

Forschungsvorhaben EfA, 19U6006C

Elektrokomponenten für Aktivgetriebe

Hochtemperaturtaugliche Verbindungstechnik,
Stromsensorik, Treiber-IC zur Getriebeintegration der
Leistungselektronik und Ankopplung an den Kühlkreislauf
des Verbrennungsmotor

Report Typ

Abschlussbericht

Erstellungsdatum

16.12.2011

Zuwendungsempfänger

Förderkennzeichen

*Infineon
Technologies AG*



19U6006C

Laufzeit des Vorhabens

01.09.2006 – 30.6.2011

Dieser Bericht wurde erstellt durch Infineon Technologies AG

Beiträge wurden verfasst von

Dr. Markus Thoben

IMM INP DM S

Max Planck Str. 5

59581 Warstein

+49 2902 / 764 2299

markus.thoben@infineon.com

© 2011 Infineon AG

Weitergabe sowie Vervielfältigung dieser Unterlage, Verwertung und Mitteilung ihres Inhalts sind nicht gestattet, soweit nicht ausdrücklich zugestanden. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadenersatz. Alle Rechte für den Fall der Patenterteilung oder Gebrauchsmustereintragung vorbehalten. Für Fehler oder Auslassungen wird keine Haftung übernommen.

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	2
2	Zielsetzung	3
3	Stand der Technik zu Projektstart	4
4	Allgemeine Beschreibung der Arbeitspakete	7
5	Planung, Durchführung, Ergebnisse	9
5.1	<i>Anforderungen an Leistungsmodule-/Kühlung (WP1)</i>	9
5.1.1	Systemanforderungen	9
5.1.2	Prüfanforderungen	11
5.1.3	Lebensdauerbelastung	13
5.2	<i>Modul- und Kühlkonzept (WP2)</i>	14
5.2.1	Modulkonzepte	14
5.2.2	Auswahl Basistechnologien	21
5.3	<i>Kühlung (WP3)</i>	22
5.3.1	Prüfstand zur Untersuchung der Kühleigenschaften	22
5.3.2	Simulationen und Messungen zum Kühlsystem	24
5.4	<i>Strommessung Silizium-Shunt (WP3)</i>	28
5.5	<i>Treiberelektronik / Sensorauswertung (WP3)</i>	34
5.6	<i>Aufbautechnik (WP3)</i>	38
5.6.1	Drucksintertechnik	38
5.6.2	Bonddrahttechnik/Metallisierung/Diffusionslöt	45
5.6.3	Anwendungsspezifische Belastungstests	52
5.7	<i>Konstruktion Leistungselektronik / Schnittstellen und Validierung der Komponenten im Gesamtsystem (WP 4+5)</i>	57
5.7.1	Schnittstelle Leistungsmodul Kondensator	57
5.7.2	Integration der Komponenten	58
5.8	<i>Nutzen, Umsetzung, Verwertung der Ergebnisse</i>	59
5.9	<i>Vergleich mit der Zielsetzung / Zielerreichung</i>	59
6	Kurzfassung des Schlussberichtes	60
7	Abbildungsverzeichnis	61
8	Tabellenverzeichnis	64
9	Wissenschaftliche Veröffentlichungen	65
10	Literaturverzeichnis	66

2 Zielsetzung

Hybridfahrzeuge (Hybrid Electric Vehicle, kurz HEV) können einen beachtlichen Beitrag zur CO₂ Reduzierung liefern. Vordringliche Voraussetzung für die Elektrifizierung des Antriebsstranges kleiner Fahrzeuge ist die signifikante Erhöhung der Leistungsdichte der Leistungselektronik. Die auf diese Weise erzielbare Minderung der Material- und Integrationsaufwendungen für das Gesamtaggregate gestattet die Prognose einer überproportionalen Verminderung der Zusatzgewichte und Systemkosten.

Ein erfolgversprechender Ansatz ist die Integration der Leistungselektronik in das Getriebe (Abbildung 1). Zudem muss das Leistungsmodul in den Kühlkreislauf des Verbrennungsmotors integriert werden und somit bei erhöhter Kühlmitteltemperatur (105°C nominell, 125°C maximal) betrieben werden, um einen zusätzlichen Kühlkreislauf zu vermeiden.

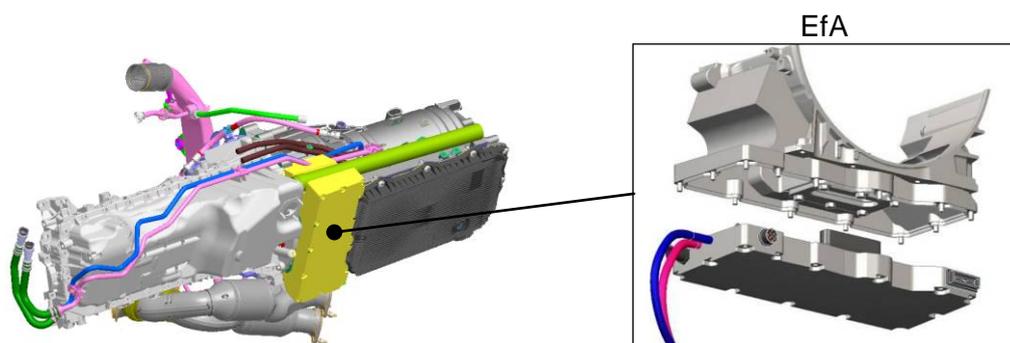


Abbildung 1: Forschungsprojekt EfA - Integration der Leistungselektronik im Getriebe mit erhöhten Einsatztemperaturen [1]

Um bei hohen Kühlmitteltemperaturen hohe Leistungsdichte des Umrichters zu erreichen, müssen die Leistungsmodule für erhöhte Sperrschichttemperatur bis 200°C ausgelegt werden. Das ist mit den heutigen Aufbau- und Verbindungstechnologien aufgrund von unzureichender Lebensdauer nicht möglich. Im Vergleich zu dieser neuen Anwendung wird die Leistungselektronik in heutigen serienmäßigen Hybridfahrzeugen bei ca. 70°C Kühlmitteltemperatur und 150°C Sperrschichttemperatur betrieben.

Ziel des Projektes EfA ist es, die Basistechnologien für die Darstellung der elektrischen Komponenten des Antriebsstranges zu ertüchtigen, um deren Volumen, Gewicht und Herstellungskosten zu reduzieren und gleichzeitig Zuverlässigkeit und Performance des Gesamtsystems zu erhöhen. Infineon Technologies konzentriert sich im Rahmen des Teilprojektes auf Hochtemperaturtaugliche Verbindungstechnik, Stromsensorik, Treiber-IC zur Getriebeintegration der Leistungselektronik.

3 Stand der Technik zu Projektstart

Der Einsatz von Leistungsbauerelementen führt zu erheblichen Verlusten. Wie in der folgenden Abbildung dargestellt wird, sind abhängig vom Strom- und Spannungsbereich unterschiedliche Bauformen im Einsatz. Leistungsmodule stellen dabei im größeren Leistungsbereich die am häufigsten verwendete Gehäuseform dar und werden im Strombereich von ca. 10 A bis 3600 A eingesetzt.

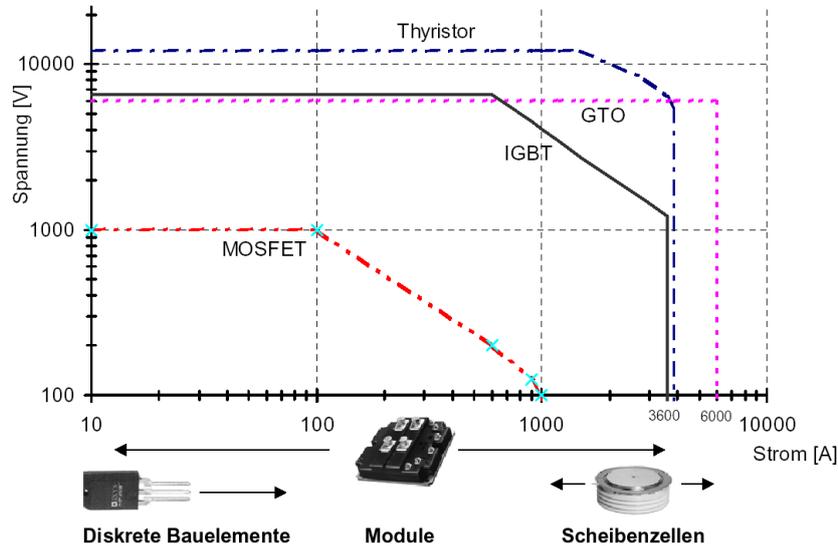


Abbildung 2: Leistungsklasse moderner Bauelemente mit Gehäuseformen [2]

Bauelemente

In der Spannungsklasse von einigen hundert Volt finden MOSFET und IGBT Bauelemente ihren Einsatz. Wie in Abbildung 3 dargestellt ist, führen 250 V Trench-MOSFET Bauelemente bei gleicher Siliziumfläche und hohen Stromdichten zu erheblich höheren Durchlassverlusten als 600 V Bauelemente in IGBT Technologie. Zum aktuellen Stand der Technik sind die IGBT Bauelemente bei hoher Temperatur, hohen Stromdichten und moderaten Schaltfrequenzen den MOSFET Bauelementen überlegen [3][4][5].

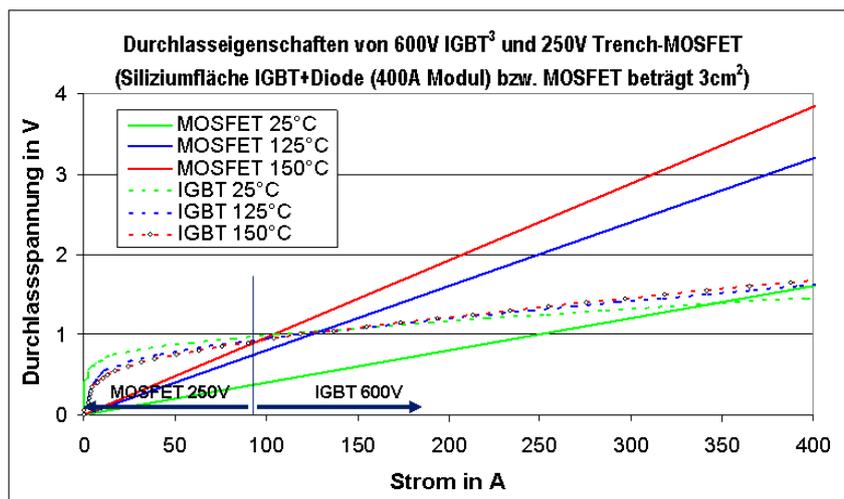


Abbildung 3: Vergleich der Durchlasseigenschaften von Trench-MOSFET und IGBT

Wie im EU Projekt HIMRATE gezeigt wurde, hat die neueste IGBT-Bauelementtechnologie das Potential bis zu Chiptemperaturen von 200 °C eingesetzt zu werden. Derzeit limitiert die Modulaufbautechnologie die maximale Dauerbetriebstemperatur auf 150 °C [6].

Aufbautechnologie

Trotz einer Vielzahl realisierter Schaltungstopologien und der Vielzahl von technologischen Besonderheiten einzelner Hersteller lassen sich in vertikaler Richtung – die Richtung des Wärmeflusses – heute zwei Standards angeben: Ein Leistungsmodul mit Grundplatte sowie ein Aufbau ohne Grundplatte. Die verwendeten Lote sind in ihren Dicken und thermischen Eigenschaften ähnlich. Das System Cu-Keramik-Cu wird auch als Substrat bezeichnet, auch unterschiedliche Substrathersteller haben sehr ähnliche Standards. Als Keramik ist in den meisten Fällen Al_2O_3 im Einsatz, in einigen, besonders gekennzeichneten Fällen AlN oder Si_3N_4 . Die Grundplatte besteht in den meisten Fällen aus Cu, in einigen speziellen Hochleistungsmodulen aus dem Verbundwerkstoff AlSiC .

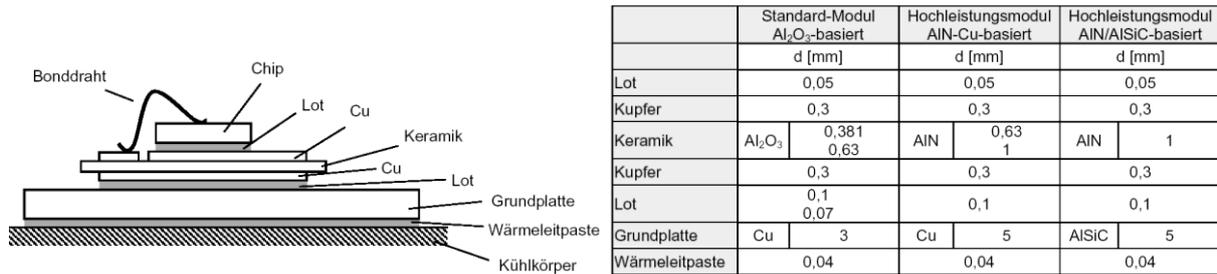


Abbildung 4: Aufbau und Schichtdicken in Standardmodulen mit Grundplatte

In Abbildung 4 sind der Aufbau und die Schichtdicken eines Standardmoduls mit Grundplatte dargestellt. In der Hauptform „Standard-Modul“ werden heute zwischen 70 und 80% der Leistungsmodule gefertigt, europäische Hersteller und Hersteller aus Fernost verwenden denselben Aufbau.

Zuverlässigkeit:

Im Betrieb des Leistungshalbleiters sind wechselnde Lasten typisch. Diese erzeugen Temperaturzyklen deren Temperaturhub und Auftretenshäufigkeit von der Applikation abhängen.

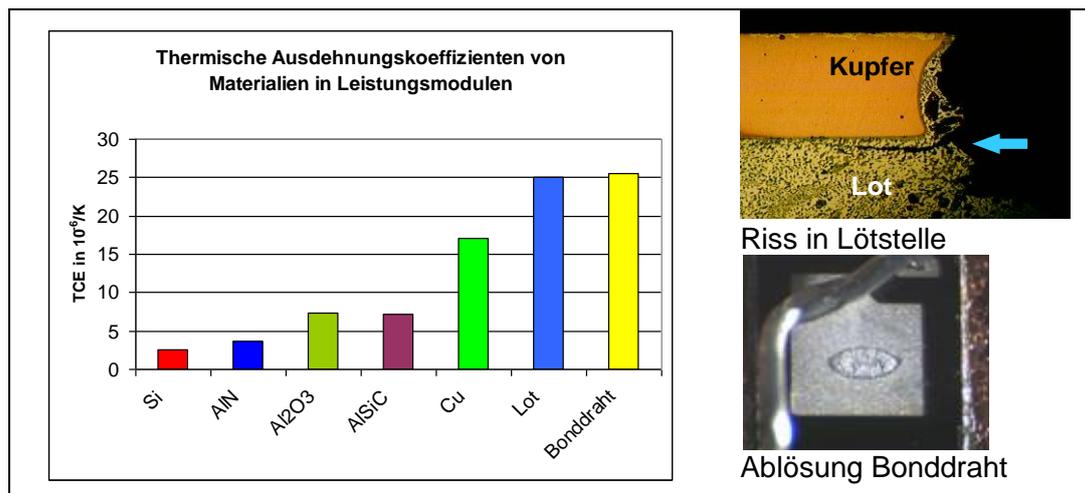


Abbildung 5: Fehlermechanismen in Standardmodulen durch thermische Wechsellast

Abbildung 5 zeigt, wie sich die im Leistungsmodul verwendeten Materialien bei Temperaturbelastung ausdehnen. Die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten erzeugen Belastungen in den Verbindungsstellen die über die Zeit zu einer Degradation der Verbindungsstelle führen.

Der Abgang von Bondverbindungen und Ermüdung von Lotschichten sind die wesentlichen Ausfallmechanismen bei Standard-Modulen nach thermischer Wechsellast [7].

Um den hohen Belastungsanforderungen in Traktionsanwendungen gerecht zu werden, werden daher thermomechanisch angepasste AlSiC Grundplatten und eine Abdeckung der Bondfüße mit Polyimid eingesetzt. Dauerbetriebstemperaturen der Halbleiter von max. 125 °C sind dabei üblich.

Grundlagenuntersuchungen zeigen, dass durch Einsatz von einer bisher nur bei Scheibenzellen-Leistungsmodulen eingesetzten Niedertemperaturverbindungstechnik die Zuverlässigkeit bei Hochtemperaturbelastung deutlich verbessert werden kann [8][9].

Kühlung:

Leistungsmodule werden üblicherweise auf Kühler aufgeschraubt, wobei die Wärmeleitung durch eine zwischen Bodenplatte des Moduls und Kühler aufgebrachte Wärmeleitpaste erfolgt. (Siehe Abbildung 4). Luftkühler mit forcierter oder natürlicher Konvektion sind dabei am weitesten verbreitet. Um jedoch sehr hohe Wärmeströme zu erreichen, werden andere Kühlprinzipien, wie Flüssigkeitskühlung, Heatpipes und Siedebadkühlung eingesetzt. Hierfür ist der Einsatz eines zweiten Rückkühlers notwendig.

Im Rahmen des BMBF-Projekts NEMO wurde gezeigt, dass aus Sicht der Kühleffizienz, voraussichtlicher Zuverlässigkeit und der Fertigungstechnologie der direkt gekühlte Umrichter auf Basis wasserdurchströmter Kühlplatten einen sehr guten Kompromiss darstellt [9].

In Abbildung 6 ist ein solches Modul der Firma Infineon mit AlSiC-Bodenplatte dargestellt. Auf der Unterseite der Modulbodenplatte sind Stifte, die direkt in das Kühlwasser ragen. Im Vergleich zu einem auf einen Kühler geschraubten Standardmodul kann so der thermische Widerstand halbiert werden.

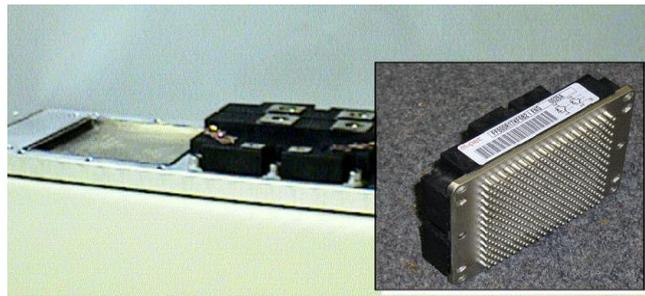


Abbildung 6: Infineon (eupec) Leistungsmodul für direkte Flüssigkeitskühlung (Prototyp)

4 Allgemeine Beschreibung der Arbeitspakete

Die Arbeitspakete sind darauf ausgerichtet, im Verbund mit den im Projekt beteiligten Firmen, BMW, ZF, Liebherr, Kemet und der TU Chemnitz, vom erreichten Stand der Technik ausgehend neue Lösungen zu erarbeiten und ein Aktivgetriebe für Baureihen kleiner Fahrzeuge darzustellen. Die Formulierung der Prämissen und die Auswahl der als aussichtsreich einzustufenden Lösungsansätze gründet auf der Erfahrung der Projektpartner in ihrem jeweiligen Markt- und Technologiesektor. Das Gesamtprojekt gliedert sich in die Arbeitspakete WP1 bis WP5. Der Umfang der Arbeitspakete ist grob umrissen und die Infineon Technologies betreffenden Arbeitsinhalte näher beschrieben. Der Schwerpunkt der Arbeiten von Infineon Technologies liegt dabei in WP3: „Technologie & Komponenten-Entwicklung“

WP1: „Spezifikationen“

Von den Projektpartnern werden die Anforderungen an die untergeordneten Systeme, Komponenten, Module, und Technologien erarbeitet und formuliert; die Spezifikationen sind Arbeitsgrundlage für die jeweils vorgelagerten Wertschöpfungsstufen.

Neben den allgemeinen Basisanforderungen, wie Temperaturen, Medien, Sicherheits- und Umweltauflagen, werden im Rahmen dieses Arbeitspakets auch die Betriebspunktkollektive definiert, die letztendlich wieder an Betriebsmodi und applikationsspezifische Anforderungen geknüpft sind.

Teil der hier festgelegten Spezifikationen sind auch die verfügbaren Bauräume, die für jede Komponente (Wertschöpfungsstufe) max. zur Verfügung stehen.

Im Sinne eines durchgängigen Entwicklungsprozesses werden gemäß den festgelegten Spezifikationen entsprechende Prüfvorschriften (Testspezifikationen) für die spätere Validierung erstellt. Infineon Technologies unterstützt hierbei die Projektpartner bei der Ableitung der Einzelanforderungen; Ein Vergleich der Anforderungen mit Anforderungen, Standards und Normen anderer Anwendungen für Leistungselektronik erfolgt. Durch einen Vergleich mit Anforderungen der Consumer-, Industrie- und Traktionselektronik werden von Infineon Technologies Lücken im Anforderungskatalog aufgezeigt und die Anforderungen für die Leistungselektronik erarbeitet. In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner TU Chemnitz werden Prüf- und Testbedingungen für die Leistungselektronischen Komponenten erarbeitet.

WP2: „Konzepte“

Auf Basis der Spezifikationen werden Lösungsansätze erarbeitet und ausgewählt. Der Detaillierungsgrad schreitet im Projekt fort von der Technologiegrundlage zum Bauteil.

Aus den vorangegangenen Bauraumdefinitionen wird das Packaging für die einzelnen Wertschöpfungsstufen abgeleitet. Die konstruktive Zusammenführung der Einzelkomponenten führt im nächsten Schritt zur Definition der mechanisch/elektrischen Schnittstellen.

Die entscheidenden Schlüsseltechnologien für Leistungselektronik und Kühlung werden, angelehnt an den gegebenen Spezifikationsrahmen, anhand von Voruntersuchungen ausgewählt.

Infineon konzipiert hier die Basistechnologie für die Leistungselektronik und erarbeitet die Gestaltanforderungen für das Leistungsmodul mit hoher Leistungsdichte. Die Schnittstellen im Leistungsmodul zum Kühler/Kondensator/Regelelektronik werden definiert. Voruntersuchungen zur Verwendbarkeit für das Leistungsmodul werden ebenfalls durchgeführt.

WP3: „Technologie & Komponenten-Entwicklung“

Auf Basis der Konzepte werden Basistechnologien und Komponenten zur Integration von Leistungselektronik/E-Maschine/ECU's etc. ins Getriebe und Kühlung an einem einheitlichen Kühlsystem entwickelt.

Durch die angestrebte hohe Leistungsdichte sind deutlich erhöhte Temperaturbelastungen der Bauteile im Aktivgetriebe zu erwarten. Eine der wesentlichen Systemanforderungen ist daher eine entsprechende Temperaturfestigkeit aller im Getriebe integrierten Komponenten.

Hand in Hand geht die Forderung nach optimierten Methoden zur Kühlung, die in Verbindung mit dem Kühlkreislauf des Fahrzeugs realisiert werden müssen.

Infineon Technologies untersucht hierbei hochtemperaturtaugliche vertikale Si-Stromsensoren, die den Anforderungen an Kompaktheit und Zuverlässigkeit gerecht werden und in die Leistungsmodule integriert werden.

Es werden Verbindungstechniken zur Integration der Leistungselektronik mit Wasserkühlung bei Kühlmitteltemperaturen bis 125°C und Betriebstemperaturen von bis zu 200°C erforscht. Zum einen wird eine Substratverbindung mittels einer Drucksintertechnik (Niedertemperaturverbindungstechnik) betrachtet. Die Zuverlässigkeit wird mittels Lastwechseluntersuchungen bewertet. Vergleichend werden auch Löttechnologien bewertet. Auf Basis der Konzeptbetrachtungen werden geeignete Kühlstrukturen ausgewählt und in Verbindung mit den neuen Technologien Leistungsmodule mit dieser Kühltechnologie realisiert.

Für die Integration ins Getriebe werden hochtemperaturtaugliche Isolierte Treiber IC auf Basis „Coreless-Transformer“ – verwendet, die das Potential zum Betrieb für Temperaturen >125°C haben. Auf Basis der gleichen Technologie wird auch die Analog/Digital Wandlung der Stromsensordesignale ausgewertet. Die Eignung wird anhand von Betriebstests bei den Partnern überprüft.

Es werden zudem weitere Aufbautechniken, wie das Diffusionslöten und verbesserte Bonddrahttechnik und unterschiedliche Metallisierungen verwendet und getestet, an denen zuvor im Rahmen im Projekt InGA (Leistungselektronik für Hybridantriebe in PKW und Nutzfahrzeuganwendungen - Integrierbar in Getriebe und Antriebsstrang, hochtemperaturfähig, zuverlässig und robust, 19 U 6007C) Voruntersuchungen stattgefunden haben [10].

WP4: „Funktionsentwicklung & Konstruktion“

In der Funktionsentwicklung & Konstruktion wird von den Projektpartnern zum Teil auf bestehende Komponenten zurückgegriffen. Sowohl die elektrische Maschine mit ihrer Regelung sowie die softwareseitige Einbindung des Antriebssystems in die Fahrzeugumgebung sowie weitere nicht EfA-spezifische Hybridkomponenten können von bestehenden Fahrzeugen übernommen werden.

Für die Erhöhung der Leistungsdichte der Leistungselektronik müssen weitgehend neue Anordnungen und mechanische Schnittstellen erarbeitet werden.

Infineon liefert für dieses Arbeitspaket die Leistungsmodule mit den in WP3 untersuchten Technologien. Spezifische Schnittstellen zur Einbindung der Leistungselektronikmodule von Infineon müssen definiert werden, da diese Schnittstelle in der bestehenden Hardware nicht vorgesehen ist. Die in WP1 erarbeiteten Spezifikationen müssen durch die leistungselektronischen Komponenten erfüllt werden und über Prüfstandtests vorab abgesichert werden.

WP5: „Integration & Validierung“

Die Integration findet in mehreren Stufen gemäß den definierten Wertschöpfungsstufen bei den verschiedenen Projektpartnern statt. Der jeweils Verantwortliche führt die Integration durch und validiert parallel gemäß den vereinbarten Tests. Die Integration wird mechanisch, thermisch, elektrisch und funktional betrachtet.

Beginnend mit der kleinsten zusammenhängenden Einheit der Leistungselektronik, bestehend aus Leistungselektronik, Kühlung und Sensorik wird die Validierung Schritt für Schritt bis hin zum Fahrzeugtest ausgeweitet. Der Übergang zur nächst höheren Wertschöpfungsstufe erfolgt erst dann, wenn die Funktionalität über die Funktionstests sicher nachgewiesen ist. Infineon untersucht dabei die Eignung der Stromsensorik und Temperatursensorik sowie Eigenschaften der Leistungsmodule in Verbindung mit der Kühlung. Die weitere Integration erfolgt bei den Partnern, Liebherr, ZF und BMW. Die Validierung der Modulaufbautechnologien wird aufgrund der Dauer parallel anhand von Technologiemustern durchgeführt.

5 Planung, Durchführung, Ergebnisse

Die Darstellung der Arbeitsergebnisse wird im folgenden thematisch gegliedert und die Zuordnung zu dem Hauptarbeitspaket angegeben. Teilweise werden aus Übersichtsgründen Ergebnisse aus anderen Arbeitspaketen ebenfalls im jeweiligen Abschnitt beschrieben.

5.1 Anforderungen an Leistungsmodule-/Kühlung (WP1)

5.1.1 Systemanforderungen

Die Anforderungen an die Leistungselektronik, hier insbesondere dem Leistungsmodul, werden aus den Basisanforderungen an das elektrische System des Fahrzeugherstellers abgeleitet [11]. Diese wurden in Form von Standards und Lastenheften ausgeführt. Folgende Zieldaten wurden festgelegt:

- Spannungsbereich DC = 100V – 170V
- Systemleistung generatorisch, elektrisch, 20sek = 25kW
- Systemleistung motorisch, mechanisch, 7sek = 26kW

Die Umweltbedingungen aufgrund des getriebeintegrierten Einbauorts bedingen neben den hohen Temperaturanforderungen auch große Vibrationsanforderungen. Verglichen mit typischen Anforderungen in Industrie- und Traktionsanwendungen sind diese in Tabelle 1 dargestellt.

Einsatzbereich	Automobil	Industrie	Traktion
Lebensdauer	17 Jahre	10 Jahre	30-40 Jahre
Betriebsstunden	8000 Stunden	8 Jahre	15 Jahre
Umgebung	-40°C –140°C Luft -40°C – 105°C (125°C) Kühlung	0° – 40 °C	-55°C – 65°C
Vibration	Sehr hohe Anforderung <20g	Geringe Anforderung	Hohe Anforderung
Klima	Betauung (geräteintern); Salznebel, zeitweises Untertauchen, Hochdruckreinigung (geräteextern)	Raumklima	Betauung / Salznebel / Abrieb metallischer Staub
Besonderheiten	Hohe Bauraumanforderung	Standard / Second Source	Ersatzteilverfügbarkeit / Kompatibilität
Innovationszyklen	3 Jahre (für Hybrid LE)	3-5 Jahre	7-10 Jahre

Tabelle 1: Übersicht Anforderungen an Leistungsmodule in Traktion und Industrie vs. EfA-Projekt

Die Anforderungen unterscheiden sich durch eine deutlich geringere Betriebsdauer bei stark verschärften Umgebungsbedingungen. Das Hybridsystem und die verwendete Hybridstrategie bestimmt die Belastung der Leistungselektronik. Somit muss für jedes Fahrzeug eine Auslegung auf Basis der maximalen Belastung und über der Lebensdauer auftretender Wechselbeanspruchung durchgeführt werden.

Abbildung 7 beschreibt exemplarisch die im Umrichter auftretenden Verluste bei einem Fahrbetrieb. Für den dargestellten Fall mit einer Batteriespannung < 180V lassen sich die Verluste näherungsweise in zwei Drehzahlbereichen berechnen. Im Drehzahlbereich > 1000/min entstehen ca. 4.5% Leistungselektronikverluste.

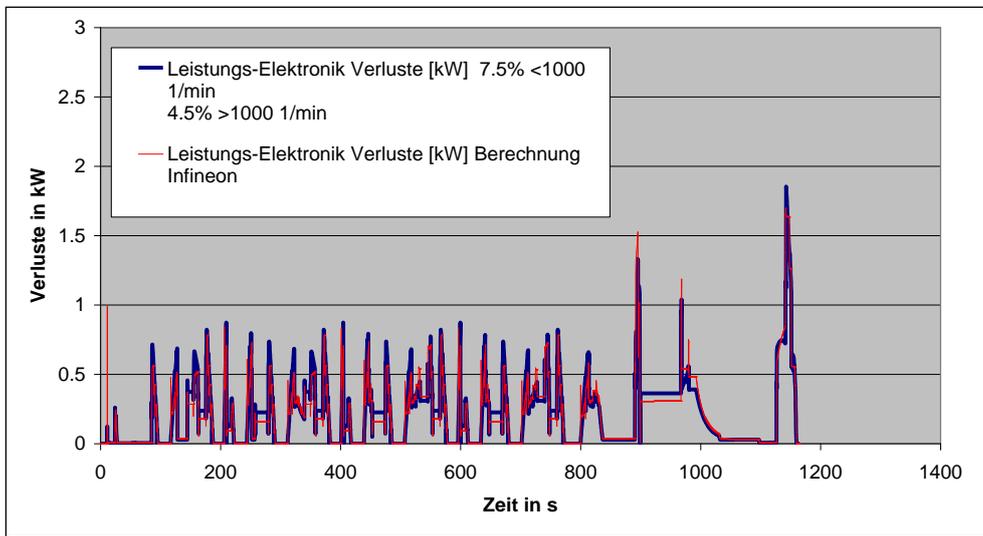


Abbildung 7: Verluste im Umrichter während des Fahrbetriebs. Abschätzung Verluste: 4.5% >1000 U/min 7.5% <1000 U/min

Bei einer stärkeren Spannungsausnutzung steigen nur die die Schaltverluste der Bauelemente an.

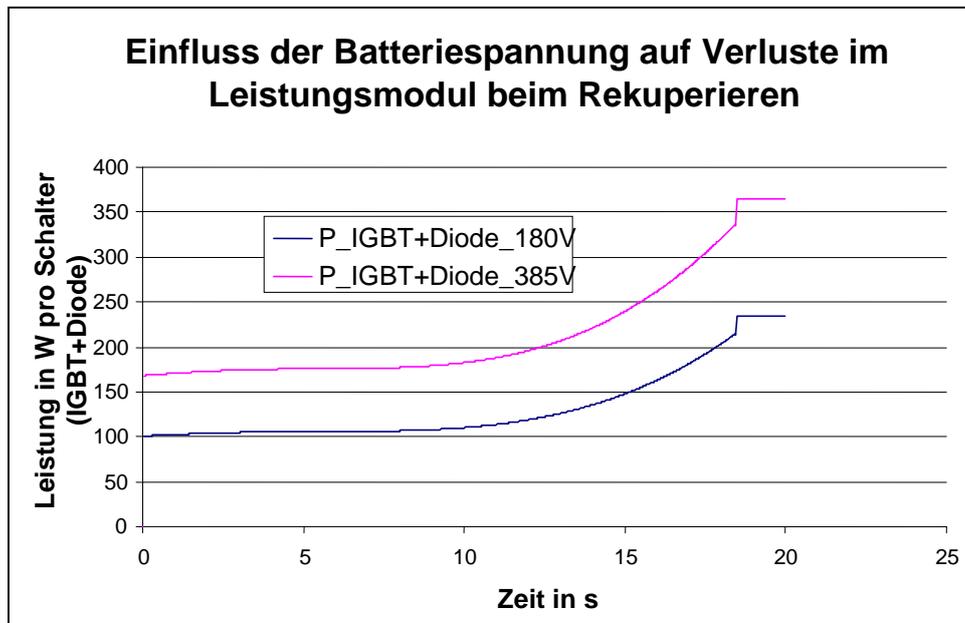


Abbildung 8: Anstieg der Verlustleistung 50% beim Rekuperieren bei Erhöhung der Batteriespannung auf 385V (Verdopplung der Ausgangsleistung)

Wie in Abbildung 8 dargestellt ist steigen im betrachteten Fall beim Rekuperieren die Verluste um ca. 50% an, so dass aufgrund der bei 385V etwa verdoppelten Ausgangsleistung die Umrichterverluste auf etwas über 3% sinken. Für eine Auslegung der Leistungselektronik und Kühlung müssen daher alle im Fahrbetrieb auftretenden Zustände berücksichtigt werden.

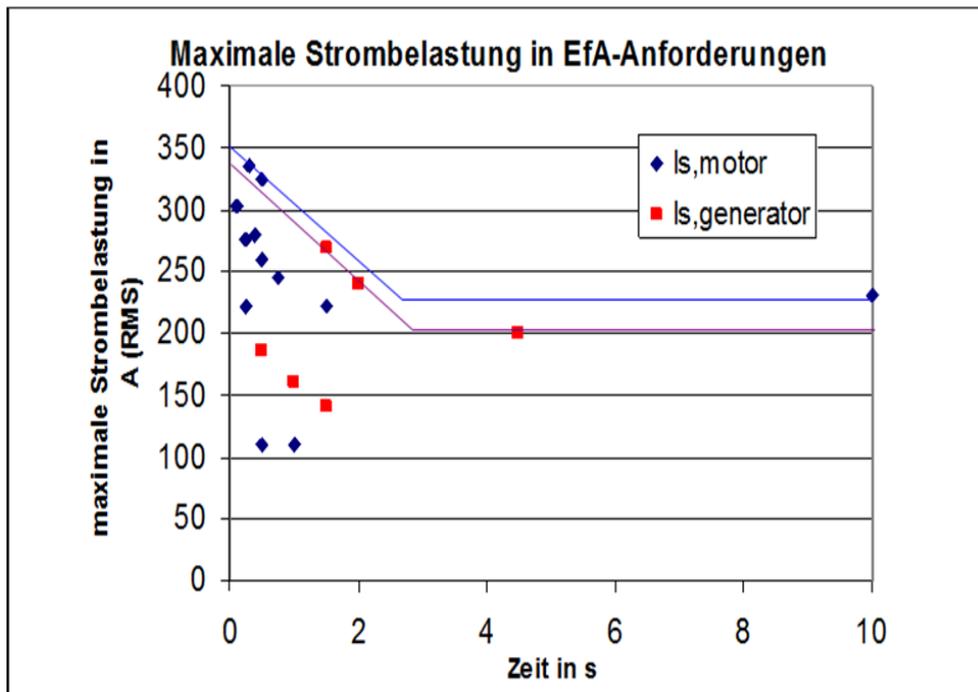


Abbildung 9: Anforderung an das Leistungsmodul: Maximale Strombelastung bei Betriebsbelastung

Abbildung 9 stellt das Analyseergebnis der maximal auftretenden Belastungen dar, die mit Daten des Fahrzeugherstellers und der elektrischen Maschine ermittelt wurden [11][12]. Im Strom/Zeitdiagramm stellt die Maximalgrenze die auslegungsrelevante Strombelastung des Leistungsmoduls dar.

5.1.2 Prüfanforderungen

Zur Absicherung des Leistungsmoduls bezüglich Umweltbedingungen und über der Lebensdauer auftretender Wechselbeanspruchung ist eine Vielzahl von Qualifikationstests der Leistungsmodule erforderlich.

Wesentliche Tests:
Temperaturschock
Thermal Cycling
Vibration
Power cycling
Hochtemperatursperrlagerung
Hochtemperaturgatestresstest
Feuchte + Sperrlagerung
Applikationsnaher Test mit Überlagerung Änderung Sperrschichttemperatur und Kühler Temperatur

Tabelle 2: Übersicht Prüfungen an Leistungsmodulen

Tabelle 2 stellt eine Übersicht dar, welche Tests für Leistungsmodule typischerweise durchgeführt werden.

Die Testrandbedingungen hängen von verschiedenen Faktoren ab. Zum einen spielt die maximale Betriebstemperatur der Bauelemente eine Rolle, zum anderen beeinflussen Einbauort und Einsatzdauer die Festlegung von Vibrationsprofilen und Testdauer, bzw. Anzahl von Lastwechseln. In Tabelle 3 sind Anforderungen für die Tests dargestellt, die für eine Betriebstemperatur von 150°C spezifiziert sind.

Type	Description	Conditions
HTRB	High Temperature Reverse Bias	1.000h, $T_j = T_{jmax} = 150^\circ\text{C}$, $V_{CE} = 0,9 * V_{CEmax}$
HTGS	High Temperature Gate Stress	1.000h, $T_j = 150^\circ\text{C}$, $V_{GE} = \pm V_{GEmax}$
H ³ TRB	High Humidity High Temperature Reverse Bias	1.000h, 85°C , 85% RH, $V_{CE} = 0,8 * V_{CEmax}$, but max. 80V, $V_{GE} = 0\text{V}$
LTS	Low Temperature Storage	1.000h, $T_a = T_{stg,min} = -40^\circ\text{C}$ No operation; bare module
TST	Thermal Shock (2-chamber-test)	$T_{stg,min} - T_{stg,max}$ typ. -40°C to $+125^\circ\text{C}$ $t_{storage} = 60\text{ min}$, $t_{change} \leq 30\text{ s}$ 1.000 cycles; No operation; bare module
TC	Thermal Cycling	External heating and external cooling $2\text{ min} < t_{cycl.} < 6\text{ min}$; $\Delta T_j = 80\text{K}$, $T_{cmin} = 25^\circ\text{C}$, (typical values) 25kcycles
PC (sec)	Power Cycling [sec]	Internal heating and external cooling $0,5\text{ sec} < t_{cycl.} < 5\text{ sec}$; $\Delta T_j = 60\text{K}$, $T_{jmax} = 150^\circ\text{C}$, (typical values) 150kcycles
PC (min)	Power Cycling [min]	Internal heating and external cooling $1\text{ min} < t_{cycl.} < 6\text{ min}$; $\Delta T_j = 60\text{K}$, $T_{cmin} = 50^\circ\text{C}$, (typical values) 15kcycles
V	Vibration	5-200 Hz sine wave (1 oct. per min.), 5g, 30h per axis (x, y, z) bare module
Shock	Mechanical Shock	Half-sine pulse, 30g \pm , 3x per axis (x, y, z), bare module

Tabelle 3: Prüfbedingungen für automotive IGBT Leistungsmodule

Im Rahmen des Projekts EfA werden Aufbautechnologien erforscht, die den Betrieb der Leistungsmodule bei Betriebstemperaturen von 200°C erlauben sollen. Der getriebeintegrierte Einbauort erfordert zudem verschärfte Anforderungen an die Vibrationsbeständigkeit. Basierend auf diesen Anforderungen müssen die Prüfbedingungen verändert werden, wie in Tabelle 5 dargestellt ist. Die Anzahl der erforderlichen Testzyklen hängt dabei von der Auslegung der Module und der Fahrstrategie ab.

Modul	Anforderung	Risiko	Absicherungsmaßnahme
EfA- Leistungsmodul	$T_j = 200^\circ\text{C}$	vorzeitige Alterung wegen hoher Temperatur	HTRB, HTGS, 200°C . 1000h
	$T_j = 200^\circ\text{C}$	Bondabheber wegen hoher Temperatur	PC, sec, 200°C , Cycles tbd. IOL, 200°C , $\Delta T_c = 100\text{K}$, T_{case} cycles = ? T_j cycles = ?
	31500 passive Temperaturzyklen durch Kühlwasser	Risse oder Ablösungen in der AVT durch unterschiedliche TCE	TST (-40 150°C) 2500 cycles TC (20 .. 125°C) 13000 cycles TC (25 .. 105°C) 25000 cycles
	Aktive Temperaturzyklen durch Verlustwärme beim elektrischen Betrieb	Ablösungen von Bonddrähten	PC, sec, 200°C , Cycles tbd. IOL, 200°C , $\Delta T_c = 100\text{K}$, T_{case} cycles = ? T_j cycles = ?
	Vibration	Abrisse von Wire bonds	Sinus über Rauschen gemäß BMW Group Standard GS 95003-3 für Einbaubereich B3 und B4
	hohe Stromdichte von x A / cm^2	Kurzschlüsse oder Unterbrechungen durch Elektromigration	PC, sec, IOL bei Nennstrom Ausgangs tests, Kurzschluss (-6 x Nennstrom), Modulcharakterisierung (2xNennstrom)

Tabelle 4: Erweiterung der Prüfbedingungen für Leistungsmodule aus EfA Projekt

Der Warmlauf des Verbrennungsmotors bedingt einen zusätzlichen Test. Im überlagerten Test (IOL: Intermittent operation lifetime) wird das Kühlmittel passiv gekühlt und aufgeheizt. Während der Aufheizphase wurden die Prüflinge zusätzlich mit aktiven Zyklen belastet. Neben den Testbedingungen sind Fehlerkriterien definiert, die in Tabelle 5 dargestellt sind und über die Änderungen der elektrischen Eigenschaften der Bauelemente und der thermischen Eigenschaften des Aufbaus einen Ausfall der Baugruppe definieren.

Failure Criteria (Reference: DIN IEC 47E/114/CDV: 1998-10)	
IGBT-Modules and Press Pack	
• I_{GES}	maximum change: $\pm 20nA$ or $\pm 100\%$ of initial value, whichever is greater;
• I_{CES}	maximum change: $\pm 100\mu A$ or $\pm 100\%$ of initial value, whichever is greater;
• $V_{CE(SAT)} / V_F$	maximum change: $\pm 5\%$ of initial value;
• $V_{GE(th)}$	maximum change: $\pm 20\%$ of initial value;
• $R_{th(jc)}$	maximum change: $\pm 20\%$ of initial value;
• V_{ISO}	0.8 x specified value

Tabelle 5: Fehlerkriterien für Tests an Leistungsmodulen

5.1.3 Lebensdauerbelastung

Die Lebensdauerbelastung der Leistungsmodule hängt nicht nur von der Betriebstrategie und den Umwelthanforderungen ab, sondern variiert mit dem verwendeten Aufbaukonzept und der Auslegung der Leistungsmodule.

Es müssen daher vorab Simulationen von Fahrleistungszyklen durchgeführt werden, um Leistungselektronikkonzepte zu bewerten. Die in Abbildung 10 beschriebene Vorgehensweise wird dabei verwendet, um die Modul- und Kühlkonzepte bezüglich der spezifizierten Anforderungen zu vergleichen und notwendige Basistechnologien auszuwählen.

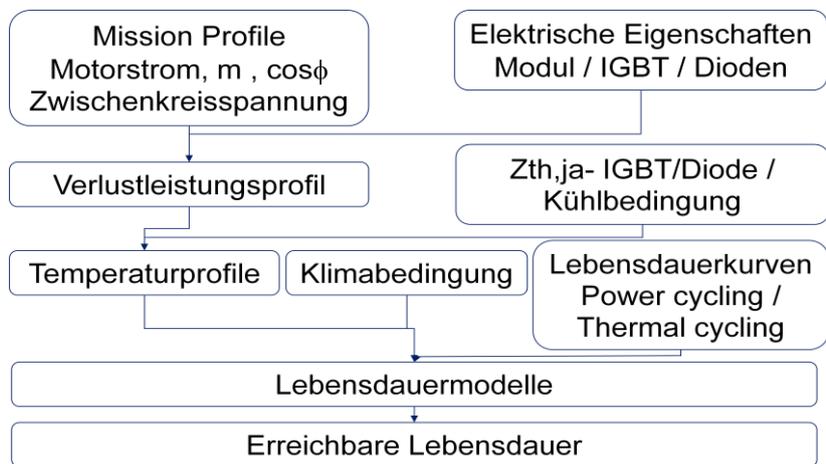


Abbildung 10: Vorgehensweise zur Abschätzung erreichbarer Lebensdauer von Leistungsmodulen [13]

5.2 Modul- und Kühlkonzept (WP2)

5.2.1 Modulkonzepte

Für die Auswahl des Modulkonzepts werden zum einen die Maximalbelastungen bewertet, auf deren Basis eine erste Dimensionierung der Chipflächen erfolgen kann. Für die spezifizierte Spannungslage von 180V sind wie in Abschnitt 3 beschrieben nach heutigem Stand 600V IGBT Bauelemente und Dioden geeignet. Aufgrund der geringen Sperrströme hat die IGBT³-Bauelementtechnologie von Infineon Technologies AG das Potential bis zu Chiptemperaturen von 200°C eingesetzt zu werden. Für eine Auslegung der benötigten Chipfläche wird im ersten Schritt der Fahrleistungstest [11] bewertet.

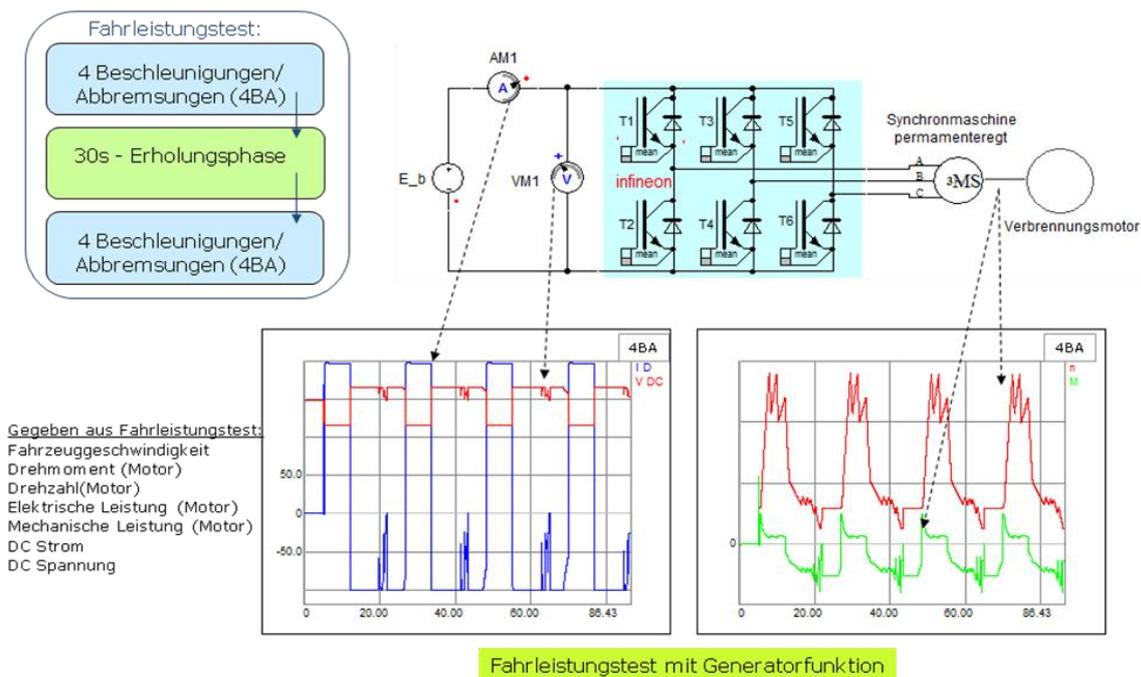


Abbildung 11: Anforderungen im Fahrleistungstest zur Beurteilung der Belastung der Elektronik

Abbildung 11 zeigt, wie auf Basis der Fahrdaten die elektrischen Daten gewonnen werden.

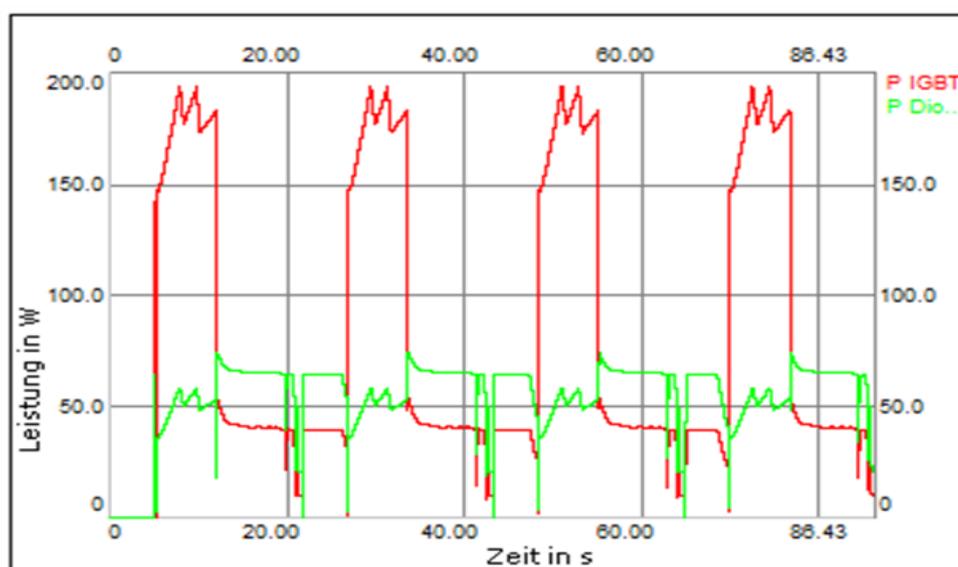


Abbildung 12: Verlustleistung im Fahrleistungstest mit Generatorfunktion

Entsprechend der Vorgehensweise aus [13] werden dann die Verluste im Halbleiterleistungsmodul bestimmt. Für die Bestimmung der Temperaturverläufe werden für die verschiedenen Aufbaukonzepte 3D Finite Elemente Simulationen durchgeführt. Die Ergebnisse der transienten Simulationen werden, wie in Abbildung 13 zu sehen ist, in ein thermisches Ersatzschaltbild überführt. Mit diesen Modellen können die unter Verwendung der Verlustleistungsprofile, die in den Halbleitern auftretenden Temperaturen berechnet werden.

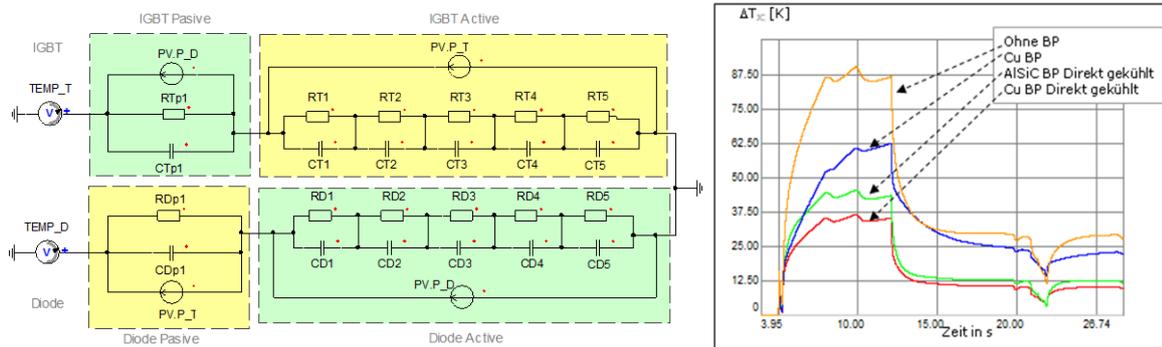


Abbildung 13: Thermisches Modell und Temperaturverlauf im Fahrleistungstest

Es werden im ersten Schritt vier flüssigkeitsgekühlte Modulkonzepte bewertet. Wie in Abschnitt 3 beschrieben wurde, sind aus Sicht der Kühleffizienz direkt gekühlte Umrichter auf Basis wasserdurchströmter Kühlplatten sehr effizient. Daher werden zwei Modulkonzepte mit direkt gekühlten Bodenplatten (Kupfer und AlSiC) verglichen mit Modulen, die auf Kühlern montiert werden.

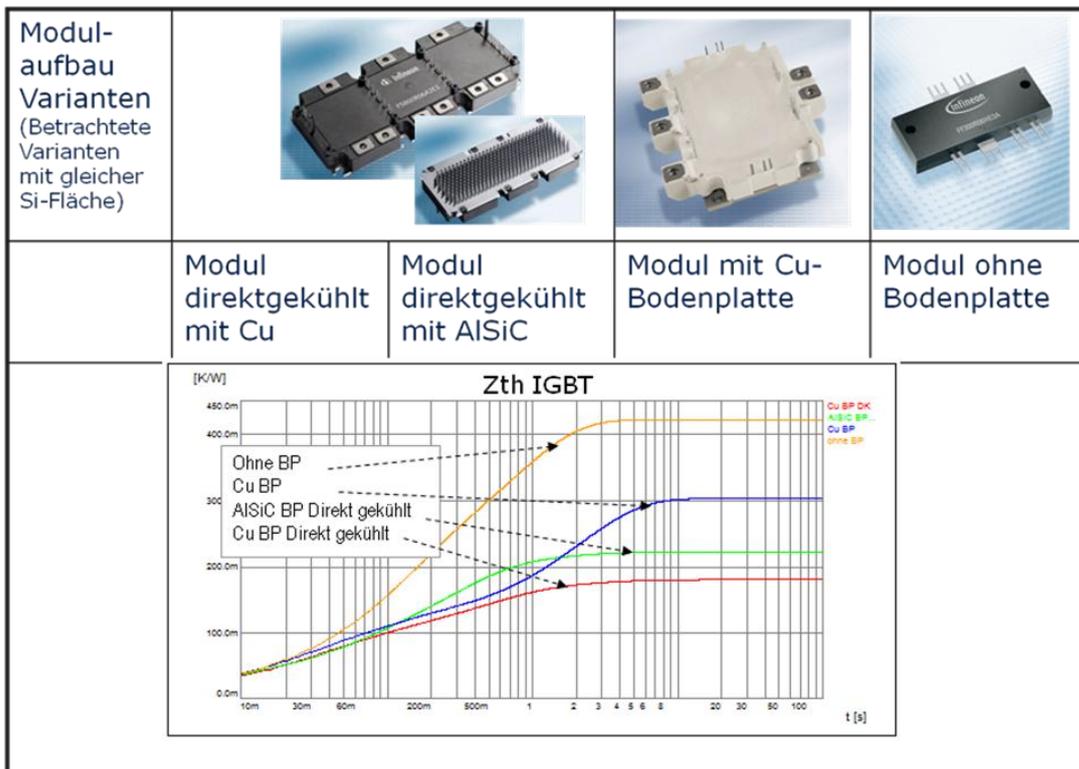


Abbildung 14: Thermischer Vergleich von Modulkonzepten unter Verwendung gleicher Chipfläche

Wie in Abbildung 14 dargestellt ist, wird bei Modulen, die auf Kühlern montiert werden zwischen Modulen mit und ohne Bodenplatte unterschieden. Aufgrund der geringen Wärmekapazität und der geringen Wärmespreizung liefert das Modul ohne Bodenplatte bei gleicher Chipfläche die höchsten Temperaturhübe. Hier wäre im Vergleich zu dem

direktgekühlten Kupferbodenplattenmodul mehr als die doppelte Siliziumfläche erforderlich. Bei der Analyse der Temperaturhübe wurde dabei sichtbar, dass zudem eine große Anzahl von Temperaturrippeln auftreten.

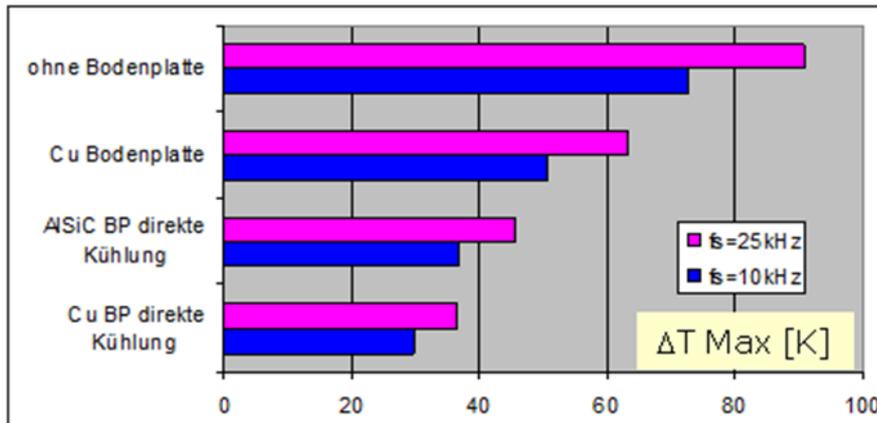


Abbildung 15: Maximaler Temperaturhub im Fahrleistungstest für verschiedene Aufbauvarianten

Für Module mit Bodenplatte liegt der Temperaturhub, wie in Abbildung 15 zu sehen ist, zwischen denen der direktgekühlten Module und dem für das Modul ohne Bodenplatte ermittelten Temperaturhub. Aufgrund der einfachen Montage und der geringen Temperaturhübe wird dieses Modul weiter mit betrachtet.

	Wasserkühler indirekt (Alu)	Wasserkühler direkt (Kupfer)	Ölkühler indirekt/direkt (Kupfer)
Wärmeübergangskoeffizient α_{eff} in $\text{W/m}^2 \text{K}$ @ 6l/min	12900 *) [9]	16800 *) [9]	16500 *) abgeleitet aus Daten [11]
Druckabfall @RT in mbar	100	100	100

Tabelle 6: Berücksichtigte Kühleigenschaften zur Integration in den vorhandenen Kühlkreislauf

Durch Getriebeintegration wird die Nutzung von zwei Kühlmedien möglich. Zum einen das Getriebeöl und zum anderen das Wasser/Glykol Gemisch zur Kühlung des Verbrennungsmotors. Auf Basis von Messdaten wurden die in Tabelle 6 dargestellten Kühleigenschaften abgeleitet.

Modul direktgekühlt mit Wasser/Glykol		Modul direktgekühlt mit Öl		Modul mit Cu-Bodenplatte auf Wasser/Glykolkühler		Modul mit Cu-Bodenplatte auf Ölkühler	
Variante	Ampere	Kühlung	Art	$R_{\text{th,IGBT}}$ in K/W	$R_{\text{th,Diode}}$ in K/W		
1	400	Wasser/Glykol	indirekt	0.32	0.413		
2	200	Wasser/Glykol	indirekt	0.45	0.647		
3	400	Wasser/Glykol	direkt	0.20	0.29		
4	200	Wasser/Glykol	direkt	0.33	0.531		
5	400	Öl	indirekt	0.30	0.389		
6	200	Öl	indirekt	0.43	0.625		
7	400	Öl	direkt	0.20	0.29		
8	200	Öl	direkt	0.34	0.56		

Rth aus Simulation

Tabelle 7: Thermische Eigenschaften der verglichenen Modulvarianten

Um eine effiziente Kühlung über das Getriebeöl zu erreichen, ist die Verwendung des in Tabelle 7 aufgeführten feinstrukturierten Kupferkühlers notwendig. Das Getriebeöl weist schlechtere thermische Eigenschaften aus und kann daher bei gleicher Kühlstruktur deutlich weniger Wärme abführen. Mittels Simulationen wurden thermische Modelle für alle Modulkonzepte erstellt. Die stationären thermischen Widerstände für zwei unterschiedliche Chipbestückung (200A und 400A) sind in Tabelle 7 aufgeführt. Für die Direktkühler wird aufgrund der fehlenden Wärmeleitpaste ein deutlicher geringerer Wärmewiderstand erreicht. Vom Fahrzeughersteller BMW wurden die Belastungsfälle über die komplette Betriebsdauer des Antriebssystems bestimmt. Auf Basis der Daten für die elektrische Maschine [12] wurden die Strombelastungsverläufe der einzelnen Betriebsfälle und daraus mit Hilfe der Eigenschaften der Halbleitermodule Verlustleistungsprofile ermittelt.

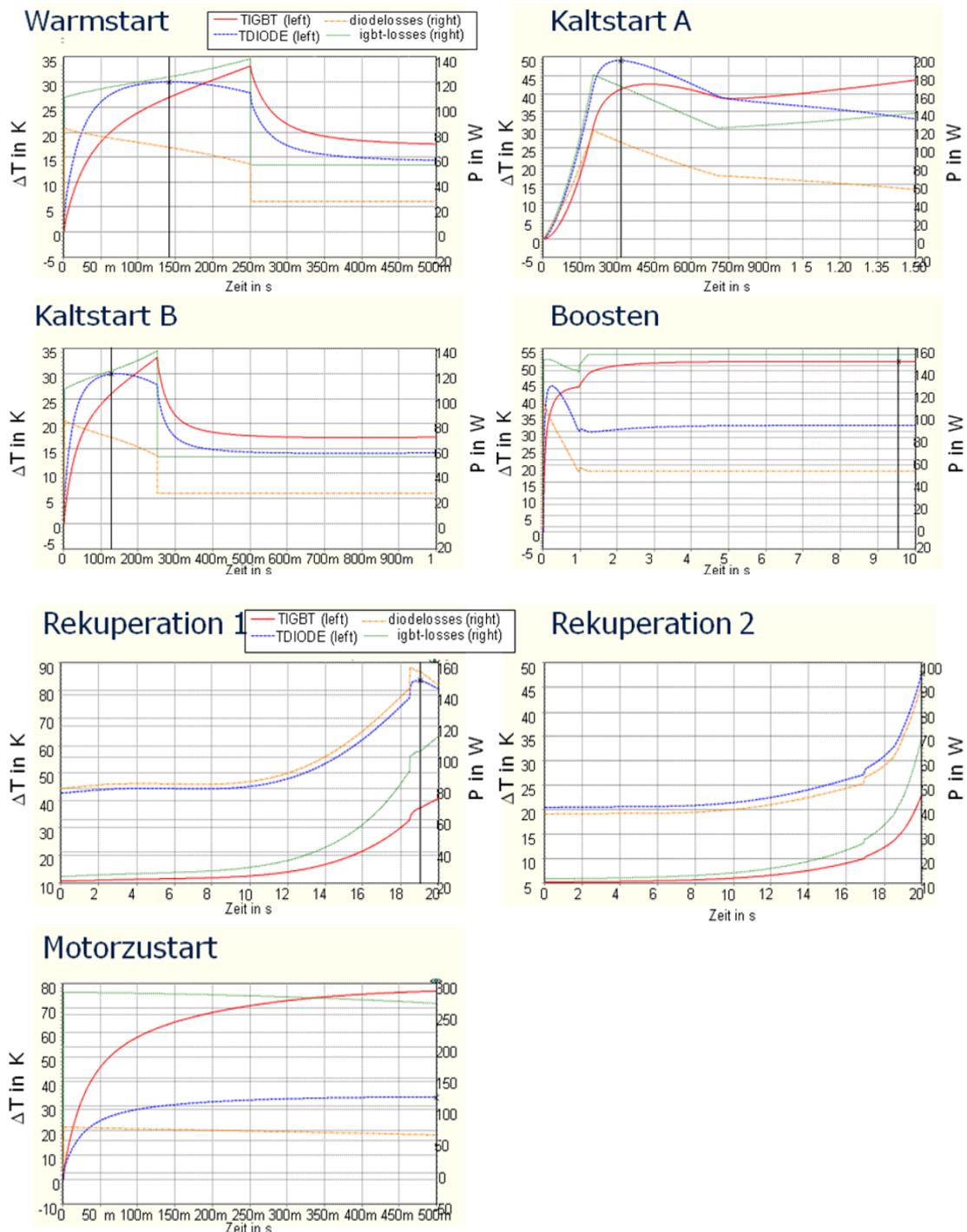


Abbildung 16: Verlustleistung und exemplarischer Temperaturverlauf für direkte Wasser/Glykolkühlung mit 200A Chipbestückung bei unterschiedlichen Belastungsarten

Abbildung 16 zeigt exemplarische für eine 200A Chipbestückung den Verlustleistungsverlauf für die verschiedenen Belastungsvarianten.

Zudem sind für die direkte Wasser/Glykolkühlung die Temperaturhübe auf den Halbleitern dargestellt. Der größte Temperaturhub auf dem IGBT wird im Motorzustart erreicht. Die Dioden sehen die größte Temperaturbelastung bei Belastung Rekuperation 1. Über die Gesamtbetriebsdauer treten die Belastungsfälle in unterschiedlicher Häufigkeit auf.

Kühlmittel	Belastungs-dauer in s	Chip-variante	Boosten		Kaltstart_A_Tiempertemperatur		Kaltstart_B	
			IGBT	Diode	IGBT	Diode	IGBT	Diode
			10	10	1.5	1.5	1	1
Wasser	direkt	200	51	44	44	49	33	30
Öl	direkt	200	52	43	46	47	35	28
Wasser	indirekt	200	73	51	50	50	35	30
Öl	indirekt	200	71	48	50	50	35	30
Wasser	direkt	400	27	21	24	20	15	13
Öl	direkt	400	32	21	28	23	20	14
Wasser	indirekt	400	46	40	26	24	15	14
Öl	indirekt	400	44	38	28	24	15	13
geforderte Zyklen			1.5E+5	1.5E+5	1.2E+4	1.2E+4	1.8E+4	1.8E+4

Kühlmittel	Belastungs-dauer in s	Chip-variante	Motorzustart		Rekuperation1		Rekuperation2		Warmstart	
			IGBT	Diode	IGBT	Diode	IGBT	Diode	IGBT	Diode
			0.5	0.5	20	20	20	20	0.5	0.5
Wasser	direkt	200	77	33	41	84	23	48	33	30
Öl	direkt	200	82	34	42	85	24	48	35	28
Wasser	indirekt	200	81	36	63	103	33	57	35	30
Öl	indirekt	200	82	36	60	100	32	56	35	30
Wasser	direkt	400	33	19	29	41	16	24	15	13
Öl	direkt	400	43	21	31	41	19	25	20	14
Wasser	indirekt	400	34	20	48	61	26	34	15	13
Öl	indirekt	400	34	20	45	57	24	33	15	13
geforderte Zyklen			1E+6	1E+6	6E+5	6E+5	2.6E+6	2.6E+6	3.6E+5	3.6E+5

	Delta T > 70K
	Delta T > 40K
	Delta T > 25K
	Delta T < 25K
	Zykluszahl > 0.6 Mio

Tabelle 8: Temperaturbeanspruchung bei unterschiedlichen Belastungsarten vs. geforderte Lastwechsel

In Tabelle 8 sind für alle Modulvarianten die Temperaturhübe für die jeweiligen Belastungsfälle aufgeführt. In der untersten Zeile ist zudem die Häufigkeit der Belastung während der Fahrzeuglebensdauer dargestellt. Temperaturhübe von mehr als 70K sind rot markiert, da mit heutiger Modultechnologie hier nur 100.000 Lastwechsel erlaubt sind (siehe Abbildung 17).

Power Cycling Capability for HybridPACK™ Modules

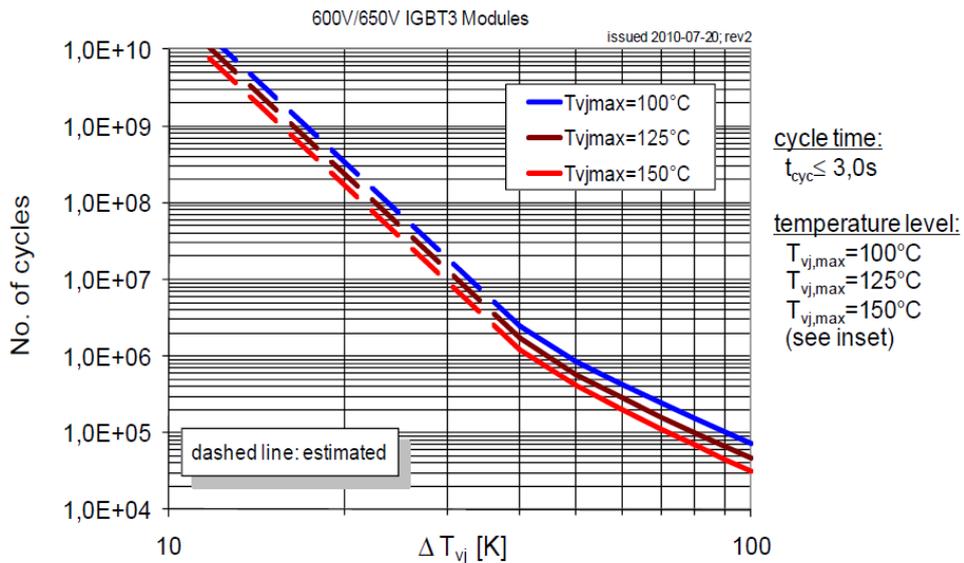


Abbildung 17: Lastwechselfestigkeit von HybridPACK™ Modulen

Eine weitere farbliche Abstufung ist bei 40K. Hier können 1Mio. Lastwechsel mit heutiger Technologie erreicht werden

Basierend auf der in Abbildung 17 dargestellten Lastwechselfestigkeitskurve für 150°C wurde die Lebensduranforderung mit den berechneten Belastungsprofile ermittelt. Eine Kurve für höhere Betriebstemperaturen liegt nicht vor, da heutige Module nicht oberhalb von 150°C Betriebstemperatur spezifiziert sind.

Kühlmittel	Belastungs- dauer in s	Chip- variante	Boosten	Kaltstart_A_ Tiefemperatur		Kaltstart_B		Motorzustart		Rekuperation 1		Rekuperation 2		Warmstart		
				10	10	1.5	1.5	1	1	0.5	0.5	20	20	20	20	0.5
Wasser	direkt	400	2.8%	0.9%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	44.4%	4.0%	11.4%	71.7%	4.3%	28.7%	0.5%	0.3%
Öl	direkt	400	5.6%	0.9%	0.3%	0.1%	0.1%	0.0%	158.1%	5.9%	20.5%	72.5%	8.5%	30.3%	1.5%	0.3%
Wasser	indirekt	400	34.5%	17.3%	0.2%	0.1%	0.0%	0.0%	50.4%	4.3%	168.7%	537.3%	35.8%	131%	0.5%	0.3%
Öl	indirekt	400	26.0%	12.5%	0.3%	0.1%	0.0%	0.0%	51.8%	4.9%	120.0%	405.5%	27.7%	107.4%	0.5%	0.3%

Tabelle 9: Verbrauch der Lebensdauer bei unterschiedlichen Belastungsarten unter Annahme der Lastwechselfestigkeit ohne Berücksichtigung der Warmläufe des Kühlmittels (Berücksichtigung hypothetischer Lebensdauerkurve 150°C)

Die Module mit 200A Chipbestückung erzeugen für alle Varianten zu hohe Temperaturhübe und werden in der Lebensdauerbetrachtung nicht berücksichtigt. Die Indirekte Kühlung erzeugt bei langen Belastungen (Boosten/Rekuperation) sehr große Temperaturhübe. Diese dominieren den Lebensdauerverbrauch. Mit direkter Ölkühlung werden auch bei 400A Chipbestückung relative hohe Temperaturhübe >40K für den Motorzustart erzeugt, da der feinstrukturierte Kühler eine geringe Wärmekapazität und damit eine kleine Zeitkonstante < 0.5 s aufweist.

Kühlmittel	Belastungs- dauer in s	Art	Chip- variante	Verbrauch von Lebensdauer	
				IGBT	Diode
Wasser	direkt	400	64%	106%	
Öl	direkt	400	195%	110%	
Wasser	indirekt	400	290%	690%	
Öl	indirekt	400	226%	531%	

Tabelle 10: Vergleich Lebensdauerverbrauch für unterschiedliche Kühlarten bei gleicher Chipbestückung

In Tabelle 10 ist die Ausnutzung hinsichtlich Lebensdauer infolge der aktiven Belastung dargestellt. Die direkte Wasser/Glykol Kühlung belastet die Module am wenigsten. Eine hinsichtlich Lebensdauer gute Dimensionierung wird erreicht, wenn für die IGBT eine 300 A Bestückung erfolgt. Die direkte Ölkühlung benötigt für die IGBT Dimensionierung eine größere Fläche. Der Kostenvergleich, der für das Modul hinsichtlich der beiden Kühlvarianten durchgeführt wurde, zeigt, dass auch hinsichtlich dieses Aspekts die direkte Kühlung über Wasser/Glykol zu favorisieren ist. Der feinstrukturierte Kühler erfordert deutliche Mehrkosten. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass für die Kühlung des Zwischenkreiskondensators zusätzlicher Aufwand entsteht.

Die Bewertung der Modulkonzepte hinsichtlich der Kühlung ergibt, dass aus Kosten und Chipflächenbedarf die direkte Kühlung mittels Kupfer-PinFin Bodenplatte die günstigste Variante darstellt. Dies zeigen sowohl die Untersuchungen hinsichtlich maximal auftretender Belastung als auch hinsichtlich Lebensdauerbegrenzung durch Lastwechsel.

Hinsichtlich der Motorzustartanforderung ist eine Wasserkühlung aufgrund größerer Wärmekapazität der Bodenplatte vorteilhafter als die Ölkühlung.

Für die Anforderungen im Efa Projekt ist direkte Wasserkühlung mit 300A IGBT-Fläche und 400A Dioden Fläche anzustreben.

Die Kupferbodenplatte wird zudem benötigt, um Kühlung im Warmlauf des Verbrennungsmotors bei geringer Last zu ermöglichen. Bis zu einer Kühlmitteltemperatur von 92°C bleibt die elektrische Wasserpumpe ausgeschaltet, um nicht vorzeitig Wärme aus dem Motor abzuführen. Es gibt dann keine Durchströmung durch die Leistungselektronik [11]. In

Abbildung 18 ist zu sehen, dass auch in diesem Fall durch die Wärmekapazität der Bodenplatte und des Kühlers keine kritische Temperatur entsteht. Die Simulationen, die durch Messungen verifiziert wurden, zeigen, dass der Temperaturanstieg unterhalb 80K liegt.

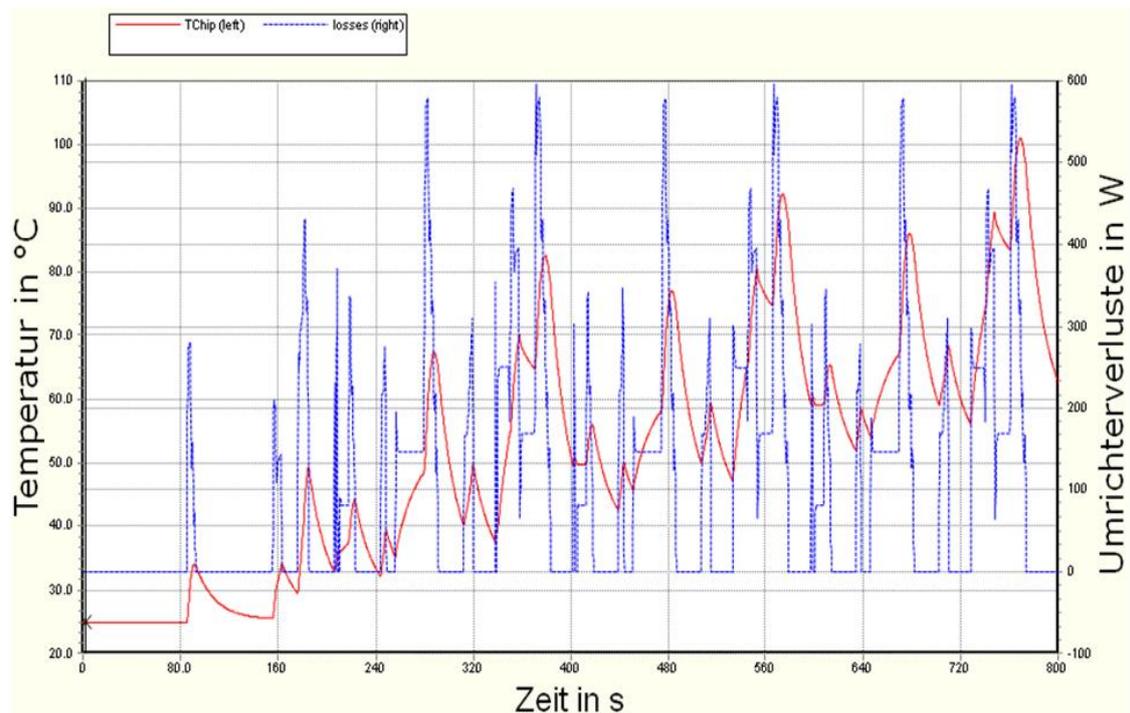


Abbildung 18: Simulierter Temperaturverlauf im KV01 Fall bei stehendem Kühlmittel

Die Untersuchungen zeigen, dass für die Erreichung der Lebensdauer eine Verbesserung der Aufbautechnologie erforderlich ist. Die aktive Belastung nutzt bereits die Lebensdauer heutiger Technologie aus. Zusätzliche Belastungen durch die Warmlaufanforderungen des Verbrennungsmotors erfordern eine Erhöhung der Zuverlässigkeit der Chipaufbautechnologie (Drahtbond/Chiplötung), die die Lastwechselfestigkeit hinsichtlich aktiver Lastwechsel begrenzt.

5.2.2 Auswahl Basistechnologien

In Abbildung 19 sind die Warmlaufanforderungen des Verbrennungsmotors über der Betriebsdauer des Fahrzeugs aufgeführt. Der Lebensdauerverbrauch, der alleine durch den Temperaturhub im Kühlmittel auftritt, ist für ein Modul mit AlSiC Bodenplatte berechnet.

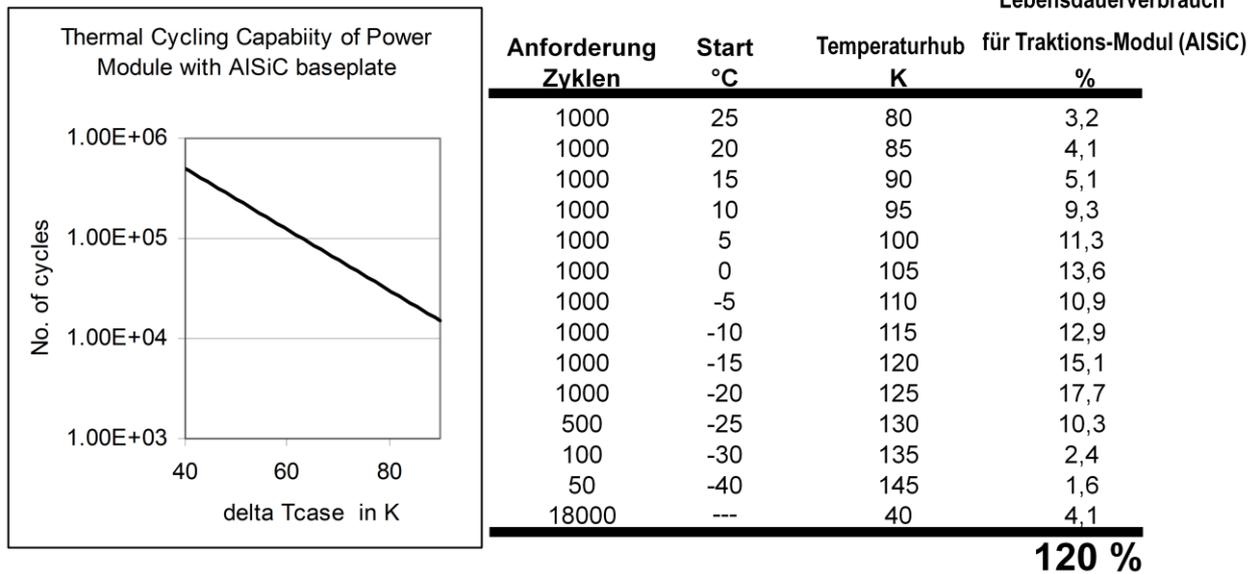


Abbildung 19: Lastwechselanforderungen aus Warmläufen und Abkühlen des Verbrennungsmotors vs. Lebensdauerverbrauch für Traktionsmodul mit AlSiC Bodenplatte und High Performance Keramik

Alleine die Warmlaufanforderungen, ohne Berücksichtigung aktiver Belastungen, übersteigen die Thermal Cycling Lastwechselfestigkeit eines heutigen Moduls mit dem thermomechanisch angepassten Bodenplattenmaterial.

Eine Verbesserung der Verbindung zwischen Bodenplatte und DCB-Keramik ist daher erforderlich, insbesondere wenn kostengünstigere Bodenplattenmaterialien und Keramiken eingesetzt werden sollen. Im Rahmen des EfA Projekts wird daher die Niedertemperaturverbindungstechnik hinsichtlich dieser Verbindung bei Einsatz von Kupferbodenplatten mit Al₂O₃-Keramiken untersucht. Vergleichend werden verbesserte Lötungen bei Verwendung gleicher Bodenplattenmaterialien und Keramik untersucht.

Für die Chipverbindungstechnik wurde die Niedertemperaturverbindungstechnik in Voruntersuchungen ebenfalls betrachtet. Aus Synergiegründen wird für die Modulaubauten jedoch das in [10] im Rahmen des InGA Projekts untersuchte Diffusionslötten und verbesserte Bonddrähte und Chipmetallisierung eingesetzt. Die Verbesserung der Chipaufbautechnologie ist insbesondere deshalb notwendig, um die Betriebstemperatur zu erhöhen.

Die Bauraumuntersuchungen zeigen, dass hier ein Rahmenkonzept des HybridPACK™ 1, verwendet werden kann, das auch hinsichtlich der Vibrationsanforderungen vorteilhaft ist. In das Modul werden neben den IGBT- und Dioden Bauelemente Stromsensoren in Form von Siliziumshunts integriert (siehe Abschnitt 5.4).

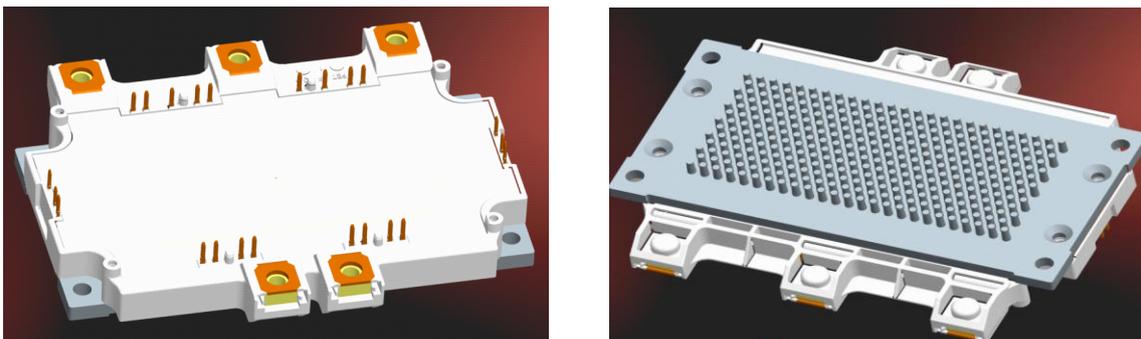


Abbildung 20: Direktgekühltes Leistungsmodul mit PinFin Kühlstruktur

5.3 Kühlung (WP3)

Eine Effektive Direktkühlung ermöglicht eine erhöhte Verlustleistung bevor die maximale Chiptemperatur erreicht wird. Damit die Kühlmittelpumpe keinen erhöhten Leistungsbedarf hat und das Kühlsystem des Verbrennungsmotors nicht beeinflusst wird, darf diese Kühlung keinen relevanten zusätzlichen Druckabfall verursachen. Ziel der Arbeiten im Bereich Kühlung ist, das Kühlsystem bestehend aus direktgekühlten Leistungsmodul und dem Kanal so zu optimieren, dass die Anforderungen erreicht werden können. Die Anhebung der maximalen Betriebstemperatur von 150°C auf 175°C bis 200°C erlaubt deutlich mehr Verlustleistung abzuführen, wenn die Kühlmitteltemperatur bereits 125°C, bedingt jedoch eine exakte Kenntnis der Performance des Kühlsystem, da die Leistungshalbleiter im physikalischen Grenzbereich betrieben werden. Dazu wird neben Simulationen ein Flüssigkeitsprüfstand aufgebaut, der es erlaubt das Kühlsystem zu evaluieren, bevor eine Integration ins Getriebe bzw. in Fahrzeug erfolgt.

5.3.1 Prüfstand zur Untersuchung der Kühleigenschaften

Nachfolgend ist das Konzept des Flüssigkeitsprüfstandes dargestellt. Der Prüfstand enthält einen geschlossenen Wasser/Glykol Kühlkreislauf, dessen Temperatur geregelt wird. Über eine Heizung sowie einen Wärmetauscher, der an das Prozesswasser angeschlossen wird, lässt sich die Temperatur variabel steuern.

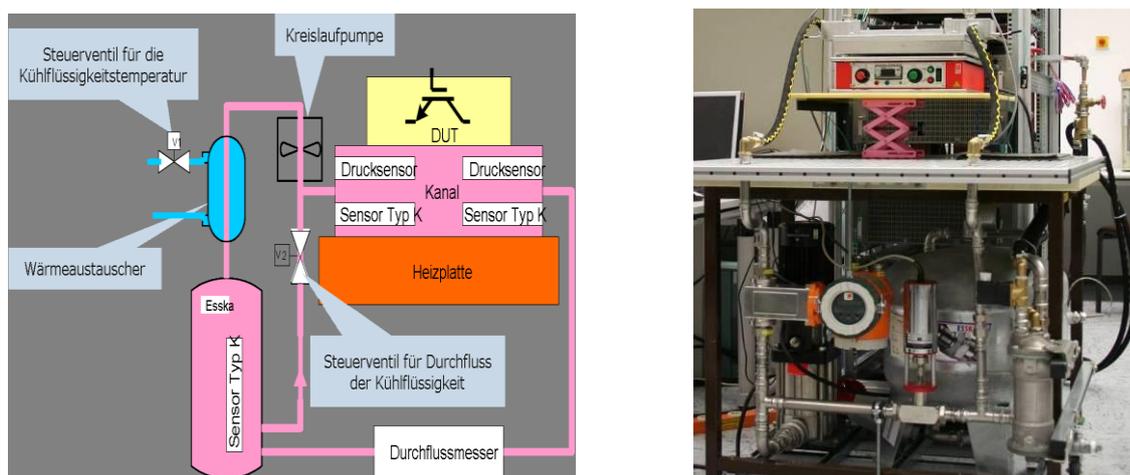


Abbildung 21: Funktionsblockdiagramm und Aufbau des Prüfstands

Der Durchfluss kann ebenfalls eingestellt werden und der Druckabfall sowie Ein- und Auslasstemperatur werden erfasst. Die Steuerung der Stromquellen sowie Messung der Ströme und Spannungen an einzelnen Bauelementen wird über ein PC-Meß und Steuerkarte erfasst. Der Aufbau ist geeignet, um das Verhalten auch bei hoher Kühlmitteltemperatur zu untersuchen. Die Dichtigkeit des Kühlers unter hohem Druck und hoher Temperatur konnte so auch untersucht werden. Abbildung 22 zeigt eine detaillierte Darstellung mit den Schnittstellen im System.

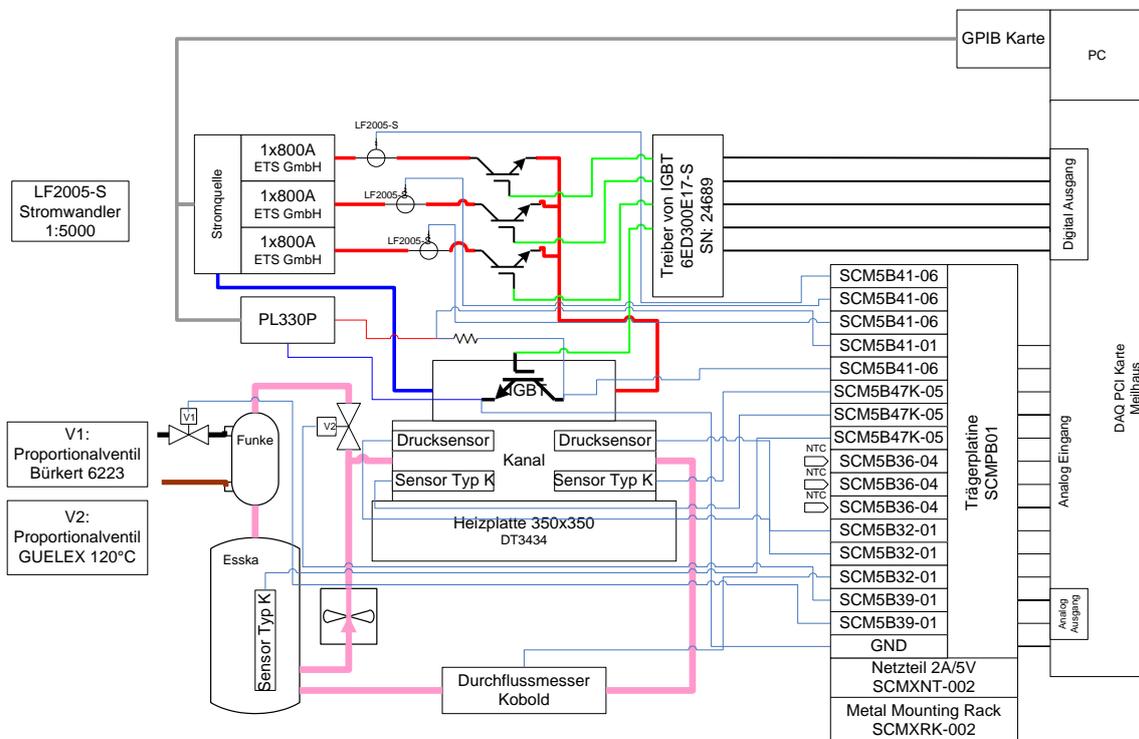


Abbildung 22: Detailstruktur des Prüfstands zur Untersuchung der Kühlleistungen

Die Untersuchung der Kühlsysteme erfolgte zu verschiedenen Phasen des Projekts und Messergebnisse wurden genutzt, um das thermische System hinsichtlich Druckabfall und Kühlperformance zu optimieren.

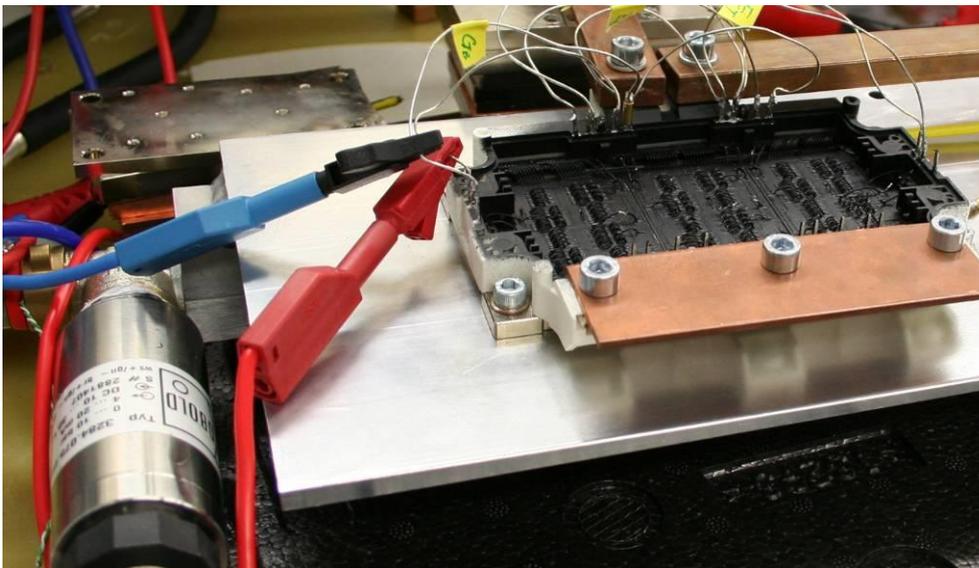


Abbildung 23: Kühleraufbau zur Untersuchung des thermischen Verhaltens

Abbildung 23 zeigt beispielhaft den Kühler der Leistungselektronik 1, an dem Untersuchungen zur Dichtigkeit und dem Druckabfall und thermische Verhalten durchgeführt worden. Um Temperaturverteilung bzw. Bereich zu detektieren, in denen das Kühlmittel sich staut, wurde die Temperaturverteilung mittels Infrarotmessung aufgenommen.

5.3.2 Simulationen und Messungen zum Kühlsystem

In Abbildung 24 links ist die PinFin Bodenplatte des direktgekühlten Leistungsmoduls dargestellt. Das Modul wird in einem Kühler montiert. Hinsichtlich der Integration in den Kühlkreislauf sind entsprechend der Bauraumanforderungen nur beschränkt Optimierungen des Kühlers möglich.

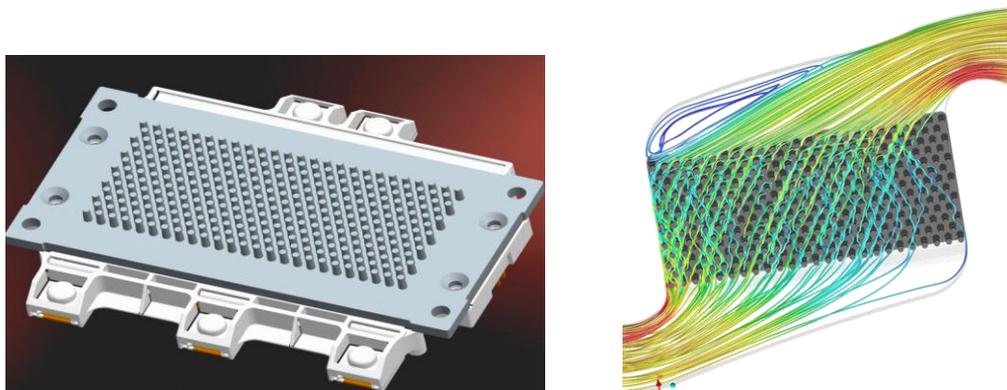


Abbildung 24: Stromlinienverteilung als Ergebnis von CFD Simulationen einer PinFin Kühlstruktur

Mit CFD Simulationen wurde beim Projektpartner ZF unter diesen Randbedingungen die optimale Anströmung der PinFin Struktur ermittelt.

Abbildung 24 rechts zeigt beispielhaft die Strömungslinien, wenn das Modul über die Längsseite angeströmt wird und Ein- und Auslaufbereich neben den kurzen Seiten des Moduls liegen. Unterhalb der PinFin Struktur entstehen Bereiche, in denen nahezu kein Kühlmittelstrom fließt. Dies kann zu einer lokalen Überhitzung des Moduls führen.

Verschiedene Kühlvarianten wurden simuliert. Abbildung 25 links zeigt die Temperaturverteilung eine Variante in der das Modul an der kurzen Seite angeströmt wird. Hier entsteht ein erhöhter Druckabfall.

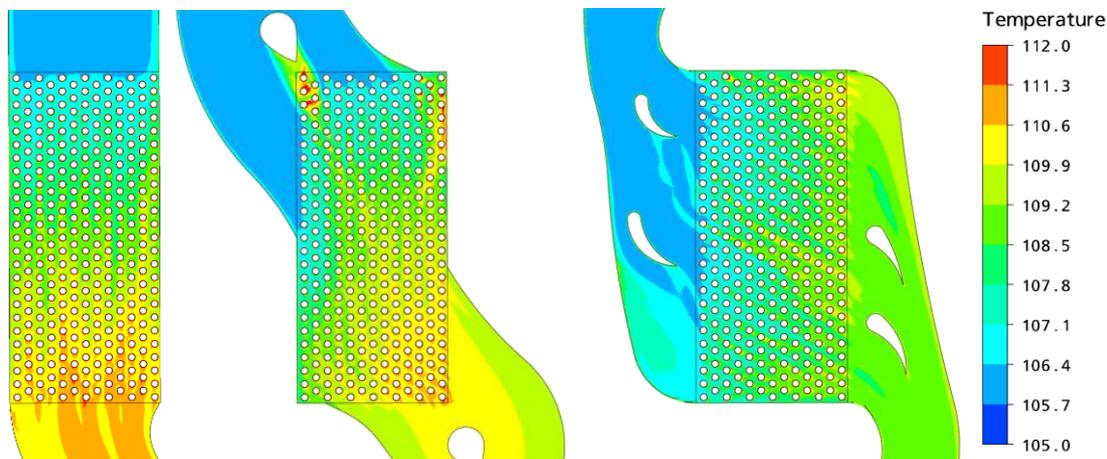


Abbildung 25: Optimierung des Kühlers mittels CFD-Simulationen: Querangeströmte Variante (rechtes Bild) ergibt optimale Temperaturverteilung bei geringstem Druckabfall von 20mbar bei 6l/min Durchfluss (Quelle: ZF)

Die diagonale Anströmung, Abbildung 25 mittig, führt zu einem etwas geringeren Druckabfall, erzeugt jedoch in Randbereichen erhöhte Temperaturen. Die Queranströmung in Abbildung 25 rechts mit integrierten Strukturen im Einlauf und Auslaufbereich erzeugt den geringsten Druckabfall und eine relativ homogene Temperatur über dem gesamten Modul.

Druckabfall vs. Durchfluss bei 20°C

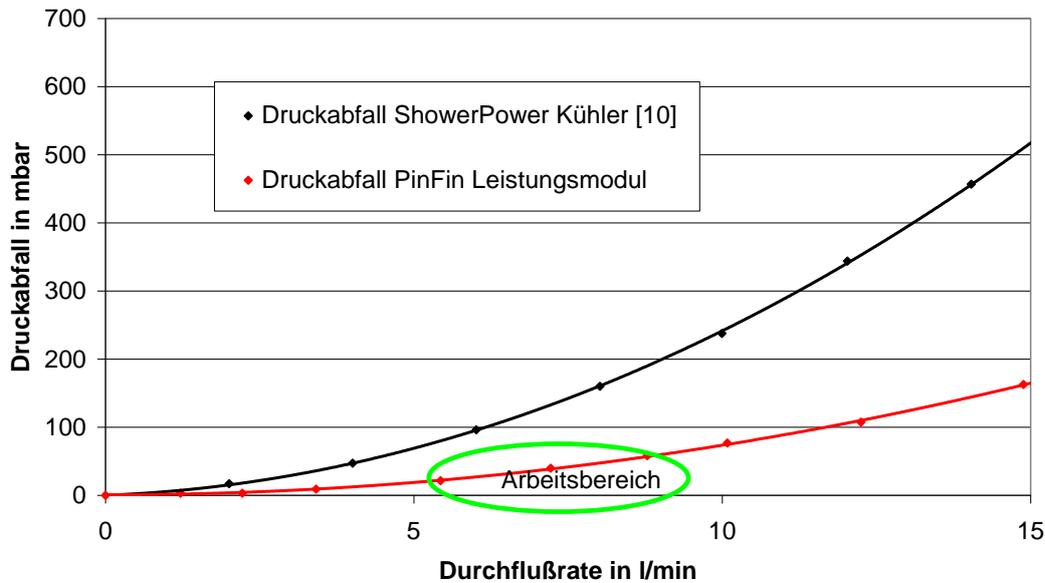


Abbildung 26: Messung des Druckabfall des direktgekühlten PinFin Leistungsmoduls im Vergleich zu einem Modul auf ShowerPower Kühler

Die mittels CFD-Simulationen optimierte Variante wurde umgesetzt und der Druckabfall abhängig von der Durchflußrate simuliert.

Abbildung 26 zeigt den gemessenen Druckabfall im Vergleich zu einem ShowerPower Kühler, bei dem die Kühlstruktur im Kühler realisiert ist [14]. Der mittels Simulation ermittelte Druckabfall von 20mbar bei 6 l/min lässt sich auch in den Messungen am Kühler bestätigen. Die Struktur erlaubt daher bei einer Variation des Kühlmittelstroms bis zu 12l/min einen Druckabfall kleiner 100mbar, ein ShowerPower Kühler hat hier schon einen Druckabfall von 350mbar.

Die Ergebnisse der CFD-Simulationen werden verwendet, um die Wärmeübergangseigenschaften des Leistungsmoduls zu ermitteln und damit ein präzises thermisches Modell für die Systemauslegung zu entwickeln. Abbildung 27 zeigt das Simulationsergebnis bei Bestromung der IGBT und Diodenbauelemente.

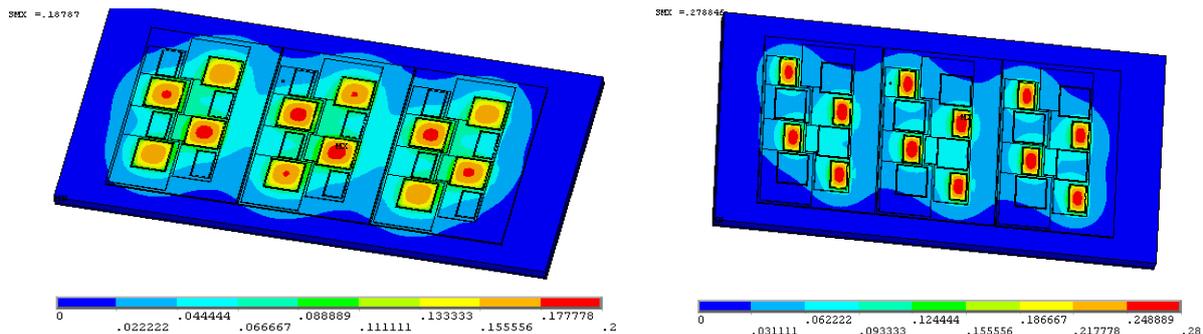


Abbildung 27: Simulation des thermischen Widerstands für Belastung von IGBTs (links) und Dioden (rechts)

Aufgrund der Direktkühlung wird die Wärme sehr lokal an das Kühlmittel abgeführt. Zur Verifikation der thermischen Simulationen wurde das Leistungsmodul mittels Infrarotaufnahmen thermisch charakterisiert. Abbildung 28 zeigt die Temperaturverteilung bei Bestromung aller IGBTs und aller Dioden. Die Messungen zeigen nur geringe Abweichungen zu den Simulationen.

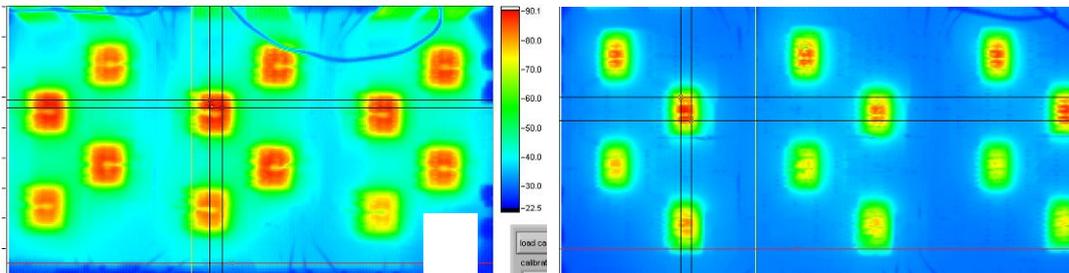


Abbildung 28: Infrarotaufnahmen bei Bestromung der IGBTs (links) und der Dioden (rechts) (Einspeisung unterschiedlicher Verlustleistungen)

In Abbildung 29 ist die Temperaturverteilung für die IGBTs bei unterschiedlichen Kühlmittelströmen dargestellt. Infolge der guten Wärmeabfuhr der PinFin Bodenplatte gibt es ab einem Kühlmitteldurchfluss von ca. 6 l/min nur noch geringe Veränderungen im thermischen Widerstand. Danach dominiert der thermische Widerstand der DCB- Keramik.

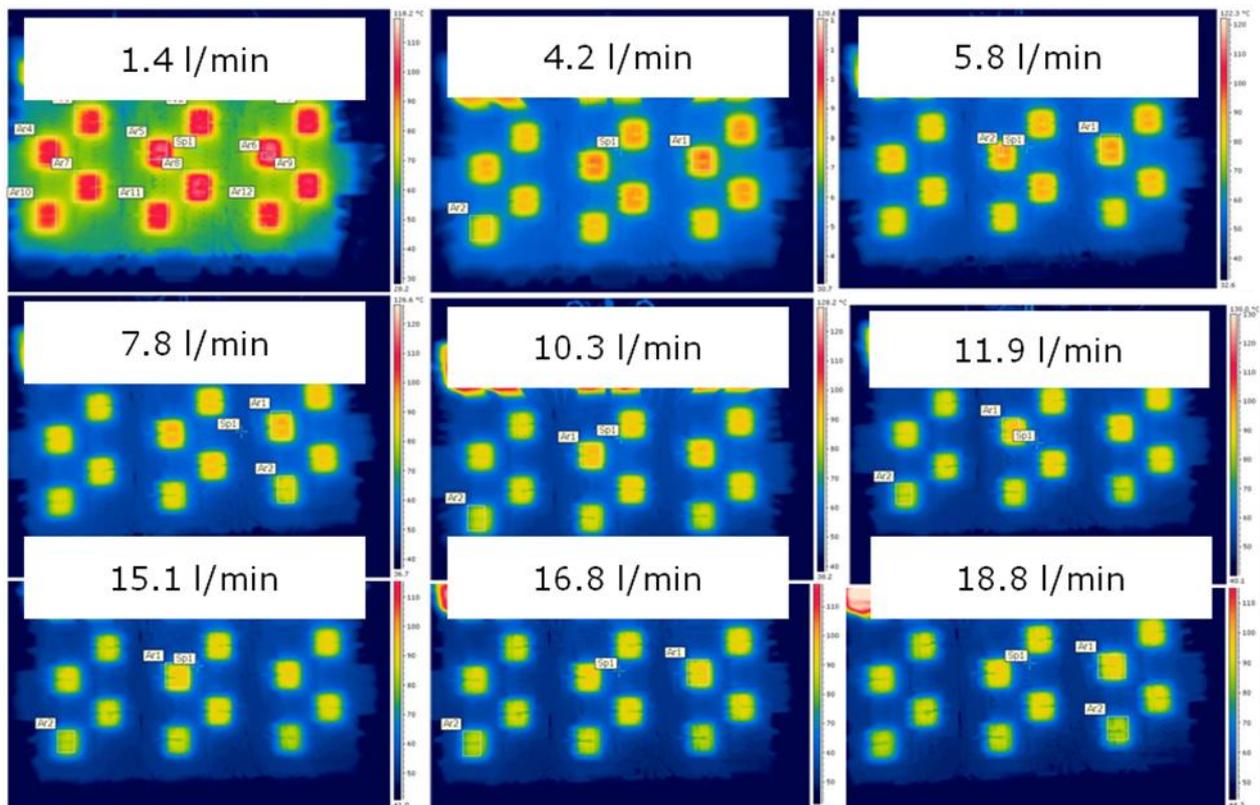


Abbildung 29: Infrarotaufnahmen bei Bestromung der IGBTs bei unterschiedlichen Kühlmittelströmen

Die Wärmespreizung um den IGBT erfolgt in nur einem kleinen Bereich. Daher ist die Kopplung zwischen IGBT und den Dioden nur gering

Thermischer Widerstand in Abhängigkeit vom Kühlmittelstrom (Wasser/Glykolgemisch 50/50)

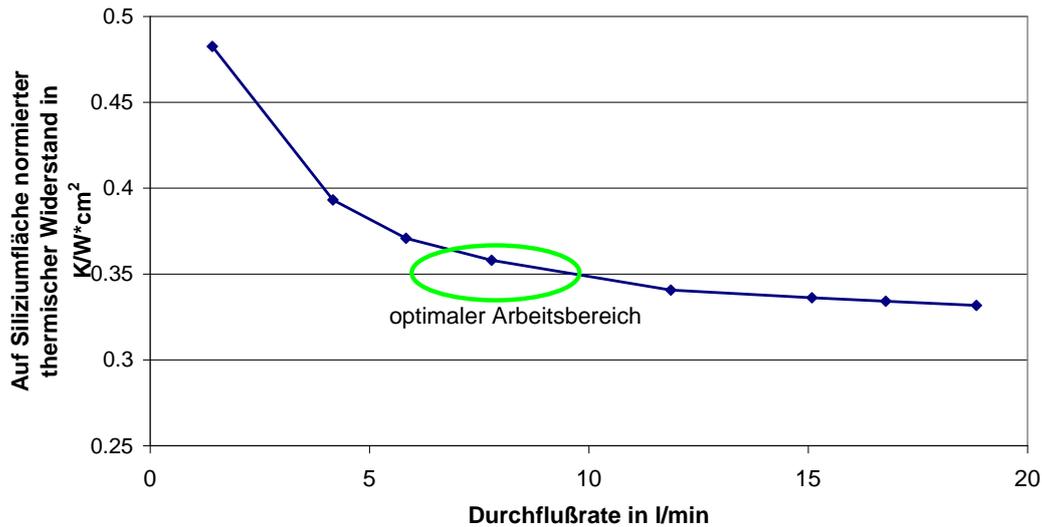


Abbildung 30: Auf Siliziumfläche normierter thermischer Widerstand des direktgekühlten Pin Fin Leistungsmodul in Abhängigkeit vom Kühlmittelstrom

Aus den Infrarotmessungen wurde der Chip mit maximaler Temperaturbelastung ermittelt. Für diesen Chip ist der auf die Siliziumfläche normierte thermische Widerstand in Abhängigkeit vom Kühlmittelstrom in Abbildung 30 dargestellt. Ab einer Durchflußrate von 8l/min verringert sich der thermische Widerstand nur noch um ca. 10%. Eine deutliche Erhöhung des Kühlmittelstroms führt dann nur noch zu einem erhöhten Druckabfall. Eine weitere Verbesserung des thermischen Widerstands ist dann nur noch durch Verwendung teurer Keramiken mit verbesserter Wärmeleitfähigkeit und durch beidseitige Kühlung möglich.

In den Abbildungen 31 sind die transienten thermischen Widerstände des IGBT für unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten dargestellt. Bis zu einer Zeit von ca. 1 Sekunde wird der transiente thermische Widerstand nicht durch die Strömungsgeschwindigkeit beeinflusst, da die thermische Kapazität der Bodenplatte wirksam ist. Die stationären Widerstände liegen im Bereich der für die Auslegung verwendeten Daten. Wie auch aus den Infrarotaufnahmen zu erkennen ist, nimmt die thermische Kopplung zwischen den Bauteilen ab einem Durchfluss von 4l/min stark ab.

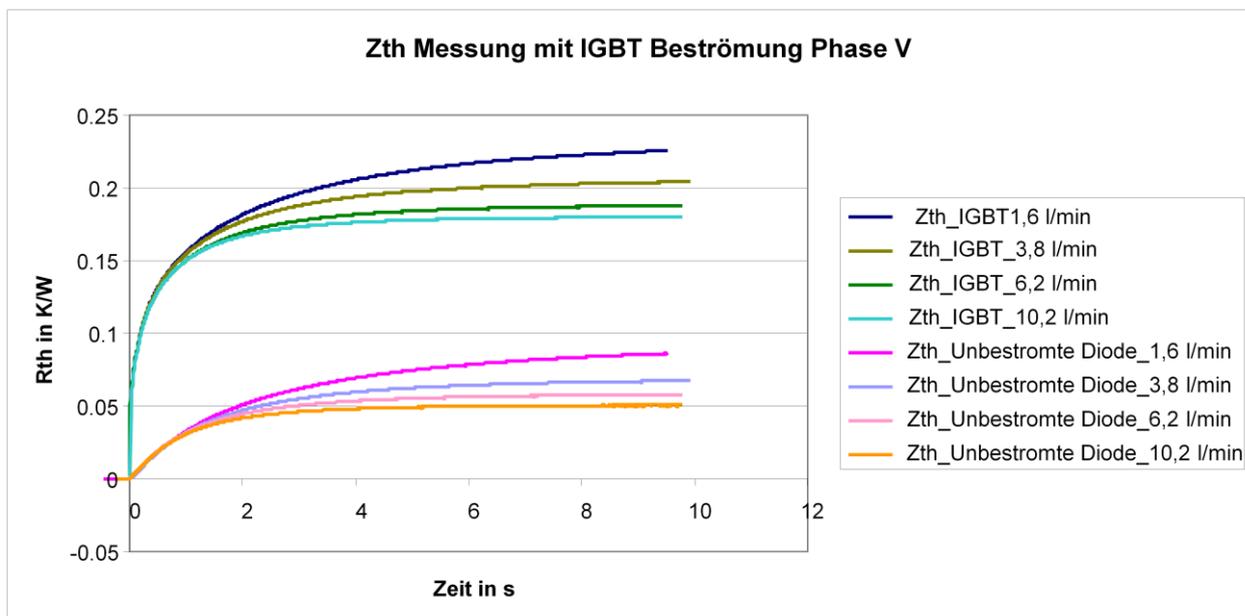


Abbildung 31: Transienter thermischer Widerstand bei Bestromung der IGBTs bei unterschiedlichen Kühlmittelströmen und Kopplung auf Dioden

Der Vergleich mit den für die Auslegung verwendeten transienten thermischen Modellen zeigt eine gute Übereinstimmung, was die optimierte Gestaltung der Kühlung bestätigt.

5.4 Strommessung Silizium-Shunt (WP3)

Die Bauraum und Umwelthanforderungen erfordern eine kompakte und hochtemperaturtaugliche Lösung für die Strommessung. Es eignen sich prinzipiell zwei Strommessmethoden für die Hochtemperaturstrommessung.

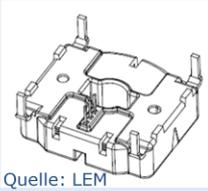
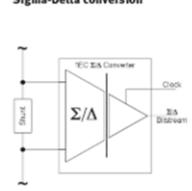
■ Eigenschaften Hall-Effekt- Wandler	■ Eigenschaften Shunt / Σ - Δ -Wandler
<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Störeinkopplung nach Wandlung auf Analogsignal möglich <input type="checkbox"/> Bandbreite typisch 20~30kHz <input type="checkbox"/> Phasengang PT1 Verhalten <input type="checkbox"/> Erheblicher Bauraumbedarf 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> mittels Filter gewandeltes Signal wird störungsarm digital übertragen <input type="checkbox"/> >30kHz bei maximaler Auflösung (abhängig von Einstellung des digitalen Filters) <input type="checkbox"/> konstante Gruppenlaufzeit der Sinc3 Filterung \rightarrow Phase ist linear proportional zur Grundschwingungsfrequenz, bei Rekonstruktion der Flussvektorlage sehr einfach zu kompensieren <input type="checkbox"/> Kompensation Temperaturabhängigkeit Shunt über Modultemperaturmessung <input type="checkbox"/> Nahezu kein Bauraumbedarf
 <p>Quelle: LEM</p>	 <p>Sigma-Delta conversion</p> <p>1EC coreless transformer Sigma/Delta IC \rightarrow Galvanische Trennung \rightarrow Programmierbare Überstromerkennung \rightarrow 10 MHz Σ-Δ + Analogausgang</p> 

Abbildung 32: Vergleich Strommessung mit Shunt vs. Strommessung mit Hall-Effekt Wandler

In Abbildung 32 werden die beiden Strommessprinzipien: Messung über Hall-Effekt-Wandler und Messung über Shunt verglichen. Die Strommessung weist hinsichtlich der Filterung und der Störempfindlichkeit bei Verwendung eines Sigma-Delta A/D Wandler Vorteile auf und bietet über den sehr geringen Bauraumbedarf eine einfache Möglichkeit zur Integration. Abbildung 33 zeigt die Anwendung eines modulintegrierten Shuntwiderstands für Module in Starter/Generator Anwendung. Es sind hier flache steife Metallshunts verwendet worden.

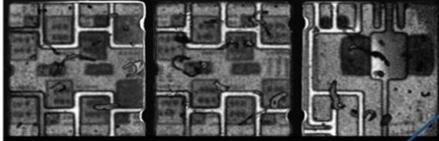
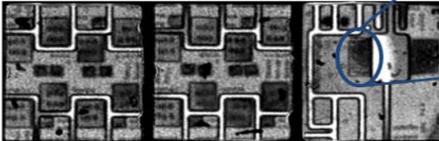
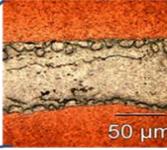
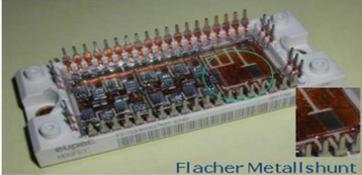
<p>Ohne Betriebsbelastung</p> <p>8 Jahre Betrieb 180.000 km</p> <p>Alle Funktionen i.O.</p> <p>Shunt 200A Dauer 900A Spitze</p>	 	<p>Riss in Shuntlötung</p>  <p>50 μm</p> <p>Keine Schädigung der IGBT/Dioden AVT</p>
	 <p>Flacher Metallshunt</p>	

Abbildung 33: Untersuchung an flachen Metall-Shunts in MOSFET Modul nach Fahrzeugbetrieb

Es wurden Module aus Prototypenanwendungen nach 8 Jahren Betriebszeit ohne Ausfall analysiert. Das Modul war in einem PkW mit separatem Kühlkreislauf für die Leistungselektronik verbaut, das 180.000 km Fahrleistung hatte. Die Ultraschallanalyse zeigt, dass die Lötverbindung des Shunts Anrisse zeigt, wogegen die Aufbautechnik der Siliziumbauelemente keine Alterungserscheinungen zeigt. Eine Kühlung integrierter flacher steifer Metallshunts am Verbrennungsmotorkühlkreislauf ist nicht möglich, da die Anforderungen an die Aufbautechnik wesentlich steigen.

Ziel ist es daher einen modulintegrierten Shunt auf Basis von Silizium zu erforschen, der die gleiche Aufbautechnik wie IGBTs und Dioden verwenden kann.

Der Vorteil von Silizium ist dabei, dass über eine geeignete Dotierung der Widerstandswert eingestellt werden kann und das Silizium dann in vertikaler Richtung bestromt werden kann. Der Nachteil liegt in der starken Temperaturabhängigkeit des Widerstandes. Untersuchungen an hochohmigen Siliziumwiderständen zeigten, dass dieser Temperaturgang durch Elektronenbestrahlung kompensiert werden kann (siehe Abbildung 34).

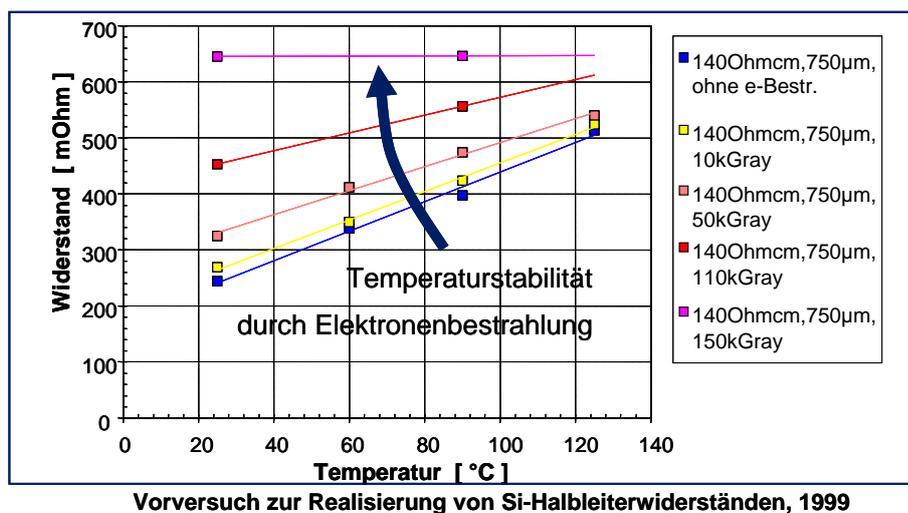


Abbildung 34: Untersuchung zu Einfluss der Elektronenbestrahlung an hochohmigen Siliziumwiderständen

Der Einfluss auch bei hoher Dotierung soll untersucht werden, um den Einfluss der Elektronenbestrahlung für Shunts zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurden hochdotierte Siliziumwafer elektronenbestrahlt und zu Meßzwecken auf Testsubstraten aufgebaut.

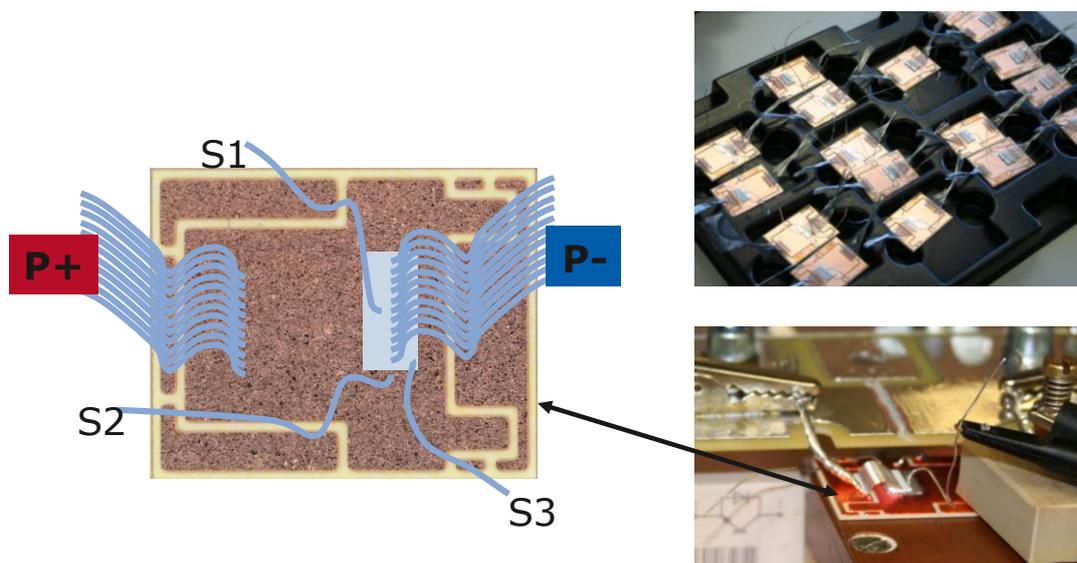


Abbildung 35: Testsubstrate zur Untersuchung der Si-Widerstände

Abbildung 35 zeigt das Testsubstrat, das es erlaubt unter Hochstrombelastung die Eigenschaften der Siliziumwiderstände zu messen. Das Silizium wird dabei vertikal bestromt.

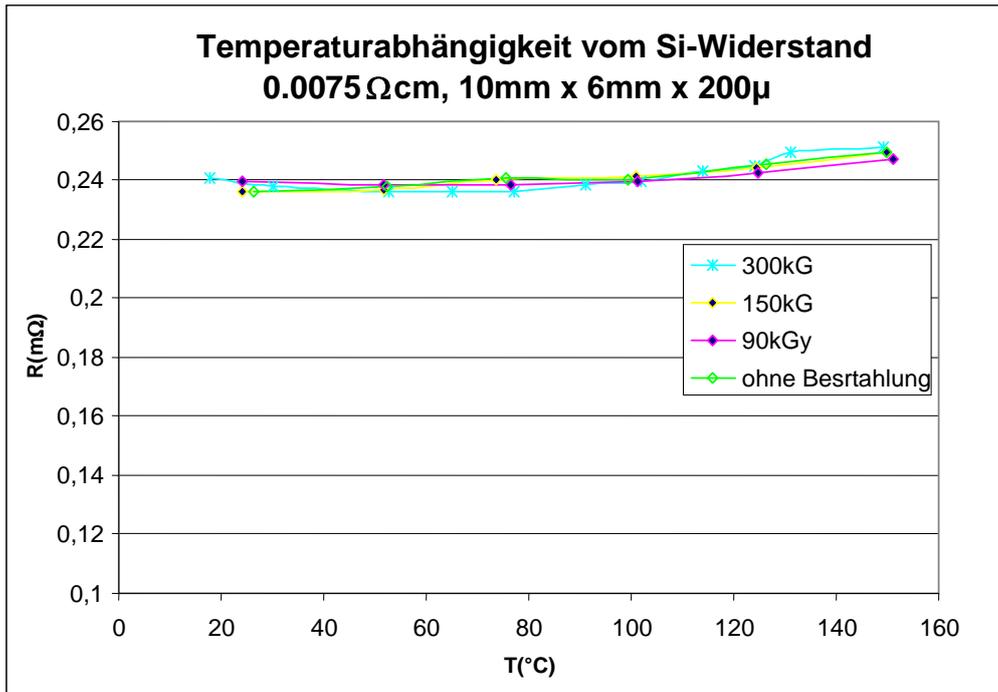


Abbildung 36: Einfluss der Elektronenbestrahlung auf den Temperaturgang

Die Messungen zeigen, dass der Temperaturgang durch Elektronenbestrahlung bei hochdotierten Wafern nicht wesentlich beeinflusst werden kann. Abbildung 36 zeigt, dass auch eine hohe Strahlendosis von 300kG hier keine große Änderung bewirkt. Der Temperaturgang ist jedoch nur sehr gering und zeigt im Bereich von 20°C bis 100°C nur sehr kleine Änderungen des Widerstands.

Die Kompensation des Temperaturgangs erfolgt durch die hohe Dotierung. Wie in Abbildung 37 dargestellt ist, bewirkt die Störstellenstreuung eine entgegengesetzte Temperaturabhängigkeit wie die Kristallgitterstreuung. Bei Dotierungen von 10^{19} wird dadurch über einen großen Temperaturbereich die Abhängigkeit des Widerstands von der Temperatur minimiert.

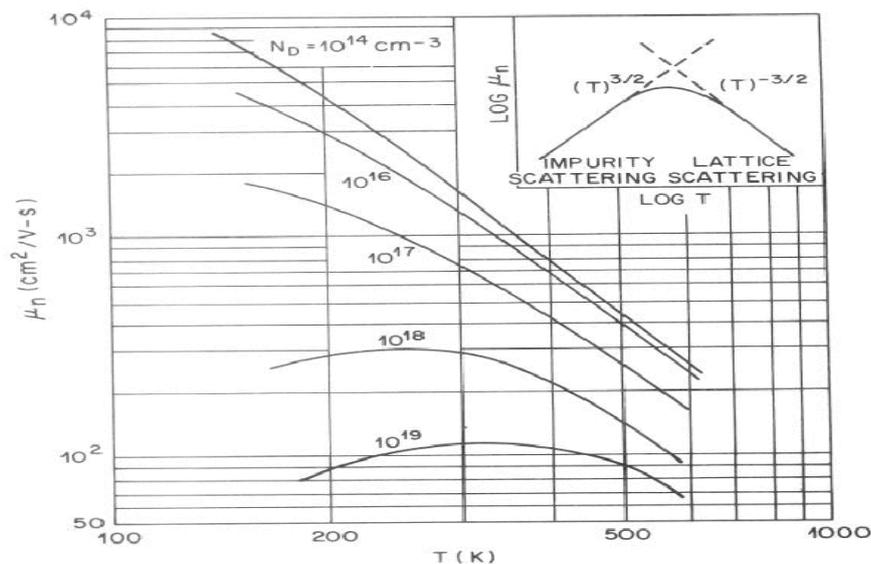


Abbildung 37: Einfluss der Dotierung auf Elektronenbeweglichkeit aus [15]

Die geringe Temperaturabhängigkeit erlaubt eine Kompensation über die interne Temperaturmessung des Leistungsmoduls. Für einen großen Arbeitsbereich ist der Temperaturgang zudem nicht signifikant.

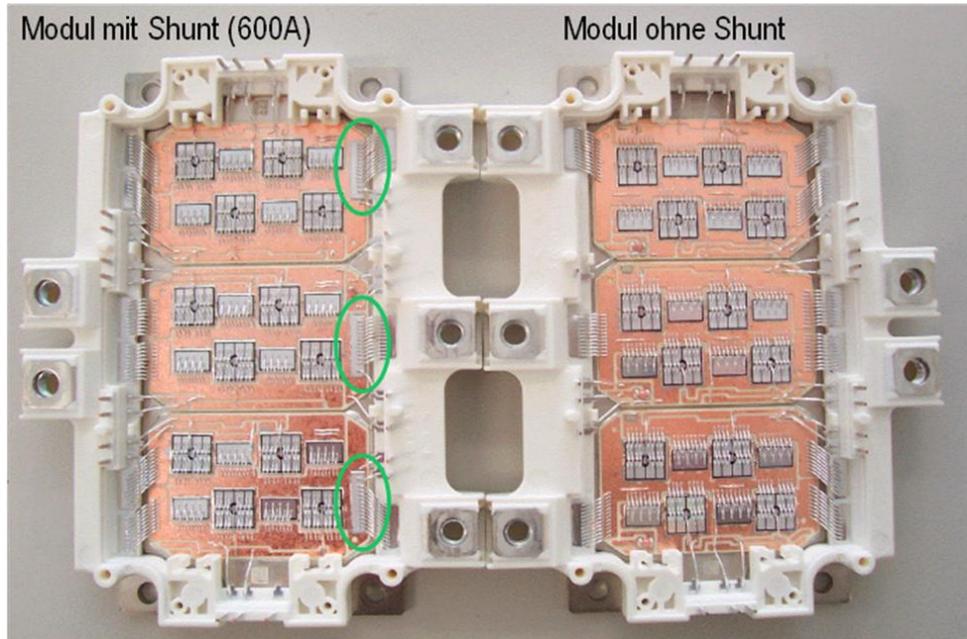


Abbildung 38: Vergleich Modul mit integrierten Shunts vs. Modul ohne Shunts

In Abbildung 38 ist das Modul mit integrierten Shunts zu sehen. Die Siliziumshunts werden oberseitig direkt mit den Bonddrähten zum Phasenausgang verbunden. So können die Siliziumshunt ohne zusätzlichen Flächenbedarf im Modul integriert werden. Die Dimensionierung des Widerstands erfolgt so, dass nur ein geringer Temperaturhub auf den Siliziumwiderständen entsteht und so die Stromtragfähigkeit der Anschlüsse nicht reduziert wird.

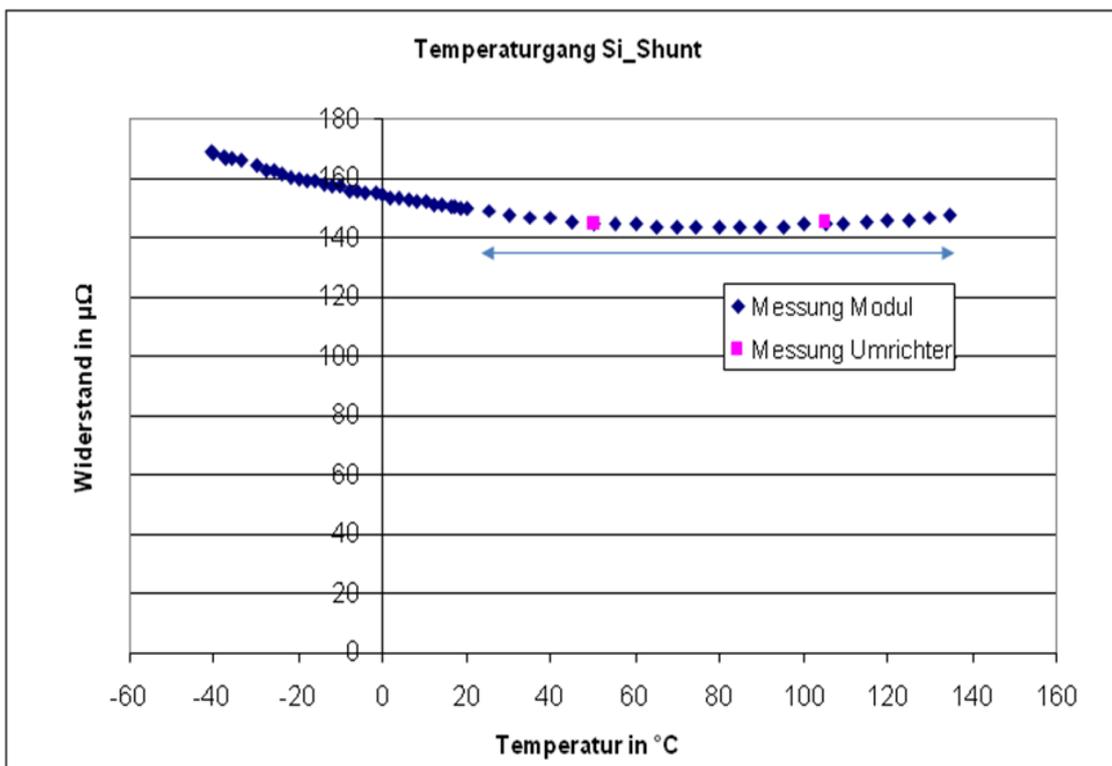


Abbildung 39: Temperaturgang eines im Modul integrierten Shunts mit ~200µm Dicke

Der Temperaturgang des modulintegrierten Siliziumshunts wurde, wie in Abbildung 39 und 40 dargestellt wird, für unterschiedliche Chipdicken gemessen und durch Messungen am Umrichter bestätigt. Für sehr niedrige Widerstandswerte von $160\mu\Omega$ liegt das Widerstandsminimum bei ca. 70°C , bei einer größeren Chipdicke, und damit einem höheren Widerstandswert verschiebt sich das Minimum auf niedrige Werte von ca. 40°C . Dies ist auf einen Anteil vom DCB-Kupfer zurückzuführen, auf den der Chip gelötet wird, dessen positiver Temperaturkoeffizient sich bei sehr niedrigen Widerstandswerten überlagert.

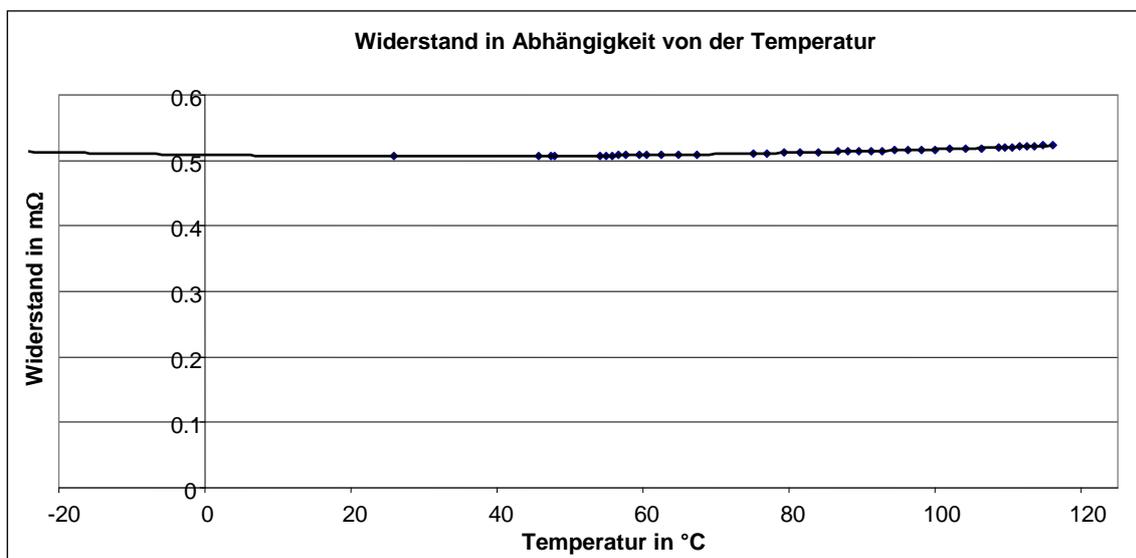


Abbildung 40: Temperaturgang eines im Modul integrierten Shunts mit $\sim 600\mu\text{m}$ Dicke

Für die Module wurden Widerstandswert von $200\mu\Omega$ und $400\mu\Omega$ eingesetzt, die beide einen sehr geringen Temperaturgang aufweisen.

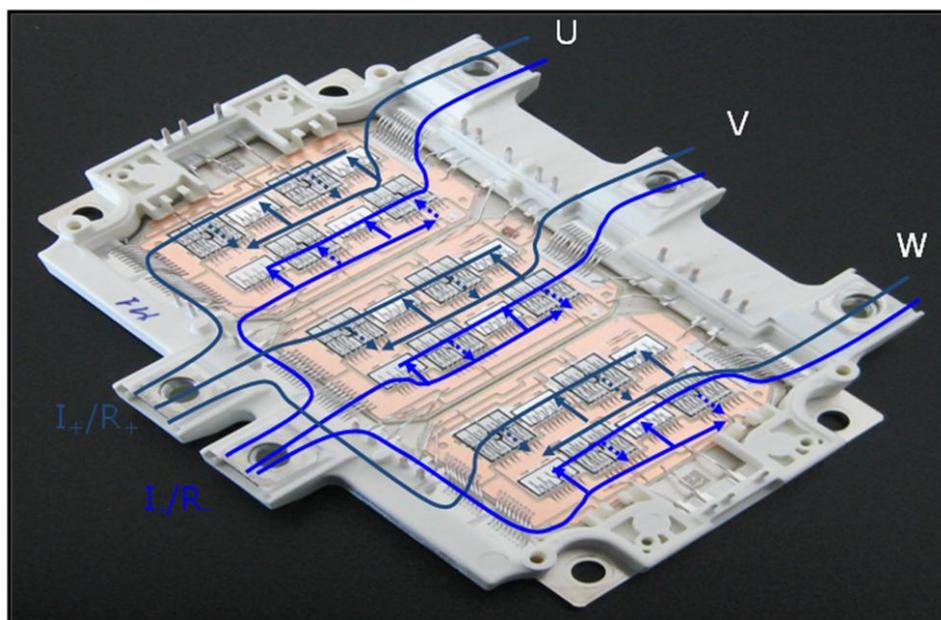


Abbildung 41: Bestromungsverläufe im Modul bei unterschiedlichen Schaltzuständen

In Abbildung 41 ist der Verlauf der Ströme im Leistungsmodul bei unterschiedlichen Schaltzuständen zu sehen.

Die Messungen der Widerstände zeigen abhängig von der Stromrichtung in den verschiedenen Phasen Abweichungen von bis zu 2% (Tabelle 11).

Phase	R_+ (μOhm)	R_- (μOhm)	Fehler
U	195.5	199.0	1.7%
V	208.0	208.3	0.1%
W	212.6	209.4	-1.5%

Tabelle 11: Gemessene Widerstandswerte in Abhängigkeit von Bestromungsrichtung

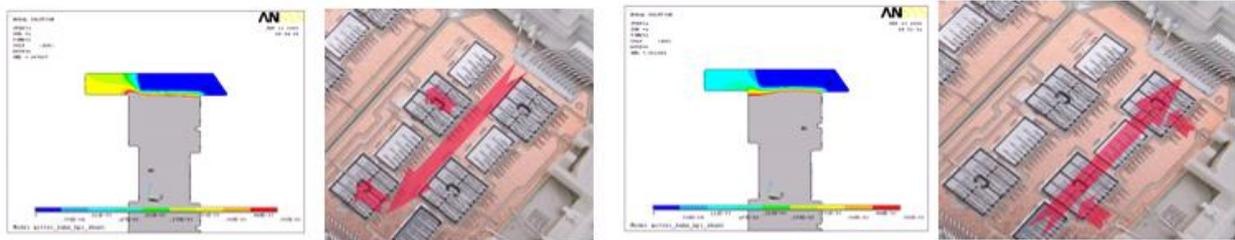


Abbildung 42: Simulation der Potentialverteilung in Abhängigkeit von Bestromungsrichtung

Die Simulation der Feldverteilung auf dem Substrat in Abbildung 42 liefert abhängig von der Bestromungsrichtung geänderte Spannungsabfälle am Sensekontakt auf der DCB. Diese führen zu den Fehlern in der Widerstandsmessung.

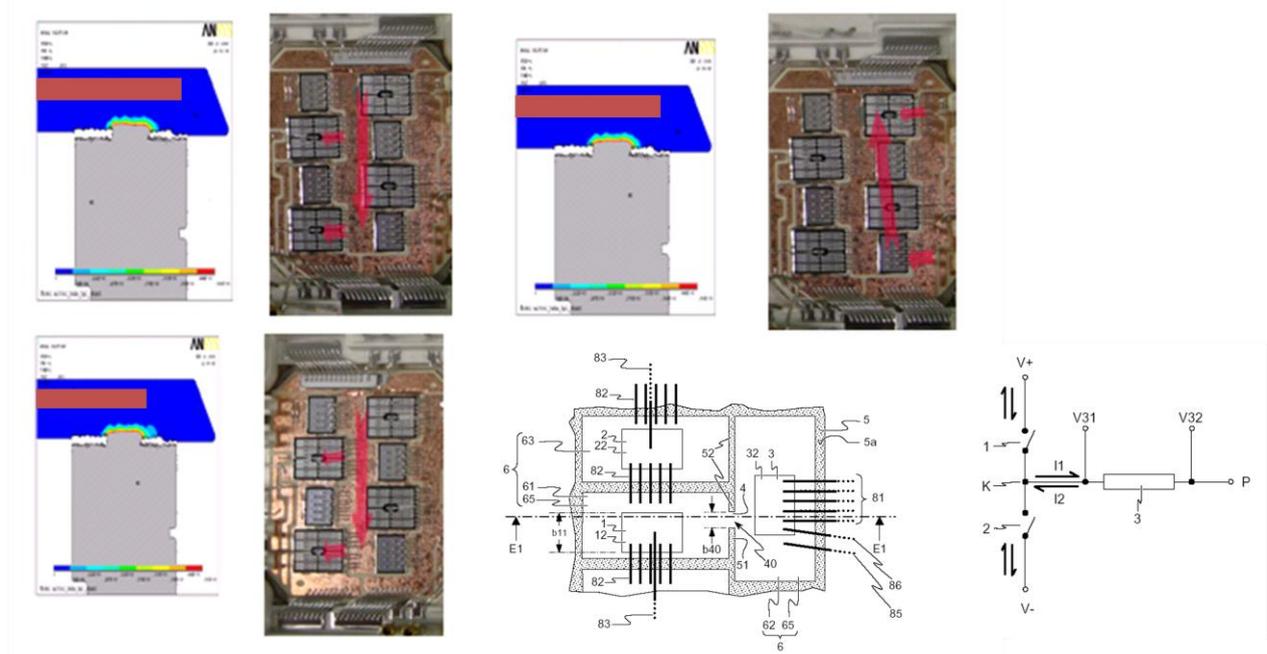


Abbildung 43: Potentialverteilung im Bereich des Shuntwiderstands für verschiedene Stromrichtungen nach Substratmodifikation

Der stromrichtungsabhängige Spannungsabfall kann durch ein geeignetes Substratlayout kompensiert werden. Hierzu müssen im Bereich der Shunts Gräben eingebracht werden, wie in Abbildung 43 zu sehen ist. Dadurch ist das Feld um den Siliziumshunt homogen und die Position des Sensebonds auf der DCB sowie die Stromrichtung beeinflussen nicht mehr die Widerstandsmessung. Im Rahmen des Projekts erfolgte dazu eine Patentanmeldung: DE1020100303178, T. Hong, M. Thoben; Schaltungsanordnung mit Shuntwiderstand. Bei der Herstellung des Moduls wurde das Layout in geeigneter Form modifiziert und die Funktion der Strommessung im Fahrzeugbetrieb und am Getriebeprüfstand bei den Partnern BMW und ZF verifiziert.

5.5 Treiberelektronik / Sensorauswertung (WP3)

Aufgrund der hohen Umgebungstemperaturen von bis zu 125°C Kühlmitteltemperatur und 140 °C Umgebungstemperatur ist es erforderlich, dass die verwendeten ICs bei Chiptemperaturen von 150°C betrieben werden können. Infineon Technologies hat sich in dem Projekt auf Bausteine für die galvanische Trennung konzentriert. Hierbei handelt es sich um einen Treiber IC und einen Sigma Delta Wandler, die beide auf Basis der Coreless Transformer Technologie die galvanische Trennung des Signalpfads realisieren [16][17].

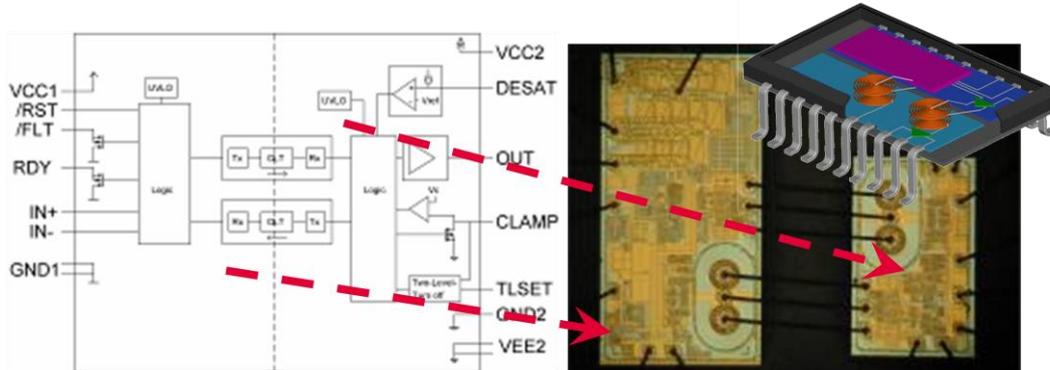


Abbildung 44: Einsatz der Coreless Transformer Technologie für galvanische Trennung von Treiber und A/D Wandler Bausteinen

Der Aufbau mit zwei getrennten Chips, die einem Package integriert werden, ist für den Treiber IC exemplarisch in Abbildung 44 dargestellt.

Im Rahmen des Projekts wurde ein Treiberboard für die Messung der Ströme erweitert. Zudem sind für Schutzfunktionen einige MOSFET Treiber integriert worden. Die Struktur des Treiberboards ist in Abbildung 45 dargestellt.

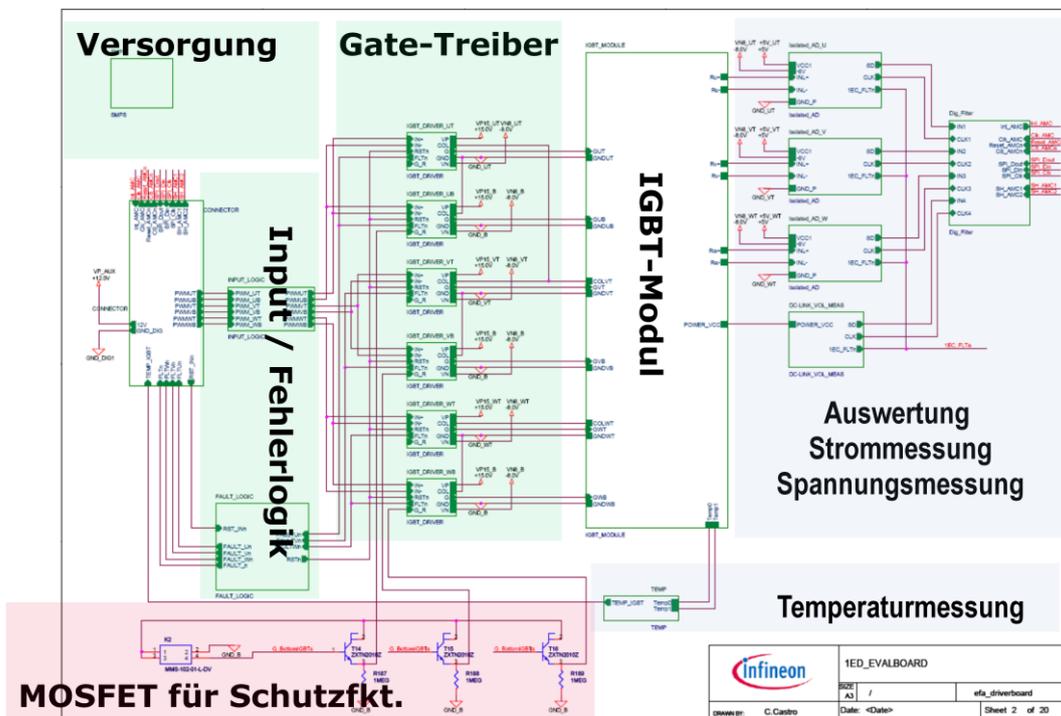


Abbildung 45: Blockdiagramm der Treiberelektronik mit Leistungsmodul

Das Board wurde für den Test der ICs, die Prüfung der Leistungsmodule und der Stromsensoren verwendet. Für die Fahrzeugintegration wurde von dem Projektpartner Liebherr eine integrierte Lösung der Treiber und Controllerfunktionen entwickelt, bei denen die Treiber ICs und die Sigma-Delta Wandler mit verwendet werden.



Abbildung 46: Treiberelektronik mit Coreless Transformer Treiber IC und Sigma Delta Analog Wandler

Abbildung 46 stellt das Treiberboard dar, mit denen die Schalteigenschaften des Leistungsmoduls, die Auswertung der Stromsensorik und weitere Strombelastungstests durchgeführt werden konnten.

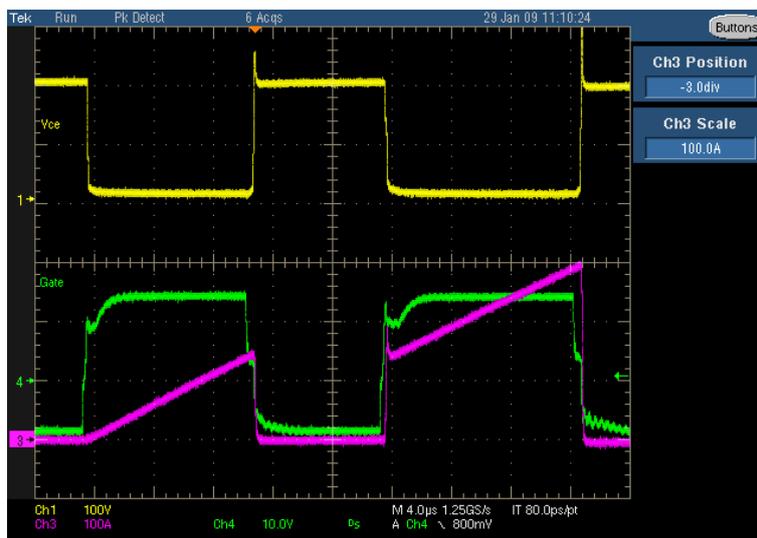


Abbildung 47: Messung des Leistungsmoduls mit Treiberplatine Doppelpuls Abschalten bei 300 A

In Abbildung 47 sind im Doppelpuls Abschalttest die Verläufe der Gatespannung (grün), der Stromanstieg über einer Lastinduktivität (pink) und der Versorgungsspannung (zu sehen). Der Test ist eine typische Messung zur Bestimmung der Einschalt- und Ausschaltverluste. Für den Test wurde der im Rahmen des Projekts aufgebaute Folienkondensator des Projektpartner Kemet eingesetzt, so dass auch Aussagen zur Induktivität und daraus resultierender Überspannungen getroffen werden konnten.

Der Strom kann über den Sigma-Delta Wandler anhand von Analogausgängen oder über digitale Filterung, die auf dem Board über den Baustein AMC1210 der Firma, Texas Instruments erfolgt, ausgewertet werden. Abbildung 48 zeigt den analogen Ausgang des Sigma Delta Wandler (1EC) im Vergleich zur Referenzstrommessung mittels einer Rogowski Spule.

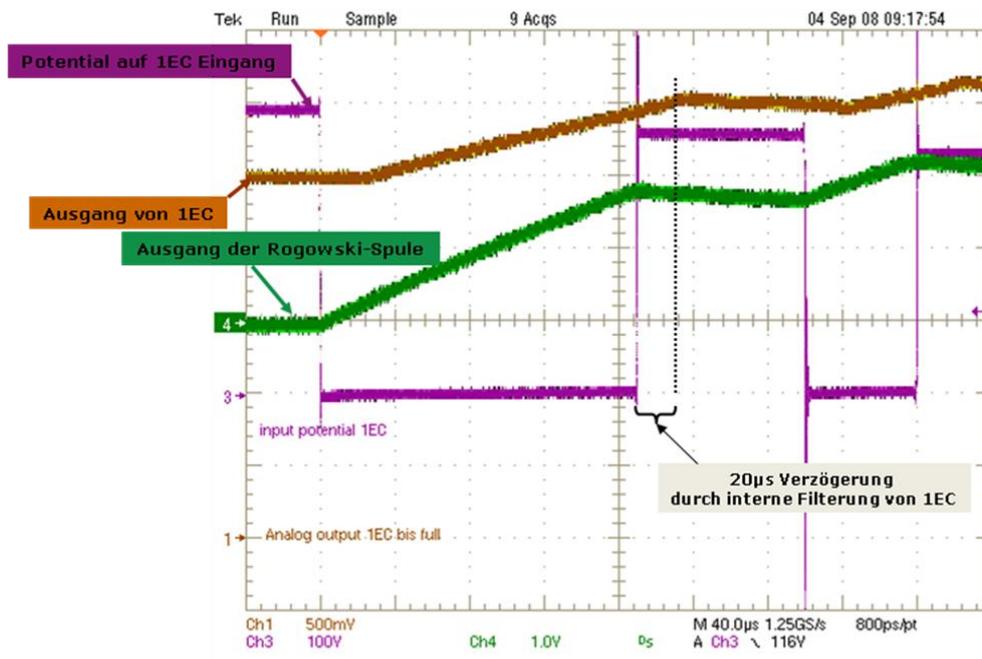


Abbildung 48: Vergleich der Messung des Stromsignals am Ausgang des Sigma Delta ICs im Vergleich zu einer Rogowski Spule

Die interne Filterung für den analogen Ausgang des Sigma/Deltawandler führt zu einer um 20 µs verzögerten Ausgabe des Messsignals.

Für die Anwendung im EfA Projekt ist dagegen die digitale Signalverarbeitung der Strommessung besser geeignet. Die konstante Gruppenlaufzeit bei einer Sinc3 Filterung des Sigma/Delta Datenstroms erlaubt eine exakte Bestimmung des Zeitstempels bei der Messung und damit eine präzise Synchronisierung der Strommessung mit der Messung der Motorposition.

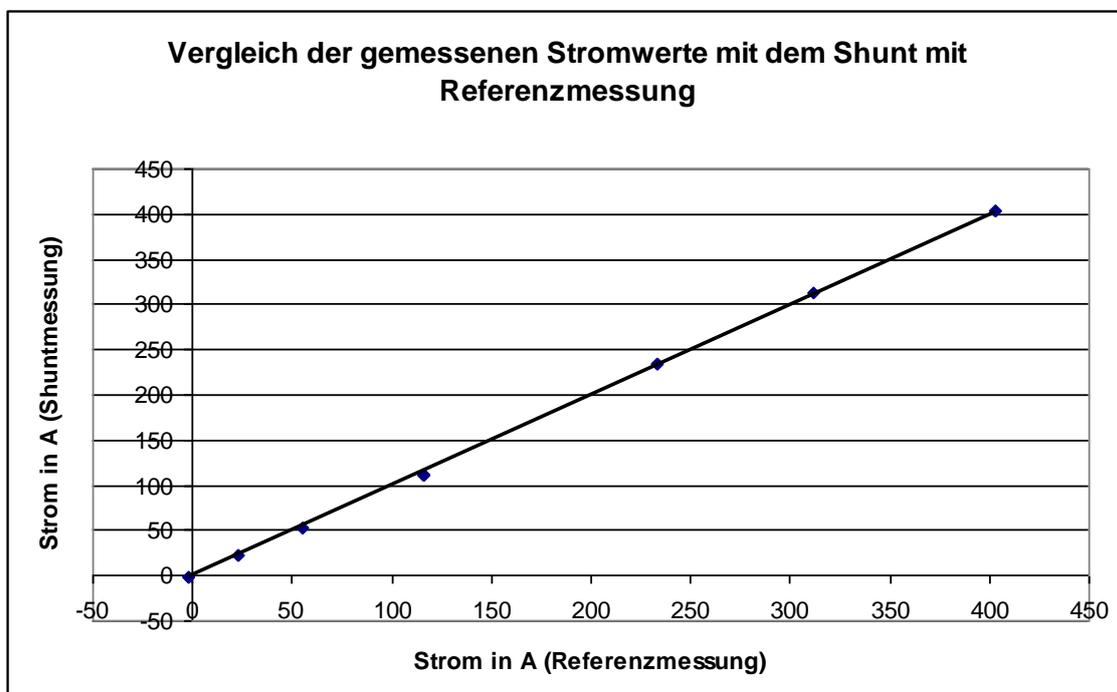


Abbildung 49: Vergleich der Messung des Stromsignals am Digitalausgang vs. Referenzmessung

In Abbildung 49 ist beispielhaft die Messung die Stromsignals verglichen mit der Referenzmessung dargestellt.

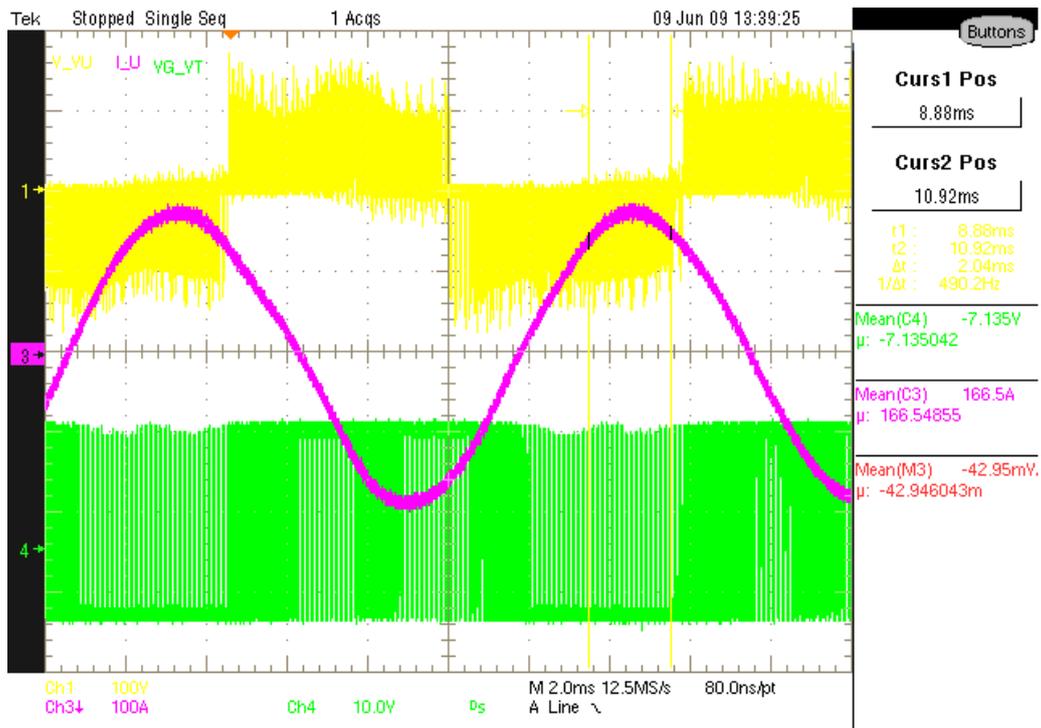


Abbildung 50: Messung Strom / Phasenspannung / Gatespannung bei $I_{\text{eff}}=166\text{A}$ / $U_{\text{DC}}=130\text{V}$

Mit dem Treiberboard und einem Controller wurden zudem Dauerlastversuche mit den ICs durchgeführt. Die Abbildung 50 zeigt den Verlauf des Phasenstroms (pink), der Gatespannung (grün) und der Phasenspannung bei einem Umrichterbetrieb mit 166A.

Neben den Umrichteruntersuchungen wurden für den Sigma/Delta Wandlerbaustein Hochtemperaturlagertests über 1000h bei 150°C durchgeführt, die den Betrieb im Fahrzeug absichern.

5.6 Aufbautechnik (WP3)

Die Anforderungen an die Leistungselektronik, insbesondere die Warmläufe des Verbrennungsmotors, erfordern für das Erreichen der Lebensdauer eine Verbesserung der Aufbautechnologie. Die Bewertung der Modulkonzepte ergibt, dass die aktive Belastung bei einer hohen Ausnutzung der Halbleiterbauelemente bereits die Lebensdauer heutiger Technologie ausnutzt. Zusätzliche Belastungen durch die Warmlaufanforderungen des Verbrennungsmotors erfordern eine Erhöhung der Zuverlässigkeit der Chipaufbautechnologie (Drahtbond/Chiplötung) und der Substratverbindungstechnik.

5.6.1 Drucksintertechnik

Mit der Drucksintertechnik kann die Zuverlässigkeit einer Verbindung deutlich erhöht werden [8]. Die Verbindungstechnik kann sowohl für die Chip/DCB als auch die DCB/Bodenplattenverbindung eingesetzt werden.

Für den eigentlichen Niedertemperatursinter-Prozess sind zunächst einige vorbereitende Prozessschritte erforderlich. Im ersten Schritt wird zunächst das Silberpulver mit einem Gemisch aus verschiedenen Lösungsmitteln zu einer Silberpaste aufgeschlämmt und durch die Variation der Lösungsmittelmengen spritz-, druck- oder streichfähig gemacht. Im zweiten Schritt wird die vorbereitete Silberpaste je nach Anwendung auf einen der miteinander zu verbindenden Partner aufgetragen.

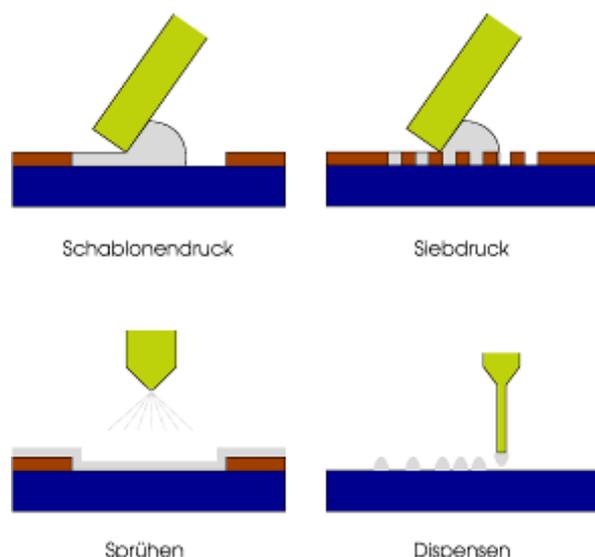


Abbildung 51: Beispiele für mögliche Verarbeitungsverfahren der Silberpasten

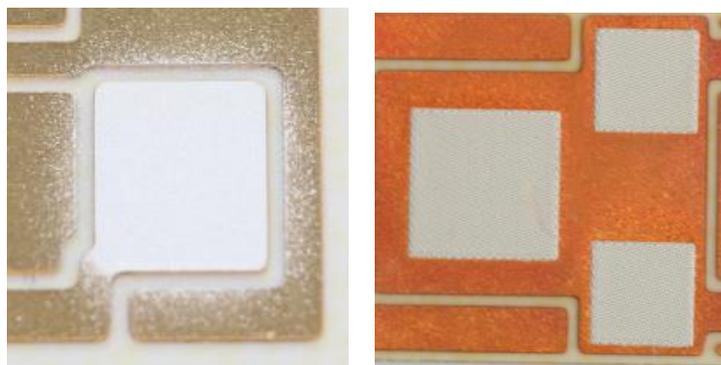


Abbildung 52: Vergleich im Airbrushverfahren (links) mit im Siebdruckverfahren (rechts) beschichtete DCB

Es wurden unterschiedliche Verfahren ausprobiert. Das Airbrushverfahren, dessen Ergebnis in Abbildung 52 links dargestellt ist, eignet sich aufgrund der Streuung am Rand weniger für die Chip/DCB Verbindung und kann eher für die DCB/Bodenplattenverbindung eingesetzt werden.

In einem dritten Schritt wird die auf einen der Verbindungspartner aufgetragene Silberpaste getrocknet um die Lösungsmittel wieder aus der zu sinternden Verbindungsschicht zu entfernen, da diese im Sinterprozess zu erheblicher Lunkerbildung führen würden. Im vierten und letzten Schritt werden die Bauteile in ein Sinterwerkzeug eingelegt und unter Zufuhr von Wärmeenergie sowie einem entsprechenden Pressdruck miteinander verbunden, in dem das Silberpulver an die Grenzflächen der Bauteile ansintert und in sich selbst versintert.

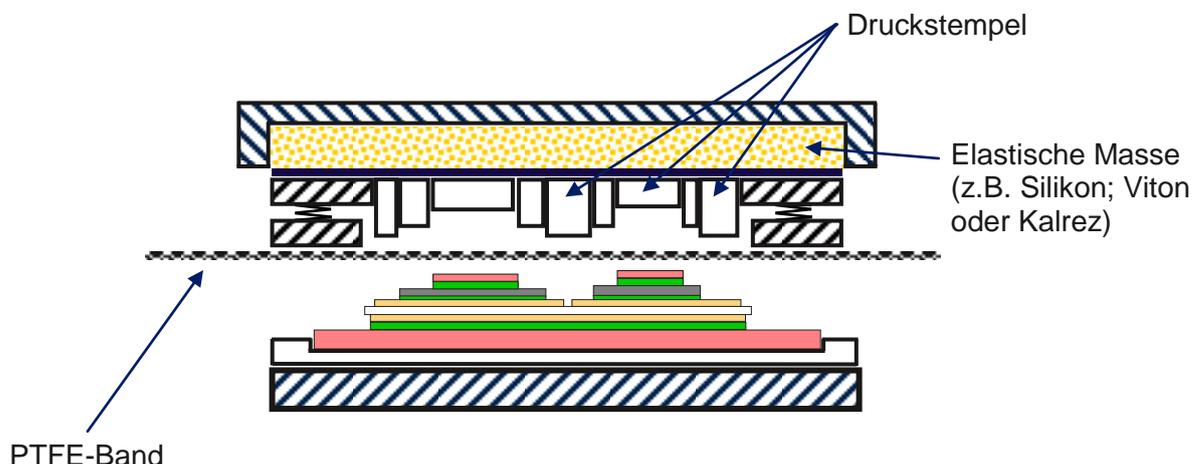


Abbildung 53: Schematische Darstellung eines möglichen Sinterwerkzeugs

In Abbildung 53 ist ein Sinterwerk für das gleichzeitige Versintern von Chips, DCB und Bodenplatte dargestellt. Ein PTFE Band verhindert die Verschmutzung des Werkzeugs.

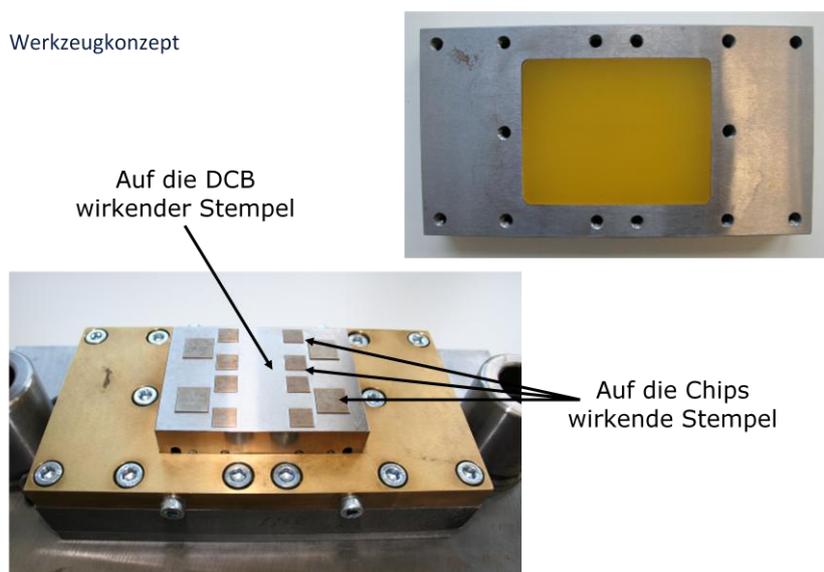


Abbildung 54: Bild des Werkzeugs für Sinterprozess von Chips und DCB

Abbildung 55 zeigt die technische Ausführung des Werkzeugs, mit denen Moduaufbauten hergestellt wurden.



Abbildung 55: Bild der Presse für den Sinterprozessschritt

Das Werkzeug wurde in die in Abbildung 55 dargestellte Presse eingebaut. Alternativ erfolgte eine Montage ohne Werkzeug mit einem Silikonkissen.

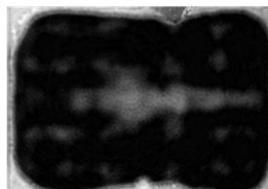
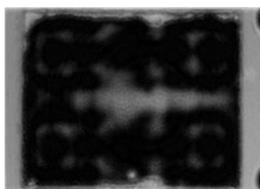
Für den Niedertemperatursinter-Prozess sind keine besonderen Umgebungsbedingungen erforderlich, da unter anderem der Luftsauerstoff aus der umgebenen Atmosphäre für die Verbrennung der im Silberpulver enthaltenen Mahlwachse benötigt wird. Die mit einander zu verbindenden Bauteile benötigen mindestens auf den der Verbindung zugewandten Flächenanteilen einen Edelmetallabschluss.

Bei der Gestaltung der Oberflächen derjenigen Bauteile, die in einem Niedertemperatursinter-Prozess mit einander verbunden werden sollen, ist jedoch darauf zu achten, dass Flächenanteile, die nicht für den Niedertemperatursinter-Prozess benötigt werden, möglicherweise für Folgeprozesse geschützt werden müssen.

5.6.1.1 Temperaturschocktests und Thermal Cycling für Drucksintertechnik

An Modulaufbauten wurden zur Bewertung der Qualität und Zuverlässigkeit Temperaturschocktests durchgeführt. Die Module wurden mit Kupferbodenplatte und Al₂O₃ Keramiken aufgebaut.

Teile aus dem Versuchswerkzeug



Teile mit Silikonkissen hergestellt



Nach 3000 Zyklen TST

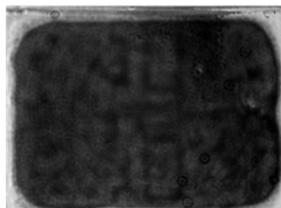


Abbildung 56: Ultraschallaufnahme der Sinterverbindung des Substrats vor (links) und nach 3000 TST (rechts) (-40°C / 150°C, $t_{\text{storage}} > 1\text{h}$, $t_{\text{change}} < 30\text{s}$)

Helle Bereiche in den Ultraschallaufnahmen in Abbildung 56 zeigen Degradationen der Verbindung bzw. Bereiche, die zu Versuchsstart nicht verbunden waren. Die Qualität der Verbindung bei den Modulaufbauten, die mit Silikonkissen hergestellt wurden ist besser als die Verbindung, die mit dem Werkzeug hergestellt werden konnten. Die Druckverteilung bei Nutzung des Werkzeug führt dazu, dass einige Stellen nicht versintert werden. In beiden Aufbauten zeigt sich nur eine unwesentliche Degradation. Die Anzahl der erreichten Temperaturschock übersteigt deutlich die im EfA Projekt erforderliche Lebensdauer. Die Technologie scheint daher geeignet für die Anwendung im Projekt EfA.



Abbildung 57: Werkzeug für Aufnahme der PinFin Bodenplatten für die Drucksinterung

Für die Verbindung der Pin-Fin Bodenplatte des direktgekühlten Moduls ist ein angepasstes Unterwerkzeug notwendig, das in Abbildung 57 dargestellt ist.

Die Verbindung des gesamten Moduls in einem Prozessschritt bedingt, dass eine elektrische Prüfung erst nach kompletter Modulfertigung erfolgen kann. Dadurch entsteht ein erhöhter Ausschluss, der durch einen Substratvortest vermieden werden kann. Deshalb wurde im weiteren Projektverlauf der Aufbau der Module mit unterschiedlichen Technologien weitergeführt.

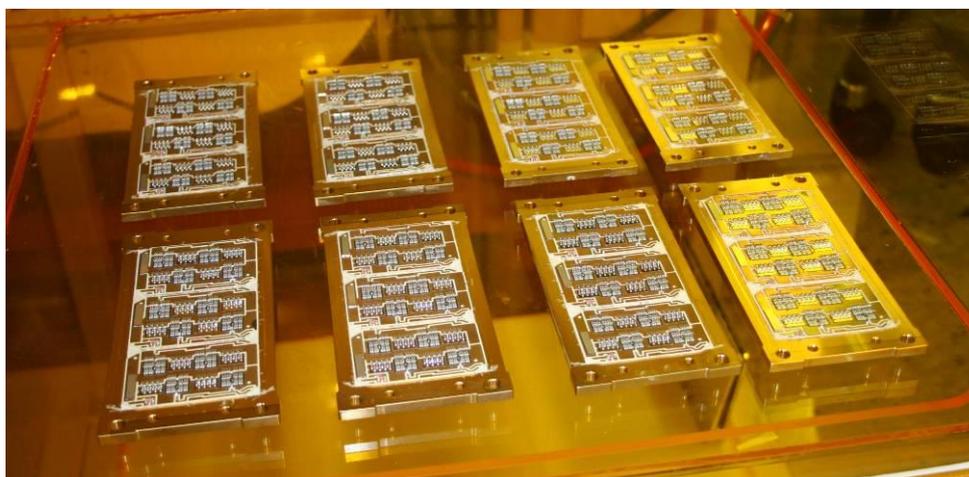


Abbildung 58: Modulaufbauten mit Diffusionslötens und Drucksinterung für Substratverbindung

In Abbildung 58 sind Modulaufbauten dargestellt, bei denen die Chipverbindung mittels Diffusionslötens [24] erfolgte und die Substratverbindung in Drucksinterertechnik mit dem Werkzeug in Abbildung 57 und einem Silikonkissen hergestellt wurde. Weitere Module wurden für eine einfachere Analyse mit glatten Bodenplatten hergestellt.

Mit den Modulaufbauten wurden verschiedene Validierungstests durchgeführt. In Abbildung 59 ist das Ergebnis von Ultraschallaufnahmen der Module mit Drucksinterverbindungen nach Thermal Cycling Tests dargestellt. Dazu werden die Module auf einen Wasserkühler montiert, und die Temperatur passiv geändert. Nach 25000 Temperaturwechseln mit einem

Temperaturhub von ΔT 80 K ist nur eine geringe Degradation der Verbindungsschicht sichtbar.

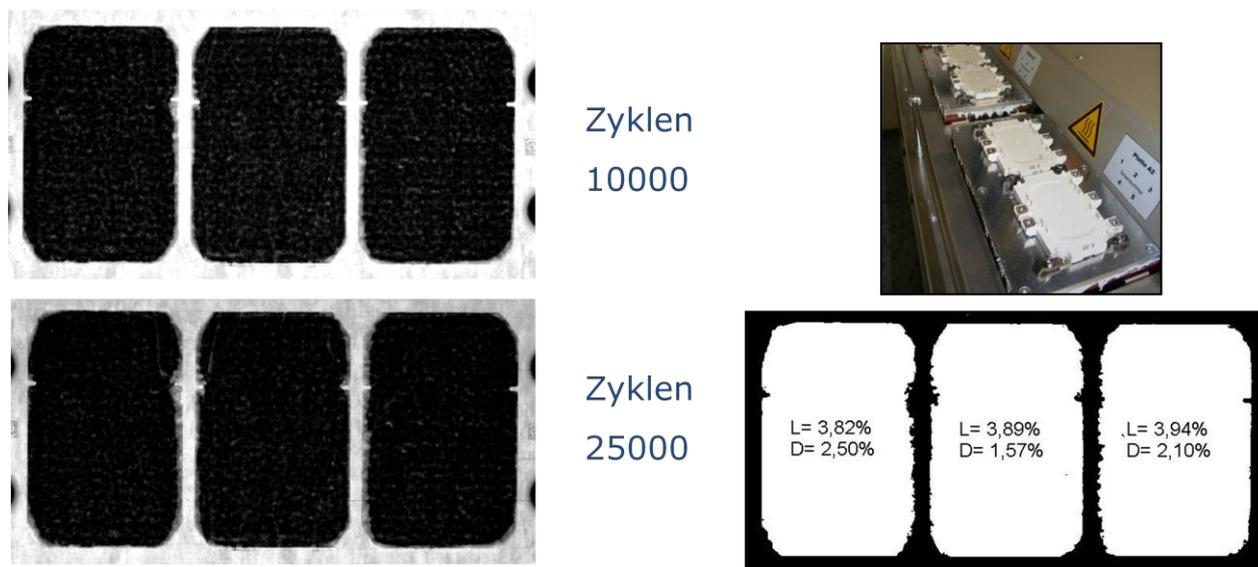


Abbildung 59: TC Test (ΔT 80K) Ultraschallaufnahmen nach 10000/25000 Zyklen

Die Untersuchungen zeigen, dass die Drucksintertechnik zur Verbindung von Kupferbodenplatten mit Al_2O_3 Keramiken das Potential zur Erfüllung der Anforderungen aus Warmläufen des Verbrennungsmotors hat.

5.6.1.2 Vergleichende Untersuchungen mit .XT Substratlötung

Alternativ zur Drucksintertechnik wurde eine verbesserte Substratlötung untersucht [24]. Im Gegensatz zur Drucksintertechnik können für diese Lötung konventionell verfügbare Lötanlagen eingesetzt werden. Die neuartige Lotschicht enthält vertikale intermetallische Phasen, die die Rissbildung in dieser Schicht verhindern, was zu einer erhöhten Zuverlässigkeit sorgt. Abbildung 60 zeigt einen metallografischen Schliff dieser Verbindung.

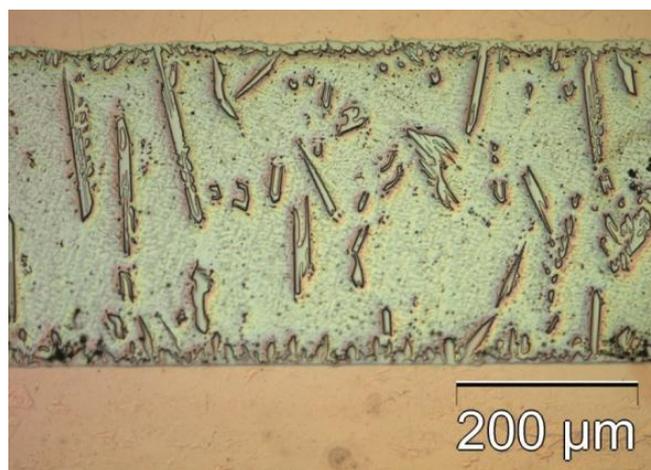


Abbildung 60: Metallografischer Schliff der .XT Systemlötung [24]

Im Gegensatz zur Drucksintertechnik erfolgt die Lötung ohne Sauerstoff, so dass eine Oxidation der Substratoberflächen vermieden wird. An den Modulaufbauten wurden Temperaturschocktests durchgeführt.

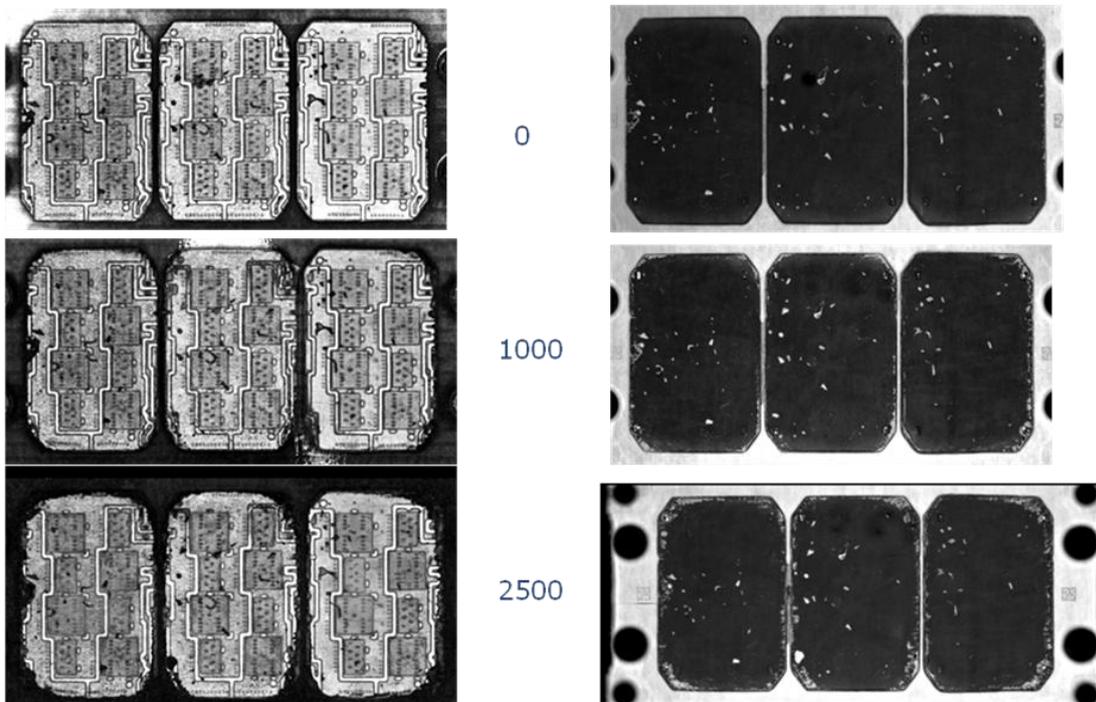


Abbildung 61: Ultraschallbilder des verbesserten Moduls nach TST Test (ΔT 190K) -40°C ~ 150°C mit .XT Substratlötung nach Ultraschallaufnahmen nach 0/1000/2500 Zyklen

Im Vergleich zur Drucksinterverbindung entstehen an den Kanten des Substrats ähnliche Degradationen. (vgl. Abbildung 61 und Abbildung 56). In Kombination mit abgeschrägten Substratkanten können 2500 Temperaturschocks erreicht werden, ohne dass der thermische Widerstand des Moduls beeinflusst wird.

Mit dem Coffin Manson Ansatz kann ein Vergleich der Lebensdauer aus Tests mit den Anwendungsbedingungen erfolgen. Es wird bei der Betrachtung ein konservativer Beschleunigungsexponent von 3 verwendet. Für konventionelle bleifreie Lote ist ein Exponent von 2.4 anwendbar [18].

$$\frac{n_{duty_cycle}}{n_{test}} = \left(\frac{\Delta T_{duty_cycle}}{\Delta T_{test}} \right)^{-3}$$

Bei Verwendung der direktgekühlten Module tritt nur ein geringer Temperaturhub in der Substratlötung auf. Die Temperatur liegt hier bei ca. 110°C. Aus den Warmlaufanforderungen können damit die über der Lebensdauer auftretenden Lastwechsel bestimmt werden.

T_solder_max [°C]	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	
T_water_min = Tc_min [°C]	-40	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
delta Tc [K]	150	140	135	130	125	120	115	110	105	100	95	90	85	
Cycles per lifetime	50	100	500	1000	1000	1000	1000	1500	1500	1500	1000	1000	1000	17 years
equivalent number of DT190K for acceleration exponent :3	25	40	179	320	285	252	222	291	253	219	125	106	90	2406

Tabelle 12: Vergleich der erreichten Tests mit Anforderungen aus EfA Profil unter Annahme eines Beschleunigungsexponenten von 3

Tabelle 12 stellt die Berechnung der erforderlichen Temperaturschocks dar. Für das direktgekühlte Leistungsmodul sind 2400 Temperaturschocks erforderlich. Der Temperaturschocktest mit erreichten 2500 TST mit der .XT Systemlötungen zeigt, dass auch diese Technologie das Potential hat, die im EfA Projekt spezifizierten Anforderungen zu erfüllen.

5.6.2 Bonddrahttechnik/Metallisierung/Diffusionslöt

Weitere Aufbautechniken, wie das Diffusionslöt, verbesserte Bonddrahttechnik und unterschiedliche Metallisierungen werden hinsichtlich ihres Potentials untersucht, die Lastwechselfestigkeit zu verbessern. Zu einem Teil der Technologien wurden im Projekt InGA bereits Voruntersuchungen durchgeführt [10][19]. Für die Untersuchungen im Projekt EfA wurden an der TU Chemnitz Prüfstände entwickelt und Lastwechseltests durchgeführt, die im Abschlussbericht [20] detailliert beschrieben sind. Einer der Prüfstände der TU Chemnitz ist in Abbildung 62 zu sehen. Zur Untersuchung der Lebensdauer werden aktive Lastwechselversuche (Power Cycling) durchgeführt, bei denen die Leistungsmodule zyklisch bis zum Ausfall aktiv aufgeheizt und wieder abgekühlt werden [21][22][23]. Die Module wurden bei Infineon Technologies aufgebaut nach Abschluss der Tests analysiert.

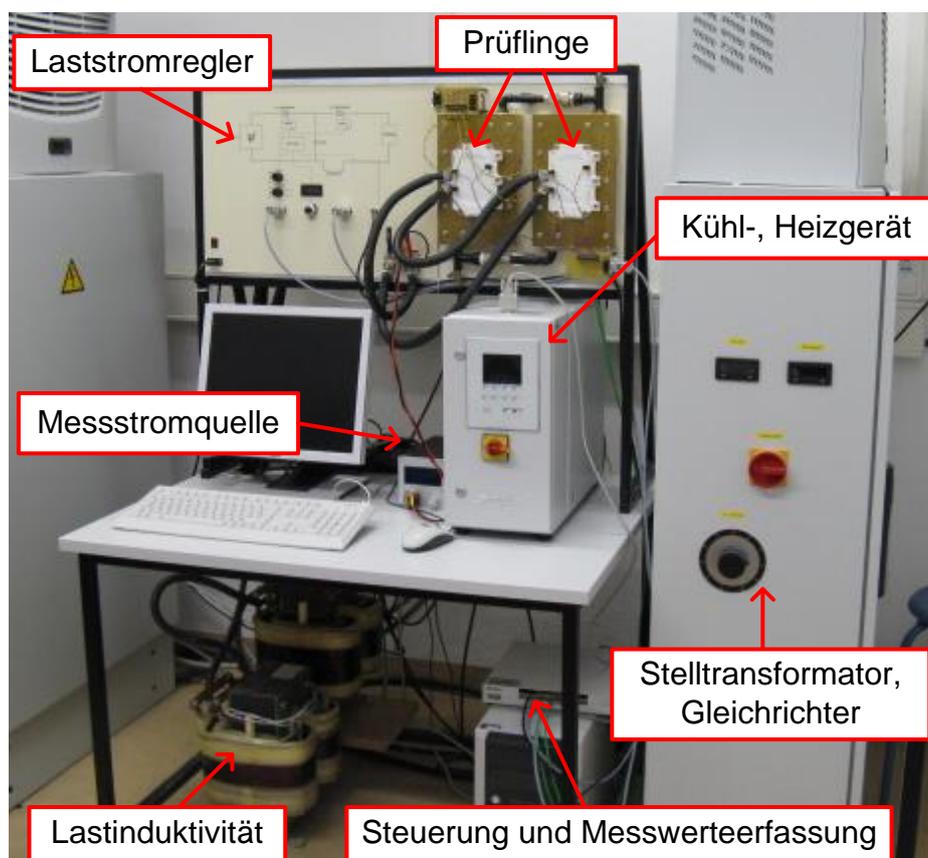


Abbildung 62: Foto eines der realisierten Lastwechselstände (Quelle: TU Chemnitz)

Die Ablösung von Bondverbindungen und Ermüdung von Lotschichten begrenzen im Wesentlichen die Einsatzdauer von Leistungsmodulen nach thermischer Wechsellast. Diese Fehlermechanismen erzeugen einen Anstieg des thermischen Widerstands und der V_{CE} Spannung und werden daher online überwacht. Der Test wird beendet, wenn die in Tabelle 5 definierten Fehlergrenzen überschritten sind und das Modul somit ausgefallen ist.

5.6.2.1 Einfluss der Bondtechnologie und der Chipdicke

In diesem Lastwechseltest wurden zwei Einflussfaktoren auf die Lastwechselfestigkeit der Leistungsmodule untersucht: Einfluss der Bonddrahttechnologie und der Chipdicke. Die Prüflinge wurden mit drei verschiedenen Leistungshalbleiterbauelementen bestückt. Untersucht wurden IGBTs mit unterschiedlicher Chipdicke 70 μ m, 120 μ m, 180 μ m (entspricht 600V/1200V/1700V Spannungsklasse). Es wurden verbesserte Bonddrähte eingesetzt.

Andere Verbindungen im Modul wurden mit Standard-Technologien ausgeführt. Der Aufbau des Prüflings in einem Standard-Modulgehäuse ist in der Abbildung 63 gezeigt.

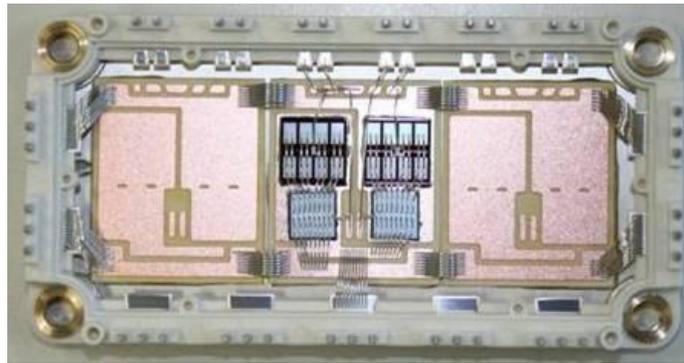


Abbildung 63: Prüfling mit verbesserter Bonddrahttechnologie

Mit langen Zykluszeiten von 40s (Einschaltzeit von 15 s, die Ausschaltzeit 25 s) wurden die Module getestet. Alle Leistungsmodule sind aufgrund der Erhöhung des thermischen Widerstands ausgefallen. In Modulen mit verbesserter Bonddrahttechnologie ist kein Versagen der Bonddrähte aufgetreten. Die Fehleranalyse mit Ultraschallmikroskop in der Abbildung 64 zeigt die Degradation der Lotschicht zwischen dem Chip und dem DCB-Substrat, der zum Anstieg des thermischen Widerstands führt und die Lebensdauer der Leistungsmodule begrenzt.

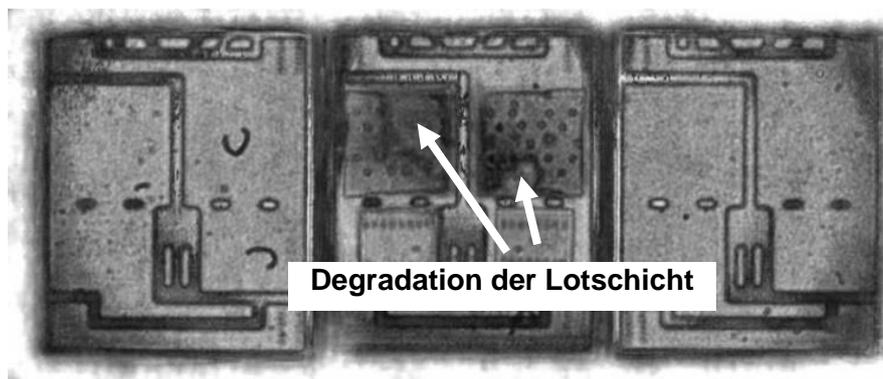


Abbildung 64: Degradation der Lotschicht zwischen Chip und DCB-Substrat, Analyse mit Ultraschallmikroskop

Lebensdauerauswertung

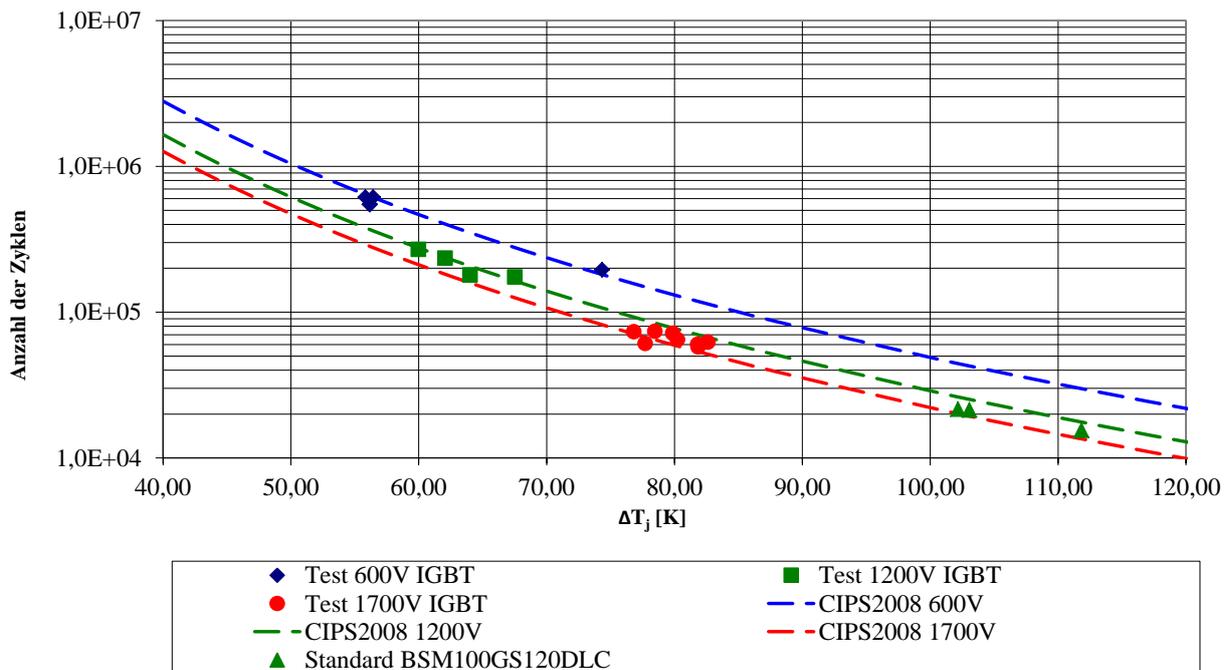


Abbildung 65: Ergebnisse Lastwechseltests mit verbesserter Bondtechnologie und verschiedenen Chipdicken [24]

In Abbildung 65 werden die Lastwechselergebnisse mit einem Lebensdauermodell verglichen, das auf der CIPS 2008 präsentiert wurde [25] und die Zuverlässigkeit heutiger Standard-Leistungsmodule beschreibt. Desweiteren ist das Testergebnis eines Standardmoduls dargestellt.

Die erreichten Lastwechselzyklen mit Modulen, die eine verbesserte Bondtechnologie haben, stimmen mit dem Lebensdauermodell überein. Aus diesem Testergebnis kann abgeleitet werden, dass bei relativ langen Zykluszeiten die Lebensdauer von der Lotschicht zwischen Chip und Substrat bestimmt wird.

Eine Weiterentwicklung der Bonddrahttechnologie ist somit alleine nicht ausreichend und die Verbindungsschicht zwischen Chip und DCB-Substrat muss ebenfalls verbessert werden.

5.6.2.2 Einfluss verbesserter Lotschicht zwischen Chip und DCB-Substrat

Im nächsten Schritt wurde die Chiplötung modifiziert. Abbildung 66 zeigt den Testaufbau eines Einzelchips mit verbesserter Lötung.

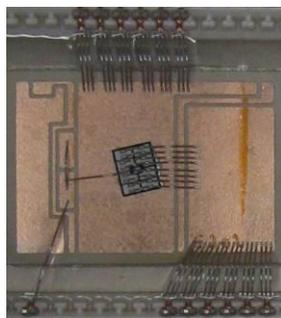


Abbildung 66: Testaufbau für Lastwechseluntersuchung mit Diffusionslötung

Die Verbindung zwischen Chip und DCB-Substrat wurde mit Diffusionslötungen ausgeführt. Der Unterschied des Diffusionslötens zum Standardlötens besteht darin, dass während des

Lötprozesses intermetallische Phasen gebildet werden. Diese haben nach dem Lötprozess Schmelztemperaturen $>400^{\circ}\text{C}$. Damit hat diese Verbindung viel höhere Schmelztemperatur (Schmelzpunkt der Sn-Ag Standard-Lötung: ca. 220°C) und verspricht nach dem Zusammenhang der homologen Temperatur eine höhere Zuverlässigkeit [24]. Einen metallografischen Schliff dieser Verbindung zeigt die Abbildung 67.

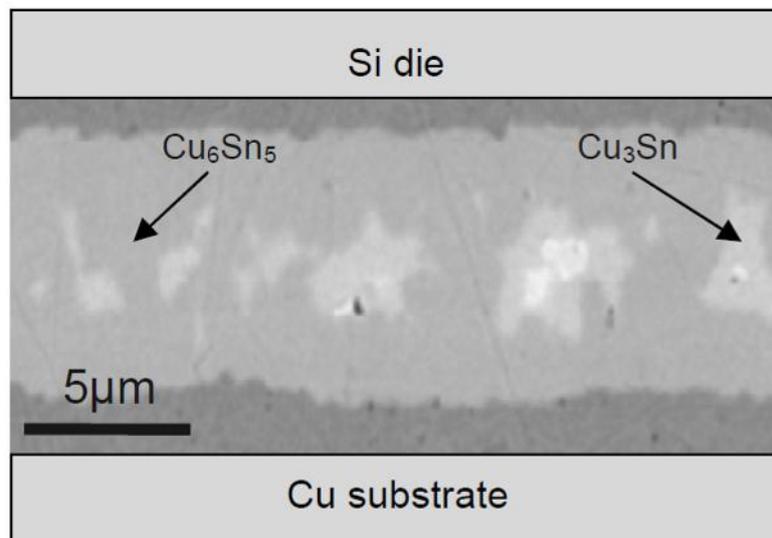


Abbildung 67: Metallografischer Schliff der Verbindung zwischen Chip und DCB-Substrat [24]

Bei einer Kühlmitteltemperatur von 75°C wurden Tests mit maximaler Betriebstemperatur von 165°C bis 187°C durchgeführt. Mit gleichen Testrandbedingungen wurden Referenzmodule mit Standardaufbautechnologie untersucht.

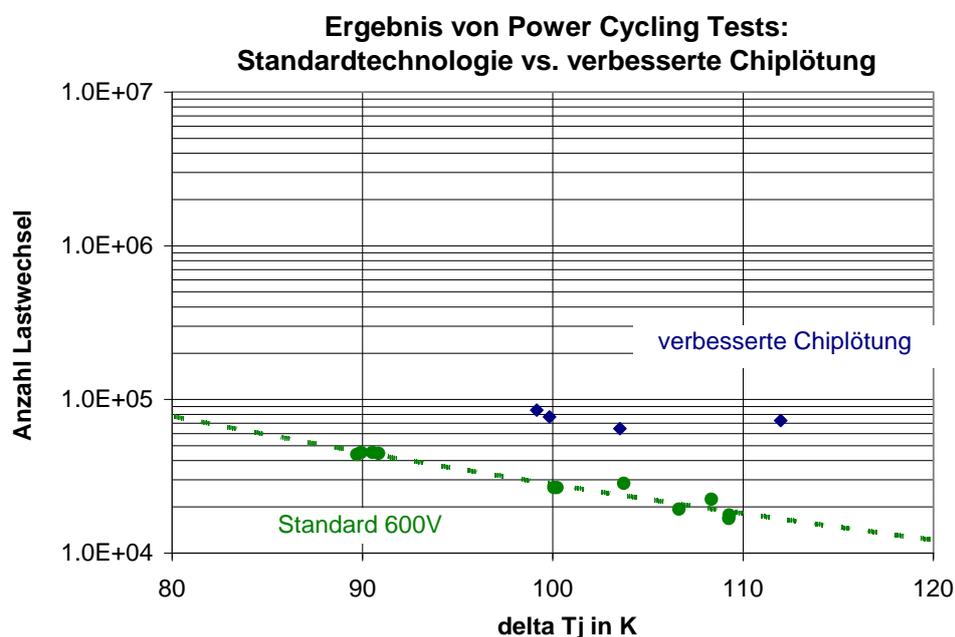


Abbildung 68: PowerCycling Ergebnis an Testaufbauten mit Diffusionslötung im Vergleich zu Standard 600V Leistungsmodul bei $T_{j\text{max}}=165^{\circ}\text{C}-187^{\circ}\text{C}$ [24]

Abbildung 69 zeigt die Anzahl der Lastwechsel, die in den verschiedenen Versuchen erreicht werden konnte. Mit der Diffusionslötung kann die Lebensdauer im Power Cycling deutlich erhöht werden. Das Ende des Tests wird durch einen Anstieg der V_{CE} Spannung um 5% verursacht.

Änderung von V_{CE} und R_{th} während des Power Cycling Test

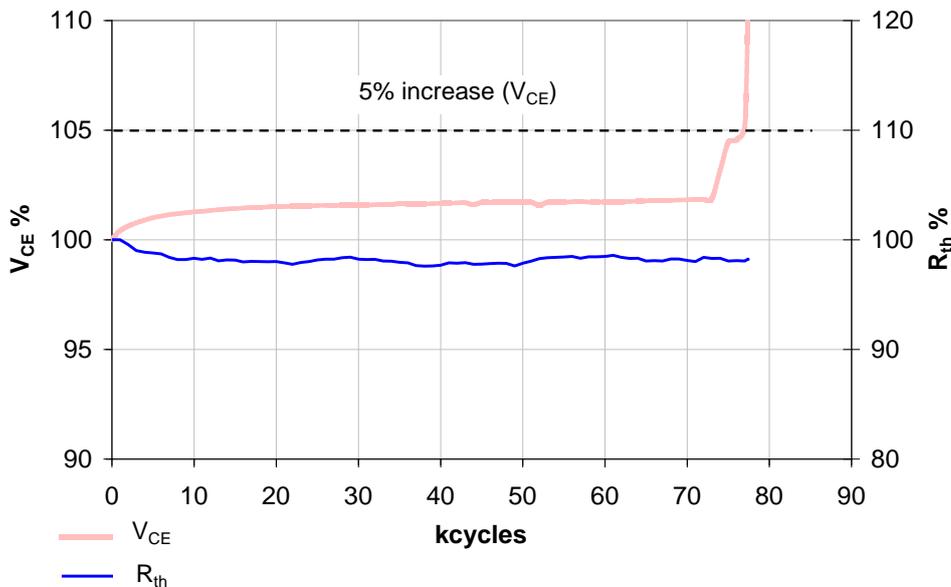


Abbildung 69: Bild 9: Anstieg der Kollektor/Emitter Spannung V_{CE} infolge PowerCycling von Modulen mit Diffusionslötung und Standard Bonddrahttechnik

Wie in Abbildung 68 dargestellt ist, ändert sich der thermische Widerstand nur unwesentlich. Dieses Ergebnis zeigt, dass der Drahtbond die Ausfallursache für den Power Cycling Test ist, was durch eine nachfolgende Analyse bestätigt werden konnte. Die Diffusionslötung ermüdet dagegen nicht.

5.6.2.3 Einfluss der Chipmetallisierung bei Diffusionslötung und verbesserter Bonddrahttechnik

Für die Erhöhung der Lastwechselfestigkeit ist somit eine Kombination der verbesserten Bonddrahttechnik und Chipmontagetechnik notwendig. Gleichzeitig wird der Einfluss der Chipmetallisierung auf die Zuverlässigkeit der Leistungsmodule untersucht. Dafür wurden Module mit verbesserter Chipverbindungstechnologie (Diffusionslötungen) und Bonddrähten aufgebaut. Für die Substrat/Bodenplattenverbindung wurden teilweise Drucksinterverbindungen und .XT Systemlötungen verwendet. Mit zusätzlich zwei veränderten Varianten der Chipmetallisierung wurden die Leistungsmodule entsprechend der im EfA Fahrzeug verbauten Chipbestückung aufgebaut. Getestet wurde eine Parallelschaltung von zwei 650V/150A IGBT-Chips.

Um die Anforderungen im EfA Projekt gemäß Tabelle 4 zu prüfen wurden die Tests bei Sperrschichttemperaturen zwischen 175°C und 200°C durchgeführt.

Unter vergleichbaren Bedingungen wurde eine Vielzahl von Standardmodulen getestet, um die Verbesserung der im EfA Projekt untersuchten Technologien nachzuweisen. Die Auswertung der Lastwechselfestigkeit ist in der Abbildung 70 dargestellt [20].

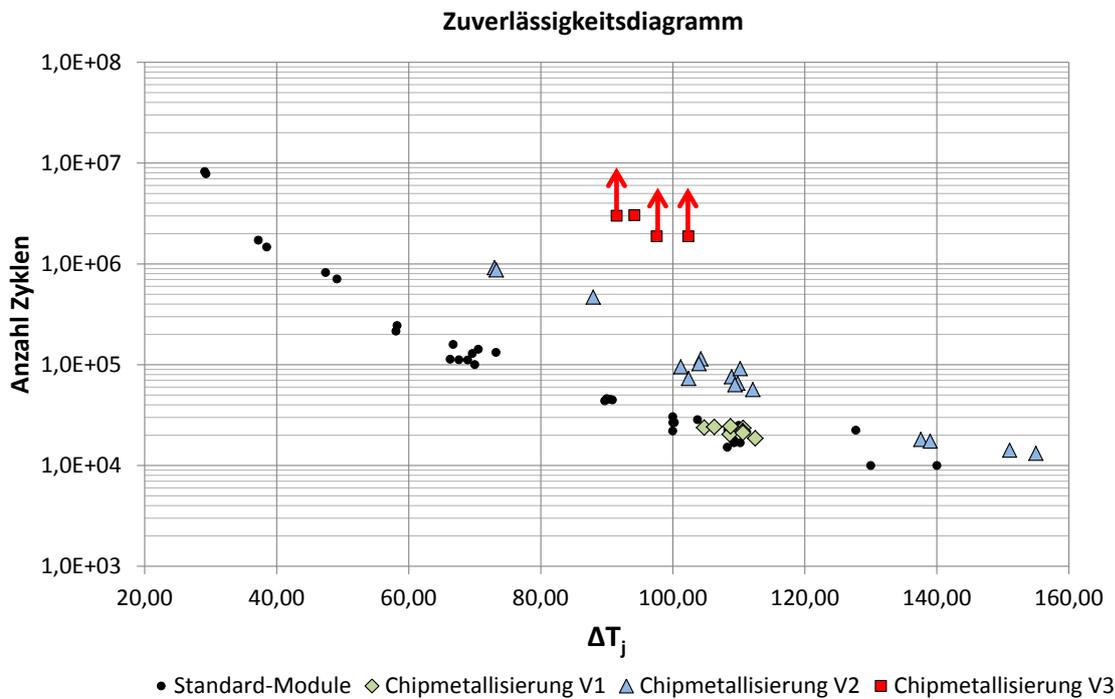


Abbildung 70: Lebensdauervergleich zwischen Standard-Leistungsmodulen und Prüflingen mit Diffusionslötung, verbesserten Bonddrähten und verschiedenen Chipmetallisierungen

Der Vergleich der Lastwechselfestigkeiten zeigt einen deutlichen Einfluss der Chipmetallisierung. Bei der Standardmetallisierung, Variante V1, liegt die Zuverlässigkeit auf dem Niveau der Standard-Leistungsmodule. Die Leistungsmodule mit der Chipmetallisierung V2 zeigen eine Erhöhung der Zuverlässigkeit im Bereich von $\Delta T_j = 70\text{K}$ eine Verbesserung um etwa Faktor zehn gegenüber der Standard-Modulen, bei höheren Temperaturerhöhungen $\Delta T_j = 120\text{K}$ ist die Verbesserung geringer. Die Chipmetallisierungsvariante V3 zeigt eine weitere starke Verbesserung der Zuverlässigkeit. Damit konnten im Vergleich zu Standardmodulen ein Faktor 100 höhere Lastwechsel erreicht werden, wobei bei drei der vier getesteten Module noch kein Ausfall eingetreten ist.

Bei den Tests konnte kein Anstieg des thermischen Widerstands erfasst werden. Sowohl die Drucksinterverbindungen, die .XT Systemlötung als auch die Diffusionslötung zeigen keine relevante Degradation.

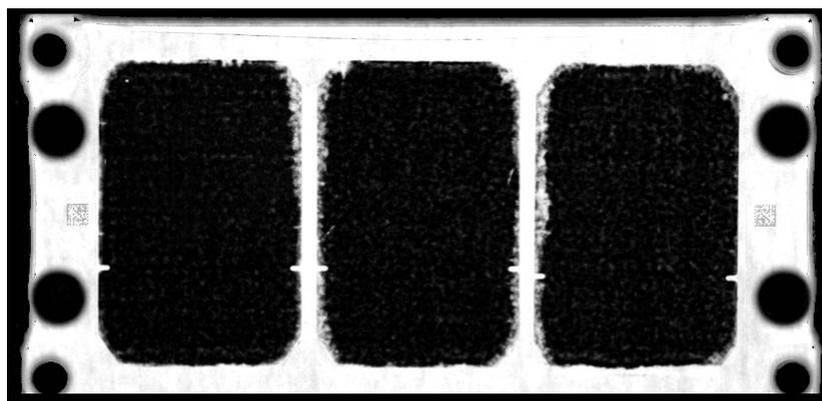


Abbildung 71: Ultraschallaufnahme der Substratverbindung (Niedertemperaturverbindung)

Abbildung 71 zeigt beispielhaft die Ultraschallaufnahmen der Substratverbindung nach Testende, die nur geringe Degradation am Rand aufweist. Der Einfluss der Chipmetallisierung konnte mit der Fehleranalyse bestätigt werden. In Abbildung 72 ist ein Schlibbild eines Bonddrahts zu sehen. Der Riss startet von beiden Seiten des Bonddrahts und verläuft innerhalb der Chipmetallisierung.

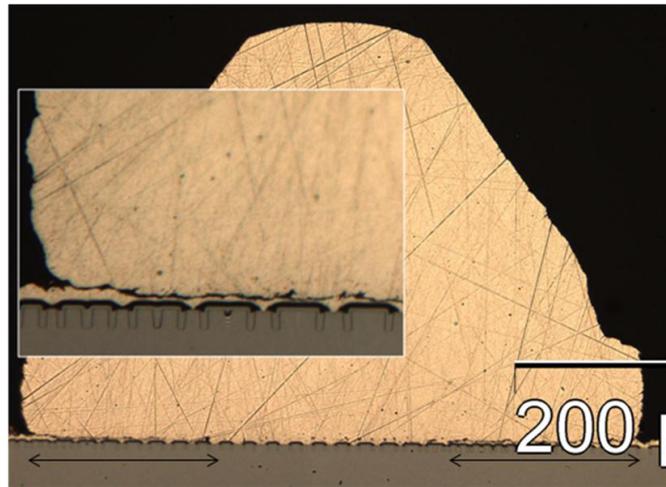


Abbildung 72: Rissbildung innerhalb der Chipmetallisierung bei Leistungsmodul mit verbesserten Bonddrähten und Standardmetallisierung

Nur durch die parallele Verbesserung der Chipmetallisierung, des Bonddrahtmaterials, der Chipplötung und der Substrat/Bodenplattenverbindung kann die Gesamtlebensdauer deutlich verbessert werden. Eine weitere Verbesserung ist durch eine Verbesserung des Bondprozesses oder Verwendung anderer Bondmaterialien wie z.B. Kupferdrahtbonds erreichbar, die zudem eine erhöhte Stromtragfähigkeit erlauben.

5.6.3 Anwendungsspezifische Belastungstests

Im Abschnitt 5.6 wurden begleitend zu den Technologieuntersuchungen Tests, wie Power Cycling, Thermal Cycling und Temperaturschock durchgeführt. Daneben sind weitere Prüfungen erforderlich, die in Tabelle 4 dargestellt sind. Zum einen muss die überlagerte Belastung verursacht durch den Warmlauf des Kühlkreislaufes und dem aktiven Betrieb der Leistungshalbleiterbauelemente untersucht werden. Zum anderen sind spezifische Tests erforderlich, die grundsätzlich die Eignung der Bauelemente bei Temperaturen bis 200°C untersuchen. Die nachfolgend dargestellten Untersuchungen dienen dazu, das Potential der Bauelemente für diese Betriebsbelastung zu untersuchen. Es sind jedoch modulspezifisch bedingt Grenzen vorhanden. So ist z.B. das Gehäusematerial für dauerhafte Belastung von 200°C nicht geeignet. Daher werden einige Tests, bei denen das Gehäusematerial mit 200°C belastet würde, ohne das Gehäuse durchgeführt

5.6.3.1 Überlagerter Temperaturlastwechsel (IOL)

Für die überlagerten Tests wurden die bereits für Power Cycling Tests verwendeten Prüfstände der TU Chemnitz eingesetzt. Die Prüfungen erfolgten an der TU Chemnitz, wobei die Aufbauten und die Analyse nach den Tests bei Infineon Technologies in Warstein durchgeführt wurden. Detaillierte Angaben zum Test sind im Abschlussbericht der TU-Chemnitz dargestellt [20].

In diesem Test wurden zum einen Leistungsmodul mit Standardtechnologien und ein Prüfling getestet, bei dem die Verbindungstechnologien verbessert wurden (Abbildung 73).

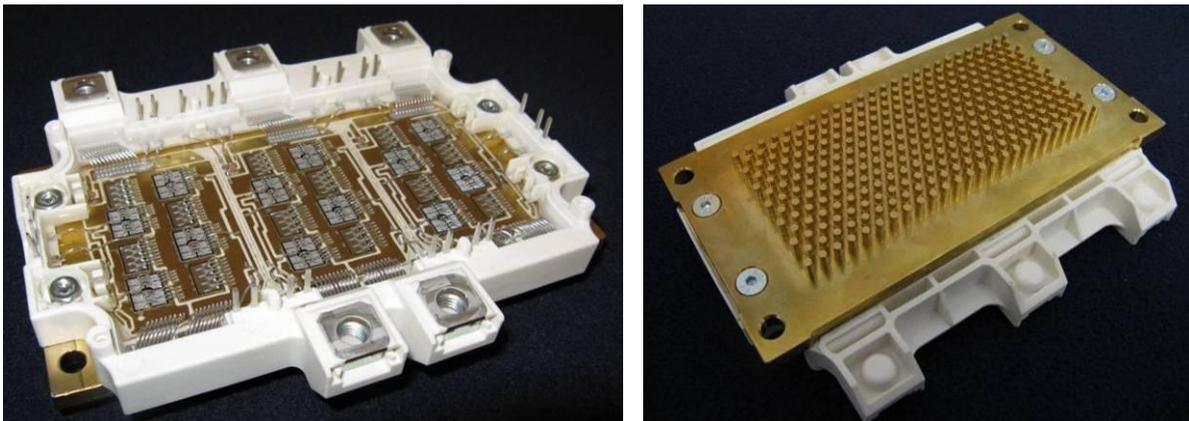


Abbildung 73: Verbessertes Leistungsmodul für applikationsnahen Lastwechselstest

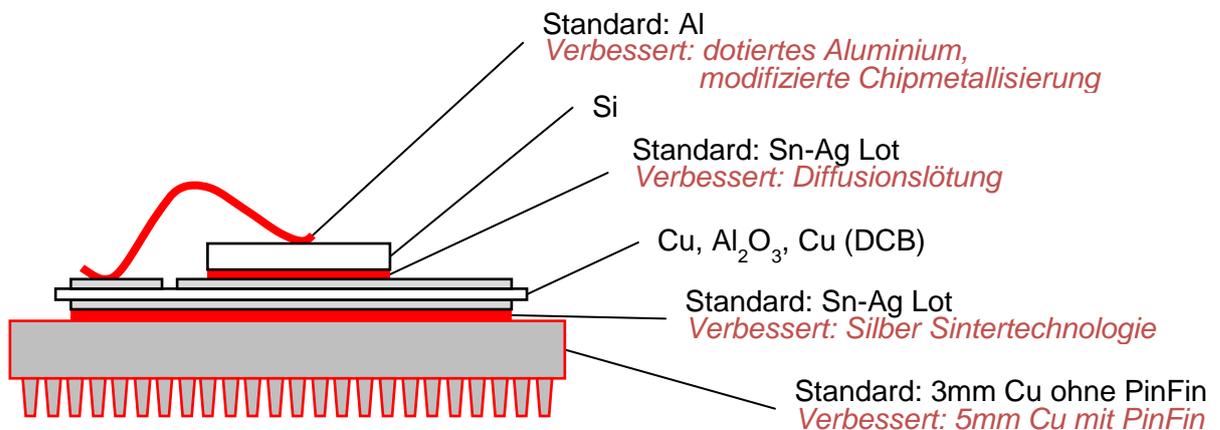


Abbildung 74: Vergleich zwischen Standard- verbesserter Verbindungstechnologie

In Abbildung 74 ist dargestellt, welche Modifikationen an dem EfA Leistungsmodul gegenüber dem Modul in Standardtechnologie durchgeführt wurden.

Während des Tests wurden die Module mit Hilfe des externen Temperiergerätes über einen wassergekühlten Kühlkörper gekühlt und aufgeheizt. Während der Aufheizphase wurden die Prüflinge zusätzlich mit aktiven Zyklen belastet. Das Modul in Standardtechnologie wurde über die Wärmeleitpaste an dem Kühlkörper montiert. Der Prüfling mit verbesserter Aufbau- und Verbindungstechnik wurde direkt an der PinFin-Struktur mit der Kühlflüssigkeit durchströmt. Die Kühlmitteltemperatur wurde von 22°C auf 122°C variiert und der Leistungshalbleiter dabei auf 175°C erwärmt. Den gemessenen Temperaturverlauf zeigt die Abbildung 75. Aufgrund der Wärmeleitpaste sieht das Leistungsmodul ohne PinFins einen höheren Temperaturhub in der Bodenplattenlötung, die eine Temperatur von ca. 145°C haben kann, als das Modul mit PinFins. Somit wird auch durch die Direktkühlung eine Erhöhung der Lastwechselfestigkeit erwartet. Damit im Modul trotzdem die gleiche Chiptemperatur erreicht wird, wird im verbesserten Modul eine 300A Chipbestückung und im Modul mit Standardtechnologie eine Variante mit 400A Chipbestückung getestet.

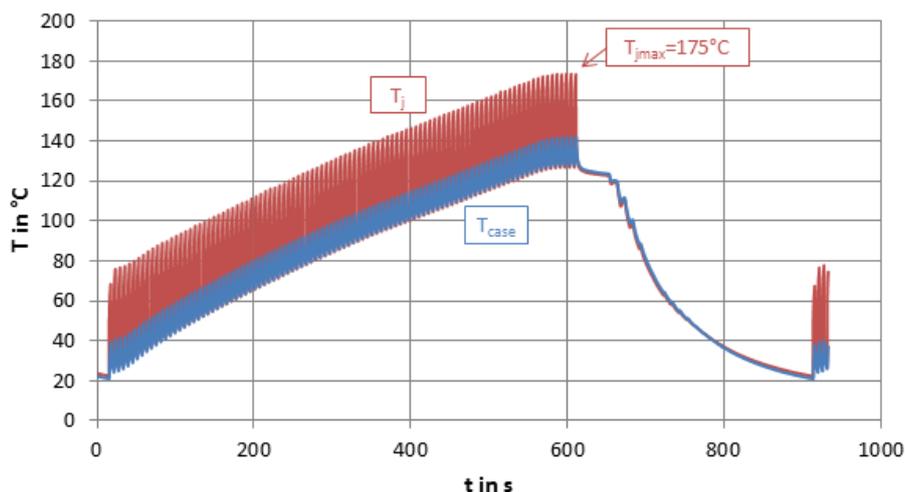


Abbildung 75: Temperaturverlauf während des applikationsnahen Lastwechseltests, gemessen am Standardmodul

Der Verlauf des R_{th} ist in der Abbildung 76 dargestellt. Das Standardmodul fiel bei diesem Test nach 2400 passiven Zyklen aufgrund der Erhöhung des thermischen Widerstandes aus. Das verbesserte Modul zeigte nach 6500 Zyklen noch keinen Ausfall.

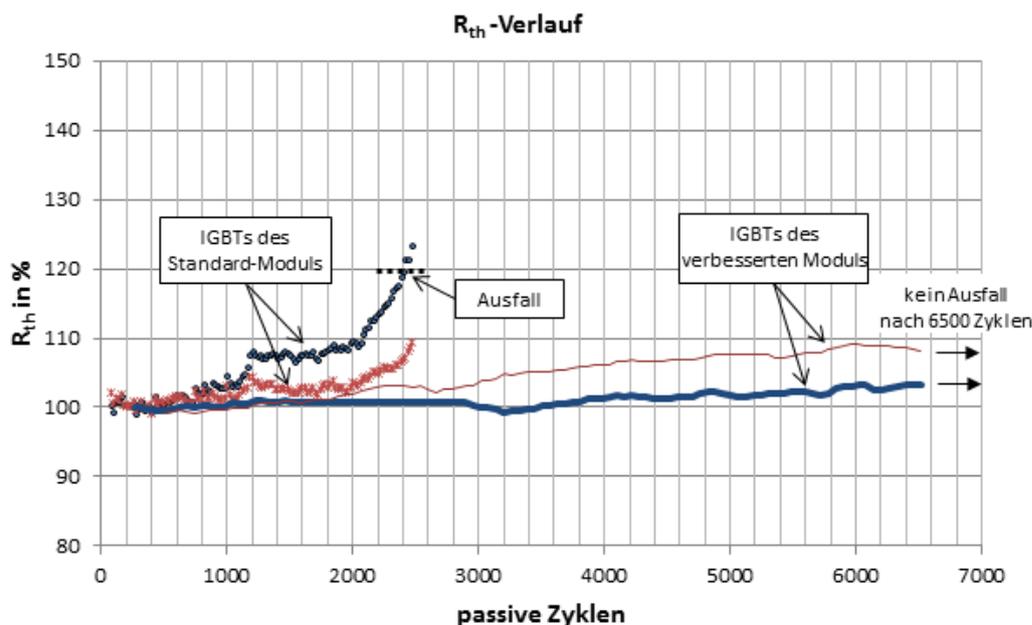


Abbildung 76: Verlauf des thermischen Widerstands, gemessen während des überlagerten Lastwechseltests

Die Fehleranalyse mit dem Ultraschallmikroskop zeigt im Standard-Modul die Delamination der Lotschicht zwischen DCB-Substrat und Grundplatte. Auch die Lotschicht zwischen dem Chip und DCB-Substrat zeigt Unregelmäßigkeiten. Es ist zu vermuten, dass diese Lotschicht ebenfalls degradiert ist.

Das Ergebnis dieses Tests zeigt, dass unter anwendungsnaher Temperaturwechselbelastung die Lotschichten die Lebensdauer des Leistungsmoduls begrenzen. Ein Bonddrahtfehler ist unter den überlagerten Temperaturwechselbedingungen nicht aufgetreten. Die verbesserten Verbindungen, Sintertechnologie für die Systemverbindung und Diffusionslötungen für die Chipverbindung, zeigen unter diesen Testbedingungen eine mindestens 2,5 fache Steigerung der Leistungsmodul-Lebensdauer.

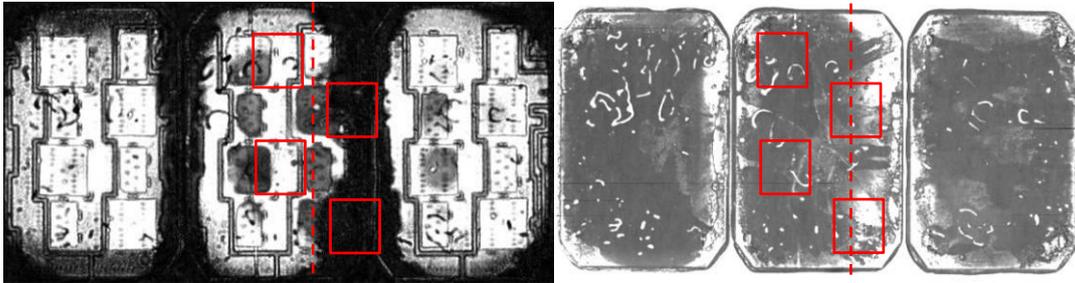


Abbildung 77: Ultraschallbilder des Standard-Moduls nach dem Test, links: Lotschicht zwischen Chip und DCB-Substrat, rechts: Lotschicht zwischen DCB-Substrat und Grundplatte

Für die Ultraschallanalyse der Drucksinterverbindung im Modul mit verbesserter Technologie müssen die PinFins entfernt werden. Das Abfräsen der Pins führt zu einer starken Verwölbung, die eine Analyse nur bedingt möglich macht. Die Ultraschallaufnahme, die in Abbildung 77 zu sehen ist, zeigt daher an verschiedenen Stellen des Moduls unterschiedliche Schichten. Im mittleren Bereich ist nicht mehr die oberseitige Kupfermetallisierung des Keramiksubstrats zu erkennen. Ebenfalls ist der Siliziumshunt nicht mehr zu sehen. Die Analyse zeigt, dass die Substratverbindung wesentlich geringer beschädigt ist, als die Lötverbindung des Referenzmoduls. Daher ist zu erwarten, dass der Test noch länger ohne einen Ausfall laufen würde. Eine Analyse der Diffusionslötverbindung zeigt ebenfalls keine Degradation.

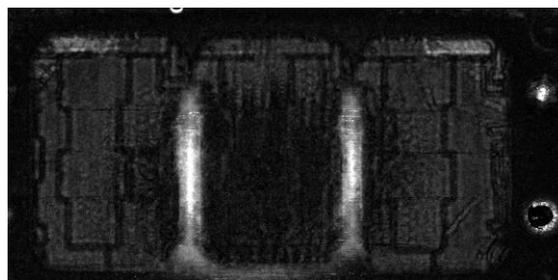


Abbildung 78: Ultraschallbilder des verbesserten Moduls nach dem Test und nach Abfräsen der PinFins: starke Durchbiegung nach Abfräsen führt zu unterschiedlichem Tiefe der Aufnahme

5.6.3.2 Überlagerter Temperaturlastwechsel (IOL) mit .XT Substratlötung

In diesem Test war das Ziel, die Zuverlässigkeit der neuartigen Systemlötung zu testen. Hierfür wurde ähnlich dem Test aus dem Abschnitt 5.6.3.1 ein anwendungsnaher Lastwechseltest durchgeführt. Für den Test wurden Prüflinge mit verbesserten Technologien aufgebaut. Im Vergleich zu vorher beschrieben Test wurde anstelle der Sintertechnologie die Verbindungsschicht zwischen DCB-Substrat und Grundplatte mit der .XT Lötung realisiert. Die Prüflinge wurden mit einer Standard-Grundplatte (Cu, 3mm, ohne PinFin) aufgebaut. Im Vergleich zum Referenzmodul wurden nur 2x150A Chips anstelle 2x200A Chips verwendet, so dass eine höhere Chiptemperatur erreicht wird.

Die Testparameter für den anwendungsnahen Test wurden wie in Tabelle 13 beschrieben verwendet.

$T_{\text{wasser_min}}$	22°C
$T_{\text{wasser_max}}$	122°C
$t_{\text{heizen (passiv)}}$	10min
$t_{\text{kühlen (passiv)}}$	5min
I_{Last}	220A
$t_{\text{on (aktiv)}}$	2s
$t_{\text{off (aktiv)}}$	4s
Anzahl aktiver Zyklen pro passivem Zyklus	100
T_{jmax}	195°C

Tabelle 13: Testparameter für den applikationsnahen Lastwechseltest

Der Test wurde nach 2120 Zyklen unterbrochen, um eine Ultraschallmikroskopie durchzuführen. Diese Zyklenzahl entspricht in etwa der Lebensdauer des Standard-Moduls aus dem Test im Kapitel 5.6.3.1. Die Ultraschallbilder sind in Abbildung 79 zu sehen. Die Diffusionslötung zwischen Chip und DCB-Substrat zeigt trotz der 195°C Betriebstemperatur keine Degradation. Die neuartige Systemlötung zeigt an den Ecken des Substrats beginnende Delamination.

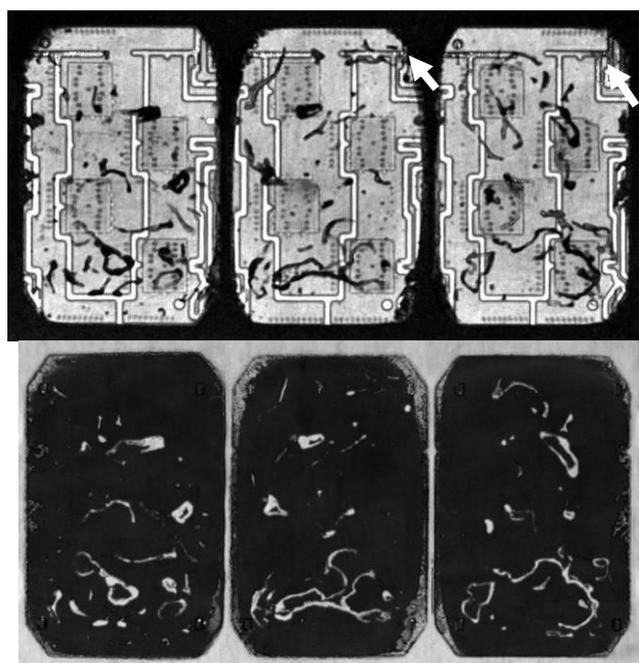


Abbildung 79: Ultraschallbilder des verbesserten Moduls nach dem Test, links: Lotschicht zwischen Chip und DCB-Substrat, rechts: Lotschicht zwischen DCB-Substrat und Grundplatte

Unter Annahme eines linearen Rißfortschritts bei zunehmender Zyklenzahl ergibt sich eine voraussichtliche Lebensdauer der Systemlötung von größer 6000 Zyklen. Durch den Einsatz von PinFin Direktkühlern sinkt bei gleicher Kühlmitteltemperatur die Temperatur infolge der fehlenden Wärmeleitpaste signifikant. Es ist daher zu erwarten, dass ähnliche Zyklenzahlen wie im Aufbau mit Drucksintertechnik erzielt werden können, wenn das PinFin Modul zum Einsatz kommt.

5.6.3.3 Lagertests mit 200°C Umgebungstemperatur

Gemäß Tabelle 4 in Abschnitt 5.1.2 sind Lagertests, wie Hochtemperatursperrlagerung und Hochtemperaturgatestresstest, bei Temperaturen mit der maximalen Betriebstemperaturen durchzuführen. Die Tests werden entweder auf Heizplatten oder in Öfen durchgeführt. Dadurch werden auch die Gehäusewerkstoffe auf die gleiche Temperatur erhitzt, obwohl dies in der Applikation so nicht vorkommt. Der im EfA Projekt verwendete Gehäusekunststoff ist nicht für den dauerhaften Einsatz bei 200°C geeignet. Daher konnten die Tests nur an vereinfachten Teststrukturen durchgeführt werden oder mit angepassten Randbedingungen durchgeführt werden und geben damit einen Hinweis auf das Potential für den Betrieb bei 200°C.

Für den Hochtemperatursperrlagertest wurden die Testbedingungen wie folgt festgelegt:

- Test auf Heizplatte
- 100h / 200 °C / 585 V / $V_{GE}=0V$
- 900h / 180 °C / 400 V / $V_{GE}=0V$

Der Vergleich von Nachmessungen und Vormessungen der für diesen Test aus Tabelle 5 relevanten Eigenschaften zeigen keine kritischen Änderungen oder signifikant erhöhte Werte.

Der Hochtemperaturgatestresstest

- Test in Ofen
- Test ohne Gehäuse/Verguss
- 1000h / 200 °C / $V_{GE}=+-V_{GE,max}$

Der Vergleich von Nachmessungen und Vormessungen der für diesen Test aus Tabelle 5 relevanten Eigenschaften zeigen keine kritischen Änderungen oder signifikant erhöhte Werte. Die Lagertests zeigen somit ebenfalls ein Potential der Halbleiterbauelemente für Betrieb bei deutlich erhöhten Betriebstemperaturen.

5.7 Konstruktion Leistungselektronik / Schnittstellen und Validierung der Komponenten im Gesamtsystem (WP 4+5)

Im Rahmen einer Bauraumuntersuchung wurde für die Leistungselektronik eine Anbaulösung unterhalb des 8-Gang Automatgetriebes gewählt, das vom Projektpartner ZF für das Fahrzeug von BMW aufgebaut wird. Der Aufbau ist in Abschnitt Zielsetzung in Abbildung 1 dargestellt. Im Abschnitt 5.3 und Abschnitt 5.5 wurden bereits Arbeiten zur Kühlung und Ansteuerung dargestellt, die teilweise die Konstruktion unterstützen und der Untersuchung der elektrischen Schnittstellen dienen. Die Analyse des Bauraum zeigte die Möglichkeit einer Integration des Leistungsmoduls mit HybridPACK™ 1 Rahmen und PinFin Bodenplatte.

5.7.1 Schnittstelle Leistungsmodul Kondensator

Der schmale Bauraum macht es notwendig, den Zwischenkreiskondensator der Firma Kemet neben dem Leistungsmodul anzuordnen. Abbildung 79 zeigt schematisch die Anordnung von Leistungsmodul und Kondensator.

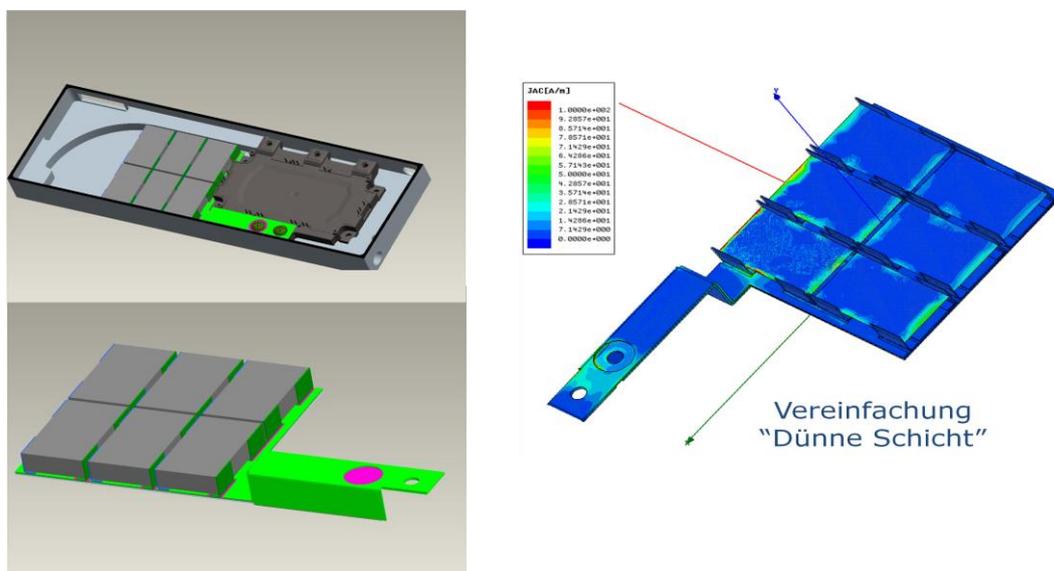


Abbildung 80: Untersuchung der Anschlussinduktivität des Kondensators optimale Induktivität 8.6 nH

Die Induktivität zwischen Kondensator und Leistungsmodul verursacht Überspannungsspitzen an den Leistungshalbleiterschaltern und muss deshalb minimiert werden. Simulationen wurden daher durchgeführt, um den Aufbau zu optimieren. Mit einer optimierten Anschlussgeometrie war es möglich die Induktivität des Kondensators auf 8.6 nH zu reduzieren. Die Anschlussführung verursacht jedoch Kollisionen mit der Treiberelektronik. Wie in Abbildung 80 dargestellt ist, wurde ein Kompromiss gefunden, der bei einer Induktivität von 10 nH eine einfache Integration erlaubt.

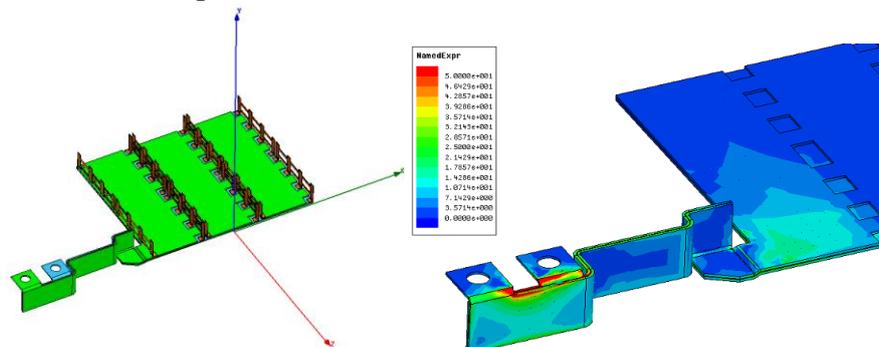


Abbildung 81: Anschlussdesign des Kondensators für einfache Integration: 10nH Kondensatorinduktivität

Die Simulierten Induktivitätswerte konnten über Messungen bestätigt werden. Desweiteren wurde der Verlustleistungseintrag der Anschlüsse geprüft.

5.7.2 Integration der Komponenten

Abbildung 81 zeigt schematisch den Ablauf der Integration durch die verschiedenen Projektpartner. Die Integration des Leistungsmoduls mit integrierten Stromsensoren und PinFin Struktur und der galvanisch getrennten Treiberbauelemente/Sigma-Delta Wandler IC erfolgte durch den Projektpartner Liebherr Elektronik GmbH, welcher die Konstruktion der Gesamtelektronik im Projekt verantwortet.

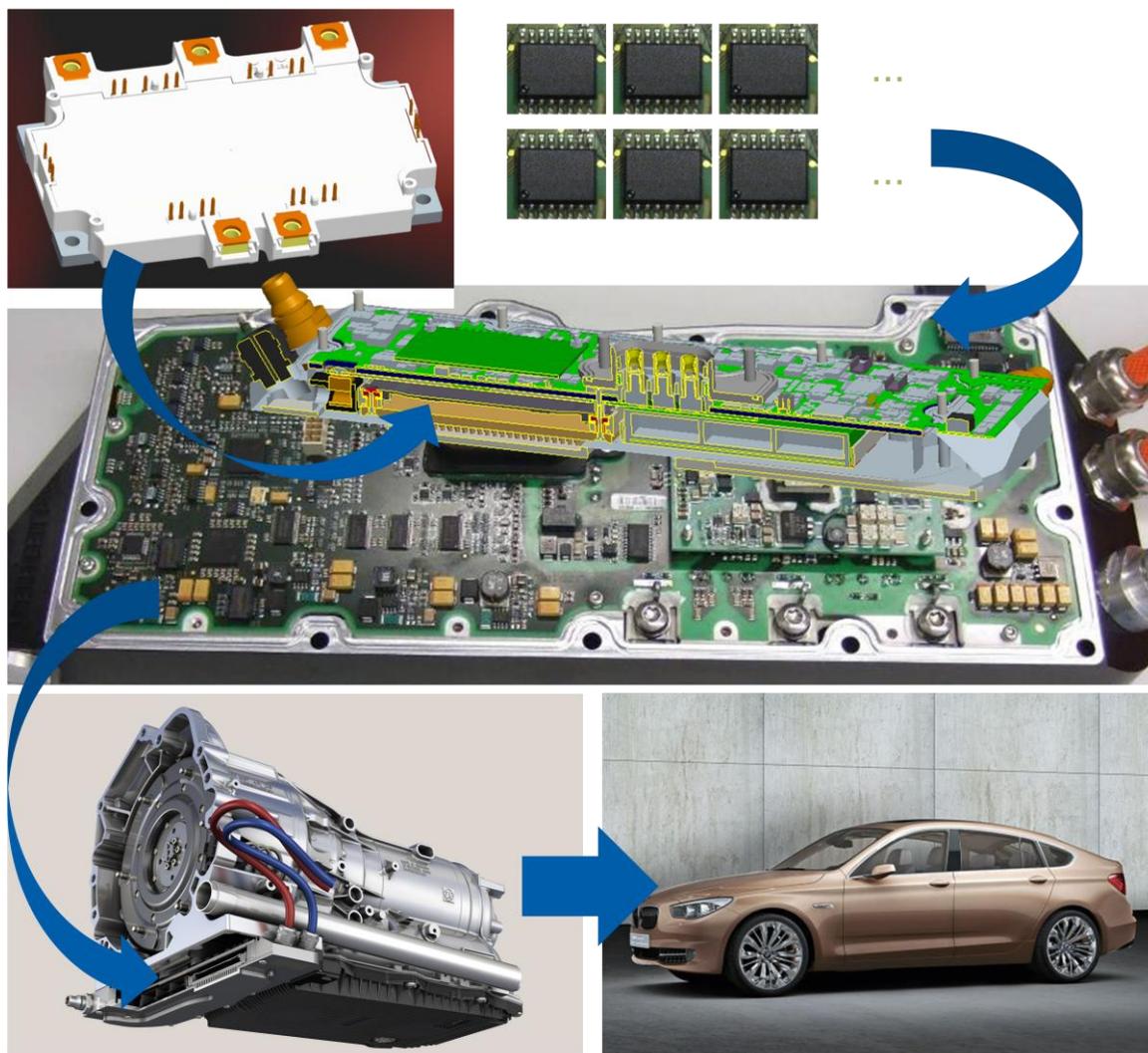


Abbildung 82: Integration des Leistungsmoduls und der Treiber/Sigma Delta IC in Gesamtelektronik/Getriebe und Fahrzeug

Die weiteren Integrationsstufen und Prüfungen auf Getriebe bzw. Fahrzeugebene erfolgten nachfolgend bei den Projektpartnern ZF. Bei diesen Partnern wurden Vibrationstests mit den Leistungsmodulen durchgeführt. Die Stromsensorik mit integrierten vertikalen Siliziumshunts konnte erfolgreich in Betrieb genommen werden. Prüfstandtests und Fahrzeugtests bestätigten die Funktion der leistungselektronischen Komponenten. Ergebnisse der Integration und Validierungstests sind in den Abschlussberichten der Projektpartner zu finden [11][12].

5.8 Nutzen, Umsetzung, Verwertung der Ergebnisse

Einige Teilerkenntnisse aus den Aktivitäten im Rahmen von EfA Projekts sind bereits jetzt in die Serienprojekte mit eingeflossen: Erkenntnisse aus dem EfA Projekt wurden genutzt, um auf dem HybridPACK™ 1 Modul die Entwicklung eines HybridPACK™ 1 PinFin Modul mit direkter Kühlung zu beginnen. Ergebnisse hinsichtlich der Kühlung wurden zudem für die Entwicklung des HybridPACK™ 2 Leistungsmoduls genutzt.

Die Erkenntnisse zur Lastwechselfestigkeit von Standardtechnologien werden zudem in Kombination mit den erarbeiteten Lebensdauerbewertungsverfahren für die Lebensdauer vorhersage von Leistungsmodulen in Hybridfahrzeugen und Elektrofahrzeugen eingesetzt.

Erkenntnisse zu den neuen Technologien werden zudem genutzt um darauf aufbauend Entwicklungen zu treiben.

Eine Verwertung der Ergebnisse auch in der industriellen Anwendung ist sichtbar. Eine Prüfung, beispielsweise des vertikalen Siliziumshunts für weitere Anwendungsbereiche im Industriebereich wird auf Basis der erarbeiteten Ergebnisse gestartet.

5.9 Vergleich mit der Zielsetzung / Zielerreichung

Technik-Aspekt:

Die Arbeiten der Infineon Technologies AG konzentrierten sich auf die Erforschung einer zuverlässigen, hochtemperaturfähigen Leistungselektronik bis zu 200 °C Betriebstemperatur, eine modulintegrierte Stromsensorik sowie die Direktkühlung mit niedrigem Druckabfall für die Integration in den Verbrennungsmotorkühlkreislauf. Desweiteren wurden galvanisch getrennte Treiber IC und Sigma-Delta A/D Wandler untersucht.

Die Technologien wurden in Leistungsmodule integriert und die ICs von Projektpartnern in die getriebeintegrierte Elektronik mit eingebaut. Mit der integrierten Elektronik wurde an Prüfständen und nach Integration in Getriebe und Fahrzeug in Fahrtests der prinzipielle Nachweis der Hochtemperaturtauglichkeit erbracht. Der Fahrbetrieb zeigt, dass die Stromsensorik prinzipiell geeignet ist, um die Motorregelung zu realisieren. Die Verbesserung der Lastwechselfestigkeit um einen Faktor 100 konnte mit Lebensdauer tests, die beim Projektpartner TU Chemnitz durchgeführt wurden, nachgewiesen werden. Es wurde gezeigt, dass sowohl die Drucksinter- als auch die .XT Systemlötung das Potential haben die Anforderungen für den Betrieb am Motorkühlkreislauf zu erfüllen. Zudem konnten die jeweiligen Lastwechselgrenzen von Bonddrahttechnik, Löttechnik und Chipmetallisierung aufgezeigt werden.

Der Betrieb der Leistungselektronik unter Temperaturbedingungen wie am Verbrennungsmotorkühlkreislauf und integriert am Getriebe möglich.

Wirtschaftlicher Aspekt: Durch den Einsatz verbesserter Aufbautechnologie ist der zuverlässige Betrieb der Leistungselektronik bei erhöhter Betriebs- und Kühlmitteltemperatur möglich. Durch den resultierenden Entfall der Phasenleitungen und den Wegfall des zusätzlichen Kühlkreislaufs sowie durch das einfache Servicekonzept bei Integration unterhalb des Getriebes ist das System auch wirtschaftlich interessant. Das Potenzial der Leistungsmodule kann damit besser genutzt werden

Allgemein: Das Projektziel Erforschung von Komponenten für ein kostengünstigen und zugleich zuverlässigen Hybridantriebs ist erreicht worden. Die Integration der Leistungselektronik an das Getriebe unter Wegfall von Phasenleitung und ohne den zusätzlichen Niedertemperaturkühlkreislauf wurde nachgewiesen. Mit der modulintegrierten Stromsensorik auf Basis von vertikalen Siliziumshunts, sowie temperaturfester Aufbautechnik und direkter Cu-PinFin Kühlung konnten Leistungsmodule hoher Leistungsdichte realisiert und integriert werden.

6 Kurzfassung des Schlussberichtes

Die Kurzfassung des Schlussberichtes, in dem im wesentlichen der fachliche Inhalt dargestellt ist, wird getrennt zu diesem Abschlussbericht abgegeben. Dabei wird der **BMWi-Vodr. 3831/11.05** verwendet.

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Forschungsprojekt EfA - Integration der Leistungselektronik im Getriebe mit erhöhten Einsatztemperaturen [1]	3
Abbildung 2: Leistungsklasse moderner Bauelemente mit Gehäuseformen [2]	4
Abbildung 3: Vergleich der Durchlasseigenschaften von Trench-MOSFET und IGBT	4
Abbildung 4: Aufbau und Schichtdicken in Standardmodulen mit Grundplatte.....	5
Abbildung 5: Fehlermechanismen in Standardmodulen durch thermische Wechsellast.....	5
Abbildung 6: Infineon (eupec) Leistungsmodul für direkte Flüssigkeitskühlung (Prototyp)	6
Abbildung 7: Verluste im Umrichter während des Fahrbetriebs. Abschätzung Verluste: 4.5% >1000 U/min 7.5% <1000 U/min.....	10
Abbildung 8: Anstieg der Verlustleistung 50% beim Rekuperieren bei Erhöhung der Batteriespannung auf 385V (Verdopplung der Ausgangsleistung).....	10
Abbildung 9: Anforderung an das Leistungsmodul: Maximale Strombelastung bei Betriebsbelastung	11
Abbildung 10: Vorgehensweise zur Abschätzung erreichbarer Lebensdauer von Leistungsmodulen [13]	13
Abbildung 11: Anforderungen im Fahrleistungstest zur Beurteilung der Belastung der Elektronik	14
Abbildung 12: Verlustleistung im Fahrleistungstest mit Generatorfunktion.....	14
Abbildung 13: Thermisches Modell und Temperaturverlauf im Fahrleistungstest	15
Abbildung 14: Thermischer Vergleich von Modulkonzepten unter Verwendung gleicher Chipfläche	15
Abbildung 15: Maximaler Temperaturhub im Fahrleistungstest für verschiedene Aufbauvarianten.....	16
Abbildung 16: Verlustleistung und exemplarischer Temperaturverlauf für direkte Wasser/Glykolkühlung mit 200A Chipbestückung bei unterschiedlichen Belastungsarten	17
Abbildung 17: Lastwechselfestigkeit von HybridPACK™ Modulen.....	18
Abbildung 18: Simulierter Temperaturverlauf im KV01 Fall bei stehendem Kühlmittel	20
Abbildung 19: Lastwechselanforderungen aus Warmläufen und Abkühlen des Verbrennungsmotors vs. Lebensdauerverbrauch für Traktionsmodul mit AlSiC Bodenplatte und High Performance Keramik.....	21
Abbildung 20: Direktgekühltes Leistungsmodul mit PinFin Kühlstruktur.....	21
Abbildung 21: Funktionsblockdiagramm und Aufbau des Prüfstands	22
Abbildung 22: Detailstruktur des Prüfstands zur Untersuchung der Kühleigenschaften	23
Abbildung 23: Kühleraufbau zur Untersuchung des thermischen Verhaltens.....	23
Abbildung 24: Stromlinienverteilung als Ergebnis von CFD Simulationen einer PinFin Kühlstruktur.....	24
Abbildung 25: Optimierung des Kühlers mittels CFD-Simulationen: Querangeströmte Variante (rechtes Bild) ergibt optimale Temperaturverteilung bei geringstem Druckabfall von 20mbar bei 6l/min Durchfluss (Quelle: ZF)	24
Abbildung 26: Messung des Druckabfall des direktgekühlten PinFin Leistungsmoduls im Vergleich zu einem Modul auf ShowerPower Kühler	25
Abbildung 27: Simulation des thermischen Widerstands für Belastung von IGBTs (links) und Dioden (rechts).....	25

Abbildung 28: Infrarotaufnahmen bei Bestromung der IGBTs (links) und der Dioden (rechts) (Einspeisung unterschiedlicher Verlustleistungen)	26
Abbildung 29: Infrarotaufnahmen bei Bestromung der IGBTs bei unterschiedlichen Kühlmittelströmen	26
Abbildung 30: Auf Siliziumfläche normierter thermischer Widerstand des direktgekühlten Pin Fin Leistungsmodul in Abhängigkeit vom Kühlmittelstrom	27
Abbildung 31: Transienter thermischer Widerstand bei Bestromung der IGBTs bei unterschiedlichen Kühlmittelströmen und Kopplung auf Dioden	27
Abbildung 32: Vergleich Strommessung mit Shunt vs. Strommessung mit Hall-Effekt Wandler	28
Abbildung 33: Untersuchung an flachen Metall-Shunts in MOSFET Modul nach Fahrzeugbetrieb	28
Abbildung 34: Untersuchung zu Einfluss der Elektronenbestrahlung an hochohmigen Siliziumwiderständen.....	29
Abbildung 35: Testsubstrate zur Untersuchung der Si-Widerstände.....	29
Abbildung 36: Einfluss der Elektronenbestrahlung auf den Temperaturgang.....	30
Abbildung 37: Einfluss der Dotierung auf Elektronenbeweglichkeit aus [15].....	30
Abbildung 38: Vergleich Modul mit integrierten Shunts vs. Modul ohne Shunts.....	31
Abbildung 39: Temperaturgang eines im Modul integrierten Shunts mit ~200µm Dicke	31
Abbildung 40: Temperaturgang eines im Modul integrierten Shunts mit ~600µm Dicke	32
Abbildung 41: Bestromungsverläufe im Modul bei unterschiedlichen Schaltzuständen	32
Abbildung 42: Simulation der Potentialverteilung in Abhängigkeit von Bestromungsrichtung.....	33
Abbildung 43: Potentialverteilung im Bereich des Shuntwiderstands für verschiedene Stromrichtungen nach Substratmodifikation	33
Abbildung 44: Einsatz der Coreless Transformer Technologie für galvanische Trennung von Treiber und A/D Wandler Bausteinen	34
Abbildung 45: Blockdiagramm der Treiberelektronik mit Leistungsmodul	34
Abbildung 46: Treiberelektronik mit Coreless Transformer Treiber IC und Sigma Delta Analog Wandler.....	35
Abbildung 47: Messung des Leistungsmoduls mit Treiberplatine Doppelpuls Abschalten bei 300 A	35
Abbildung 48: Vergleich der Messung des Stromsignals am Ausgang des Sigma Delta ICs im Vergleich zu einer Rogowski Spule	36
Abbildung 49: Vergleich der Messung des Stromsignals am Digitalausgang vs. Referenzmessung.....	36
Abbildung 50: Messung Strom / Phasenspannung / Gatespannung bei $I_{eff}=166A$ / $U_{DC}=130V$	37
Abbildung 51: Beispiele für mögliche Verarbeitungsverfahren der Silberpasten	38
Abbildung 52: Vergleich im Airbrushverfahren (links) mit im Siebdruckverfahren (rechts) beschichtete DCB	38
Abbildung 53: Schematische Darstellung eines möglichen Sinterwerkzeuges.....	39
Abbildung 54: Bild des Werkzeugs für Sinterprozess von Chips und DCB	39
Abbildung 55: Bild der Presse für den Sinterprozessschritt	40
Abbildung 56: Ultraschallaufnahme der Sinterverbindung des Substrats vor (links) und nach 3000 TST (rechts) (-40°C / 150°C, $t_{storage} > 1h$, $t_{change} < 30s$	40
Abbildung 57: Werkzeug für Aufnahme der PinFin Bodenplatten für die Drucksinterung.....	41

Abbildung 58: Modulaufbauten mit Diffusionslötungen und Drucksinterung für Substratverbindung	41
Abbildung 59: TC Test (ΔT 80K) Ultraschallaufnahmen nach 10000/25000 Zyklen	42
Abbildung 60: Metallografischer Schliff der .XT Systemlötung [24]	42
Abbildung 61: Ultraschallbilder des verbesserten Moduls nach TST Test (ΔT 190K) $-40^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ mit .XT Substratlötung nach Ultraschallaufnahmen nach 0/1000/2500 Zyklen.....	43
Abbildung 62: Foto eines der realisierten Lastwechselstände (Quelle: TU Chemnitz)	45
Abbildung 63: Prüfling mit verbesserter Bonddrahttechnologie.....	46
Abbildung 64: Degradation der Lotschicht zwischen Chip und DCB-Substrat, Analyse mit Ultraschallmikroskop	46
Abbildung 65: Ergebnisse Lastwechseltests mit verbesserter Bondtechnologie und verschiedenen Chipdicken [24].....	47
Abbildung 66: Testaufbau für Lastwechseluntersuchung mit Diffusionslötung	47
Abbildung 67: Metallografischer Schliff der Verbindung zwischen Chip und DCB-Substrat [24]	48
Abbildung 68: PowerCycling Ergebnis an Testaufbauten mit Diffusionslötung im Vergleich zu Standard 600V Leistungsmodul bei $T_{jmax}=165^{\circ}\text{C}-187^{\circ}\text{C}$ [24]	48
Abbildung 69: Bild 9: Anstieg der Kollektor/Emitter Spannung VCE infolge PowerCycling von Modulen mit Diffusionslötung und Standard Bonddrahttechnik.....	49
Abbildung 70: Lebensdauervergleich zwischen Standard-Leistungsmodulen und Prüflingen mit Diffusionslötung, verbesserten Bonddrähten und verschiedenen Chipmetallisierungen...50	50
Abbildung 71: Ultraschallaufnahme der Substratverbindung (Niedertemperaturverbindung) .50	50
Abbildung 72: Rissbildung innerhalb der Chipmetallisierung bei Leistungsmodul mit verbesserten Bonddrähten und Standardmetallisierung	51
Abbildung 73: Verbessertes Leistungsmodul für applikationsnahen Lastwechseltest	52
Abbildung 74: Vergleich zwischen Standard- verbesserter Verbindungstechnologie	52
Abbildung 75: Temperaturverlauf während des applikationsnahen Lastwechseltests, gemessen am Standardmodul.....	53
Abbildung 76: Verlauf des thermischen Widerstands, gemessen während des überlagerten Lastwechseltests.....	53
Abbildung 77: Ultraschallbilder des Standard-Moduls nach dem Test, links: Lotschicht zwischen Chip und DCB-Substrat, rechts: Lotschicht zwischen DCB-Substrat und Grundplatte	54
Abbildung 78: Ultraschallbilder des verbesserten Moduls nach dem Test und nach Abfräsen der PinFins: starke Durchbiegung nach Abfräsen führt zu unterschiedlicher Tiefe der Aufnahme.....	54
Abbildung 79: Ultraschallbilder des verbesserten Moduls nach dem Test, links: Lotschicht zwischen Chip und DCB-Substrat, rechts: Lotschicht zwischen DCB-Substrat und Grundplatte	55
Abbildung 80: Untersuchung der Anschlussinduktivität des Kondensators optimale Induktivität 8.6 nH	57
Abbildung 81: Anschlussdesign des Kondensators für einfache Integration: 10nH Kondensatorinduktivität	57
Abbildung 82: Integration des Leistungsmoduls und der Treiber/Sigma Delta IC in Gesamtelektronik/Getriebe und Fahrzeug	58

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht Anforderungen an Leistungsmodule in Traktion und Industrie vs. EfA-Projekt.....	9
Tabelle 2: Übersicht Prüfungen an Leistungsmodulen.....	11
Tabelle 3: Prüfbedingungen für automotive IGBT Leistungsmodule	12
Tabelle 4: Erweiterung der Prüfbedingungen für Leistungsmodule aus EfA Projekt.....	12
Tabelle 5: Fehlerkriterien für Tests an Leistungsmodulen	13
Tabelle 6: Berücksichtigte Kühleigenschaften zur Integration in den vorhandenen Kühlkreislauf	16
Tabelle 7: Thermische Eigenschaften der verglichenen Modulvarianten	16
Tabelle 8: Temperaturbeanspruchung bei unterschiedlichen Belastungsarten vs. geforderte Lastwechsel	18
Tabelle 9: Verbrauch der Lebensdauer bei unterschiedlichen Belastungsarten unter Annahme der Lastwechselfestigkeit ohne Berücksichtigung der Warmläufe des Kühlmittels (Berücksichtigung hypothetischer Lebensdauerkurve 150°C).....	19
Tabelle 10: Vergleich Lebensdauerverbrauch für unterschiedliche Kühlarten bei gleicher Chipbestückung	19
Tabelle 11: Gemessene Widerstandswerte in Abhängigkeit von Bestromungsrichtung	33
Tabelle 12: Vergleich der erreichten Tests mit Anforderungen aus EfA Profil unter Annahme eines Beschleunigungsexponenten von 3	43
Tabelle 13: Testparameter für den applikationsnahen Lastwechseltest.....	55

9 Wissenschaftliche Veröffentlichungen

1. F. Vogel, S. Lutz, A. Hensler, J. Lutz, M. Thoben, W. Schön, A. Munding, J. Lück, "Power Electronics in the Powertrain - an Optimum of Integration", Proceedings of Hybrid Vehicles and Energy Management 6th Symposium, Braunschweig, 2009, pp. 146-158.
2. A. Hensler, J. Lutz, M. Thoben, W. Schön, S. Lutz, J. Lück, "Power Electronics for Power Cycling Capability at High Temperatures and High Temperature Swings", Proceedings of Hybrid Vehicles and Energy Management 6th Symposium, Braunschweig, 2009, pp. 194-210
3. A. Hensler, J. Lutz, M. Thoben, K. Guth, "First Power Cycling Results of Improved Packaging Technologies for Hybrid Electrical Vehicle Applications", Proceedings of CIPS, Nuremberg, 2010, pp. 85-89.
4. A. Hensler, J. Lutz, M. Thoben, J. Zachariae, "Power Cycling Tests at High Temperatures with IGBT Power Modules for Hybrid Electrical Vehicle Applications," in Proceedings of ESTC, Berlin, 2010.
5. M. Thoben, A. Munding, A. Hensler, S. Lutz, „Integration Leistungselektronik für höhere Betriebstemperatur“, Haus der Technik, Tagung Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen, Expert Verlag, 2010
6. A. Munding, M. Thoben, T. Hong, M. Kerkhoff, W. Schön, S. Lutz, „Compact PCB-packaging and water cooling of a 25-kW inverter“, Proceedings of PCIM, Nuremberg, 2010
7. M. Thoben, T. Hong, P. Weidner, J. Reiners, and G. Osvald, "Modulintegration von Si-Shunts für die Stromregelung in Antrieben," in *39. Kolloquium Halbleiter-Leistungsbaulemente und ihre systemtechnische Anwendung*, Freiburg, 2010
8. T. Licht, M. Thoben, R. Speckels: Sintering technology used for interconnection of large areas, Proceedings of CIPS, Nuremberg, 2010
9. W. Schön, T. Voss, A. Hensler, J. Lutz, S. Lutz, A. Munding, M. Thoben, D. Zeidler, „Hybrid Drive as a variation of a gear box“, Braunschweiger Symposium Hybrid- und Elektrofahrzeuge, ITS Niedersachsen, 2011
10. A. Hensler, J. Lutz, M. Thoben, A. Munding, D. Zeidler, S. Lutz, W. Schön, "Reliability Investigations of Improved Power Modules - Results from EfA-Project", Braunschweiger Symposium Hybrid- und Elektrofahrzeuge, ITS Niedersachsen, 2011
11. A. Hensler, C. Herold, J. Lutz, M. Thoben, „Thermal Impedance Monitoring during Power Cycling Tests“, Proceedings of PCIM, Nuremberg, 2011
12. A. Hensler, D. Wingert, C. Herold, J. Lutz, M. Thoben, "Thermal Impedance Spectroscopy of Power Modules During Power Cycling", Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), San Diego, 2011
13. W. Schön, S. Lutz, A. Hensler, A. Munding, M. Thoben, D. Zeidler, „Third Generation Hybrid Drive: Transmission-based integration of power electronics“, ATZ Elektronik, 03/2011 Volume 6

10 Literaturverzeichnis

- [1] F. Vogel, S. Lutz, A. Hensler, J. Lutz, M. Thoben, W. Schön, A. Munding, J. Lück, "Power Electronics in the Powertrain - an Optimum of Integration," in *Proceedings of Hybrid Vehicles and Energy Management 6th Symposium*, Braunschweig, 2009, pp. 146-158.
- [2] J. Lutz, U. Scheuermann, H. Schlangenotto: Halbleiterleistungsbauelemente, Springer Verlag, Berlin, tbp. 2006
- [3] R. Bayerer, A. Christmann, M. Münzer, M. Thoben: High temperature semi-conductors for HEV applications, EPE 2005, Dresden
- [4] P. Kanschat, T. Stolze, T. Passe, H. Rüthing, F. Umbach, O. Hellmund: 600V IGBT3-Technology in New Low Cost Modules for Consumer Drives Applications, PCIM 2003, Nürnberg
- [5] P. Kanschat, H. Rüthing, F. Umbach, F. Hille: 600V IGBT3: A detailed Analysis of Outstanding Static and Dynamic Properties, PCIM 2004, Nürnberg
- [6] G. Coquery, G. Lefranc, T. Licht, R. Lallemand, N. Seliger, H. Berg :High temperature reliability on automotive power modules verified by power cycling tests up to 150°C, ESREF 2003, Bordeaux
- [7] N. Seliger, E. Wolfgang, G. Lefranc, H. Berg, T. Licht: Reliable Power Electronics for Automotive Applications, Proc. 13th European Symposium on the Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis, ESREF2002, Rimini, Italy
- [8] R. Amro, J. Lutz, J. Rudzki, M. Thoben, A. Lindemann: Double-Sided Low-Temperature Joining Technique for Power Cycling Capability at High Temperature, EPE 2005, Dresden
- [9] M. Thoben, M. Lutterbach : Kühl- und Aufbaukonzepte, Abschlussbericht BMBF Projekt NEMO, 2003
- [10] M. Thoben et al: Abschlussbericht zum Teilvorhaben 19 U 6007C im Verbundprojekt INGA, Aufbau- und Verbindungstechnik für die Integration der Leistungselektronik und den Einsatz bei hohen TemperaturenEntwicklungsstudie zur Hochtemperaturqualifikation von Bare Die (32 bit) Microcontrollern, 2010
- [11] S. Lutz, A. Jerin: Abschlussbericht zum Teilvorhaben BMW, 19 U 6006D im Verbundprojekt EfA, (BMW)", 2011
- [12] W. Schön: Abschlussbericht zum Teilvorhaben 19 U 6006A im Verbundprojekt EfA, Elektrokomponenten für Aktivgetriebe (ZF)", 2011
- [13] M. Thoben, K. Mainka, R. Bayerer, I. Graf, M. Münzer: „From vehicle drive cycle to reliability testing of Power Modules for hybrid vehicle inverter“, in Proceedings of PCIM, Nuremberg, 2008
- [14] M. Baumann, W. Wondrak, J. Lutz: Comparison of different cooling systems for power modules in automotive application, PCIM 2009
- [15] S. M. Sze, Semiconductor Devices Physics and Technology
- [16] U. Schwarzer, A. Arens, M. Schulz, IGBT Module with integrated Current Measurement Unit using Sigma-Delta Conversion for direct Digital Motor Control, ", in Proceedings of PCIM, Nuremberg, 2010

- [17] EiceDRIVER™, 1ED020I12FA2, Single IGBT Driver IC, Preliminary Datasheet, Rev. 1.0, 2011-04-27, www.infineon.com, 2011
- [18] General Motors Standard, GMW3172 12/2005 Appendix E – Lead-Free Solder Guidelines for Thermal Shock Testing and Power Temperature Cycling, 2005
- [19] M. Thoben, D. Siepe, and K. Kriegel, "Use of Power electronics for HEV at elevated temperature," in Hybrid Vehicles and Energy Management 5th Symposium, Braunschweig, 2008.
- [20] A. Hensler, J. Lutz: Abschlussbericht zum Teilvorhaben 19 U 6006F im Verbundprojekt EfA, „Zuverlässigkeitstests leistungselektronischer Komponenten (TU Chemnitz)“, 2011
- [21] A. Hensler, J. Lutz, M. Thoben, W. Schön, and S. Lutz, "Power Electronics for Power Cycling Capability at High Temperatures and High Temperature Swings," in Proceedings of Hybrid Vehicles and Energy Management 6th Symposium, Braunschweig, 2009, pp. 194-210.
- [22] A. Hensler, J. Lutz, M. Thoben, and J. Zachariae, "Power Cycling Tests at High Temperatures with IGBT Power Modules for Hybrid Electrical Vehicle Applications," in Proceedings of ESTC, Berlin, 2010.
- [23] A. Hensler, J. Lutz, M. Thoben, and K. Guth, "First Power Cycling Results of Improved Packaging Technologies for Hybrid Electrical Vehicle Applications," in Proceedings of CIPS, Nuremberg, 2010, pp. 85-89.
- [24] K. Guth, F. Hille, F. Umbach, D. Siepe, and J. Görlich, "New assembly and interconnects beyond sintering methods," in Proceedings of PCIM, Nuremberg, 2010, pp. 232-237.
- [25] R. Bayerer, T. Herrmann, T. Licht, J. Lutz, and M. Feller, "Model for Power Cycling lifetime of IGBT Modules - various factors influencing lifetime," in CIPS, Nuremberg, 2008.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart	
3a. Titel des Berichts Elektrokomponenten für Aktivgetriebe: Hochtemperaturtaugliche Verbindungstechnik, Stromsensorik, Treiber-IC zur Getriebeintegration der Leistungselektronik und Ankopplung an den Kühlkreislauf des Verbrennungsmotor		
3b. Titel der Publikation		
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Thoben, Markus	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.06.2011	
	6. Veröffentlichungsdatum 16.12.2011	
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))	7. Form der Publikation Bericht	
	8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Infineon Technologies AG Standort Warstein Max Planck Str. 5 59581 Warstein	
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 53107 Bonn	9. Ber.Nr. Durchführende Institution	
	10. Förderkennzeichen 19U6006C	
	11a. Seitenzahl Bericht 66	
	11b. Seitenzahl Publikation	
	12. Literaturangaben 25	
16. Zusätzliche Angaben	14. Tabellen 13	
	15. Abbildungen 82	
	17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Ziel des Projektes EfA ist es, die Basistechnologien für die elektrischen Komponenten des Hybridantriebs zu ertüchtigen, um deren Volumen, Gewicht und Herstellungskosten zu reduzieren und gleichzeitig Zuverlässigkeit und Performance des Gesamtsystems zu erhöhen. Die Arbeiten der Infineon Technologies AG konzentrieren sich auf die Erforschung einer zuverlässigen, hochtemperaturfähigen Leistungselektronik bis zu 200 °C Betriebstemperatur, eine modulintegrierte Stromsensorik, sowie die Direktkühlung mit niedrigem Druckabfall für die Integration in den Verbrennungsmotorkühlkreislauf. Desweiteren wurden galvanisch getrennte Treiber IC und Sigma-Delta A/D Wandler untersucht. Die Technologien wurden in Leistungsmodule integriert und die ICs vom Projektpartner Liebherr in die getriebeintegrierte Elektronik mit eingebaut. Mit der integrierten Elektronik wurde am Prüfstand des Projektpartners ZF und nach Integration in Getriebe und Fahrzeug in Fahrttests beim Projektpartner BMW der prinzipielle Nachweis der Hochtemperaturtauglichkeit erbracht. Der Fahrbetrieb zeigt, dass die Stromsensorik mit vertikalen Siliziumshunts prinzipiell geeignet ist, um die Motorregelung zu realisieren. Die Verbesserung der Lastwechselfestigkeit um einen Faktor 100 konnte mit Lebensdauerests, die beim Projektpartner TU Chemnitz durchgeführt wurden, nachgewiesen werden. Es wurde gezeigt, dass sowohl die Drucksintertechnik als auch alternative neue Lötverbindung mit vertikalen intermetallischen Phasen das Potential haben die Anforderungen für den Betrieb am Motorkühlkreislauf zu erfüllen. Zudem konnten die jeweiligen Lastwechselgrenzen von Bonddrahttechnik, Löttechnik und Chipmetallisierung aufgezeigt werden. Durch den Einsatz verbesserter Aufbautechnologie ist der zuverlässige Betrieb der Leistungselektronik bei erhöhter Betriebs- und Kühlmitteltemperatur möglich. Durch den resultierenden Entfall der Phasenleitungen und den Wegfall des zusätzlichen Kühlkreislaufs sowie durch das einfache Servicekonzepts bei Integration unterhalb des Getriebes ist das System auch wirtschaftlich interessant. Das Potenzial der Leistungsmodule kann damit besser genutzt werden		
19. Schlagwörter Power electronics, lifetime, reliability, IGBT, Diode, Electric vehicle, Hybrid electric vehicle		
20. Verlag	21. Preis	

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of Report	
3a. Report Title Electronics components for active transmission: Mounting and Packaging Technology for Integration of Power Electronics and operation at high temperature, current sensing, driver-IC for transmission integrated Power Electronics and direct cooling with engine cooling loop		
3b. Title of Publication		
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Thoben, Markus		5. End of Project 30.06.2011
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s))		6. Publication Date 16.06.2011
		7. Form of Publication Report
8. Performing Organization(s) (Name, Address) Infineon Technologies AG Standort Warstein Max Planck Str. 5 59581 Warstein		9. Originator's Report No.
		10. Reference No. 19U6006C
		11a. No. of Pages Report 66
		11b. No. of Pages Publication
		12. No. of References 25
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 53107 Bonn		14. No. of Tables 13
		15. No. of Figures 82
		16. Supplementary Notes
17. Presented at (Title, Place, Date)		
18. Abstract Target of the EfA project is increasing the reliability and performance of a compact power electronics system for a hybrid electrical vehicle (HEV) integrated into the transmission. Work packages of Infineon Technologies are focussing the research of reliable, high temperature power electronics for operating temperatures up to 200 °C, of module integrated current sensor and direct cooling with the engine cooling loop. Further, galvanic isolated driver IC and sigma-delta analog/digital converter are investigated and used in the power electronics system. Technologies have been integrated into power modules. An improvement of the power cycling capability by factor of 100 was achieved in lifetime test performed by project partner TU Chemnitz. Integrated in the transmission the electronics was operated on a test bench by project partner ZF. Afterwards vehicle tests were performed at project partner BMW under high temperature ambient and coolant conditions. The measurement result confirmed the high temperature operation capability and the function of the vertical silicon shunts for current control. The low temperature sintering technology as well as the new soldering technology with vertical intermetallic phases show the capability to meet the requirements of power electronics cooled with engine cooling loop. The lifetime limits of wire bond technology, soldering technology and chip metallization are identified. Utilizing improved packaging technologies, investigated in the project, a reliable operation of the power module is possible at increased operating- and cooling temperature. When integrating the power electronics below the transmission and using the engine cooling system, phase lines and the additional low temperature cooling loop are eliminated and system costs are reduced. Maximum utilization of the power electronics components is therefore possible.		
19. Keywords Power electronics, lifetime, reliability, IGBT, Diode, Electric vehicle, Hybrid electric vehicle		
20. Publisher		21. Price