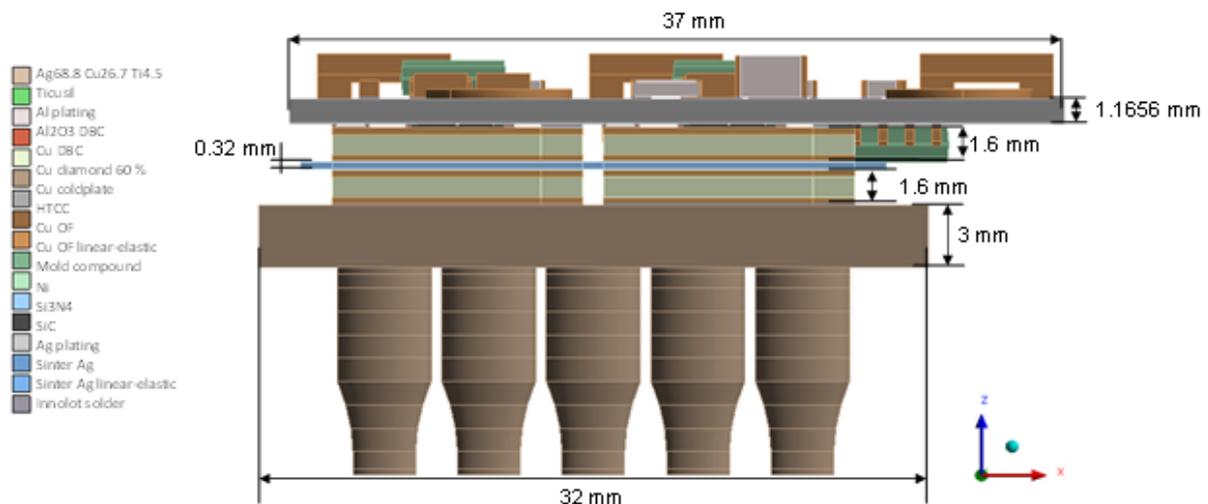


Abbildung 2-36: Finale vereinfachte CAD Geometrie des SiCool Demonstrators für den digitalen Zwilling mit Abmessungen in der Seitenansicht.

Eine umfassende Netz-Konvergenzstudie wurde durchgeführt, um den numerischen Fehler durch die räumliche Approximation über das Finite-Elemente-Netz zu minimieren. Die Diskretisierung der Geometrie ist in Abbildung 2-37 zu sehen. Es enthält ungefähr 1,7 Millionen Elemente und 4,3 Millionen Knoten, wobei quadratische Ansatzfunktionen verwendet wurden, um die Elemente zu integrieren. In den schädigungskritischen Bereichen (Halbleiter, Sinterschicht, Lotschicht und Hartlotschicht) wurde eine lokale Netzverfeinerung durchgeführt.

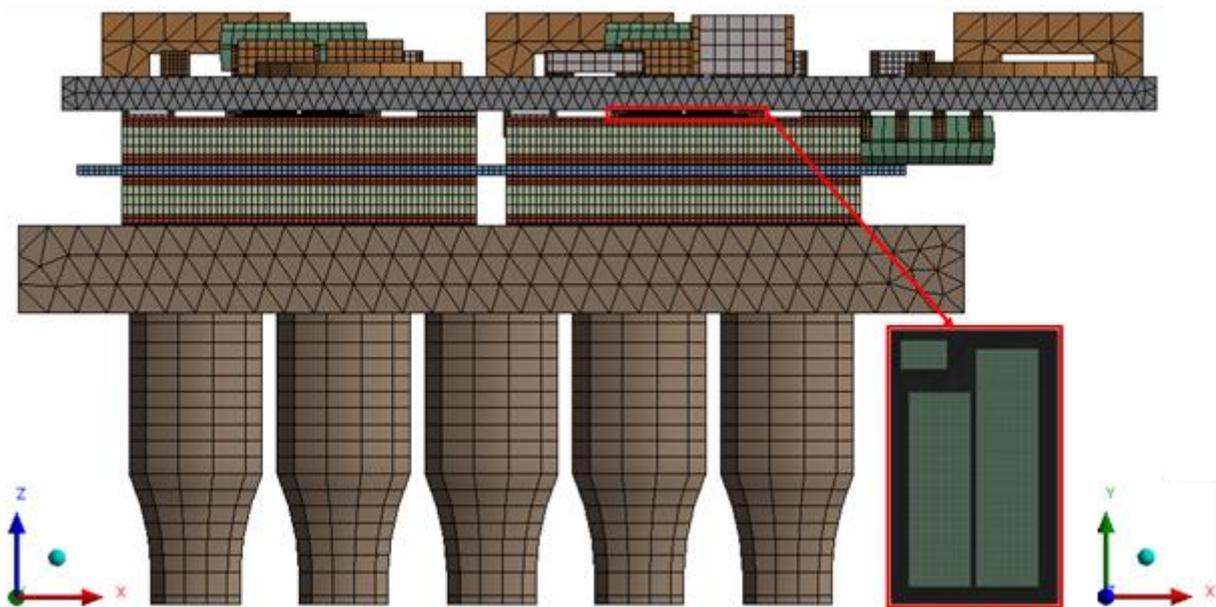


Abbildung 2-37: FE-Modell Diskretisierung der Geometrie des SiCool Demonstrators für den digitalen Zwilling.

Die verwendeten thermischen Randbedingungen waren eine freie Luftkonvektion von  $5e-6$  W/(mm<sup>2</sup>K) bei 22°C Umgebungstemperatur auf allen offenen Oberflächen des Leistungsmoduls, ein aus der CFD-Simulation aus AP 2 extrahierter Wärmeübergangskoeffizient von  $4,4515e-2$  W/(mm<sup>2</sup>K) bei 65°C Kühlmitteltemperatur auf der Grenzfläche zwischen Kühlkörper und Kühlflüssigkeit und eine Verlustleistungs-Randbedingung in Form eines Wärmestroms auf der oberen Seite der beiden Leistungshableiter, deren Wert so angepasst wurde, um verschiedene Temperaturhübe  $\Delta T = [20,80]$  K am Halbleiter zu erreichen. Die Verlustleistung in der thermischen Simulation wurde in Form eines Rechtecks eingepreßt, wobei die Schaltzeit jeweils 1 ms, die Einschaltdauer  $t_{on} = 3$  s und die Ausschaltdauer  $t_{off} = 15$  s betrug. Die Zeiten sind repräsentativ für einen gewöhnlichen Lastwechselversuch. Die Ausschaltdauer wurde so gewählt, dass innerhalb dieser Dauer die Halbleitertemperatur bis zur Kühlmitteltemperatur sinkt. Für jeden Temperaturhub wurden inklusive einer Abkühlphase von 200°C homogener Modelltemperatur unter natürlicher Konvektion auf Kühlmitteltemperatur insgesamt zehn Lastzyklen berechnet. Die vorgeschaltete Abkühlphase simuliert in vereinfachter Weise den Sinterprozess, wodurch Eigenspannungen und -dehnung in das System bereits vor dem Lastwechseltest eingebracht werden.

Die Randbedingung für die statische mechanische Simulation war eine fixierte Lagerung der unteren Fläche der Kühlkörperplatte. Zusätzlich wurde die Referenztemperatur für den dehnungsfreien Zustand aller Körper auf 200°C eingestellt.

Die notwendigen Materialeigenschaften wurden aus einer IISB-internen Datenbank entnommen und um die Messergebnisse der Projektpartner für die SiCool-spezifischen Materialien erweitert. Das plastische Materialverhalten für die relevanten Metalle wurde durch Anand-Viskoplastizität für Innot, einem Garofalo-Sekundärkriechmodell kombiniert mit isotroper Verfestigung für gesintertes Silber und bilinear kinematischer Verfestigung für Kupfer, Ticusil-Lot und Aluminium modelliert.

Als erstes Ergebnis sollen zunächst Beobachtungen zur Entwärmungssituation des Demonstrators vorgestellt werden. Dazu ist die Wärmestromdichte vektoriell am Ende der Heizphase in einem Querschnitt entlang der x-z-Ebene durch die Halbleiter in Abbildung 2-38 dargestellt.

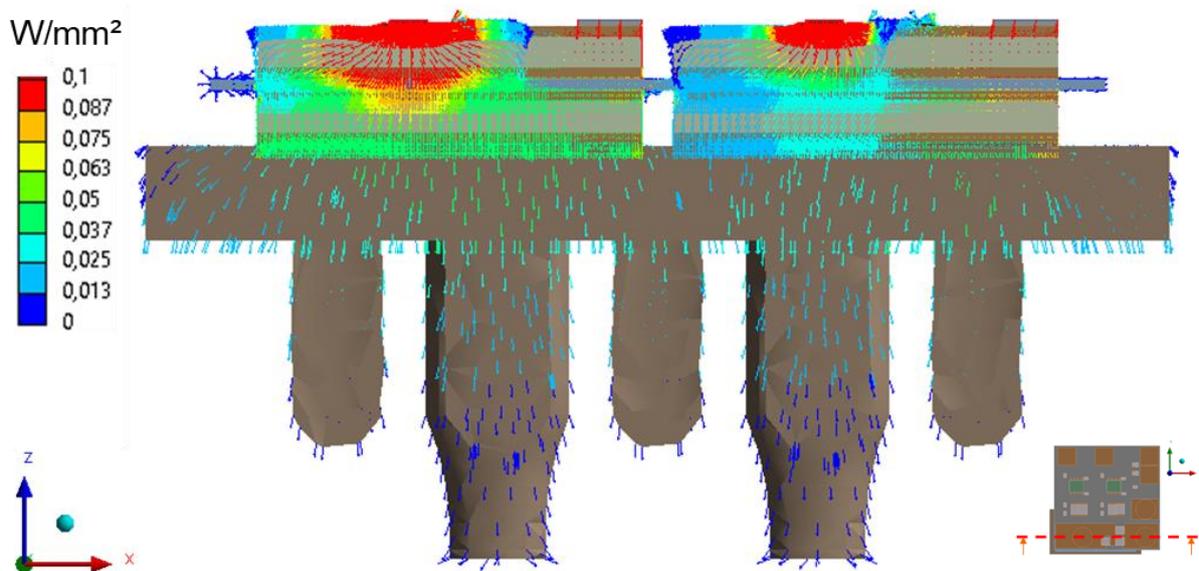


Abbildung 2-38: Wärmestromdichte am Ende der Heizphase (3 s) im Querschnitt entlang der x-z-Ebene durch die Leistungshalbleiter (Schnittposition im Bild unten rechts).

Auffällig ist, dass der Wärmestrom unter den beiden Halbleitern nicht symmetrisch ist. Dies ist vor allem auf die Gestaltung der HTCC für die Treiberschaltung auf der Oberseite der beiden Halbleiter zurückzuführen. Die asymmetrische Wärmeabfuhr führt voraussichtlich zu einer unterschiedlichen mechanischen Beanspruchung der beiden Halbleiter und deren Anbindungsschichten, wodurch unterschiedliche Lebensdauern erwartet werden können.

Für die Interpretation der weiteren Simulationsergebnisse wurde eine neue Auswertestrategie erarbeitet, die es ermöglicht, simulative Ergebnisse  $\Delta w_p(\Delta T, t_{on}, T_{min}, \dots)$  direkt mit den experimentellen PCT-Messkurven  $\Delta R_{th}(\Delta T, t_{on}, T_{min}, \dots)$  zu vergleichen, um daraus einerseits die Validität des Simulationsmodells zu bewerten und andererseits Zugang zu inneren Schädigungsgrößen zu erhalten. Im Nachfolgenden wird die entwickelte Strategie hergeleitet.

Zunächst wurden für verschiedene Verlustleistungen am Halbleiter jeweils zehn Lastzyklen in der thermisch-transienten-statisch-mechanischen Simulation berechnet. Die maximale Halbleitertemperatur ist für ein Szenario in Abbildung 2-39 abgebildet.

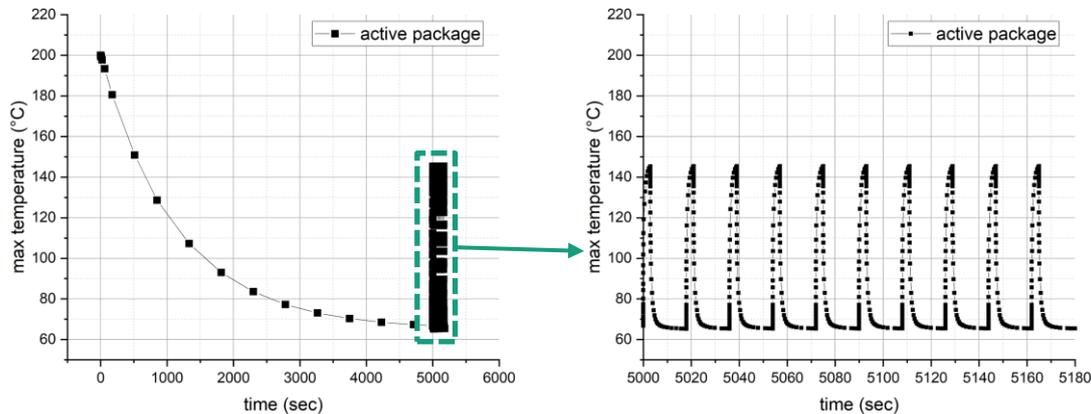


Abbildung 2-39: Simulierte maximale Halbleitertemperatur während des Power Cycling Tests für die ersten zehn Lastwechsel. Links: Lastzyklen mit vorgeschalteter Abkühlung an freier Konvektion nach dem Sinterprozess, bei welchem die thermischen Dehnungen als Referenzzustand angenommen wurden. Rechts: Vergrößerte Darstellung der max. Halbleitertemperatur in den Lastzyklen.

Eine übliche experimentell zugängliche Größe für die Bewertung der Alterung eines elektronischen Aufbaus im Power Cycling Test ist die Veränderung des thermischen Widerstands aufgrund einer verschlechterten Wärmeabfuhr. Diese tritt ein, wenn Verbindungsschichten zerrütten oder delaminieren und darüber ein signifikanter Anteil der Wärme abgeführt wird. In der Praxis sind das häufig Lotschichten aber auch für Sinterschichten ist so ein Verhalten bekannt. Aus simulativen Voruntersuchungen ergab sich die Sinterschicht für den Demonstrator ebenfalls als möglicher Degradationsort während des Versuchs. Um die Veränderung des thermischen Widerstands aufgrund einer Schädigung der Sinterschicht  $\Delta R_{th}(\Delta A)$  quantitativ darstellen zu können, wurden verschiedene Alterungszustände thermisch simuliert. Dazu wurden die Sinterschichten unter den Leistungshalbleitern in ihrer Anbindungsfläche jeweils rechteckig und symmetrisch auf bis zu 50% der initialen Kontaktfläche reduziert. Dies wurde durch die Deaktivierung der Wärmeleitfähigkeit in den entsprechenden Bereichen der Sinterschicht erreicht. Die Form der Flächenreduktion entspricht der Beobachtung aus Ultraschalluntersuchungen an üblichen Versuchsaufbauten. Die erzwungene Delamination unter einem Halbleiter ist in der nachfolgenden Abbildung 2-40 dargestellt.

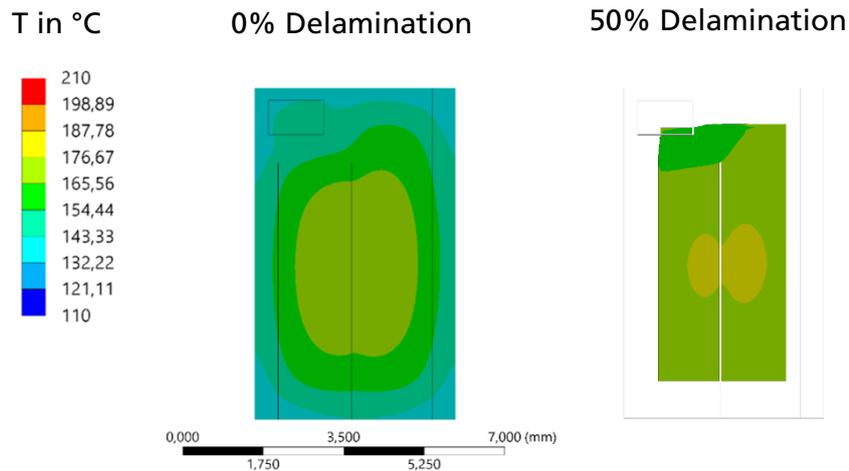


Abbildung 2-40: Erzwungene Delamination der Sinterschicht unter dem Leistungshalbleiter für die thermischen Simulationen. Zu verschiedenen Delaminationszuständen wurde der Rth des Aufbaus berechnet.

Die sich daraus ergebenden Temperaturfelder für den gesamten Demonstrator bei gleicher Verlustleistung sind in Abbildung 2-41 gezeigt. Da die untere Sinterschicht einen erheblichen Beitrag zur Entwärmung der Leistungshalbleiter beiträgt, kann im Fall der 50%igen Delamination oder Schädigung der Sinterschicht eine erhebliche Veränderung des Temperaturfeldes auf der Treiberschaltung beobachtet werden. Ebenso steigt dort auch die Maximaltemperatur, was zu einer erhöhten Belastung der Logikbauteile führt und den Ansatz der gemeinsamen Lebensdauerbetrachtung im Projekt weiter rechtfertigt.

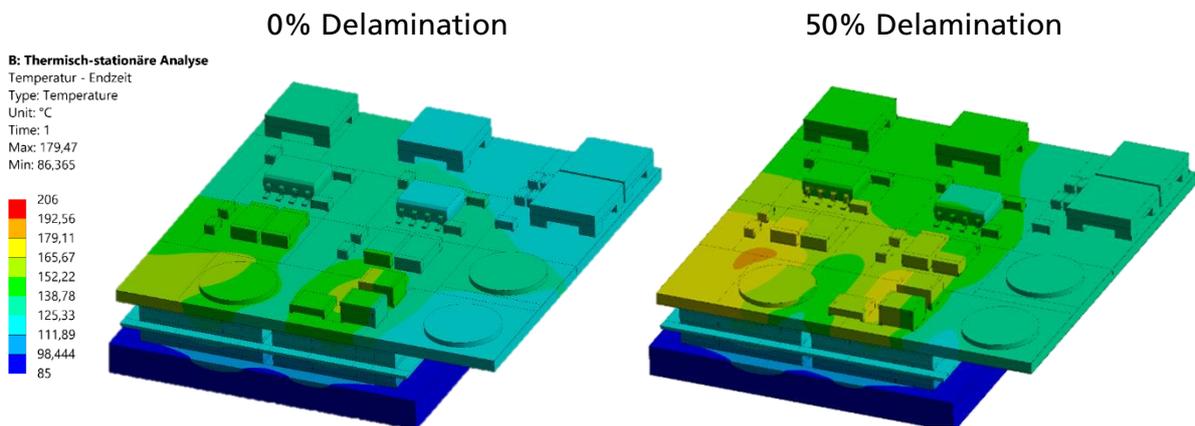


Abbildung 2-41: Temperaturfeld für den Demonstrator für zwei unterschiedliche Delaminationszustände der Sinterschicht unter den Leistungshalbleitern. Links: Initialer Zustand ohne Delamination. Rechts: Reduktion der initialen Anbindungsfläche um 50%.

Die simulativen Voruntersuchungen zeigten auch, dass die Sinterschichten an den Spacern, welche zum Stützen des HTCC-Substrats für den Fertigungsprozess notwendig sind, während des Tests degradieren können, siehe Abbildung 2-42.

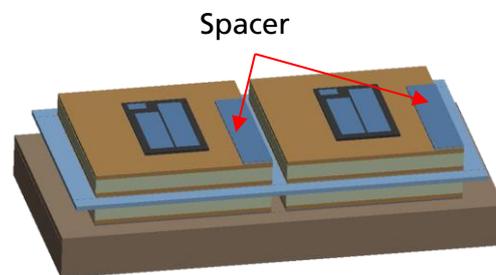


Abbildung 2-42: Spacer zum Stützen der HTCC-Keramik während des Fertigungsprozesses. Die Sinterschichten der Spacer sind ebenfalls potenzielle Schädigungsstellen des Aufbaus.

Um den Einfluss einer möglichen Degradation der Spacer bewerten zu können, wurden zusätzlich zu den thermischen Simulationen mit der Delamination der Sinterschichten noch Berechnungen eines Worst-Case-Szenarios durchgeführt. Hierzu wurden bei einer Delamination von 50% der Halbleitersinterschichten die Temperaturverteilungen im Demonstrator für eine vollständige Degradation der Spacer berechnet, siehe Abbildung 2-43.

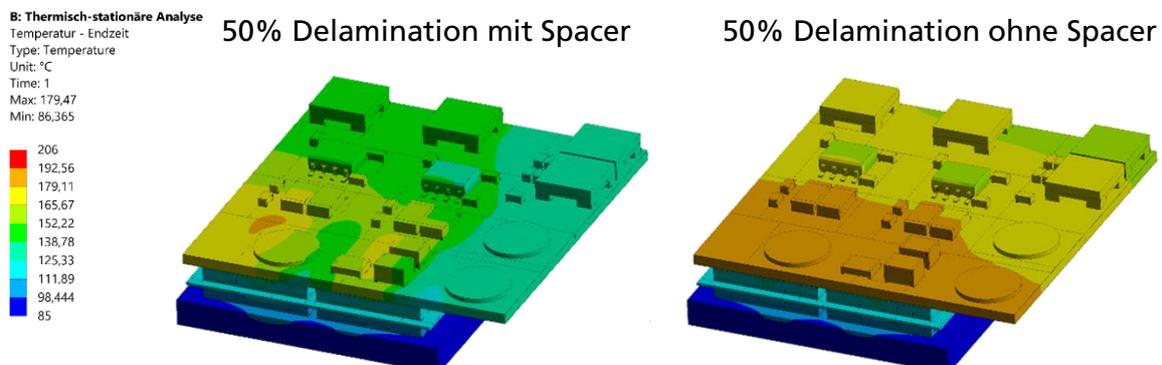


Abbildung 2-43: Berechnete Temperaturverteilung für ein Worst-Case-Szenario unter Annahme einer 50%igen Delamination der unteren Sinteranbindungsschicht der Leistungshalbleiter. Links: Zustand ohne Degradation der Spacer. Rechts: Zustand mit vollständiger Delamination der Spacer.

Bei gleicher Farbskalierung zeigt sich eine erhebliche, großflächige Erwärmung der Treiberschaltung für den Fall der vollständig degradierten Spacer. Die Logikbauteile in unmittelbarer Nähe zum Leistungshalbleiter erreichen signifikant höhere thermische Belastungen. Die Spacer stellen somit einen wichtigen Beitrag zur Entwärmung der Treiberschaltung dar. Die Änderung des thermischen Widerstands in Abhängigkeit von der Sinteranbindungsfläche der

Halbleiter  $\Delta R_{th}(\Delta A)$  ist für die Fälle mit vollständiger Degradation der Spacer und ohne Berücksichtigung der Spacer in der nachfolgenden Abbildung 2-44 gezeigt.

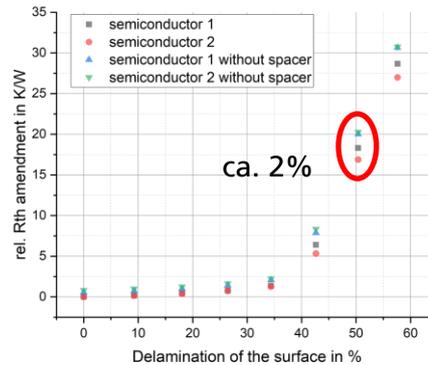


Abbildung 2-44: Berechneter Zusammenhang zwischen der relativen Änderung des thermischen Widerstands und der Änderung der unteren Sinteranbindungsfläche der Leistungshalbleiter für beide Halbleiter ohne und mit Degradation der Spacer.

Wie zu erwarten, ergeben sich zwischen den beiden Halbleitern keine großen Unterschiede. Ein übliches Ausfallkriterium im Power Cycling Test stellt eine Änderung des initialen thermischen Widerstands um 20% dar. Dieser Wert wird für den Demonstrator bei einer Verringerung der Sinteranbindungsfläche um ca. 50% erreicht. Die verhältnismäßig große Höhe dieses Wertes verdeutlicht die hervorragende thermische Performance des SiCool-Aufbaus. Weiterhin auffällig ist, dass bei diesem Alterungszustand ein Unterschied in der relativen Änderung des thermischen Widerstands zwischen den beiden Extremfällen mit und ohne Berücksichtigung der Alterung der Spacer von nur 2% entsteht. Diese Beobachtung bedeutet, dass die Erwärmung der Treiberschaltung bei einer Degradation der Spacer im Power Cycling Test vermutlich nicht eindeutig über die gemessene Halbleitertemperatur detektiert werden kann. Die Schädigung der passiven Komponenten kann also bereits vor den aktiven Komponenten auftreten und sollte im Lebensdauertest zusätzlich separat überwacht werden. Zur quantitativen Bestimmung der Alterung der Sinterschicht wurde die inelastische Dehnungsenergie-dichte  $W_{in}$  gemäß

$$W_{in} = \frac{1}{V} \int_V \int_t (\sigma : \epsilon^p + \sigma : \epsilon^{cr}) dt dV$$

und daraus das zum zehnten Lastzyklus stabilisierte Inkrement je Lastzyklus  $\Delta W_{in\_cycle\ i}$  folgendermaßen berechnet:

$$\Delta W_{in\_cycle\ i} = W_{in\_cycle\ i}^{end} - W_{in\_cycle\ i-1}^{end}$$

Das Feld des so berechneten Inkrements ist zum letzten Zeitpunkt der Simulation für die unteren Sinterschichten und einen Temperaturhub von 80 K in Abbildung 2-45 dargestellt.

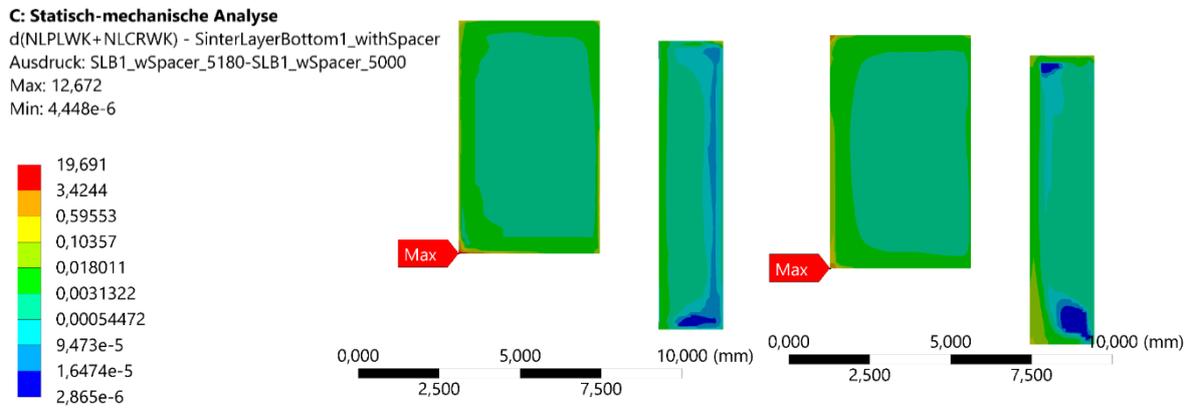


Abbildung 2-45: Feld des Inkrements der inelastischen Dehnungsenergiedichte je Zyklus zum zehnten Lastwechsel über den unteren Sinteranbindungsflächen der Leistungshalbleiter und Spacer.

Gut zu erkennen ist die überwiegend rechteckige und symmetrische Form der Konturen des Feldes unter den Halbleitern, was die Annahme der Delaminationsform aus Abbildung 2-40 rechtfertigt. Zusätzlich kann auch eine nicht vernachlässigbare Beanspruchung der Spacer-Anbindungsschicht beobachtet werden, was die vorherigen Untersuchungen ebenso bestätigt. Die Entwicklung der maximalen inelastischen Dehnungsenergiedichte ist für die obere und untere Sinterschicht in Abbildung 2-46 abgebildet.

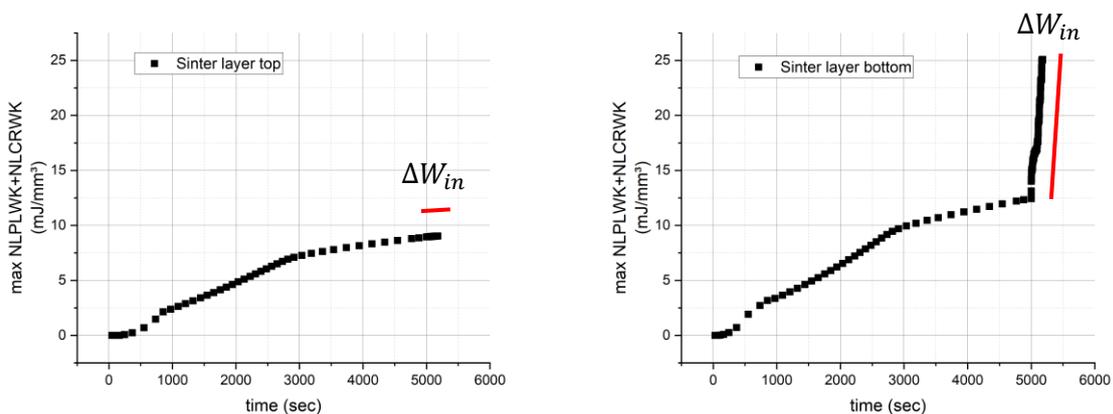


Abbildung 2-46: Entwicklung der maximalen inelastischen Dehnungsenergiedichte in der oberen (links) und der unteren (rechts) Sinterschicht für einen Temperaturhub von 80 K.

Gut zu erkennen ist der Unterschied zwischen der ungleichmäßigen Entwicklung während der Abkühlung nach dem Sinterprozess und der in der Gesamtdarstellung stabil erscheinenden Entwicklung während der Lastzyklen. Ebenso deutlich ist die erheblich höhere Beanspruchung

der unteren Sintersicht, was den Fokus der gewählten Auswertestrategie bestätigt. Um eine lineare Extrapolation der Entwicklung der Schädigungsgröße zu rechtfertigen, muss die Linearität, also die stabile Entwicklung je Lastwechsel, zunächst bewiesen werden. Dazu wurde die relative Änderung der Schädigungsgröße bezogen auf den zehnten Lastwechsel für die beiden Sinterschichten für einen Temperaturhub von 20 K in Abbildung 2-47 dargestellt.

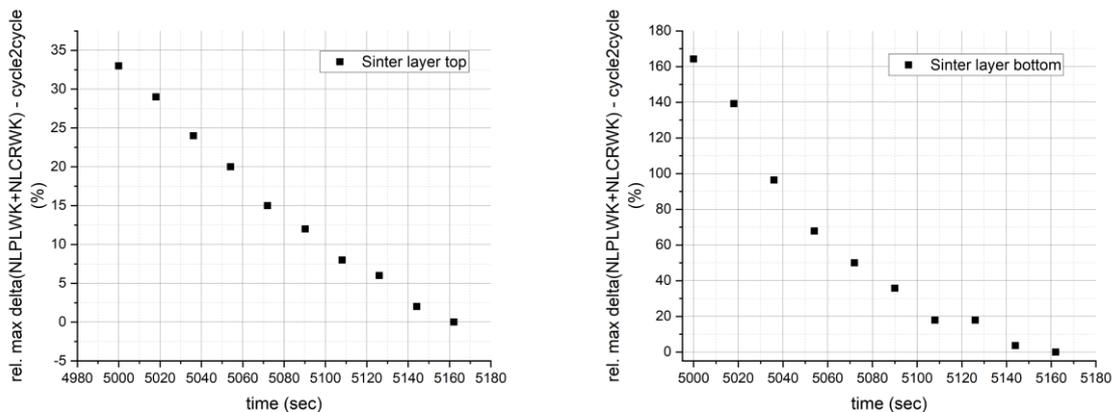


Abbildung 2-47: Relative Änderung der Schädigungsgröße bezogen auf den zehnten Lastwechsel für die obere (links) und die untere (rechts) Sinterschicht für einen Temperaturhub von 20 K.

In beiden Kurven wurde zum zehnten Lastwechsel eine Veränderung von weniger als 5 % festgestellt, was die Annahme der linearen Entwicklung je Lastwechsel ab hier rechtfertigt. Der niedrige Temperaturhub von 20 K erzeugt die geringste Beanspruchung im Material. Ist die Entwicklung für dieses Beanspruchungsszenario stabil, kann das Verhalten für höhere Beanspruchungen ebenfalls als stabil angesehen werden. Dies wurde im Projekt explizit bestätigt, aufgrund des Umfangs soll allerdings auf deren Darstellung hier verzichtet werden. Zur Beschreibung der Alterung der Sinterschichten wird das bekannte und übliche Modell zur niederzyklischen Ermüdung von Metallen nach Coffin-Manson in folgender Form verwendet

$$N_f = C(\Delta W_{in})^{m_c}$$

Dieses Modell wurde in aufwändigen Versuchen und Simulationen für gesintertes Silber bei einer Schichtdicke von 25 um und einer relativen Dichte von 91% in der Literatur<sup>18</sup> parametrisiert und statistische Verteilungen für die Parameter ermittelt, siehe Abbildung 2-48.

<sup>18</sup> Reliability of thermoelectric modules for automotive application, <https://www.mch.rwth-aachen.de/go/id/jexa/lidx/1/file/724120>, DOI: [10.18154/RWTH-2018-224567](https://doi.org/10.18154/RWTH-2018-224567)

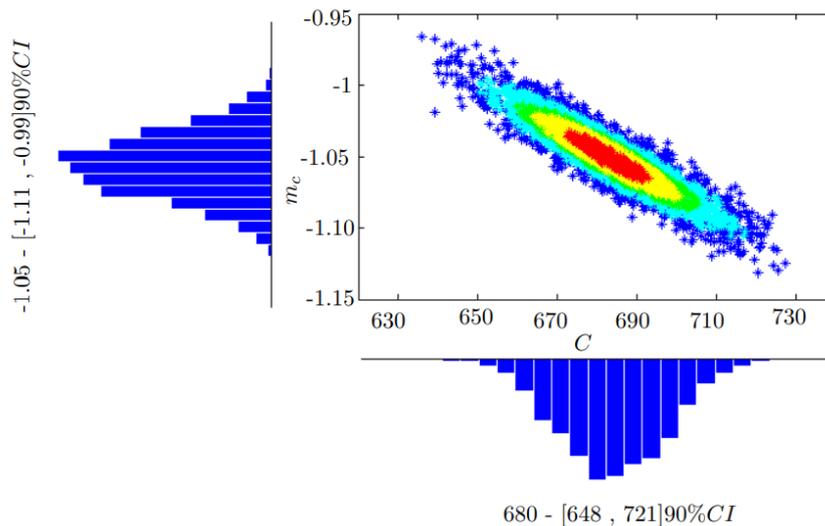


Abbildung 2-48: Erwartungsbereich der Modellparameter für Gleichung 3 für gesintertes Silber aus der Literatur<sup>18</sup>. Die Parameter wurden für alle Berechnungen zur Lebensdauer im Projekt SiCool angewendet.

Da das Material vergleichbar mit dem Sintermaterial im SiCool-Projekt ist, wurden die Parameter zur Demonstration der hier entwickelten Methode herangezogen. Ein Vorteil der Verteilungsfunktionen der Parameter ist, dass ein Erwartungsbereich für die Lebensdauer der Sinterschichten unter Berücksichtigung der Streuung der Materialeigenschaften angegeben werden kann. Dies setzt die Annahme voraus, dass die in SiCool erzeugten Streuungen vergleichbar zu den in der Literaturstelle ermittelten Streuungen sind. Weiterhin anzumerken ist, dass die Streuung der Parameter nur die Variation der Materialeigenschaften aufgrund von Variationen im Herstellungsprozess berücksichtigen und nicht die unterschiedlichen Beanspruchungen durch Variationen in der Geometrie durch die Toleranzkette, was zu weiteren Abweichungen gegenüber dem Experiment führen kann.

Um eine gekoppelte Lebensdauerbeschreibung  $N_f(\Delta R_{th}(\dots), \Delta w_p(\dots))$  zu ermöglichen, muss zusätzlich zur bereits dargestellten Abhängigkeit  $\Delta R_{th}(\Delta A)$  noch die Abhängigkeit  $\Delta w_p(\Delta A)$  berechnet werden. Dazu wurden die inelastischen Dehnungsenergiegedichte-Inkrement  $\Delta w_p$  durch Mittelung über die delaminierte Fläche  $\Delta A$  zu den jeweiligen Evaluationspunkten für den thermischen Widerstand ermittelt. Der Mittelwert der betrachteten Fläche entspricht dann der erwarteten Lebensdauer für die vollständige Delamination der betrachteten Fläche. Die Ergebnisse für einen Temperaturhub von 80 K aus den verschiedenen Mittelungen, welche dann unterschiedlichen thermischen Widerständen entsprechen, sind in Abbildung 2-49 dargestellt.

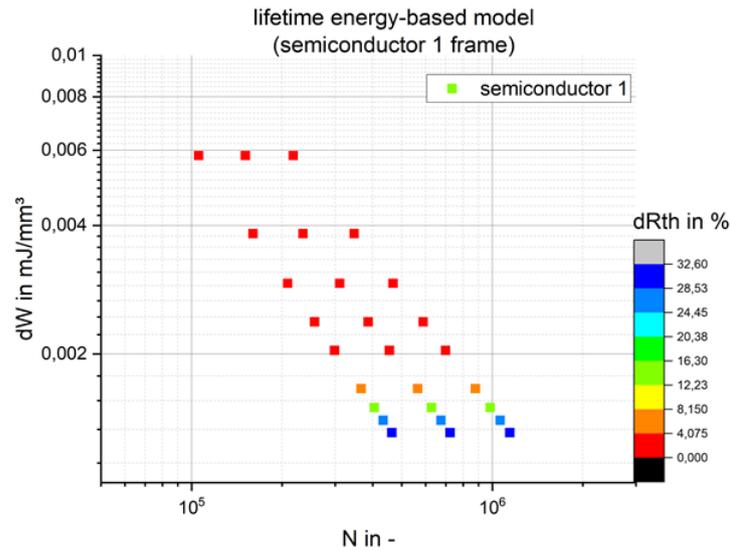


Abbildung 2-49: Berechnete Lebensdauer für einen Temperaturhub von 80 K im Halbleiter 1 für verschiedene thermische Widerstände. Linke Kurve: Parametersatz für minimale Lebensdauer. Rechte Kurve: maximale erwartete Lebensdauer. Mittlere Kurve: Erwartungswert der Lebensdauer (63%).

Die Ergebnisse aus der vorherigen Graphik können mit den vorliegenden Daten auch in Form der im Power Cycling Test üblichen Darstellung der Änderung des thermischen Widerstands dargestellt werden, siehe Abbildung 2-50 (links), und erlauben damit dann erstmals einen direkten Vergleich zu Messkurven aus dem Experiment. Da im Projekt verschiedene Temperaturhübe berechnet wurden, ist ebenfalls die im PCT gebräuchliche Darstellung der Lebensdauer über den Temperaturhub für ein vorher definiertes Ausfallkriterium, hier eine thermische Widerstandsänderung von ca. 15%, möglich, um daraus empirische Lebensdauermodelle, vgl. CIPS08, ableiten zu können.

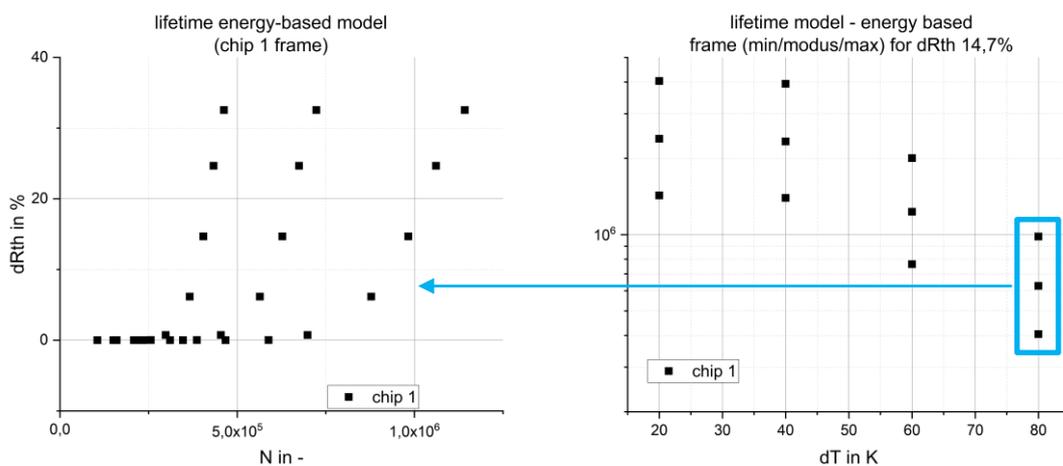


Abbildung 2-50: Alternative Ergebnisdarstellung des kombinierten simulativen Ansatzes zur Lebensdauerbeschreibung des Demonstrators im Power Cycling Test. Links: Berechnete Änderung des thermischen Widerstands

über die Lastzyklen zum Vergleich mit experimentellen Kurven. Rechts: Berechnete Lebensdauer bei einer Änderung des thermischen Widerstands um 15 % in Abhängigkeit vom Temperaturhub. Die Abweichung bei  $dT = 20$  K von der Erwartung wird auf eine unzureichende Parametrisierung des Materialmodells bei geringen Temperaturen zurückgeführt.

Auffällig ist in Abbildung 2-50 (rechts) jedoch, dass die Lebensdauer bei einem Temperaturhub von 20 K nicht den physikalischen Erwartungen entspricht. Entgegen einer gleichbleibenden Lebensdauer sollte ein erheblicher Anstieg der Lebensdauer bei sehr geringen Temperaturhuben eintreten. Die Beobachtung wird auf eine unzureichende Genauigkeit der Parametrisierung des Materialmodells für die Viskoplastizität der Sinterschichten bei niedrigen Temperaturen zurückgeführt.

Diese Art der Auswertung und der Simulationsstrategie ist neu, bisher nicht publiziert und stellt damit einen erheblichen Fortschritt im Bereich des digitalen Zwillings für beschleunigte Lebensdaueruntersuchungen an Leistungselektronik dar. Mit den Ergebnissen kann nun auch eine teilweise Parametrisierung des Systemmodells unter Zuhilfenahme von Schätzwerten für die weiteren Bauteile erfolgen.

Zur Lebensdauerabschätzung wird ein Beanspruchungsszenario konstruiert, in welchem beide Halbleiter jeweils einen Lastzyklus von 55, 48, 33 und 20 K in Folge durchlaufen. Die Dauer eines Zyklus, sowie die Kühlmitteltemperatur und die weiteren Randbedingungen sollen den Annahmen der Simulation der PCTs entsprechen.

Der Wert von  $t_{\text{wear}}$  wird durch Ablesen des Schnittpunktes der Tangenten an den Graphen in Abbildung 2-51 (links) bestimmt. Der Graph zeigt die berechneten plastischen Dehnungsenergieamplituden in Abhängigkeit von der Lebensdauererwartung in Zyklen zu 63% Wahrscheinlichkeit und einem Ausfallkriterium von +15%Rth. Dabei wurden die Ergebnisse für beide Halbleiter kombiniert. Für kleine plastische Dehnungsenergieamplituden rechts des Schnittpunktes wird ein vernachlässigbarer Anteil zur niederzyklischen Ermüdungsschädigung erwartet. Der Wert für  $t_{\text{wear}}$  wird mit  $1,13e6$  Zyklen oder 5630 h bestimmt.

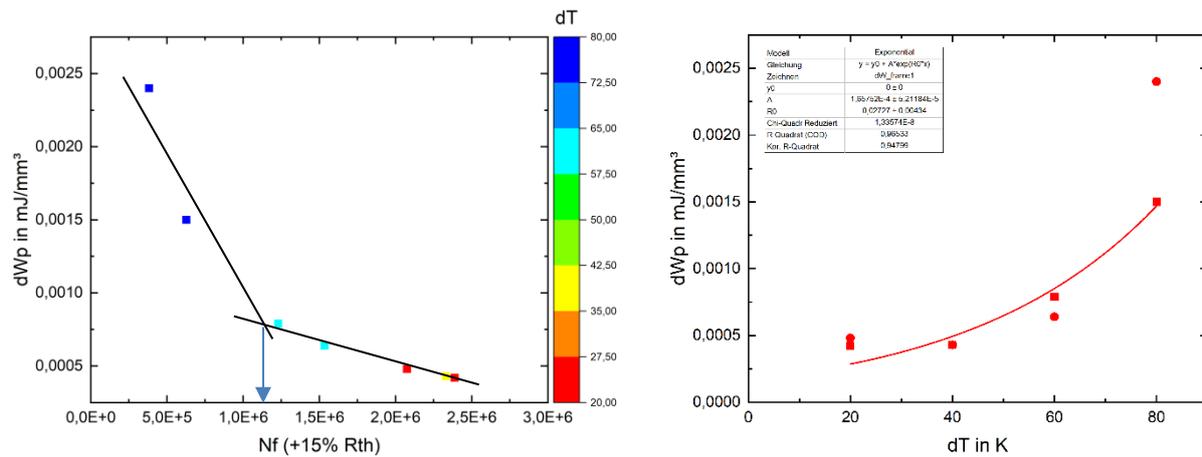


Abbildung 2-51: Berechnete plastische Dehnungsamplitude in Abhängigkeit von der Lebensdauererwartung in Zyklen bei 63% Ausfallwahrscheinlichkeit und einem Ausfallkriterium von +15%Rth für beide Halbleiter (links). Berechneter Zusammenhang zwischen plastischer Dehnungsamplitude und angelegtem Temperaturhub für beide Halbleiter und Fit für einen Halbleiter (rechts).

Basierend auf dem Zusammenhang zwischen der plastischen Dehnungsenergieamplitude und dem angelegten Temperaturhub, siehe Abbildung 2-51 (rechts), können für das oben genannte Lastszenario die jeweiligen plastischen Dehnungsenergieamplituden berechnet werden. Über den bereits gezeigten Zusammenhang aus der Literatur zwischen plastischer Dehnungsenergieamplitude und Lebensdauer kann nun die Dauer in Zyklen bis 63% Ausfallwahrscheinlichkeit für jeden Temperaturhub berechnet werden. Der Schadensanteil  $D_i$  für jeden Temperaturhub ergibt sich dann nach:

$$D_i = 1/N_f$$

Die je Temperaturhub berechneten Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 2-10: Ergebnisse der Schadensanteilsberechnung je Temperaturhub.

$\Delta T$	$\Delta W_p$	$N_f$	$D_i$
55	7,43E-04	1,31E+06	7,61848E-07
48	6,14E-04	1,60E+06	6,23477E-07
33	4,08E-04	2,46E+06	4,05779E-07
20	2,86E-04	3,58E+06	2,7966E-07

Durch Summation der einzelnen Schädigungsfractionen  $D_i$  mithilfe der Palmgren-Miner Regel zur linearen Schadensakkumulation wird der Gesamtschaden für das komplette Beanspruchungsszenario erhalten. Die Inversion davon, also die Extrapolation zu 100%, liefert die Anzahl der Wiederholungen des Gesamtbeanspruchungsszenarios bis 63% Ausfallwahrscheinlichkeit und ergibt sich hier zu 482913 Wiederholungen. Dies entspricht bei einer Zyklendauer von 18s

einer Lebensdauer von 9658 h und stellt das Ergebnis für  $\alpha$  für die Sinterschicht dar. Konsistent muss nun für die weiteren Komponenten im Aufbau vorgegangen werden. Zur Demonstration der Methode sollen hier die weiteren Parameter geschätzt werden. Eine Liste der Systemkomponenten im Demonstrator in vereinfachter Weise und ihre geschätzten Werte für  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $t_{\text{wear}}$  und FIT sind in Tabelle 2-11 zusammengefasst.

Tabelle 2-11: Liste der Komponenten und der berechneten und geschätzten Parameterwerte.

Komponententyp	Komponentenname	Status	$\alpha$ in 1/h	$\beta$	$t_{\text{wear}}$ in h	FIT in 1/h
Resistor	R1, R2	P	15000	1	0	1e-9
	R3	S	15000	1	0	1e-9
ICs	IC1, IC2	S	13000	2	10000	3e-9
SiC Halbleiter	MOSFET 1	S	15000	3	8000	3,7e-9
	MOSFET 2	S	15000	3	8000	3,7e-9
Kondensator	C_DC, C_SNUBBER	S	12000	3	7000	1,5e-9
	C1-C2	P	12000	3	7000	1,5e-9
Verbindungsschichten	Systemlot	S	10000	4	6500	5e-10
	Sintered Silver	S	9658	5	5630	5e-10
AMB Substrat	AMB Si3N4	S	15000	2	13100	1e-10
Logik Board	HTCC	S	17000	2	8000	1e-10
Kühlkörper	Cu-Kühlkörper	S	20000	1	0	1e-11

Da die Ergebnisdarstellung der Ausfallrate in Ausfälle/h zwar die Form der Badewannenkurve wiedergibt aber die Interpretation des Ergebnisses in anderen Darstellungsformen zugänglicher ist, wurden die Ausfallraten über folgende Beziehung in die Systemzuverlässigkeit (Survival function) umgerechnet:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$

Die Funktion gibt die Wahrscheinlichkeit an, bis zu einem Zeitpunkt t keinen Ausfall zu erhalten und ist somit wesentlich zugänglicher für eine Interpretation.

Die Daten aus der vorherigen Tabelle wurden in den Python-Code eingegeben und die Ausfallrate- und Zuverlässigkeitsfunktion bis zu einer Betriebsdauer von 8000 h berechnet, was einer üblichen Beanspruchung im Automotive-Bereich entspricht. Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Abbildung 2-52 wiedergegeben.

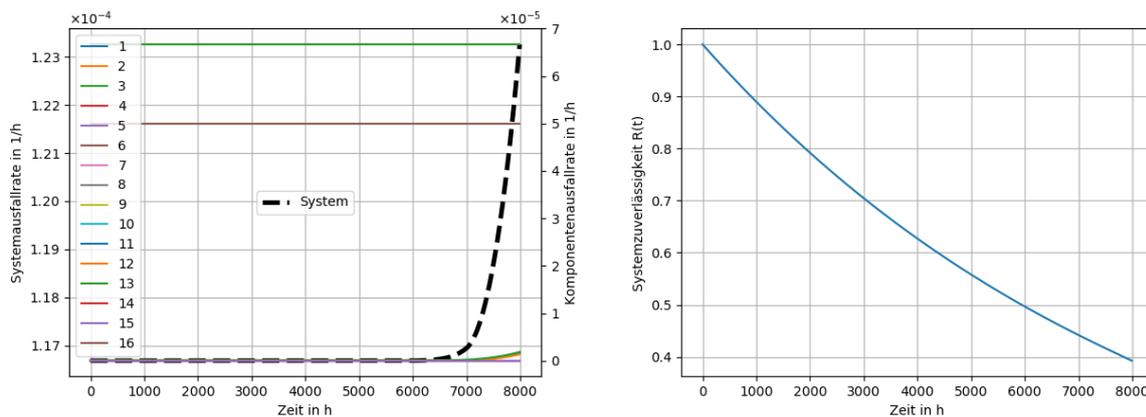


Abbildung 2-52: Ergebnisse der Simulation eines Testszenarios mit dem entwickelten Zuverlässigkeitsmodell für den vereinfachten SiCool-Demonstrator. Links: Komponenten- und Systemausfallrate. Rechts: Systemzuverlässigkeit als Überlebenswahrscheinlichkeit über die Betriebszeit.

Als Ergebnis stellt sich für das virtuelle Szenario mit dem vereinfachten SiCool-Demonstrator eine Systemausfallrate von  $\sim 1,23 \times 10^{-4}$  Teilen/h nach 8000 Betriebsstunden ein. Es ist weiterhin ersichtlich, dass die Komponentenzuverlässigkeitskurven sowohl Teile mit konstanter Ausfallwahrscheinlichkeit als auch mit Verschleißphase enthalten. Die Darstellung der Systemzuverlässigkeit zeigt eine Wahrscheinlichkeit von 40% für einen vollständigen Ausfall nach 8000 Betriebsstunden. Die berechneten Ergebnisse bewegen sich damit in einem Bereich, der durchaus der Erwartungen entspricht, jedoch muss auch auf die stark vereinfachte Abbildung der Systemkomponenten und auf die Schätzwerte für deren Parameter verwiesen werden, sodass an dieser Stelle die Funktionsfähigkeit der Methodik erfolgreich aufgezeigt werden konnte, die präzise Parametrisierung des Modells jedoch einen nicht unerheblichen, aber notwendigen Aufwand für den Einsatz des Modells in der Industrie darstellt.

## 2.4 AP5 Test und Verifikation anhand von vereinfachten Modellstrukturen

### Fraunhofer IISB

Wie bereits im vorherigen Abschnitt beschrieben wurde, sind die Aufgaben des IISB im AP 5 zugunsten der Finite-Elemente-Analyse und der Lebensdauermethodik in AP 4 verschoben und wurden dort vorgestellt.

## 2.4.1 AP 5.1 Elektrische und thermische Charakterisierung

Fraunhofer IFAM

### 2.4.1.1 AP 5.1.1 Herstellung, Aufbau und Inbetriebnahme der Modellstrukturen

Seitens Fraunhofer IFAM wurden die zur Einrichtung und Befähigung der Prüfstände benötigten partitionierten Substrate in Abstimmung mit den Projektpartner hergestellt und für den weiteren Aufbau an die Projektpartner übergeben. Speziell wurden Cu-C-Pads nach festgelegter Spezifikation dargestellt sowie thermisch vermessen. Damit wurden dann innerhalb des Konsortiums die Modellstrukturen 1 bis 3 aufgebaut und in die jeweiligen Tests überführt, siehe Abbildung 2-53.



Abbildung 2-53: Auszug aus den im Projekt benötigten Modellstrukturen bis hin zum Demonstrator 1.

### 2.4.1.2 AP 5.1.2 Vermessung und Charakterisierung der Modellstrukturen

Seitens Fraunhofer IFAM wurden die aufgebauten Modellstrukturen hinsichtlich ihrer thermischen Eigenschaften, speziell der Wärmeleitfähigkeit, vermessen. Dabei wurden zum einen Aufbauten aus reinen Materialien (Kupfer, Kupfer gedruckt, Cu-C-Pad) sowie gelötete Strukturen (Kupfer/Lot/Cu-C-Pad) thermisch vermessen. Es konnte festgestellt werden, dass die verwendete Lotschicht eine Wärmeleitfähigkeit im Bereich von 17 bis 37 W/(m\*K) aufweisen. Die reinen Cu-C-Pads weisen in Dickenrichtung eine Wärmeleitfähigkeit von 500 W/(m\*K) bis

650 W/(m\*K) auf. Mit Hilfe von Wasserstrahlschneiden konnte auch ein Weg aufgezeigt werden, der es ermöglicht Proben aus dem Gesamtaufbau der Modellstrukturen zu präparieren. Beispielhaft sei in Abbildung 2-54 des komplexen Aufbaus eines PCT-Musters gezeigt. An solch einem Schnitt konnten im Projekt wesentliche Ergebnisse mit Blick auf potenzielle Fehlerquellen bei den einzelnen Fertigungsschritten abgeleitet werden. Ebenso konnten mittels Rasterelektronenmikroskopie Erkenntnisse zu auftretenden Diffusionsprozessen und Phasenbildungen gewonnen werden.

#### Aufbau PCT Muster

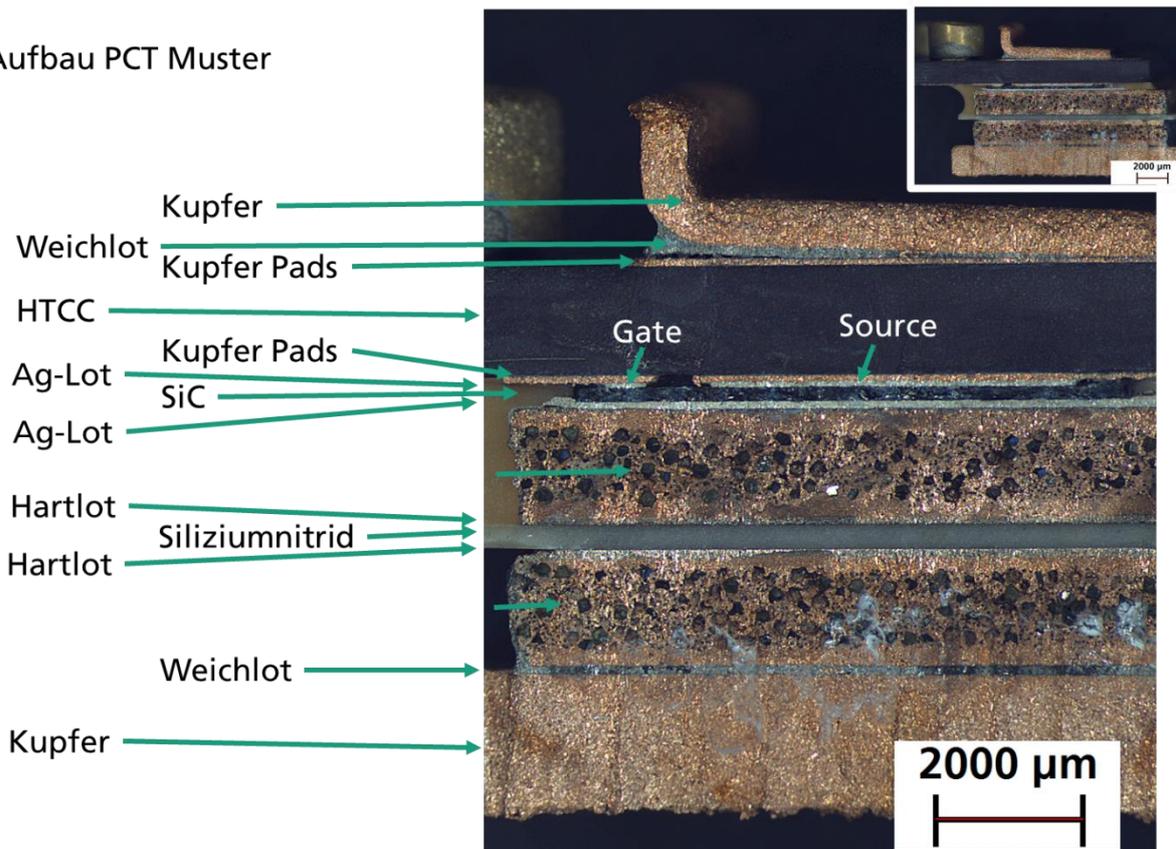


Abbildung 2-54: Wasserstrahlschnitt durch den komplexen Aufbau eines PCT-Musters mit Erklärung der einzelnen Lagen.

#### 2.4.2 AP5.2 Optimierung der Modellstrukturen und -Konzepte

Im Zuge der Bereitstellung von CuC Pads wurden seitens Fraunhofer IFAM unterschiedliche Lagendicken des Kupfer/Diamant-Verbundwerkstoffes sowie der Kupferkaschierungen umgesetzt (Abbildung 2-55). Die Auswirkungen auf folgende Prozessschritte kann dadurch untersucht werden.

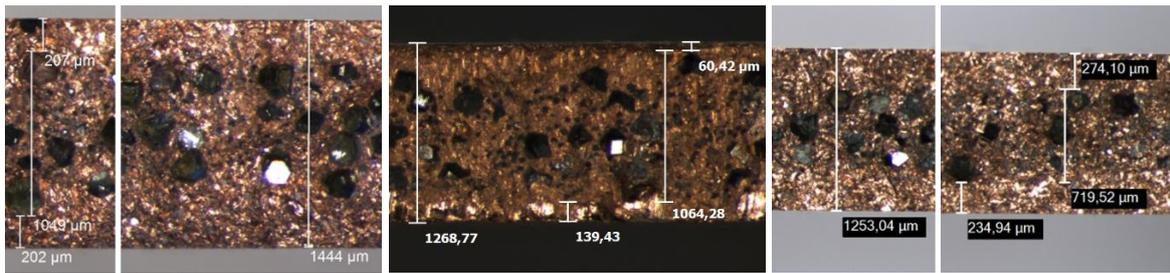


Abbildung 2-55: Variation der Lagendicken des CuC-Pads hinsichtlich Dicken des Kupfer/Diamant-Kerns und der Kupferkaschierung.

### 2.4.3 AP5.3: Optimierung der Modellstrukturen und –konzepte

Ein additiv herstellbares CAD-Design des in Arbeitspaket 2 entwickelten Kühlkörpers wurde im STL-Format an den Partner Bosch geliefert. Dieses CAD-Design wurde erfolgreich durch die Binder-Jetting-Technologie bei Bosch hergestellt.

Aus dem in Arbeitspaket 2 für die Entwicklung des Kühlkörpers entwickelten Simulations- und Optimierungsworkflow können theoretisch sowohl CAD-Daten als auch Wärmefelder für zukünftige Simulationen exportiert werden. Für das Mapping der Wärmefelder sollte jedoch sichergestellt werden, dass die in der anfänglichen Strömungssimulation verwendete Geometrie mit der in den nachfolgenden Analysen verwendeten identisch ist.

Aufgrund der Vereinfachungen im ursprünglichen CFD-Modell, welches für die Kühlkörperoptimierung verwendet wurde, besteht jedoch keine Möglichkeit, die resultierenden Wärmefelder auf die realistischere Geometrie des FE-Modells abzubilden, das für die Lebensdauerbewertung in Arbeitspaket 2 und 6 verwendet wird.

## 2.1 AP 6: Demonstrator

### Fraunhofer IISB

Wie im Abschnitt 2.3 beschrieben wurde, sind die Aufgaben des IISB im AP 6 zugunsten einer konsistenten Ergebnisdarstellung bereits AP 4 vorgestellt worden.

### Fraunhofer IFAM

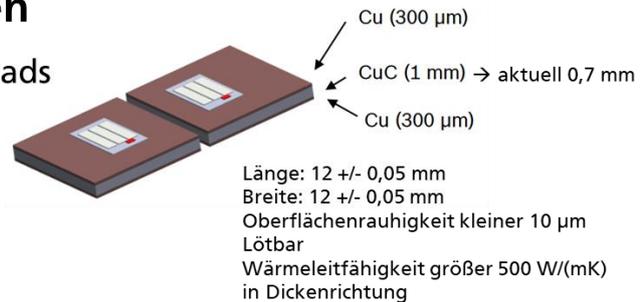
#### 2.1.1 AP 6.1: Proof of Concept (Demonstratorgeneration 1)

Für den Aufbau der Demonstratorgeneration 1 wurden seitens Fh IFAM Dresden die benötigten Cu-C-Pads bereitgestellt. Basis dafür bildet der erarbeitete Aufbau aus einer zentralen Lage aus Kupfer/Diamant Verbundwerkstoff, der beidseitig durch eine Kupferkaschierung

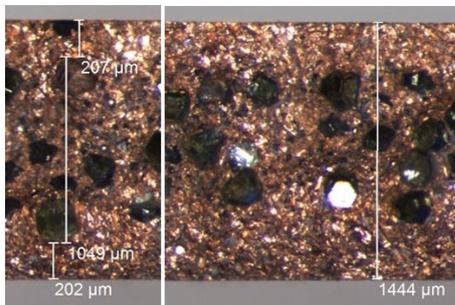
beschichtet ist. Dieser Dreilagenvorbund erfüllt die Anforderungen an thermische Leitfähigkeit sowie Verarbeitbarkeit, siehe Abbildung 2-56.

## Teilvorhaben IFAM Dresden

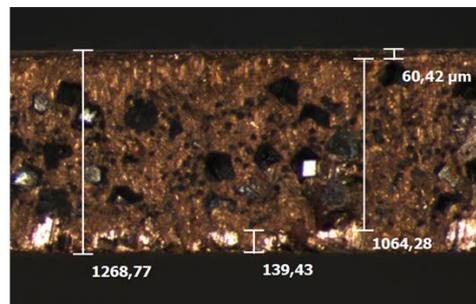
Aufgabe: Bereitstellung von Cu-C Pads



Cu-C Pads Gen 1



Cu-C Pads Gen 2



bisher im Projekt bereitgestellt: > 120 Cu-C Pads nach Spezifikation

Abbildung 2-56: Zusammenfassung der Teilaufgabe Bereitstellung von Cu-C-Pads mit Anforderungen sowie stereomikroskopischer Bilder der Cu-C-Pad Generationen 1 und 2.

Um eine seriennahe Fertigung der Cu-C-Pads zu ermöglichen, wurde intensiv an der zu verwendenden Prozesskette gearbeitet. Zielführend ist dabei die Fertigung des Werkstoffverbundes nach einem Waferansatz zu verfolgen, um möglichst viele Cu-C-Pads aus einer Sinterung zu erhalten. Nach mehreren Überarbeitungsschritten weist aktuell die in Abbildung 2-57 dargestellte Prozesskette das höchste Potential zur seriennahen Fertigung auf. Aktuell werden bis zu ca. 20 Cu-C-Pads aus einer Scheibe mit einem Durchmesser von 80mm erstellt. Dabei wird ausgehend von der Pulvermischung in der Sinterung eine Scheibe im Dreilagenaufbau realisiert. Diese wird anschließend durch Spannungsarmglühen und einer zweiten Kurzzeitwärmebehandlung in Dicke, thermischen Eigenschaften und Spannungszustand eingestellt. Folgend kann mittels Wasserstrahlschneiden die geforderte Cu-C-Pad Geometrie herausgetrennt werden. Mit einer Vermessung der Temperaturleitfähigkeit jedes Einzel-Pads steht der Weg für eine Qualitätskontrolle offen. Die Oberflächen werden anschließend auf die geforderte Oberflächenrauigkeit eingestellt. Die so präparierten Cu-C-Pads stehen dann der weiteren Verarbeitung zur Verfügung.

Es ist ersichtlich, wenn der Scheibendurchmesser bei Sinterung vergrößert werden kann, so ist eine Erhöhung der erreichbaren Stückzahl an Cu-C-Pads sofort ersichtlich. Kann im nächsten Schritt dann noch eine Mehrfachpressung der Ausgangsscheiben erfolgen, so treten die Sinterkosten pro Einzel-Cu-C-Pad immer mehr in den Hintergrund. Ebenfalls wird erwartet, dass das erarbeitete Vorgehen auch auf andere Werkstoffe für das thermische Management übertragen werden kann. Während der Projektlaufzeit konnten Drei-Lagen-Scheiben mit einem Durchmesser von 200 mm dargestellt werden.

## Prozesskette Präparation Cu-C-Pads Gen 2



Abbildung 2-57: Erarbeitete Prozesskette zur seriennahen Fertigung von Cu-C-Pads der Generation 2.

### 2.1.2 AP 6.2: Entwicklung und Aufbau Demonstratorgeneration 2

Aufbauend auf der erarbeiteten Prozesskette zur Präparation von Cu-C-Pads wurden insgesamt schon über 400 Stück Cu-C-Pads (Eigenschaften innerhalb der projektinternen Spezifikation) an Projektpartner zur weiteren Verarbeitung versendet.

Ebenso wurden getestete PCT-Muster mittels Wasserstrahlschneiden für die Charakterisierung mittels licht- und rasterelektronenmikroskopischer Methoden zugänglich (Abbildung 2-58).

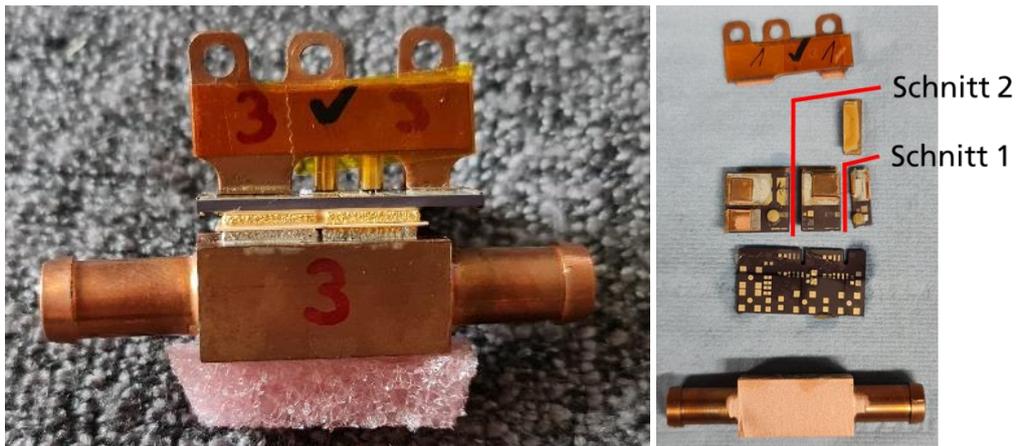


Abbildung 2-58: PCT-Muster links: vor und rechts: nach dem Wasserstrahlschneiden.

Speziell konnten anhand der Querschnittsfläche Aussagen zu Anbindungen zwischen den einzelnen Lagen sowie des SiC Chip getroffen werden. Diese Aussagen wurden dann mit den Beobachtungen und Messergebnissen der Projektpartner im Projektkonsortium bewertet. Auf diesem Wege konnten wichtige Rückschlüsse für die weiteren Aufbauten an Demonstratoren getroffen werden. Beispielhaft sei in Abbildung 2-59 die Detektion von Anbindungsfehlern am Gate-Kontakt gezeigt.

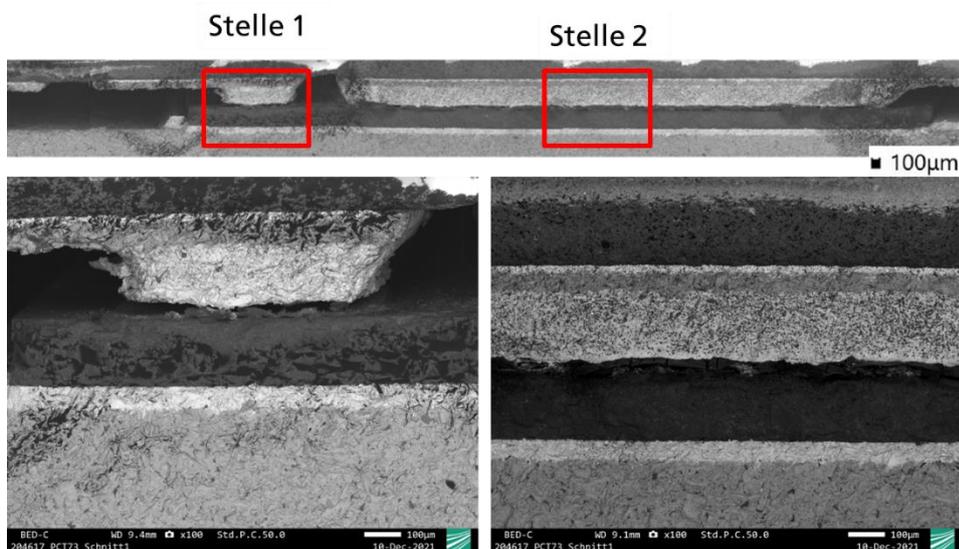


Abbildung 2-59: Elektronenmikroskopische Untersuchung der Anbindung von Gate- und Sourcekontakt des SiC Chips am HTCC Substrat; Lokalisierung eines Anbindungsfehlers am Gatekontakt.

Begleitend wurden von verschiedenen Substraten die Wärmeleitfähigkeit (Abbildung 2-60) und der thermische Ausdehnungskoeffizient (Abbildung 2-61). Speziell beim thermischen Ausdehnungsverhalten zeigt sich deutlich der Vorteil der Verwendung eines Kupfer/Diamant-Kerns mit angepasstem thermischen Ausdehnungsverhaltens.

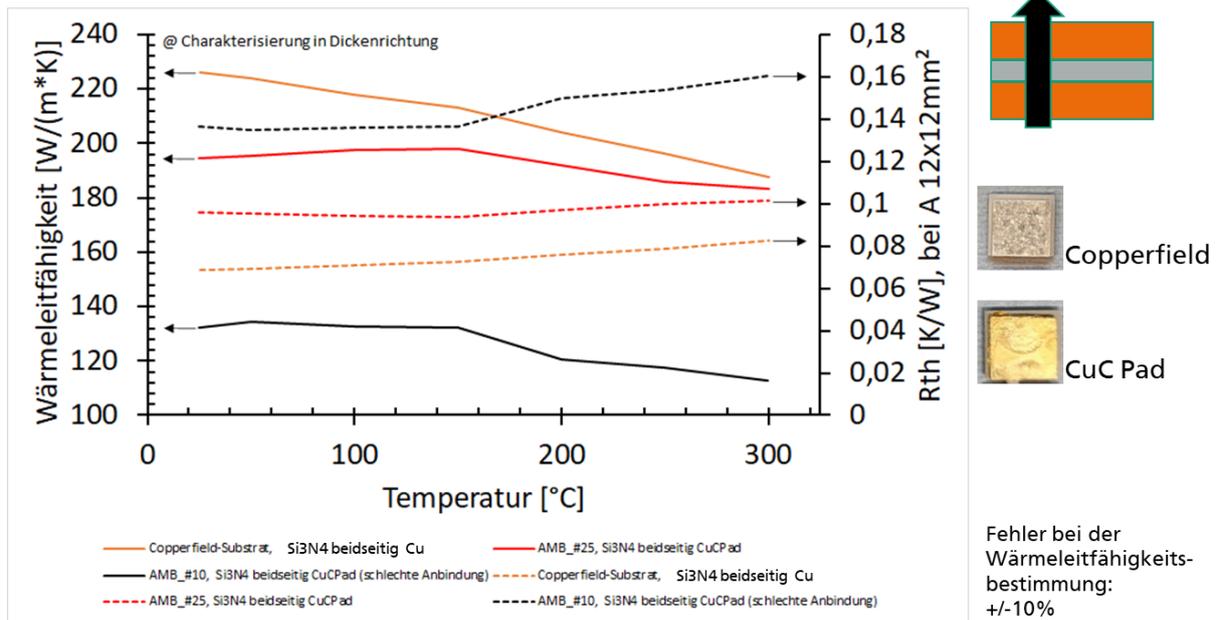


Abbildung 2-60: Charakterisierung der Wärmeleitfähigkeit an Substraten in Dickenrichtung nach allen erforderlichen Lötprozessen.

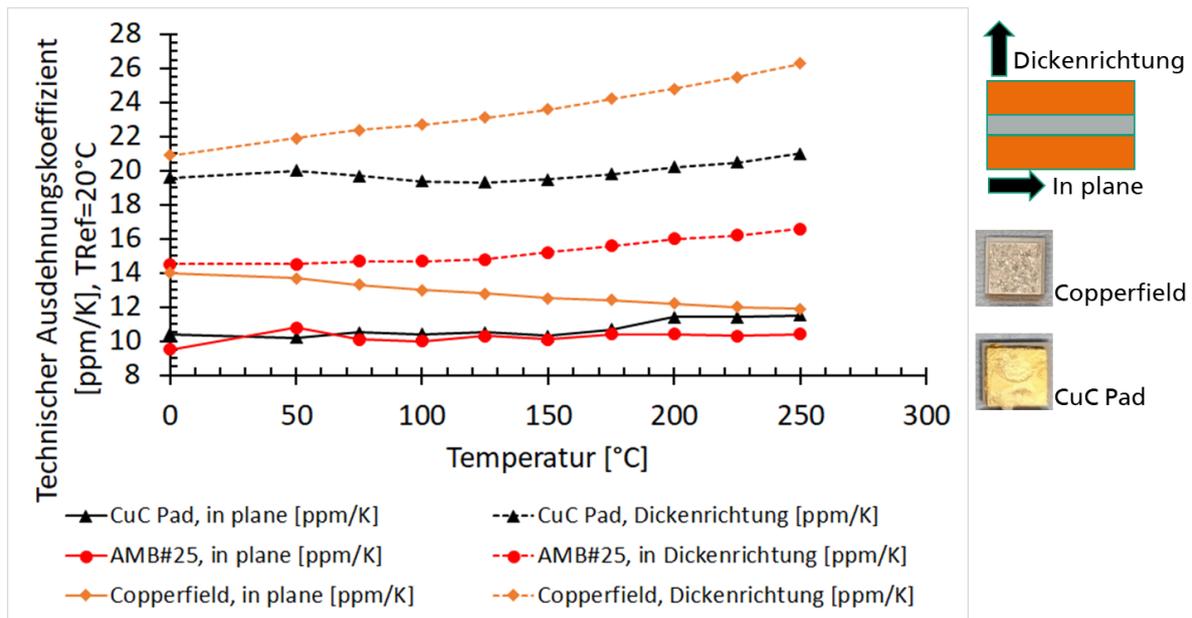


Abbildung 2-61: Charakterisierung des Thermischen Ausdehnungsverhaltens an Substraten in Dickenrichtung und in-plane Richtung.

### 3 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der zahlenmäßige Nachweis wurde separat übermittelt.

## **4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Trotz guter Erfolgsaussichten bestand ein nicht unbeträchtliches Risiko, inwieweit die für eine erfolgreiche Vermarktung – als Voraussetzung für die Refinanzierung der FuE-Aufwendungen – nötigen Kosten- und Effizienzziele sowie der Ziele in Bezug auf die Volumenreduzierung der entwickelten Systemkomponenten auch wirklich erreicht werden können. Durch die beantragte Zuwendung sollte das finanzielle Risiko der am Gesamtvorhaben beteiligten Unternehmen so weit reduziert werden, dass es für diese wirtschaftlich vertretbar war, die geplanten Arbeiten durchzuführen und das verbleibende Risiko zu tragen.

Weiterhin lag ein nicht unbeträchtliches wirtschaftliches Risiko in der Unsicherheit bzgl. der Marktentwicklung der Elektromobilität; in der jüngeren Vergangenheit wurden die entsprechenden Wachstumserwartungen nicht erreicht.

Des Weiteren war die Notwendigkeit der Förderung auch vor dem Hintergrund des großen öffentlichen Interesses an den Ergebnissen des Vorhabens zu sehen. Das Thema hoch-effiziente langlebige und leichte Elektronik für die Elektromobilität wurde durch den Rahmen dieses Förderprojektes verbindlicher und schneller vorangetrieben. Das Projekt leistete sowohl einen Beitrag zur Sicherung des Wirtschafts- und Produktionsstandortes Deutschland als auch für die Verbreitung von Elektrofahrzeugen. Insgesamt war die beantragte Zuwendung für die Projektdurchführung notwendig und im öffentlichen Interesse.

## **5 Verwertbarkeit des Ergebnisses**

Das Fraunhofer IISB konnte die Ergebnisse des Forschungsprojekts nutzen, um seine Kompetenz im Bereich „Packaging, Test und Lebensdauermodellierung“ weiter auszubauen. Die erarbeiteten Ergebnisse und Erkenntnisse eröffnen dem Institut weitere Möglichkeiten als innovativer Partner der Industrie für Leistungselektronik. Mit der neuentwickelten Optimierungsstrategie Systemzuverlässigkeitsbetrachtung erschließt sich dem Institut ein neues Kompetenzfeld. Neben der in diesem Forschungsvorhaben adressierten automobilen Anwendung sieht das IISB eine geeignete Verwendung in anderen Feldern.

Das IISB wird Lebensdauerberechnungen im Zusammenspiel mit dem simulationsgestützten thermischen Management, mit Hilfe des neuen Zuverlässigkeitsmodells, Kunden aus der Industrie als Dienstleistung, begleitend zum Entwicklungsprozess, anbieten. Zusätzlich werden Lebensdauertests und Ausfallanalysen als Validierung angeboten.

Das Fraunhofer IFAM konnte die Ergebnisse des Forschungsprojektes nutzen, um seine Kompetenzen im Bereich Werkstoffe für das Thermische Management weiter ausbauen. Dazu zählen zum einen die Veröffentlichung der Ergebnisse in Poster, Vorträgen und Veröffentlichungen. Zum anderen konnten die erarbeiteten Ansätze in weiterführende Projektskizzen eingebracht werden. Speziell die direkte Weiterverarbeitung mit Hilfe von additiven Fertigungsverfahren birgt ein sehr großes Potenzial, um die Entwärmung von elektronischen Bauteilen weiter zu steigern.

## **6 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Auf den Fortschritt bei anderen Stellen für relevante Themen für dieses Teilprojekt wurde im Detail an den jeweiligen Stellen im Kapitel „Eingehende Darstellung der Ergebnisse“ ausführlich eingegangen, worauf hier verwiesen werden soll.

## **7 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen**

Im Rahmen des Projekts wurden mehrere Vorträge auf internationalen Konferenzen gehalten. Ein weiteres Manuskript ist derzeit in Bearbeitung, dessen Veröffentlichung auf einer Konferenz geplant ist. Nachfolgend sind die im Rahmen des Projektes erstellten Publikationen mit Beteiligung Fraunhofer IISB und IFAM dargestellt.

- T. Menrath, A. Roskopf, F. B. Simon, M. Groccia and S. Schuster, "Shape Optimization of a Pin Fin Heat Sink," 2020 36th Semiconductor Thermal Measurement, Modeling & Management Symposium (SEMI-THERM), 2020, pp. 10-16, doi: 10.23919/SEMI-THERM50369.2020.9142830.
- S. Schuster, A. Roskopf, V. Jung, M. Groccia and T. Menrath, "Genetic Optimization of Pin Fin Heat Sinks Using a Finite Difference Formulation," 2020 26th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC), 2020, pp. 97-101, doi: 10.1109/THERMINIC49743.2020.9420500.
- T. Menrath, "Strukturoptimierung von Pin-Fin-Kühlkörpern in der Leistungselektronik", 2019, 9. Cooling Days, Fachkongress für Elektronikkühlung und Wärme-Management, Würzburg.
- F.B. Simon, S.A. Letz, "A combined approach for determining the system reliability of power electronics devices" 2022, Manuscript in preparation.

- A. Sewergin, Martin Rittner, Andreas Burghardt, Kai Kriegel, Gerhard Mitic, Dr. Thomas Zetterer, Thomas Hutsch, Albert Neumann, Flaviu Simon, Rik W. De Donckera Highly Integrated Switching Cell Design based on Copper Diamond Heat Spreader, 3D Printed Heat Sink and HTCC Logic Board CIPS2020 Berlin, 24.03.2020
- M. Rittner, T. Hutsch, A. Sewergin Requirements on SiC-half-bridge assemblies - semiconductor, design, thermal management and materials - using the example of German public funded project BMBF-´SiCool´ 13th Expert Forum Electric Vehicle Drives online, 21-23.09.2021
- Thomas Hutsch, Martin Rittner, Thomas Zetterer, Thomas Weißgärber: Metal diamond composites – A way for industrial production and material integration into power module, WorldPM 2022, Oktober 2022, Lyon (accepted talk)

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Verbundprojekt „SiCool“ Hochintegrierte SiC-Leistungselektronik auf thermisch partitionierten Keramiksubstraten (SiCool)  Teilvorhaben der Fraunhofer Gesellschaft Lebensdauermethodik und Optimierung für die Logik und Leistungs-Integration (IISB) Thermisch partitionierte Substrate für hochintegrierte SiC-Leistungselektronik (IFAM)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Letz, Sebastian A. Hutsch, Thomas	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.08.2021
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  Fraunhofer-Institut für integrierte Systeme und Bauelementetechnologie Schottkystrasse 10, 91058 Erlangen  Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und angewandte Materialforschung Winterbergstraße 28, 01277 Dresden	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 16EMO0267
	11. Seitenzahl
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben
	14. Tabellen
	15. Abbildungen
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Projektträger VDIVDEIT am 30.06.2022	
18. Kurzfassung Das Verbundprojekt SiCool hatte die Entwicklung eines hocheffizienten logik-leistungsintegrierten SiC-Halbbrückenmoduls auf Basis eines thermisch partitionierten keramischen Schaltungsträgers und flexibel einsetzbaren Flüssigkeitskühler-Konzepten zum Ziel. Darauf basierend wurden im Rahmen des Projekts verschiedene Geschäftsfelder und Einsatzszenarien (z.B.: Antriebsumrichter, DC-DC-Wandler) adressiert.  Die Hauptaufgaben des Fraunhofer IISB waren die Entwicklung eines numerisch optimierten Hochleistungskühlkörpers für das neue SiC-Halbbrückenmodul sowie ein universeller Optimierungsworkflow für Kühlkörper der Leistungselektronik und die Entwicklung einer kombinierten Lebensdauer Methode für Leistungs- und Logikkomponenten. Beide Themen spiegeln die aktuellen Bedürfnisse und Interessen der Leistungselektronik und insbesondere der Automobilindustrie wider.  Am Fraunhofer IFAM in Dresden wurde die Entwicklung eines Substrates auf Kupfer-Kohlenstoff- Basis entwickelt, welches direkt in den Gesamtaufbau integriert werden kann. Dabei waren die Randbedingungen einer Wärmeleitfähigkeit größer 500 W/(m*K), einem angepassten Ausdehnungskoeffizienten sowie eine beidseitige Beschichtung mittels Reinkupfer zu erfüllen. Ebenso waren geometrische Toleranzen zu erfüllen, um erforderliche Lötprozesse durchführen zu können. Es sollte eine Möglichkeit aufgezeigt werden, wie die im Forschungsprojekt eingesetzten Materialien im industriellen Umfeld dargestellt werden können.	
19. Schlagwörter SiCool, Kühlkörperoptimierung, Zuverlässigkeitsmodell, Leistungselektronik, Kupfer-Kohlenstoff Substrat	
20. Verlag	21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title Verbundprojekt „SiCool“ Hochintegrierte SiC-Leistungselektronik auf thermisch partitionierten Keramiks substraten (SiCool)  Teilvorhaben der Fraunhofer Gesellschaft Lebensdauermethodik und Optimierung für die Logik und Leistungs-Integration (IISB) Thermisch partitionierte Substrate für hochintegrierte SiC-Leistungselektronik (IFAM)	
4. author(s) (family name, first name(s)) Letz, Sebastian A. Hutsch, Thomas	5. end of project 31.08.2021
	6. publication date
	7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address)  Fraunhofer-Institut für integrierte Systeme und Bauelementetechnologie Schottkystrasse 10, 91058 Erlangen  Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und angewandte Materialforschung Winterbergstraße 28, 01277 Dresden	9. originator's report no.
	10. reference no. 16EMO0267
	11. no. of pages
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references
	14. no. of tables
	15. no. of figures
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) Projekträger VDIVDEIT am 30.06.2022	
18. abstract The aim of the joint project SiCool was the development of a highly-efficient logic-power-integrated SiC half-bridge module on the basis of a thermally-partitioned ceramic circuit carrier and flexible-use liquid cooler concepts. Based on that different business areas and application scenarios (e.g. traction inverter, DC-DC converter) were addressed in the frame of the project.  The main tasks of the Fraunhofer IISB were the development of a numerically optimized high-performance heat sink for the new SiC half-bridge module as well as a universal optimization workflow for heat sinks in power electronics and the development of a combined reliability model for power and signal electronics components. Both topics reflect the demands and interests in power electronics especially in the automotive industry.  The Fraunhofer IFAM in Dresden has developed a substrate based on copper-carbon, which is directly integrable in the project's assembly. The boundary conditions were a thermal conductivity higher than 500 W/(m*K), an optimized coefficient of thermal expansion as well as a double-sided coating by pure copper. Additionally, geometrical tolerances had to be fulfilled to realize the required soldering processes. It was a further task to demonstrate, how the in this research project applied materials could be used in an industrial environment.	
19. keywords SiCool, heatsink optimization, reliability model, power electronics, copper-carbon substrate	
20. publisher	21. price