

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

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

VOLKSWAGEN

AKTIENGESELLSCHAFT

Spezifikation der Systemanforderungen und Verifikation der Systemperformance

Zuwendungsempfänger: Volkswagen AG	Förderkennzeichen: 19 U 6007F
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2006 bis 30.06.2010	
Berichtszeitraum: 01.07.2010 bis 30.06.2010	
Projektleiter:	Christian Mertens Volkswagen AG K-EFAS Brieffach 1778 38436 Wolfsburg christian.mertens@volkswagen.de

1 Inhaltsverzeichnis

1	INHALTSVERZEICHNIS	2
2	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	3
3	VOLKSWAGEN AG: SPEZIFIKATION DER SYSTEMANFORDERUNGEN UND VERIFIKATION DER SYSTEMPERFORMANCE.....	4
3.1	MOTIVATION UND STAND DER TECHNIK.....	4
3.2	AUSGANGSSITUATION.....	5
3.2.1	<i>Aufgabenstellung</i>	<i>5</i>
3.2.2	<i>Zielsetzung.....</i>	<i>6</i>
3.3	PLANUNG, DURCHFÜHRUNG, ERGEBNISSE.....	6
3.3.1	<i>Arbeitspaket 1: Bewertung von Topologien U- und I-Umrichter</i>	<i>7</i>
3.3.2	<i>Arbeitspaket 2: Auswahl und Entwicklung geeigneter Aufbau und Verbindungstechnik</i>	<i>7</i>
3.3.3	<i>Arbeitspaket 3: Zwischenkreiskondensator über 150°C.....</i>	<i>13</i>
3.3.4	<i>Arbeitspaket 4: Integration der Leistungs- und Regelelektronik.....</i>	<i>14</i>
3.3.5	<i>Arbeitspaket 5: Systemintegration</i>	<i>14</i>
3.3.6	<i>Arbeitspaket 6: Systemintegration in fahrbaren Demonstrator.....</i>	<i>15</i>
3.4	NUTZEN, UMSETZUNG, VERWERTUNG DER ERGEBNISSE	16
3.5	VERGLEICH MIT DER ZIELSETZUNG / ZIELERREICHUNG	17
4	KURZFASSUNG DES SCHLUSSBERICHTES	17
5	ERFOLGSKONTROLLBERICHT	17

2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Temperaturbelastung der Leistungselektronik.....	4
Abbildung 3-2: Projektkonsortium	5
Abbildung 3-3: Lebensdauer-repräsentatives Missionprofile für den Umrichter.....	10
Abbildung 3-4: vom Missionprofile zur Lebensdauerabschätzung.....	10
Abbildung 3-5: Verlustleistungsprofile von Diode und IGBT	11
Abbildung 3-6: Lebensdauerrelevantes Temperaturprofil von IGBT und Diode.....	11
Abbildung 3-7: Vergleich der ausgewerteten Zählstrategien	12
Abbildung 3-8: Verbesserung der Lastwechselfestigkeit im InGA-Projekt	13
Abbildung 3-9: Einbauort für E-Maschine und Leistungselektronik.....	14
Abbildung 3-10: InGA-Leistungselektronik – Systemintegration	15
Abbildung 3-11: Hybridfahrzeug-Demonstrator mit InGA-Antriebssystem	16

3 Volkswagen AG: Spezifikation der Systemanforderungen und Verifikation der Systemperformance

3.1 Motivation und Stand der Technik

Die Einführung von Elektrotraktion als Fahrzeugantrieb als Grundlage einer CO₂-neutralen Elektromobilität ist heute, zum Abschluss des Vorhabens, mehr denn je in aller Munde. Alle Automobilhersteller erwarten eine zunehmende Elektrifizierung im Fahrzeugantrieb und präsentieren technische Lösungen für einen Serieneinsatz. Zu Beginn des Vorhabens waren erst sehr wenige Fahrzeuge mit elektrifizierten Antrieben am Markt eingeführt. Dies hat sich mittlerweile geändert, allerdings noch mit sehr geringen Marktanteilen. In Verbindung mit dem als klassischem Verbrennungsmotor ausgeprägten Haupt-Antrieb sorgen die elektrischen Antriebe dabei in Form der sogenannten Mild- oder Vollhybrid-Antriebssysteme für eine Verbrauchsreduzierung. Reine Elektrofahrzeuge, die ihre gesamte Antriebsenergie aus dem Stromnetz beziehen würden und damit die CO₂-Potenziale der regenerativen Energiequellen erschließen würden, sind derzeit wegen der hohen Batteriekosten, der daraus resultierenden geringen realisierbaren Reichweiten und der langen Ladezeiten nur Nischenprodukte. Eine größere Rolle könnte den sogenannten Plug-In-Fahrzeugen zukommen, die mit mittleren Batteriekapazitäten die meisten täglichen Fahrten über den Strom aus der Steckdose abdecken könnten, aber auch längere Fahrten aus ihrem Kraftstofftank und dem Verbrennungsmotor ermöglichen. Diese Systeme müssen allerdings zwei vollwertige Antriebe vereinen und der Kostendruck ist hier besonders hoch.

Aus diesen Gründen sind die dem Vorhaben bei Projektbeginn zugrunde gelegten Fragestellungen immer noch hochaktuell. Die Leistungselektronik zur Ansteuerung der Elektromaschine mit dem gleichen Kühlkreislauf wie den Verbrennungsmotor zu betreiben und damit dessen Temperaturniveau als passive Temperaturbelastung der Elektronik aufzuprägen ist vom Kostengesichtspunkt äußerst wünschenswert, bedeutet aber eine extreme Belastung der gesamten Komponenten. Diese erfährt schließlich wegen ihrer eigenen Verlustwärmern zusätzliche Temperaturzyklen, die nun auf höherem Niveau die Materialien wesentlich früher an ihre Lebensdauergrößen führen (s. Abbildung 3-1).

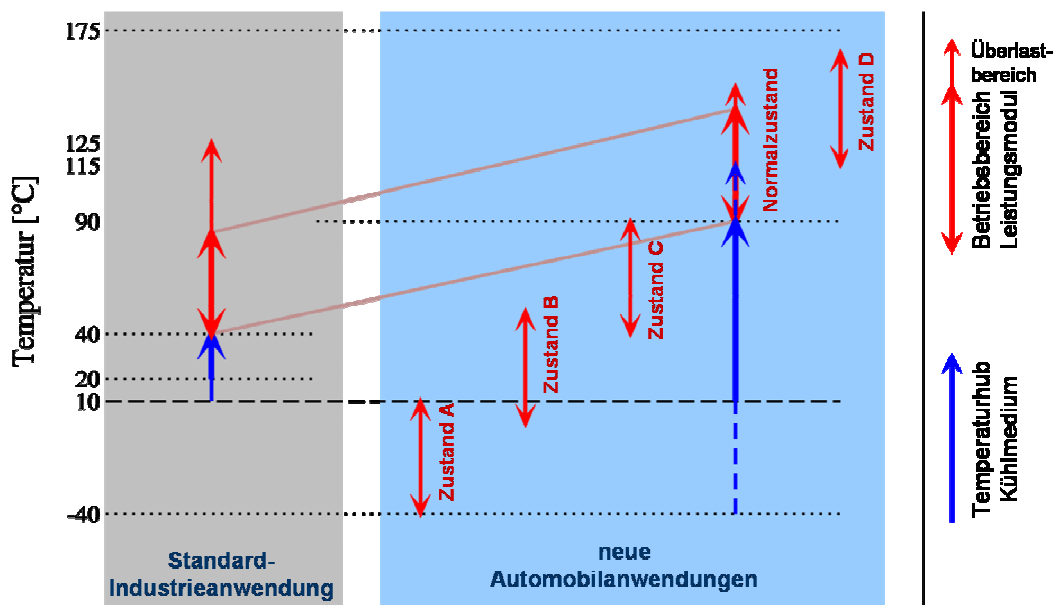


Abbildung 3-1: Temperaturbelastung der Leistungselektronik

Die aktiven Halbleiterbauelemente auf Siliziumbasis sind dabei bereits mit Sperrschichttemperaturen bis 200 °C betrieben werden. Noch höhere Sperrschichttemperaturen versprechen Siliziumkarbid-Bauelemente (SiC). Dann wären theoretisch deutlich kleinere Halbleiterflächen bei geringerem Kühlaufwand realisierbar, wenn auch eine geeignete Aufbautechnik für diese Anwendung derzeit nicht zur Verfügung steht. Bei den SiC-Bauelementen sah der Partner SiCED (Förderkennzeichen 19 U 6007D) den „Vertical Junction Field Effect Transistor“ (VJFET) als eine marktreife SiC-Halbleiterstruktur, die deshalb den vergleichenden Untersuchungen in diesem Projekt zugrunde gelegt wurde.

Alle benötigten Komponenten – Leistungsmodul, Treiberkarte, Controllerkarte und Controller-Chip und Kondensator – des leistungselektronischen Umrichters für die Ansteuerung der Elektromaschine waren zu Projektbeginn nicht für die beschriebene Hochtemperaturanwendung entwickelt. Zudem war ungeklärt, welche genauen Anforderungen an diese Leistungselektronik zu stellen sind.

3.2 Ausgangssituation

3.2.1 Aufgabenstellung

Das Projektkonsortium (siehe Abbildung 3-2) hat sich die Aufgabe gestellt, ein Fahrzeugsystem zu definieren, welches nur einen gemeinsamen Kühlkreislauf für Verbrennungsmotor, E-Maschine und Leistungselektronik aufweist. Dafür sollte beispielhaft eine geeignete, möglichst hoch integrierte Leistungselektronik mit allen Komponenten entwickelt werden. Um dem Kostengesichtspunkt für einen zukünftigen Serieneinsatz gerecht zu werden, sollte ein modularer Ansatz auf Komponentenebene zugrunde liegen. Damit wäre es möglich, die Ergebnisse in unterschiedlichsten Leistungsklassen und Bauformen zu nutzen.

Daneben war als Prognose für in fernerer Zukunft liegende Anwendungen der Stand der SiC-Halbleitertechnik zu evaluieren und zu bewerten.



Abbildung 3-2: Projektkonsortium

Das Gesamtsystem sollte abschließend in einem Fahrzeug-Demonstrator dargestellt und erprobt werden.

Die Themengebiete des Gesamtprojektes waren damit folgende:

- Hochtemperatur Aufbau- und Verbindungstechnik
- Hochtemperatur Leistungselektronik
- Hochtemperatur Regelelektronik
- Hochtemperaturfähige Kondensatoren
- Entwärmungskonzepte
- Systemintegration

Diese wurden im Gesamtprojekt innerhalb der folgenden Arbeitspakete (AP) bearbeitet:

- AP1: Bewertung von Topologien U- und I-Umrichter
- AP2: Auswahl und Entwicklung geeigneter Aufbau und Verbindungstechnik
- AP3: Zwischenkreiskondensator über 150 °C
- AP4: Integration der Leistungs- und Regelelektronik
- AP5: Systemintegration
- AP6: Systemintegration in fahrbaren Demonstrator

Dabei waren die Aufgaben seitens Volkswagen:

- Definition der Missionprofiles für elektrische Maschine und Leistungselektronik. (AP2, AP3)
- Kombination der hochtemperaturfähigen, elektrischen Antriebseinheit mit einer Verbrennungskraftmaschine und einem Getriebe zu einem Hybridantriebstrang. (AP5)
- Begleitung der Prüfstandtests. (AP5)
- Bewertung der hochtemperaturfähigen elektrischen Antriebseinheit bzgl. Fahrzeugtauglichkeit. (AP5)
- Mitarbeit beim Fahrzeugumbau (AP6)
- Testen des Demonstrator-Fahrzeugs (Rollenprüfstands- und Fahrversuche) (AP6)

Darüber hinaus hat Volkswagen die Arbeiten der Partner kontinuierlich begleitet und die automotivespezifischen Aspekte eingebracht.

3.2.2 Zielsetzung

Für die Volkswagen AG waren die beschriebene Ausgabenstellung mit den folgenden Projektzielen verbunden:

- Die Anforderungen, welche tatsächlich im Betrieb an eine „Hochtemperatur-Leistungselektronik“ und an deren Komponenten gestellt werden müssen, sollten geklärt und beschrieben werden
- Für alle Komponenten waren die Voraussetzungen (Einhaltung von Temperaturgrenzen, Lebensdauer im Lastspiel, usw.) für einen den gestellten Anforderungen entsprechenden Betrieb zu schaffen
- Die Funktion aller Komponenten unter den gestellten Rahmenbedingungen war an einem Prototypumrichter am Prüfstand nachzuweisen
- Die Funktion des Prototypumrichters war in einem fahrbaren Demonstrationsfahrzeug nachzuweisen
- Die Gültigkeit der Auslegungsannahmen sollte im realen Fahrbetrieb validiert werden

3.3 Planung, Durchführung, Ergebnisse

Die Ergebnisse des Projektes aus Sicht von Volkswagen werden in diesem Kapitel nach den Arbeitspaketen gegliedert präsentiert und diskutiert.

Da eine wesentliche Aufgabe seitens Volkswagen die Bewertung und Einordnung der komponenten- bzw. systembezogenen Ergebnisse bezüglich Ihrer Relevanz für die angestrebte Fahrzeuganwendung war, werden hier auch die nicht direkt beeinflussten Ergebnisse der Partner behandelt.

3.3.1 Arbeitspaket 1: Bewertung von Topologien U- und I-Umrichter

Die vom Projektpartner SiCED und TU-Braunschweig (Förderkennzeichen 19 U 6007G) durchgeführten Untersuchungen zum Stand der SiC-Halbleitertechnik lassen den Stand dieser Technik zum heutigen Zeitpunkt beurteilen.

Das Siliziumkarbid-Halbleitermaterial hat in den letzten Jahren deutliche Verbesserungen erfahren. Die Anzahl an sog. Micropipes und anderen kritischen Störstellen konnte wesentlich reduziert werden, so dass Bauelementflächen für einige Ampere Stromtragfähigkeit mit brauchbarer Ausbeute herstellbar sind. Größere Stromtragfähigkeiten sind nur durch Parallelisieren mehrerer Chips möglich und teilw. kritisch im Hinblick auf ihre Gleichbelastung im Betrieb.

Im Vergleich zu Silizium ist das Siliziumkarbidmaterial jedoch immer sehr viel aufwendiger in der Herstellung. Damit können nur entscheidende Performance-Vorteile, die um eine Größenordnung kleinere Chipflächen bei gleichen Systemleistungen zulassen oder die entsprechende Kostenvorteile im Gesamtsystem bewirken, die Kostennachteile der Halbleiterherstellung aufwiegen.

In Bezug auf ihre Serienreife sind als Schaltelement der SiC-JFET und als Diode natürlich die SiC-Schottkydiode am weitesten. Wegen der schlechten Langzeitstabilität des Gateoxids kommen MOS-Bauelemente derzeit nicht für einen zeitnahen Einsatz in Frage.

Der Nachteil des „Normally-On“-JFETS lässt sich schaltungstechnisch beherrschen, ist also kein Ausschließungsmerkmal für einen Fahrzeugeinsatz.

Allerdings steht für die notwendige hohe Stromtragfähigkeit in Traktionsanwendungen nur die mehrfache Parallelschaltung zur Verfügung mit schwer zu beherrschender Gleichverteilung und der Gefahr des thermischen Weglaufens eines Elements.

Hinsichtlich der Hochtemperaturtauglichkeit der SiC-Elemente gelten ähnliche Forderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik wie für Si-Bauelemente. Hier könnten die Ergebnisse des Projektes Anwendung finden.

Für noch höhere Sperrschichttemperaturen, wie sie für SiC denkbar und aus Wirtschaftlichkeitsgründen sinnvoll wären, existiert bislang noch keine lebensdauer-taugliche Aufbautechnik.

Hinsichtlich Ihrer elektrischen Performance habe die Untersuchungen im Rahmen des Projektes gezeigt, dass die SiC-JFETs in Durchlass und Schaltverhalten Vorteile würden bringen können. Anwendungen mit höherer Zwischenkreisspannung und höheren Schaltfrequenzen als bei den derzeit eingesetzten Fahrzeugumrichtern würden sich vorteilhaft auf den Wirtschaftlichkeitsfaktor auswirken.

Zusammenfassend lässt sich aus den Projektergebnissen feststellen, dass die Anwendung von SiC-Schaltern in Fahrzeug-Antriebsumrichtern heute trotz des großen Fortschritts der letzten Jahre technisch noch keinen ausreichenden Reifegrad besitzt und absehbar noch nicht wirtschaftlich darstellbar ist.

3.3.2 Arbeitspaket 2: Auswahl und Entwicklung geeigneter Aufbau und Verbindungstechnik

Die zentrale Aufgabe des Gesamtprojektes war eine zuverlässige, robuste und hochtemperaturfähige Leistungselektronik für Fahrzeugantriebe darzustellen. Unter Hochtemperatur-Leistungselektronik soll hier eine in allen Komponenten für den Betrieb bei

den hohen Temperaturen der Umgebung eines Verbrennungsmotors unter Nutzung eines gemeinsamen Kühlkreislaufs ertüchtigte Leistungselektronik verstanden werden. Dies führt bzgl. der elektronischen Baugruppen und der Leistungshalbleiter auf die Frage nach einer geeigneten Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT). (Bei dem im nachfolgenden Kapitel behandelten Zwischenkreiskondensator waren dagegen die aktiven Materialien zu betrachten.)

Auswahl und Entwicklung einer geeigneten AVT gelingt nun aber nur auf der Basis eines auf die Baugruppe bezogenen Anforderungsprofils, aus welchem sich im Speziellen die lokalen Belastungen der AVT ableiten lassen.

Daher wurde diesem Projekt ein Hybrid-Antriebssystem als Beispielanwendung zugrunde gelegt, welches auch in der zweiten Projektphase als Demonstratorsystem und schließlich in einem Volkswagen Touran als Demonstrationsfahrzeug aufgebaut wurde. Der betreffende Hybrid-Antriebsstrang folgt einem Mildhybrid-Konzept mit entsprechend geringer elektrischer Leistung (23 kW Peakleistung bei 10 kW Dauerleistung) mit kurbelwellenfester E-Maschine. Bei einer solchen Anwendung wäre der Kostendruck besonders hoch und die Verwendung einer bauraumsparenden Leistungselektronik mit nur einem Kühlkreislauf besonders wünschenswert.

Zusammen mit der dem Hybrid-System zugeordneten Hybridstrategie, welche die Energieflüsse zwischen verbrennungsmotorischem und elektrischem Pfad steuert, lag das Betriebsverhalten des Beispielsystems prinzipiell fest.

Für die Beispielanwendung waren nun die Anforderungen an den leistungselektronischen Umrichter abzuleiten. Für spätere Serienanwendungen anderer Hybridsysteme müssen die entsprechenden Anforderungen mit denen des hier diskutierten Beispielsystems verglichen werden, so dass die Ergebnisse des Projektes zur Grundlage von Auslegung und Aufbau eines geeigneten Hochtemperatur-Umrichters werden dienen können.

Für die nun zu betrachtende AVT von elektronischen Baugruppen und Leistungsmodul sind zwei verschiedene Belastungsarten zu beachten:

- a) die passiven Belastungen – wie von außen eingeprägte Temperaturwechsel durch Außentemperaturen und Kühlmitteltemperaturverlauf, klimatische Bedingungen und mechanische Belastungen

und

- b) die aktiven Belastungen – wie die im aktiven Betrieb entstehenden Wechselbelastungen infolge der internen Verlustwärmern.

Für die Auslegung der AVT ist nun nicht nur die Sicherstellung der Funktionalität in allen Anforderungsbereichen entscheidend, sondern insbesondere auch die Sicherstellung der Funktionalität über Lebensdauer. Diese Lebensdauer spiegelt sich in den passiven Wechselbelastungen von Temperatur und mechanischen Schwingungen sowie in den aktiv erzeugten thermischen Wechselbelastungen wider.

Eine Vergrößerung der Halbleiterfläche kann die aktiv erzeugte thermische Wechselbelastung senken, jedoch nicht die passive!

Die Ableitung eines Anforderungskatalogs für das Beispielsystem bzgl. der mechanischen Randbedingungen und passiven Belastungen auf den gesamten Umrichter lässt sich nach Festlegung des Einbauortes und der Montagebedingungen (siehe Kapitel 3.3.5 und 3.3.6) aus den heute bekannten Anforderungen an Systeme in verbrennungsmotorisch getriebenen Fahrzeugen ableiten:

- Temperaturbereich: -40 °C to 125 °C (+15 °C Nachheizphase)
- Schwingungsbelastung: 220 m/s² at 200-250 Hz
- Beständigkeit gegen Salznebel und hohe Luftfeuchtigkeit

- passive Temperaturwechsel:

T low	T high	number of cycles
-40 °C	95 °C	100
-30 °C	95 °C	900
-10 °C	95 °C	3000
10 °C	95 °C	5000
-40 °C	125 °C (+15 °C)	30

hinzu kommen die elektrischen Randbedingungen des Hybridsystems

- DC-Spannung: 300 V
- max. Strom: 60A, 200A peak

Diese äußeren Anforderungen lassen sich für die Auslegung der AVT direkt oder mit einfacher Rechnung auf die internen Baugruppen übertragen.

Anders ist die Situation bei der Beschreibung der aktiven Belastungen der Leistungshalbleiter. Eine einfache Abschätzung einer Anzahl der zu bestehenden Temperaturwechsel ist beliebig falsch und sehr abhängig vom Hybridsystem und der zugehörigen Fahrstrategie.

Die Bestimmung der tatsächlichen aktiven Belastungen (aktiven Lastwechseln) ist daher eine anspruchsvolle Aufgabe und das im Projekt durchgeführte Vorgehen soll hier detaillierter erläutert werden. In vier Schritten ließ sich zunächst ein Belastungsprofil der Halbleiter gewinnen:

1. Schritt: Definition eines **Fahrzyklus** (Geschwindigkeit und Steigung über Zeit), der in N-facher Wiederholung ein spezielles Belastungsprofil darstellt, das die Lebensdauerbelastung der Komponenten des elektrischen Antriebsstranges repräsentiert.
Dieser **Lebensdauer-Fahrzyklus (Mission Profile)** kann einer Messung oder theoretischen Überlegungen entstammen – im vorliegenden Fall ist es eine Kombination
2. Schritt: Simulation des Hybrid-Systems beim “Abfahren” des Lebensdauer-Fahrzyklus. Ergebnis sind die **Strom/Spannungs-, Drehzahl- und Drehmoment-Profile** des elektrischen Antriebs
3. Schritt: Simulation der E-Maschine bei Belastung durch die Strom/Spannungs-, Drehzahl- und Drehmoment-Profile. Ergebnis sind **Phasenstrom- und $\cos \varphi$ -Verlauf**
4. Schritt: Der resultierende Datensatz dient als **erweitertes Mission Profile** zur Auslegung und Berechnung der Leistungselektronik-Komponenten

Damit liegt ein für die Lebensdauer repräsentatives Anforderungsprofil vor (s. Abbildung 3-3).

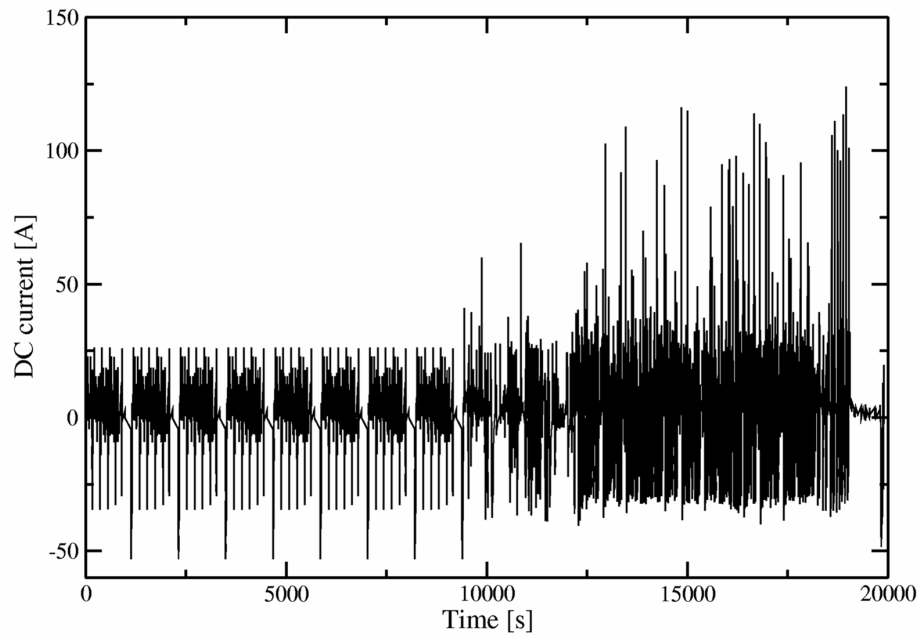


Abbildung 3-3: Lebensdauerrepräsentatives Missionprofile für den Umrichter

Aus diesem Stromprofil können nun in Verbindung mit den entsprechenden Spannungs-Drehzahl- und $\cos \varphi$ -Profilen auf dem in Abbildung 3-4 dargestellten Weg zunächst die Verlustleistungen und daraus die Temperaturprofile gewonnen werden (siehe Abbildung 3-5 und Abbildung 3-6). Nun muss eine Zählstrategie aus dem Temperaturprofil nach Temperaturamplituden kategorisieren und die jeweilige Anzahl an Temperaturhüben abzählen. Letztendlich kann über das Lebensdauermodell auf die erreichbare Lebensdauer geschlossen werden. Das genaue Vorgehen ist im Bericht der Partners Infineon (Förderkennzeichen 19 U 6007 C) und Siemens (Förderkennzeichen 19 U 6007E) beschrieben.

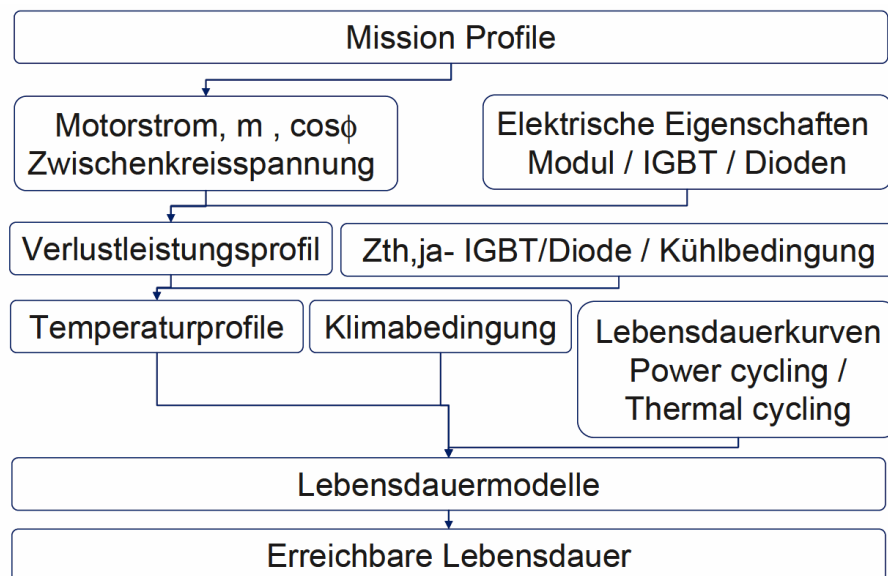


Abbildung 3-4: vom Missionprofile zur Lebensdauerabschätzung

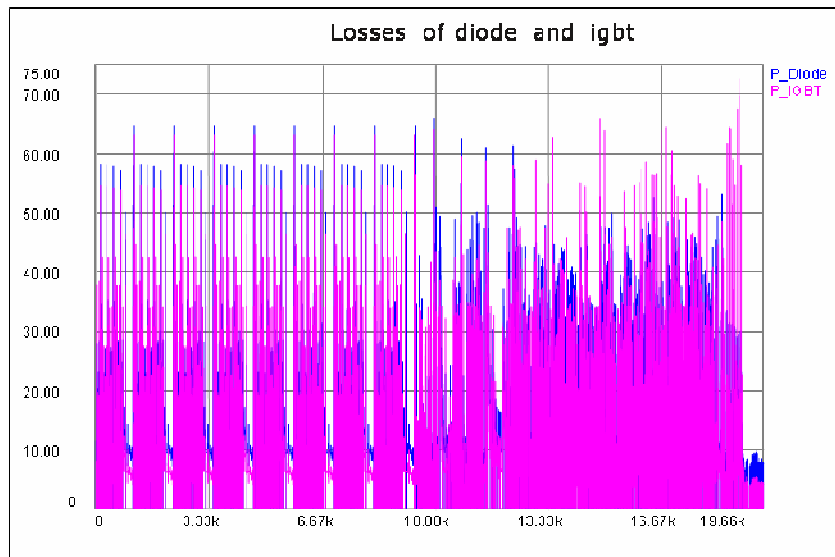


Abbildung 3-5: Verlustleistungsprofile von Diode und IGBT

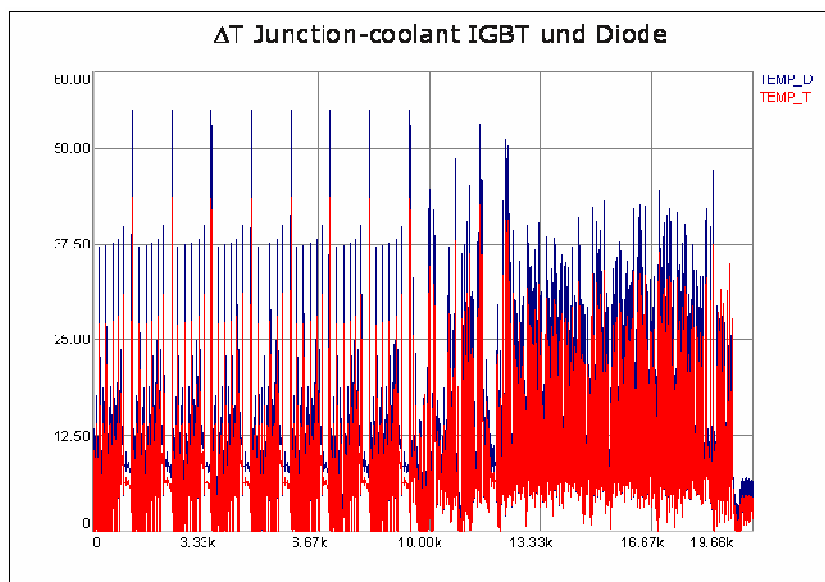


Abbildung 3-6: Lebensdauerrelevantes Temperaturprofil von IGBT und Diode

Hier ist als wichtiges Projektergebnis herauszustellen, dass die beiden verwendeten Zählstrategien im Bereich der lebensdauerwirksamen größeren Temperaturhöhe sehr ähnliche Anzahlen ergeben haben (siehe Abbildung 3-7). Der allgemein anerkannte Rainflow-Algorithmus hat dabei den Nachteil, dass er erst berechnet werden kann, wenn das gesamte Profil vorliegt. Der vereinfachte Algorithmus von Infineon hat nun den Vorteil, online mitgerechnet werden zu können. Damit wird ein Mitrechnen der „verbrauchten Lebensdauer“ möglich und man kann in der Fahrzeuganwendung rechtzeitig vor dem Ausfall einer Komponente den Austausch veranlassen.

ΔT	algorithm 1	Rainflow method
5	486	1592.5
10	589	376
15	303	130
20	143	56
25	111	73
30	63	46
35	68	62
40	10	10
45	3	4
50	10	10

Abbildung 3-7: Vergleich der ausgewerteten Zählstrategien

Der hier vorgestellte Weg zur Ableitung des Anforderungskatalogs zeigt, dass durch den zentralen Einfluss des Hybridsystems und der Fahrstrategie kein allgemeingültiges lebensdauerrelevantes Lastwechselprofil bestimmt werden kann. Ein solches müsste die maximal denkbare Anforderung absichern und würde damit in der überwiegenden Vielzahl der Anwendungsfälle zu einer Auslegung mit übergroßem Sicherheitsfaktor führen. Das wiederum ist aus Kostengesichtspunkten nicht zu rechtfertigen.

Ein wesentliches Ergebnis ist damit in der folgenden Aussage zusammengefasst:

Die spezielle Anforderungsdefinition an die Leistungshalbleiter ist fahrzeugspezifisch – der Weg zur Definition der Anforderungen ist zu verallgemeinern.

Die nun auf dieser Basis von den Partnern betrachteten allgemein eingeführten Aufbau- und Verbindungstechniken wie Standard-Lotverfahren und Standard-Drahtbondverfahren im Halbleitermodul, sowie der Leiterplattenaufbau beim Controllerboard erwiesen sich als den Anforderungen nicht gewachsen.

Darauf wurden bei den Partnern die Aufbautechnologien gemäß der jeweiligen Berichte weiterentwickelt mit den wesentlichen Maßnahmen:

- Einsatz Diffusionslötten für Chip-Substrat-Verbindung
- Veränderung Chipmetallisierung und Bonddrahtmaterial
- Spezieller Vergussprozess für Controllerplatine
- Bewertung und Auswahl von Steckverbindern

Mit der Summe der Maßnahmen am Leistungsmodul konnte die Lebensdauer der AVT um den Faktor 4,5 gegenüber einem herkömmlichen gesteigert werden (s. Abbildung 3-8).

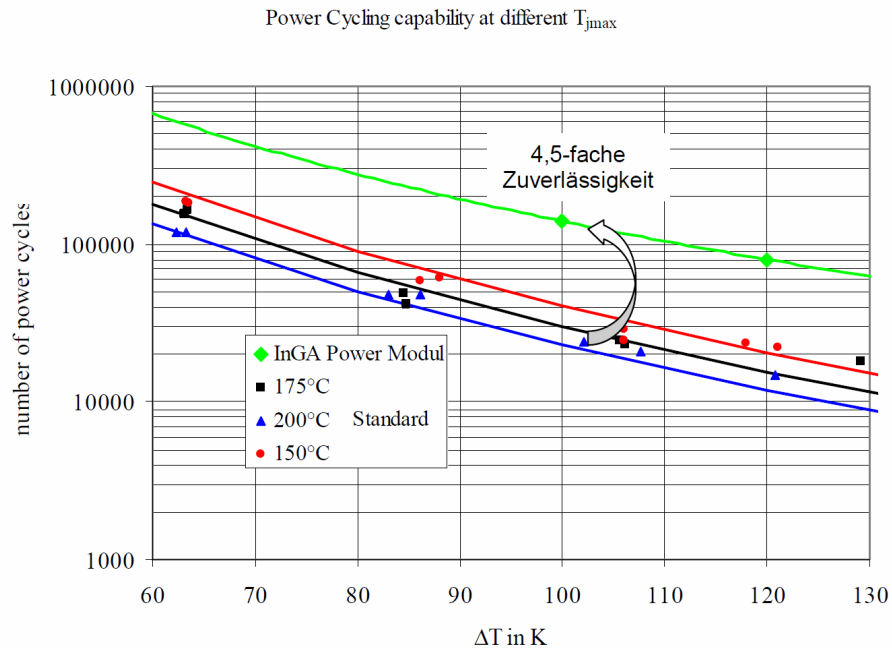


Abbildung 3-8: Verbesserung der Lastwechselfestigkeit im InGA-Projekt

Für die Controllerplatine konnte die AVT um einen Faktor größer 5 gegenüber einem unvergossenen Aufbau gesteigert werden und übertraf die geforderte Temperaturwechselanzahl noch um den Faktor 3. Geeignete Steckverbinder wurden für bleihaltige und bleifreie Lote gefunden.

Mit diesen Ergebnissen ist ein hochtemperaturgeeigneter Leistungsumrichter im Fahrzeug möglich geworden.

3.3.3 Arbeitspaket 3: Zwischenkreiskondensator über 150 °C

Die Entwicklung eines Zwischenkreiskondensators für den Betrieb in dem spezifizierten Temperaturbereich ist eine wesentliche Aufgabe für den Einsatz einer Hochtemperaturelektronik im Fahrzeug. Die Untersuchungen wurden bei dem Partner EPCOS (Förderkennzeichen 19 U 6007B) in einem in sich geschlossenen Arbeitspaket durchgeführt. Es wurden dabei sowohl die Folienkondensator- als auch die Elektrolytkondensatortechnik weiterentwickelt. Wie dem Bericht von EPCOS im Detail zu entnehmen ist, haben beide Technologien wesentliche Fortschritte erfahren. Für die spezifizierten Projektanforderungen konnte nur der Folienkondensator auf Basis eines PEN-Films (PEN=Polyethylenaphtalat) ertüchtigt werden. Damit ist allerdings auch ein entscheidendes Teilziel für die Realisierungsmöglichkeit einer Hochtemperatur-Leistungselektronik im Fahrzeug erreicht.

Die Weiterentwicklungen im Bereich der Elektrolytkondensatoren für Temperaturen größer 105°C lässt einen Einsatz im Fahrzeug zwar nicht als Hochtemperaturanwendung aber bei den geringeren Temperaturen in reinen Elektrofahrzeugen zukünftig möglich werden.

3.3.4 Arbeitspaket 4: Integration der Leistungs- und Regelelektronik

Das Arbeitspaket 4 umfasste die vielen Arbeitspunkte zur funktionellen Inbetriebnahme des Umrichters um im Nachgang schließlich auch einen funktionsfähigen Demonstrator vorweisen zu können. Die Details sind dem Bericht des Partners Continental (Förderkennzeichen 19 U 6007A) zu entnehmen. Hier erfolgte keine direkte Zuarbeit seitens Volkswagen.

3.3.5 Arbeitspaket 5: Systemintegration

Das Arbeitspaket „Systemintegration“ basiert auf der zunächst erfolgten Bauraumidentifizierung für den Gesamtumrichter. Hier wurde ein direkter Anbauort am Verbrennungsmotor, der für andere Motorversionen für einen Turboverdichter freigehalten ist, ausgewählt. An dieser Stelle ist ein direkter Steckanschluss an die zwischen Motor- und Getriebeflansch montierte E-Maschine möglich. Damit entfällt ein dreiphasiger HV-Kabelstrang. Es wird eine hochintegrierte Anordnung des Gesamtantriebs möglich. Allerdings ergeben sich damit auch die oben genannten harten Anforderungen für den Umrichter als Motoranbauteil (siehe Abbildung 3-9).

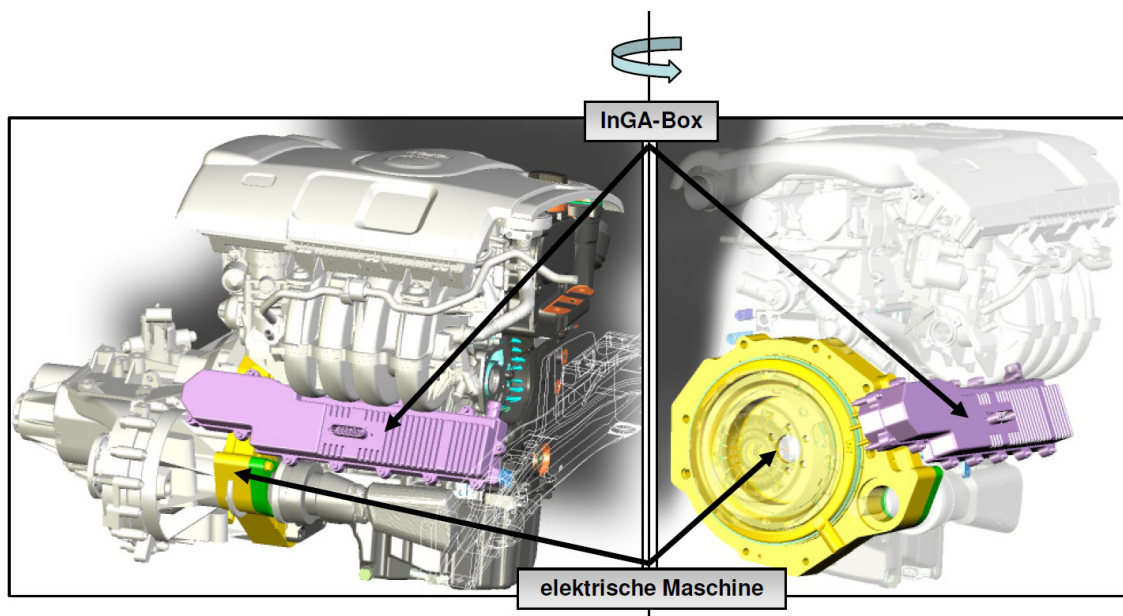


Abbildung 3-9: Einbauort für E-Maschine und Leistungselektronik

Der Gehäusebauraum ergab sich nach Anordnung der funktionellen Komponenten und nach Definition der Systemschnittstellen, die vom Partner Continental in Zusammenarbeit mit der Fa. Hofer Powertrain als Unterauftragnehmer für die E-Maschine unter Mitwirkung von Volkswagen erarbeitet worden waren (siehe Abbildung 3-10).

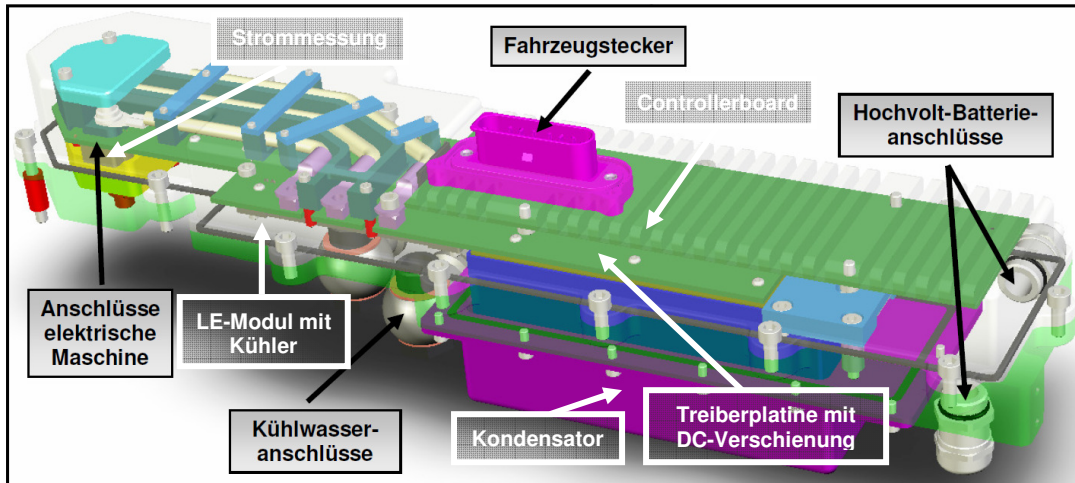


Abbildung 3-10: InGA-Leistungselektronik – Systemintegration

Folgende besondere Eigenschaften zeichnen das System aus:

- Kompaktes Leistungsmodul mit hocheffizienter Wasserkühlung
- Horizontal-lineare Anordnung von EM-Anschluss, Leistungsmodul, Kondensator und DC-Anschluss
- Vertikale Anordnung von Leistungskreisebene, Treiberebene, Controllerebene
- DC-Verschaltung über Treiberplatine
- 3-Phasen-Steckanschluss zur E-Maschine mit integrierter Strommessung

Damit wurde ein Aufbaukonzept entwickelt, das durch seine Modularität den Aufbau verschiedener Leistungsklassen nur durch Skalierung der Komponenten unter Beibehaltung der Schnittstellenkonfiguration zulässt.

Die durchgängige Verfolgung eines solchen Konzeptes für Fahrzeuge der unterschiedlichen Klassen lässt bei zukünftigen Fahrzeugprojekten große Kostenvorteile erwarten.

Die Anwendung dieses modularen Konzeptes ist dabei unabhängig von der hier gleichzeitig realisierten Hochtemperaturfähigkeit.

Zum Nachweis der Funktionalität der gesamten Umrichter-Komponente an der E-Maschine und unter den geforderten Temperaturbedingungen wurde bei dem Partner TU-Braunschweig ein Prüfstand aufgebaut, an dem die E-Maschine und Leistungselektronik im Lastbetrieb mit den geforderten Umgebungstemperaturbedingungen beaufschlagt werden können. Durch die gleichzeitige Temperierung des Kühlkreislaufs waren sehr anwendungsnah die Extremalbedingungen des Betriebs nachstellbar. Durch den Betrieb des Systems unter diesen Bedingungen in Verbindung mit den Lebensdaueruntersuchungen der Komponenten konnte die grundsätzliche Eignung der aufgebauten Leistungselektronik in einer Hochtemperaturanwendung nachgewiesen werden.

3.3.6 Arbeitspaket 6: Systemintegration in fahrbaren Demonstrator

Die Systemintegration erfolgte in einen bei Projektbeginn bereits bestehenden Versuchsträger auf Basis eines Volkswagen Touran. Die Arbeiten für das Ersetzen aller E-Antriebskomponenten bei zusätzlicher Umstellung der Spannungslage erwiesen sich als sehr umfangreich. Ein großer Arbeitspunkt war auch der Neuaufbau des Kühlsystems auf einen einfachen Kühlkreislauf, bei dem die Kühlung der E-Komponenten in jeder Betriebssituation sichergestellt ist. Der Aufbau des Fahrzeugs konnte erfolgreich abgeschlossen werden (siehe Abbildung 3-11).



Abbildung 3-11: Hybridfahrzeug-Demonstrator mit InGA-Antriebssystem

Allerdings ist die vollständige Inbetriebnahme nicht mehr im Rahmen der Projektlaufzeit gelungen. Die daraus resultierenden Abweichungen zum geplanten Vorhabensziel sind im Schreiben vom 9.10.2010 „Abweichung des Vorhabensstandes von der geplanten Zielerreichung im AP6 (Systemintegration in fahrbaren Demonstrator) im Unterarbeitspaket Rollenprüfplatz und Straßentests“ an den TÜV Rheinland Consulting GmbH gemeldet worden. Die vorgesehenen Fahrtests sind nicht mehr im Rahmen des Projektes durchführbar gewesen.

Trotzdem ist der Nachweis der Integration einer Hochtemperatur-Leistungselektronik in ein Fahrzeug gelungen. Da dieses Fahrzeug als Beispielsystem Grundlage der Auslegung war, diente es für alle Untersuchungen als „Projektmotor“ und hat damit sehr zum Projekterfolg beigetragen.

3.4 Nutzen, Umsetzung, Verwertung der Ergebnisse

Die im Rahmen des InGA-Projektes erzielten Ergebnisse in Bezug auf die Lebensdauerertüchtigung der Teilkomponenten, insbesondere

- die Aufbau- und Verbindungstechnik für das Leistungsmodul (verbessertes Lötverfahren, verbesserte Bondtechnik)
- die Vergusstechniken für den Leiterplattenaufbau
- die Hochtemperaturtestverfahren für elektrische Gesamtantriebssysteme
- die Qualifikation von Mikrocontrollern im erweiterten Temperaturbereich

werden direkt in den kommenden Generationen der Fahrzeugumrichter Verwendung finden. Volkswagen profitiert von zuverlässigeren und bauraumsparenderen Antriebsumrichtern im Gesamtfahrzeug. Das beim Aufbau verfolgte Modularitätskonzept verspricht weitere Kostenvorteile.

Die Erkenntnisse bei der Ableitung der Anforderungen, speziell des Missionprofiles, sind bereits aus der Forschung an die Entwicklungsabteilungen kommuniziert und werden für die Lastenhefterstellung künftiger Fahrzeuge mit elektrischen Antriebssträngen Verwendung finden.

Zur Absicherung der Erkenntnisse des HT-Umrichterbetriebs und der Missionprofile-Definition werden im Nachgang des Projektes an dem aufgebauten Demonstratorfahrzeug von den Partnern Volkswagen und Continental intensivere Messungen durchgeführt.

Für die vollständige Umsetzung einer Hochtemperatur-Leistungselektronik, wofür hier entscheidende Grundlagen gelegt werden konnten (Aufbautechnik, Kondensatorfolien, effiziente Wasserkühler, Prüfverfahren, erstes Demonstratorsystem für Umgebungstemperatur von 125 °C), in die Serie wird noch ein längerer Vorlauf und weitere schwerpunktmäßig systembezogene Forschungs- und Entwicklungsarbeit nötig sein. Die

grundsätzliche Machbarkeit konnte hier nachgewiesen werden. Dieses ist als großer Projekterfolg zu werten.

3.5 Vergleich mit der Zielsetzung / Zielerreichung

Technik-Aspekt

Die Grundlagen für die Umsetzung von Hochtemperatur-Leistungselektronik im Fahrzeug konnten gelegt werden. Es konnte ein sehr hoher Integrationsgrad des Systems erzielt werden. Dabei wurde ein modulares Konzept eingehalten, wie es als Projektziel vorgesehen war. Die vorhergehende Anforderungsdefinition konnte mit guter Basis erarbeitet werden, die Frage nach dem Weg zur Erstellung eines Missionprofiles wurde beantwortet. Ausstehend ist die Rückkopplung der Ergebnisse der Fahrzeugvermessung auf die eingangs eingebrachten Annahmen zum Fahrverhalten des Zielsystems. Damit konnte eine vollständige Bestätigung der Relevanz des Missionprofiles für die Lebensdaueranforderungen des Beispiel-Hybridsystems nicht erfolgen.

Wirtschaftlicher Aspekt

Die Kostenvorteile der Entfall eines zweiten Kühlkreislaufs in Hybridfahrzeugen war die Motivation dieses Projektvorhabens. Durch die technische Demonstration der Machbarkeit ist die Möglichkeit, dieses Kostenpotenzial zu erschließen gezeigt und kann zum wirtschaftlichen Erfolg zukünftiger Hybridfahrzeuge beitragen.

Da die Hochtemperatur-Leistungselektronik mit Verbesserungen der heute in Serienfertigungen eingesetzten Produktionsmethoden gelungen ist, kann man bei einem Serieneinsatz mit maximal moderat erhöhten Komponentenkosten rechnen, so dass ein merklicher Systemkostenvorteil bleibt.

Die Verbesserung der Lebensdauer der einzelnen Umrichterkomponenten lässt auch für heutige am Niedrigtemperaturkreislauf betriebene Systeme beispielsweise durch Einsparung von Halbleiterfläche Kostenvorteile erwarten, die aber im Einzelfall zusammen mit den Mehrkosten bewertet werden müssen.

Allgemein

Mit der Darstellung eines Hochtemperatur-Antriebsumrichters, dem Funktionsnachweis im Prüfstandsbetrieb unter Grenztemperaturbedingungen und der Integration des Umrichters in ein Beispiel-Hybridfahrzeug wurde das Projektziel erreicht.

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 **BMW-Vodr. 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 Spezifikation der Systemanforderungen und Verifikation der Systemperformance	
3b. Titel der Publikation	
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Dr. Christian Mertens	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.06.2010
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))	6. Veröffentlichungsdatum 28.02.2011
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Volkswagen AG Konzernforschung Antriebe - Antriebssysteme Berliner Ring 2 D-38440 Wolfsburg	7. Form der Publikation
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 53107 Bonn	9. Ber.Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 19 U 6007F
	11a. Seitenzahl Bericht 17
	11b. Seitenzahl Publikation
	12. Literaturangaben
	14. Tabellen
	15. Abbildungen 11
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Das Forschungsziel des Projektes InGA bestand in der Ertüchtigung aller Bauteile eines leistungselektronischen Wechselrichters zur Ansteuerung eines elektrischen Antriebs im Hybridfahrzeug für den Betrieb am gleichen Kühlkreislauf mit dem Verbrennungsmotor. Die Ergebnisse sind in den Aufbau eines Demonstrationsumrichters eingeflossen, welcher abschließend in ein Demonstrationsprototypfahrzeug integriert wurde. Zunächst konnte zur Ableitung der Anforderungen an die Wechselrichterkomponenten in einem solchen System ein Verfahren entwickelt werden, das auch die lebensdauerrelevanten Temperaturzykluszahlen im Vorfeld zur Systemauslegung einschätzbar macht. Für die eingeführten Aufbautechnologien zeigte sich, dass diese erwartungsgemäß den abgeleiteten hohen Anforderungen an eine Hochtemperatur-Leistungselektronik nicht auf Lebensdauer standhalten würden. Die im Projektverlauf verfolgten technischen Neuerungen an Leistungsmodul, Kondensator und Controllerboard konnten den Zuverlässigkeitsrahmen aller Bauteile schließlich derart erweitern, dass die Anforderungen erfüllbar wurden. Beim Aufbau des Demonstrationsumrichters konnte ein Modularitätskonzept realisiert werden, das durch Skalierung der Komponenten Kostenvorteile verspricht. Mit dem direkten Anbau an die am Motorflansch montierte E-Maschine konnte zudem ein hoher Integrationsgrad in Bezug auf das Antriebssystem im Demonstrationsfahrzeug dargestellt werden. Mit der erfolgreichen Inbetriebnahme dieses Fahrzeugs ist der funktionelle Nachweis einer Hochtemperatur-Leistungselektronik zur Ansteuerung der E-Maschine in einem Hybridfahrzeug gelungen.	
19. Schlagwörter Hochtemperatur-Leistungselektronik, Hybridfahrzeug, Hybridantrieb, Zuverlässigkeit, Lebensdauer, Aufbau- und Verbindungstechnik, Fahrzyklus, Mission Profile, Leistungselektronik-Integration	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of Report	
3a. Report Title Derivation of system specifications and validation of system performance		
3b. Title of Publication Dr. Christian Mertens		
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s))		5. End of Project 30.06.2010
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s))		6. Publication Date 28.02.2011
		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. 19 U 6007F
		11a. No. of Pages Report 17
		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
		15. No. of Figures 11
16. Supplementary Notes		
17. Presented at (Title, Place, Date)		
18. Abstract Research objective of the InGA project was the enhancement of all parts of a power electronics converter for controlling the electric machine in a hybrid drive using a common cooling circuit with the combustion engine. The results of this were used for set-up a demonstration converter which was integrated into a demonstration hybrid car at the end of the project. In the beginning a method to derive the requirements for the converter component in such a system was developed. Via this method the number of temperature cycles relevant for life time could be estimated. As expected the requirements on a high temperature power electronic converter exceed the reliability of the state-of-the-art packaging and joining techniques. During the project new developments on power module, capacity and controller board resulted in an improvement of reliability of all parts such that all requirements could be met. In the set-up of the demonstration converter a modular concept could be realized that promises cost advantage by only scaling the components. By direct mounting the converter to the electric machine a very high degree of integration related to the complete power train of the demonstration car could be realized. At the end of the project the setting up of this car showed generally the function of a high temperature power electronic converter for controlling the electric machine in a hybrid car.		
19. Keywords High temperature power electronics – hybrid cars – hybrid power train – reliability – power electronic packaging – joining technique – driving cycle – mission profile – power electronic integration		
20. Publisher		21. Price