

# Ultrakompaktes Leistungs-Modul höchster Zuverlässigkeit

## UltiMo

### Abschlussbericht

zum Teilvorhaben  
Fahrzeuggerechte Systemintegration und  
Betriebsverhalten an Traktions-E-Maschinen

der

# VOLKSWAGEN

AKTIENGESELLSCHAFT

Zuwendungsempfänger: Volkswagen AG	Förderkennzeichen: 16N10902
<b>Vorhabenbezeichnung:</b>	Ultrakompaktes Leistungs-Modul höchster Zuverlässigkeit (UltiMo)
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b>	01.07.2010 bis 30.06.2013
<b>Berichtszeitraum:</b>	01.07.2010 bis 30.06.2013
<b>Projektleiter:</b>	Dr. Christian Mertens Volkswagen AG K-EFAS Brieffach 1778 38436 Wolfsburg

# 1 Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>INHALTSVERZEICHNIS</b> .....	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>PROJEKTRAHMEN</b> .....	<b>4</b>
3.1	AUFGABENSTELLUNG UND PROJEKTZIELE.....	4
3.1.1	<i>Aufgabenstellung</i> .....	4
3.1.2	<i>Technische Lösungsansätze</i> .....	4
3.1.3	<i>Technische Ziele des Projekts im Detail</i> .....	5
3.2	VORAUSSETZUNGEN FÜR DAS VORHABEN .....	6
3.3	WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND ZU BEGINN DES VORHABENS .....	7
3.3.1	<i>Aufbautechnik und Konzepte</i> .....	7
3.3.2	<i>Substrat</i> .....	8
3.3.3	<i>Halbleiter</i> .....	8
3.3.4	<i>Fügen der Halbleiterbauelemente</i> .....	8
3.3.5	<i>Robustness Validation- Forschungsstand</i> .....	9
3.3.6	<i>Elektrische Fahrzeugantriebe</i> .....	9
<b>4</b>	<b>PROJEKTERGEBNISSE</b> .....	<b>9</b>
4.1	ERGEBNISSE DES TEILPROJEKTES UND ZIELERREICHUNG.....	9
4.1.1	<i>Anforderungen und Randbedingungen</i> .....	9
4.1.2	<i>Bewertung von Zuverlässigkeit</i> .....	10
4.1.3	<i>Vorbereitungen zur Systemcharakterisierung</i> .....	12
4.1.3.1	<i>Berechnung und Auslegung der Elektromaschine</i> .....	12
4.1.3.2	<i>Konstruktion und Aufbau</i> .....	14
4.1.3.3	<i>Ansteuerung</i> .....	15
4.1.4	<i>Erreichte Fortschritte im doppelseitigen Modulaufbau</i> .....	16
4.1.5	<i>Bewertung der technologischen Möglichkeiten für doppelseitige Module im elektrischen Fahrzeugantrieb</i> .....	23
4.2	NUTZEN UND VERWERTBARKEIT .....	24
4.2.1	<i>Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende</i> .....	24
4.2.2	<i>Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten nach Projektende</i> .....	24
4.3	FORTSCHRITTE AUF DEM GEBIET DES VORHABENS BEI ANDEREN STELLEN.....	24
4.4	VERÖFFENTLICHUNG DER ERGEBNISSE .....	25
<b>5</b>	<b>KURZFASSUNG DES SCHLUSSBERICHTES</b> .....	<b>25</b>
<b>6</b>	<b>ERFOLGSKONTROLLBERICHT</b> .....	<b>25</b>

## 2 Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 3-1: VARIANTE A: NEUARTIGES MODULKONZEPT, DICHTUNG AM SUBSTRAT.....	5
ABBILDUNG 3-2: VARIANTE B: NEUARTIGES MODULKONZEPT, INTEGRATION IM KÜHLER UND EINHAUSUNG .....	5
ABBILDUNG 3-3: EINSEITIGE INDIREKTE KÜHLUNG, GESCHRAUBTE AUSFÜHRUNG.....	7
ABBILDUNG 4-1: MÖGLICHE VORGEHENSWEISEN ZUR ZUVERLÄSSIGKEITSBEWERTUNG.....	11
ABBILDUNG 4-2: IDENTIFIZIERTES TESTVERFAHREN FÜR ZUVERLÄSSIGKEITSUNTERSUCHUNGEN .....	11
ABBILDUNG 4-3: FLUSSDICHTEVERTEILUNG UND ÖRTLICHER VERLAUF DER LUFTSPALTINDUKTION OHNE BESTROMUNG .....	13
ABBILDUNG 4-4: DREHMOMENT IN ABHÄNGIGKEIT VOM STROMBELAG BEI POLRADWINKEL $\vartheta = 90^\circ$ EL. ....	13
ABBILDUNG 4-5: ZEITLICHER DREHMOMENTVERLAUF .....	14
ABBILDUNG 4-6: E-MASCHINE: KONSTRUKTIONSSTAND .....	15
ABBILDUNG 4-7: SYSTEMÜBERSICHT DES RPT-SYSTEMS ZUM PRÜFSTANDBETRIEB DES ANTRIEBS.....	15
ABBILDUNG 4-8: KONZEPT DER FELDORIENTIERTEN REGELUNG.....	16
ABBILDUNG 4-9: VERGLEICH-CHIP (LINKS) UND PROJEKT-CHIP (RECHTS) (BILDER: ISIT) .....	17
ABBILDUNG 4-10: (A) GRUNDSÄTZLICHER CHIPKONTAKTIERUNG IM MODULAUFBAU MIT DARSTELLUNG DER SCHICHTFOLGE UND STUFENSTRUKTUR, (B) AUFBAUVARIANTEN MIT UNTERSCHIEDLICHEN STUFENDESIGNS UND PASSIVIERUNGEN (BILDER: ISIT) .	17
ABBILDUNG 4-11: AUFBAU KERAMIK-SUBSTRAT MIT RÜCKSEITIG VERKLEBTER ALUMINIUMSCHICHT (BILD: CURAMIK).....	18
ABBILDUNG 4-12: HYSTERESEVERHALTEN DER DURCHBIEGUNG IM TEMPERATURWECHSEL BEI VERSCHIEDENEN KERAMIKSUBSTRATEN (DARSTELLUNG: CURAMIK) .....	19
ABBILDUNG 4-13: VARIANTE 1. MODULAUFBAU SCHEMATISCH (DARSTELLUNG: DANFOSS) .....	20
ABBILDUNG 4-14: VARIANTE 1. UNTERES UND OBERES SUBSTRAT, VORBESTÜCKT UND VORBEREITET FÜR DIE MODULVERBINDUNG (BILDER: DANFOSS) .....	20
ABBILDUNG 4-15: VARIANTE 1. IM MODULAUFBAU WERDEN IM BEREICH DER HALBLEITER GROßE ZUGSPANNUNGEN ERZEUGT (DARSTELLUNG: DANFOSS).....	20
ABBILDUNG 4-16: VARIANTE 2. (A) MODULAUFBAU FÜR VORVERSUCHE: KLEINES LAYOUT, (B) ZIEL-MODULAUFBAU (DARSTELLUNGEN: IISB).....	21
ABBILDUNG 4-17: VARIANTE 2. (A) SANDWICHAUFBAU, KLEINES LAYOUT, (B) GEÖFFNETER ZIELSANDWICH, AUFBAUVERSUCH, (C) MODULAUFBAU MIT LASERGESCHWEIßTER ALUMINIUM-TASCHE, KLEINES LAYOUT (BILDER: IISB) .....	21
ABBILDUNG 4-18: BERECHNUNG DES WÄRMEWIDERSTANDES VERSCHIEDENER MODULKONFIGURATIONEN (DARSTELLUNG IISB) ...	22
ABBILDUNG 4-19: ENDSTUFENAUFBAU MIT DOPPELSEITIGEN LEISTUNGSMODULEN NACH VARIANTE 1. VON OBEN NACH UNTEN: OBERSEITIGER WASSERKÜHLER, LEISTUNGSMODULE IM BONDRAHMEN AUF UNTERSEITIGEM KÜHLER, TREIBERBOARD (BILD: CONTINENTAL) .....	23

## 3 Projektraumen

### 3.1 Aufgabenstellung und Projektziele

Generell ist bei allen Anwendungen aus dem Bereich Leistungselektronik ein Trend zu immer höheren Leistungsdichten, steigenden thermischen Belastungen und schärfer werdenden Zuverlässigkeitsanforderungen festzustellen. Diese Entwicklung führt die heutigen Konstruktionsprinzipien und Aufbautechniken für Leistungsmodul an ihre Grenzen. Es ist daher ein völlig neues Modulkonzept erforderlich, das es ermöglicht, Leistungsmodul deutlich kompakter und flacher als heute üblich zu realisieren, welches die Anzahl verschiedener Materialien im Stapelverbund minimiert und eine hocheffektive beidseitige Kühlung erlaubt. Bei alledem muss eine einfache Integrierbarkeit in die Zielanwendung möglich sein und die Sicherstellung einer ununterbrochenen Kühlung gewährleistet sein. Die Hauptziele ohne Einschränkungen in der Lebensdauer sind:

- Halbieren der Chipfläche und somit der Chipkosten
- Reduzierung des Leistungsmodul-Volumens
- Halbierung der Schaltverluste und somit höhere Effizienz
- Drastische Erhöhung der Leistungsdichte auf Systemebene

#### 3.1.1 Aufgabenstellung

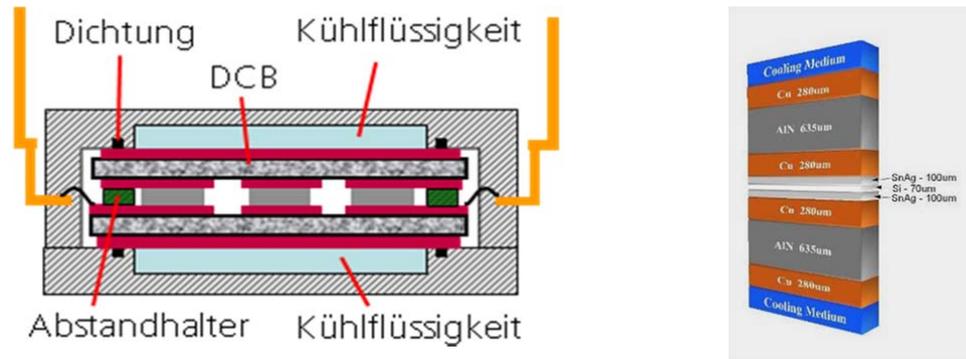
Bestehende Leistungsmodul für den Einsatz in Hybridfahrzeugen sind nach wie vor in einer Aufbautechnik realisiert, welche für die Industrie entwickelt wurde, wo Bauraum und Gewicht eine untergeordnete Rolle spielen: Auf einer auf einem Keramiksubstrat oberseitig aufgebracht und strukturierten Kupferschicht sind die Silizium-Halbleiter aufgelötet und elektrisch mit Drahtbonds mit der Kupferschicht verbunden. Auf der Unterseite befindet sich eine Grundplatte. Problematisch bei solchen Moduln ist der unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizient der verwendeten Materialien, der bei hohen und vielen Lastwechselzyklen zur Ermüdung von Löt-schichten und Ablösung von Bondverbindungen führen kann. Moderne Leistungshalbleiter können bei hohen Temperaturen betrieben werden. Aufgrund von unzureichender Aufbau-, Verbindungs- und Gehäuse-technik kann der Vorteil aber nicht ausgenutzt werden. Die Leistungselektronik steht vor der paradoxen Situation, dass die Eigenschaften vieler Leistungshalbleiterbauelemente nicht mehr durch das Silizium sondern durch die Aufbau- und Gehäuse-technik limitiert werden. Mangelnder Bauraum und zu großes Volumen dieser Leistungselektronik ist jedoch ebenso wie die derzeit noch hohen Kosten ein Haupthindernis für die Einführung von mechatronisch integrierten Lösungen.

Die Qualifizierung komplexer mechatronischer Systeme ist ein weiteres grundlegendes Problem, da hier die meisten klassischen, auf statistischen Methoden und beschleunigten Tests beruhenden Qualifizierungsverfahren scheitern. Ein üblicher Temperaturschocktest beispielsweise würde an Systemen mit einer Masse von einigen zehn bis hundert Kilogramm - wie elektrische Antriebseinheiten mit integrierter Leistungselektronik, Energiespeicher o.ä. - aufgrund der hohen thermischen Zeitkonstanten Jahre dauern, und die für statistisch relevante Aussagen erforderlichen Stichprobengrößen würden untragbare Kosten für Testmuster und Prüfstand-technik verursachen. Trotz dieses Aufwands wären Fehlerraten im ppm-Bereich auf diese Weise praktisch nicht nachweisbar, und das Ziel „Null-Defekt“ wäre verwehrt.

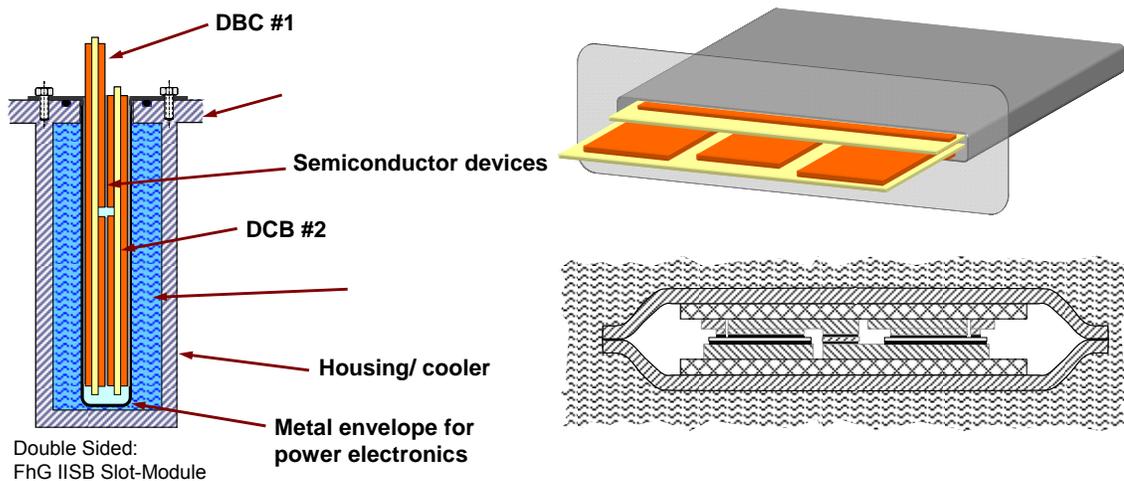
#### 3.1.2 Technische Lösungsansätze

Primäres Ziel des vorliegenden Verbund-Projekts ist die Erforschung eines neuartigen Leistungsmoduls, das die Schwächen heutiger Lösungen zu beseitigen verspricht. Die Umsetzung verlangte Innovationen auf allen Ebenen der Wertschöpfungskette eines Leistungsmoduls. Das Prinzip eines neuartigen flüssigkeitsgekühlten Leistungsmoduls

basiert auf einem „sandwichartigen“ Aufbau zweier Substrate mit den dazwischen liegenden beidseitig gefügten Leistungshalbleitern. Der Substrat-Stapel wird in ein sehr effektives beidseitiges Kühlungssystem integriert. Dabei können mehrere Substrat-Stapel in einen Kühlkreislauf montiert werden. In diesem Vorhaben wurden zwei Varianten zu solchen Sandwich-Modulen verfolgt (s. Abbildung 3-1 und Abbildung 3-2).



**Abbildung 3-1: Variante A: Neuartiges Modulkonzept, Dichtung am Substrat**



**Abbildung 3-2: Variante B: Neuartiges Modulkonzept, Integration im Kühler und Einhausung**

Gegenüber bekannten Modulkonzepten sollten sowohl der Montageaufwand auf Systemebene als auch der modulinterne thermo-mechanische Stress minimiert werden können. Letzteres ist eine unabdingbare Voraussetzung für höchste Zuverlässigkeit und Lebensdauer.

### 3.1.3 Technische Ziele des Projekts im Detail

Dieses Projekt zielt auf die Realisierung eines völlig neuartigen Leistungsmoduls für flüssigkeitsgekühlte Systeme mit beidseitiger Kühlung der Leistungshalbleiter. Als explizite Ziele des Projekts sind folgende zu nennen:

- Reduzierung des thermischen Widerstands gegenüber herkömmlichen Modulen um 50%.
- Reduzierung des parasitären Zuleitungswiderstands durch kurze Wege und vollflächige Kontaktierung.
- Halbierung der Schaltverluste durch halbe parasitäre Induktivität im Kommutierungskreis. Dies wird durch die doppelseitige elektrische Kontaktierung erreicht. Die Schaltgeschwindigkeiten können verdoppelt werden was zu einer Reduzierung der Schaltverluste führt. Dies schlägt sich in einer höheren Effizienz nieder.
- Erhöhung der Temperaturwechselbeständigkeit durch konzeptbedingten minimalen thermomechanischen Stress
- Niedrigerer Preis durch deutlich bessere Kühlung und somit besserer Ausnutzung der Halbleiterfläche macht das System wirtschaftlich interessant. Dies wirkt sich positiv in der Energie- und Kostenbilanz der Herstellung aus.
- Halbierung des Bauraums für die Leistungshalbleiteranordnung gegenüber herkömmlichen Lösungen durch Verzicht auf Grundplatte und Bonddrähte, die Leistungsdichte wird somit um 50% gesteigert
- Ultradünne Leistungsschalter (ca. 50µm) mit Laser-aktivierter Feldstoppschicht und angepasstem Layout (Gate-Anschluss im Randbereich: Kanten- oder Eck-Gate) für die neue Modultechnik und dadurch Reduzierung der Sättigungsspannung im Vergleich zu handelsüblichen IGBTs um ca. 10 bis 20% und Reduzierung der Abschaltzeit auf 50ns
- Sinterverfahren und Sinterpasten für beidseitige Chipkontaktierung
- Transient Liquid Phase Bonding (TLPB) für doppelseitigen Aufbau
- Eine Modul-Lebensdauer mit den Anforderungen an Automobilelektronik.
- Aufbau eines Demonstrators aus dem Feld der Zielanwendung
- Verfolgung des Ansatzes der „Robustness Validation“, um aus dem Zuverlässigkeitsspektrum eine Lebensdauer vorherzusagen.

Die Realisierbarkeit im System und der Nachweis der Systemvorteile sollte seitens Volkswagen in einem Prüfstandsbetrieb mit einer angepassten fahrzeuggeeigneten Antriebsmaschine nachgewiesen werden.

### **3.2 Voraussetzungen für das Vorhaben**

Das im UltiMo-Projekt im Rahmen einer Laufzeit von 3 Jahren aktive Konsortium bildete die gesamte Lieferkette für eine Leistungselektronik in der Automobilanwendung ab:

*Fahrzeughersteller* – Volkswagen AG, Daimler AG (während der Laufzeit ausgeschieden)

*Komponentenzulieferer* – Continental Automotive

*Modulhersteller* – Danfoss Silicon Power GmbH mit

*Materiallieferanten* – W.C. Heraeus GmbH, Curamik GmbH, CoorsTek (ANCeram GmbH)

*Prozesstechnologie* – Bayerisches Laserzentrum GmbH

Forschungseinrichtungen für

*Chipherstellung* – Fraunhofer ISIT Itzehoe

*Modulaufbau* – Fraunhofer IISB Erlangen, Fraunhofer IZM Berlin

Volkswagen ist seit 1970 in die Forschung, Entwicklung und Produktion von Fahrzeugen mit elektrischen und hybriden Antriebssystemen involviert, so z.B. dem Golf CitySTROMer, ein rein elektrisches Fahrzeug, das 1995 im Verkauf war, und dem Golf-Hybrid mit einer parallelen Antriebskonfiguration, der für den Flottentest in Zürich und Hannover aufgebaut wurde.

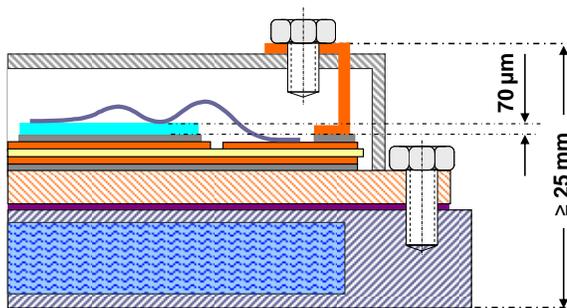
Im Oktober 2001 präsentierte VW im Rahmen der EVS-18 in Berlin seinen neuesten Prototyp EV, den Bora Electric, ausgestattet mit Li-Ion-Batterien und den Bora HyMotion mit Brennstoffelement. Im Jahr 2004 wurde das Projekt SUVA abgeschlossen, in dem VW einen Bora mit Parallel-Hybridantrieb realisierte und einer Bewertung im Vergleich mit den

aufgebauten Fahrzeugen der Projektpartner unterzog. Im Jahr 2005 wurde der Vollhybrid „EcoPower“ mit DSG-Getriebe präsentiert, im Juni 2008 folgte im Rahmen des Projektstarts vom „Flottenversuch Elektromobilität“ die Vorstellung des Plug-In-Hybrids „TwinDrive“. Weitere Projekte waren und sind "Vorausschauendes Energiemanagement für innovative PKW Hybridantriebe" (BMBF), „Flottenversuch Elektromobilität“ (BMU), „InGA“ (BMW) und HOPE (EU).

### 3.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Leistungshalbleiter benötigen wegen der im Betrieb auftretenden Verlustleistung eine sehr effektive Kühlung. Heutige aufbautechnische Lösungen bieten – von wenigen Ausnahmen abgesehen – nur eine einseitige Kühlung und nutzen damit die Leistungsfähigkeit der Leistungshalbleiterchips nicht voll aus. Außerdem erfordern die bislang bekannten Aufbautechniken komplizierte Schichtstrukturen aus verschiedensten Materialien, was aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten zu thermomechanischen Spannungen und als Folge davon zu Lebensdauerproblemen führt.

#### 3.3.1 Aufbautechnik und Konzepte



**Abbildung 3-3: Einseitige indirekte Kühlung, geschraubte Ausführung**

Zu Projektbeginn stellte sich folgende Situation dar:

Im Bereich hoher Leistungen und zur Erzielung hoher Leistungsdichten wurden Leistungsmodule typisch auf Flüssigkeitskühler montiert. Die dazu bekannten Montagelösungen erforderten entweder platzaufwändige Befestigungs- oder Andruckvorrichtungen im Fall klassischer Modulkonstruktionen oder aufwändige Abdichtungen im Fall direkt

flüssigkeitsgekühlter Leistungsmodule. Im Ergebnis erreichten Leistungsmodule nach dem Stand der Technik vor Projektbeginn

nur ein sehr schlechtes Verhältnis zwischen dem verbauten Siliziumvolumen und dem Gesamtvolumen des Moduls. Ein einseitig flüssigkeitsgekühltes Modul beispielsweise besaß inklusive Kühler eine Höhe von rund 20mm (20.000µm). Bei einer Höhe der eigentlichen Leistungshalbleiter von weniger als 100µm waren damit nur 0,5% der Gesamthöhe (und des Volumens) des Moduls aktiv. Hinzu kam, dass bei den meisten bekannten Modulkonstruktionen die Kontaktierung von Chips und Schaltungsträger senkrecht zur Chipebene (z.B. Bonddrähte) erfolgte. Diese Konstruktion verbaute jedoch den Raum oberhalb der Chips und machte damit eine kostengünstige beidseitige Kühlung der Leistungshalbleiterchips unmöglich. Die doppelseitig gekühlten Ansätze waren nur beschränkt serientauglich und verfügten in der Regel über eine aufwändige und voluminöse Konstruktion.

In dieser Aufbauvariante wurde das Keramiksubstrat großflächig auf eine Grundplatte (typisch Kupfer) gelötet. Unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten (CTE) zwischen Drahtbond, Chip, Substratmaterial, Kühlkörper und Gehäuse führen hier zu thermomechanischen Spannungen und damit zu Ermüdungsausfällen in den Lotverbindungen und Dickdrahtkontakten. Dies limitierte den Einsatz der Leistungshalbleiter in thermisch anspruchsvollen Anwendungen. Aus diesem Grund wurden alternative Möglichkeiten erforscht wie z.B. andere Materialien (meist teuer) die die CTE-Differenz reduzierten (z. B. AlSiC-Kühlkörper statt Cu oder AlN-DCB statt Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-DCB), und/ oder andere Technologien, die die Ermüdungsfestigkeit steigerten (z.B. Sintern statt Löten).

Handelsübliche lötlverbindungsfreie Leistungsmodul wurden auf der Chipoberseite nach wie vor mittels Dickdrahtbondtechnik kontaktiert und damit die Lebensdauer begrenzt. Weitere Aufbautechniken von Leistungsmodulen waren auf Leadframe (meist mit dickem Kupfer) gefügte Halbleiterchips mit oberseitigen Drahtbonds. Diese wurden anschließend, fast ausschließlich in Asien, durch Transfermolding verkapselt und als sog. diskrete Bauelemente weiterverarbeitet.

Module nach dem Stand der Technik mit Bonddrähten und der damit verbundene zweidimensionalen Aufbautechnik spannen eine nicht vernachlässigbare stromumflossene Fläche auf. Diese ist direkt proportional zur parasitären Kommutierungsinduktivität. Ein weiteres Problem der Bonddrähte ist die ungünstige Stromdichteverteilung in der Chipmetallisierung sowie der parasitäre Zuleitungswiderstand. Bei Niederspannungs-MOSFETs begrenzte dies den Nennstrom.

In Bezug auf die Modulkonzepte wurden vor Projektbeginn eine Reihe von Konzepten für eine drahtbondfreie Aufbautechnik häufig mit doppelseitiger Kühlung publiziert (Alstom, Toyota), von denen jedoch, sei es wegen übermäßigem mechanischen Aufwand auf der Systemseite oder Zuverlässigkeitsproblemen, nur wenige in Nischenanwendungen wie der Bahn- oder Militärtechnik Anwendungsreife erlangten. Des Weiteren boten diese keinen nennenswerten Vorteil im thermischen Widerstand und damit keine Reduktion der Chipfläche welches den Kostentreiber darstellte.

Diese zu Projektbeginn vorgefundene Situation hat sich auch während der Projektlaufzeit nicht wesentlich verändert. Gleiches gilt für die im Folgenden aufgeführten Teiltechnologien.

### **3.3.2 Substrat**

Stand der Technik waren keramische Substrate, aufgebaut mittels DCB oder AMB-Technologie (Direct Copper Bonding bzw. Active Metal Brazing), welche einen angepassten thermischen Ausdehnungskoeffizienten bei gleichzeitig niedrigem thermischen Widerstand und hervorragenden Isolationseigenschaften lieferten. Üblicherweise bestanden diese Substrate aus einer isolierenden Keramik und einem guten elektrischen Leiter. Sie überbrückten einen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von ca. 3 ppm/ K auf der Halbleiterseite zu dem von ca. 17 ppm / K auf der Grundplattenseite. Hierdurch wurde bei Temperaturwechseln thermomechanischer Stress innerhalb des Substrats und in den Verbindungsflächen erzeugt, welcher zum Versagen des Aufbaus führen konnte.

### **3.3.3 Halbleiter**

Zu Projektbeginn gab es keine frei erhältlichen Leistungshalbleiter mit 600V Spannungsfestigkeit für einen oberseitigen flächigen Kontakt. Einige Hersteller (z.B. ABB) hatten eine teilweise lötfähige Metallisierung im Angebot, welche sich aber nur auf den Emitter-Kontakt beschränkte. Sinterfähige Metallisierungen gab es keine. Darüber hinaus befand sich der Gate-Anschluss oftmals in der Mitte des Chips, was zu Problemen bei der doppelseitigen AVT führte. Des Weiteren verringerte der Isolationsgraben des Gate-Anschluss die zur Verfügung stehende Kühlfläche, was sich negativ auf den thermischen Widerstand auswirkte.

Derzeitige Leistungs-IGBTs in der 600V Klasse ließen sich mit einer Dicke von ca. 70µm herstellen. Eine weitere Dünnung des Siliziums war unter Beibehaltung der derzeitigen Prozessierung (Aktivierung der Feldstoppschicht bei hohen Temperaturen im Ofen) aufgrund der schlechten Handelbarkeit der dünnen „Silizium-Folien“ nicht möglich. Dünnere Halbleiter haben verbesserte elektrische Eigenschaften zur Folge, wie ein verringerter Durchlasswiderstand und höhere Schaltgeschwindigkeiten.

### **3.3.4 Fügen der Halbleiterbauelemente**

Das Weichlöten ist eines der ältesten und gebräuchlichsten Fügeverfahren für Metalle. In Leistungsmodulen wird dieses Verfahren zur Verbindung der Halbleiter auf das Substrat bzw. des Substrats mit der Grundplatte verwendet. Dadurch wird einerseits ein guter thermischer Kontakt hergestellt sowie die mechanische Befestigung bewerkstelligt.

Ein Nachteil der Lötverbindung ist der relativ niedrige Schmelzpunkt der verfügbaren Lote. Dies äußert sich in einer kurzen Lebensdauer der Verbindungsschicht bei Betriebstemperaturen über 150°C.

Das Silbersintern bei hohem Prozessdruck und das „Transient-liquid-phase-Bonding“ (TLPB) hatten keine bekannte Leistungselektronik-Anwendung im Automobilbereich und waren diesbezüglich auf Forschungsniveau einzuordnen.

### **3.3.5 Robustness Validation- Forschungsstand**

Die Robustheit einer Komponente beschreibt die Fähigkeit, innerhalb ihrer spezifischen Applikation korrekt und ohne Versagen auch unter Berücksichtigung wechselnder Einsatzbedingungen zu funktionieren [6, 7]. Robustness Validation („RV“) ist eine Methode mit Hilfe derer die Robustheit einer Komponente in Bezug auf ein bestimmtes, die Einsatzbedingungen definierendes Missionsprofil demonstriert werden kann.

Robustness Validation besteht aus drei Hauptpunkten:

- Kenntnis über die Einsatzbedingungen und deren Belastungen („Mission Profile“)
- Kenntnis der relevanten Fehlermechanismen für das spezifische Bauteil
- Kenntnis der beschleunigten Alterungsmodelle

RV untersucht spezifische Versagensmechanismen für bestimmte, wohl definierte Applikationen mit Hilfe definierter Alterungsmodelle. Zu Projektbeginn existierten RV-Handbücher und –datenbanken sowohl für Halbleiterkomponenten als auch für elektrische Module (Steuergeräte) im Kfz-Bereich [8].

Bzgl. der Fehlermechanismen fehlten RV-Herangehensweise und -wissen für doppelseitig gekühlte Leistungsmodule vollständig.

### **3.3.6 Elektrische Fahrzeugantriebe**

Leistungselektronik für elektrische Fahrtriebe ist wesentlich von den industriell verfügbaren Konzepten und Aufbautechniken geprägt, so dass die oben beschriebenen Technologiestände auch für die Leistungselektronik-Komponenten im Auto den Stand der Technik zu Projektbeginn beschreiben. Wegen der Bauraum- und Kostendrucks in waren die in diesem Vorhaben verfolgten technischen Ziele besonders relevant für Fahrzeuganwendungen.

## **4 Projektergebnisse**

### **4.1 Ergebnisse des Teilprojektes und Zielerreichung**

#### **4.1.1 Anforderungen und Randbedingungen**

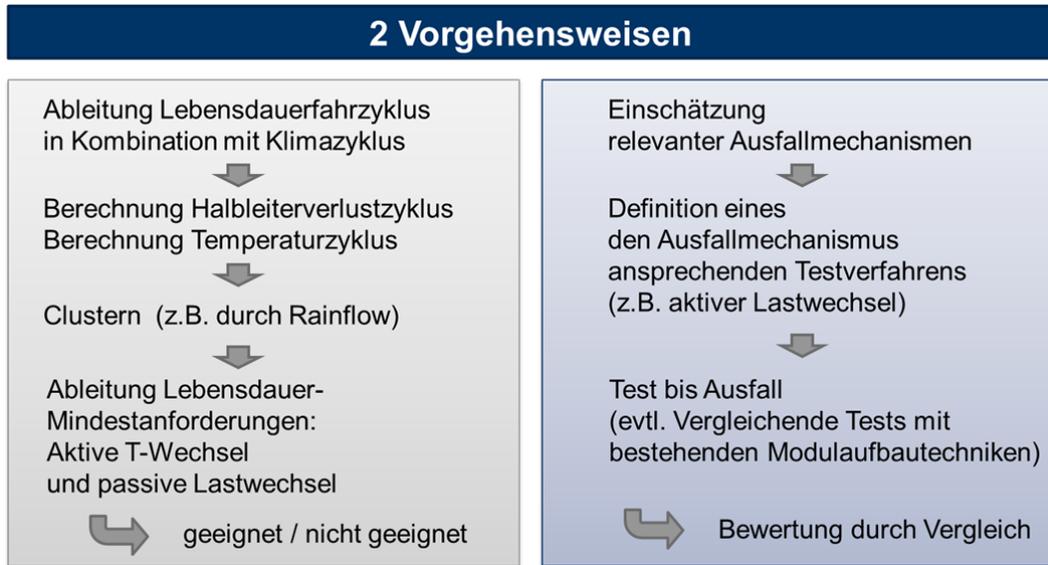
In der ersten Projektphase sind in Zusammenarbeit mit den Partnern Continental und Daimler repräsentative Anforderungen an eine Leistungselektronik erarbeitet und definiert worden. Dies geschah im Hinblick auf einen elektrischen Antrieb, wie er zu diesem Zeitpunkt für zukünftige Zielfahrzeugkonzepte benötigt würde. Dabei wurden insbesondere solche Fahrzeugkonzepte berücksichtigt, die besonders von den Bauraum- und Performancezielen des Vorhabens profitieren würden. Die wesentlichen Aussagen sind in der Tabelle 1 wiedergegeben. Auf Basis dieser Systemanforderungen wurde durch die Projektpartner eine Leistungsmodulauslegung durchgeführt, die auf der Zielvorgabe „halbe Chipfläche im Vergleich zu Standard-Leistungselektroniken“ beruhte. Chipauswahl, -konfiguration und – layout wurden entsprechend der Zielvorgaben durchgeführt und ausgelegt.

**Tabelle 1: Grundlegende Anforderungen an die Leistungselektronik**

<b>Motor</b>	3-Phasen Synchronmaschine
Leistung (mechanisch)	90kW Spitze (30s), 50kW Dauer
Moment	330Nm Spitze (30s, Kurbelwelle), 180Nm Dauer
Maximaldrehzahl	12000/min.
ZK-Spannung	260 - 360V (vorh. Batterie)(Ziel 420V --> Stromreduzierung?)
motorisch	260 - 310V
generatorisch	310 - 360V
Schaltfrequenz	16 kHz, Absenkung bei niedrigen Drehzahlen / hohen Momenten
Ströme, motorisch	450Aeff im gesamten motorischen Spannungsbereich
Ströme, generatorisch	300Aeff im gesamten generatorischen Spannungsbereich
<b>Umrichter</b>	
Kühltemperaturen	-40/+85°C, ergänzend Aussage über höhere Temp. (105°C)
Kühlmitteldurchfluß	5-8 l/min.
Druckabfall	Optimierung auf geringen Druckabfall über gesamten Temperaturbereich
Umgebungstemperatur (Luft)	125°C, 140°C Nachheizphase
Anbauort (Wunsch)	Motoranbau
Volumen	< 10 Liter (Vergleich Leistungsvolumen EPF2)
<b>Ansteuerung/Schnittstellen</b>	angepasste Treiberplatine mit RPT-System ansteuerbar
Stromsensorik	externe Stromsensorik
Zwischenkreis	Spannungsripple: 8V peak to peak
ZK-Kondensator	t.b.d., angepasst an Endstufen

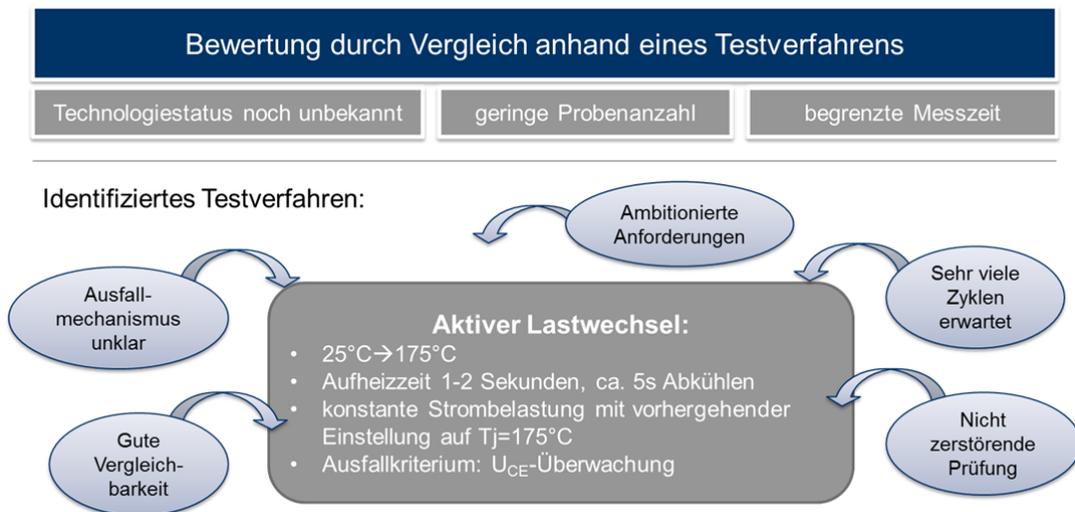
#### 4.1.2 Bewertung von Zuverlässigkeit

Hinsichtlich der vorgesehenen Zuverlässigkeitsbewertung wurden zwei mögliche Vorgehensweisen identifiziert. Diese sind in Abbildung 4-1 dargestellt.



**Abbildung 4-1: Mögliche Vorgehensweisen zur Zuverlässigkeitsbewertung**

Aufgrund des Neuheitsgrades der angewandten Modulaufbautechnologien war eine Berücksichtigung möglicher bekannter Ausfallszenarien nicht möglich. Vielmehr musste eine Vorgehensweise gefunden werden, die vermutlich Fehlermechanismen in allen Modulebenen und durch alle Betriebsmodi hindurch ansprechen würde. Zudem sollte wegen der Allgemeingültigkeit der Untersuchungen kein explizites Fahrzeug der Anwendung zugrunde liegen. Daher wurde die 2. Vorgehensweise, die an etwaig relevanten Ausfallmechanismen und nicht am Fahrzeugzyklus orientiert ist, als sinnvolle Vorgehensweise erachtet. Hier kann die Bewertung durch Vergleich mit dem bekannten Zuverlässigkeitsverhalten von Serienmodultechnologien erfolgen. Das letztendlich entschiedene Testverfahren ist in Abbildung 4-2 dargestellt. Das Verfahren lässt allerdings wegen der hohen Lebensdauererwartung der eingesetzten Technologien grundsätzlich eine sehr hohe Zyklenzahl und damit verhältnismäßig lange Prüfzeiten erwarten. Wegen der Grenztemperaturen der Leistungshalbleiterchips ist aber keine weitere Beschleunigung durch Erweiterung des Temperaturbereichs mehr möglich.



**Abbildung 4-2: Identifiziertes Testverfahren für Zuverlässigkeitsuntersuchungen**

Zu einer Durchführung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen an doppelseitigen Modulprototypen ist es im Projektverlauf nicht mehr gekommen, da, wie weiter unten beschrieben, keine funktionsfähigen Module zu Prüfzwecken vorgelegt werden konnten.

### 4.1.3 Vorbereitungen zur Systemcharakterisierung

Als Vorbereitungen für die Prüfstandsversuche zur messtechnischen Bewertung der neuen Umrichtertechnologie in einer fahrzeugrelevanten Antriebsstrangstruktur wurde im Rahmen dieses Teilprojektes eine spezielle Elektromaschine ausgelegt und aufgebaut, die an Ihrer Eckdrehzahl das Zielmoment im Rahmen der Phasenstromvorgaben erreicht.

#### 4.1.3.1 Berechnung und Auslegung der Elektromaschine

##### Spezifikation und Bauraum

Die auszulegende dreiphasige permanentmagnetisch erregte Synchronmaschine (PMSM) sollte folgende Spezifikation erfüllen:

$$\begin{array}{ll} P_n = 50 \text{ kW} & P_{\max} = 90 \text{ kW} \\ M_n = 180 \text{ Nm} & M_{\max} = 330 \text{ Nm} \end{array}$$

Dabei waren folgende elektrische Eingangsgrößen gesetzt:

$$\begin{array}{l} I_{\text{eff,max,phase}} = 450 \text{ A} \\ U_n = 310 \text{ V} \\ U_{\min} = 260 \text{ V} \\ U_{\max} = 360 \text{ V} \end{array}$$

Als mechanische Randbedingungen lagen fahrzeugrelevant enge Bauraumvorgaben zugrunde.

##### Wahl einer PMSM

Aus der Spezifikation der PMSM (Permanentmagnet erregte Synchronmaschine) sowie den maximal möglichen Abmessungen ergab sich, dass die auszulegende PMSM über eine sehr hohe Drehmoment- und Leistungsdichte verfügen sollte. Damit verbunden war automatisch eine hohe Verlustleistungsdichte, deren Ursache primär in dem hohen Maximalmoment und somit in den Kupferverlusten lag.

Das Drehmoment (dauerhaft oder maximal) ist das Produkt von Statorstrom und magnetischer Flussverkettung in der PMSM. Daraus lässt sich ableiten, dass mit zunehmender magnetischer Flussverkettung der Statorstrom abnehmen kann, was schließlich zur Absenkung der Kupferverluste führt. Die Flussverkettung kann jedoch nicht beliebig hoch sein, denn deren Erhöhung führt proportional zur Erhöhung der Phasenspannung.

Die magnetische Flussverkettung resultiert aus dem magnetischen Fluss in der PMSM. Dieser ist höher, wenn sich die Permanentmagnete im Rotor näher am Stator befinden. Diese Konstellation bietet die Konstruktion des Rotors mit Oberflächenmagneten, wo die Permanentmagnete auf dem sog. Rotorrückschluss aus Elektroblech oder ferromagnetischem Stahl aufgeklebt sind. Der Fluss bzw. die Flussverkettung in der PMSM ist dabei voll zur Drehmomentbildung ausgenutzt.

Im weiteren Verlauf wurde deshalb die Variante der PMSM mit Oberflächenmagneten ausgelegt.

Darüber hinaus war die Art des Rotors in der PMSM festzulegen.

Mit einem Außenläuferrotor lassen sich beim gleichen Luftspaltradius und Strom theoretisch höhere Drehmomente realisieren als bei einer PMSM mit Innenläuferrotor. In Anbetracht der begrenzten Dimensionen der auszulegenden PMSM und folglich einer viel geringeren Kühlfläche beim Außenläufer zusammen mit der hohen abzuleitenden Verlustleistung wurde jedoch die PMSM Variante mit einem Innenläufer gewählt. Hier befand sich der Kühlkörper am Außenradius des Stators und war in der Lage, viel höhere Verlustleistung abzuleiten als die entsprechende Variante mit einem Außenläuferrotor.

Entsprechend diesen Vorgaben wurde nun die Detailauslegung der Maschine durchgeführt.

### FEM 2D statisch

Mit einer statischen 2D FEM Simulation wurden die Flussdichten im Querschnitt der Elektromaschine sowie das Drehmoment überprüft.

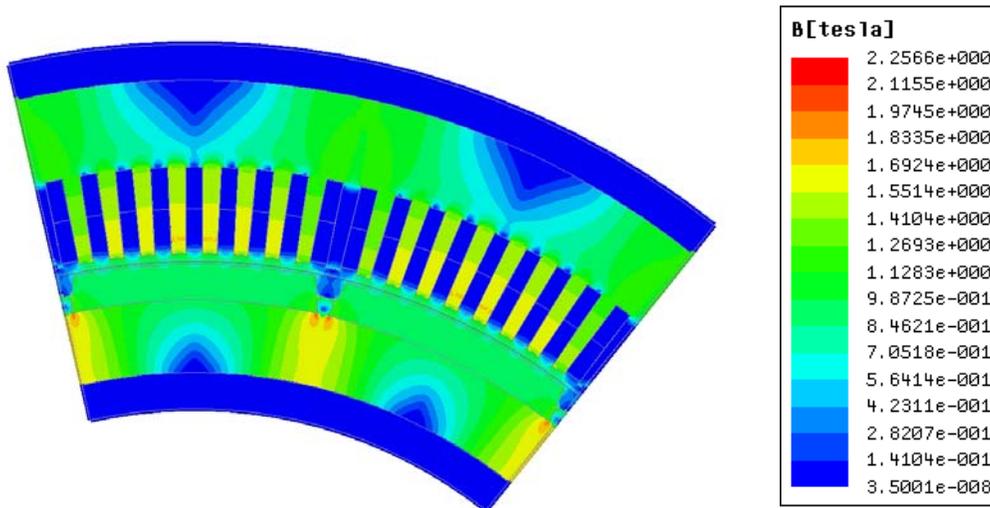


Abbildung 4-3: Flussdichteverteilung und örtlicher Verlauf der Luftspaltinduktion ohne Bestromung

Aus den Simulationsergebnissen in der Abbildung 4-3 geht hervor, dass die vorgegebenen Flussdichten eingehalten wurden und der angenommene Wert für die Luftspaltinduktion ebenfalls richtig war.

Das im analytischen Ansatz bestimmte Drehmoment musste im Anschluss u.a. wegen der Nichtlinearitäten des Werkstoffes, die sich auf die Drehmomentbildung nennenswert auswirken, mittels der FEM-Rechnung korrigiert werden.

Abbildung 4-4 zeigt als Ergebnis dieser Berechnung die Phasenstrom - Drehmoment Abhängigkeit.

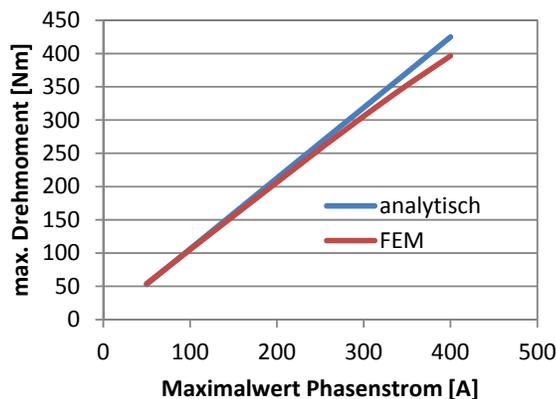


Abbildung 4-4: Drehmoment in Abhängigkeit vom Strombelag bei Polradwinkel  $\vartheta = 90^\circ$ el.

Insgesamt zeigte die Untersuchung, dass der magnetische Kreis der hier beschriebenen PMSM auch bei maximalem Strombelag noch nicht in Grenzbereiche gerät.

## FEM 2D transient

Die transiente FEM Simulation wurde angewendet, um die zeitlichen Verläufe der Flussverkettung, der induzierten Phasenspannung und des Rastmomentes im Leerlauf ( $I_q = 0A$ ) sowie des Drehmomentes unter Last ( $I_q > 0A$ ) zu berechnen. Das Ergebnis der Berechnung unter Belastung mit  $I_q = 171A$  und  $314A$  zeigt die Abbildung 4-5.

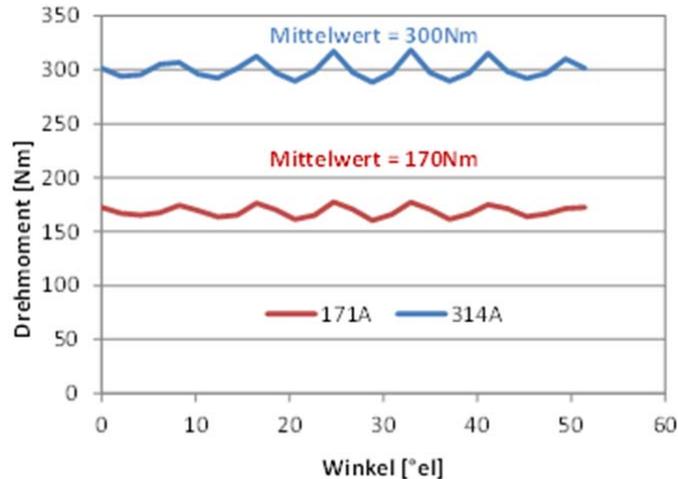


Abbildung 4-5: Zeitlicher Drehmomentverlauf

Die transient berechneten Werte unterscheiden sich geringfügig von den analytisch berechneten Werten der Drehmomente. Dies war auch zu erwarten, da lokale Sättigungseffekte und Welligkeiten in den zeitlichen Verläufen nur mit einer transienten FEM Berechnung berücksichtigt wurden.

Um die Drehmomente lt. Spezifikation zu erreichen, sind tatsächlich folgende Ströme notwendig:

$$180Nm \rightarrow I_q = 181A \rightarrow I_{eff,phase} = 221A_{eff}$$

$$330Nm \rightarrow I_q = 346A \rightarrow I_{eff,phase} = 423A_{eff}$$

Die Spezifikation bleibt auch mit dem geringfügig höheren Umrichterstrombedarf erfüllt. Die Spezifikation der Dauer und Maximalleistung ist ebenfalls erfüllt:

$$P_n = 56kW$$

$$P_{max} = 105kW$$

Bei Eckdrehzahl und Drehmoment  $M = 330Nm$  wurde eine Phasenspannung von  $U_m = 205V$  berechnet (Abweichung von der Leerlaufspannung  $U_m = 180V$  durch Spannungsabfälle an den Induktivitäten und Phasenwiderstand). Mit  $U_m = 205V$  Ist die Spezifikation ebenfalls erfüllt.

### 4.1.3.2 Konstruktion und Aufbau

Basierend auf der oben ausführlicher beschriebenen Auslegungsrechnung wurde die Maschine konstruiert und aufgebaut. Abbildung 4-6 zeigt den letztendlichen Konstruktionsstand der Maschine.

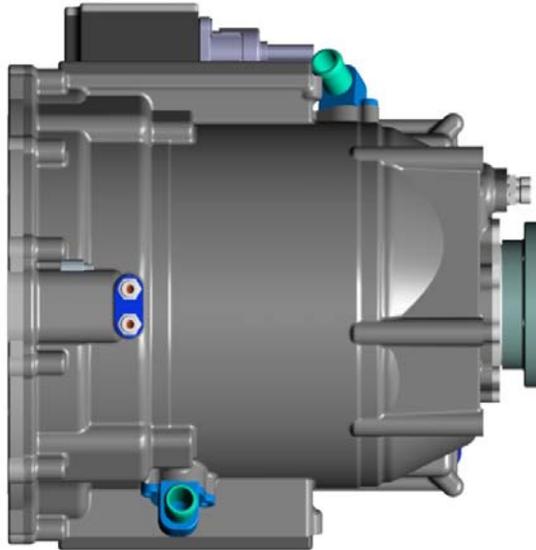


Abbildung 4-6: E-Maschine: Konstruktionsstand

#### 4.1.3.3 Ansteuerung

Für die Ansteuerung des geplanten Projektumrichters in Verbindung mit der aufgebauten E-Maschine wurde ein Rapid-Prototyping-System (=RPT-System) ausgewählt. Das erarbeitete Betriebskonzept und die zum Betrieb implementierten Software-Funktionen werden im Folgenden dargestellt.

Abbildung 4-7 zeigt zunächst den Systemplan zur Erprobung der Elektromaschine im Motorbetrieb am Prüfstand. Die Integration von RPT-Software und deren im Programmsystem Matlab/Simulink dargestellten Tools auf dem Steuerrechner bildete die Software-Entwicklungsumgebung.

Das Regelungskonzept wurde an die RPT-Schnittstellen angepasst und das Simulationsmodell kompiliert. Das entstandene Programm wurde dann auf die RPT-Hardware übertragen und in Echtzeit (Real-Time) ausgeführt.

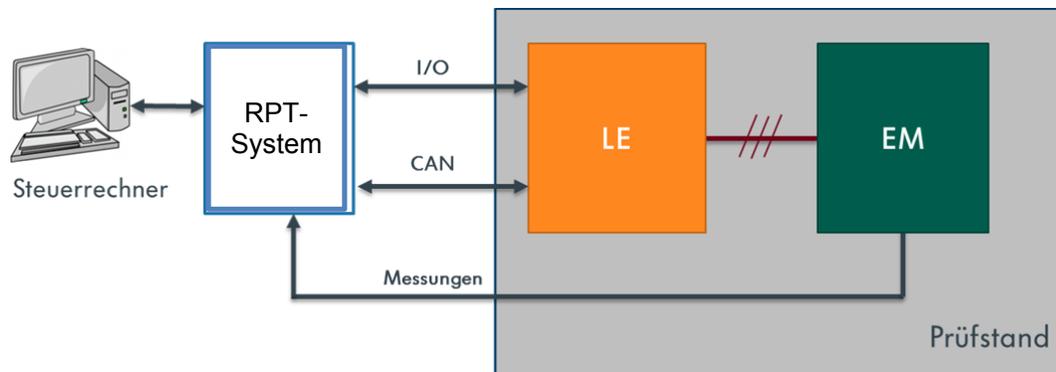


Abbildung 4-7: Systemübersicht des RPT-Systems zum Prüfstandsbetrieb des Antriebs

Das verwendete RPT-System als eine flexible Lösung eignete sich optimal für die hier erforderliche Anbindung der Hardware-In-the-Loop an Elektromaschinen. Die integrierten I/O- und Signalfunktionen bieten die Möglichkeit an, das Prototyping leicht und effizient zu realisieren. Für den Bereich der Leistungselektronik und Elektromotoren ermöglichte die Kombination mit einer FPGA-Lösung eine geeignete Testumgebung.

## Regelung

Für den Betrieb der 3-phasigen Elektromaschine wurde eine feldorientierte Regelung implementiert. Das grundsätzliche Konzept ist in Abbildung 4-8 dargestellt. Dabei handelt es sich um eine Drehmomentenregelung und nicht um eine Drehzahlregelung. Bei diesem Konzept ist der Stromregler in der dq-Ebene wirksam. Dafür sind die Park- und Clarke-Transformationen sehr wichtig, und dabei ist eine genaue Bestimmung der Position des Rotors notwendig.

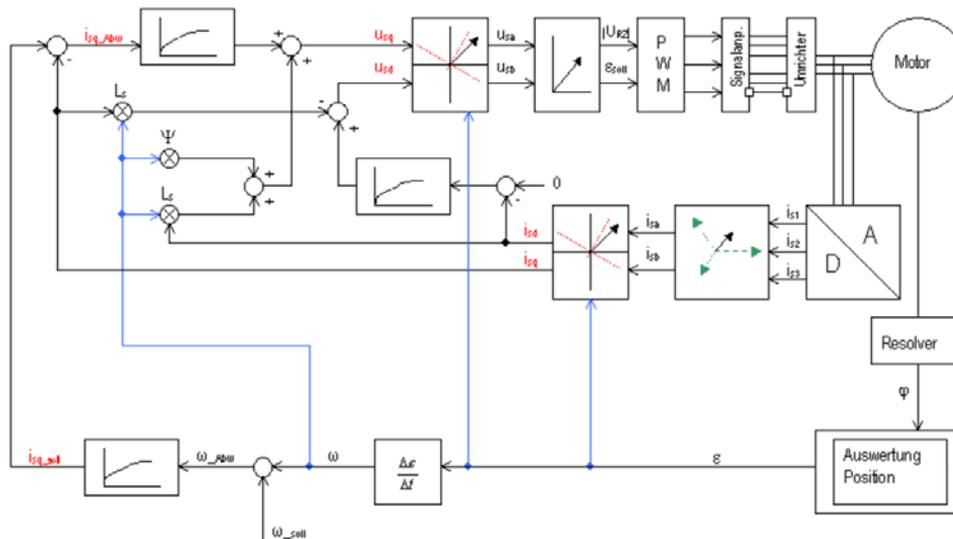


Abbildung 4-8: Konzept der Feldorientierten Regelung

Alle Funktionen zum Betrieb des Prototyp-Umrichters mit der Elektromaschine am Antriebsstrangprüfstand sind zunächst simulatorisch bestätigt und anschließend mit einem verfügbaren Prüfstandsumrichtersystem im Zusammenhang mit der Prüfstandsmaschine ausgetestet worden.

Zum Systembetrieb mit dem angestrebten Projektumrichter ist es wegen des im Projektrahmen nicht mehr verwirklichten Komponentenaufbaus nicht gekommen.

### 4.1.4 Erreichte Fortschritte im doppelseitigen Modulaufbau

Die Realisierung der eingangs dargestellten Modulvarianten mit dem Charakter der direkten doppelseitigen Chipkühlung über zwei angrenzende Metall-Keramik-Substrate (DCB, DAB, AMB) erfordert Innovationen auf allen Ebenen des Systemaufbaus. Die im Rahmen des Vorhabens erreichten Fortschritte sollen an dieser Stelle im Überblick zusammengestellt werden, um den Technologiestand im nachfolgenden Abschnitt 4.1.5 aus Sicht des Systemanwenders bewertet zu können.

## Halbleiter

Die Herstellung von anwendungsspezifisch gestalteten Halbleitern ermöglichte den Zugriff auf verschiedene Konfigurationen der Gate-Position, der Isolierungen, der Metallisierungen und der Aufbauhöhen. Aktive und absolute Chipfläche wurden für eine vergleichende Bewertung an einen marktgängigen Chiptyp der Firma Infineon angelehnt (s. Abbildung 4-9 und Abbildung 4-10).

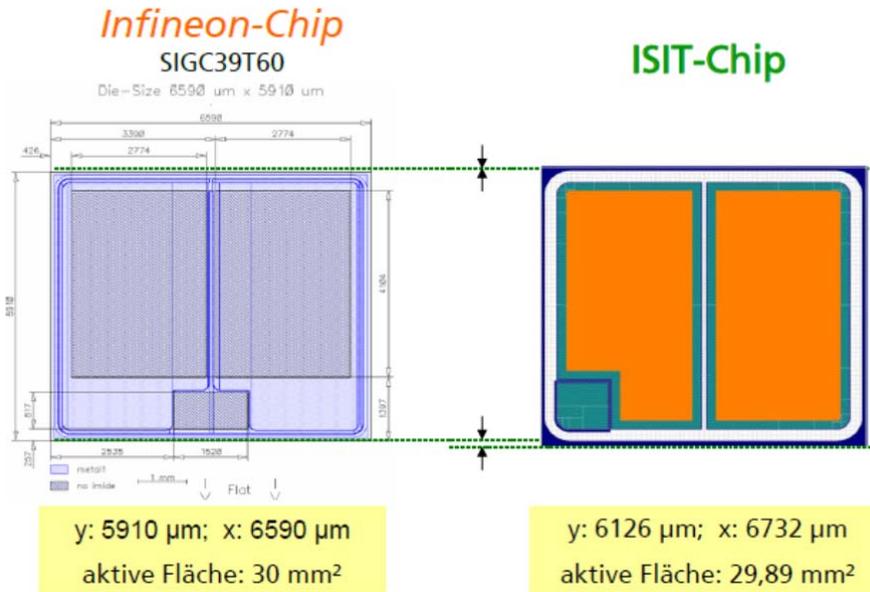


Abbildung 4-9: Vergleichs-Chip (links) und Projekt-Chip (rechts) (Bilder: ISIT)

Im Einzelnen wurden Ni/Au, Cu/Sn, Ti/Ni/Au mit unterschiedliche Passivierungen und Stufendesigns dargestellt und für die im ausgetesteten Verbindungstechniken Löten, Silbersindern und „Transient-liquid-phase-Bonding“ (=TLPB) erfolgreich eingesetzt. Die Hauptproblematik der optimalen Flächenausnutzung der Anbindungen, die durch die Kanten der Passivierungen und Metallisierungen beschränkt wird, ist eingehend untersucht worden und es konnten Lösungen bereitgestellt werden.

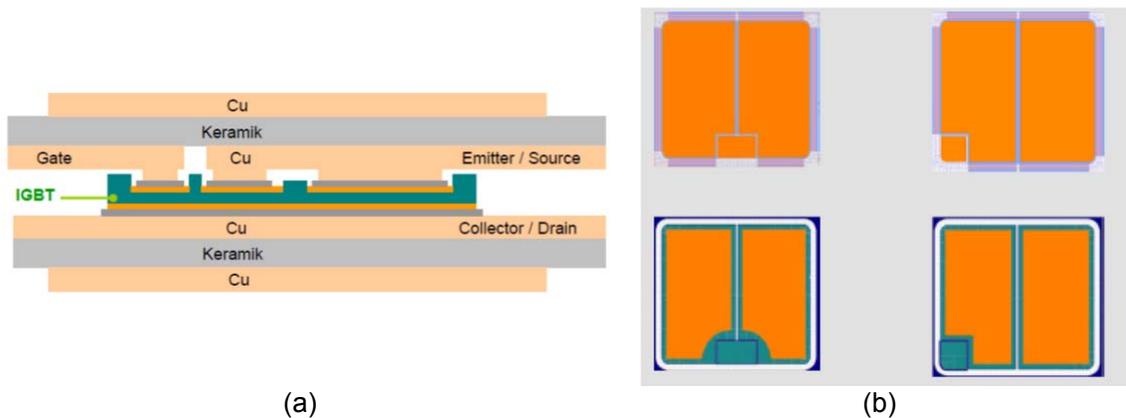


Abbildung 4-10: (a) Grundsätzlicher Chipkontaktierung im Modulaufbau mit Darstellung der Schichtfolge und Stufenstruktur, (b) Aufbauvarianten mit unterschiedlichen Stufendesigns und Passivierungen (Bilder: ISIT)

## Keramik-Substrate

Die Basis des doppelseitigen Modulaufbaus in beiden Varianten bilden die beidseitig mit Metallfolien verbundenen Keramiksubstrate. Der Grundidee des hier betrachteten Modulkonzeptes ist schließlich ein materialschlüssiger Wärmeleitpfad vom Chip bis ins Kühlwasser. Die Konsequenz für die Grenzflächen ist eine Chip-kompatible Topologie mit den entsprechenden Metallabschlüssen auf der einen Seite und eine mit dem Kühlwasser verträgliche Oberfläche der Modulaussenhaut, die durch die zweite Seite des Substrats gebildet wird. Dazu dient die Keramik selbst der Isolation und der Anpassung des Wärmeausdehnungskoeffizienten (CTE) des Verbundes an das angebundene Silizium.

Technologische Basis bieten hier die üblichen DCB- und AMB-Substrate mit stufengeätzten Oberflächen, geeigneten Metallisierungen und Keramikmaterialien. Der Aufgabe angemessen wurde in diesem Vorhaben eine breite Varianz an möglichen Technologien verfolgt. Die Stufenätzungen in Kupfer mit entsprechenden Metallisierungen für die vorgesehenen Verbindungstechnologien konnten erfolgreich umgesetzt werden. Oberflächenstrukturen in Aluminium und geeignete Metallisierungen konnten nur ansatzweise gezeigt werden.

Wegen der problematischen Prozessierung von Mehrmetallsubstraten wurden weitgehend nur Substrate mit beidseitig Kupfer für den Modulaufbau verwendet. Zur späteren Darstellung einer geeigneten Oberfläche für eine offene Wasserkühlung konnte noch keine letztlich zielführende Technologie identifiziert werden. Ein vielversprechender Ansatz ist das einseitige Verkleben oder Aktivlöten einer Aluminiumfolie direkt an die Keramik (Schichtfolge dargestellt in Abbildung 4-11).



**Abbildung 4-11: Aufbau Keramik-Substrat mit rückseitig verklebter Aluminiumschicht (Bild: Curamik)**

Die große Schwierigkeit beim Keramikaufbau ergab sich in der resultierenden Durchbiegung des Einzelsubstrates für das relativ große Zielmodul. Selbst unter Ausnutzung diverser Strukturierungsmaßnahmen auf beiden Substratseiten und einem Richtvorgang nach der Fertigung führt ein Temperaturgang, wie er während des jeweiligen Verbindungsprozesses durchlaufen wird, zu einem Hystereseverhalten der Durchbiegung mit einer Amplitude von +100µm nach -100µm (s. Abbildung 4-12).

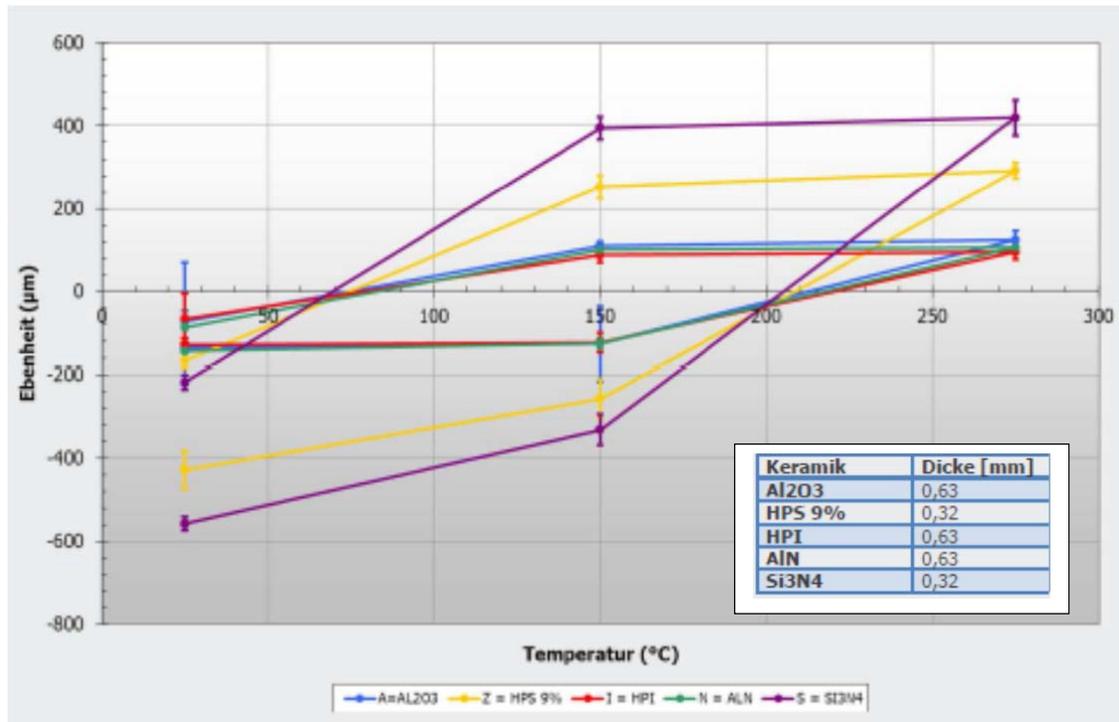


Abbildung 4-12: Hystereseverhalten der Durchbiegung im Temperaturwechsel bei verschiedenen Keramiksubstraten (Darstellung: Curamik)

### Verbindungstechniken

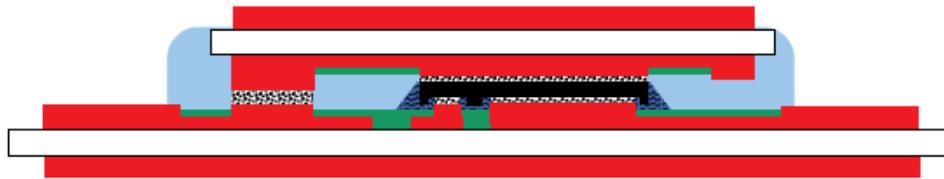
Als Verbindungstechniken für die den Chipkontakt und gleichzeitig Verbundaufbau wurden mehrere Ansätze verfolgt. Hinsichtlich der Prozessführung ist hier das Silbersintern unter hohen Druckkräften mit kurzer Prozesszeit von den Verfahren mit geringen oder gar keinen Druckkräften auf die Verbindungsschichten mit deutlich längeren Prozesszeiten, dem druckarmen oder druckfreien Silbersintern und dem TLPB-Verfahren) unterschieden. Während das TLPB-Verfahren und Drucksintern nur im Bereich der Prozessführung angepasst wurde, sind hinsichtlich der Pastenherstellung für das druckarme und druckfreie Silbersintern große Fortschritte erzielt worden, so dass letztendlich im Rahmen dieses Vorhabens ein geeigneter Prozess dargestellt werden konnte, wie er vorher nicht verfügbar war (hier ist auf die Abschlussberichte der Partner zu verweisen).

Neben der Chipkontaktierung war für den Modulaufbau nach Variante 2 eine geschlossene Metallumhausung darzustellen. Zur Verbindung wurden hier Laserschweißverfahren untersucht. Im Ergebnis zeigt sich eine grundsätzliche Machbarkeit zur Bildung von dichten Schweißnähten auf DCB-Kupfer und DAB-Aluminium mit den verschiedenen Metallabschlüssen. Die Nähte am kupferbasierten Material sind allerdings hinsichtlich einer sicheren Qualität eher kritisch einzuschätzen. Schweißnähte in Aluminium sind qualitativ deutlich besser einzuordnen.

### Modulaufbau Variante 1

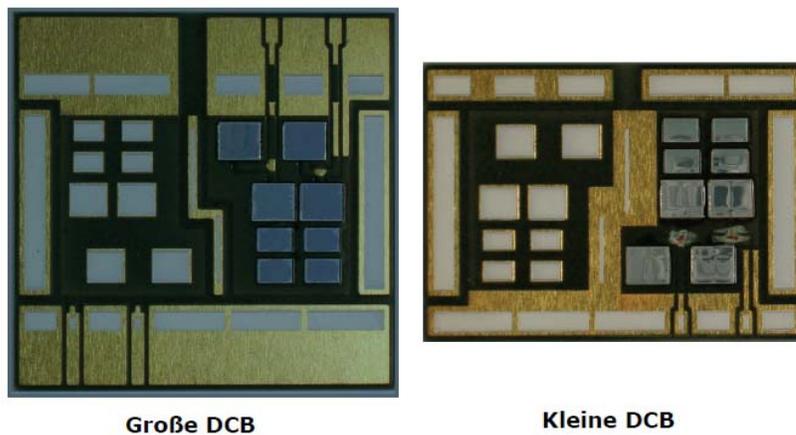
Der nach der Konzeptvariante 1 verfolgte Modulaufbau ist in Abbildung 4-13 detailliert. Der Substratstapel umschließt die aktive Chipebene. Die Substrate werden direkt flüssigkeitsgekühlt und der offene Kühler gegen das Substrat gedichtet. Die elektrischen Anschlüsse werden über ein überstehendes Substrat dargestellt. Kennzeichnend für diesen Aufbau sind die Einbettungsverfahren (Lack und Underfill), die einerseits die

Druckankopplung im Sinterschritt ermöglichen und im Zusammenbau die Isolation darstellen. Die einseitige Bestückung der Substrate ist hier erfolgreich gelungen (s. Abbildung 4-14).



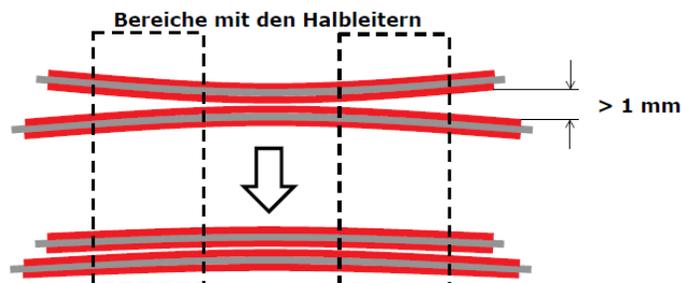
**Abbildung 4-13: Variante 1. Modulaufbau schematisch (Darstellung: Danfoss)**

Allerdings liegen die Substrate nach diesem Schritt mit deutlicher Durchbiegung vor. Im Fall des Drucksinterns werden entsprechend Abbildung 4-15 Spannungen in den Verbind eingepreßt, die zu Bauteilzerstörungen (Chipbruch, bzw. Delamination von Underfill und Sinterschicht) führen.



**Abbildung 4-14: Variante 1. Unteres und oberes Substrat, vorbestückt und vorbereitet für die Modulverbindung (Bilder: Danfoss)**

Im Fall einer druckarmen Verbindungstechnik mittels Löten und TLPB kommt kein ausreichender Kontakt zwischen den Fügepartnern zustande und führt zu unvollständiger Anbindung. Die Anwendung de Silbersinterns anstelle des TLPB-Prozesses wäre denkbar, konnte aber im Rahmen des Verfahrens nicht mehr durchgeführt werden.



**Abbildung 4-15: Variante 1. Im Modulaufbau werden im Bereich der Halbleiter große Zugspannungen erzeugt (Darstellung: Danfoss)**

## Modulaufbau Variante 2

Die Konzeptvariante 2 weist eine geschlossene Tasche auf, die in einem offenen Flüssigkeitskühler eingetaucht. Gedichtet wird die Tasche über den Montageflansch des Moduls. Der interne Aufbau des Substratstapels ist grundsätzlich vergleichbar der Variante 1. Allerdings ist das zusätzliche Problem der materialschlüssig am Substrat angeschlossenen Tasche zu erreichen, ebenso wie der dichte Aufbau der Tasche insgesamt. Die notwendigen Verbindungsverfahren sind oben bereits diskutiert. Die Konzeptvariante 2 wurde an zwei verschiedenen Aufbauten verfolgt: Einem kleinen Layout mit minimaler Chipbestückung für Vorversuche und der vollbestückte Zielaufbau (s. Abbildung 4-16 und Abbildung 4-17). Im Ergebnis konnten nur die Module nach dem kleinen Layout erfolgreich funktional dargestellt werden. Für die Module nach dem Ziellayout ergaben sich die gleichen, oben bereits geschilderten, Probleme im Zusammenhang mit der Durchbiegung der großen Substrate.

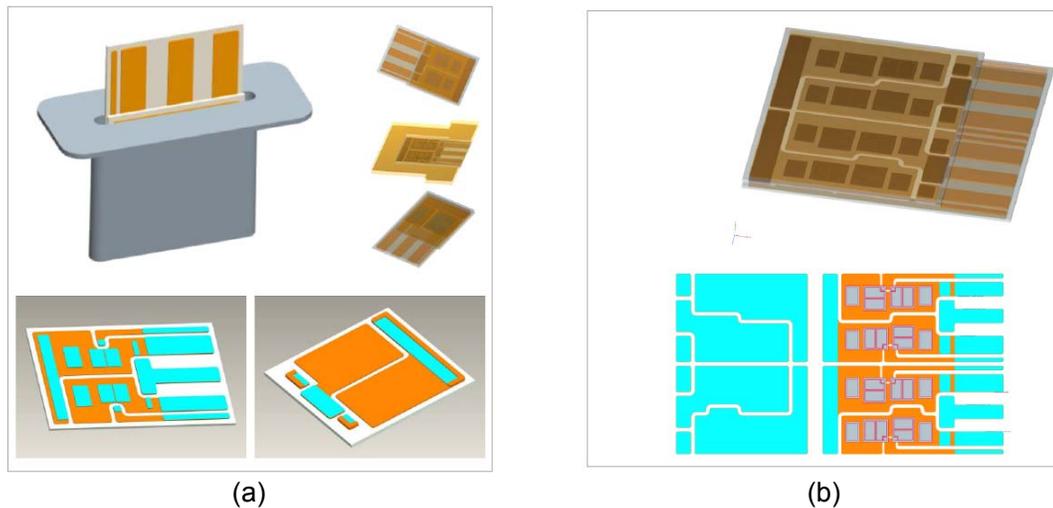


Abbildung 4-16: Variante 2. (a) Modulaufbau für Vorversuche: kleines Layout, (b) Ziel-Modulaufbau (Darstellungen: IISB)

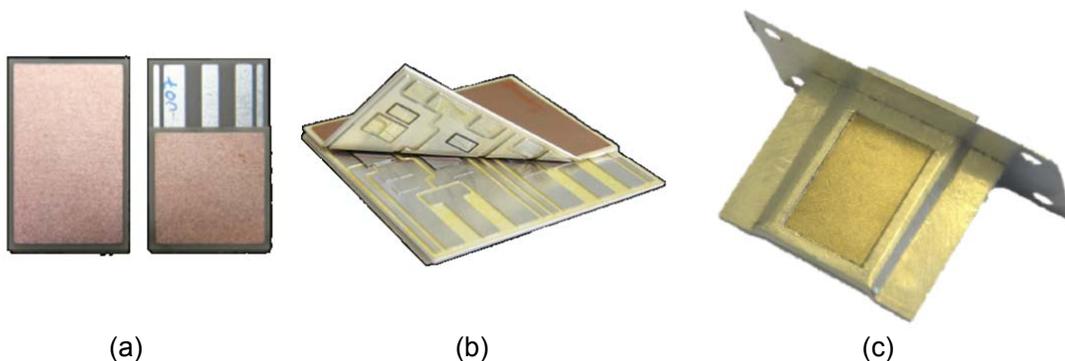


Abbildung 4-17: Variante 2. (a) Sandwichaufbau, kleines Layout, (b) geöffneter Zielsandwich, Aufbauversuch, (c) Modulaufbau mit lasergeschweißter Aluminium-Tasche, kleines Layout (Bilder: IISB)

An den Modulen mit kleinem Layout ist auch der dichte Aufbau der Umhausungen gelungen. Die vergoldete Kupferrückseite der Substrate, wie sie in Abbildung 4-17 zu sehen ist, bildet hier einen Teil der Hülle und steht im Betrieb in direktem Wasserkontakt. Diese Konfiguration ist damit wegen zu erwartender Korrosionen nur für einen kurzen Versuchsbetrieb zulässig. Für einen dauerhaften Betrieb müsste eine zum Wasser kompatible Oberfläche dargestellt werden, die – wie oben beschrieben – durch aluminiumbeschichtete Substrate erreicht werden würde.

An den Modulen mit kleinem Layout konnten schließlich die angestrebten Charakterisierungen in Bezug auf den Wärmewiderstand durchgeführt werden. Abbildung 4-18 zeigt den berechneten Wärmewiderstand des vorliegenden doppelseitigen Modulaufbaus im Vergleich zu einem einseitigem Modulaufbau für Cu- und Al-beschichtete Substrate für verschiedene Keramikmaterialien. Der Wärmewiderstand des doppelseitigen Cu-beschichteten  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Substrats konnte messtechnisch sehr gut nachgewiesen werden.

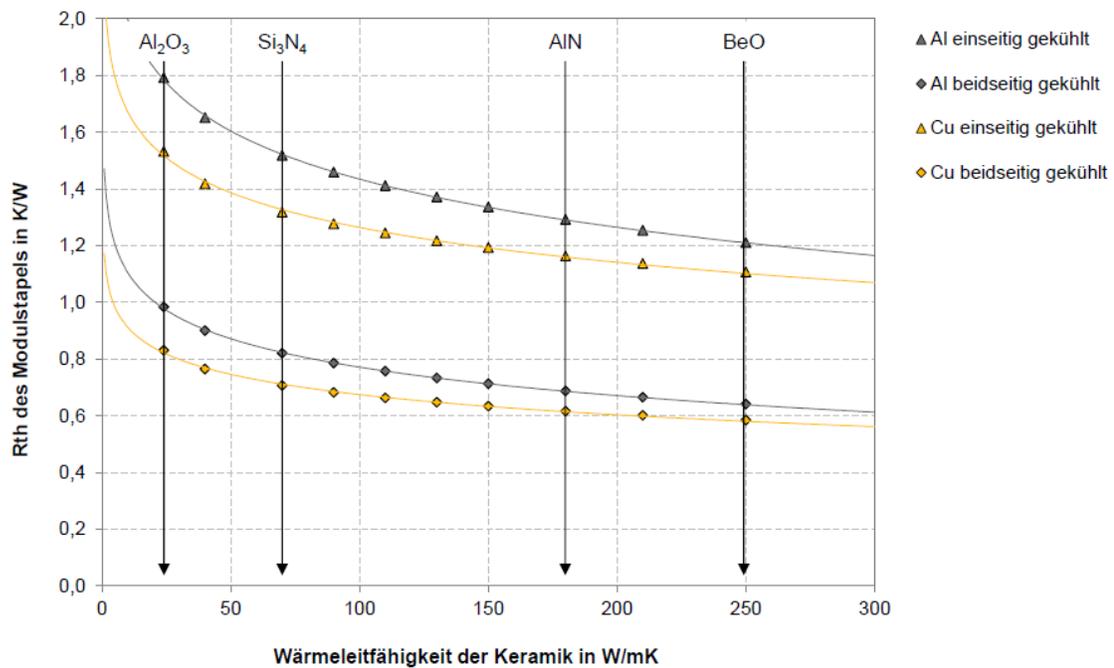
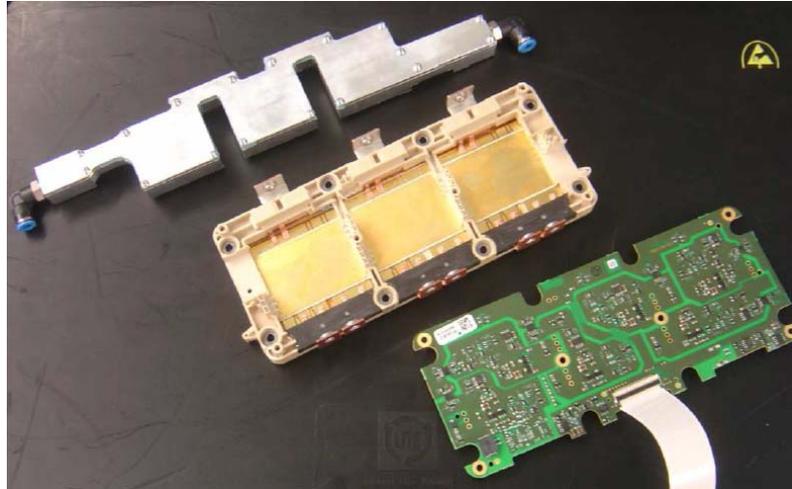


Abbildung 4-18: Berechnung des Wärmewiderstandes verschiedener Modulkonfigurationen (Darstellung IISB)

### Systemaufbau

Für den vorgesehenen Konzeptnachweis am Prüfstand ist der in Abbildung 4-19 abgebildete Endstufenaufbau vorbereitet worden. Zu sehen sind drei nicht funktionale Modulaufbauten nach Variante 1, die in einen Bondrahmen integriert wurden. Für einen sicheren Betrieb und eine gegebene Vergleichbarkeit zu einem bestehenden, in Serie eingesetztem System wurde kein offener, sondern ein geschlossener Wasserkühler vorgesehen. Da keine voll funktionsfähigen Module entstanden sind, ist die Endstufe und damit auch die oben dargestellte Prüfstandsordnung nicht in Betrieb gegangen.



**Abbildung 4-19: Endstufenaufbau mit doppelseitigen Leistungsmodulen nach Variante 1. Von oben nach unten: oberseitiger Wasserkühler, Leistungsmodule im Bondrahmen auf unterseitigem Kühler, Treiberboard (Bild: Continental)**

#### **4.1.5 Bewertung der technologischen Möglichkeiten für doppelseitige Module im elektrischen Fahrzeugantrieb**

Zunächst ist grundsätzlich festzustellen, dass der Bedarf an einer Steigerung der Leistungsdichte und Reduktion der Siliziumfläche unverändert besteht. Zudem kann auch bei Abschluss des Projektes die Spezifikation des Projektantriebs hinsichtlich Leistungs- und resultierendem Strombedarf für elektrische Traktionsantriebe im Fahrzeug bestätigt werden. Für eine erfolgreiche Anwendung von doppelseitig gekühlten Leistungsmodulaufbauten war im Projekt davon ausgegangen worden, dass eine Halbbrücke in einem Modul zusammengefasst sein sollte. Nur so ließen sich einerseits die elektrotechnischen Vorteile kleiner parasitärer Induktivitäten z.B. für eine deutlich gesteigerte Schaltfrequenz erreichen, und andererseits die Vorteile im kompakten Aufbau nutzen. Diese Forderung an ein Halbbrückenmodul führt auch bei möglicher Reduzierung der Halbleiterfläche immer noch zu einer Größe der Modulgrundfläche, die bei der im Projekt erreichten Substratebene nicht zu funktionsfähigen Modulen gereicht hat. Es scheint aus heutiger Sicht hier eine technologische Grenze für die Substratgröße eines im Direktverbund aufgebauten Sandwich-Moduls überschritten zu sein. Für eine direkte Anwendung zur Ansteuerung von typischen dreiphasigen Elektromaschinen im Fahrzeugantrieb ist dieses Aufbaukonzept damit nicht relevant.

Wenn sich auch Module der geforderten Größe nicht darstellen ließen, so sind trotzdem wesentlichen Technologien für die Darstellung des besagten im Direktverbund aufgebauten Sandwich-Moduls in diesem Vorhaben entwickelt oder massiv vorangebracht worden:

- Chip-Technologien: Strukturierung, Passivierung und Metallisierung für alle benötigten Verbindungsverfahren
- Isolation: Underfill und Verguss
- Substrattechnologie: DCB-Stufenätzung
- Verbindungstechnik: Löten, Silbersintern mit hohem und niedrigen Prozessdruck und druckfrei für kleine Flächen, Diffusionslöten (TLPB)
- Gehäuseaufbaukonzepte für die direkte Wasserkühlung
- Im Ansatz konnte das hybride Substrat mit Cu-Beschichtung auf der einen Seite und Al-Beschichtung auf der anderen gezeigt werden (Dieser Aufbau erscheint heute für eine langlebige Anwendung im Direktkühler notwendig.)

Die Darstellung eines doppelseitigen Moduls mit genügend kleiner Grundfläche auf Basis dieser Technologien war im Labormaßstab erfolgreich. Damit ist die Machbarkeit eines doppelseitigen Modulaufbaus mit direkter Chipkontaktierung gegen zwei DCB-Substrate grundsätzlich gezeigt. Hier ließ sich auch das theoretische Potenzial der Reduzierung der benötigten Chipfläche bei doppelseitiger Kühlung grundsätzlich nachweisen. Der Nachweis von fahrzeugrelevanter Performance und Zuverlässigkeit ist mit der darstellbaren Technologiestufe aber noch offen geblieben.

Eine reine Parallelschaltung kleinerer doppelseitig kühlbarer Moduleinheiten, wie sie ja heute realisierbar scheinen, zur Darstellung der erforderlichen Antriebsperformance ist aus den oben diskutierten Gründen nicht sinnvoll. Anders könnte eine Anwendung in den heute diskutierten mehrphasigen oder mehrstufigen Topologien beurteilt werden. Hier könnte ein Gesamtsystem schließlich doch deutlich profitieren.

## **4.2 Nutzen und Verwertbarkeit**

### **4.2.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende**

Derzeit kann man bei gegenwärtigen Elektro- und Hybridfahrzeugprojekten beobachten, dass die Leistungselektroniken als separate Komponenten ausgeführt sind. Diese Komponenten erfahren dabei mit gewisser Dynamik bereits weitergeführte Entwicklungsstufen, welche auf deutlich kompaktere Bauweisen führen. Der prinzipielle Modulaufbau ist dabei allerdings noch wenig angefasst. Eine wichtige Schlüsselkomponente ist die Kühlung.

Es ist also zu erkennen, dass Bedarf und Bereitschaft besteht, die Komponente Leistungselektronik wegen des hohen Performance- und Kostenpotenzials weiter zu optimieren. Das betrachtete Aufbaukonzept wird in dieser Form keine Anwendung im Automobil haben. Indirekt wird aber von den deutlichen Technologiefortschritten zu profitieren sein.

### **4.2.2 Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten nach Projektende**

Der im Projektrahmen erreichte Technologiestatus ist noch weit von einer Vorentwicklungsreife entfernt geblieben. Das theoretische Technologiepotential wird durch die technologische Begrenzung der darstellbaren Modulgrenze eingeschränkt. Es sind allerdings Anwendungen denkbar, die grundsätzlich kleinere Schaltereinheiten benötigen. Hier ist eine erfolgreiche Anwendung durchaus denkbar. Allerdings muss dazu die Forderung nicht-korrosiver Materialien an der Schnittstelle zum Kühlwasser für eine technische Umsetzung der Konzepte in Serie erfüllt werden. Die dazu vorgesehenen innovativeren Substratkonzepte konnten im Rahmen des Vorhabens nur ansatzweise gezeigt und untersucht werden.

## **4.3 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Doppelseitig gekühlte Leistungsmodulkonzepte in direkter Verbindung zu reinem Kupfer (keine DCB) und über Ausgleichsmaterialien (wie Molybdän) sind bei einigen Herstellern erfolgreich dargestellt. Isolierte Aufbauten der hier verfolgten Größe in direktem Materialkontakt ohne Wärmeleitpastenschichten sind dagegen nicht bekannt.

#### **4.4 Veröffentlichung der Ergebnisse**

Neben diesem Schlussbericht sind seitens Volkswagen keine weiteren Veröffentlichungen vorgesehen. Da die Umrichterrealisierung nicht im Rahmen des Vorhabens gelungen ist und somit keine Systembewertung möglich war, ist hier auf die Veröffentlichungen der Teilergebnisse durch die Projektpartner zu verweisen.

#### **5 Kurzfassung des Schlussberichtes**

Eine Kurzfassung des Schlussberichtes gemäß **BMBF-Vodr. 3831/03.07\_2** wird in Ergänzung zu diesem Abschlussbericht vorgelegt.

#### **6 Erfolgskontrollbericht**

Dem Schlussbericht ist zusätzlich ein kurz gefasster Erfolgskontrollbericht beigefügt der nicht veröffentlicht wird.

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel  Ultrakompaktes Leistungs-Modul höchster Zuverlässigkeit (UltiMo) –Abschlussbericht zum Teilvorhaben „Fahrzeuggerechte Systemintegration und Betriebsverhalten an Traktions-E-Maschinen“ der Volkswagen AG	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]  Dr. Christian Mertens	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.06.2013
	6. Veröffentlichungsdatum 28.02.2014
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  Volkswagen AG Konzernforschung Antriebe - Antriebssysteme Berliner Ring 2 D-38440 Wolfsburg	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 16N10902
	11. Seitenzahl
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben
	14. Tabellen
	15. Abbildungen
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung  Leistungselektronik im elektrischen Fahrtrieb, besonders bei Hybridfahrzeugen steht unter hohem Bauraum- und Kostendruck. Im Rahmen des Förderprojektes UltiMo wurde ein Ansatz zum doppelseitigen Leistungsmodulaufbau mit direkter Chipkontaktierung gegen zwei DCB-Substrate betrachtet. Das Konzept sieht eine direkte Wasserkühlung des Verbundes vor. Zahlreiche Technologien, die zur Realisierung des Aufbaukonzeptes notwendig sind, konnten bereitgestellt werden. Eine vollfunktionale Darstellung des Zielmoduls war jedoch nicht erfolgreich. Das Gesamtkonzept und der erreichte Technologiestatus werden unter dem Gesichtspunkt einer automobilen Anwendung bewertet.	
19. Schlagwörter Elektrofahrzeug, Elektroantrieb, Hybridfahrzeug, Hybridantrieb, Aufbau- und Verbindungstechnik, doppelseitige Kühlung,	
20. Verlag	21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) report
3. title  Ultra compact power electronic module of highest reliability (UltiMo) – report on subproject: automotive compatible system integration and operating performance at electric traction machines“	
4. author(s) (family name, first name(s))  Dr. Christian Mertens	5. end of project 30.06.2013
	6. publication date 28.02.2014
	7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address)  Volkswagen AG Konzernforschung Antriebe - Antriebssysteme Berliner Ring 2 D-38440 Wolfsburg	9. originator's report no.
	10. reference no. 16N10902
	11. no. of pages
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references
	14. no. of tables
	15. no. of figures
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract  Power electronics for electric power train, especially in hybrid cars, shows strong demand for saving space and cost. The project UltiMo was implemented to investigate a power electronic module concept for a two-side cooling with direct contact to DBC substrates on both sides of the chip. The concept shows direct water cooling of the compound. A lot of technologies that are necessary for realization of the module concept could be provided. But the setup of a functional demonstrator of the module concept was not successful at the end. The complete concept and the reached steps in technology are discussed from the point of view of an automotive application.	
19. keywords electric car, electromobility, hybrid car, hybrid power train, power electronic set-up, joining technology	
20. publisher	21. price