

# Abschlussbericht

zum Verbundvorhaben



---

**Zuwendungsempfänger:**

Futavis GmbH  
Nerscheider Weg 170  
52076 Aachen

**Förderkennzeichen:**

16EM4009-1

---

**Vorhabenbezeichnung:**

Convert – CONVertER for Trucks

---

**Laufzeit des Vorhabens:**

01.09.2019 – 31.08.2022

---

**Projektpartner**

RWTH Aachen University – Institut für  
Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe



---

**SIEMENS**

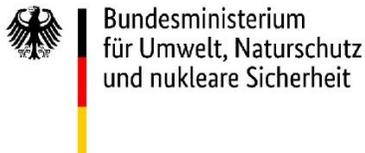
Siemens Mobility GmbH  
(assoziiertes Partner)



Werkzeugmaschinenlabor  
WZL der RWTH Aachen

---

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



---

**VDI | VDE | IT**

# 1. Allgemeiner Teil

## 1.1. Dokument und Projekt bearbeitende Personen

Tabelle 1.1 Dokument und Projekt bearbeitende Person

Name, Vorname	Kürzel	Firma	Position	Aufgabe im Projekt
Rib, Georg	rib	Futavis GmbH	Projektleiter/in	Projektleiter
Prang, Carsten	prn	Futavis GmbH	QM	Administration
Bockstette, Jens	bck	Futavis GmbH	Geschäftsführer	Beaufsichtigung

## 1.2. Verzeichnisse

### 1.2.1. Inhaltsverzeichnis

1. Allgemeiner Teil .....	2
1.1. Dokument und Projekt bearbeitende Personen .....	2
1.2. Verzeichnisse .....	2
1.2.1. Inhaltsverzeichnis .....	2
1.2.2. Abbildungsverzeichnis .....	3
1.2.3. Tabellenverzeichnis .....	3
1.2.4. Referenzen, Literatur- und Dokumentenverzeichnis .....	4
1.2.5. Abkürzungsverzeichnis .....	4
2. Zusammenfassung .....	5
3. Zielstellung des Verbundprojektes .....	6
3.1. Gesamtziel des Verbundes .....	6
3.2. Aufgaben der einzelnen Partner .....	9
3.2.1. Rolle von Futavis .....	10
3.2.2. Rolle von Siemens .....	10
3.2.3. Rolle des ISEA .....	10
3.2.4. Rolle des WZL .....	10
4. Ausführliche Darstellung der erzielten Ergebnisse .....	11
4.1. Zusammenfassung .....	11
4.2. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse .....	11
4.2.1. AP3: Auslegung und Entwicklung eines DC-DC Wandlers .....	11
4.2.2. AP4: Auslegung und Entwicklung des Sicherheitskonzepts .....	16
4.2.3. AP6: Entwicklung der Steuerung und der Regelungsalgorithmen .....	21
4.2.4. AP7: Aufbau und Inbetriebnahme .....	25
4.3. Arbeitsplan .....	29
5. Stand und Zukunft der Technik .....	30
5.1. Vergleich der Projektergebnisse zum internationalen Stand der Technik .....	30

5.2.	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses und der Erfahrungen ..	31
5.3.	Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) .....	31
5.4.	Darstellung der erfolgten oder geplanten Veröffentlichung des Ergebnisses .....	31

### 1.2.2. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1	Schematische Darstellung des Ladegeräts im Lastkraftwagen .....	8
Abbildung 3.2	Zusammenarbeit/Arbeitsteilung und Schwerpunkte der Partner .....	9
Abbildung 4.1	Gesamtsystem .....	12
Abbildung 4.2	Anteile thermischer Widerstand (links), Schalter-Isolator-Kühler (rechts).....	13
Abbildung 4.3	Resonanzkondensator .....	14
Abbildung 4.4	Magnetik und Kühlkörper.....	15
Abbildung 4.5	Elektronischer Leistungsteil.....	16
Abbildung 4.6	Sicherheitskonzept Converter-BMS-Zusammenspiel (BMS in Batterie) .....	18
Abbildung 4.7	Sicherheitskonzept Converter-BMS-Zusammenspiel (BMS nicht in Batterie) .....	18
Abbildung 4.8	Sicherheitskonzept BMS.....	19
Abbildung 4.9	Auszug Software-Architektur (BMS).....	20
Abbildung 4.10	Baugruppe BMS Master (links), Screenshot Schaltplan (rechts) .....	20
Abbildung 4.11	Zentrales Steuer Modul (ZSM) .....	22
Abbildung 4.12	Betriebszustände und -abläufe (grob).....	23
Abbildung 4.13	Betriebszustände und -abläufe (detailliert).....	24
Abbildung 4.14	Wandler im Gehäuse .....	25
Abbildung 4.15	SRC Ströme (gelb und lila) und Halbbrückenspannungen bei $U_{in} = U_{out} = 600V$ & $I_{in} = 300A$ .....	26
Abbildung 4.16	Abschalten bei Überstrom .....	27
Abbildung 4.17	Abschalten bei Übertemperatur.....	28
Abbildung 4.18	Abschalten bei Überspannung .....	29
Abbildung 5.1	Vergleich Wirkungsgrad und Verluste .....	30

### 1.2.3. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1	Dokument und Projekt bearbeitende Person .....	2
Tabelle 1.2	Abkürzungsverzeichnis .....	4
Tabelle 3.1	Anvisierte Spezifikationen der DC-DC-Wandler.....	7
Tabelle 4.1	Thermische Widerstände und erwartete Verlustleistungen für $I_{in} = 340A$ $V_{in} = V_{out} = 600V$ .....	13
Tabelle 4.2	Kenngroßen Trafo .....	14
Tabelle 4.3	Kenngroßen Induktivitäten .....	14
Tabelle 4.4	Sicherheitsziele auf Pantographen- und Batterie-Ebene .....	17
Tabelle 4.5	Kenngroßen PI-Regler .....	23

### 1.2.4. Referenzen, Literatur- und Dokumentenverzeichnis

- [1] D. e. a. Bündgen, „Highly Integrated 200 kW SiC Three-Phase Dual-Active-Bridge Converter with 3D-Printed Fluid Coolers,“ in *The 8th IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA)*, 2021.
- [2] „High Performance Advanced Drive Systems,“ Deutz AG, [Online]. Available: <https://deutz-electrified.com/>. [Zugriff am August 2022].
- [3] „Forschung & Innovation,“ Futavis GmbH, [Online]. Available: <https://www.futavis.de/unternehmen/#forschung-innovation>. [Zugriff am 12 August 2022].

### 1.2.5. Abkürzungsverzeichnis

Tabelle 1.2 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
AP	Arbeitspaket
BMS	Batterie-Management-System
CMD	Command for Controller
DC	Direct current, Gleichspannung
FPGA	Field Programmable Gate Array
GPIO	General Purpose Input/Output
HV	Hochvolt
IGBT	Insulated-gate bipolar transistor, Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode
IML	Intermediate-Layer
MCU	Microcontroller Unit
OC	Over current, Überstrom
OT	Over temperature, Übertemperatur
OV	Over voltage, Überspannung
PWM	Pulsweitenmodulation
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
SRC	Serienresonanter Wandler
UT	Under temperature, Untertemperatur
UV	Under voltage, Unterspannung

## 2. Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts wurde erstmalig ein solches Ladegerät erforscht. Aufgrund der angestrebten Projektdauer von nur 2 Jahren erfolgte die Entwicklung in verschiedenen Ansätzen:

1. Entwicklung und Aufbau eines galvanisch getrennten leistungselektronischen Oberleitungsladegeräts für einen Leistungsbereich von circa 200 kW. Dieses dient zur Ladung der Batterie des Lastkraftwagens während der Fahrt an einer Oberleitung. Dabei standen insbesondere die benötigten Sicherheitsfeatures sowie die Schnittstellen, z.B. Kommunikation, für die Integration in einen Lastkraftwagen mit Pantographen im Vordergrund. Der DC-DC-Wandler im Ladegerät wurde auf Basis von etablierten Halbleiter-Technologien aufgebaut.
2. Entwicklung und Aufbau eines galvanisch getrennten, modular gefertigten, leistungselektronischen DC-DC-Wandlers basierend auf neuester Siliziumkarbid-Technologie für höchste Leistungsdichten von 10 kW/l. Durch die Verwendung von Siliziumkarbidhalbleitern konnte die Effizienz bei gleichzeitig erhöhter Leistungsdichte gesteigert werden, und bietet dadurch langfristige Integrations- und Kostenvorteile. Das entwickelte Forschungsmuster hat die möglichen Potentiale aufzeigen können und dient damit als High-End-Prototyp für die zukünftigen Entwicklungen von Ladegeräten für Oberleitungslastkraftwagen.
3. Erforschung von additiv gefertigten Umformwerkzeugen zur Verbindung der leistungselektronischen Blöcke innerhalb des DC-DC-Wandlers. Durch den modularen und hochintegrierten Ansatz des High-End-Forschungsmusters wird eine komplexe Geometrie für die Verbindungselemente der leistungselektronischen Blöcke benötigt, z.B. für die typischerweise aus Kupfer gefertigten Busbars. Um dennoch eine kostengünstige und seriennahe Umsetzung zu gewährleisten, wurden Umformwerkzeuge mittels additiver Fertigungsverfahren hergestellt. Durch die dreidimensionale Fertigung wurden zudem völlig neuartige Verbindungsgeometrien innerhalb des Wandlers schon während des Prototypenbaus umzusetzen umgesetzt.

Im ersten Schritt wurden alle Spezifikationen, Sicherheitsanforderungen und Topologien festgelegt. Daraufhin galt es alle Teilkomponenten inklusive Halbleiter, passiven Komponenten und Verbindungselementen der Wandler vollständig auszulegen. Im letzten Schritt wurden die Wandler aufgebaut, vermessen und bewertet. Sodass das Ladegerät für die Integration in einen Lastkraftwagen bereitsteht. Die Durchführung der Arbeitspakete und Erreichung der Meilensteine verlief nach Zeitplan, es gab keine Abweichungen zum Arbeitsplan.

### 3. Zielstellung des Verbundprojektes

#### 3.1. Gesamtziel des Verbundes

Um den CO<sub>2</sub>-Ausstoß im straßengebundenen Güterverkehr zu senken, ist der Umstieg von herkömmlichen Verbrennungsmotoren auf elektrische Antriebe unumgänglich. Da der straßengebundene Güterverkehr stetig wächst und schon heute signifikant zur CO<sub>2</sub>-Belastung beiträgt, bieten sich hier große Einsparpotentiale. Oberleitungen für Lastkraftwagen auf Autobahnen bieten hinsichtlich ökologischer als auch ökonomischer Faktoren eine effektive Option, den Güterverkehr zu elektrifizieren und so die Umweltbelastung zu reduzieren. Um den Ausbau der benötigten Infrastruktur schnell und flächendeckend zu realisieren, bietet sich eine abschnittsweise Ausrüstung der Autobahnen mit Oberleitungen als eine effiziente Lösung an. Für diesen Anwendungsfall verfügen die Lastkraftwagen über eine Batterie, die an den elektrifizierten Abschnitten der Autobahnen über einen Pantographen während der Fahrt wieder aufgeladen wird, sodass die benötigten Standzeiten zum Laden verringert werden.

Für die Realisierung dieses Konzepts wird allerdings ein geeignetes, leistungselektronisches Ladegerät benötigt, das die Anforderungen an hohe elektrische Leistung bei hoher Effizienz, hoher Leistungsdichte, Sicherheitsvorkehrungen und Wirtschaftlichkeit erfüllt.

Die Sicherheit des elektrischen Antriebsstrangs und ein fehlertoleranter Betrieb des Fahrzeugs und aller anderen Lastkraftwagen, die an derselben Oberleitung angeschlossen sind, müssen gewährleistet sein. Dafür ist zwingend eine galvanische Trennung der elektrischen Komponenten von der Oberleitung erforderlich, welche analog zur Bahntechnik über einen Transformator erfolgt. Dadurch nehmen die Leistungsdichte und Effizienz der leistungselektronischen Wandler zwangsweise ab. Dies steht im Gegensatz zu den Anforderungen an die Integration in einen Lastkraftwagen, die eine hohe Robustheit, Leistungsdichte und geringe Kosten voraussetzt. Diese gegenläufigen Anforderungen können nur durch technologisch hochentwickelte Konzepte adressiert werden.

Im Rahmen des Projekts soll erstmalig ein solches Ladegerät erforscht werden. Aufgrund der angestrebten Projektdauer von nur 2 Jahren erfolgt die Entwicklung in verschiedenen Ansätzen:

1. Entwicklung und Aufbau eines galvanisch getrennten leistungselektronischen Oberleitungsladegeräts für einen Leistungsbereich von circa 200 kW. Dieses dient zur Ladung der Batterie des Lastkraftwagens während der Fahrt an einer Oberleitung. Dabei stehen insbesondere die benötigten Sicherheitsfeatures sowie die Schnittstellen, z.B. Kommunikation, für die Integration in einen Lastkraftwagen mit Pantographen im Vordergrund. Der DC-DC-Wandler im Ladegerät wird auf Basis von etablierten Halbleitertechnologien aufgebaut.
2. Entwicklung und Aufbau eines galvanisch getrennten, modular gefertigten, leistungselektronischen DC-DC-Wandlers basierend auf neuester Siliziumkarbid-Technologie für höchste Leistungsdichten von 10 kW/l. Durch die Verwendung von Siliziumkarbidhalbleitern kann die Effizienz bei gleichzeitig erhöhter Leistungsdichte gesteigert werden, und bietet dadurch langfristige Integrations- und Kostenvorteile. Das entwickelte Forschungsmuster soll die möglichen Potentiale aufzeigen und dient damit als High-End-Prototyp für die zukünftigen Entwicklungen von Ladegeräten für Oberleitungslastkraftwagen.

3. Erforschung von additiv gefertigten Umformwerkzeugen zur Verbindung der leistungselektronischen Blöcke innerhalb des DC-DC-Wandlers. Durch den modularen und hochintegrierten Ansatz des High-End-Forschungsmusters wird eine komplexe Geometrie für die Verbindungselemente der leistungselektronischen Blöcke benötigt, z.B. für die typischerweise aus Kupfer gefertigten Busbars. Um dennoch eine kostengünstige und seriennahe Umsetzung zu gewährleisten, sollen Umformwerkzeuge mittels additiver Fertigungsverfahren hergestellt werden. Durch die dreidimensionale Fertigung sind zudem völlig neuartige Verbindungsgeometrien innerhalb des Wandlers schon während des Prototypenbaus umzusetzen.

Im Zuge des Projekts wird erstmalig ein leistungselektronisches Ladegerät im Leistungsbereich von 200 kW entwickelt und aufgebaut. Mit Hilfe dieses Ladegeräts kann die Batterie über eine Oberleitung und einen Pantographen während der Fahrt aufgeladen werden. Die Effizienz des Wandlers soll mehr als 95% betragen. Eine galvanische Trennung ist aufgrund von Sicherheitsaspekten, z.B. im Fall eines elektrischen Kurzschlusses auf der Oberleitungsseite, erforderlich. Die anvisierten Spezifikationen der DC-DC-Wandler im Ladegerät sind in Tabelle 3.1 zu sehen.

Tabelle 3.1 Anvisierte Spezifikationen der DC-DC-Wandler

<b>Elektrische Leistung</b>	200 kW
<b>Eingangsspannung</b>	500 V - 780 V
<b>Ausgangsspannung</b>	600 V - 750 V
<b>Max. Überspannung</b>	1015 V, 20 ms *
<b>Nominaler Ausgangsstrom</b>	350 A
<b>Effizienz</b>	> 95%
<b>Leistungsdichte</b>	10 kW/l **
<b>Maximales Gewicht</b>	25 kg (ohne Kühlkörper) **
<b>Maximales Volumen</b>	21 l **
* Nur bei ausgeschaltetem Ladegerät	
** Nur High-End-Forschungsmuster	

Abbildung 3.1 zeigt schematisch die zu erforschenden Komponenten und die Einbindung in den elektrischen Antriebsstrang eines elektrischen Lastkraftwagens.

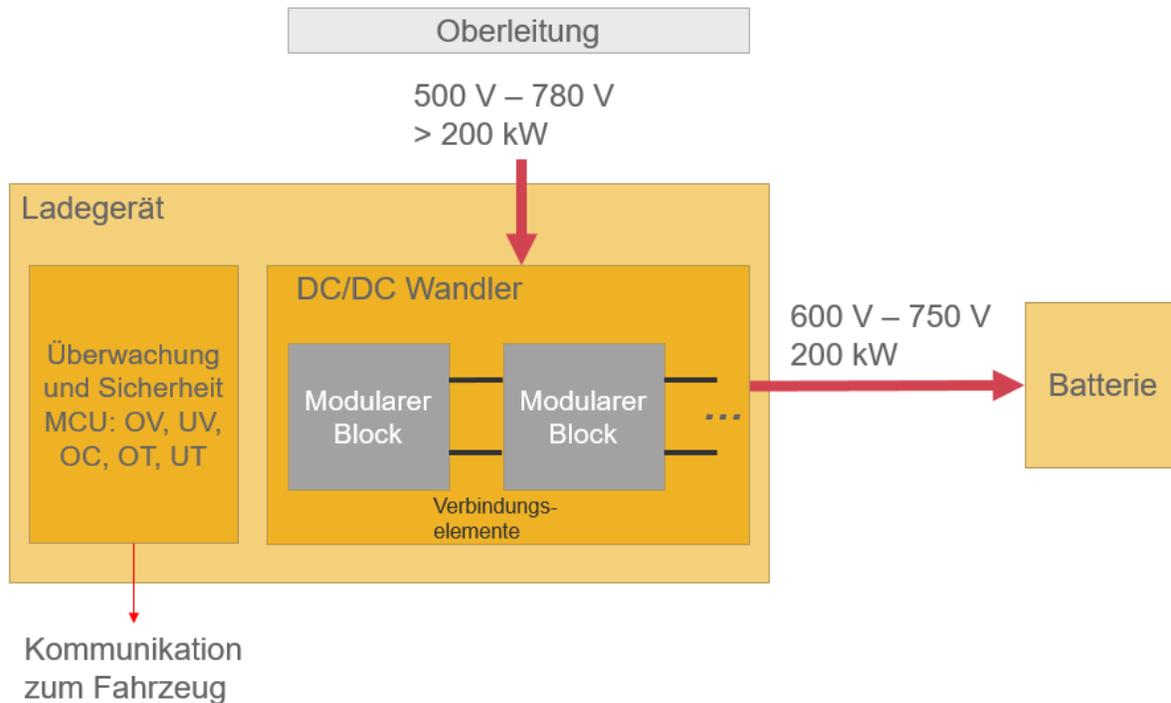


Abbildung 3.1 Schematische Darstellung des Ladegeräts im Lastkraftwagen

Bei der Entwicklung des Oberleitungsladegeräts steht die Entwicklung und Erprobung von Sicherheitsvorkehrungen wie z.B. einem Überspannungsschutz, welcher bei Systemen mit Pantographen unabdingbar ist, im Vordergrund, sodass ein fehlertoleranter Betrieb ermöglicht wird. Darüber hinaus werden die erforderlichen Sicherheits- und Kommunikationsschnittstellen für die Integration in einen Lastkraftwagen entwickelt und getestet. Der DC-DC-Wandler in diesem Ladegerät wird zunächst basierend auf etablierten Halbleitertechnologien aufgebaut.

Gleichzeitig wird ein Forschungsmuster eines leistungselektronischen, hochintegrierten DC-DC-Wandlers mit neuesten Halbleitertechnologien erforscht und entwickelt. Durch Verwendung von Siliziumkarbid-Halbleitern kann die Schaltfrequenz drastisch erhöht werden, wodurch passive Komponenten verkleinert werden können. Dadurch können Gewicht und Volumen des DC-DC-Wandlers deutlich verringert werden. Dies schlägt sich in einer einfacheren Integration in einen Lastkraftwagen sowie langfristig in Kostenvorteilen nieder. Des Weiteren soll der Prototyp modular aufgebaut werden und höchste Effizienz aufweisen. Der High-End DC-DC-Wandler wird dabei mit identischen elektrischen Schnittstellen wie der DC-DC-Wandler mit etablierter Halbleitertechnologie entwickelt, um einen einfachen Austausch zu gestatten.

Die elektrische und mechanische Verbindung der modularen, leistungselektronischen Blöcke zu einem funktionalen DC-DC-Wandler ist bezüglich der Produzierbarkeit, Kosten und Flexibilität eine Herausforderung. Beispielsweise sind aus Kupfer gefertigte Busbars für die elektrische Verbindung der modularen Blöcke notwendig. Mit Hilfe neuer additiver Fertigungsverfahren sollen neue Umformwerkzeuge erforscht werden, die eine kostengünstige und seriennahe Fertigung solcher Verbindungselemente ermöglichen. Damit soll der Weg vom High-End-Forschungsmuster zu einer seriennahen Fertigung aufgezeigt werden. Zudem können Potentiale durch neue Geometrien für den Aufbau von Ladegeräten aufgezeigt werden. Die Realisierbarkeit der Strukturen anhand der additiv gefertigten Umformwerkzeuge wird mit den Prototypen validiert.

Um die Potentiale eines hochintegrierten und automobiltauglichen Oberleitungsladegeräts auf Basis von neuartigen Technologien aufzuzeigen, wurden die verfolgten Ansätze in der finalen Phase des Projekts zusammengeführt und getestet. Durch die Einhaltung identischer elektrischer Schnittstellen können die DC-DC-Wandler des Oberleitungsladegeräts jederzeit ausgetauscht werden. Auf diese Weise kann das Sicherheits- und Kommunikationskonzept des zur Zertifizierung vorbereiteten Oberleitungsladegeräts mit dem modularen, hochintegrierten DC-DC-Wandler kombiniert und die Gesamtsystempotentiale aufgezeigt werden. Die Fertigungsverfahren bilden dabei die Schnittstelle, um das High-End-Forschungsmuster des Wandlers in ein seriennahes System zu überführen. Auf diese Weise konnte innerhalb von nur zwei Jahren ein hochintegriertes Oberleitungsladegerät entwickelt werden, das den Anforderungen an den automobilen Einsatz (Kommunikation, Sicherheitsfunktionen, etc.) entspricht und gleichzeitig die Potentiale der neuen Technologien (Siliziumkarbidhalbleiter, Hochintegration) sowie deren seriennahe Umsetzung (additive Umformwerkzeuge) aufzeigt.

Durch die Entwicklung und den Aufbau des hochintegrierten Ladegeräts können erstmalig elektrische Lastkraftwagen entworfen werden, die lange Strecke bei geringen Ladezeiten vollständig elektrisch zurücklegen. Langfristig kann so der straßengebundene Güterverkehr vollständig elektrisch und damit emissionsfrei erfolgen.

### 3.2. Aufgaben der einzelnen Partner

Abbildung 3.2 zeigt die geplante Zusammenarbeit und Arbeitsteilung im Projekt. Die Rolle der einzelnen Projektpartner einschließlich ihrer Arbeitsschwerpunkte werden im Folgenden kurz erläutert. Weitere Einzelheiten können der Arbeitspaketbeschreibung in Abschnitt 4.1 entnommen werden.

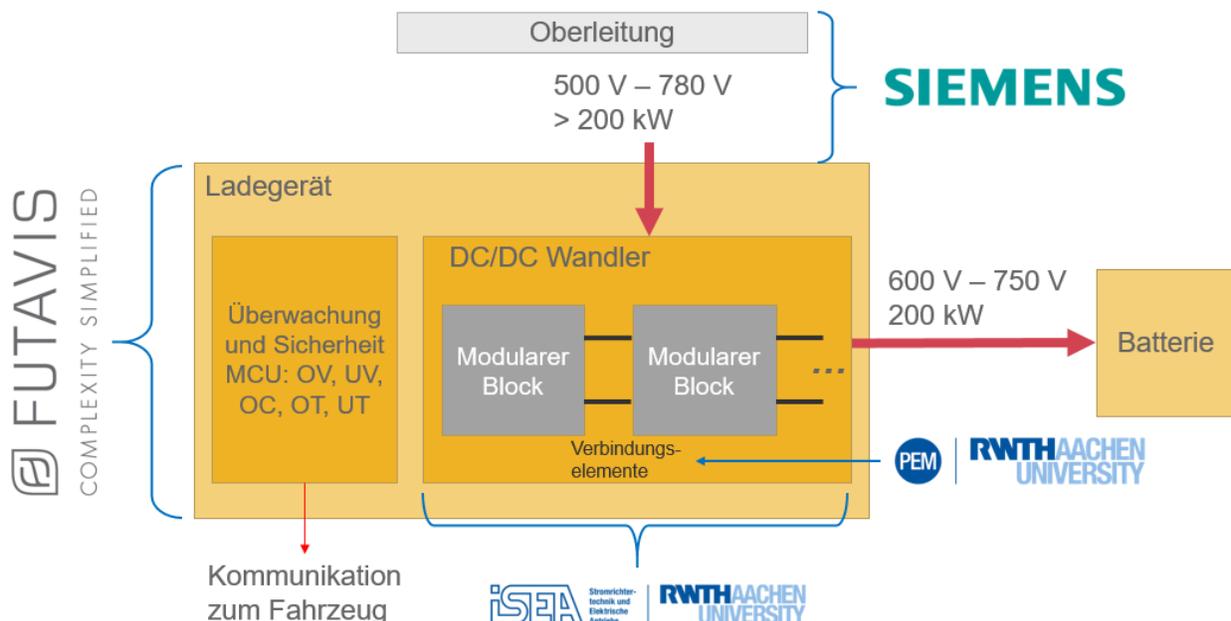


Abbildung 3.2 Zusammenarbeit/Arbeitsteilung und Schwerpunkte der Partner

### **3.2.1. Rolle von Futavis**

Die Futavis GmbH entwickelte ein Ladegerät für Oberleitungslastkraftwagen. Zielsetzung war die Implementierung von notwendigen Sicherheitsfunktionen, damit das Ladegerät zertifizierungsfähig ist. Außerdem wurden entsprechende Schnittstellen integriert, um einen Tausch der DC-DC-Wandler zu ermöglichen. Zusätzlich entwickelte Futavis alle erforderlichen Sicherheitseinrichtungen zur Überwachung der Batterie. Der DC-DC Wandler wurde nach aktuellem Stand der Technik aufgebaut.

### **3.2.2. Rolle von Siemens**

Die Siemens Mobility hat sich als assoziierter Partner im Rahmen des Projekts bei der Abstimmung von Schnittstellen bzw. Anforderungen für das Gesamtkonzept eingebracht. Weiter hat die Siemens Mobility GmbH Informationen zum Pantographensystem bereitgestellt, die für die zielgerichtete Entwicklung des Oberleitungsladegeräts und weitere Komponenten benötigt wurden.

### **3.2.3. Rolle des ISEA**

Das ISEA hat im Rahmen des Projekts die Auslegung des High-End DC-DC-Wandlers im Oberleitungsladegerät auf Basis von modernen, schnellschaltenden Siliziumkarbid-Halbleitern erforscht. Neben dem modularen Layout der Leistungselektronik stand die Auslegung der passiven Bauteile sowie die Regelung des Ladegeräts im Vordergrund. Der Aufbau der erforderlichen integrierten Logikschaltungen (Treiber, Spannungsversorgung) und Sensorik für schnellschaltende Ladegeräte wurde ebenfalls betrachtet.

### **3.2.4. Rolle des WZL**

Im Zuge des Projekts hat sich das WZL mit der Entwicklung von Verbindungselementen und additiv hergestellten Werkzeugen für die umformtechnische Herstellung von Verbindungselementen befasst. Dabei spielten sowohl die technische als auch wirtschaftliche Machbarkeit eine Rolle. Durch die Verwendung der neuen Werkzeuge konnten auch in Prototypen seriennahe Technologien verwendet und somit die Entwicklungszeiten reduziert werden.

## 4. Ausführliche Darstellung der erzielten Ergebnisse

### 4.1. Zusammenfassung

#### 4.2. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Im Folgenden wird auf die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete der Futavis eingegangen.

##### 4.2.1. AP3: Auslegung und Entwicklung eines DC-DC Wandlers

Ziel des Arbeitspaketes war es auf Basis der Spezifikationen aus AP 1 den DC-DC-Wandler für das Oberleitungsladegerät zu entwickeln. Futavis entwickelte einen robusten DC-DC-Wandler basierend auf etablierten Halbleitertechnologien.

###### 4.2.1.1. Topologie-Auswahl

Der DC-DC-Wandler regelt den Leistungsfluss zwischen Fahrzeug und der DC-Oberleitung.

Aufgrund äußerer Einflüsse kann die Spannung an der DC-Leitung stark schwanken. Hinzu kommt, dass der Stromabnehmer nicht in allen Situationen einen ausreichenden Kontakt zur Oberleitung sicherstellen kann, so dass mit Stromabrissen und plötzlichem Wiederkehren der Versorgung am Eingang zu rechnen ist.

Daher wurde sich für einen zweistufigen Aufbau entschieden, bei der die Eingangsstufe die Netzspannung auf eine höhere interne Spannung hochsetzte. Die schaltenden Leistungshalbleiter sahen dann nur die fixe interne Zwischenkreisspannung und nicht die schwankende Eingangsspannung. Die Topologie ist in Abb. 1 zu sehen. Durch die höhere interne Spannung wurde zudem sichergestellt, dass es bei wiederkehrender Versorgungsspannung nicht zu einem hohen „Inrush-Current“ kam, da der Stromanstieg durch die Induktivitäten der Eingangsphasen begrenzt wurde und zudem die Eingangsspannung im Betriebsbereich unterhalb der internen Zwischenkreisspannung lag.

Die eigentliche galvanische Trennung zur Batterie fand in der zweiten Stufe statt. Diese bestand aus zwei Serienresonanten Wandlern (SRC), die als Spannungswandler fungierten und rein gesteuert betrieben wurden. Durch den geringen Spannungshub der Ausgangsspannung (600 V – 750 V), konnte der Transformator gut ausgenutzt werden.

Die beiden SRCs wurden batterieseitig parallel und netzseitig in Serie verschaltet. So ergab sich durch das Übersetzungsverhältnis von 1:1 eine interne Systemspannung von 1200 V – 1500 V. Die netzseitige Serienschaltung erlaubte den Einsatz von 1200V-SiC-Leistungsschaltern, welche im hartschaltenden Booster-Betrieb aufgrund ihrer geringen Schaltverluste im Vergleich zu IGBTs höhere Schaltfrequenzen erlaubten.

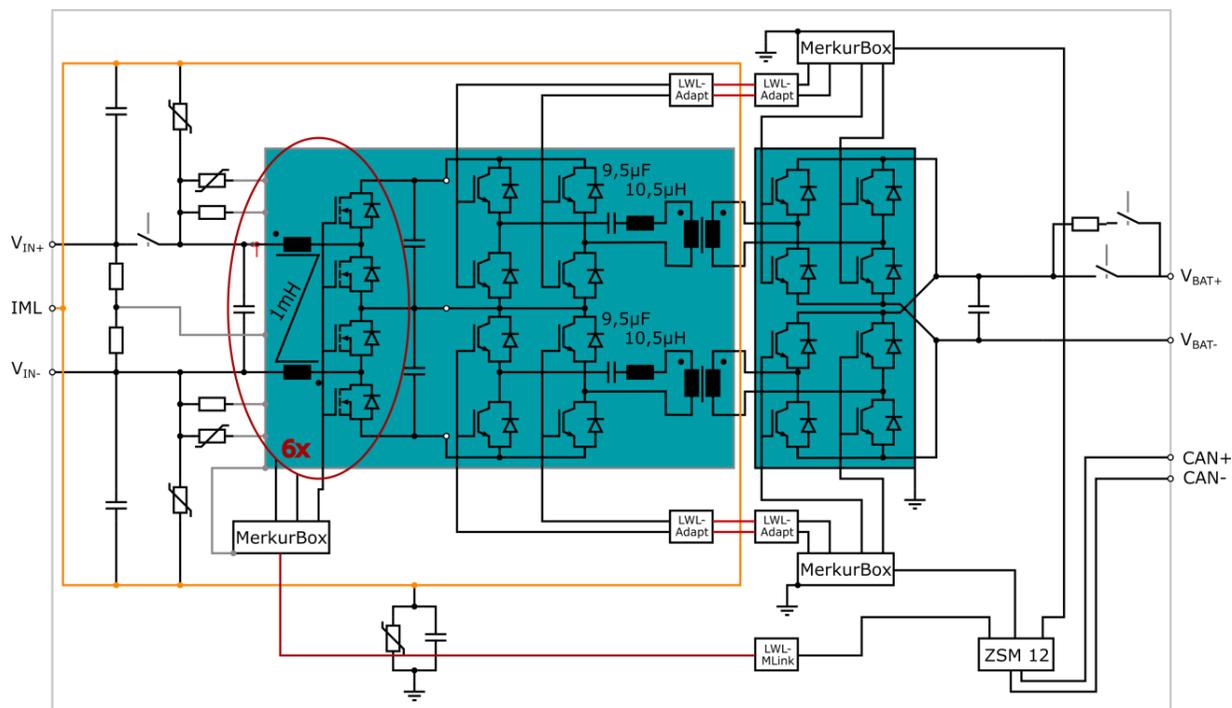


Abbildung 4.1 Gesamtsystem

Die SRC erlaubte (bei korrektem Betrieb) ein spannungsloses Einschalten der Halbleiter und relative geringe Ausschaltströme. Daher wurde hier auf IGBT-Technik zurückgegriffen. Die Resonanzfrequenz lag bei ca. 16kHz, während die Schaltfrequenz bei ca. 15kHz lag. Ursächlich hierfür waren die langen Totzeiten, die eine Verlängerung der Schaltperioden erforderten, um ideales Schaltverhalten zu erzielen.

#### 4.2.1.2. Aufbau / Elektrische Auslegung und Kühlkonzept

Aufgrund der Platzanforderungen und der Einbauflexibilität wurde sich für eine Wasserkühlung entschieden. Denn neben dem Platzbedarf ist auch die Möglichkeit der Wärmeabfuhr zu berücksichtigen, welche eine erwartete Größenordnung von 6-8kW erreichen kann.

Eine Besonderheit des Wandlers bestand darin, dass ein sogenannter Intermediate-Layer zwischen jedes Potential auf HV-Seite und GND des Systems gezogen werden musste. Das Potential dieses Layers wies sowohl zum HV-Teil als auch zu GND hin einen hohen Isolationswiderstand von  $R > 1M\Omega$  auf.

Aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit des Kühlmediums Wasser, sind die Kühlkörper auf GND-Potential. Funktionsbedingt lag der Intermediate-Layer also im thermischen Pfad. Der Gehäuseboden der Halbleitermodule wurde daher auf Intermediate-Layer-Potential gelegt und wurde elektrisch durch eine zusätzliche Keramik-Platte vom Kühlkörper getrennt. Zwar ist der thermische Widerstand der (AIN-) Keramik-Platte vernachlässigbar, es wurde jedoch ein zusätzlicher thermischer Übergangswiderstand in den Wärmepfad eingefügt. Dieser war für die SiC-MOSFETs im Easy1B-Gehäuse wie folgt anhand des Übergangswiderstands eines 62mm-Moduls abgeschätzt:

$$R_{th,iso} = R_{th,62mm} \cdot \frac{A_{62mm}}{A_{Easy1B}} < 0,1K/W$$

Für den Booster wurde ein 6phasiger Aufbau gewählt, um die Stromtragfähigkeit eines einzelnen Halbleitermoduls (Typ: FF11MR12W1M1) nicht zu überschreiten. Es existierten zwar auch SiC-Halbleitermodule mit einem höheren Nominal-Strom. Allerdings wiesen diese höhere Schaltverluste auf als das ausgewählte Halbleiter-Modul.

Als Kühlkörper, für jeweils 6 Module, wurde der Kühlkörper WK 140.14 in 400mm Länge von der Firma Austerlitz verwendet. Bei der anvisierten Durchflussmenge von 12L/Min. ergab sich hier ein Widerstand von  $R_{th,HS} < 0,01$  K/W. Umgerechnet auf ein Modul ergab sich vereinfacht ein Widerstand von 0,1K/W (Korrekturfaktor, da eingebrachte Verlustleistung nur punktuell, und nicht vollflächig eingebracht wurde).

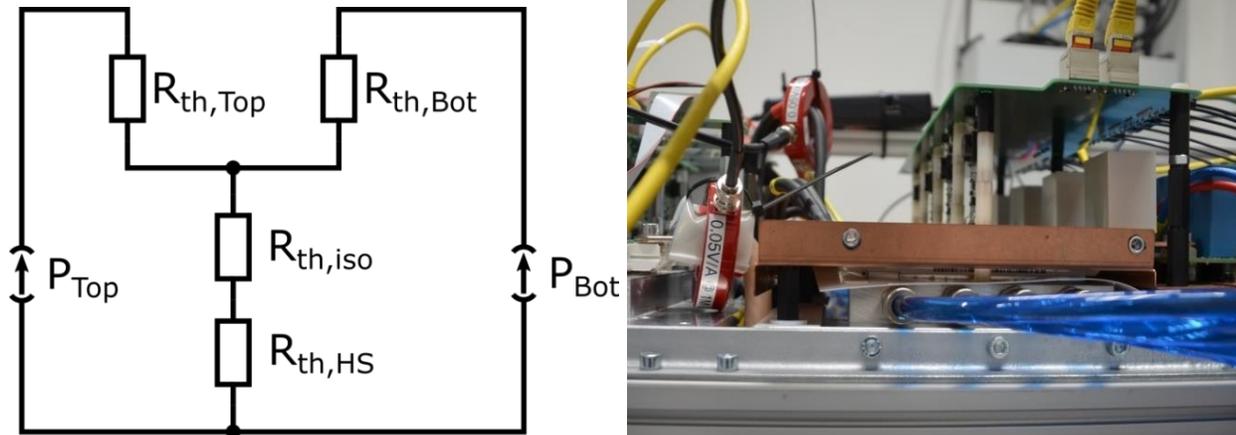


Abbildung 4.2 Anteile thermischer Widerstand (links), Schalter-Isolator-Kühler (rechts)

Tabelle 4.1 Thermische Widerstände und erwartete Verlustleistungen für  $I_{in} = 340A$   $V_{in} = V_{out} = 600V$

Modul	Schaltungsteil	$f_{sw}$	$R_{th,HS}$	$R_{th,iso}$	$R_{th,Top/Bot}$	$P_{Top}$	$P_{Bot}$
FF11MR12W1M1	Booster	28kHz	0,1K/W	0,1K/W	0,553K/W	58W	24W
FF450R12ME4	SRC	16kHz	0,05K/W	0,03K/W	0,066K/W	160W	160W

Die Verlustleistungen wurden mit dem Schaltungssimulationsprogramm PLECS unter der Annahme ermittelt, dass die Kühlkörpertemperatur 80°C nicht überschritt.

Ein Unsicherheitsfaktor waren hierbei die Schaltverluste der im SRC verwendeten Halbleitermodule. Diese waren zwar Topologie-bedingt gering, da die Schalter lediglich den Magnetisierungsstrom des Transformators ausschalten mussten. Allerdings war die Schaltfrequenz für ein solches Modul hoch und die Verlustangaben im Datenblatt für so kleine Ströme nicht angegeben. Zudem musste der Wandler auch in der Lage sein zusätzliche Schaltverluste aushalten zu können für den Fall, dass die Resonanzfrequenz nicht ideal getroffen wurde.



Abbildung 4.3 Resonanzkondensator

Der Resonanzkondensator (Abbildung 4.3) ist aus mehreren kleinen Kondensatoren des Typen C4GAMUC4100AA1J der Firma Kemet zusammengesetzt. Die Strombelastung berechnet sich wie folgt:

$$I_{DC} = \frac{I_{out}}{2} = 150A$$

$$I_{res,rms} = I_{DC} \cdot \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} = 167A$$

Die Resonanzinduktivität ist in das Transformatorgehäuse integriert.

Tabelle 4.2 Kenngrößen Trafo

<b>Nennleistung <math>P_N</math></b>	100 kW
<b>Max. Betriebsspannung <math>U_N</math></b>	750 V
<b>Wicklungsverhältnis <math>N1/N2</math></b>	1:1
<b>Frequenz <math>f</math></b>	16 kHz
<b>Gewicht</b>	41 kg
<b>Hauptinduktivität <math>L_m</math></b>	1,9 mH
<b>Resonanzinduktivität <math>L_{res}</math></b>	10,5 $\mu$ H
<b>Verlustleistung <math>P_{loss}</math></b>	340 W
<b>Besonderheiten</b>	Schirmwicklung (für IML-Anschluss)

Tabelle 4.3 Kenngrößen Induktivitäten

<b>Nennstrom <math>I_N</math></b>	60 A
<b>Rippelstromanteil <math>I_{pp}/I_N</math></b>	ca. 23%
<b>Max. Betriebsspannung <math>U_N</math></b>	1500 V
<b>Induktivität</b>	1 mH

<b>Frequenz</b>	28 khz
<b>Gewicht</b>	11,5 kg
<b>Verlustleistung <math>P_{\text{loss}}</math></b>	100 W

Aufgrund der im Vergleich zu den Halbleitern geringeren Verluste, wurden die magnetischen Komponenten durch dieselben Kühlkörper gekühlt, auf denen auch die Halbleiter montiert waren. Da sie größere Abmaße hatten, waren sie jedoch noch auf eine Adapterplatte geschraubt, auf welche dann der Kühlkörper mit den Halbleitern geschraubt war.

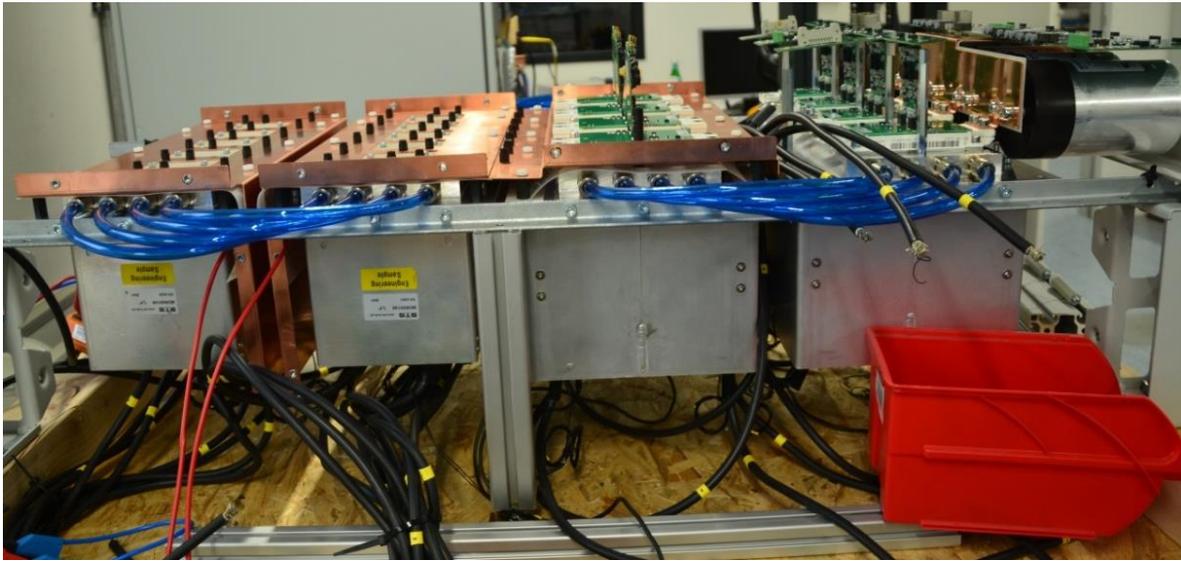


Abbildung 4.4 Magnetik und Kühlkörper

Abbildung 4.4 zeigt den Prototypen in der Aufbauphase. Die Magnetik waren hier hängend unter die Kühlkörper geschraubt. Links im Bild befindet sich die Eingangsseite. Die Phaseninduktivitäten waren in 2 Reihen angeordnet. Dann folgten rechts die beiden Trafos. Auf der Oberseite befanden sich die Leistungsschalter, von denen hier in der Abbildung 3 nur die IGBTs der SRCs montiert wurde.

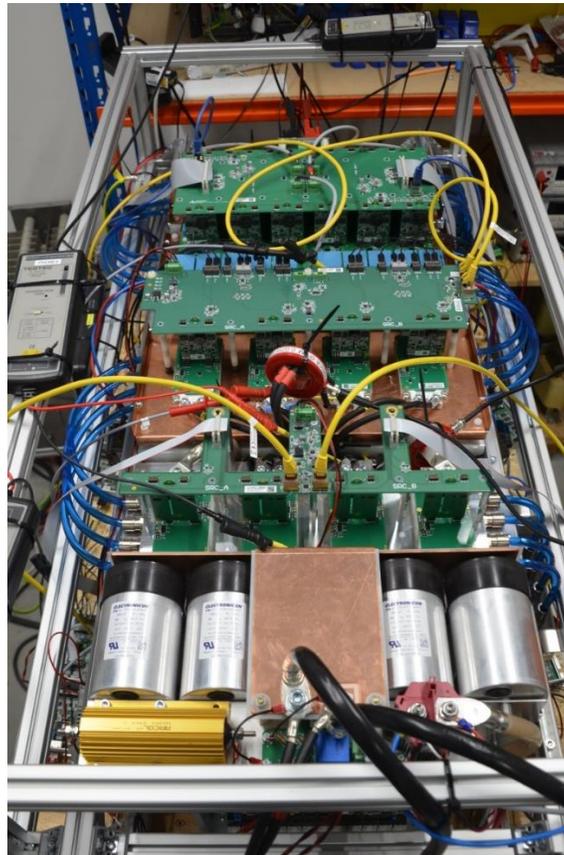


Abbildung 4.5 Elektronischer Leistungsteil

Abbildung 4.5 zeigt den Aufbau der Elektronik. Im oberen Teil sind die 6 Treiber der Eingangsphasen zu erkennen, dann folgen jeweils die beiden Vollbrücken der SRCs.

#### 4.2.2. AP4: Auslegung und Entwicklung des Sicherheitskonzepts

Für den Einsatz im Feldversuch wurden geeignete Schutzkonzepte entwickelt, die einen sicheren Betrieb während der Fahrt an einer Oberleitung für das Ladegerät und die Batterie gewährleisten. Es wurden sowohl hardwareseitige als auch softwareseitige Schutzkonzepte untersucht. Ziel war die Entwicklung eines gesamtheitlichen Schutzkonzepts, das die elektrischen Parameter (Ladestrom, Ladespannung) während des Ladevorgangs überwacht und im Fehlerfall eine entsprechende Fehlerreaktion einleitet.

##### 4.2.2.1. Entwicklung der Schutzschaltungen

Anhand der Spezifikationen aus AP 1 wurden insbesondere anwendungsspezifische Sicherheitsfunktionen für das Laden der Batterie über einen Pantographen an einer Oberleitung erforscht. Diese beinhalteten eine Über- und Unterspannungsbegrenzung beziehungsweise Abschaltung, insbesondere für kritische Überspannungen beim Einfahren der Lastkraftwagen in die Oberleitungen, als auch eine Spannungsfestigkeit gegenüber Überspannungen im ausgeschalteten Zustand. Außerdem wurden die Eingangs- und Ausgangsströme auf ein sicheres Level begrenzt, um sowohl Lastkraftwagen als auch Oberleitung zu schützen. Tabelle 4 gibt eine Übersicht der Sicherheitsziele auf Pantographen- und Batterie-Ebene.

Tabelle 4.4 Sicherheitsziele auf Pantographen- und Batterie-Ebene

<b>Pantograph</b>	<b>Batterie</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Überstromschutz: Converter schaltet sich bei einem Überstrom in der Eingangsseite ab</li> <li>• Überspannungsschutz: Converter schaltet sich bei einer Überschreitung der Pantographenspannung ab</li> <li>• Inrush-current Begrenzung: Ein hoher Strom, der aus einem kurzzeitigen Abriss der Spannungsversorgung resultiert, wird begrenzt, so dass das System keinen Schaden nimmt</li> <li>• Polaritätsprüfung der Eingangsspannung: Vor dem Aufschalten aufs Netz erfolgt eine Polaritätsprüfung des Eingangs</li> <li>• Entladung des Zwischenkreiskondensators in &lt; 1s auf &lt; 60V</li> <li>• Primärseitiger Intermediate-Layer (IML)</li> <li>• Anschlüsse für externen Isolationswächter zwischen HV-Leitungen und IML, IML/Chassis</li> <li>• Steuer-/Signalleitungen der HV-Teile durch Lichtwellenleiter getrennt, um die Isolationssicherheit zu erhöhen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Überstromschutz: Converter schaltet sich bei einem Überstrom in der Ausgangsseite ab</li> <li>• Spannungsbereichsschutz: Converter schaltet sich bei einer Verletzung des Ausgangsspannungsbereichs ab</li> <li>• Entladung des Zwischenkreiskondensators in &lt; 1s auf &lt; 60V</li> </ul>

Die Ergebnisse der funktionalen Sicherheitsanalyse beruhen auch auf den Erfahrungen aus vergangenen Batterieentwicklungen für Fahrzeuge. Die Sicherheitsfunktionen wurden aus Sicht der funktionalen Sicherheit als ASIL QM eingestuft. Entscheidend und damit die größte Herausforderung, war die Sicherstellung der elektrischen Sicherheit, wie z. B.:

- Sicherstellung der Isolation und die Einhaltung der Betriebsgrenzen.
- Sicherstellung der Spannungsfreiheit, wenn das Fahrzeug sich in der Wartung befindet oder abgestellt wird
- Batterie muss sich beim Verlassen ihres spezifizierten Betriebsbereichs vom Umrichter trennen

Abbildung 4.6 stellt das aus den Anforderungen entwickelten Sicherheitskonzepte dar, welches davon ausgeht, dass die Batterie bereits durch ein Futavis BMS überwacht wird, sodass dies die Aufgaben der redundanten Überwachung des Converters übernehmen kann.

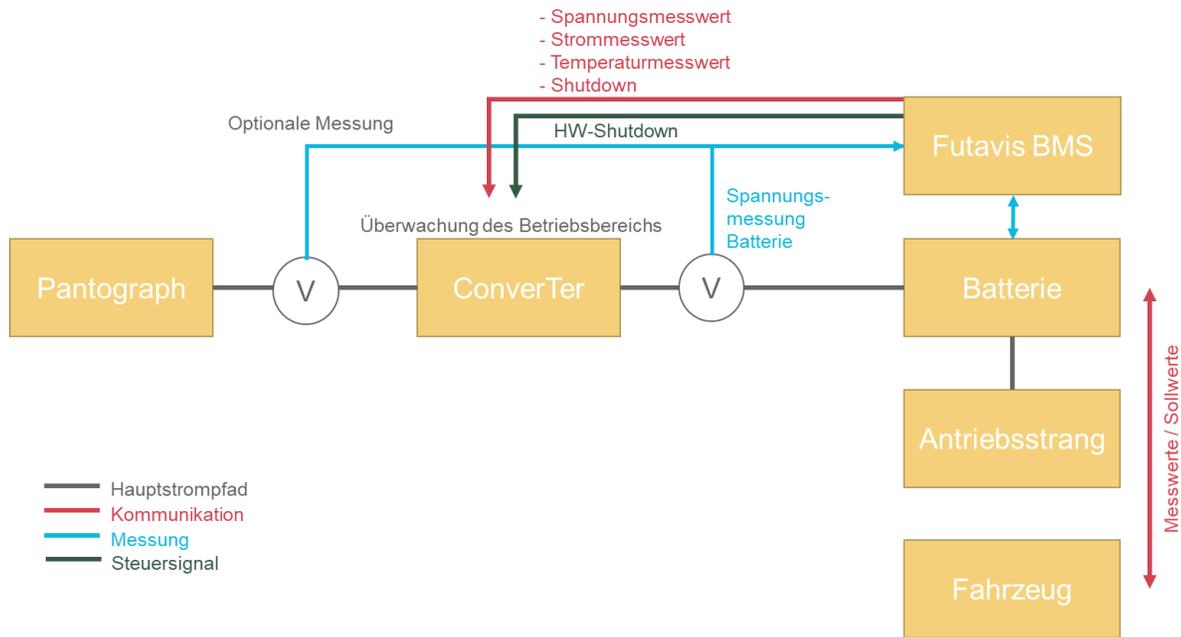


Abbildung 4.6 Sicherheitskonzept Converter-BMS-Zusammenspiel (BMS in Batterie)

Abbildung 4.7 stellt das aus den Anforderungen entwickelten Sicherheitskonzepte dar, welches davon ausgeht, dass die Batterie nicht durch ein Futavis BMS überwacht wird, sodass der BMS Master als zusätzliche Komponente eingesetzt werden kann und die Aufgaben der redundanten Überwachung des Converters übernehmen kann.

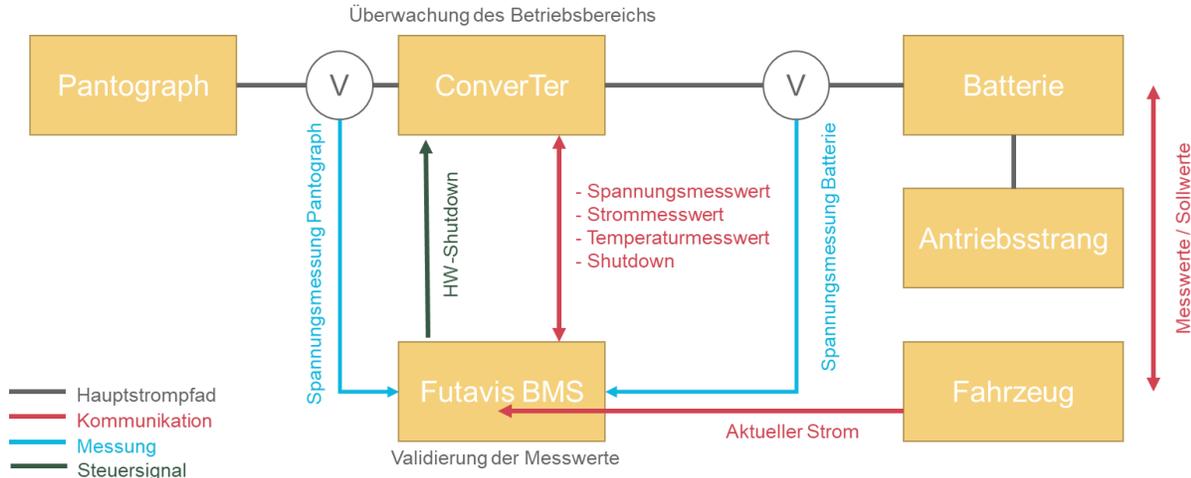


Abbildung 4.7 Sicherheitskonzept Converter-BMS-Zusammenspiel (BMS nicht in Batterie)

Der Converter überwacht seinen Betriebsbereich selbständig und schaltet sich bei einer Verletzung ab. Eine redundante Überwachung des Converter-Betriebsbereichs (Spannung, Strom, Temperatur) wird durch das Futavis BMS gewährleistet. Der Shutdown des Converters kann über CAN-Nachricht oder als letzte Instanz über ein Steuersignal initiiert werden.

Im nächsten Schritt wurde sichergestellt, dass das Sicherheitskonzepte des BMS (vgl. Abbildung 4.8) sich schlüssig in das hier entwickelte Konzept integriert und die nötigen Schnittstellen zur Verfügung stehen.

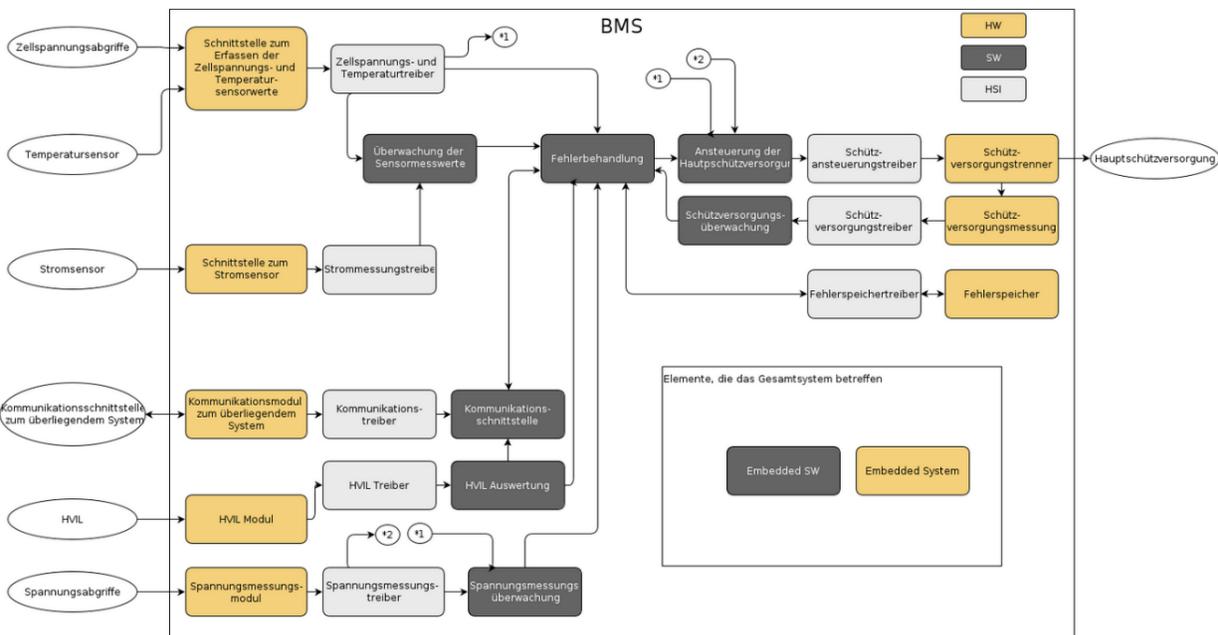


Abbildung 4.8 Sicherheitskonzept BMS

#### 4.2.2.2. Implementierung einer Softwareüberwachung

In diesem Arbeitspaket wurden die Funktionen der Überwachung des Converters in die Software implementiert, sodass eine sichere Abschaltung im Fehlerfall während des Betriebs gewährleistet wurde und sowohl Lastkraftwagen als auch die Oberleitung vor Schäden geschützt werden. Alle erforderlichen Sicherheitsmechanismen zur Überwachung der Batterie (Nur bei Variante 1 - Abbildung 4.6) und Converter wurden integriert. Für die Überwachung der elektrischen Parameter während des Ladevorgangs mussten die entsprechenden Parameter durch die Software eingelesen und verarbeitet werden. Ziel der Überwachung war es, das Erreichen des sicheren Zustandes (Hauptstrompfad ist getrennt) zu gewährleisten, wenn eine Verletzung oder Überschreitung der sicherheitsrelevanten Parameter im System vorlag.

Die entsprechenden Schnittstellen zwischen Hardwarefunktionen (Sensoren) und Softwaretreibern wurden entwickelt. Die erfassten Werte wurden in der Software-Applikation weiterverarbeitet und bewertet. Die Applikation-Software sollte beim Überschreiten von definierten Grenzwerten eine entsprechende Fehlerreaktion auslösen. Das BMS stellte damit eine redundante Plausibilisierung der Spannungs- Strom- und Temperaturmesswerte des Converters zur Verfügung. Sollte der Converter selbst nicht abschalten war das BMS in der Lage eine Abschaltaufforderung abzugeben.

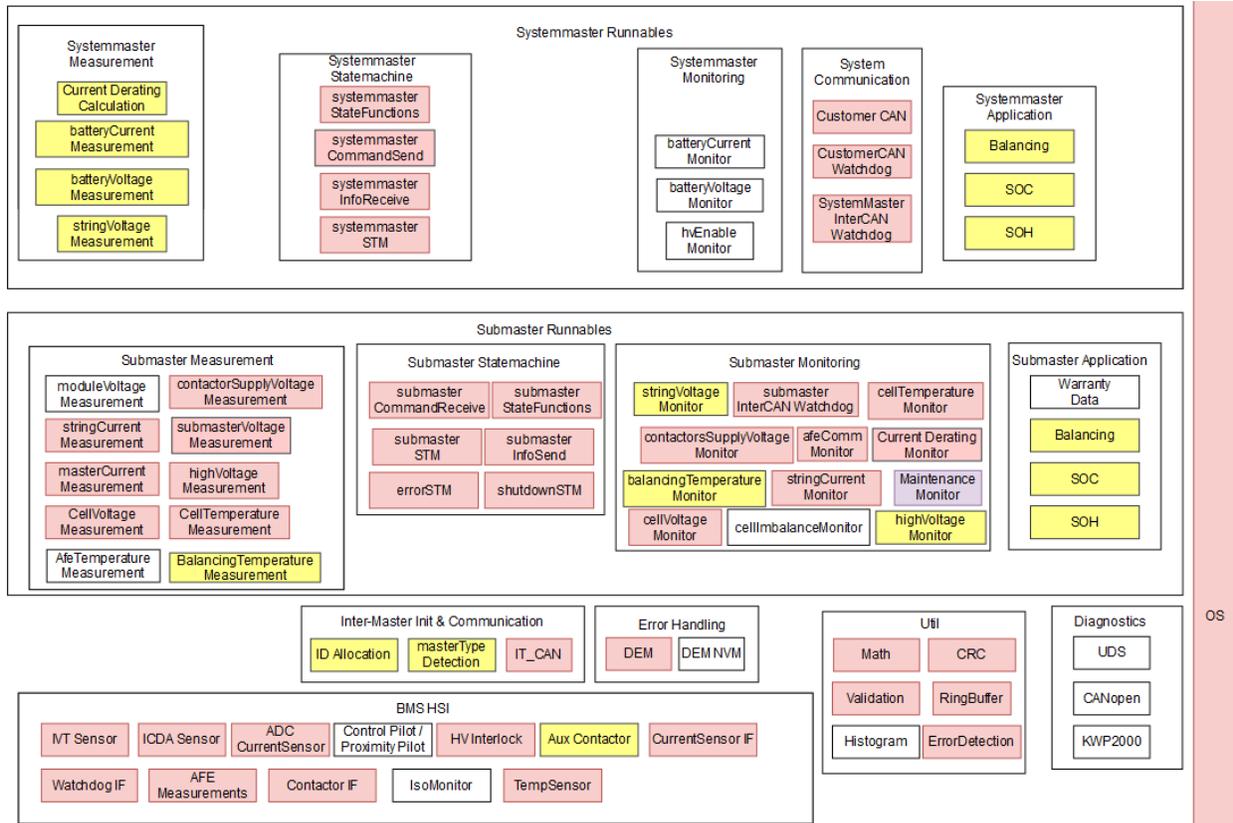


Abbildung 4.9 Auszug Software-Architektur (BMS)

Abbildung 4.9 stellt einen Teil der Architektur der Software des BMS dar, welcher die nötigen Software-Module bereitstellt, um die Spannungs-, Strom- und Temperaturmesswerte zu überwachen und um die bilaterale Kommunikation zu gewährleisten.

#### 4.2.2.3. Layout der Schutzschaltungen

Die erforderlichen Schaltpläne, Leiterplattenlayouts und mechanischen Elemente für die Implementierung der Schutzschaltungen, welche das BMS darstellt, wurden adaptiert, bestellt und bestückt.

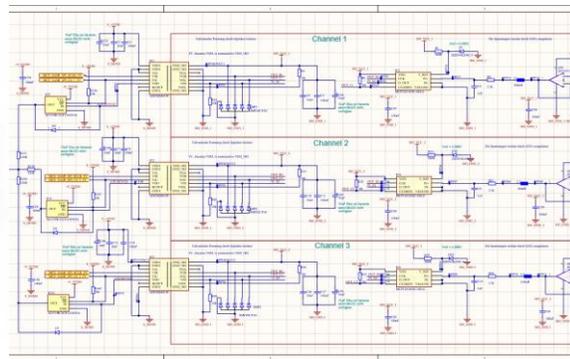


Abbildung 4.10 Baugruppe BMS Master (links), Screenshot Schaltplan (rechts)

Der Master des von der Futavis entwickelten Batteriemanagementsystems stellt die nötigen Hardware-Funktionen und Schnittstellen bereit.

Charakteristische Daten des BMS Masters:

- Prozessor - ARM-Cortex - R4F – 160MHz
- Externer Watchdog
- Spannungsversorgung 8 V ... 36 V
- GPIOs:
- Enable, HV Enable, Charge Enable
- ID Vergabe, HV Interlock
- 2 separate CAN-Schnittstellen
- Kommunikation zu den Slaves
- On-board-Temperatur-Messung
- 2 Strommessungen (bis zu 1.5kA), Messung mittels LEM–DHAB-Serie
- CAN Stromsensoren
- 3 Spannungsmessungen (bis zu 1000V)
- Bis zu 6 Relay-Treiber (bis zu 3 A pro Treiber)

#### **4.2.3. AP6: Entwicklung der Steuerung und der Regelungsalgorithmen**

Die für den Betrieb der leistungselektronischen Schaltungen notwendigen Steuer- und Regelverfahren wurden entwickelt. Dabei wurden intelligente Algorithmen untersucht, die eine hohe Effizienz und den stabilen Betrieb des Wandlers ermöglichten. Die erforderliche Regelungsplattform für die Inbetriebnahme der Funktionsmuster wurde implementiert.

##### **4.2.3.1. Regelungsplattform und Sensorik**

Als Regelungsplattform wurde ein Zentrales Steuermodul (ZSM12) verwendet, welches dezentral verschiedenen Satelliten (MERKUR-Box) ansteuern konnte, auf denen die Messwerterfassung, als auch die Pulsgenerierung erfolgte, siehe auch Abbildung 4.1.

Dabei konnten die PWM-Ausgänge der einzelnen Satelliten auf  $\pm 10 \text{ ns}$  genau synchronisiert werden. Die zentrale Recheneinheit (ZSM12) kommunizierte mittels Merkur-Link-Protokoll mit den verschiedenen Merkurboxen. Die Hauptkomponente einer Merkurbox war ein FPGA. Dieses wertete in erster Linie die angeschlossene Sensorik aus und sendete diese zusammen mit weiteren Informationen in einem Merkur-Link-Paket an die zentrale Recheneinheit. Außerdem wertete es die empfangenen Merkurlink-Pakete aus und steuerte die Halbleiter oder Schütze entsprechend an.

Durch die Verwendung einer LWL-Kommunikation für den Merkur-Link war außerdem eine einfache und sichere galvanische Trennung zwischen dem HV-Teil und der zentralen Recheneinheit sichergestellt.

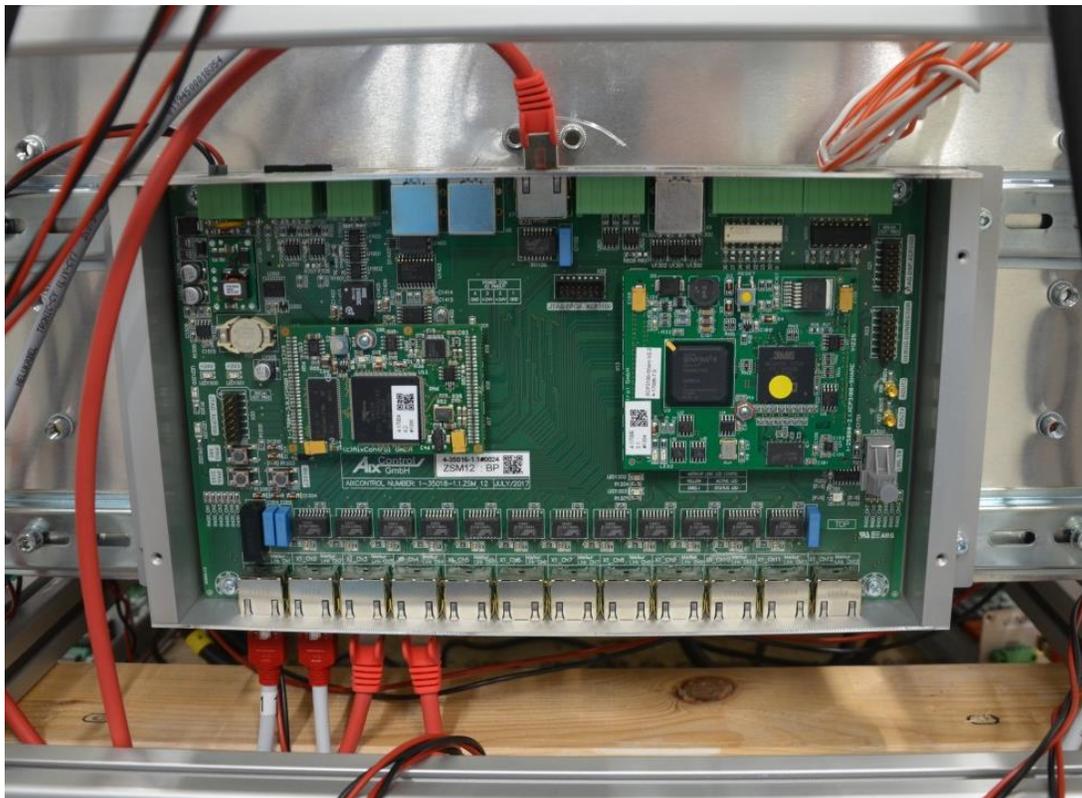


Abbildung 4.11 Zentrales Steuer Modul (ZSM)

Abbildung 4.11 zeigt das Zentrale Steuermodul, an das insgesamt vier Merkur-Boxen angeschlossen wurden (über die unteren vier Ethernet-Kabel). Die beiden grauen Ethernet-Kabel unten links führten dabei aber erst noch zu einem LWL-Umsetzer zur galvanischen Trennung, da sich die beiden Merkurboxen im HV-Teil befanden.

Um den batterieseitigen Ausgangs-Strom-Rippel zu reduzieren, wurden die beiden SRCs um  $45^\circ$  phasenversetzt angesteuert. Ebenfalls zur Reduzierung des Eingangs-Strom-Rippels wurden die sechs Eingangsphasen um  $60^\circ$  phasenversetzt angesteuert. Da SRC und Eingangsstufe zusätzlich auch noch mit verschiedenen Schaltfrequenzen liefen bestand bei klassischen Analog-Digital-Wandlern die Gefahr, dass ein Sample-Zeitpunkt zeitlich sehr nah an einer Schalthandlung eines Leistungshalbleiters lag. Die von der Schalthandlung erzeugten elektromagnetischen Störaussendungen könnten den so abgetasteten Messwert erheblich stören.

Daher wurden die hier gemessenen Phasenströme mittels Delta-Sigma-Wandlern erfasst. Kurzzeitige Störungen im Delta-Sigma-Bitstream wirkten sich nicht so gravierend aus, wie bei einem klassischen DA-Wandler-Prinzip, da hierdurch automatisch eine digitale Mittelwertbildung stattfand, welche elektrisch nicht gestört werden konnte.

Aufgrund der benötigten Rechenzeit des Controllers betrug die Interrupt-Frequenz, mit der die Merkur-Link-Pakete versendet und die Messwerte im System aktualisiert wurden, 14kHz. Der Booster bekam also nur jede zweite Schaltperiode ( $f_{sw} = 28\text{kHz}$ ) einen neuen Tastgrad übermittelt. Innerhalb dieser Zeitabschnitte wurden die nächsten Stellgrößen berechnet. Somit bestimmte diese Kenngröße auch die maximal mögliche Dynamik des Systems. Die Phasenströme wurden über einen PI-Regler geregelt. Dessen Kenngrößen wurden in der folgenden Tabelle aufgelistet:

Tabelle 4.5 Kenngrößen PI-Regler

$L_{ph}$	1 mH
$K_P$	3,5
$K_I$	6130
$f_{IRQ}$	14 kHz

Daraus ergibt sich eine Reglerbandbreite von

$$f_{BW} = \frac{K_P}{2\pi \cdot L_{ph}} = 557 \text{ Hz}$$

Die folgenden Abbildungen zeigen die Übersicht der Betriebszustände und -abläufe (Statemachine). Die einzelnen Zustände wurden in AP 7 durchfahren und in Betrieb genommen.

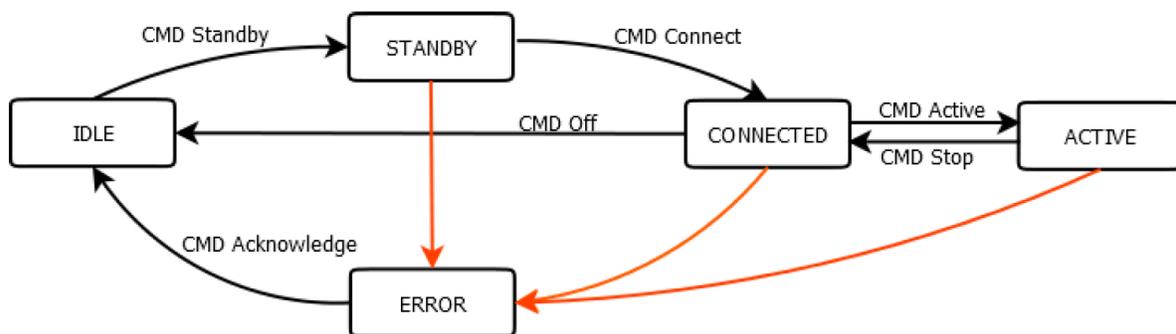


Abbildung 4.12 Betriebszustände und -abläufe (grob)

Die einzelnen Betriebszustände des Converters haben die folgenden Funktionen:

- Idle: Der Converter ist inaktiv und wartet auf Kommandos.
- Standby: Der Zwischenkreis ist geladen und die SRC regeln.
- Error: Der Converter ist inaktiv und wartet auf eine Bestätigung.
- Connected: Der Converter hat eine Verbindung zum Netz.
- Active: Der Converter regelt den Energiefluss.

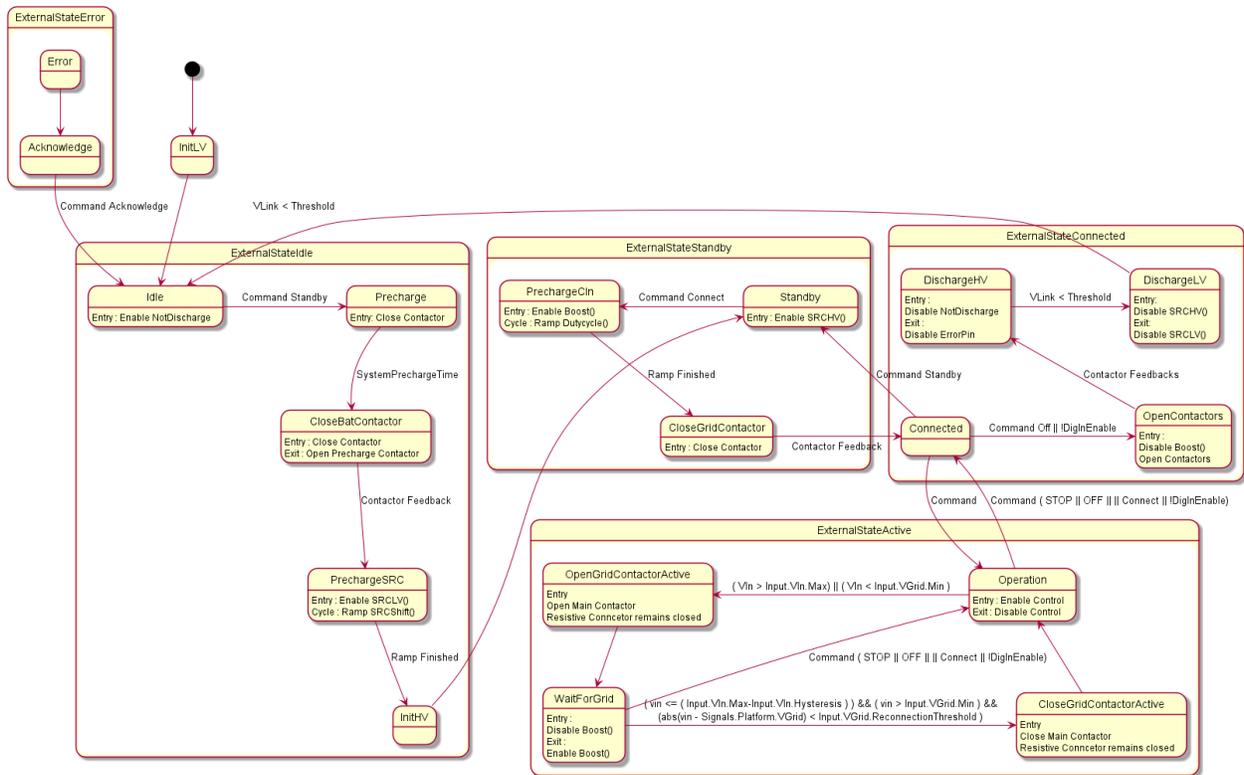


Abbildung 4.13 Betriebszustände und -abläufe (detailliert)

#### 4.2.4. AP7: Aufbau und Inbetriebnahme

Die in den vorherigen Arbeitspaketen entwickelten DC-DC-Wandler wurden aufgebaut und in Betrieb genommen.

##### 4.2.4.1. Aufbau

Siehe Beschreibung und Bebilderung in Kapitel 4.2.1.2. Die folgenden Bilder zeigen ergänzend den fertigen Wandler im Gehäuse.



Abbildung 4.14 Wandler im Gehäuse

##### 4.2.4.2. Inbetriebnahme des leistungselektronischen Gesamtsystems

Da sich die Spannungsbereiche von Ein- und Ausgang des Wandlers überschneiden, wurde der Ausgang des Wandlers für erste Tests mit seinem Eingang verbunden und zusätzlich durch ein geeignetes HV-Netzteil versorgt. Somit konnte der volle Strom bei voller Spannung „im Kreis“ gefahren werden, während das HV-Netzteil nur die Verlustleistung des Systems nachführen musste. Dies erleichtert auch die Bestimmung des Wirkungsgrads.

Abbildung 4.15 zeigt die charakteristischen Verläufe von Strom und Spannung in der SRC. Gut zu erkennen ist die lange Totzeit, während der die Ausgangskapazität der Halbbrücken umschwingt.

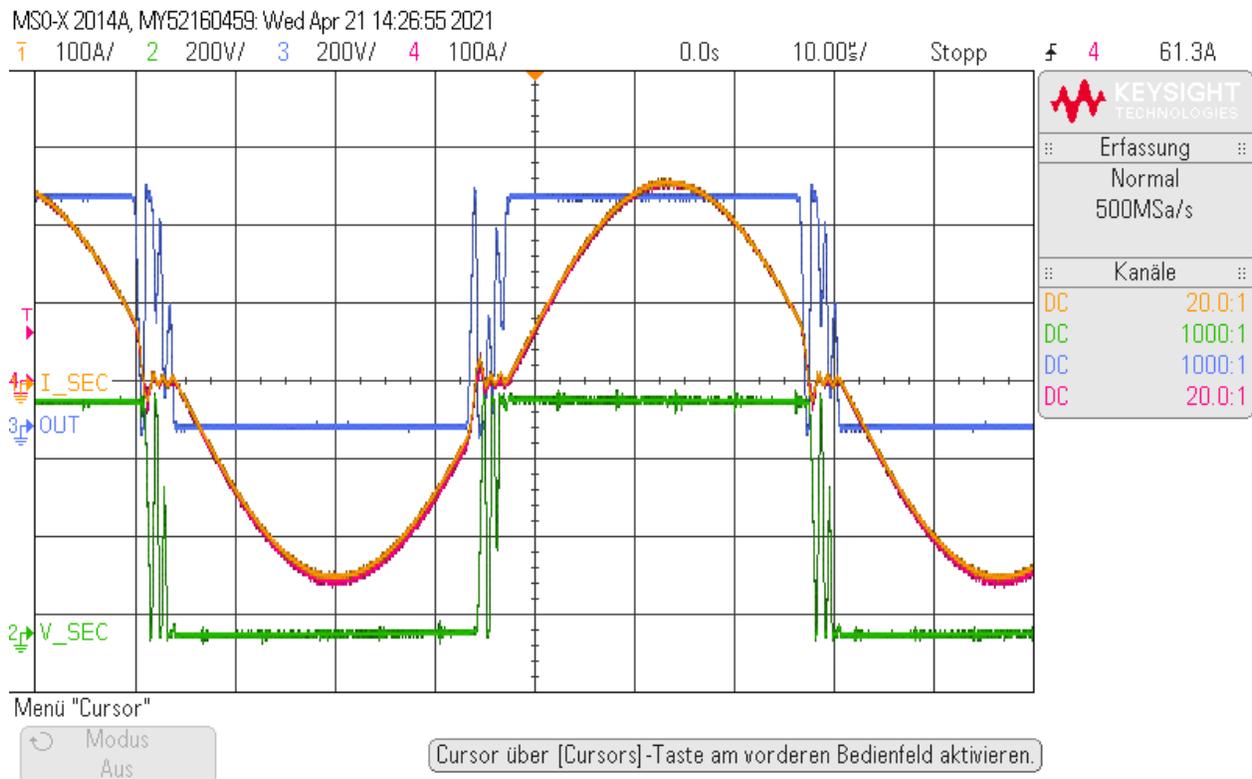


Abbildung 4.15 SRC Ströme (gelb und lila) und Halbbrückenspannungen bei  $U_{in} = U_{out} = 600V$  &  $I_{in} = 300A$

Der über die zugeführte Leistung ermittelte Wirkungsgrad des Systems beläuft sich bei  $U = 600V$  und  $I = 330A$  auf ca. 96,3%. Bei kleineren Leistungen wird sogar deutlich über 97% erreicht.

#### 4.2.4.3. Inbetriebnahme der Sicherheitsschaltungen

Zur Inbetriebnahme der Sicherheitsschaltungen Übertemperatur, Überstrom und Überspannung wurden entsprechend der Sicherheitsfunktion Signale an den Eingang des Converters angelegt, um die eingestellten Grenzwerte zu überschreiten.

##### 4.2.4.3.1. Überstrom:

In Abbildung 4.16 ist das Abschalten bei einem Überstrom dargestellt. Dazu wurde der Stromgrenzwert für die Stromabschaltung reduziert und der Converter in den Aktiven-Betriebszustand gebracht. Beim Überschreiten des Stromgrenzwerts schaltet der Converter die Schütze der Eingangs- und Ausgangsseite ab.

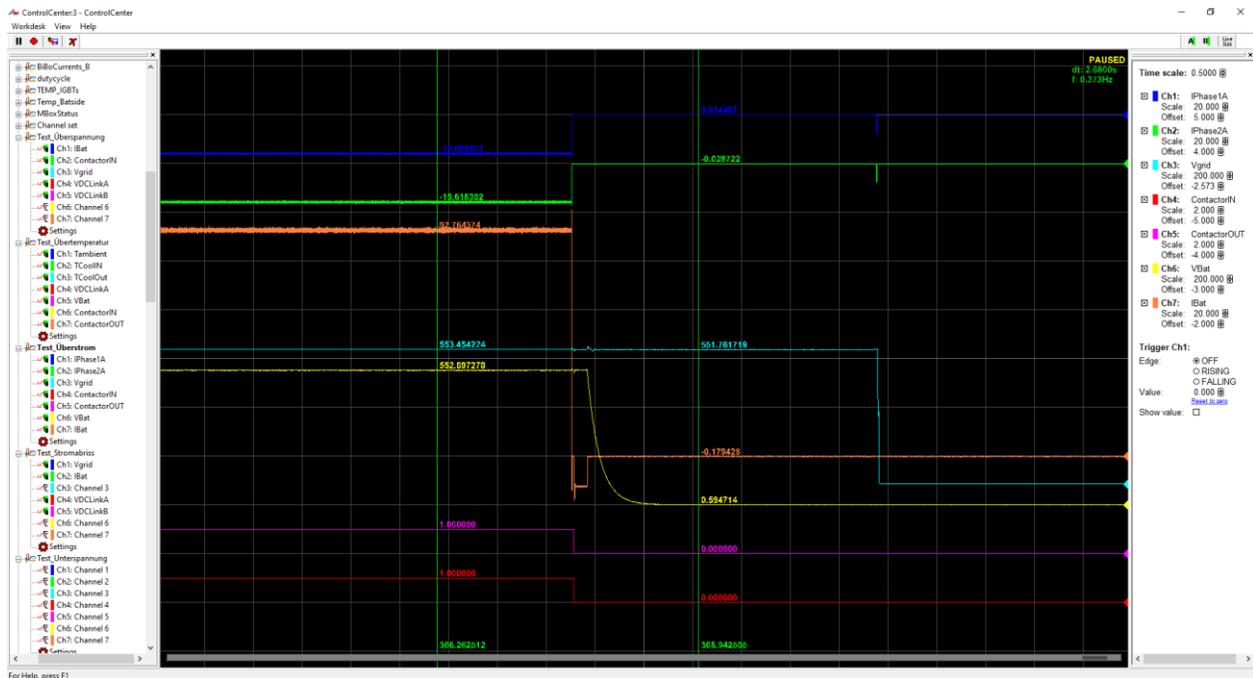


Abbildung 4.16 Abschalten bei Überstrom

#### 4.2.4.3.2. Übertemperatur

In Abbildung 4.17 ist das Abschalten bei einer Übertemperatur dargestellt. Dazu wurde der Converter in den Aktiven-Betriebszustand gebracht, die Eingangs- und Ausgangsspannung, die Schaltzustände des Eingangs- und Ausgangsschütz, die Kühlmittel- und Umgebungstemperatur aufgezeichnet. Der aufgenommene Umgebungstemperaturwert wurde durch einen parallel zum Temperatur-Messwiderstand angebrachten Potentiometer manipuliert, sodass der eingestellte Grenzwert überschritten wurde. Aus der Darstellung lässt sich ablesen, dass der Converter bei einer Umgebungstemperatur von ca. 75 °C das Ausgangsschütz trennt und den Hauptstrompfad damit unterbricht.

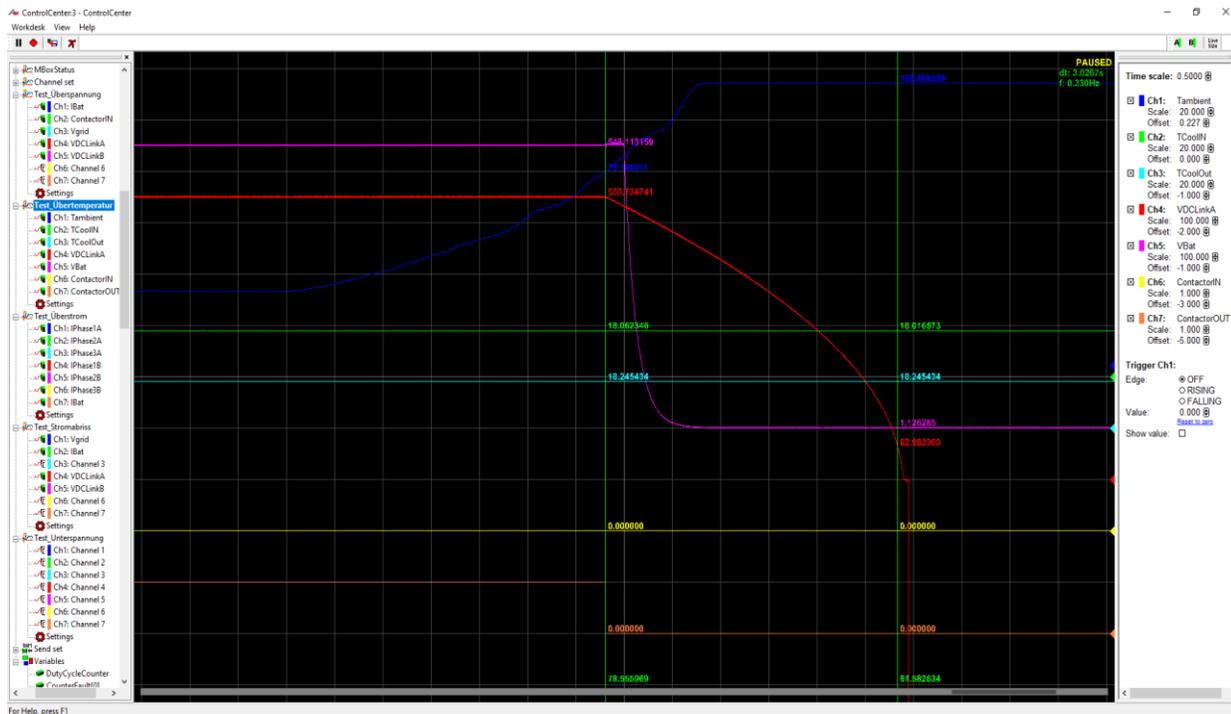


Abbildung 4.17 Abschalten bei Übertemperatur

#### 4.2.4.3.3. Überspannung:

In Abbildung 4.18 ist das Verhalten bei einer anliegenden Überspannung am Eingang des Converters dargestellt. Dazu wurden die Eingangs- und Ausgangsspannung, der Zustand des Eingangsschutz und der Strom des Hauptstrompfads des Converters dargestellt. Anhand der Messungen lässt sich ablesen, dass das Eingangsschutz bei einer anliegenden Eingangsspannung von 1203,38 VDC vom System getrennt und damit der Hauptstrompfad unterbrochen wurde.

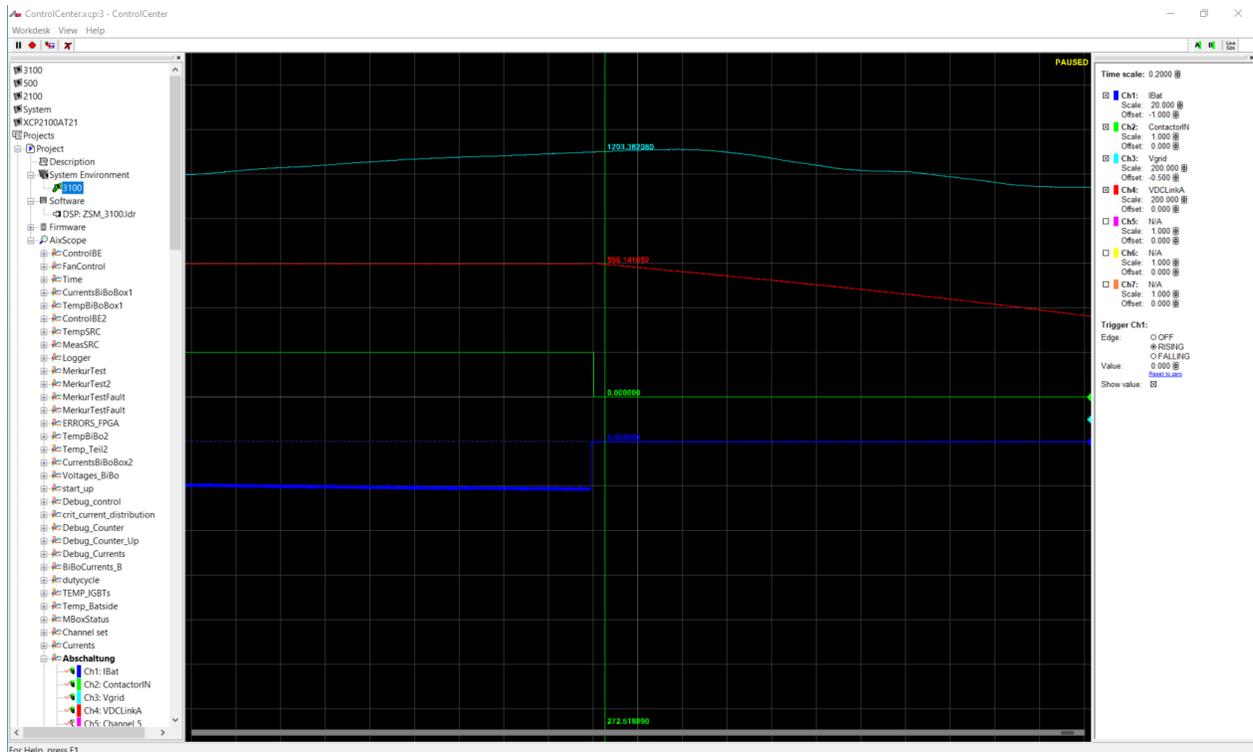


Abbildung 4.18 Abschalten bei Überspannung

### 4.3. Arbeitsplan

Die drei Meilensteine während der Entwicklung wurden gemäß Zeitplan erreicht.

- M1: Alle Spezifikationen, Sicherheitsanforderungen und Topologien wurden festgelegt
- M2: Alle Teilkomponenten inklusive Halbleiter, passiven Komponenten und Verbindungselementen der Wandler wurden vollständig ausgelegt
- M3: Die Wandler wurden aufgebaut, vermessen und bewertet. Das Ladegerät steht für die Integration in einen Lastkraftwagen bereit.

Die Durchführung der Arbeitspakete verlief reibungslos, es gab keine Abweichungen zum Arbeitsplan.

## 5. Stand und Zukunft der Technik

### 5.1. Vergleich der Projektergebnisse zum internationalen Stand der Technik

Den Vergleich zum internationalen Stand der Technik hat das Verbundvorhaben schon in seiner Vorhabensbeschreibung abgefangen. Durch die parallele Entwicklung zweier DC-DC-Wandler, wobei einer basierend auf neuester Siliziumkarbid-Technologie entwickelt wurde, lassen sich die beiden Technologien direkt vergleichen.

Im Rahmen des Projekts wurden so eine Reihe wissenschaftliche Veröffentlichungen zu dem Thema erzeugt. Durch die Verwendung von Siliziumkarbidhalbleitern konnte die Effizienz bei gleichzeitig erhöhter Leistungsdichte gesteigert werden [1], und bietet dadurch langfristige Integrations- und Kostenvorteile. Das entwickelte Forschungsmuster hat damit die möglichen Potentiale aufgezeigt und dient damit als High-End-Prototyp für die zukünftigen Entwicklungen von Ladegeräten für Oberleitungslastkraftwagen.

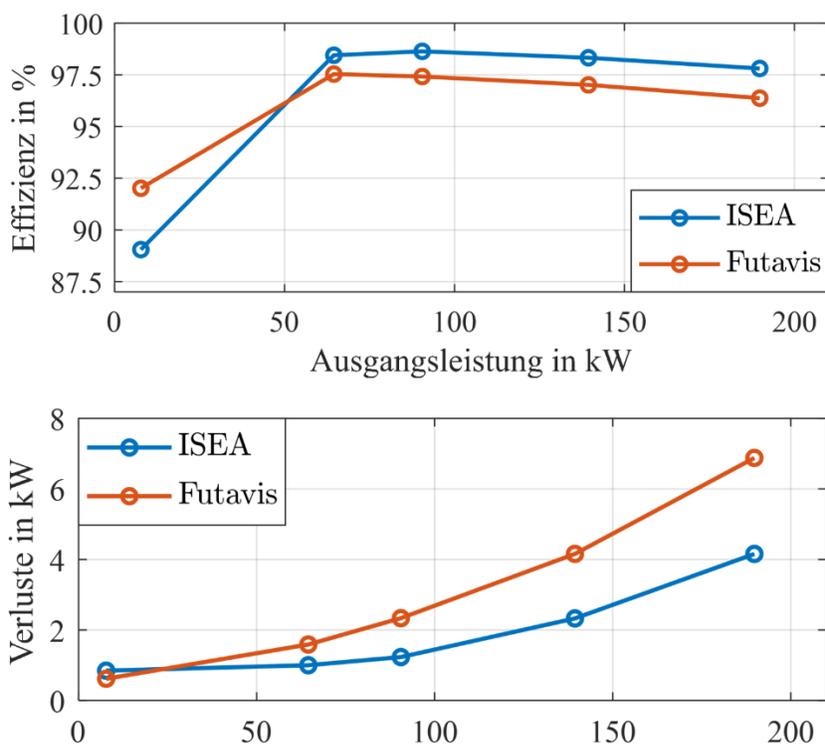


Abbildung 5.1 Vergleich Wirkungsgrad und Verluste

In der oberen Abbildung zeigt sich der exemplarisch für dieses Projekt der Vergleich der beiden entwickelten Wandler. Zu sehen ist, dass die in diesem Projekt entwickelten Technologien in der Lage sind einen deutlich höheren Wirkungsgrad durch geringere Verluste zu erreichen. Weiterführende Informationen dazu finden sich im äquivalenten Abschlussbericht des ISEA.

## **5.2. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses und der Erfahrungen**

Futavis konnte sein Produktportfolio um leistungselektronische Oberleitungsladegeräte erweitern.

Durch die parallele Entwicklung einzelner Aspekte des Ladegeräts konnten Ergebnisse auch getrennt voneinander weiterverwertet werden. Neben der Erweiterung des Funktionsumfangs des Futavis BMS haben die gewonnenen Erkenntnisse und Kompetenzen der Forschungspartner hinsichtlich Fertigung, Entwicklung und Aufbau von leistungselektronischen Systemen sich als auf andere Applikationen übertragbar erwiesen. Damit bildet das während der Projektlaufzeit gesammelte Know-How die Basis für eine effiziente Entwicklung zukünftiger Technologien.

Im Kontext des mit dem Mutterkonzern Deutz AG der Futavis entwickelten kompletten elektrischen Antriebsstrangs entstanden hier zusätzliche, mögliche Applikationen [2].

Zusätzlich wurden neue Verknüpfungen zwischen den Konsortialpartnern geknüpft, die auch in Zukunft ihre Anwendung finden werden.

## **5.3. Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)**

Die Entwicklung von kompakten und leistungsfähigen Ladegeräten für oberleitungsgebundene Lastkraftwagen ist ein stark wachsender Markt. Gerade im Hinblick auf die notwendige Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen im straßengebundenen Güterverkehr, welcher für einen Großteil der gesamten Emissionen verantwortlich ist und kontinuierlich wächst, wurden in diesem Projekt technologische Schlüsseltechnologien entwickelt, die dies in Zukunft ermöglichen.

## **5.4. Darstellung der erfolgten oder geplanten Veröffentlichung des Ergebnisses**

Die Veröffentlichungen zu diesem Projekt wurden größtenteils durch die beteiligten Institute beigetragen. Seitens der Futavis beschränken sich diese auf die Veröffentlichungen auf der Homepage [3].