Ausfallsicheres und effizientes elektrisches **An**triebssystem für **Ro**botertax**i**s

Finanziert von der Europäischen Union
NextGenerationEU

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Schlussbericht zum Teilvorhaben: „Funktionserweiterung On-Board Charger“ 01.04.2021 – 30.06.2024 Finepower GmbH

Zuwendungsempfänger	Finepower GmbH
Förderkennzeichen	19A21004I
Vorhabensbezeichnung	AnRox – Ausfallsicheres und effizientes elektrisches Antriebssystem für Robotertaxis; Teilvorhaben: Funktionserweiterung On-Board Charger
Laufzeit des Vorhabens	01.04.2021 – 30.06.2024
Leiter des Teilvorhabens mit Telefon, Fax und E-Mail	Georg Heiland Tel.: 089/3090758-15 Fax: 089/3090758-22 g.heiland@finepower.com
Datum	29.11.2024

© Copyright 2023 Finepower GmbH

Versionen

Datum	Version	Bearbeiter	Kommentar
21.01.2022	1.0	G. Heiland	1. Zwischenbericht
08.08.2022	2.0	G. Heiland	2. Zwischenbericht
10.02.2023	3.0	G. Heiland	3. Zwischenbericht
11.08.2023	4.0	G. Heiland	4. Zwischenbericht
11.02.2024	5.0	G. Heiland	5. Zwischenbericht
15.11.2024	6.0	G. Heiland	Schlussbericht

Projektkoordination

Dr. Kirill Gorelik
Robert Bosch GmbH
Postfach 10 60 50
70049 Stuttgart
Telefon: +49 711 811-21135, Fax: +49 711 811-0
kirill.gorelik@de.bosch.com

Teilvorhabensleitung

Georg Heiland
Finepower GmbH
Carl-Zeiss-Ring 21, 85737 Ismaning
Telefon: 089/3090758-15, Fax: 089/3090758-22
g.heiland@finepower.com

Autor:innen

Georg Heiland, 089/3090758-15, g.heiland@finepower.com

Inhaltsverzeichnis

Versionen **2**
Inhaltsverzeichnis **3**
Abbildungsverzeichnis **4**
Abkürzungsverzeichnis **5**
1 Aufgabenstellung **6**
2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde **6**
3 Planung und Ablauf des Vorhabens **6**
4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde **7**
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen **7**
6 Erzielte Ergebnisse **8**
6.1 AP1: Identifikation von Anforderungen an Antriebs-, Fahrwerkssysteme und Energiebordnetze eines Robotertaxis 8
6.1.1 AP1.4: Anforderungen an Antriebs- und Energiebordnetzkomponenten 8
6.2 AP3: Komponenten für ausfallsichere Antriebe und Energiebordnetze 10
6.2.1 AP3.3: Elektronische Knoten für fehlertolerante Energiebordnetze 10
6.3 AP4 – Validierung 16
7 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises **18**
8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit **19**
9 Nutzen und Verwertbarkeit / Fortschreibung des Verwertungsplans **19**
9.1 Erfindungen / Schutzrechtsanmeldungen 19
9.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten 19
9.3 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten 19
9.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit 19
10 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens **20**
11 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen **20**

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lösungsweg im Förderprojekt AnRox 6
Abbildung 2 9
Abbildung 3 – Funktionsmöglichkeiten OBC während der Fahrt 10
Abbildung 4 – Konzept 1 & 2 für OBC-Betrieb während der Fahrt 11
Abbildung 5 - Konzept 1 & 2 für OBC-Betrieb während der Fahrt 11
Abbildung 6 – Halbleiter-Verlustleistung der PFC im DC/DC-Betrieb 12
Abbildung 7 – maximale Leistungsübertragung der PFC im DC/DC-Betrieb zwischen 2 Hochvolt-Batterien 13
Abbildung 8 14
Abbildung 9 14
Abbildung 10 – Oszillogram der Strom- und Spannungsformen im Konzept Nr. 2 16
Abbildung 11 - Oszillogram der Strom- und Spannungsformen im Konzept Nr. 2 (Zoom) 16
Abbildung 12 17

Abkürzungsverzeichnis

OBC – On Board Charger

PFC – Power Factor Correction

HV – Hochvolt

LV – Low-Volt (Niederspannung)

FuSi – Funktionale Sicherheit (Bezug zu gemeinsamen Unterauftrag)

GUA – gemeinsamer Unterauftrag

1 Aufgabenstellung

Das Verbundprojekt „***Ausfallsicheres und effizientes elektrisches Antriebssystem für Robotertaxis (AnRox)***“ hatte zum Ziel die Erforschung und Validierung von ganzheitlich optimierten System- und Komponentenlösungen für ausfallsichere Antriebssysteme und Energiebordnetze für das automatisierte elektrische Fahren. Dabei sollten Mehrkosten für ausfallsichere Antriebssysteme und Energiebordnetze minimiert und/oder durch einen nachweisbaren Mehrwert für Endnutzer oder Betreiber kompensiert werden. Die im Rahmen des Projekts entwickelten Methoden, Simulationstools und Lösungen fokussierten auf den Anwendungsfall eines Robotertaxis, sind jedoch generell auf alle elektrisch angetriebenen Fahrzeuge übertragbar. Eine Übersicht über die grundsätzliche Vorgehensweise, adressierte Analyse der Anforderungen aus Betreiber und Nutzersicht sowie die technischen Themenfelder gibt Abbildung 1.

Abbildung 1: Lösungsweg im Förderprojekt AnRox

Das Teilvorhaben der Finepower GmbH hatte die Erforschung der Nutzung eines On-Board-Ladegeräts während des Fahrtbetriebs zum Ziel. Es sollten mögliche Use-Cases identifiziert und die dafür notwendigen Sicherheitsanforderungen sowie technische Lösungen dafür erarbeitet und validiert werden.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Förderprojekt AnRox adressierte den wichtigen und stark wachsenden Markt von (teil-)automatisierten Fahrzeugen mit Fokus auf intelligente zukunftsfähige Antriebslösungen. Neben diesen sollten im Teilvorhaben der Finepower GmbH auch Funktionserweiterungen eines On-Board Chargers erforscht werden, um diesen auch während des Fahrbetriebs sinnvoll einsetzen zu können. Damit sollte ein wertvoller Beitrag zu den übergeordneten Zielen der Verfügbarkeit und Sicherheit geliefert werden.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Verbundprojekt AnRox ist in vier Arbeitspakete gegliedert: (AP1) *Identifikation von Anforderungen an Antriebs-, Fahrwerksysteme und Energiebordnetze eines Robotertaxis*, (AP2)

Ausfallsichere und intelligente Antriebssysteme und Energiebordnetze, (AP3) *Komponenten für ausfallsichere Antriebe und Energiebordnetze* sowie (AP4) *Validierung*.

Finepower hat im Rahmen der Unter-AP 1.4.2, 3.3.1, 3.3.4 sowie 4.3.7 die Forschungsarbeiten zur Funktionserweiterung eines On-Board-Ladegeräts durchgeführt. Dabei fanden wöchentliche Regelabstimmungen mit den Partnern der Arbeitsgruppe „Bordnetz“ statt (v.a. Fraunhofer IISB, Kroschu, smartCable & Infineon), in welchen die für die jeweiligen partnerindividuellen Arbeiten notwendigen Ergebnisse ausgetauscht wurden.

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Vorarbeiten im Unternehmen im Rahmen vorangegangener Forschungs- und Entwicklungsprojekte beschäftigten sich mit der Realisierung und Demonstration von On-Board-Ladegeräten für industrielle Anwendungen sowie für die Elektromobilität. Die adressierten Batteriespannungen liegen sowohl im Niederspannungs- als auch im Hochspannungsbereich, wobei unterschiedliche Schaltungstopologien für die jeweiligen Anwendungen zum Einsatz kommen, welche auch die hardwaremäßigen Voraussetzungen für einen bidirektionalen Betrieb des Ladegeräts erfüllen. Diese Anwendung beschränkte sich jedoch bisher auf den Fall einer Netzrückspeisung während der Standzeit des Fahrzeugs, wodurch zum Einen keine Überlastanforderungen und zum anderen keine erhöhten funktionalen Sicherheitsanforderungen (sog. „ASIL“-Level) existierten. Das Teilvorhaben im Projekt „AnRox“ adressierte durch die Zielsetzung eines Betriebs während der Fahrt genau diese Anforderungen.

Im internationalen Stand der Technik waren sowohl zu Projektbeginn als auch während der gesamten Projektlaufzeit keine vergleichbaren Lösungen oder ähnliche Forschungsvorhaben bekannt, welche sich mit einem Betrieb einer Ladeelektronik während der Fahrt beschäftigten.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Projektarbeit im Teilvorhaben wurde ausschließlich im Unternehmen selbst durchgeführt; lediglich die Ergebnisse zu den Anforderungen aus der funktionalen Sicherheit wurden im Rahmen des gemeinsamen Unterauftrags durch die Fa. Invensity erarbeitet.

6 Erzielte Ergebnisse

6.1 AP1: Identifikation von Anforderungen an Antriebs-, Fahrwerkssysteme und Energiebordnetze eines Robotertaxis

6.1.1 AP1.4: Anforderungen an Antriebs- und Energiebordnetzkomponenten

AP1.4.2: Anforderungen an Komponenten ausfallsicherer Energiebordnetze

In diesem AP werden die technischen sowie Sicherheits- und Zuverlässigkeits-Anforderungen für einen DC/DC-Wandler definiert, der als Teil eines On-Board Chargers („OBC“) während des Fahrbetriebs einen zusätzlichen Bordnetz-Versorgungspfad erzeugen soll.

Die technischen Anforderungen sind abhängig von den konkreten Bordnetzverbraucher-Leistungen sowie der im Projekt zu erarbeitenden Bordnetzarchitektur, welche unter anderem auch die Spannungslevel des Niedervolt-Bordnetzes sowie die Anzahl und Verteilung der Energiespeicher in den Teilbordnetzen definiert.

Andererseits besitzt der bereits vorhandene On-Board Charger technische Eigenschaften, welche zu bestimmten maximalen elektrischen Werten für ein fiktives Bordnetz führen. Die folgenden elektrischen Parameter können für eine Bordnetzanbindung während des Fahrbetriebs abgeleitet werden:

Parameter	1~ OBC	3~ OBC	Bemerkung
U_{HV} [V]	350…420	350…800	
P_{max} – 12V	264 W	750 W	Rückwärtsbetrieb PFC
P_{max} – 48V	1 kW	3 kW	Rückwärtsbetrieb PFC
P_{max} – DCDC HV#1-HV#2	3 kW	10 kW	Bidirektionaler Betrieb DC/DC-Teil
	7 kW	21 kW	Bidirektionaler Betrieb PFC-Teil

Tabelle 1

Der Ergebnisbericht der Fa. Invensity zum gemeinsamen Unterauftrag (GUA) wurde im Oktober 2023 bereitgestellt. Bezüglich des On-Board-Chargers wurde von der Zuwendungsempfängerin für die Arbeiten im Unterauftrag der Use-Case einer Energieausgleichsfunktion zwischen 2 HV-Batterien definiert. Die Versorgung von Verbrauchern im HV- oder LV-Bordnetz wurde als „optional“ eingestuft, sodass für die Funktion „Energiebereitstellung Verbraucher“ keine ASIL-Anforderungen für den OBC definiert wurden. Grund hierfür waren die Leistungsanforderungen der HV- und LV-Bordnetze, welche deutlich über die Leistungsfähigkeit eines typischen On-Board-Chargers hinausgehen, sodass eine redundante Bordnetzversorgung durch einen OBC nur für einzelne Verbraucher möglich ist. Die entsprechenden ASIL-Anforderungen für sicherheitsrelevante Verbraucher wurden im Rahmen anderer Aufgaben des Unterauftrags erarbeitet, sodass die dortigen Ergebnisse auch für die Funktion des OBC gelten.

Das Ergebnis für die Funktion „Energieausgleichsfunktion zwischen 2 HV-Batterien“ lautet:

„**ASIL D für elektrische Trennung von OBC und HV-Batterie“.**

Eine solche Anforderung kann dabei entweder durch den OBC allein oder durch den OBC und ein zusätzliches in Serie geschaltetes Trennelement erreicht werden, siehe Abb. 2.

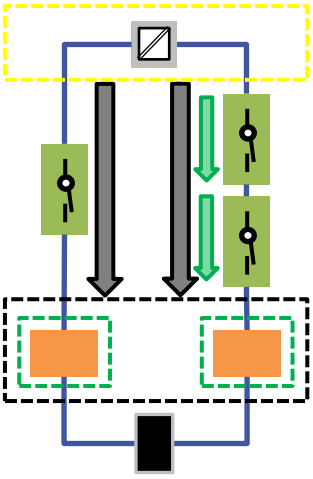

Abbildung 2

Für letztere Variante (OBC und externes Trennelement in Serie) kann eine Dekomposition der Sicherheitsanforderungen auf ASIL B(D) durchgeführt werden.

Die Trennfunktion soll dabei durch unterschiedliche Ursachen ausgelöst werden:

1. Vorgabe durch Bordnetz-Befehl
2. Vorgabe durch OBC selbst

Der Fall (2) kann dabei entweder durch Erreichen interner Betriebsgrenzen oder durch Fehlerdetektion ausgelöst werden. Dabei muss die Erfassung dieser Auslösegründe in der ASIL-Bewertung mitberücksichtigt werden. Im Fall (1) muss lediglich die Trennfunktion selbst berücksichtigt werden.

Folgende Auslösegründe wurden für die exemplarische ASIL-Bewertung definiert:

(1) Temperaturüberschreitung Halbleiter
(2) Isolationsfehler
(3) Überspannung Ein- oder Ausgang

Für die definierten Auslösegründe wurden schaltungstechnische Lösungen zur Detektion erarbeitet und die daraus resultierenden FIT-Raten bestimmt, welche direkt die Einstufung in ASIL-Klassen beeinflussen (siehe hierzu AP4.3.7).

6.2 AP3: Komponenten für ausfallsichere Antriebe und Energiebordnetze

6.2.1 AP3.3: Elektronische Knoten für fehlertolerante Energiebordnetze

AP3.3.1: Konzepte für elektronische Energiebordnetzknoten

Es wurden unterschiedliche Möglichkeiten der Funktionalität eines On-Board Chargers während des Fahrbetriebs skizziert und die dafür notwendigen Zusatzelemente hinsichtlich elektrischer Sicherheit aus normativen Anforderungen ermittelt.

Dabei haben sich grundsätzlich 3 unterschiedliche mögliche Funktionalitäten ergeben:

1. Bidirektionaler Betrieb DC/DC zwischen zwei HV-Teilbordnetzen (potenzialgetrennt)
2. Speisung LV-Bordnetz aus HV-Bordnetz (Rückwärtsbetrieb OBC)
3. Bidirektionaler Betrieb PFC zwischen zwei HV-Teilbordnetzen (nicht potenzialgetrennt)

Die folgenden Abbildungen veranschaulichen die unterschiedlichen Funktionsmöglichkeiten:

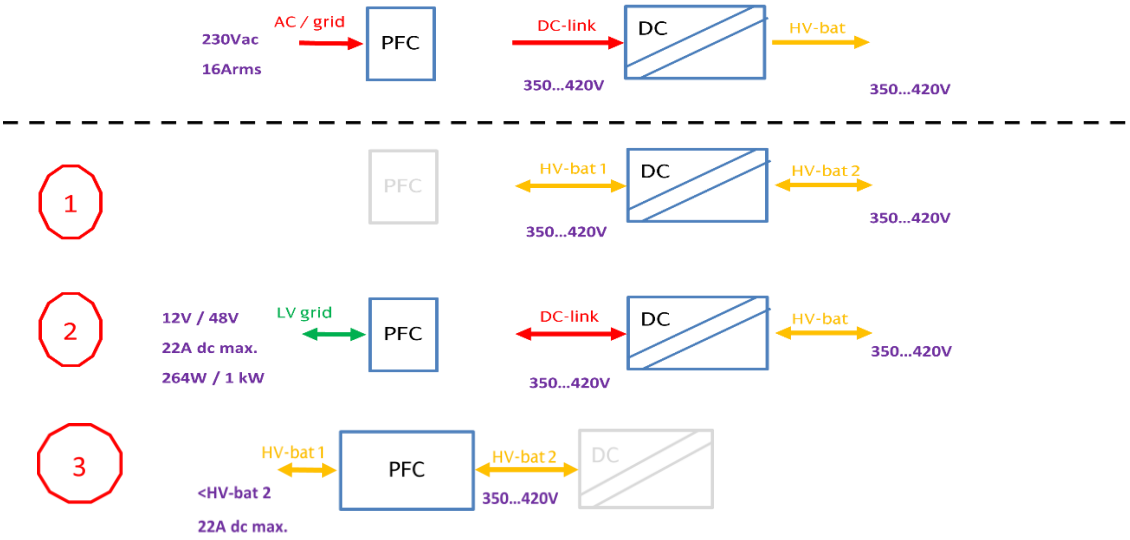

Abbildung 3 – Funktionsmöglichkeiten OBC während der Fahrt

Es wurden die notwendigen Zusatzkomponenten für die einzelnen Konzepte ermittelt, welche für die elektrische Sicherheit erforderlich sind:

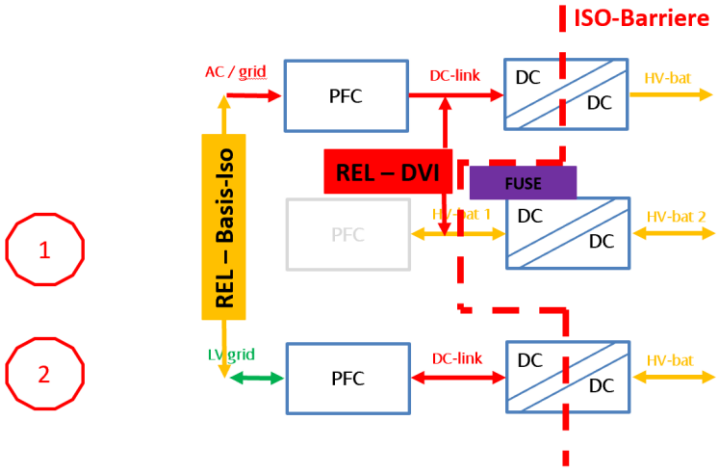

Abbildung 4 – Konzept 1 & 2 für OBC-Betrieb während der Fahrt

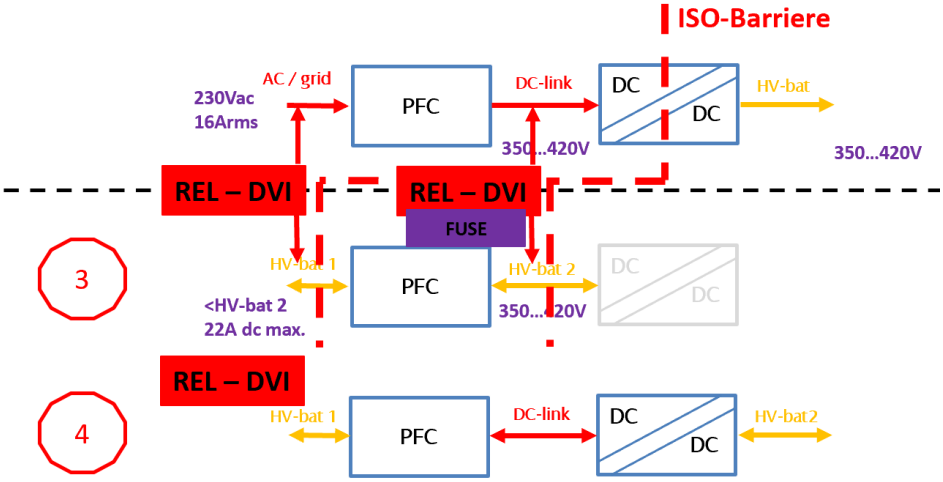

Abbildung 5 - Konzept 1 & 2 für OBC-Betrieb während der Fahrt

Das Konzept 1 sieht vor, dass der DC/DC des OBC direkt zwischen 2 HV-Batterien geschaltet wird. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit einer Umschaltmöglichkeit am Zwischenkreis des OBC mit einer DVI (doppelte/verstärkte Isolierung), da im Ladebetrieb der Zwischenkreis auf Netzpotenzial liegt. Eine weitere notwendige Erweiterung des OBC ist eine Eingangssicherung im DC/DC, um den HV-Bordnetzpfad im Fehlerfall „Kurzschluss“ nicht zu belasten. Dieses Konzept ist grundsätzlich in der Lage, Energie in beiden Richtungen zu übertragen, unabhängig vom Verhältnis der beiden Batteriespannungen. Jedoch ist die Eingangsspannung durch das Design für den Hauptbetrieb „Laden“ üblicherweise auf einen engen Spannungsbereich begrenzt (z.B. 380-420V beim einphasigen Laden).

Das Konzept 2 sieht eine Leistungsübertragung zwischen HV- und LV-Bordnetz vor, woraus sich die Notwendigkeit einer Umschaltmöglichkeit zwischen Netzanschluss und LV-Bordnetz ergibt, welche lediglich eine Basisisolierung erfordert.

Das Konzept 3 sieht eine Leistungsübertragung zwischen 2 HV-Batterien vor, wobei nur der PFC-Teil der Ladeelektronik genutzt wird. Hierbei ist sowohl am Eingang als auch am Ausgang der PFC eine Umschaltmöglichkeit mit DVI notwendig, da beide Schnittstellen im Ladebetrieb auf Netzpotenzial liegen. Zudem ist eine Ausgangssicherung notwendig, um den HV-Bordnetzpfad im Fehlerfall „Kurzschluss“ nicht zu belasten. Eine technische Einschränkung ist dabei, dass nur dann Energie übertragen werden kann, wenn die HV-Spannung am PFC-Ausgang höher als die HV-Spannung am PFC-Eingang ist (Hochsetzstellerschaltung). Dies ist in den meisten Betriebssituationen ausreichend, da die Batterie mit der niedrigeren Spannung (bei baugleichen Batterien) üblicherweise geladen und nicht zusätzlich belastet werden sollte.

Ein weiteres Konzept (4) ist die Nutzung des gesamten OBC als bidirektionale Energieübertragungsmöglichkeit zwischen 2 HV-Batterien. Dabei ist wie im Konzept 1 die Notwendigkeit einer Umschaltmöglichkeit zwischen Netzanschluss (Ladedose) und HV-Batterie notwendig, welche eine DVI erfordert. Durch dieses Konzept kann Energie in allen Betriebsspannungsbereichen der beiden HV-Batterien bidirektional übertragen werden.

Für die Konzepte (1), (2) und (4) ist zur Ermöglichung des Rückwärtsbetriebs eine Erweiterung der Gleichrichtung am DC/DC-Ausgang auf eine aktive Gleichrichtung notwendig, wobei eine Realisierung ohne Zusatzgewicht und mit sehr begrenztem Kostenaufwand (hauptsächlich Mehrkosten durch Treiberbeschaltung) möglich ist.

Für das Konzept (3) wurden elektrische Simulationen und Verlustleistungsbetrachtungen durchgeführt, um die technischen Leistungsgrenzen für dieses Konzept zu ermitteln.

Es wurden die auftretenden Verlustleistungen der Halbleiter im Rahmen des Konzepts (3) in Abhängigkeit der Spannungsdifferenz der beiden HV-Batterien für den maximal möglichen Strom ermittelt, der sich aus der Dimensionierung der Speicherdrosseln der PFC ergibt (im einphasigen Ladebetrieb: 16A * sqrt(2) = 22A).

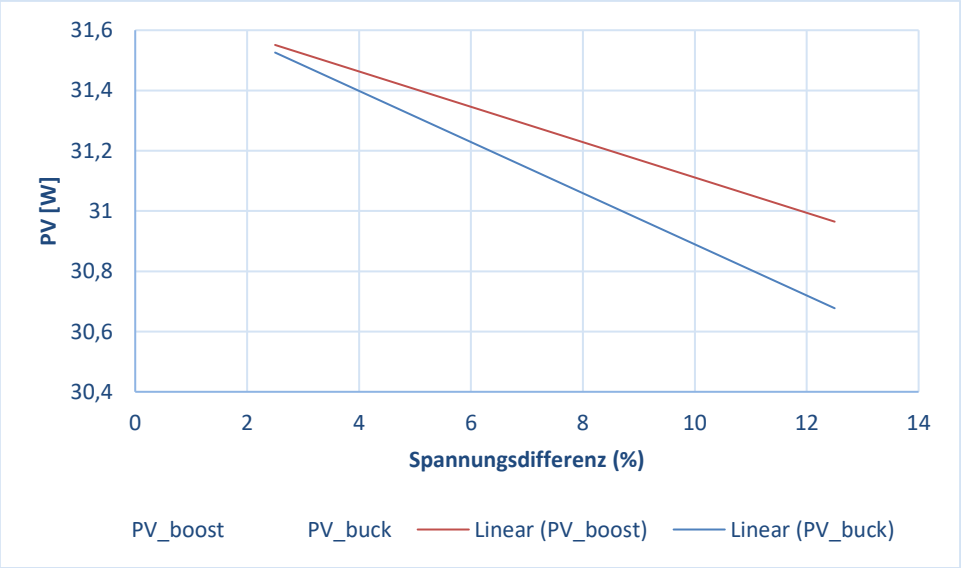

Abbildung 6 – Halbleiter-Verlustleistung der PFC im DC/DC-Betrieb

Die im herkömmlichen Ladebetrieb auftretenden Halbleiter-Verlustleistungen, auf welche auch das thermische Konzept ausgelegt ist, betragen ca. 20W, sodass sich mit einem ansonsten unveränderten thermischen und elektrischen Konzept folgende Übertragungsleistungen ergeben, welche mit dem Konzept (3) dauerhaft (thermisches Limit) bzw. kurzzeitig (maximaler Strom 22A) zur Verfügung gestellt werden können:

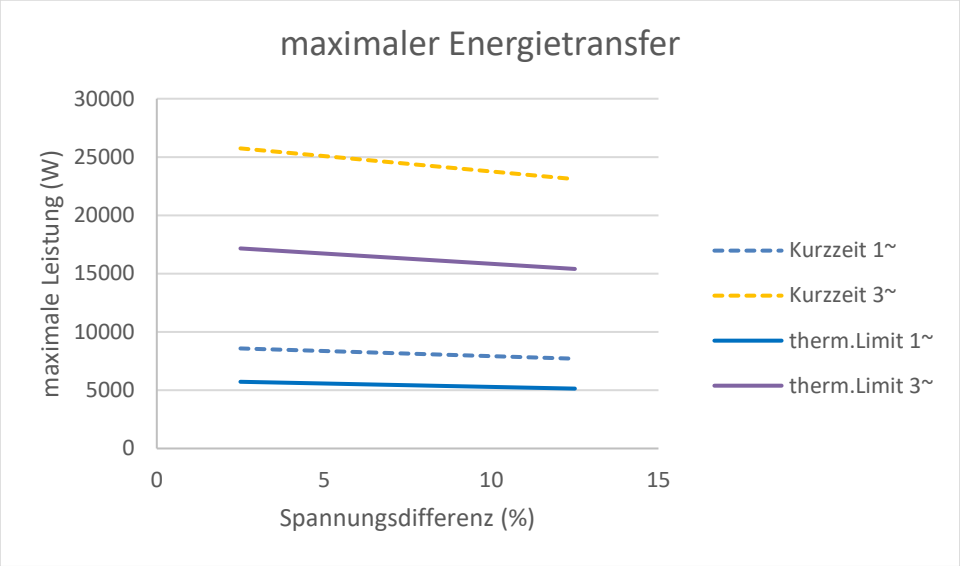

Abbildung 7 – maximale Leistungsübertragung der PFC im DC/DC-Betrieb zwischen 2 Hochvolt-Batterien

Für den DC/DC-Wandler wurden unterschiedliche Schaltungstopologien definiert, welche auf die technischen Grenzen für den Betrieb zwischen zwei HV-Batterien im Rahmen des Konzepts (4) untersucht werden sollen:

a) LLC-Resonanzwandler
b) CLLC-Resonanzwandler
c) Phase-Shift-Wandler

<u>Ergebnisse LLC-Resonanzwandler:</u>

Die Übertragungscharakteristik des Wandlers ist in Abbildung 8 in Abhängigkeit der Leistung (unterschiedliche Lastwiderstände) dargestellt. Dabei ergibt sich ein allen Leistungswerten gemeinsamer Resonanzpunkt bei einer Frequenz von 70 kHz, bei der immer eine Ausgangsspannung von 400V bzw. eine Übertragungsverstärkung von 1 erreicht wird. Bei einer Ausgangsspannung von nur 350V ergibt sich eine Frequenz von 90 kHz. Die resultierende Strombelastung des Resonanzkreises ist in Abbildung 9 dargestellt. Aus dieser können die Amplituden des Resonanzstroms bei den jeweiligen Arbeitspunkten abgelesen werden, wobei sich eine Strombelastung von ca. 11,4A bei 70 kHz (400V) und ca. 12,8A bei 90 kHz (350V) bei jeweils maximaler Leistung von 3,6 kW (einphasiges Ladegerät) ergibt.

Wird der Stromwert von 12,8A bei nahezu gleich geladenen HV-Batterien angenommen (jeweils 400V), würde sich eine mögliche Leistungsübertragung von ca. 4 kW ergeben, ohne dass Überlastungen an den Resonanzelementen auftreten.

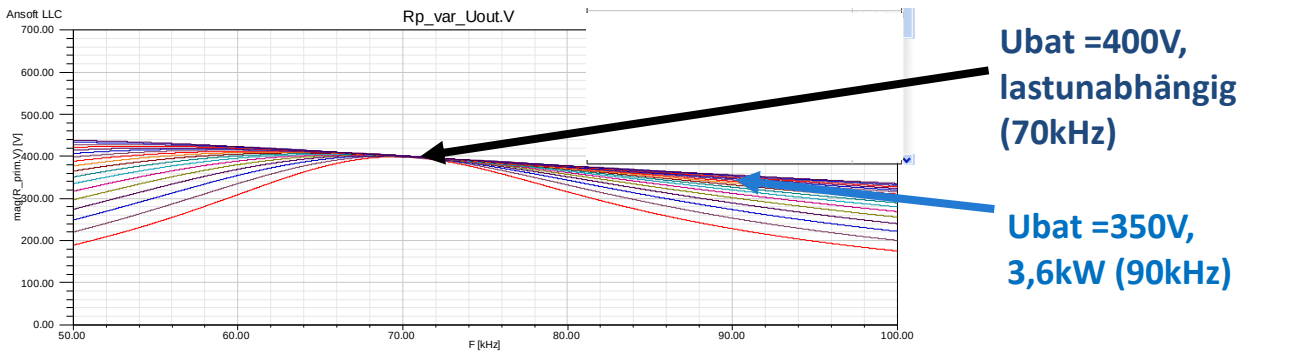

Abbildung 8

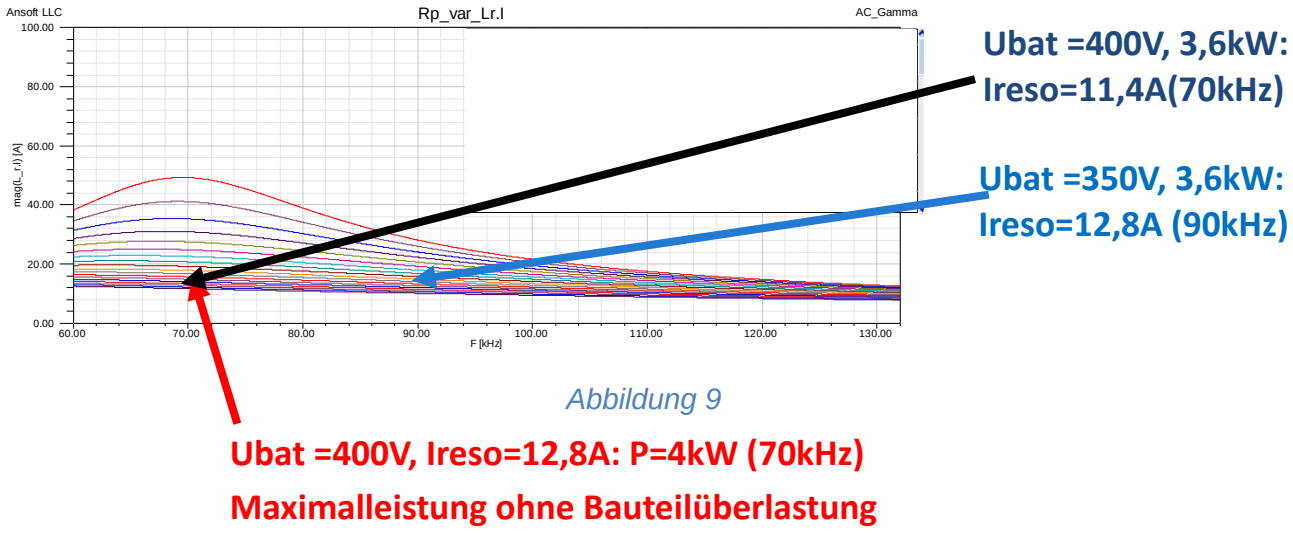

Abbildung 9

Dem hinzuzufügen ist die Einschränkung, dass dieser Überlastbetrieb nur in eine Energieflussrichtung (Vorwärtsrichtung gemäß Ladebetrieb) möglich ist. In Rückwärtsrichtung ist effektiv nur ein Serienresonanzkreis wirksam, mit welchem kein Überlastbetrieb möglich ist, sondern vielmehr nur eine gegenüber der Nennleistung im Ladebetrieb reduzierte Leistungsübertragung möglich ist. Soll eine Zusatzfunktion wie angestrebt zum Energieausgleich zwischen 2 HV-Batterien mit möglichst hoher Leistung vorhanden sein, müssen die Schlüsselkomponenten (Halbleiter, Transformator, Resonanzelemente) mit erhöhter Stromtragfähigkeit versehen werden, wodurch vor allem die Kosten ansteigen. Eine Alternative hierzu wäre eine Verschaltungsoption, sodass je nach Ladezustand immer diejenige Batterie an den DC/DC-Eingang geschaltet wird, welche den höheren State of Charge (SoC) aufweist.

<u>Ergebnisse CLLC-Resonanzwandler:</u>

Zuerst wurde mithilfe von parametrisierten Simulationen im Frequenzbereich eine mögliche Auslegung eines CLLC-Resonanzkreises für eine Batteriespannung von 400V erarbeitet.

Die sich daraus ergebenden maximalen Bauteilbelastungen im Ladebetrieb, auf welche die einzelnen Komponenten für die Funktion „Laden“ ausgelegt werden, sind in folgender Tabelle zusammengefasst:

U_{in}=400V, P_{out}=3,3kW	U_{out} [V]	f_{sw} [kHz]	$\hat{I}_{prim}$ [A]	$\hat{U}_{Cr}$ [V]
	350	256	11,2	279
	400	140	10,3	468
	450	157	10,5	426

Tabelle 2

Die maximalen Bauteilbelastungen für die Funktion „Rückspeisen“ (bzw. Energieausgleich zwischen sekundärer und primärer HV-Batterie) sind in folgender Tabelle zusammengefasst:

U_{in}=400V, P_{in}=3,3kW	U_{out} [V]	f_{sw} [kHz]	$\hat{I}_{prim}$ [A]	$\hat{U}_{Cr}$ [V]
	350	239	11,0	293
	400	300	11,0	233
	450	332	11,3	217

Tabelle 3

Diese Ergebnisse zeigen bereits, dass für den Fall, dass ein optionaler Betrieb zur Ladungsausgleichsfunktion zwischen 2 HV-Batterien stattfinden soll, kein Überlastbetrieb unter Einhaltung der im Ladebetrieb vorhandenen maximalen Bauteilbelastungen möglich ist.

AP3.3.4: Realisierung der elektronischen Energiebordnetzknoten

Zu Projektbeginn wurde der Aufbau einer vereinfachten PFC-Stufe für reduzierten einphasigen Betrieb durchgeführt, um darauf folgend eine funktionale Validierung des Konzepts Nr. 2 aus AP3.3.1 vorzunehmen (Rückwärtsbetrieb PFC auf 12V-Bordnetz). Für einen stabilen Betrieb mussten folgende Hardware- und Software-Änderungen durchgeführt werden:

- Integration einer Kapazität am PFC-Eingang (68µF)
- Erweiterung der Betriebssoftware:
    - Deaktivierung der Netzhalbwellen-Umschaltung,
    - dauerhafte Ansteuerung des Eingangsrelais,
    - Betriebsfrequenz 75 kHz

6.3 AP4 – Validierung

Der Betrieb des Konzepts Nr. 2 wurde mit einer Leistung von ca. 130W (12V, 11A) durchgeführt (s. Abbildung 10 & Abbildung 11, Ch1: Drosselstrom, Ch2: LV-Spannung, Ch3: LV-Strom). Die aktuelle technische Grenze setzen die eingesetzten MOSFETs (650V GaN, GaNSystems), welche laut Datenblatt eine Strombelastbarkeit von 15A haben. Als eine nachteilige Betriebseigenschaft ist dabei zu bewerten, dass der Lowside-Transistor in seiner Eigenschaft als Buck-Auflader aufgrund des hohen Spannungsunterschieds zwischen LV- und HV-Spannung nahezu die gesamte Zeit eingeschaltet ist, was sich hinsichtlich Lebensdauer und damit Verfügbarkeit negativ auswirkt.

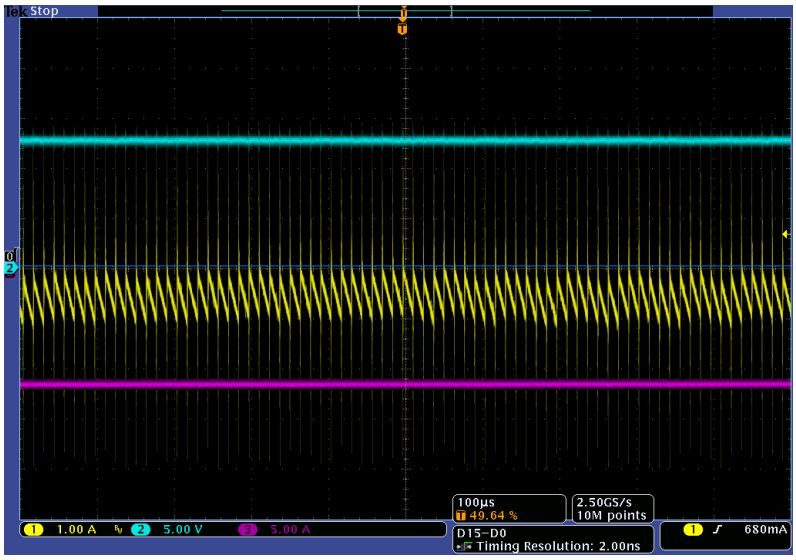

Abbildung 10 – Oszillogram der Strom- und Spannungsformen im Konzept Nr. 2

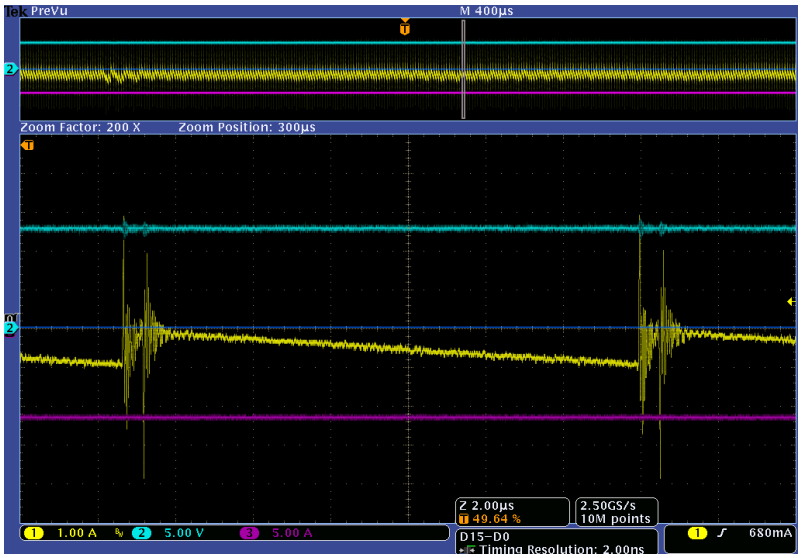

Abbildung 11 - Oszillogram der Strom- und Spannungsformen im Konzept Nr. 2 (Zoom)

Außerdem ist eine LV-Bordnetzversorgung von 130W selbst für einen Notbetrieb bzw. eine zusätzliche, redundante Versorgungsmöglichkeit von sicherheitsrelevanten Verbrauchern vermutlich nicht ausreichend. Aus diesen Gründen wurde im weiteren Projektverlauf zusätzlich ein Betrieb der PFC zwischen 2 HV-Teilbordnetzen (Konzept Nr. 3) untersucht. Dabei wurde ein Betrieb von der Batterie mit der höheren Spannung (Einstellung: 400V) zur anderen Batterie nachgestellt, welche niedrigere Spannungen aufweist (→Tiefsetzstell-Betrieb).

Die resultierenden Wirkungsgrade in Abhängigkeit der Spannung HV-Batterie mit der niedrigeren Betriebsspannung sind in Abbildung 12 dargestellt. Im realen Laborbetrieb wurde nicht die maximale, theoretisch mögliche Leistung eingestellt um thermische Defekte der Halbleiter zu vermeiden (theoretisch mögliche Leistung ca. 5 kW). Jedoch kann aufgrund der Messdaten bei der im Laborbetrieb tatsächlich übertragenen Leistung von ca. 4 kW von einer Konsistenz zu den theoretisch ermittelten Leistungsgrenzen ausgegangen werden. Die unterschiedlichen maximal getesteten Leistungswerte sind damit zu erklären, dass im Laborbetrieb immer nur ein maximaler DC-Strom von 10A eingestellt wurde; diese stellen nicht die maximal mögliche Leistung dar.

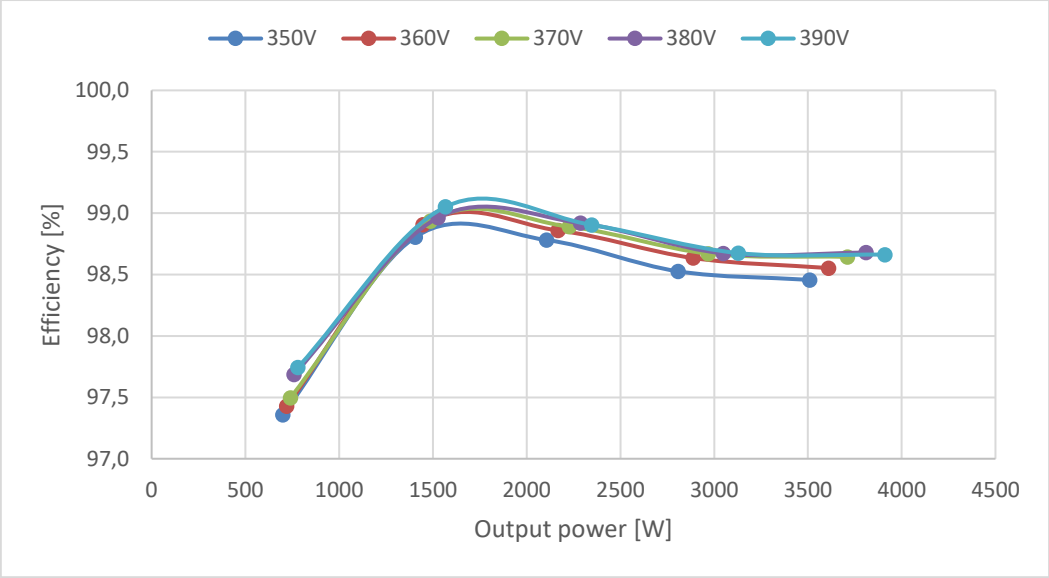

Abbildung 12

Abschließend wurde eine FIT-Raten Bestimmung für die einzelnen in AP3.3.1 erarbeiteten Fehlerfälle durchgeführt sowie anschließend schaltungstechnische Lösungen dafür erarbeitet:

- Trennfunktion: Anforderung ASIL D bzw. ASIL B(D) mit zusätzlichem (externem) Trennelement ASIL B(D) → FIT max. 100; reale FIT der Schaltung: 32
- Fehlerdetektion (1): Temperaturüberschreitung Halbleiter: FIT = 29
- Fehlerdetektion (2): Isolationsfehler: FIT = 204
- Fehlerdetektion (3): Überspannung Ein- oder Ausgang: FIT = 20

Zusammenfassung – Ausgangsstand FIT-Raten für die einzelnen Fehlerfälle:

Gesamt-FIT	Fall 1: ext. Befehl	Fall 2: OBC-int.
Trennfunktion	32	n.r.
Übertemp. HL	n.r.	32 + 29 = 61
Iso-Fehler	n.r.	32 + 204 = 236
Überspg. In/Out	n.r.	32 + 20 = 52

Tabelle 4

Nach der Erarbeitung von schaltungstechnischen Verbesserungsmaßnahmen zur weiteren Zuverlässigkeitserhöhung resultierten die folgenden FIT-Raten:

- Trennfunktion: FIT = 24
- Isolationsüberwachung: FIT = 105

Zusammenfassung –FIT-Raten für die einzelnen Fehlerfälle nach Schaltungsoptimierung:

Gesamt-FIT	Fall 1: ext. Befehl	Fall 2: OBC-int.
Trennfunktion	24	n.r.
Übertemp. HL	n.r.	24 + 29 = 53
Iso-Fehler	n.r.	24 + 105 = 129
2-fach redundant		24 + 10 = 34
Überspg. In/Out	n.r.	24+20 = 44

Tabelle 5

Fazit: ASIL B(D) (max. FIT =100) erreichbar; ASIL D (max. FIT=10) nur durch 2-3 fache Redundanz für jede einzelne Funktion realisierbar.

7 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wesentlichen Kosten des Teilvorhabens sind in der Kategorie Personalkosten angefallen; diese waren zur Erarbeitung der in Kap. 6 dargestellten Ergebnisse notwendig. In der Kategorie Materialkosten sind deutlich weniger Kosten als in der bewilligten Zuwendung vorgesehen angefallen, da durch die Ergebnisse des Unterauftrags eine weitere Realisierung bzw. Überarbeitung einen Bestandsgeräts eines On-Board-Chargers voraussichtlich keine Zusatzergebnisse mehr generiert hätte. In der Kategorie Reisekosten sind ebenfalls deutlich weniger Kosten angefallen als in der bewilligten Zuwendung vorgesehen, dies war überwiegend bedingt durch die Reise- und Kontaktbeschränkungen durch die Corona-Pandemie sowie im weiteren Projektverlauf durch die überwiegend von den Projektpartnern unabhängige Durchführung des Teilvorhabens. Notwendige Abstimmungen mit den Projektpartnern sowie ein Ergebnisaustausch konnten durch Online-Meetings durchgeführt werden.

8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten wurden gemäß der Projektplanung geleistet; wesentliche Abweichungen v.a. nach den Ergebnissen des gemeinsamen Unterauftrags wurden in den einzelnen Zwischenberichten dargestellt.

9 Nutzen und Verwertbarkeit / Fortschreibung des Verwertungsplans

9.1 Erfindungen / Schutzrechtsanmeldungen

Während der Projektphase wurden keine Erfindungen/Schutzrechte angemeldet.

9.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Die weiteren Schritte zur Weiterentwicklung des On-Board-Chargers zu einem produktnahen Produkt sind:

- Erweiterung der Betriebssoftware auf Basis der Forschungsergebnisse
- Fehler-Maßnahmen-Einfluss-Analyse (FMEA) zur Einhaltung der geforderten ASIL-Einstufung für die Sicherheitsfunktion „Trennen von HV-Batterie“
- Kontaktaufnahme zu Zertifizierungsstellen (z.B. Intertek, Primarion)
- Messung der leitungsgebundenen Störaussendungen zur Einhaltung der CISPR25

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten haben sich durch die gegenwärtige weltpolitische Lage im Automobilsektor, welche negative Auswirkungen auf den deutschen Markt hat, erheblich verringert. Zwar sind die Ergebnisse der Projektarbeit im Teilvorhaben der Finepower GmbH sehr konkret, und diese können auch zeitnah potenziellen Kunden präsentiert werden. Die unternehmensinterne Weiterentwicklung bzw. Funktionserweiterung eines On-Board-Chargers zu einem produktnahen Prototypen kann prinzipiell bereits jetzt erfolgen. Jedoch gehen wir durch die aktuelle Marktsituation derzeit von einem verzögerten Umsatzwachstum aus, da die Automobilhersteller und -zulieferer derzeit starke Gewinnrückgänge verzeichnen und dementsprechend zu einer Einsparpolitik übergehen. Eine wirtschaftliche Verwertung ist daher vor dem Hintergrund der aktuellen weltweiten wirtschaftlichen Situation frühestens im Jahr 2028 durch entsprechende Portierung der Ergebnisse in die Serienentwicklung von On-Board Ladegeräten für autonome Fahrzeuge bei unseren Kunden (sowohl OEM als auch Zulieferer) abzusehen.

9.3 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Es ist geplant, die Projektergebnisse sowie den funktionserweiterten On-Board-Charger im Rahmen der Fachmessen für Leistungselektronik (PCIM in Nürnberg bzw. electronica in München) zu präsentieren, wo Finepower jeweils Aussteller ist. Dies wird für die Jahre 2026 bzw. 2027 angestrebt.

9.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Da bisher keine Schutzrechtsanmeldungen durch die Projektergebnisse vorgenommen wurden, ist auch keine Lizenzvergabe durch die Projektergebnisse möglich. Es ist jedoch eine Schutzrechtsanmeldung in Planung, sodass bei Erfolg die geschützten Merkmale insbesondere der

Automobilindustrie im Rahmen von Geschäftsmodellen zum gegenseitigen Austausch von technischen Informationen und Nutzungsrechten angeboten werden sollen.

Finepower hat in den letzten Jahren einige strategische Partnerschaften mit EMS-Dienstleistungsunternehmen („Electronics Manufacturing Service“ – dt.: Elektronik-Hersteller) in Deutschland sowie Asien etabliert, mit welchen die grundsätzliche Einigung erzielt wurde, dass Serienproduktionen in gemeinschaftlicher Verantwortung durchgeführt werden sollen. In diesem Rahmen kann bei entsprechender Beauftragung durch ein OEM jederzeit kurzfristig eine Kooperationsentwicklung zur Serienreife mit anschließender Serienproduktion umgesetzt werden.

10 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens

Während der Projektlaufzeit ist uns kein Fortschritt auf dem Gebiet der Funktionserweiterung eines On-Board-Chargers für den Betrieb während der Fahrt bekannt geworden.

11 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Es wurden bis zum Projektende keine Ergebnisse des Teilvorhabens veröffentlicht. Dies ist im Rahmen der Messen PCIM und electronica für die Folgejahre geplant. Bis dahin ist eine Schutzrechtsanmeldung geplant.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel AnRox – Funktionserweiterung On-Board Charger	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Heiland, Georg	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.06.2024
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Finepower GmbH Carl-Zeiss-Ring 21 85737 Ismaning	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 19A21004I
	11. Seitenzahl 20
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 11019 Berlin	13. Literaturangaben
	14. Tabellen 5
	15. Abbildungen 12
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Technische Informationsbibliothek Hannover, Welfengarten 1B, 30167 Hannover Datum: 09.12.2024	
18. Kurzfassung Im Verbundprojekt „AnRox“ war Finepower für die Erforschung der Funktionserweiterung eines On-Board-Chargers verantwortlich, welcher Energieverteilungsfunktionen im DC-Bordnetz von autonomen Fahrzeugen während der Fahrt übernehmen sollte. Es wurden mögliche Einsatzszenarien definiert sowie die daraus resultierenden Sicherheitsanforderungen und Lösungen dafür erarbeitet.	
19. Schlagwörter	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) report
3. title AnRox – Funktionserweiterung On-Board Charger	
4. author(s) (family name, first name(s)) Heiland, Georg	5. end of project 30.06.2024
	6. publication date
	7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address) Finepower GmbH Carl-Zeiss-Ring 21 85737 Ismaning	9. originator's report no.
	10. reference no. 19A21004I
	11. no. of pages 20
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 11019 Berlin	13. no. of references
	14. no. of tables 5
	15. no. of figures 12
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) Technische Informationsbibliothek Hannover, Welfengarten 1B, 30167 Hannover Date: 09.12.2024	
18. abstract Within the funding project „AnRox“ Finepower was responsible for research on a functional extension of an existing on-board charger for autonomous electric vehicles, enabling the charger to distribute energy inside the car dc grid while driving. Possible use-cases were defined and the necessary safety requirements and solutions therefore have been derived.	
19. keywords	
20. publisher	21. price