

Abschlussbericht zum Teilvorhaben 19 U 6007C im Verbundprojekt **INGA**

Leistungselektronik für Hybridantriebe in PKW und
Nutzfahrzeuganwendungen
- **I**ntegrierbar in **G**etriebe und **A**ntriebsstrang,
hochtemperaturfähig, zuverlässig und robust



**Aufbau- und Verbindungstechnik für die Integration
der Leistungselektronik und den Einsatz bei hohen
Temperaturen**
**Entwicklungsstudie zur Hochtemperaturqualifikation
von Bare Die (32 bit) Microcontrollern**

Zuwendungsempfänger: Infineon Technologies AG	Förderkennzeichen: 19 U 6007C
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2006 bis 31.12.2009	
Berichtszeitraum: 01.07.2006 bis 31.12.2009	
Projektleiter:	Dr. Markus Thoben Infineon Technologies AG IMM INP DM TIM S Max Planck Str. 5 59581 Warstein +49 2902 / 764 2299 markus.thoben@infineon.com

1 Inhaltsverzeichnis

1	INHALTSVERZEICHNIS	2
2	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	3
3	INFINEON TECHNOLOGIES AG: AUFBAU- UND VERBINDUNGSTECHNIK FÜR DIE INTEGRATION DER LEISTUNGSELEKTRONIK UND DEN EINSATZ BEI HOHEN TEMPERATUREN / ENTWICKLUNGSSTUDIE ZUR HOCHTEMPERATURQUALIFIKATION VON BARE DIE (32 BIT) MICROCONTROLLERN	5
3.1	MOTIVATION UND STAND DER TECHNIK	5
3.2	AUSGANGSSITUATION	6
3.2.1	<i>Aufgabenstellung</i>	6
3.2.2	<i>Zielsetzung</i>	7
3.3	PLANUNG, DURCHFÜHRUNG, ERGEBNISSE	8
3.3.1	<i>Arbeitspaket 1: Modulaufbauten zur Topologiebewertung mit SiC JFET und SiC Dioden</i>	8
3.3.2	<i>Arbeitspaket 2: Auswahl und Entwicklung geeigneter Aufbau und Verbindungstechnik</i>	11
3.3.2.1	<i>Drahtbonden/ Oberseitenmetallisierung</i>	11
3.3.2.2	<i>Diffusionslöten</i>	16
3.3.2.3	<i>Kontaktierungstechnik für 500 A/cm²</i>	22
3.3.2.4	<i>Übersicht Modulaufbauten</i>	25
3.3.3	<i>Arbeitspaket 4: Integration der Leistungs- und Regelelektronik</i>	26
3.3.3.1	<i>Thermische Auslegung und Lebensdauerbetrachtung</i>	26
3.3.3.2	<i>Integration Treiberelektronik und Sensorik</i>	31
3.3.3.3	<i>Entwicklungsstudie zur Hochtemperaturqualifikation von Bare Die (32 bit) Microcontrollern</i>	37
3.4	NUTZEN, UMSETZUNG, VERWERTUNG DER ERGEBNISSE	44
3.5	VERGLEICH MIT DER ZIELSETZUNG / ZIELERREICHUNG	45
4	KURZFASSUNG DES SCHLUSSBERICHTES	45
5	ERFOLGSKONTROLLBERICHT	46

2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Leistungsmodul für Topologieuntersuchung I-Umrichter	8
Abbildung 2: Leistungsmodul mit SiC JFET Schaltern und SiC Dioden	8
Abbildung 3: Leistungsmodul mit 12 SiC Dioden je Schalter.....	9
Abbildung 4: Einschalten des Moduls (links Standard Einschalten, rechts Schalten mit gedämpften Schwingungen).....	10
Abbildung 5: Powercycling Diagramm: N_f - ΔT_J -Beziehung (min. Werte); Module für Industrie Anwendungen mit max. $T_{J,op}=125^\circ\text{C}$, untere, gestrichelte Linie; typische N_f für Module der jüngsten Generation mit IGBT4/1200V bei max. $T_{J,op}$ von 150°C , durchgezogene Linie. Der Pfeil verdeutlicht den Anstieg von ΔT_J um 25°C	11
Abbildung 6: Schliffprobe durch einen Ausfall eines mit Aluminiumbonddraht gebondeten Moduls nach Powercycling – der Bonddraht hat sich von der Chipoberfläche abgelöst (lift off). Ursächlich für den Ausfall ist ein durch das Drahtvolumen verlaufender Riss.	12
Abbildung 7: Schematische Darstellung der typischen Schichtfolge des Aufbaus eines Leistungshalbleitermoduls.	12
Abbildung 8: Thermische Ausdehnungskoeffizienten typischer Materialien aus der Fertigung von Leistungshalbleitermodulen.	13
Abbildung 9: Elektronenmikroskopische Aufnahme eines abgelösten Bondfußes nach einem Powercyclingtest.....	14
Abbildung 10: Vergleich von PowerCycling Tests mit verbesserten Bonddrähten mit Standardaufbautechnik.....	15
Abbildung 11: Vergleich einer weichgelöteten (links) mit einer diffusionsgelöteten (rechts) Chip zu Substrat Verbindung. Die intermetallischen Phasen in der Lotverbindung sind schwarz/grau dargestellt. Im dargestellten Fall besteht die diffusionsgelötete Verbindung aus zwei intermetallischen Phasen mit unterschiedlichem Schmelzpunkt. Die Abbildung ist nicht maßstabsgerecht.	17
Abbildung 12: Querschnitt durch eine diffusionsgelötete Chip-Substrat Verbindung.	18
Abbildung 13: Ultraschallscan diffusionsgelöteter Chips unterschiedlicher Fläche (16 - 185mm^2).	18
Abbildung 14: Laboranlage zur Prozesserprobung der Diffusionslöttechnologie. Die Vakuumanlage bietet Anschlüsse für unterschiedliche Prozessgase, sowie eine Kühl- und eine Heizplatte zum Verlöten eines Si-Chips auf ein DCB Substrat.....	19
Abbildung 15: Fertigungstaugliche Entwicklungsanlage für Diffusionslötverbindungen.	20
Abbildung 16: Power cycling Diagramm. Verglichen wird die Power Cycling Performance eines InGA Power Moduls bei einer Maximaltemperatur von 175°C mit Standardmodulen unterschiedlicher Maximaltemperatur. Das InGA Modul zeigt eine 4,5-fache Zuverlässigkeit im Vergleich zum Standardmodul.....	21
Abbildung 17: Layout mit oberseitiger großflächiger Kontaktierung der Chips.....	22
Abbildung 18: Großkarte mit DCB-Keramik Substraten	22
Abbildung 19: Leistungsmodul mit großflächig kontaktierten Siliziumchips.....	23
Abbildung 20: Thermische Simulation des Standardmoduls (links) im Vergleich zu Modul mit großflächiger Kontaktierung der Chips (rechts).....	23

Abbildung 21: Messungen zum Schaltverhalten (links Ausschalten, rechts Einschalten)	24
Abbildung 22: Übersicht der Leistungsmodule und Hochtemperaturelektroniken	25
Abbildung 23: Schritte zur Auslegung des Moduls hinsichtlich Lebensdauer.....	26
Abbildung 24: Thermische Simulationen bei Belastung IGBT (links) und Diode (rechts). Vergleich mit Messungen	27
Abbildung 25: Motorstrom, Modulationsgrad und Leistungsfaktor für auslegungsrelevantes Fahrspiel.....	27
Abbildung 26: Verlustleistungsverlauf für auslegungsrelevantes Fahrspiel.....	28
Abbildung 27: Thermisches Modell des direktgekühlten Leistungsmodul	28
Abbildung 28: Temperaturverlauf auf IGBT und Diode.....	29
Abbildung 29: Temperaturhübe auf IGBT und Diode während des Lastprofils für unterschiedliche Schaltfrequenzen.....	29
Abbildung 30: Temperaturhübe auf IGBT und Diode durch die Überlagerung Erwärmung des Kühlmittels und aktives Aufheizen der Siliziumbauelemente.....	30
Abbildung 31: Komponenten der InGA Elektronik	31
Abbildung 32: Übersicht der wichtigsten Funktionen der Treiberelektronik.....	31
Abbildung 33: Schaltungsteil zur Auswertung der Leistungsmodul NTC Temperaturmessung	32
Abbildung 34: Temperaturmessung Modulbodenplatte	33
Abbildung 35: Entladeschaltung für den Zwischenkreiskondensator	33
Abbildung 36: Open Loop Hall Effekt Stromwandler	34
Abbildung 37: Schalten des der Treiberelektronik/Modul mit typischen Strömen.....	34
Abbildung 38: Schalten des der Treiberelektronik/Modul im Kurzschluss	35
Abbildung 39: Temperaturverteilung auf der Leiterkarte	35
Abbildung 40: Messpunkte auf der Leiterkarte für Thermoelemente	36
Abbildung 41: Klimakammer der TU Braunschweig / Testumgebung	36
Abbildung 42: TriCore Architektur.....	38
Abbildung 43: TriCore Blockdiagramm	38
Abbildung 44: Hochtemperaturstudie / Erwartete Limitierungen bei hoher Temperatur	40
Abbildung 45: Schematische Darstellung der Messung auf dem Prober	41
Abbildung 46: Waferprober zur Durchführung von Temperaturmessungen	41
Abbildung 47: Vergleich alter und neuer Messkarte für erhöhte Temperaturanforderung.....	42
Abbildung 48: Auswahlkriterien für Leiterkartenmaterial für Nadelkarte	43
Abbildung 49: Kontaktdesign für robuste Kontaktierung (links altes Design / rechts neues zweireihiges Design).....	44

3 Infineon Technologies AG: Aufbau- und Verbindungstechnik für die Integration der Leistungselektronik und den Einsatz bei hohen Temperaturen / Entwicklungsstudie zur Hochtemperaturqualifikation von Bare Die (32 bit) Microcontrollern

Verfasser: Dr. M. Thoben, Dr. K. Guth, T. Hong, K. Mainka, P. Ossimitz, Dr. M. Lohmann

3.1 Motivation und Stand der Technik

Hybridfahrzeuge (**Hybrid Electric Vehicle**, kurz HEV) könnten einen beachtlichen Beitrag zur CO₂ Reduzierung liefern. Mild-Hybrids verbinden einen Verbrennungsmotor mit einer kleinen elektrischen Maschine, die einen schnellen Start des Verbrennungsmotors (unter 400 ms), eine Nutzbremmung und eine Momentenunterstützung beim Beschleunigen liefern können. Aufgrund der Momentencharakteristik der elektrischen Maschine, sowie deren Auslegung, kann diese Unterstützung auch zu einer deutlichen Verbesserung der Fahrbarkeit und somit auch zu mehr Fahrspaß führen. Hochrechnungen sowie Tests ergeben, dass im Standard-Zyklus mehr als 20 % an Treibstoff eingespart werden kann. Im reinen Stadt (Stop & Go) Verkehr können es sogar mehr als 30 % sein. Daraus würde sich eine CO₂ Reduzierung des PKW-Flottenverbrauchs in Deutschland von derzeit ca. 160 g/km auf 128 g/km ergeben, welches die Ziele für 2008 deutlich unterschreiten würde. Eine Hybridisierung könnte aber nicht nur im PKW-Bereich deutliche ökologische Vorteile bringen. Auch im Nutzfahrzeugbereich, im Zulieferverkehr sowie im städtischen Personenverkehr sind außer dem ökologischen auch ökonomische Aspekte zu sehen, die eine breite Einführung von Hybridfahrzeugen unterstützen.

Kernkomponenten des Hybrid-Antriebsstrangs sind die elektrische Aktuatorik und die dazugehörige Leistungselektronik, die mit ihrer Peripherie einen wesentlichen Beitrag an den Mehrkosten eines Hybridfahrzeuges gegenüber einem konventionellen Fahrzeug hat. Zusätzliche Kosten verursachen dabei nicht nur essentielle Komponenten, wie die Maschine selbst, deren Speisung und Ansteuerung, sondern auch der zusätzlich benötigte Bauraum und die Kühlung der Komponenten. Da die Temperatur des Kühlmittels der Verbrennungskraftmaschine (VKM) deutlich über der von leistungselektronischen Bauelementen des Umrichters liegt, mussten bisher für Antriebsleistungen, die das Potential eines Hybridfahrzeugs ausschöpfen, separate Kühlkreisläufe verwendet werden. Weiterentwicklungen in den Schlüsselkomponenten Leistungsschalter und Kondensatoren machen Lösungen greifbar, die auch bei hohen Umgebungs- und Kühlmitteltemperaturen große Leistungen bereitstellen können und dabei zuverlässig über die Lebensdauer eines Kraftfahrzeugs arbeiten. Höhere Betriebstemperaturen der Elektronik ermöglichen zudem einen variablen Einbauraum, wodurch die Modularisierung von Hybridkomponenten vergrößert wird und zusätzliche Komponenten kompakter ausfallen.

Für eine großflächige Einführung von Hybridfahrzeugen ist eine technische Lösung erforderlich, die eine einfache Integration in verschiedenen Fahrzeugplattformen erlaubt. Diese ist jedoch noch nicht ausgereift entwickelt. Komponenten sind nicht oder nur als Labormuster verfügbar, eine Standardisierung und damit eine weitere Reduzierung der Systemkosten wurde bisher überhaupt nicht betrieben; typisches Beispiel dafür ist die Festlegung auf eine gemeinsame Systemspannung.

Gerade leistungselektronische Anwendungen im Automotive-Bereich stellen höchste Ansprüche an die hierfür benötigten Leistungshalbleiter. Diese sollen hohe Wirkungsgrade durch geringe dynamische und statische Verluste aufweisen und höhere Betriebstemperaturen gegenüber bisherigen Leistungshalbleitern ermöglichen. Des Weiteren

sollen die Baugruppen in solchen Anwendungsbereichen ein geringes Gewicht haben und ein kleines Bauvolumen in Anspruch nehmen, wobei die resultierenden Systemkosten möglichst gering gehalten werden müssen. Neueste Leistungshalbleitergenerationen auf Si-Basis (600V, IGBT³ der Fa. Infineon Technologies AG) ermöglichen Sperrschichttemperaturen bis zu 200°C. Die Ausnutzung dieser Grenzen ist jedoch mit den üblichen Aufbautechniken für Multichip-Module und damit höhere Leistungen >5kW heute nicht möglich. Dabei basiert die Begrenzung auf Belastungsprofilen, die eine minimale Lastwechselzahl erfordern. Diese Zyklenanzahl wird bei extremen Temperaturen in den Verbindungsschichten nicht mehr erreicht. Die Junction-Temperatur von IGBT³ Bauelementen ist zwar bereits auf 175°C spezifiziert. Mit aktuellen Verbesserungen der Aufbautechnik konnte die Betriebstemperaturen erst von 125°C auf 150°C erhöht werden.

Einen Beitrag zur Lösung dieser Defizite bietet das vorliegende Vorhaben. Dieser hat sich zum Ziel gesetzt, die Systemkosten mittelfristig zu reduzieren, indem Komponenten und Technologien entwickelt werden, die einen modularen und integrierbaren Ansatz der notwendigen Leistungselektronik an die elektrische Maschine verfolgen, um ganzheitliche Hybridantriebseinheiten generieren zu können.

3.2 Ausgangssituation

3.2.1 Aufgabenstellung

Eine wesentliche Komponente des Hybrid-Antriebssystems ist der elektrische Antrieb in Kombination mit dem Verbrennungsmotor. Für den drehzahlvariablen Betrieb des elektrischen Antriebs ist der Einsatz von leistungselektronischen Komponenten notwendig, die heute in Industrie- und Traktionsanwendungen weit verbreitet sind und mit entsprechenden Halbleitern realisiert werden.

Im Gegensatz zu industriellen Anforderungen ergeben sich für die Fahrzeugintegration andere und zum Teil höhere Anforderungen, die aus den Umweltbelastungen, wie Temperatur- und Vibrationsbeanspruchungen und dem beschränkt verfügbaren Bauraum resultieren.

Derzeitig eingesetzte Antriebselektroniken erfordern einen erhöhten Systemaufwand, da neben der Antriebselektronik auch Aufwand für ein zusätzliches Rückkühlsystem anfällt. Ein wesentlicher Grund dafür sind die maximal zulässigen Betriebstemperaturen der Leistungselektronik, die zum einen durch die Bauelementetechnologie, im Wesentlichen jedoch durch die Aufbautechnologie beschränkt sind.

Im Betrieb des Leistungshalbleiters sind wechselnde Lasten typisch. Diese erzeugen Temperaturzyklen deren Temperaturhub und Auftretenshäufigkeit von der Fahrstrategie abhängen. Die im Leistungsmodul verwendeten Materialien dehnen sich bei Temperaturbelastung unterschiedlich aus. Die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten erzeugen Belastungen in den Verbindungsstellen die über die Zeit zu einer Degradation der Verbindungsstelle führen.

Die Ablösung von Bondverbindungen und Ermüdung von Löt-schichten begrenzen im Wesentlichen die Einsatzdauer von Leistungsmodulen nach thermischer Wechsellast

Die Arbeiten der Infineon Technologies konzentrieren sich auf die Entwicklung einer zuverlässigen, hochtemperaturfähigen Leistungselektronik bis zu 200 °C Betriebstemperatur.

Die Hauptarbeitspakete sind dabei:

- Aufbau- und Verbindungstechnik bis zu 200°C (Betriebstemperatur)
- Kontaktierungstechnik für 500 A/cm² (bezogen auf aktive IGBT-fläche)
- Direkte Kühlung der Leistungselektronik

Zudem wird im Rahmen des Projektes InGA eine Entwicklungsstudie zur Hochtemperaturqualifikation von Bare Die (32 bit) Microcontrollern erarbeitet. Dies ist eine Voraussetzung für den zukünftigen Einsatz von Microcontrollern in den Leistungselektronikmodulen, wie sie für Hybridantriebe benötigt werden. Die konzeptionellen Entwicklungs- und Analysearbeiten dazu umfassen die Themenkomplexe:

- Konzeption einer Qualifikations- Teststrategie
- Technologie Charakterisierung
- Machbarkeitsstudie zur Qualifizierbarkeit hochkomplexer Microcontroller

Des Weiteren sollen Modulaufbauten zur Topologiebewertung mit SiC JFET und SiC Dioden realisiert werden.

3.2.2 Zielsetzung

Die Herausforderung eines Anbaus der Leistungselektronik an die elektrische Maschine besteht in den deutlich erhöhten Randbedingungen bezüglich Temperatur und Vibration. Daher werden zur Umsetzung neue Aufbau- und Verbindungstechnologien eingesetzt. Dies ermöglicht deutliche höhere Arbeitstemperaturen, wodurch auch innovative Möglichkeiten der Entwärmung erschlossen werden. Langfristig soll auf einen zusätzlichen Wasserkühlkreislauf verzichtet und der Kühlkreislauf des Verbrennungsmotors mitgenutzt werden, welches zu einer deutlichen Reduzierung der Systemkosten für Hybridfahrzeuge führen wird. Klares Ziel des Projektes ist es, diese Technologien soweit zu entwickeln, dass die Anforderungen des künftigen Marktes realisiert werden können. Das Projekt InGA umfasst daher verschiedene Themenbereiche. Diese sind

AP1: Analyse von Topologien aus U- und I-Umrichtern für deren Einsatz in Hybridfahrzeugen unter Einbeziehung der Verwendung von Si- und SiC-Halbleitern.

AP2: Auswahl und Entwicklung geeigneter Aufbau und Verbindungstechniken

AP3: Entwicklung und Anpassung geeigneter Zwischenkreiskondensatoren

AP4: Integration der Leistungselektronik und der Regelungselektronik in das Getriebe/Antriebsstrang des Fahrzeuges.

AP5: Integration des elektrischen Antriebs in Getriebe oder Antriebsstrang des Fahrzeuges

AP6: Integration des Gesamtsystems in das Zielfahrzeug

Der Anbau der Leistungselektronik an die elektrische Maschine des Hybridfahrzeuges ist ein sehr ehrgeiziges Ziel, das von einem Hersteller alleine nicht bewältigt werden kann. Erst durch das Zusammenwirken unterschiedlicher Fraktionen der deutschen elektrotechnischen Industrie mit der Unterstützung aus Forschung und Technik sowie dem Mitwirken der deutschen Automobilindustrie, können alle Fragestellungen beantwortet und eine ganzheitliche Lösung gefunden werden. Dazu teilte sich das Projekt in verschiedene Arbeitspakete (AP) auf. Infineon Technologies hat in den Arbeitspaketen folgende Inhalte bearbeitet:

3.3 Planung, Durchführung, Ergebnisse

3.3.1 Arbeitspaket 1: Modulaufbauten zur Topologiebewertung mit SiC JFET und SiC Dioden

Innerhalb des AP1: Analyse von Topologien aus U- und I-Umrichtern für deren Einsatz in Hybridfahrzeugen unter Einbeziehung der Verwendung von Si- und SiC-Halbleitern werden Schaltereigenschaften analysiert. SiC Halbleiter bieten durch den erhöhten Bandabstand das Potential für wesentlich höhere Betriebstemperaturen und erlauben die Reduktion von Schaltverlusten. Die Untersuchungen dienen zur Feststellung von Unterschieden bezüglich des Verhaltens der Bauteile. Verglichen werden Schalter bestehender Klassen untereinander, als auch Kennlinien eines Schalters bei unterschiedlichen Temperaturen. Infineon Technologies hat für diese Untersuchung Leistungsmodulaufbauten realisiert. Für die Aufbauten wurde ein flexibel konfigurierbares Easy1B Package verwendet (Abbildung 1), in die SiC Bauelemente des Projektpartners SiCED integriert werden:

Für die Untersuchung der I-Umrichter Topologie wurden Module mit zwei Einzelschaltern realisiert.

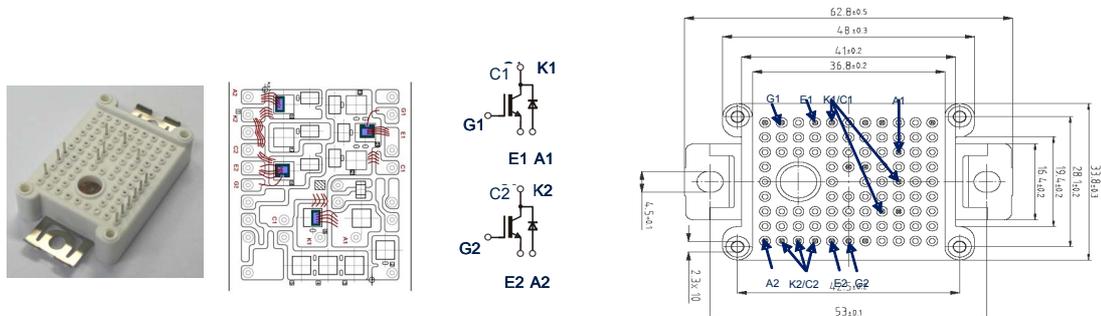


Abbildung 1: Leistungsmodul für Topologieuntersuchung I-Umrichter

In den Modulen wurden drei verschiedene Schalterarten, 1200V IGBT + Si Diode, 1200V IGBT +SiC Diode und 1200V SiC JFET + SiC Diode integriert

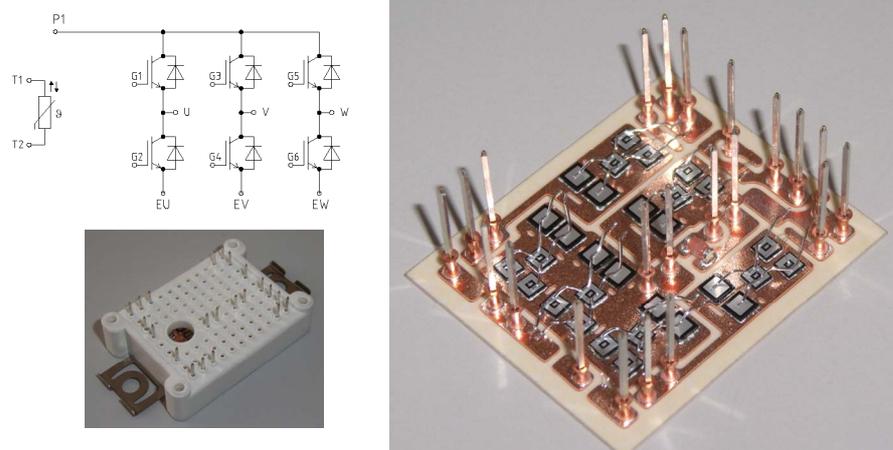
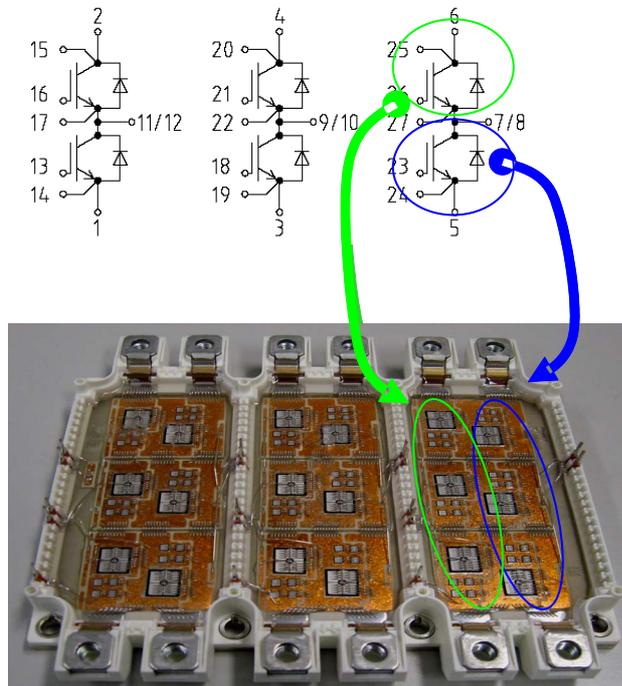


Abbildung 2: Leistungsmodul mit SiC JFET Schaltern und SiC Dioden

Abbildung 2 zeigt den Modulaufbau mit SiC JFET und SiC Diode, der sowohl für Topologieuntersuchungen als auch die Realisierung eines SiC Umrichters an der TU Braunschweig eingesetzt wird. Messergebnisse an dem Umrichter sind im Abschlussbericht

der TU Braunschweig dokumentiert. Ein weiteres Modul wurde aufgebaut um zu demonstrieren, dass die Leistung entsprechend hoch skaliert werden kann. Die Bauelemente wurden dazu in ein EconoPack™+ Gehäuse integriert. Pro Schalter werden 12 SiC Dioden und 3 IGBT parallel geschaltet.



Für jeden Schalter werden 3XIGBT und 12XSiC Dioden parallel geschaltet

Abbildung 3: Leistungsmodul mit 12 SiC Dioden je Schalter

In Abbildung 3 ist das Modul dargestellt, dass mit Strömen von 300A getestet wurde. Im Vergleich zu einem Standard IGBT Modul konnten die IGBT Einschaltverluste und Diodenrecovery Verluste um 75% reduziert werden. Die Schaltversuche zeigen, dass im Einschaltvorgang Schwingen im Stromverlauf auftreten. Diese können, wie in der folgenden Abbildung dargestellt wird, durch eine reduzierte negative Gatespannung gedämpft werden. Dies hat keine negative Wirkung auf die Reduzierung der Schaltverluste.

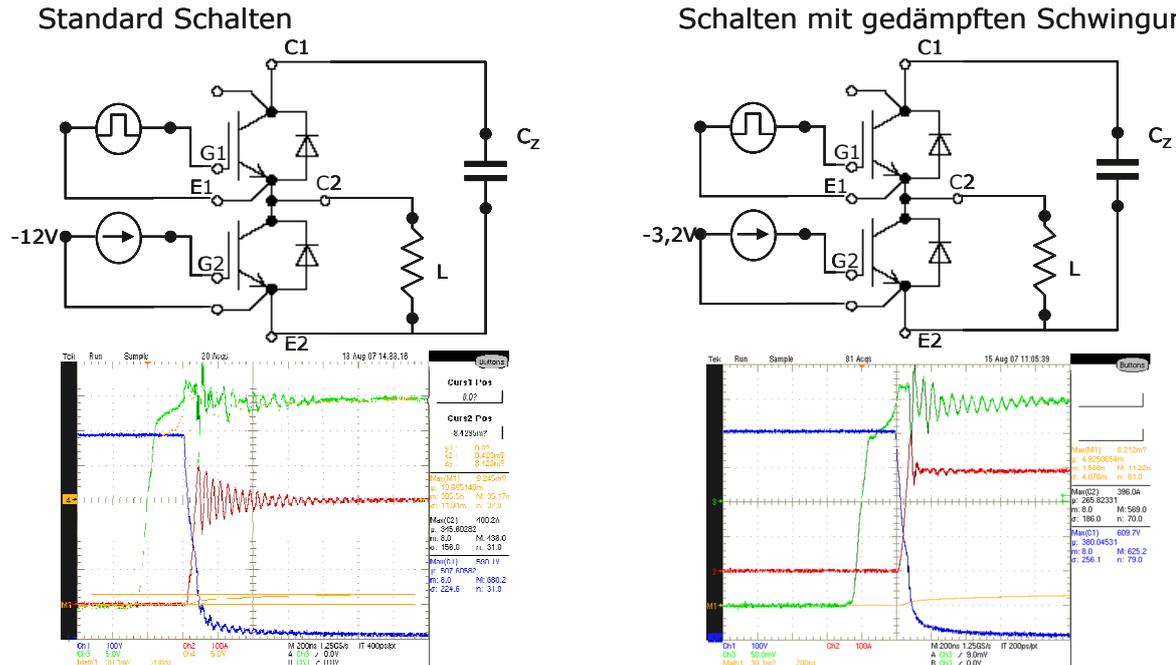


Abbildung 4: Einschalten des Moduls (links Standard Einschalten, rechts Schalten mit gedämpften Schwingungen)

3.3.2 Arbeitspaket 2: Auswahl und Entwicklung geeigneter Aufbau und Verbindungstechnik

Im Arbeitspaket 2 Auswahl und Entwicklung geeigneter Aufbau- und Verbindungstechnik werden Technologien untersucht, die den Betrieb der Leistungsbaulemente bei höheren Betriebstemperaturen von bis zu 200°C erlauben.

3.3.2.1 Drahtbonden/ Oberseitenmetallisierung

3.3.2.1.1 Zielsetzung

Die Ablösung von Bondverbindungen und Ermüdung von Lotschichten begrenzen im Wesentlichen die Einsatzdauer von Leistungsmodulen nach thermischer Wechsellast. Nachdem in der Vergangenheit für Bonddrahtstärken bis 400µm besonders eine Optimierung der bestehenden Drahtbondtechnologie im Fokus der Entwicklungsarbeiten stand, hat sich gezeigt, dass für den Einsatz in Automobilen die Zuverlässigkeit der vorderseitigen Bondverbindung nicht ausreicht, um den Anforderungen der Automobilindustrie gerecht zu werden.

Das Ziel dieser Entwicklungsarbeit ist es, eine verbesserte Verbindungstechnik für Chiptemperaturen bis zu 200°C mit höchster Lastwechselzuverlässigkeit zu entwickeln.

Zur anwendungsnahen Überprüfung der Lastwechselbeständigkeit eines Modulaufbaus und der verwendeten Aufbau- und Verbindungstechniken werden aktive Powercycling Tests eingesetzt (siehe Abbildung 11).

Für Module der neuesten Generation ($T_{J,op}=150^{\circ}\text{C}$) gilt die durchgezogene Linie. Wird die Lebensdauer eines älteren Moduls mit ($T_{J,op}=125^{\circ}\text{C}$), z.B. bei einem Wert für ΔT_J von 80°C, betrachtet (Cycling: $T_J=45^{\circ}\text{C}$ bis $T_J=125^{\circ}\text{C}$), so erreicht ein Modul der neuesten Generation eine vergleichbare Zahl an Lastwechselzyklen bei einer 25°C höheren T_J . Dieses konnte durch wesentliche Verbesserungen der bestehenden Aluminium-Drahtbondtechnologie erreicht werden.

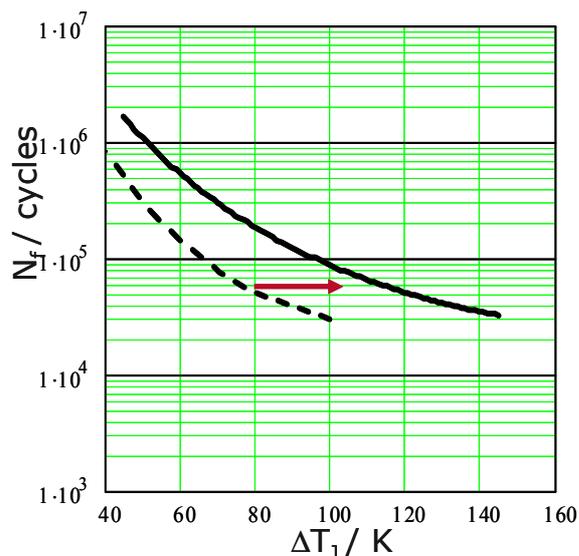


Abbildung 5: Powercycling Diagramm: N_f - ΔT_J -Beziehung (min. Werte); Module für Industrie Anwendungen mit max. $T_{J,op}=125^{\circ}\text{C}$, untere, gestrichelte Linie; typische N_f für Module der jüngsten Generation mit IGBT4/1200V bei max. $T_{J,op}$ von 150°C , durchgezogene Linie. Der Pfeil verdeutlicht den Anstieg von ΔT_J um 25°C .

Die Analyse von Ausfällen aus Lastwechselversuchen (end of life) an mit Aluminiumdraht gebondeten Modulen der verschiedenen Generationen zeigt ein klares Bild und gibt die Richtung für die künftige Entwicklung vor: Im Gegensatz zu Modulen älterer Generation ($T_{J,op}=125^{\circ}\text{C}$) wird bei Modulen der jüngsten Generation ($T_{J,op}=150^{\circ}\text{C}$) ein Rissverlauf durch den Bonddraht beobachtet, der nicht entlang der Grenzfläche zur Chipmetallisierung verläuft (siehe Abbildung 6). Um eine weitere Optimierung der Lastwechselfestigkeit von Leistungshalbleitermodulen für Automobilanwendungen zu erreichen, ist daher eine Modifikation des Drahtmaterials erforderlich. Hier wurden sowohl alternative Grundmaterialien als auch legierte Aluminiumdrähte betrachtet. Parallel dazu muss auch der Verbindungspartner – die Bondpadmetallisierung – entsprechend der Modifikation des neuen Drahtmaterials angepasst bzw. neu entwickelt werden.

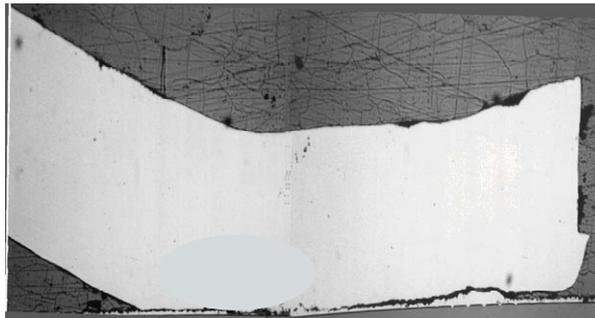


Abbildung 6: Schlichtprobe durch einen Ausfall eines mit Aluminiumbonddraht gebondeten Moduls nach Powercycling – der Bonddraht hat sich von der Chipoberfläche abgelöst (lift off). Ursächlich für den Ausfall ist ein durch das Drahtvolumen verlaufender Riss.

3.3.2.1.2 Drahtbonden – Auswahl des Materialsystems

Bei der Auswahl möglicher Materialsysteme für eine lastwechselbeständigere Drahtbondtechnologie sind eine Reihe von Kriterien, basierend auf Materialeigenschaften und sonstiger technischer Rahmenbedingungen, zu berücksichtigen.

Entscheidend für das Verständnis der Degradationsmechanismen ist die Kenntnis der Kenndaten der im Schichtaufbau verwendeten Materialien (siehe Abbildung 7). Zu nennen sind hier der thermische Ausdehnungskoeffizient (CTE), die technische Streckgrenze, die Bruchdehnung und die homologe Temperatur.

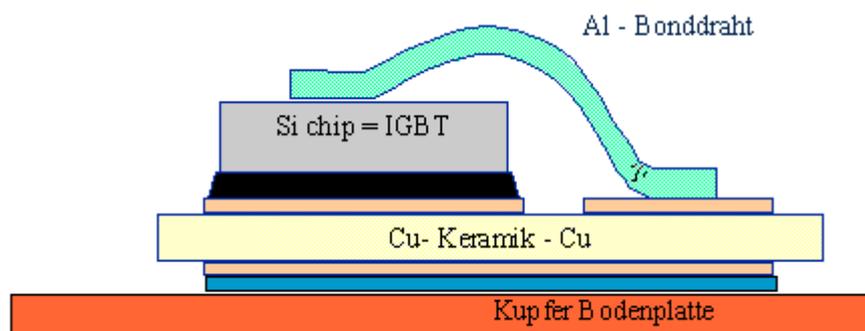


Abbildung 7: Schematische Darstellung der typischen Schichtfolge des Aufbaus eines Leistungshalbleitermoduls.

Abbildung 8 zeigt einige thermische Ausdehnungskoeffizienten von Materialien welche typischerweise in Leistungshalbleitermodulen verwendet werden. Die unterschiedlichen

Ausdehnungskoeffizienten erzeugen bei thermischen Wechselbelastungen – wie sie z.B. im aktiven Powercycling auftreten - eine mechanische Spannung an den Verbindungsschichten der einzelnen Materialien des Schichtaufbaus. Während der einzelnen Zyklen im aktiven Powercycling von Modulen wird eine zyklische plastische Deformation des Bonddrahts, der Verbindungszone zum Bondpad und der Bondpadmetallisierung erzeugt. Abhängig vom Temperaturhub und der Zykluszeit im Powercycling kann dieser Mechanismus letztlich zur Zerstörung der Verbindung von Bonddraht zum Chip führen. Durch eine geeignete Materialauswahl kann der Unterschied der thermischen Ausdehnungskoeffizienten reduziert werden, womit die Zyklenfestigkeit im Powercycling erhöht werden kann.

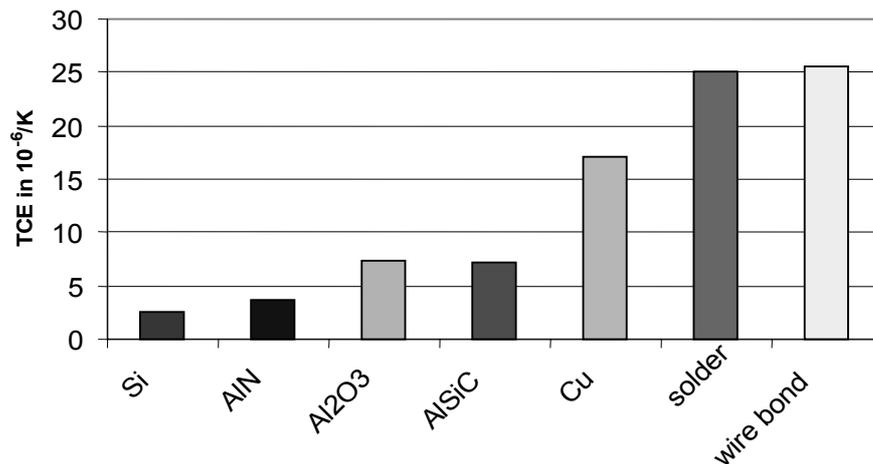


Abbildung 8: Thermische Ausdehnungskoeffizienten typischer Materialien aus der Fertigung von Leistungshalbleitermodulen.

Die mechanische Stabilität der Bondverbindung bei thermomechanischer Wechselbelastung wird auch maßgeblich durch die technische Streckgrenze und die Biegebruchfestigkeit beeinflusst. Durch die Verwendung von Legierungszusätzen zu einem herkömmlichen Aluminium-Bonddraht wird in der Regel zwar die technische Streckgrenze heraufgesetzt, jedoch nimmt zugleich auch die Bruchdehnung des Drahtmaterials ab. Die technische Streckgrenze bestimmt den Grad der plastischen Verformung die pro Lastwechsel in das System eingebracht wird. Die Bruchdehnung gibt vor wie viel plastische Verformung vom System aufgenommen werden kann, bis es zum Bruch kommt.

Die Temperaturbeständigkeit der mechanischen Eigenschaften der Legierung bis 350°C muss gewährleistet sein, um reproduzierbare Ergebnisse auch dann gewährleisten zu können, wenn das gebondete Substrat späteren Temperaturschritten (z.B. Lötung des Substrats auf die Bodenplatte) unterzogen wird.

Weiteres Kriterien bei der Auswahl des Drahtmaterials ist die Stromtragfähigkeit eines reinen Aluminiumdrahts, welche durch die Zugabe von Legierungszusätzen herabgesetzt wird.

Parallel zur Auswahl und Entwicklung eines neuen Drahtsystems muss auch der Verbindungspartner – die Bondpadmetallisierung – weiterentwickelt werden.

Die Kompatibilität von Bonddraht und Chipmetallisierung muss betrachtet werden um Anschädigungen der aktiven Flächen unterhalb der Bondpadmetallisierung zu vermeiden.

Darüber hinaus muss bewertet werden, ob durch die Veränderung des Materialsystems der Ausfallort im Powercyclingtest in Richtung Padmetallisierung verschoben wird und diese letztlich zum Lebensdauer limitierenden Element wird. Um ein optimales Ergebnis hinsichtlich der Zyklenfestigkeit des Aufbaus zu gewährleisten muss auch die Padmetallisierung, entsprechend den gestiegenen Anforderungen, weiterentwickelt werden.

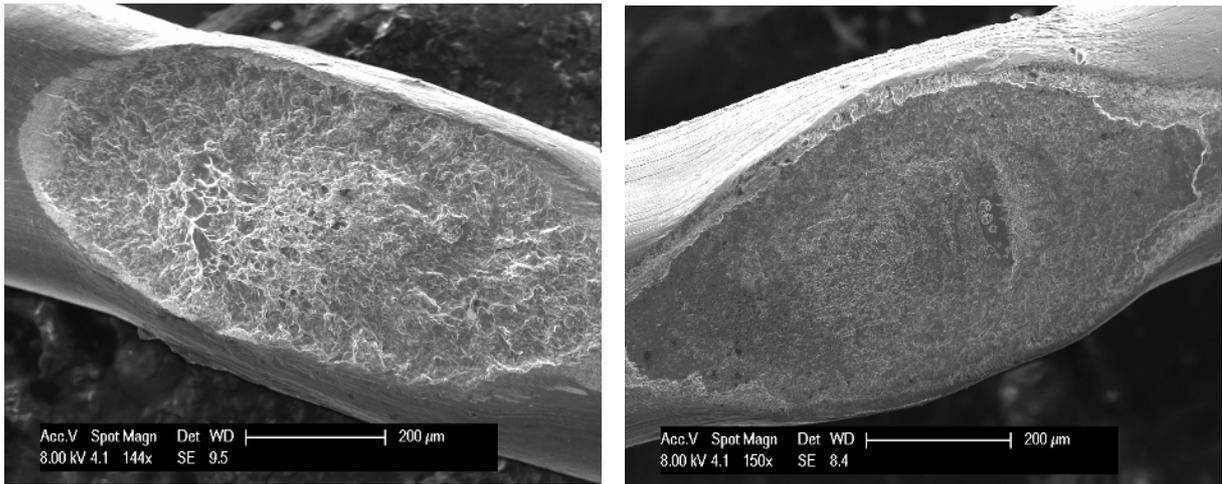


Abbildung 9: Elektronenmikroskopische Aufnahme eines abgelösten Bondfußes nach einem Powercyclingtest.

Das linke Bild in Abbildung 9 zeigt einen Bonddraht, bei dem der Riss durch den Bonddraht verläuft. Das Bild auf der rechten Seite zeigt ein anderes Ergebnis. Hier wurde ohne eine weitergehende Optimierung der Padmetallisierung ein neues Drahtmaterial verwendet. Im EDX konnten hier Reste der Bondpadmetallisierung am abgelösten Bonddraht nachgewiesen werden. Dadurch konnte gezeigt werden, dass der Riss hier durch die Bondpadmetallisierung verläuft. In diesem Fall wurde also der Ausfallort in Richtung Padmetallisierung verschoben.

Mit Modulaufbauten, in der die optimierten Padmetallisierung und dem dotierten Drahtmaterial integriert ist, wurden beim Projektpartner Siemens PowerCycling Tests durchgeführt. Die Ergebnisse der Lastwechseltests sind im Vergleich zu Testergebnissen mit Standardaufbautechnologie in Abbildung 10 dargestellt.

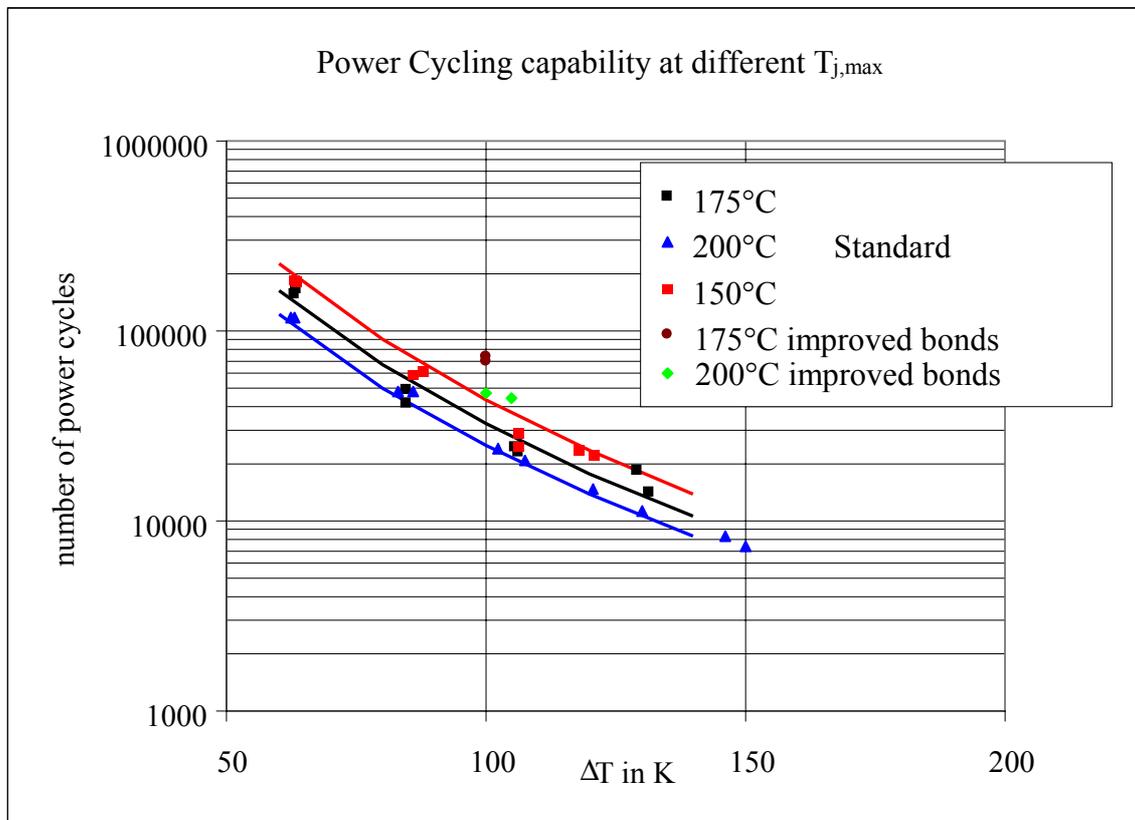


Abbildung 10: Vergleich von PowerCycling Tests mit verbesserten Bonddrähten mit Standardaufbautechnik

Durch die Verbesserung der Bonddrahttechnik können bei 200°C Lastwechselzahlen erreicht werden, die vergleichbar mit der Lastwechselanzahl bei 150°C mit Standardaufbautechnologie sind.

Die Analyse der Tests zeigt, dass mit verbesserten Bonddrähten die Ausfallursache eine Zerrüttung der Chipplötung ist. Eine weitere Verbesserung der Lastwechselfestigkeit kann daher nur erreicht werden, wenn die Lastwechselfestigkeit der Verbindung zwischen Chip und Substrat verbessert wird.

3.3.2.2 Diffusionslöten

3.3.2.2.1 Zielsetzung

Nachdem in der Vergangenheit besonders eine Optimierung der bestehenden Löttechnologien im Fokus der Entwicklungsarbeiten stand, hat sich gezeigt, dass für den Einsatz in Automobilen, weder die Temperaturfestigkeit noch die Zuverlässigkeit der Chip-Substrat Verbindung ausreicht, um den Anforderungen der Automobilindustrie gerecht zu werden.

Aus diesem Grund ist es das Ziel der Entwicklungsarbeit, eine neue Verbindungstechnik für Chiptemperaturen bis zu 200°C mit höchster Lastwechselzuverlässigkeit zu entwickeln.

Neben einer höheren Lebensdauer der Chipverbindung wirkt sich eine Verbesserung der Chip-Substrat-Verbindung auch auf die Lebensdauer der frontseitigen Bondverbindungen aus. Durch eine verzögerte Lotermüdung wird gleichzeitig der thermische Widerstand der Chip-Substrat-Verbindung konstant gehalten. Dadurch wird eine erhöhte Beanspruchung der Bondverbindung durch einen systematischen Anstieg der Chiptemperatur verhindert. Als Ergebnis erwartet man durch eine Verbesserung der Chipverbindung auch eine Zunahme der Lebensdauer der Bondverbindungen.

Um die Grenzen, die durch den niedrigen Schmelzpunkt herkömmlicher bleifreier Weichlote gesteckt sind, zu überschreiten, ist es erforderlich neue Materialsysteme und Prozesse zu evaluieren. Technologisch gesehen stellt das Ag-Sintern hierbei eine offensichtliche Alternative dar. Allerdings haben hohe Materialkosten, Inkompatibilität mit den heutigen Standardprozessen und extreme Prozessbedingungen (wie z.B. hohe Drücke, lange Sinterzeiten, oxidierende Atmosphäre) bisher verhindert, dass Sintertechnologien in großem Maßstab als Lötersatz produktiv eingesetzt werden.

Bei der Einführung einer neuen Verbindungstechnik als Alternative zum heutigen Weichlöten ist die Kompatibilität zu heutigen Fertigungsprozessen ein wichtiger Aspekt, um die problemlose Integration der Technologie in die Fertigungslandschaft zu gewährleisten.

Basierend auf diesen Gesichtspunkten wurde eine Verbindungstechnik entwickelt, die sich die positiven Aspekte heutiger Lötverfahren zu Nutze macht und gleichzeitig eine hochzuverlässige Verbindung etabliert, die auch bei Temperaturen um 200°C eingesetzt werden kann.

3.3.2.2.2 Diffusionslöten

Abhängig vom verwendeten Lotmaterial und den Metallisierungen der beiden Lötpartner bilden sich im Standardlötprozess üblicherweise intermetallische Cu-Sn bzw. Ni-Sn-Phasen als dünne Schichten an den Grenzflächen der Lötpartner aus. Diese Phasen haben einen signifikant höheren Schmelzpunkt ($T_m > 400^\circ\text{C}$) als das ursprünglich verwendete Weichlot ($T_m < 240^\circ\text{C}$). Beispielsweise findet man für das Cu-Sn-System die beiden Phasen Cu_3Sn mit $T_m = 676^\circ\text{C}$ sowie Cu_6Sn_5 mit $T_m = 415^\circ\text{C}$.

Beim Diffusionslöten wird dieser Phasenbildungsmechanismus ausgenutzt, um Chip-Substrat-Verbindungen herzustellen, die ausschließlich aus intermetallischer Phase bestehen und damit einen Schmelzpunkt $T_m > 400^\circ\text{C}$ besitzen. Dabei wird über eine geeignete Wahl der Prozessparameter und Lotlegierungen eine vollständige Umsetzung des in der Verbindung befindlichen Lotes in intermetallische Phase innerhalb kürzester Zeit erzielt.

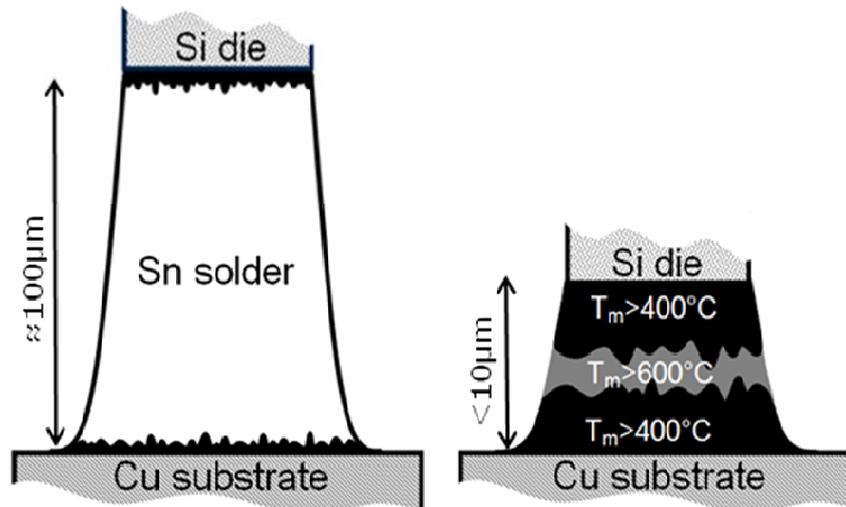


Abbildung 11: Vergleich einer weichgelöteten (links) mit einer diffusionsgelöteten (rechts) Chip zu Substrat Verbindung. Die intermetallischen Phasen in der Lotverbindung sind schwarz/grau dargestellt. Im dargestellten Fall besteht die diffusionsgelötete Verbindung aus zwei intermetallischen Phasen mit unterschiedlichem Schmelzpunkt. Die Abbildung ist nicht maßstabsgerecht.

Abbildung 11 zeigt den schematischen Vergleich zwischen einer weichgelöteten und einer diffusionsgelöteten Chip-Substrat Verbindung. Während beide Verbindungen aus einem Sn-reichen Weichlot hergestellt werden, wird in der Standardtechnik nur ein kleiner Bruchteil des Lotes in intermetallische Phase umgesetzt. Dies führt nicht zu einer Zunahme des Schmelzpunktes. Damit sind die Eigenschaften der Verbindung maßgeblich von den physikalischen Parametern des Ausgangslotes geprägt. Durch den niedrigen Schmelzpunkt der üblicherweise verwendeten Weichlote ist damit ein zuverlässiger Einsatz bei hohen Sperrschichttemperaturen ausgeschlossen.

Setzt man dagegen das gesamte Volumen in die hochschmelzende intermetallische Phase um, so steigt der Schmelzpunkt der Verbindung weit über den Schmelzpunkt des verwendeten Lotsystems. In Abhängigkeit der Dicke der Verbindungsschicht, der Löttemperatur und der Löttdauer bilden sich dabei ein oder mehrere intermetallische Phasen unterschiedlicher Schmelztemperatur aus. Im hier betrachteten Cu-Sn System sind das die beiden Phasen Cu_3Sn mit $T_m=676^\circ\text{C}$ sowie Cu_6Sn_5 mit $T_m=415^\circ\text{C}$.

Durch eine geeignete Prozessführung ist es möglich eine komplette Umsetzung des Lotes innerhalb weniger Sekunden zu erzielen. Dabei können Schichtdicken der Verbindung von $d \leq 10 \mu\text{m}$ realisiert werden (Abbildung 12).

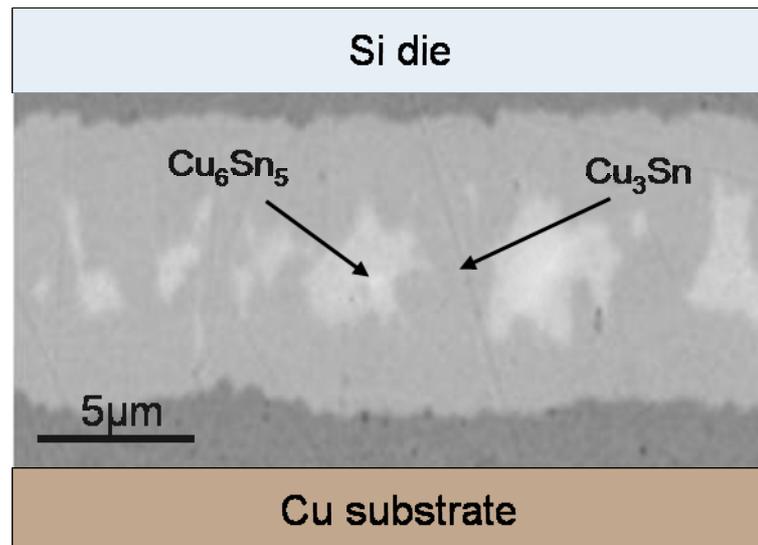


Abbildung 12: Querschnitt durch eine diffusionsgelötete Chip-Substrat Verbindung.

Nach bisherigen Erkenntnissen skaliert die Qualität der Verbindung beim Diffusionslötprozess nicht mit der Größe der eingesetzten Chips (Abbildung 13) und auch nicht mit der verwendeten Si Dicke (70-220 μm).



Abbildung 13: Ultraschallscan diffusionsgelöteter Chips unterschiedlicher Fläche (16-185 mm^2).

Im Rahmen des Projektes wurde der beschriebene Diffusionslötprozess von einer kleinen Laboranlage auf eine fertigungstaugliche Laboranlage transferiert. Mit der Laboranlage konnten Einzelchipaufbauten zur Prozesserverprobung unter definierten Prozessbedingungen aufgebaut werden. Diese Proben dienten zur Fixierung der Prozessparameter und zur Herstellung erster Zuverlässigkeitsmuster (Abbildung 14).

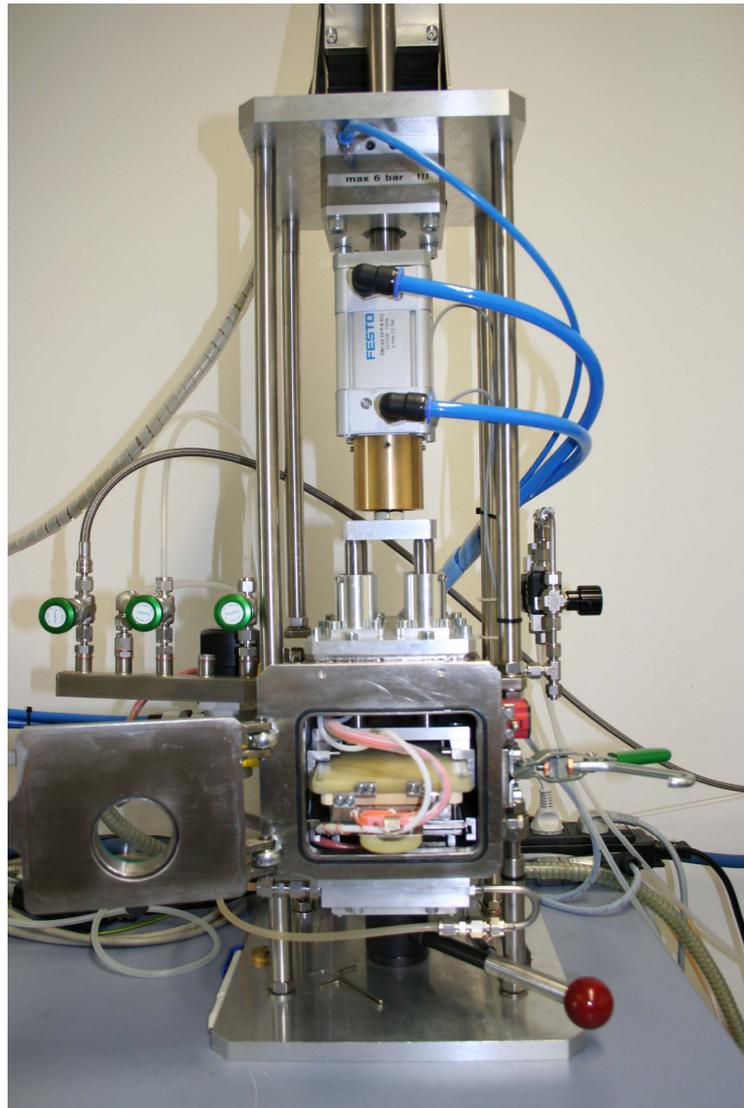


Abbildung 14: Laboranlage zur Prozessprüfung der Diffusionslöttechnologie. Die Vakuumanlage bietet Anschlüsse für unterschiedliche Prozessgase, sowie eine Kühl- und eine Heizplatte zum Verlöten eines Si-Chips auf ein DCB Substrat.

Beim Transfer auf die zweite Anlage stand neben der Verbesserung der Parameterkontrolle besonders die Umsetzung eines fertigungstauglichen Konzeptes im Vordergrund. So konnte im Rahmen des Projektes eine offene Durchlaufanlage mit einem schnellen Pick & Prozess realisiert werden. Diese Anlage ermöglicht einen großen Durchsatz sowie einen hohen Automatisierungsgrad (Abbildung 15).



Abbildung 15: Fertigungstaugliche Entwicklungsanlage für Diffusionslötverbindungen.

3.3.2.2.3 Active power cycling

Zur anwendungsnahen Überprüfung der Zuverlässigkeit der neuen Aufbautechnologien werden aktive Powercycling Tests eingesetzt. In diesem Test wird der Halbleiter durch aktive Bestromung periodisch aufgeheizt. Die dabei freigesetzte Verlustwärme führt zu einer thermischen Wechsellast, die in den angrenzenden Verbindungen thermomechanische Spannungen induziert. Besonders für kurze Zyklen mit $t_{on} < 3\text{sec}$ lokalisieren sich die thermomechanischen Spannungen dabei besonders in der Bondverbindung und der Chip-Substrat Verbindung. Die Tests wurden beim Projektpartner Siemens durchgeführt.

In Abbildung 16 ist ein Vergleich der PC Festigkeit zwischen Standardmodulen und dem InGA Leistungsmodul dargestellt. Einerseits zeigt sich in Abhängigkeit der maximalen Sperrschichttemperatur anhand der Standardmodule die zu erwartende Abnahme der Zuverlässigkeit mit steigender Maximaltemperatur. Gleichzeitig konnte für die InGA Leistungsmodule eine Zunahme der Zuverlässigkeit um den Faktor 4,5 nachgewiesen werden.

Dieses Ergebnis zeigt sehr deutlich, dass über eine Verbesserung der Chipvorderseitenkontaktierung und eine neue Rückseitenaufbautechnik eine massive Verbesserung der Lastwechselfestigkeit erzielt werden kann.

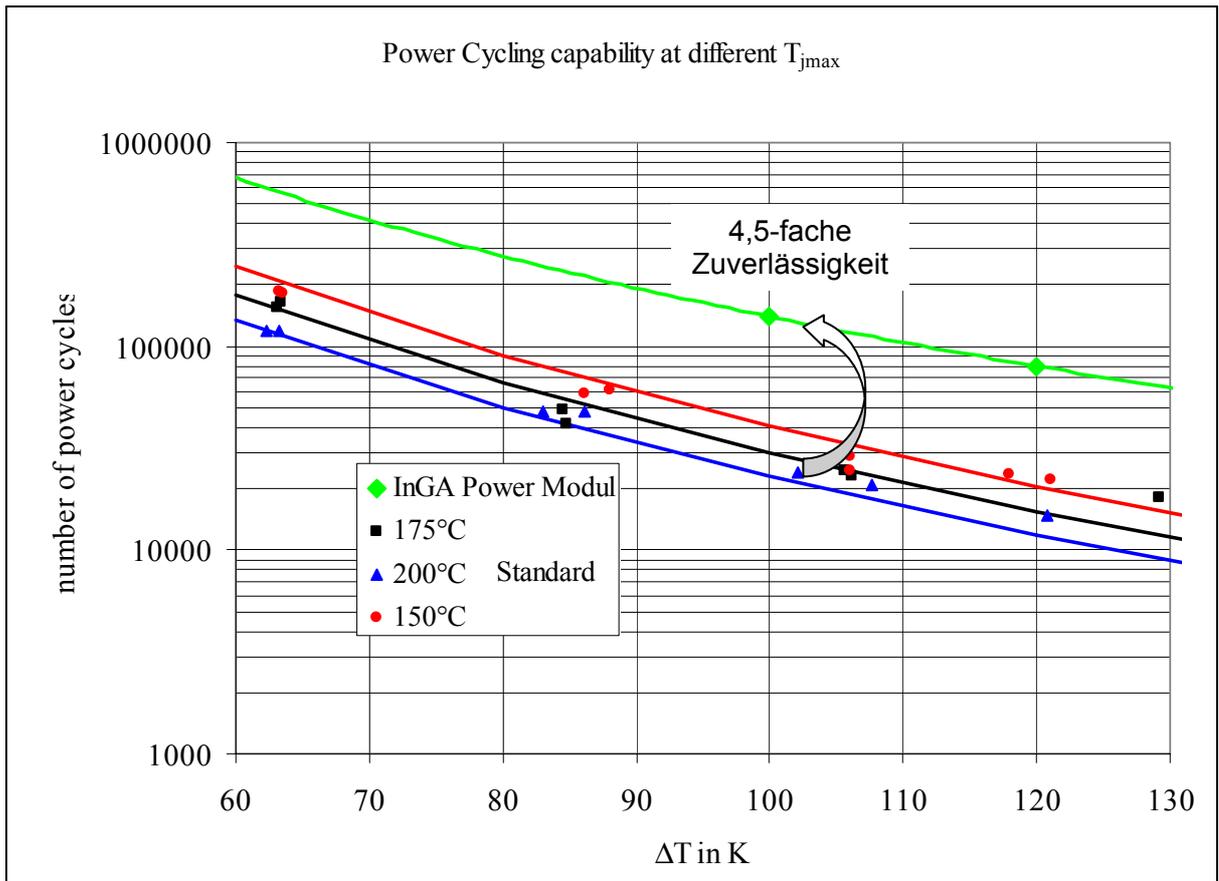


Abbildung 16: Power cycling Diagramm. Verglichen wird die Power Cycling Performance eines InGA Power Moduls bei einer Maximaltemperatur von 175°C mit Standardmodulen unterschiedlicher Maximaltemperatur. Das InGA Modul zeigt eine 4,5-fache Zuverlässigkeit im Vergleich zum Standardmodul.

3.3.2.3 Kontaktierungstechnik für 500 A/cm²

Die Verringerung von Verlusten in Leistungshalbleitern und eine erhöhte Betriebstemperatur erlauben den Betrieb von Leistungsmodulen bei erhöhten Strömen. Durch den begrenzten Querschnitt der Drahtbonds sind die Ströme eingeschränkt. Daher wird untersucht, inwiefern eine großflächige oberseitige Kontaktierung der Siliziumchips den Betrieb mit erhöhten Strömen erlaubt.

Abbildung 17 zeigt das Layout des Moduls, in dem die oberseitige Chipanbindung anstelle von Drahtbonds mit einer großflächigen Kupferlage kontaktiert wird. Die grüne Fläche stellt das Layout der Oberseitenverbindung dar.

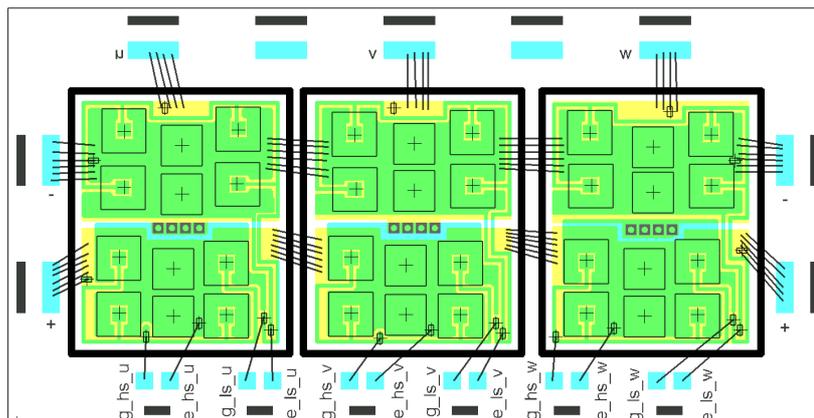


Abbildung 17: Layout mit oberseitiger großflächiger Kontaktierung der Chips

Durch das oberseitige Layout muss das Keramiksubstrat, auf das die Siliziumchips aufgelötet werden nur in zwei Flächen unterteilt werden. Dies erlaubt neben einer höheren Stromtragfähigkeit eine einfachere Aufteilung der Chips.

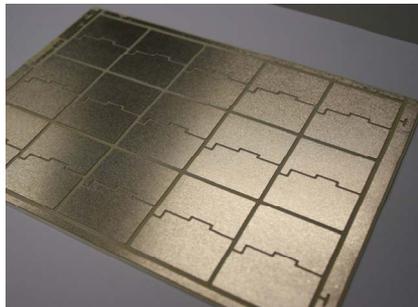


Abbildung 18: Großkarte mit DCB-Keramik Substraten

Nur die Drahtverbindungen zwischen den Keramiksubstraten und zu dem Rahmen des Moduls werden weiterhin mit Drahtbonds realisiert.

Der Prozessschritte beim Aufbau des Moduls gliedern sich folgendermaßen:

- Auflötung Chips auf DCB Großkarte
- Herstellung und Strukturierung Isolationsfolie auf Epoxidharzbasis
- Aufbringen und Strukturieren der Oberseitenmetallisierung mit Schichtdicken bis 200µm
- Brechen der Großkarte
- Auflöten der Keramiken auf Bodenplatte
- Rahmenbondung
- Verguß- und Häusung des Moduls

Die nachfolgende Abbildung zeigt das fertige Modul, das hinsichtlich der äußeren Anschlüsse Pinkompatibel mit einem EconoPack™ Modul aufgebaut ist.

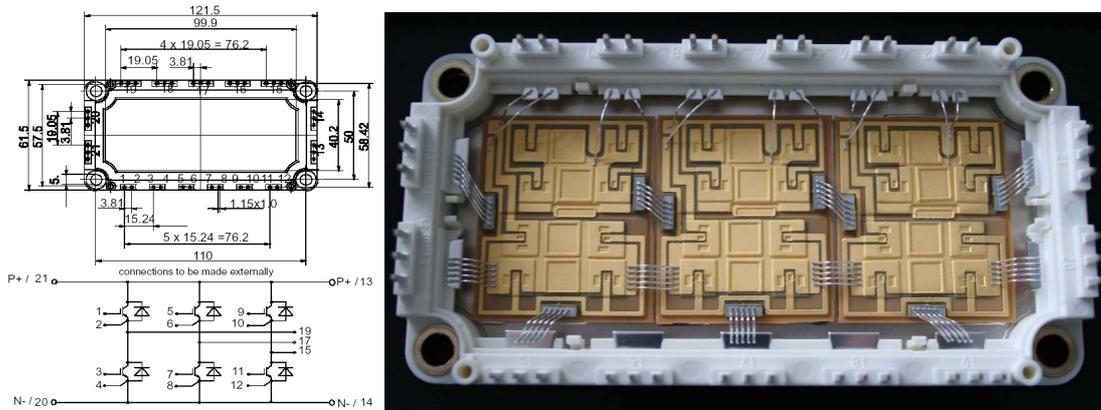


Abbildung 19: Leistungsmodul mit großflächig kontaktierten Siliziumchips

Im Vergleich zu einem Standardmodul lassen sich durch die großflächige oberseitige Kontaktierung die Siliziumchips gleichmäßiger im Modul verteilen. Thermische Simulationen wurden durchgeführt, um die Auswirkung der homogenen Verteilung der Chips zu untersuchen.

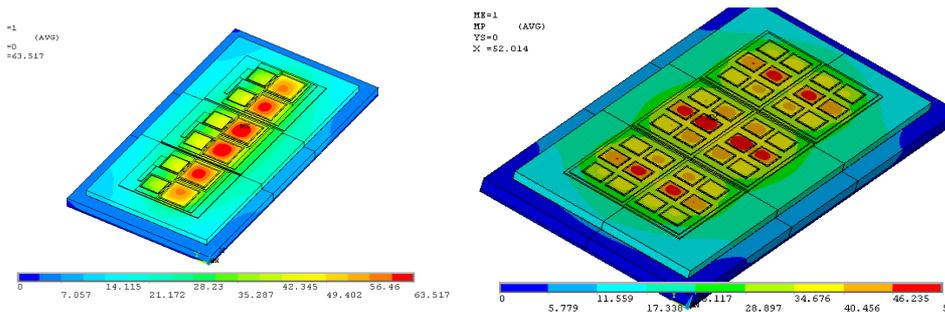


Abbildung 20: Thermische Simulation des Standardmoduls (links) im Vergleich zu Modul mit großflächiger Kontaktierung der Chips (rechts)

Es wurden verschiedene typische Belastungsfälle simuliert und maximale Temperaturen auf den Dioden und IGBT Chips bestimmt. Wie in Tabelle 1 zu sehen ist, kann der maximale Temperaturhub im Modul um ca. 20% reduziert werden.

Phasenwinkel	Verluste IGBT	Verluste Diode	Maximaler Temperaturhub im Referenzmodul:		Maximaler Temperaturhub im Aufbau mit Folientechnik	
			IGBT	DIODE	IGBT	DIODE
0°	110 W	29 W	63.5	46.4	50.9	43.2
100°	81W	54 W	54.3	54.4	45.4	50.4
180°	70 W	61 W	50.5	56.48	42.8	51.7

Tabelle 1: Temperaturmaxima auf IGBT/Diode für verschiedene Betriebsfälle

Zudem wurden an den Modulen Messungen zum Schaltverhalten und den Durchlasseigenschaften durchgeführt. Das Modul schaltet ohne Oszillationen und zeigt ein ähnliches Verhalten wie das Standardmodul (siehe Abbildung 21).

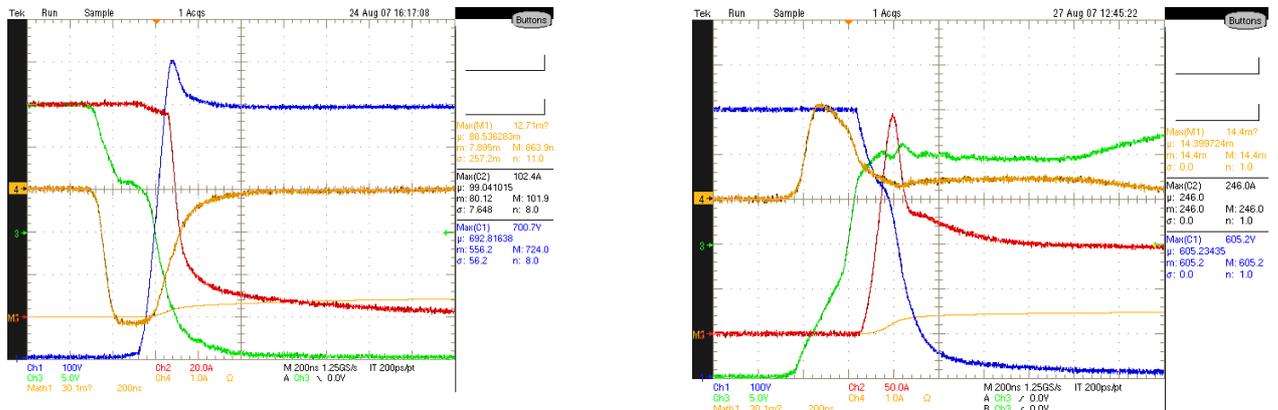


Abbildung 21: Messungen zum Schaltverhalten (links Ausschalten, rechts Einschalten)

Der Spannungsabfall auf den Zuleitungen zu den Si-Bauelementen kann durch die großflächige oberseitige Kontaktierung um 150mV reduziert werden. Die exemplarischen Messungen an Schalter 4 zeigen damit das Potential, wesentlich höhere Ströme zu führen, da die Zuleitungsverluste so um ca. 75% reduziert werden.

Ice= 100A und Vg=15V, 25°C	
Spannungsabfall durch die Zuleitung V	
Modul mit Metallisierung-S4	0.05
Standardmodul-S4	0.2

Tabelle 2: Messung des Spannungsabfalls für Schalter 4

Die Untersuchungen zeigen, wie durch die großflächige oberseitige Kontaktierung der Chips die Stromdichte deutlich erhöht werden kann und eine thermische Verbesserung des Modulaufbaus erreicht wird. In der aufgebauten Modulvariante werden die maximalen Ströme durch die äußeren Anschlüsse begrenzt. Die Messungen des Spannungsabfalls zeigen, dass Stromdichten von 500A/cm² mit der großflächigen Kontaktierung der Chips realisiert werden können, wenn die Verluste auf den Halbleitern entsprechend reduziert werden oder durch eine hoch effiziente Kühlung die Chiptemperatur begrenzt wird.

Die im Aufbau befindliche Isolationsfolie begrenzt jedoch derzeit die maximale Betriebstemperatur des Moduls. Temperaturen von 200°C sind materialbedingt noch nicht dauerhaft möglich. Zukünftige Weiterentwicklungen des Isolationsmaterials sind notwendig, um das Potential des Si- oder SiC Halbleiterbauelemente ausschöpfen zu können.

3.3.2.4 Übersicht Modulaufbauten

Im Rahmen des InGA Projektes wurden verschiedene Modulaufbauten mit einerseits SiC JFET und SiC Dioden und andererseits IGBT Module mit Aufbautechniken für Betriebstemperaturen bis 200°C und deutlich erhöhte Stromtragfähigkeit realisiert. Für den Fahrzeugaufbau wird zudem eine Hochtemperatur/Hochstrom Treiberelektronik entwickelt und aufgebaut, die in der InGA Fahrzeugelektronik integriert wird. Die Module wurden bei den Projektpartner TU Braunschweig und Continental im Umrichterbetrieb erfolgreich getestet. Beim Projektpartner Siemens wurden an den Modulen Lebensdauertests durchgeführt. Weitere Untersuchungsergebnisse dazu befinden sich in den Berichten dieser Projektpartner. Die folgende Abbildung zeigt eine Übersicht der Modulaufbauten, die im Rahmen des InGA Projekts entstanden sind.

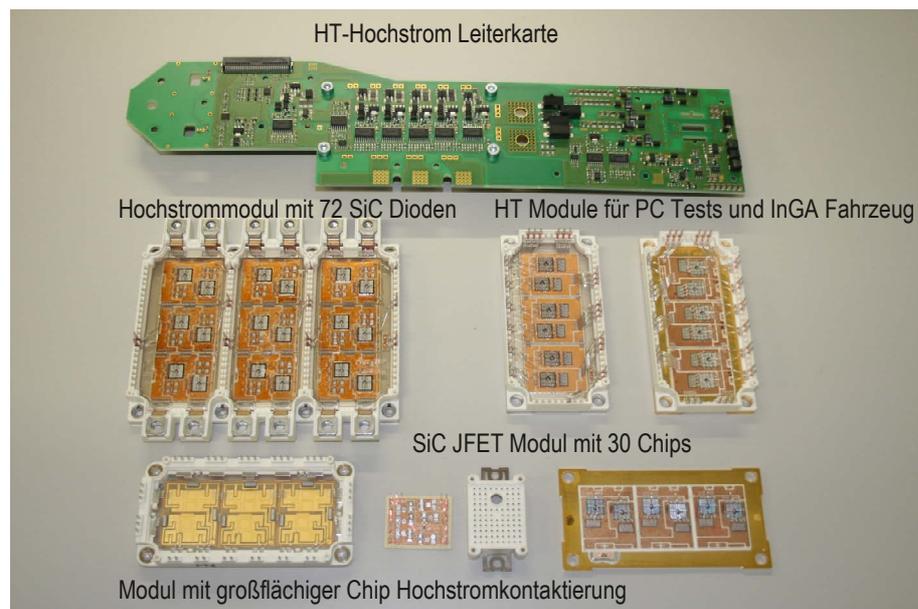


Abbildung 22: Übersicht der Leistungsmodule und Hochtemperaturelektroniken

3.3.3 Arbeitspaket 4: Integration der Leistungs- und Regelelektronik

Im Arbeitspaket 4 werden Arbeiten zur Integration der Leistungs- und Regelelektronik durchgeführt. Die thermische Auslegung und Lebensdauerbetrachtung des Leistungsmoduls wird hier umgesetzt und die Treiberelektronik für die Integration im Antriebsstrang entwickelt. Zudem werden Untersuchungen zur Hochtemperaturintegration des Microcontrollers durchgeführt, der für die Regelelektronik notwendig ist.

3.3.3.1 Thermische Auslegung und Lebensdauerbetrachtung

Für die Integration der Leistungselektronik an den Antriebsstrang ist eine thermische Optimierung notwendig. Um eine möglichst kompakte Leistungselektronik zu realisieren, sind die Komponenten auf maximale Betriebstemperatur und Lebensdauer auszulegen. Für die Durchführung dieser Auslegung ist die Kenntnis einerseits der Anwendungsanforderungen, wie klimatische Randbedingungen und Lastprofile (Mission Profile) als auch die Eigenschaften des Moduls hinsichtlich elektrischer/thermischer Eigenschaften, Kühlrandbedingungen und Lastwechselfestigkeit notwendig. Das in Abbildung 23 dargestellte Ablaufschema zeigt die Schritte, die notwendig sind um die Auslegung/Auswahl des Moduls hinsichtlich thermischer Performance und Wechsellast durchzuführen.

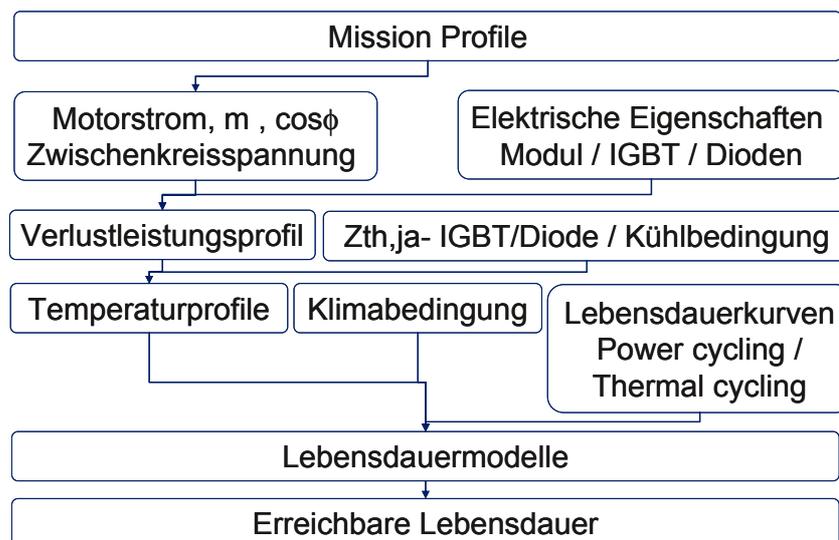
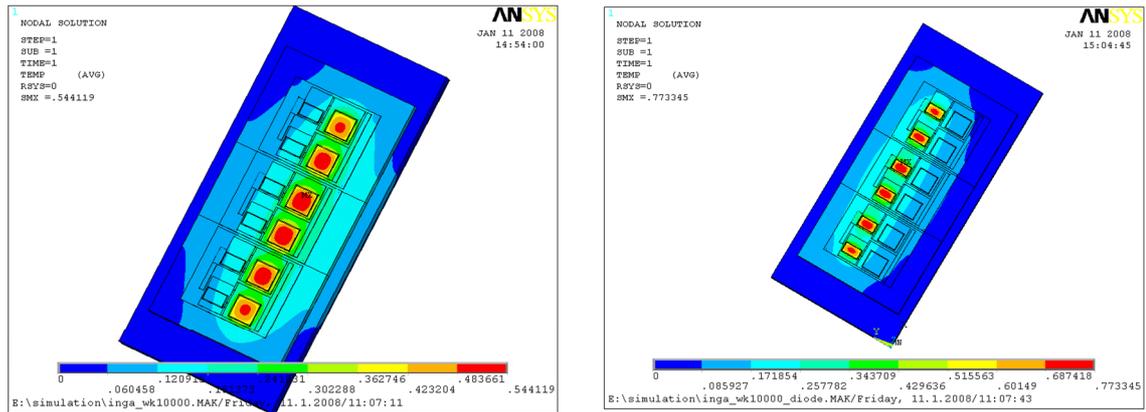


Abbildung 23: Schritte zur Auslegung des Moduls hinsichtlich Lebensdauer

Für eine hohe Kühleffizienz wird die Modulbodenplatte rückseitig direkt mit Kühlmittel gekühlt. Hierfür ist im Kühler eine Kühlstruktur integriert. Vom Projektpartner Continental wurden dazu Kühlrandbedingungen vorgegeben. Die thermischen Eigenschaften wurden mittels dieser Randbedingungen und Finite Elemente Simulationen ermittelt. Nach Abschluss der Auslegung wurden Messungen des Projektpartners Siemens am Kühlsystem durchgeführt. Diese zeigen eine gute Übereinstimmung mit der Simulationsvorhersage mit Abweichung von nur ca. 5%. Die nachfolgende Abbildung zeigt Ergebnisse der Finite Elemente Simulation und den Vergleich mit den Messungen.



	Simulation		Messung	Abweichung
	Rth,peak in K/W	Rth,avg in K/W	Rth,avg in K/W	Simulation/Messung
IGBT	0.544	0.474	0.446	5.9%
Diode	0.773	0.663	0.664	-0.2%

Abbildung 24: Thermische Simulationen bei Belastung IGBT (links) und Diode (rechts). Vergleich mit Messungen

Für die Auslegung unter Betriebsbedingungen wurde vom Projektpartner VW ein Lastprofil (Mission Profile) geliefert. Charakteristische Daten für die Modulauslegung sind hierbei der Phasenstrom und die Batteriespannung. Neben diesen Informationen sind weitere Kenntnis über Eigenschaften wie Modulationsgrad, Leistungsfaktor $\cos\phi$ und der Taktfrequenz notwendig, ohne die die Belastung der der Halbleiter nicht ermittelt werden kann. Diese wurde aus den Eigenschaften der zu betreibenden Asynchronmaschine ermittelt.

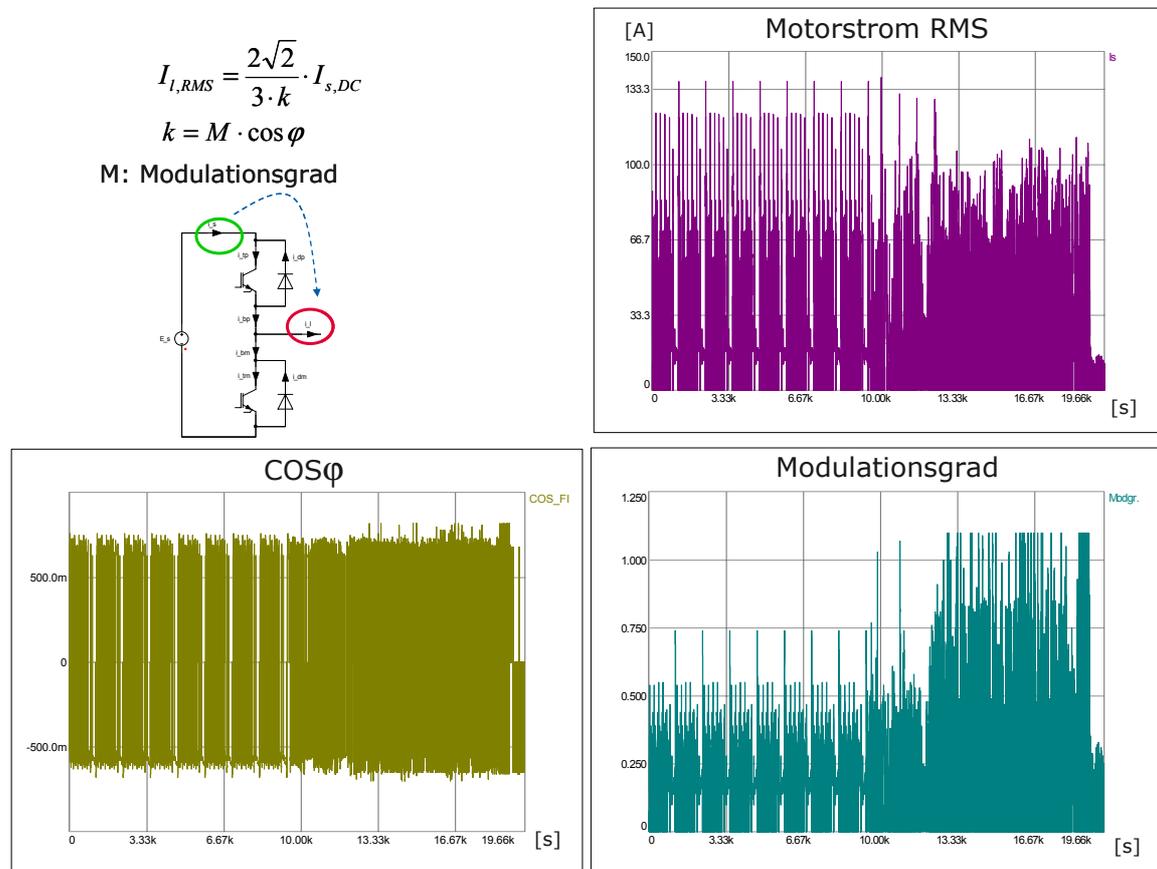


Abbildung 25: Motorstrom, Modulationsgrad und Leistungsfaktor für auslegungsrelevantes Fahrspiel

Mit den Lastprofilen und den Moduleigenschaften wurden die transienten Verlustleistungsverläufe auf den Schaltern/Dioden ermittelt (Abbildung 26).

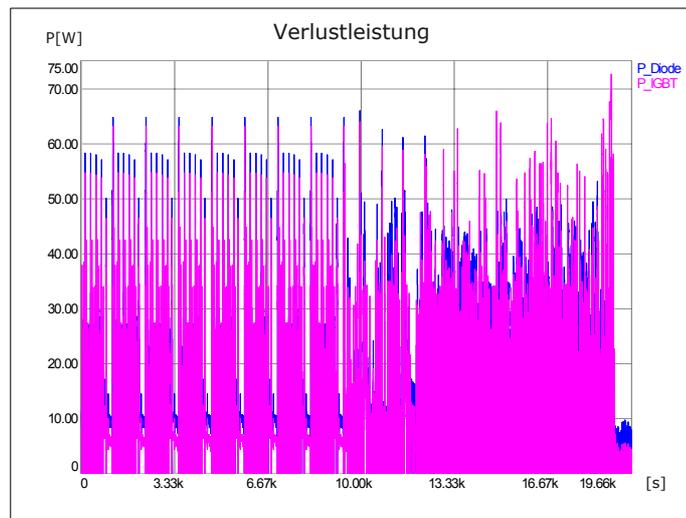


Abbildung 26: Verlustleistungsverlauf für auslegungsrelevantes Fahrspiel

Die Temperaturverläufe auf den Siliziumbauelementen können dann mit dem Verlustleistungsverlauf und einem thermischen Ersatzschaltmodell des Leistungsmoduls, das in Abbildung 27 dargestellt ist, ermittelt werden.

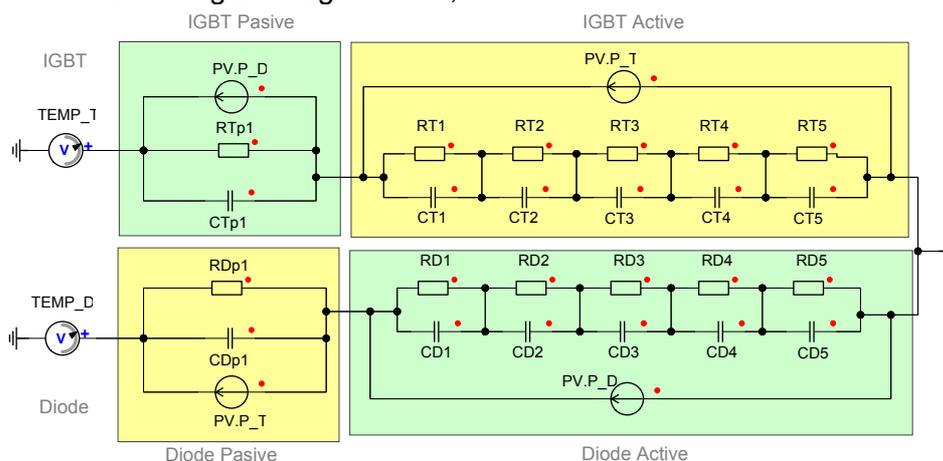
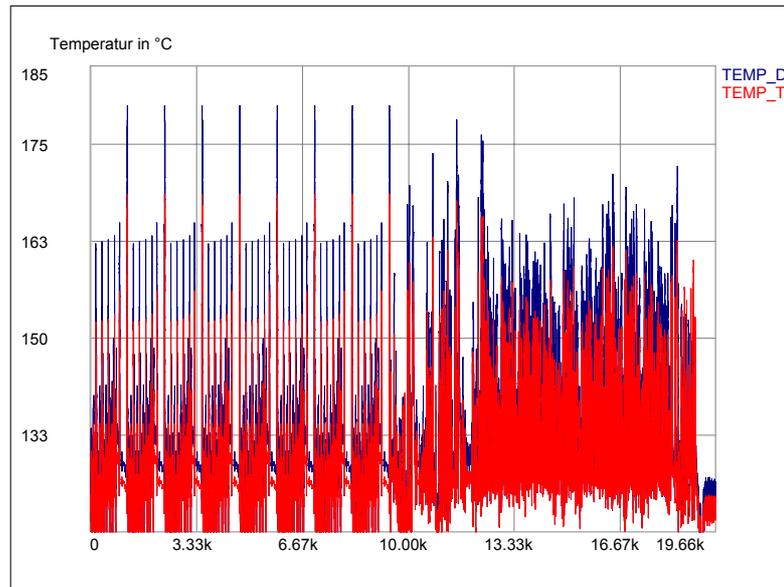


Abbildung 27: Thermisches Modell des direktgekühlten Leistungsmodul

Das thermische Modell berücksichtigt die Kopplung zwischen Dioden und IGBTs und wird aus einer transienten thermischen Simulation bei sprunghafter Leistungsbelastung der Bauelemente ermittelt.

Die Temperaturverläufe werden dann mit dem Systemsimulator Simplerer berechnet.

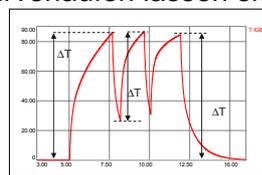


Tjmax(Diode)@Tcoolant=125 °C ~ 180 °C
 Tjmax(IGBT)@Tcoolant=125 °C ~ 170 °C

Abbildung 28: Temperaturverlauf auf IGBT und Diode

Bei der maximalen Kühlmitteltemperatur von 125°C ergeben sich, wie in Abbildung 28 dargestellt ist, auf den Bauelementen Temperaturen von 180°C. Unter Berücksichtigung der Abweichungen zwischen Messung und Simulation erfolgte damit eine Auslegung in den Bereich von bis zu 200°C Chiptemperatur.

Neben der maximalen Chiptemperatur ist auch die Zyklusfestigkeit des Leistungsmoduls zu dimensionieren. Aus den Temperaturverläufen lassen sich Temperaturhübe extrahieren.



fs=10kHz		ΔT=5	ΔT=10	ΔT=15	ΔT=20	ΔT=25	ΔT=30	ΔT=35	ΔT=40	ΔT=45	ΔT=50
IGBT	Zyklen pro Mission Profile	366	365	265	124	89	20	5	18	0	0
	Zyklen pro Lebensdauer	183000	182500	132500	62000	44500	10000	2500	9000	0	0
Diode	Zyklen pro Mission Profile	486	589	303	143	111	63	68	10	3	10
	Zyklen pro Lebensdauer	243000	294500	151500	71500	55500	31500	34000	5000	1500	5000

fs=8kHz		ΔT=5	ΔT=10	ΔT=15	ΔT=20	ΔT=25	ΔT=30	ΔT=35	ΔT=40	ΔT=45	ΔT=50
IGBT	Zyklen pro Mission Profile	326	352	256	130	59	10	3	16	0	0
	Zyklen pro Lebensdauer	163000	176000	128000	65000	29500	5000	1500	8000	0	0
Diode	Zyklen pro Mission Profile	460	622	220	114	98	57	50	6	3	8
	Zyklen pro Lebensdauer	230000	311000	110000	57000	49000	28500	25000	3000	1500	4000

Abbildung 29: Temperaturhübe auf IGBT und Diode während des Lastprofils für unterschiedliche Schaltfrequenzen

Hierfür wird eine 500fache Wiederholung des Lastprofils für die Lebensdauerbeanspruchung beurteilt. Die ausgewerteten Zyklen wurden mit Auswerteverfahren vom Projektpartner Siemens verglichen. Sie können zur Bewertung mit gemessenen Lebensdauerkurven korreliert werden. Neben diesen aktiven Belastungen treten durch die Verwendung des Motorkühlkreislaufs passive Temperaturbelastungen auf.

Die Anzahl der Belastungen sind in der nachfolgenden Grafik dargestellt. In Kombination mit der aktiven Erwärmung des Chips sieht das Bauelement Temperaturwechsel von einem ΔT >200K.

$T_{\text{kühlung,min}}$	$T_{\text{kühlung,max}}$	Anzahl Zyklen	ΔT auf Chip
-40°C	95°C	100	190 K
-30°C	95°C	900	180 K
-10°C	95°C	3000	160 K
10°C	95°C	5000	140 K
-40°C	125°C (+15°C)	30*)	220 K

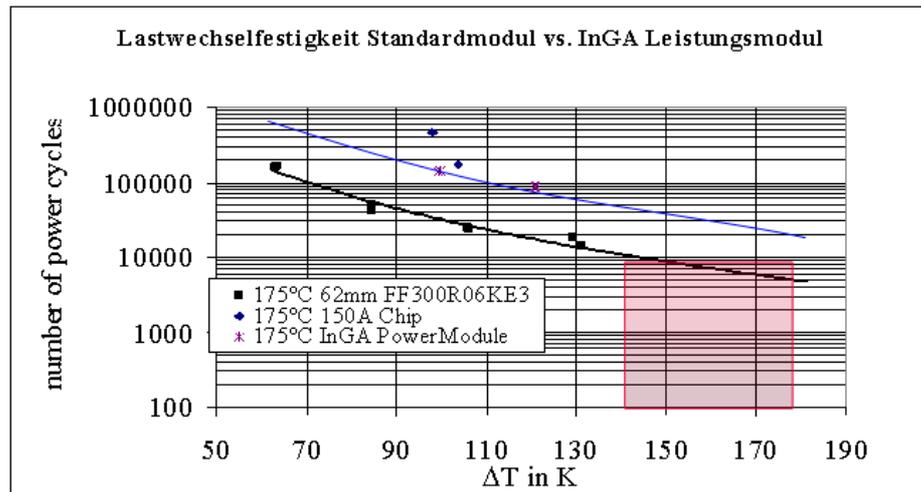


Abbildung 30: Temperaturhübe auf IGBT und Diode durch die Überlagerung Erwärmung des Kühlmittels und aktives Aufheizen der Siliziumbauelemente

Wie in dem Diagramm dargestellt ist, schneiden sich Anforderungen und Lastwechselfestigkeit bei Modulen mit konventioneller Aufbautechnik. Die Module mit verbesserten Bonds und diffusionsgelöteten Chips erreichen dagegen in den Lastwechseltests Zyklenzahlen, die ausreichend Luft zu den Anforderungen bieten und damit eine ausreichende Lebensdauer bezüglich dieser Anforderung gewährleisten. In diesen Aufbauten wurde zudem die Substratverbindung mittels einer Niedertemperaturverbindungstechnik realisiert, die im Projekt EfA (Elektrokomponenten für das Aktivgetriebe, 19 U 6006C) untersucht wird.

3.3.3.2 Integration Treiberelektronik und Sensorik

Die gesamte Elektronik zum Betrieb der elektrischen Maschine im Hybridantrieb gliedert sich in verschiedene Komponenten, wie eine Controller Einheit, die von der Firma Continental entwickelt und hergestellt wird, eine Treiberelektronik und das Leistungsmodul mit Kühlung. Der Gesamtaufbau ist in Abbildung 31 dargestellt.

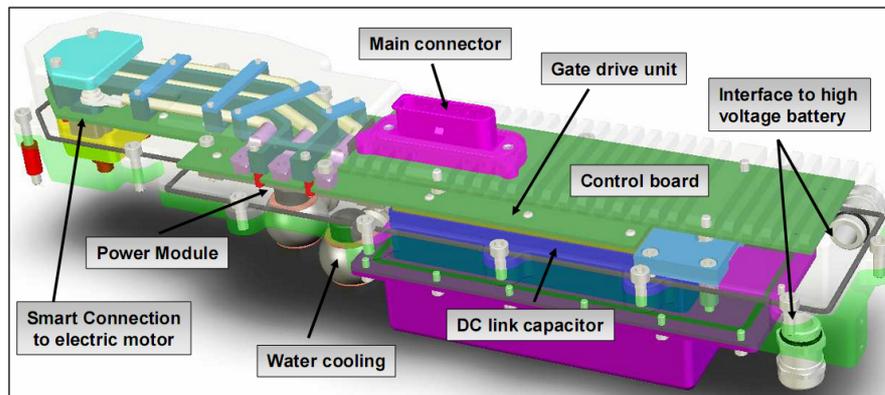


Abbildung 31: Komponenten der InGA Elektronik

Die Treiberelektronik (Gate Drive Unit) stellt zum einen die galvanische Trennung der 12 Volt Batteriespannung von der Leistungsmodulseitigen Hochspannung dar. Auf der Treiberelektronik werden die für die Ansteuerung der Leistungsschalter notwendigen Komponenten integriert und gleichzeitig liefert sie auch Messsignale für die Motorregelung und Überwachungsfunktionen. In der InGA Elektronik sind zudem auch die Hochstromverdrahtung und Anschluss des Zwischenkreiskondensators auf dem Treiberboard integriert.

Abbildung 32 zeigt die wichtigsten Funktionen, die auf der Treiberelektronik realisiert sind.

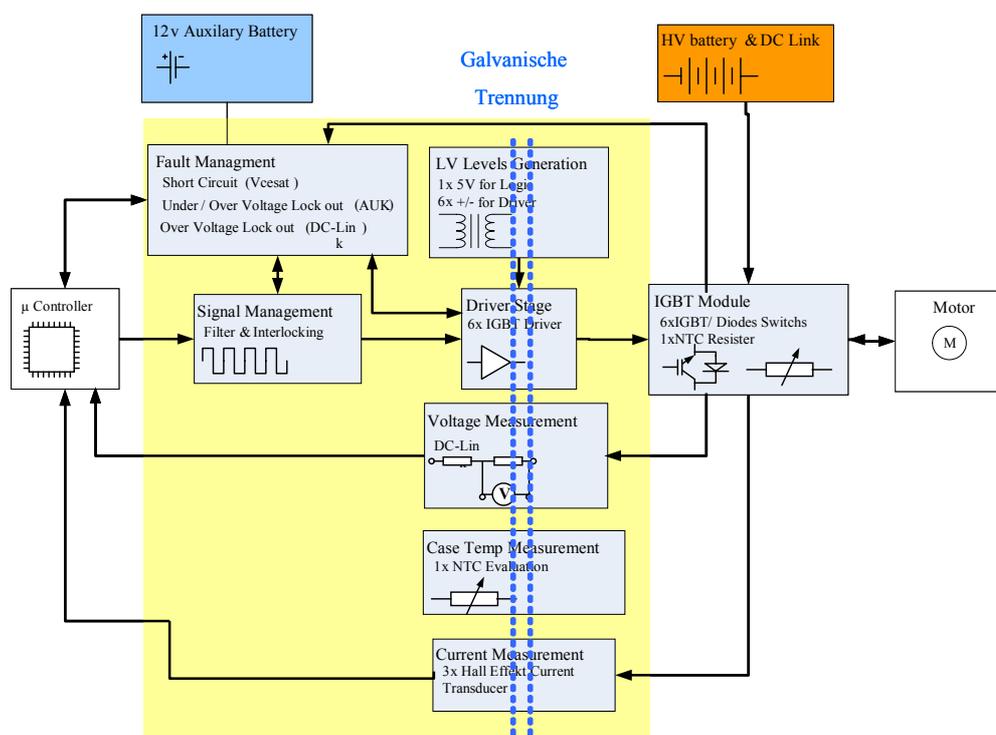


Abbildung 32: Übersicht der wichtigsten Funktionen der Treiberelektronik

Folgende Funktionen sind die auf dem InGA Treiberboard umgesetzt:

- Erzeugung der galvanisch getrennten Spannungsversorgung(1x 5V, 6x +15V/-8v)
- 1x Spannungsüberwachung für die 12V Auto-Batterie
- 1x Überspannungsüberwachung für die HV Batterie und DC Link
- 1x NTC Messung von der Leistungsmodultemperatur
- 3x Strommessung (5V Versorgung wird auf Treiberbord erzeugt)
- 6x IGBT Treiber
- Signal Management (Filter & Interlocking)
- Fehlermanagement des Treibers
- Entladung des Zwischenkreis
- 2kV Isolation zwischen Hochvolt und Niedervoltseite

Die Funktionen müssen unter extremen Umgebungsbedingungen erfüllt werden. Der gesamte Funktionsumfang muss bis zu Kühlmitteltemperaturen von 110°C und 125°C Umgebungstemperatur gewährleistet werden. Die Bauraumanforderungen zur Integration an den Antriebsstrang geben dabei den verfügbaren Bauraum und die geometrischen Abmessungen vor.

Nachfolgend werden einige Funktionen und Messungen an der Treiberelektronik dargestellt. In der Treiberelektronik ist die Auswertung der NTC Temperatur integriert. In diesem Fall wurde eine galvanische Trennung realisiert.

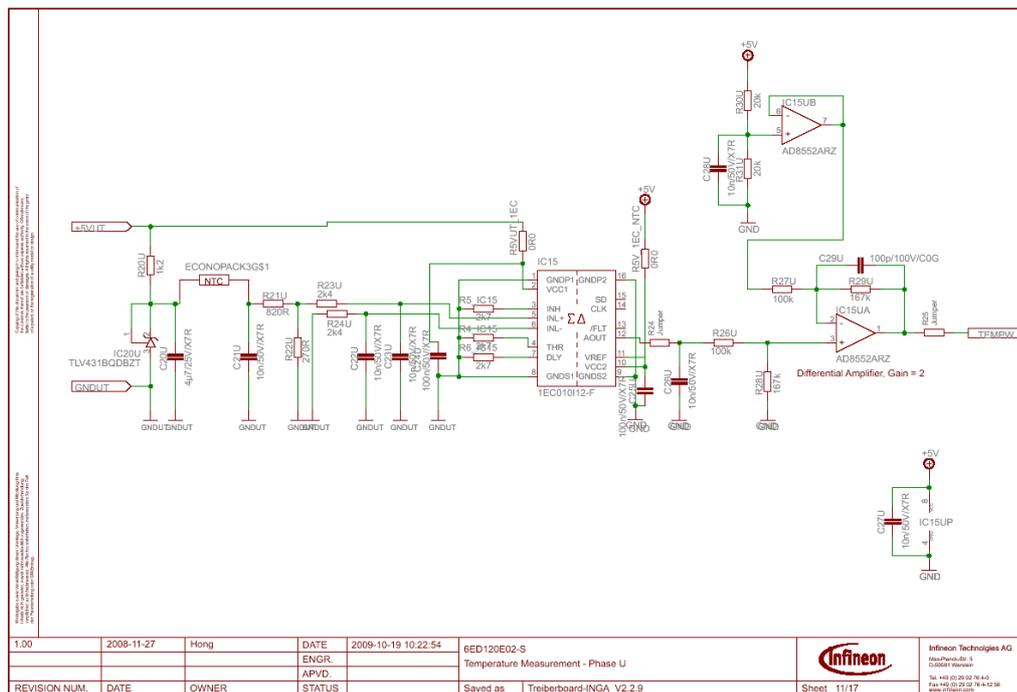


Abbildung 33: Schaltungsteil zur Auswertung der Leistungsmodul NTC Temperaturmessung

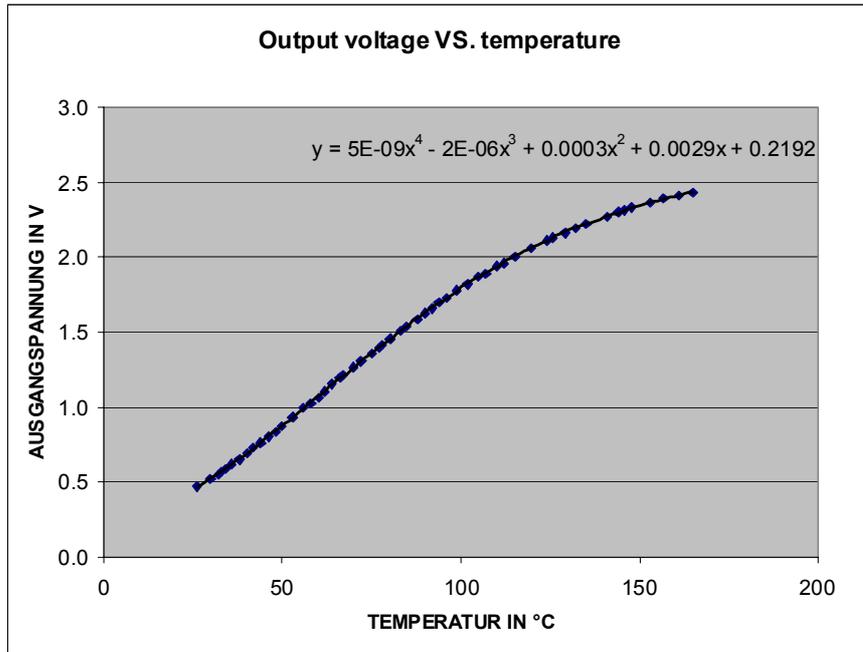


Abbildung 34: Temperaturmessung Modulbodenplatte

In Abbildung 34 ist der Verlauf des Spannungssignals über der Modultemperatur dargestellt. Aufgrund der Direktkühlung des Leistungsmoduls stellt die NTC Messung näherungsweise die Bodenplatten/Kühlmitteltemperatur dar. Das Messsignal erlaubt eine Temperatur Messung bis etwa 160°C.

Bei Abtrennung der Batterie muss der Zwischenkreiskondensator innerhalb von 5s entladen werden. Dies wird durch einen zusätzlichen Leistungsschalter realisiert

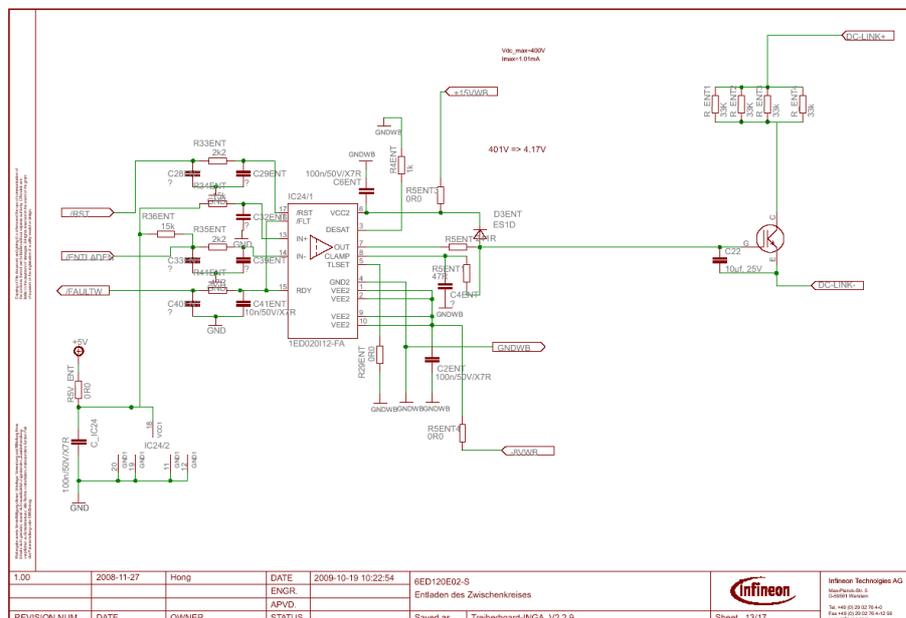
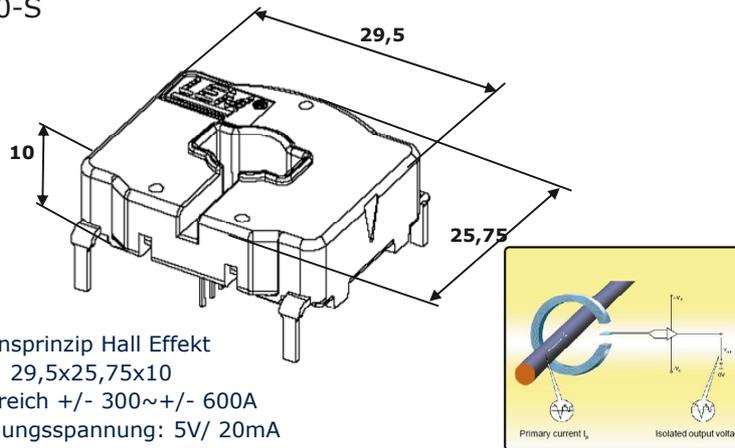


Abbildung 35: Entladeschaltung für den Zwischenkreiskondensator

Für die Erfassung der Ströme werden Open Loop Hall Effekt Stromwandler verwendet, die bis zu einer Umgebungstemperatur von 125°C einsetzbar sind.

HC6F300-S



- Funktionsprinzip Hall Effekt
- Abmaß: 29,5x25,75x10
- Messbereich +/- 300~+/- 600A
- Versorgungsspannung: 5V/ 20mA
- Arbeitstemperatur bis 125° C

Abbildung 36: Open Loop Hall Effekt Stromwandler

Die Treiberansteuerung muss das sichere Schalten der Leistungsschalter im Modul gewährleisten. Abbildung 37 zeigt das Schaltverhalten des Leistungsmoduls bei typischen Strömen von 200A. Bei einer Batteriespannung von 280V entstehen im Schaltmoment durch die Induktivität zwischen Leistungsmodul/Kondensator Spannungen von 360V. Aufgrund von Überspannung beim Schalten werden Bauelemente mit verglichen zur Batteriespannung höheren Spannungsfestigkeit von 600V eingesetzt.

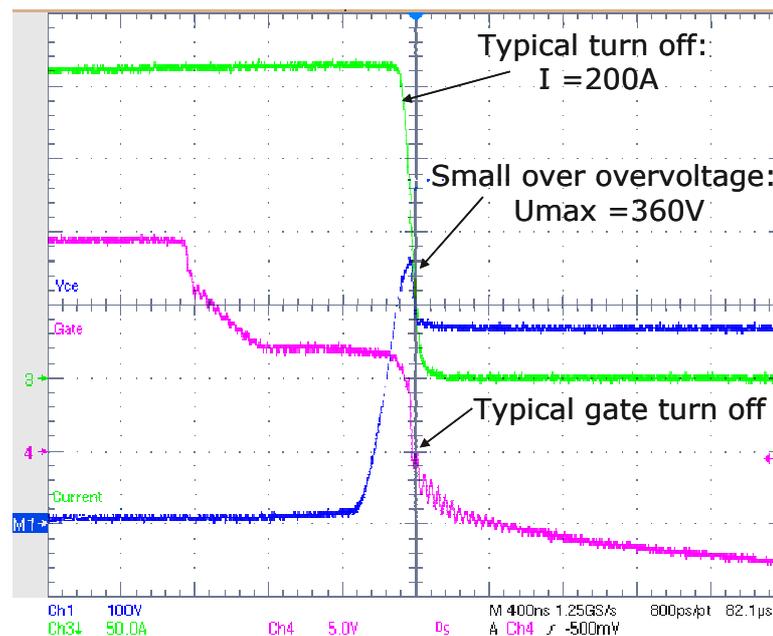


Abbildung 37: Schalten des der Treiberelektronik/Modul mit typischen Strömen

Auf der Treiberelektronik sind verschiedene Schutzfunktionen implementiert. Neben einer Über/Unterspannungsüberwachung der 12V Versorgung und einer Überspannungsüberwachung der Hochvoltspannung wird eine Kurzschlussüberwachung integriert.

Abbildung 38 zeigt den Strom-/Spannungsverlauf beim Schalten eines Kurzschlusses. Bei einem Strom von 1400A begrenzt der Schalter den Kurzschluss. Bei der untersuchten Konfiguration schaltet die Schutzfunktion den Kurzschluss nach etwa 2µs ab.

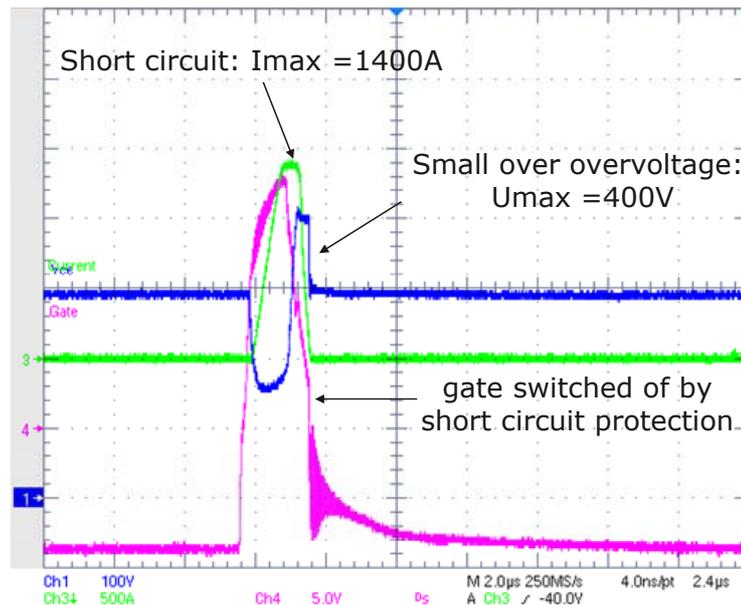


Abbildung 38: Schalten des der Treiberelektronik/Modul im Kurzschluss

Desweiteren muss abgesichert werden, dass die maximale Temperatur auf der Treiberelektronik unter Umgebungstemperaturen von 125°C zulässige Temperaturen nicht überschreitet. Dazu wurden Infrarotmessungen an einer partiell geschwärzten Treiberkarte durchgeführt. Abbildung 39: zeigt eine Infrarotaufnahme, die bei Raumtemperatur durchgeführt wurde. Es ergeben sich maximale Temperaturhübe von 21K.

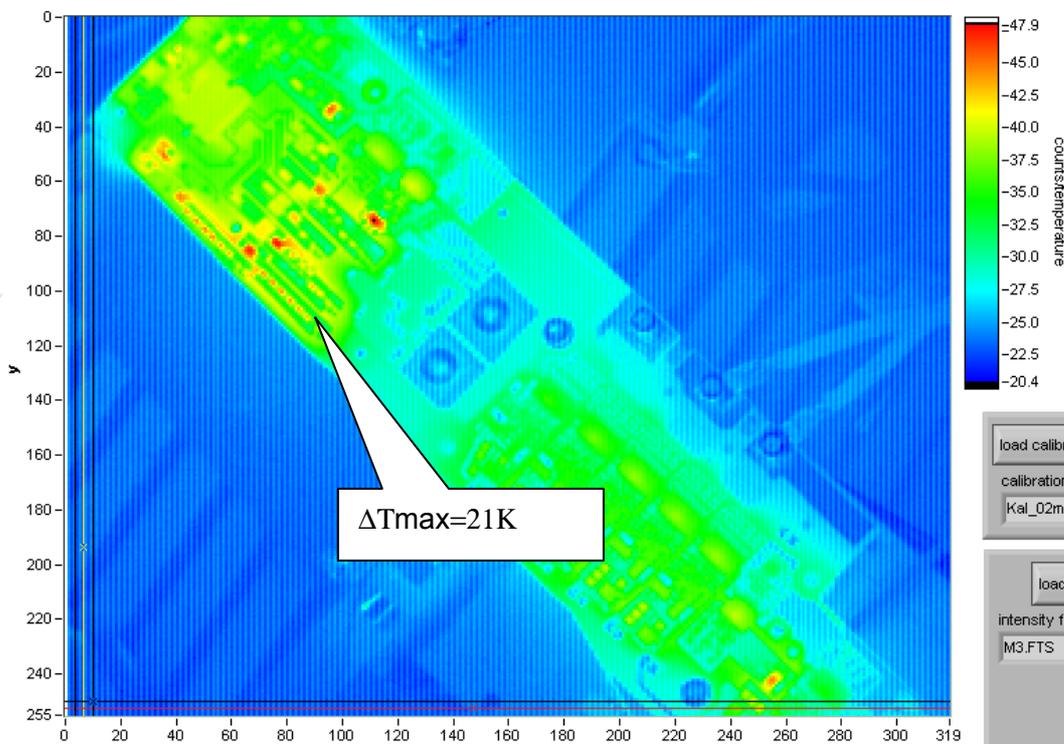


Abbildung 39: Temperaturverteilung auf der Leiterkarte

Die Orte maximaler Temperatur wurden in weiteren Untersuchungen mittels Thermoelementen untersucht, da die Elektronik in einer Temperaturkammer untersucht wird und Infrarotaufnahmen aufgrund des Bauraums nicht möglich sind.

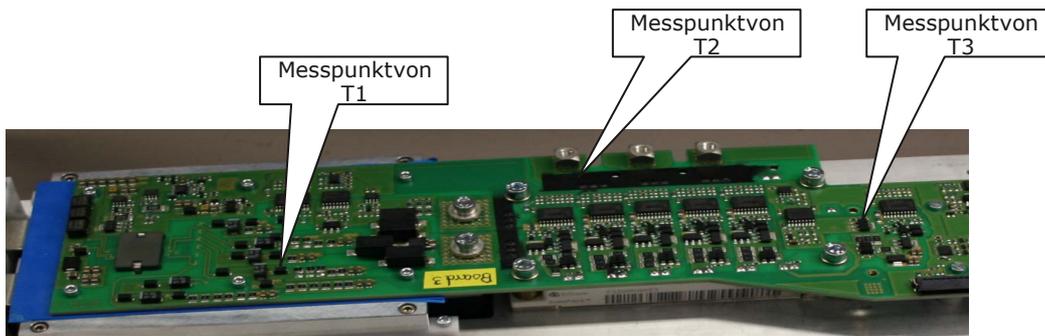
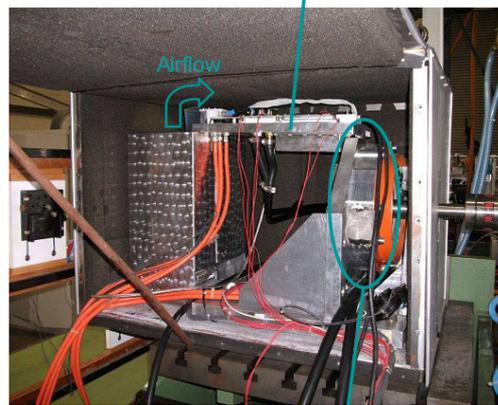


Abbildung 40: Messpunkte auf der Leiterkarte für Thermoelemente

In Abbildung 40 sind die Messpunkte gekennzeichnet, auf denen die maximalen Temperaturen entstehen. An der TU Braunschweig wurden in einer Klimakammer die Temperaturen auf der Treiberelektronik an den Messpunkten bei Betrieb der elektrischen Maschine und Hochtemperaturumgebung untersucht.

InGA test mounting plate with high temperature electronic components



Induction motor (IM)

Abbildung 41: Klimakammer der TU Braunschweig / Testumgebung

In die Temperaturkammer ist neben der Leistungselektronik auch die elektrische Maschine integriert. Die Kammer und das Kühlmittel sind variabel temperierbar. Bei verschiedenen Kühlmittel- und Umgebungstemperaturen wurden Lastprofile mit Strömen von 140A RMS getestet. Die maximale Temperatur, die während des Lastprofils auftritt ist in Tabelle 3 aufgeführt.

Messung	TL Luft in °C	TW in °C Kühlwasser	VDC in V	maximaler Laststrom I _{rms} in A	Maximale Temperatur Treiberkarte
1	95	97	240	140 A	108
2	95	100	240	140 A	112
3	111	96	240	140 A	118
4	105	101	240	140 A	120
5	117	106	240	140 A	125
6	125	105	240	140 A	128
7	126	107	240	140 A	128

Tabelle 3: Maximale Temperatur auf Treiberkarte bei Kühlmittel- und Umgebungstemperaturen von bis zu 125°C

Die Kühlmitteltemperatur konnte am Prüfstand bis maximal 107°C temperiert werden. In Kombination mit einer Umgebungstemperatur von 126°C treten maximale Temperaturen von 128°C auf der Treiberleiterkarte auf. Die elektrische Funktion des Gesamtsystems konnte dabei über einige Stunden nachgewiesen werden. Der Nachweis der Funktion der Treiberelektronik und des Leistungsmoduls unter vergleichbaren thermischen Betriebsbedingungen wie am Motorkühlkreislauf und in motornaher Umgebung wurde damit erbracht. Die weitere Integration in das Fahrzeug erfolgt bei dem Projektpartner Continental.

3.3.3.3 Entwicklungsstudie zur Hochtemperaturqualifikation von Bare Die (32 bit) Microcontrollern

Um Kostengünstige Hybridfahrzeuge auf dem Markt anbieten zu können, benötigt die deutsche Automobilindustrie elektrische Antriebseinheiten, die als Module in das Getriebe oder den Antriebstrang integriert werden können. Erst der Plug-In Einbau bietet genügend Flexibilität, eine Reduzierung der Komplexität während der Montage des Fahrzeug und somit genügend Potenzial einer Kostenreduktion. Insbesondere bei der direkten Integration in das Getriebe ist es notwendig, die Komponenten auch als Bare Die im Hochtemperaturbereich von 150°C einsetzen zu können.

Dazu wird im Rahmen des Projektes InGA eine Entwicklungsstudie zur Hochtemperaturqualifikation von Bare Die (32 bit) Microcontrollern erarbeitet. Dies ist eine Voraussetzung für den zukünftigen Einsatz von Microcontrollern in den Leistungselektronikmodulen, wie sie für Hybridantriebe benötigt werden. Die Konzeptionellen, Entwicklungs- und Analysearbeiten dazu umfassen die Themenkomplexe:

- Konzeption einer Qualifikations- Teststrategie
- Technologie Charakterisierung
- Machbarkeitsstudie zur Qualifizierbarkeit hochkomplexer Microcontroller

Im Ergebnis dieser Entwicklungsarbeiten werden wichtige Erkenntnisse zur Bewertung von Ausfallmechanismen im Hochtemperaturbereich (150°C) zur Zuverlässigkeit und End of Life Vorhersage von ungehäusten (Bare Die) Microcontrollern sowie die benötigten Test- und Qualifikationsmethoden erwartet.

Die Aufgaben wurden im Arbeitspaket 4 geplant und umgesetzt. Im Rahmen des InGA Projektes konnte die Regelungselektronik zusammen mit der Leistungselektronik an den Motorblock angebaut werden. Bei dieser Ausführungsform konnte im Gegensatz zur häufig gewählten Integrationsvariante in das Getriebe eine gehäuste Komponenten eingesetzt werden.

Zur Realisierung einer hochtemperaturfesten Steuereinheit wurden die Untersuchungen basierend auf einem TriCore 32Bit Microcontroller durchgeführt. Die Abbildung 42 und Abbildung 43 zeigen die Architektur des Microcontrollers mit allen Funktionsblöcken.

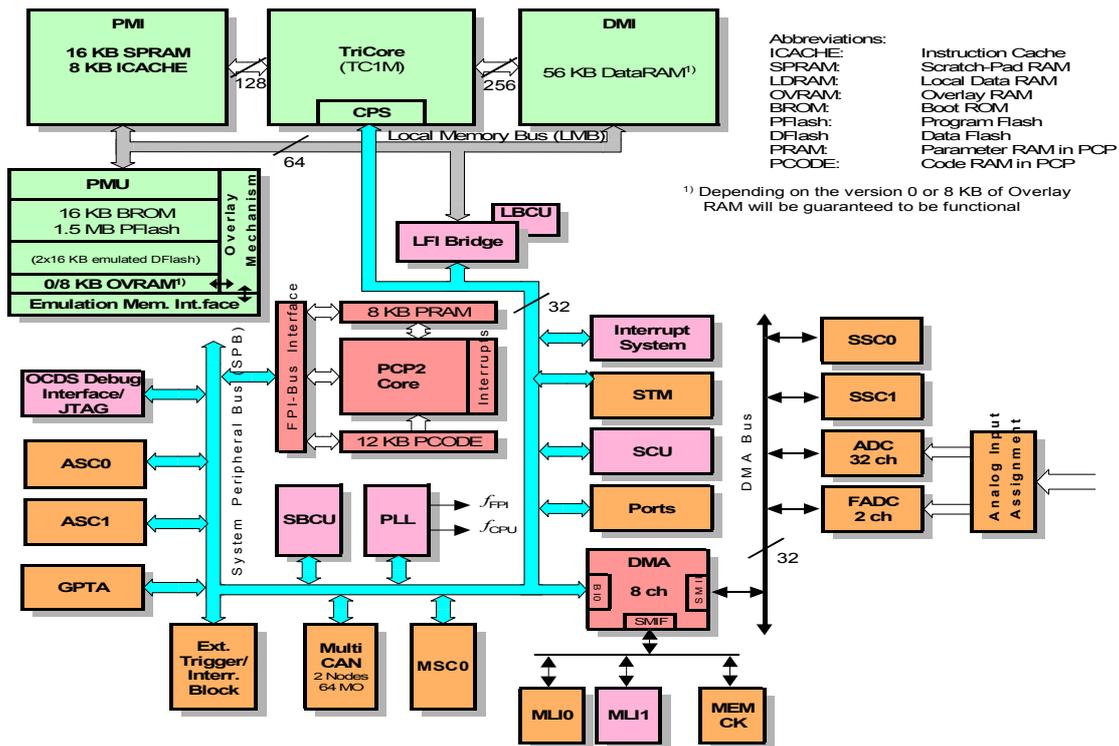


Abbildung 42: TriCore Architektur

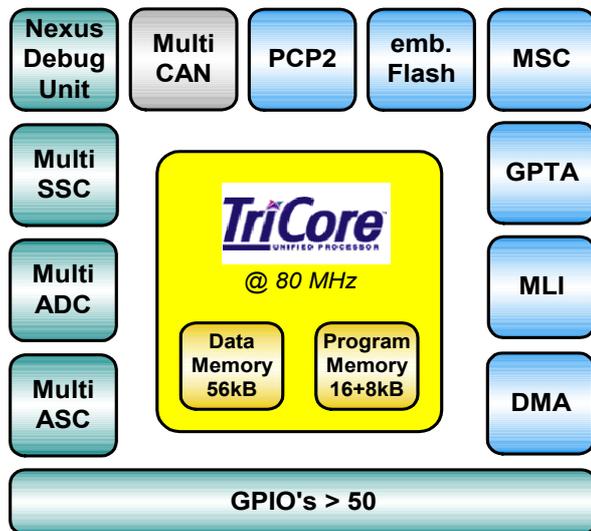


Abbildung 43: TriCore Blockdiagramm

Die nachfolgend aufgeführten Funktionen erlauben den Einsatz des Microcontroller für komplexe Regleraufgaben und die Verarbeitung einer Vielzahl von Sensorsignalen, wie sie für die Steuereinheit der Hybridelektronik notwendig sind.

TriCore Key Features

- 32-bit super-scalar TriCore™ V1.3 CPU
 - Floating Point Unit
 - Superior real-time performance
- 32-bit single cycle Peripheral Control Processor
- Multi-channel DMA controller

- GPTA[®] (flexible timer array)
 - Input signal conditioning and analysis
 - Capture/Compare/PWM
- 1,5 MB embedded Flash
- 4 kByte EEPROM Emulation
- MultiCAN (2 nodes)
 - full CAN 2.0B
 - 64 message objects
- μ S-Bus Interface (MSC)
 - extremely fast serial interface (e.g. for real-time PWM)
- 2x ASC and 2x SSC Interfaces
- Multi-Processor Interface (MLI)
- Multi-channel ADC (32 channels)
- Multi-channel FAST ADC (2 channels)

Mit seiner RISC, CISC und DSP Funktionalität und den flexibel konfigurierbaren Schnittstellen ist der Baustein sehr leistungsfähig

TriCore Designmodule

- Digitale Logik
- Flüchtige Speicher (SRAM)
- Nicht flüchtige Speicher (FLASH)
- Externe Ports und Pins
- Analoge Module

Für die Bare Die- Qualifikation ist die Bewertung aller Designmodule bei der maximalen Temperatur notwendig. Dazu wurden in einer Hochtemperaturstudie für $T_j = 160^\circ\text{C}$ die zu erwartenden Limitierungen erarbeitet. Insbesondere das Verhalten der Flash Speicherzelle ist bei hoher Temperatur genau zu bewerten. Dieser Schritt wurde ergänzend in einigen Messreihen mit dem neuen Laboraufbau erfolgreich durchgeführt.

Referenzbaustein TC1767

Temperatur $T_j = 160^\circ\text{C}$ T_j -> Temperatur an der Chipoberfläche

Function	Possible limitation	Limitation probability	Confidence on limitation value	Problem description
Clock frequency	f_max = 110 MHz	high	High	<ul style="list-style-type: none"> ■ Physical limitations ■ securing of functional capabilities
Ext. electrical parameter: e.g timing, slope, VIH, VIL, ...	Relaxed by 15%	high	High	<ul style="list-style-type: none"> ■ physical limitations ■ securing of functional capabilities
Device leakage current consumption at 160°C (incl. Pads)	factor 2.3 higher than at 150°C	high	High	<ul style="list-style-type: none"> ■ exponential increase of leakage
ADC / Temperature sensor accuracy	Reduction of accuracy Note: accuracy very difficult to estimate	high		<ul style="list-style-type: none"> ■ accuracy has to be analyzed on silicon
Flash write performance	no programming and erasing at 160°C	medium	Medium	<ul style="list-style-type: none"> ■ physical limitations
Flash read performance	no limitation at reduced clock frequency	medium	Medium	<ul style="list-style-type: none"> ■ timing issues ■ additional wait states necessary, if clock reduction is not sufficient
PPM	10-100 ppm Note: PPM impact of degradation effects very difficult to estimate	high	Low	<ul style="list-style-type: none"> ■ physical limitations

Abbildung 44: Hochtemperaturstudie / Erwartete Limitierungen bei hoher Temperatur

Qualifikations- und Teststrategie für Hochtemperaturtests

Bei der Messung von Bare Dies werden die Chips auf der Scheibe gemessen. Der Wafer wird im Prober auf die definierte Temperatur gebracht. Je höher die Unterschiede bei der Messtemperatur sind, umso schwieriger ist es, die Kontaktflecken des Bausteins zuverlässig elektrisch zu kontaktieren.

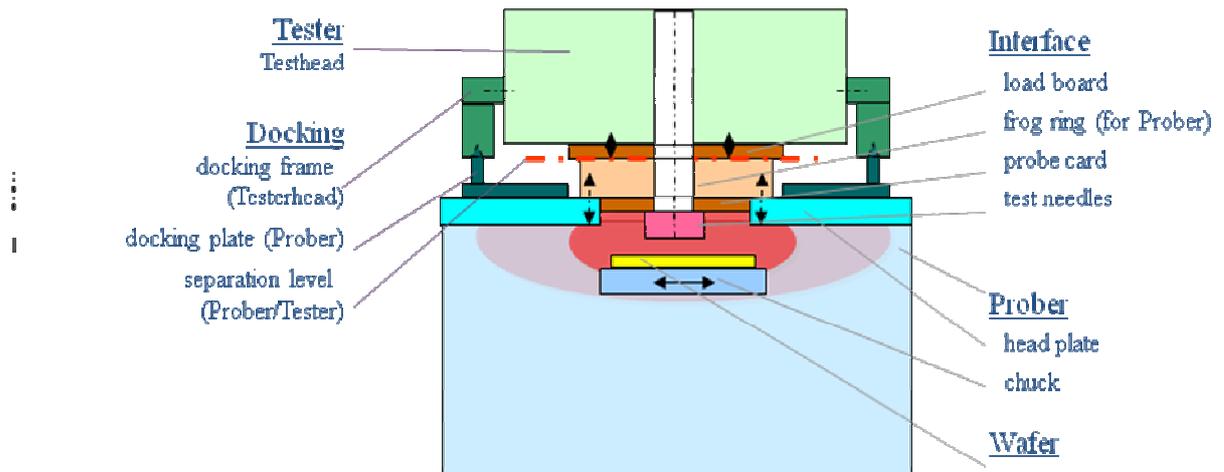


Abbildung 45: Schematische Darstellung der Messung auf dem Prober

Einführung eines neuen Waferprobers zur Durchführung von Temperaturmessungen

Für die Qualifikationsmessungen von Bare Dies wurde die Labormesstechnik mit einem neuen Prober ausgestattet. Dieser ermöglicht die Durchführung von Messungen im gesamten spezifizierten Temperaturbereich von -40°C bis $+150^{\circ}\text{C}$. Es konnte eine $T_{\text{peak}} = 180^{\circ}\text{C}$ sichergestellt werden.

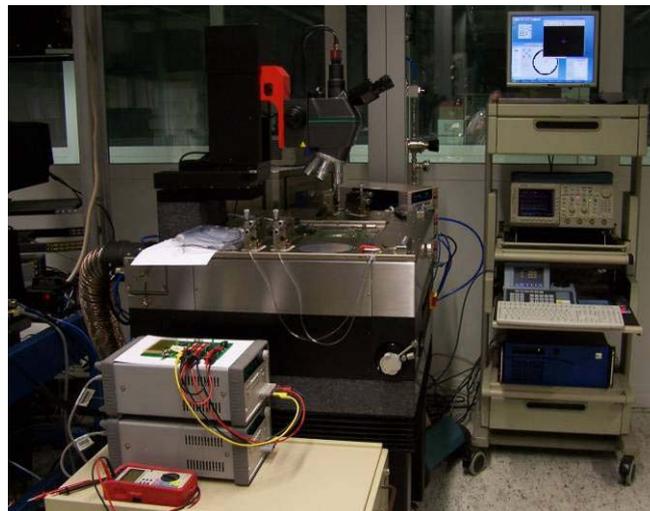


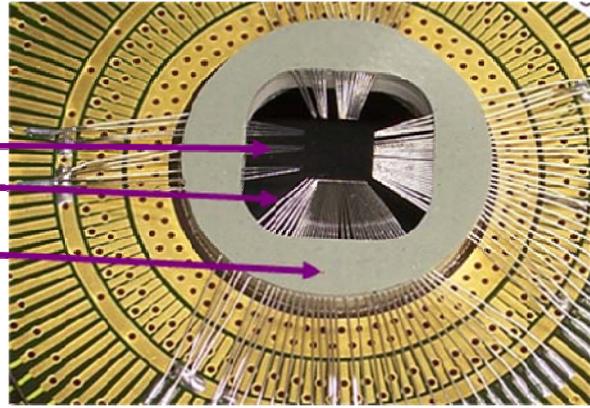
Abbildung 46: Waferprober zur Durchführung von Temperaturmessungen

Einführung neuer Nadelkarten

Zur Erreichung der Hochtemperaturfestigkeit wurden Nadelkarten mit einem neuen Design eingeführt.

Bisherige Messkarte

- Lange Nadeln
- Nadeln im Eck schräg & länger
- Nadelkartenträger: $T_{\max} = 125\text{C}$



Neue Messkarte

- Kurze Nadeln
- Nadeln fast parallel
- Nadelkartenträger: $T_{\max} = 180\text{C}$

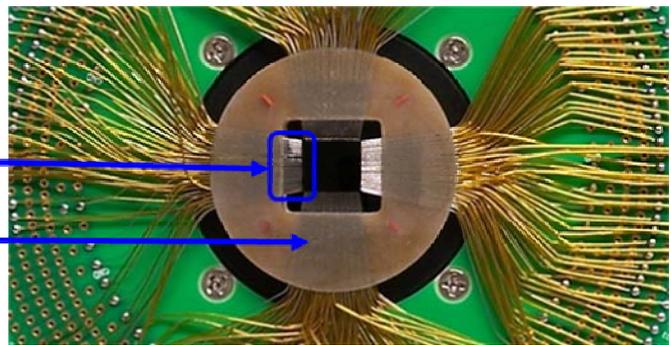


Abbildung 47: Vergleich alter und neuer Messkarte für erhöhte Temperaturanforderung

Die verbesserte geometrische Anordnung sowie die höhere Temperaturstabilität des Nadelkartenträgers lieferten auch bei $T_{\max}=180^{\circ}\text{C}$ stabile reproduzierbare Messwerte.

Auswahl des Nadelkartenträgers:

Als Boardmaterial wurde ISOLA IS 410 gewählt. Es zeichnet sich durch seine hohe Thermische Beständigkeit aus. Eine hohe Zykelfestigkeit der Platine ist bei dieser Anwendung nicht notwendig.

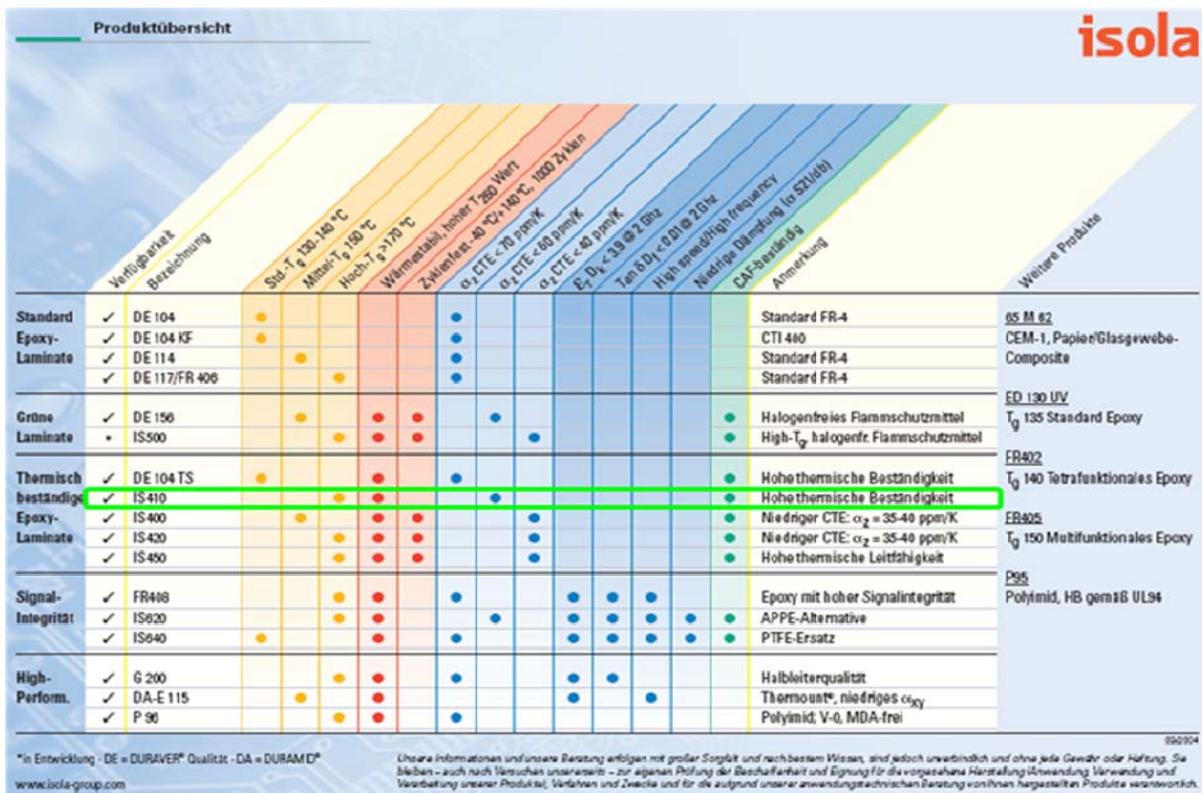


Abbildung 48: Auswahlkriterien für Leiterkartenmaterial für Nadelkarte

Re-design der Chip- Kontaktflächen

Zur robusteren Kontaktierung wurde das Chipdesign der Pads geändert. Es wurden größere Kontaktflecken eingebaut. Damit wird die Toleranz für Heißmessung am Waferprober wesentlich erhöht. Die durch den hohen Temperaturunterschied bedingte thermische Drift im System verursachte keine Fehlmessungen.

Version 1 : TC1766 Bare Die

Ergänzend zum bisherigen Pad wurde ein weiterer größerer Kontaktflecken eingebaut. Dies wurde mit der Einführung einer weiteren Metallisierungsebene auf den Pads möglich.

Version 2: Staggered Pads

In den neuen Chipdesigns werden die Pads 2-reihig versetzt angeordnet. Die darunter liegende Zelle ist weiterhin einreihig im Chip aufgebaut.

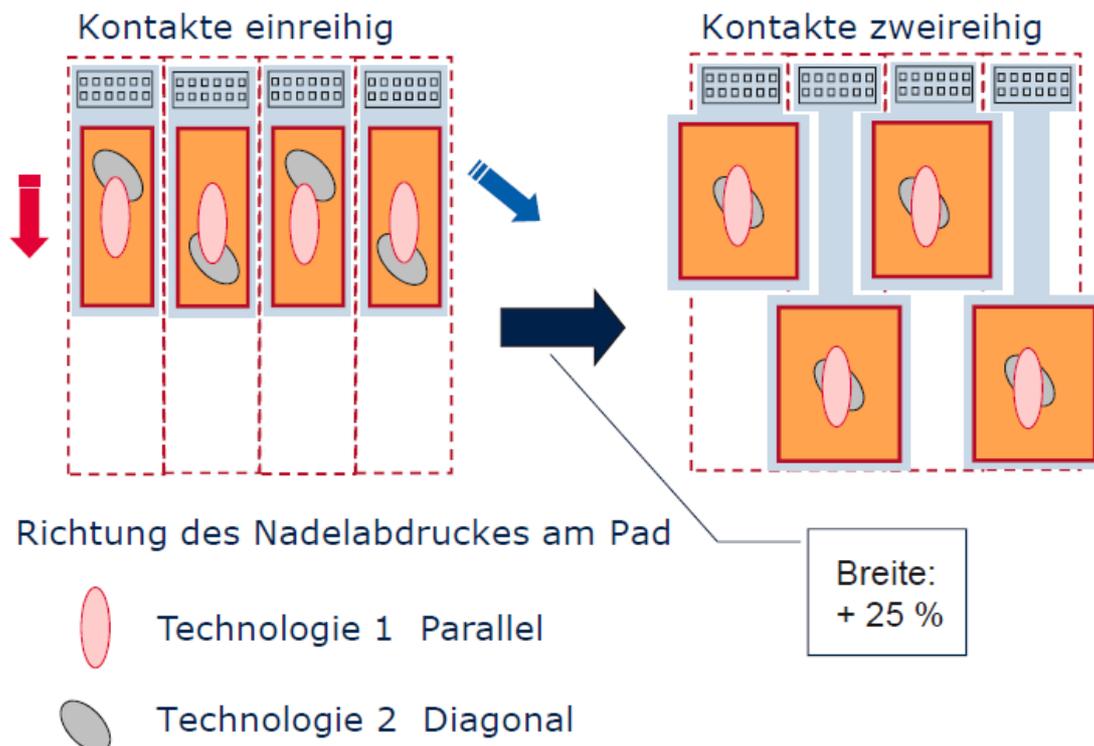


Abbildung 49: Kontaktdesign für robuste Kontaktierung (links altes Design / rechts neues zweireihiges Design)

Mit der 2-reihigen Anordnung der Kontaktöffnungen wurde eine wesentlich breitere Kontaktöffnung realisiert. Damit wird auf beiden Achsen eine hohe Toleranz erzielt. Dies benötigt man insbesondere für Kontakttechnologien, die eine Bewegungsrichtung diagonal zur Padöffnung aufweisen.

Funktionalitäten des Chipdesign mit erweiterter Tricorearchitektur wurden mit dem neuen Paddesign am neuen Laborequipment bei 175°C Scheibentemperatur verifiziert. Dies stellt sicher, dass die Bauteile für diesen Temperaturbereich qualifiziert werden können.

3.4 Nutzen, Umsetzung, Verwertung der Ergebnisse

Einige Teilerkenntnisse aus den Aktivitäten im Rahmen von InGA sind bereits jetzt in die Serienprojekte mit eingeflossen:

Das Diffusionlöten wird in Kombination mit weiteren Technologien in Produkten eingeführt: In der Presseinformation vom 04.05.2010 „Neue .XT-Technologie von Infineon erhöht deutlich die Lebensdauer von IGBT-Modulen und ermöglicht Sperrschicht-Temperaturen von bis zu 200 °C“ wurden bereits Produkt auf Basis der neuen .XT-Technologie (PrimePACK 2-Modul FF900R12IP4LD) angekündigt.

Module mit integrierten SiC Dioden sind bereits zu Ende des InGA Förderprojekts im FF600R12IS4F Modul kommerziell verfügbar.

Die im Rahmen des InGA Projektes zu Microcontrollern erzielten Ergebnisse werden in der Entwicklung und Qualifikation von neuen 32Bit Microcontroller zur Erweiterung des spezifizierten Temperaturbereiches angewandt. Dies ist insbesondere für die Aufbauform „Bare Die“ mit dem erweiterten Temperaturbereich von 150°C und höher zur Durchführung der Heißmessungen notwendig. Damit konnten die Produkteigenschaften auch in einem erweiterten Spezifikationsbereich sichergestellt werden.

Für die vollständige Umsetzung einiger weiterer Themen ist dagegen ein längerer Vorlauf erforderlich. Für Leistungsmodule wie z.B. Module auf Basis SiC JFET Bauelemente ist insbesondere für Hochtemperaturanwendungen weiterer Forschungsbedarf notwendig.

3.5 Vergleich mit der Zielsetzung / Zielerreichung

Technik-Aspekt:

Die Arbeiten der Infineon Technologies AG konzentrierten sich auf die Entwicklung einer zuverlässigen, hochtemperaturfähigen Leistungselektronik bis zu 200 °C Betriebstemperatur. Die Technologien wurden in Leistungsmodule integriert, mit denen am Prüfstand unter Motorbetrieb der prinzipielle Nachweis der Hochtemperaturtauglichkeit erbracht wurde. Die Verbesserung der Lastwechselfestigkeit um einen Faktor 4,5 konnte mit Lebensdauertests, die beim Projektpartner Siemens durchgeführt wurden, nachgewiesen werden.

Eine großflächige Chip-Kontaktierungstechnik für deutlich erhöhte Stromdichten wurde in ein Leistungsmodul integriert. Die Hochstromeignung wurde geprüft, wobei gewährleistet ist, dass die Schalteigenschaften des Moduls nicht negativ beeinflusst werden. Aufgrund des verwendeten Epoxidharz basierten Isolationsmaterialien ist eine dauerhafte Betriebstemperatur von 200°C noch nicht erreichbar.

Modulaufbauten mit SiC JFET und SiC Dioden wurden realisiert. Messungen an den Aufbauten zeigen die Vorteile dieser Bauelemente für erhöhte Schaltfrequenzen.

Die Entwicklungsstudie zur Hochtemperaturqualifikation von Bare Die (32 bit) Microcontrollern zeigt, dass die Microcontroller bis zu Temperaturen von 180°C untersucht werden können. Teilfunktionalitäten des Chipdesign mit erweiterter Tricorearchitektur wurden mit dem neuen Paddesign am neuen Laborequipment bei 175°C Scheibentemperatur verifiziert.

Mit einer Hochstrom- Hochtemperatur Treiberelektronik konnte der Betrieb bei Umgebungstemperaturen von ca. 125 °C Umgebungstemperatur und 110 °C Kühlmitteltemperatur nachgewiesen werden. Somit ist 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 des zusätzlichen Kühlkreislaufs ist das System auch wirtschaftlich interessant. Das Potenzial der Leistungsmodule kann damit besser genutzt werden

Allgemein: Das Projektziel eines kostengünstigen und zugleich zuverlässigen Hybridantriebs ist erreicht worden. Der Betrieb der Leistungselektronik unter Hochtemperatur mit hohen Kühlmitteltemperaturen des Verbrennungsmotorkühlkreis wurde nachgewiesen.

4 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-Vordr. 3831/11.05** verwendet.

5 Erfolgskontrollbericht

Dem Schlussbericht wird zusätzlich ein kurzgefasster Erfolgskontrollbericht beigefügt der nicht veröffentlicht wird.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart
3a. Titel des Berichts Entwicklung einer Aufbau- und Verbindungstechnik für die Integration der Leistungselektronik und den Einsatz bei hohen Temperaturen; Entwicklungsstudie zur Hochtemperaturqualifikation von Bare Die (32 bit) Microcontrollern	
3b. Titel der Publikation	
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Thoben, Markus; Guth, Karsten; Hong, Tao; Mainka, Krzysztof; Ossimitz, Peter; Lohmann, Maik	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2009
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))	6. Veröffentlichungsdatum 25.06.2010
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Infineon Technologies AG Standort Warstein Max Planck Str. 5 59581 Warstein	7. Form der Publikation Bericht
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium Wirtschaft und Technologie (BMWi) 53107 Bonn	9. Ber.Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 19U6007C
	11a. Seitenzahl Bericht 45
	11b. Seitenzahl Publikation
	12. Literaturangaben
	14. Tabellen 3
	15. Abbildungen 49
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Das Vorhaben hat die Darstellung einer zuverlässigen und kompakten Leistungselektronik für ein Hybridfahrzeug zum Ziel. Die Arbeiten der Infineon Technologies konzentrierten sich auf die Entwicklung einer zuverlässigen, hochtemperaturfähigen Leistungselektronik bis zu 200 °C Betriebstemperatur. Die Technologien wurden in Leistungsmodule integriert, mit denen am Prüfstand unter Motorbetrieb der prinzipielle Nachweis der Hochtemperaturtauglichkeit erbracht wurde. Die Verbesserung der Lastwechselfestigkeit konnte mit Lebensdauertests nachgewiesen werden. Eine Chip-Kontaktierungstechnik für deutlich erhöhte Stromdichten wurde in ein Leistungsmodul integriert. Die Hochstromeignung wurde geprüft, wobei gewährleistet ist, dass die Schalteigenschaften des Moduls nicht negativ beeinflusst werden. Aufgrund des verwendeten Epoxidharz basierten Isolationsmaterialien ist eine dauerhafte Betriebstemperatur von 200°C noch nicht erreichbar. Modulaufbauten mit SiC JFET und SiC Dioden wurden realisiert. Messungen an den Modulen zeigen die Vorteile dieser Bauelemente für erhöhte Schaltfrequenzen. Die Entwicklungsstudie zur Hochtemperaturqualifikation von Bare Die (32 bit) Microcontrollern zeigt, dass die Microcontroller bis zu Temperaturen von 180°C untersucht werden können. Teilfunktionalitäten des Chipdesign mit erweiterter Tricorearchitektur wurden mit dem neuen Paddesign am neuen Laborequipment bei 175°C Scheibentemperatur verifiziert. Es wurde ein Hochstrom- Hochtemperatur Treiberelektronik entwickelt, mit der der Betrieb bei Umgebungstemperaturen von ca. 125 °C und 110 °C Kühlmitteltemperatur nachgewiesen wurde. Somit ist der Betrieb der Leistungselektronik unter Temperaturbedingungen wie am Verbrennungsmotorkühlkreislauf und integriert am Getriebe möglich.	
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 Development auf Mounting and Packaging Technology for Integration of Power Electronics and operation at high temperature, development study of high temperature qualification of (32 bit) microcontroller		
3b. Title of Publication		
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Thoben, Markus; Guth, Karsten; Hong, Tao; Mainka, Krzysztof; Ossimitz, Peter; Lohmann, Maik		5. End of Project 31.12.2009
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s))		6. Publication Date 25.06.2010
		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. 19U6007C
		11a. No. of Pages Report 45
		11b. No. of Pages Publication
		12. No. of References
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 53107 Bonn		14. No. of Tables 3
		15. No. of Figures 49
16. Supplementary Notes		
17. Presented at (Title, Place, Date)		
18. Abstract The target of the project is a reliable and compact power electronics system for a hybrid electrical vehicle (HEV). Work packages of Infineon Technologies are focussing the development of reliable, high temperature power electronics for operation temperatures up to 200 °C. Technologies have been integrated into power modules, which are operated on a motor test station under high temperature ambient and coolant conditions. The measurement result confirmed the high temperature operation capability. Power Cycling tests show the improvement of cycling capability, which is required for increased coolant- and operation temperatures. A large area topside chip contact technology for increased current density was integrated into a power module. The high current capability was shown. The switching behaviour is comparable to a standard power module. Due to the temperature limitation of the used epoxy based isolation material a durable operation at 200°C is not achievable yet. Power modules with SiC JFET und SiC Dioden have been assembled. Measurements with these modules show the advantages of these devices regarding higher switching frequencies. In a development study on high temperature qualification for bare die (32 bit) microcontroller test equipment have been improved to measure the devices on wafer level with temperatures up to 180°C. Partial function of a chipdesign with enhanced tricone architecture, a new pad design and new laboratory equipment have been verified at 175°C wafer temperature. A high current / high temperature driver electronics have been developed. The driver and power electronics was operated at ambient temperature of approx. 125°C and coolant temperature of 110°C. The measurement results show the possibility to operate Power Electronics with the engine coolant loop integrated to the transmission.		
19. Keywords Power electronics, lifetime, reliability, IGBT, Diode, Electric vehicle, Hybrid electric vehicle		
20. Publisher		21. Price