H2-Integration in elektrische Antriebssysteme (H_2EASY)

HELLA Abschlussbericht

zum Teilvorhaben
„Definition und automobilelektronische Bewertung eines DC/DC-Wandlers mit kompakten Speicherdrosseln für Brennstoffzellfahrzeuge“

Zahlungsempfänger:

HELLA GmbH & Co. KGaA

Förderkennzeichen:

03B10110D

Vorhabenbezeichnung:

H_2EASY

Laufzeit des Vorhabens:

01.11.2021 bis 30.04.2024

Berichtszeitraum:

01.11.2021 bis 30.04.2024

Gefördert durch:

Bundesministerium für Verkehr

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie | nip

H_2EASY:

H2-Integration in elektrische Antriebssysteme (H_2EASY)

Projektkonsortium

- HELLA GmbH & Co. KGaA
- Sumida
- Assoziierter Partner: BMW
- Universität Kassel, KDEE
- E-Stream Energy GmbH & Co. KG

Konsortialführer

SUMIDA Components & Modules GmbH

Dr. Hans-Vogt-Platz 1

94130 Obernzell Germany

Koordinator: Michael Schmidhuber

Mail: MSchmidhuber@eu.sumida.com

Telefon: +49 8591 937-552

Inhaltverzeichnis

Kurzdarstellung **3**

1 Aufgabenstellung **3**

1.1 Gesamtziel des Vorhabens 3
1.2 Beitrag HELLA 4
1.3 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 4
1.4 Planung und Ablauf des Vorhabens 5
1.5 Stand von Wissenschaft und Technik zum Antragszeitpunkt 5
1.6 Vernetzung und Zusammenarbeit 6
1.6.1 Projektintern 6
1.6.2 Mit externen Partnern 7

Eingehende Darstellung **9**

1 AP1 – Konzeptphase: **9**

2 AP2 – Magnetische Komponenten für Bordnetzwandler: **10**

2.1 Vorstellung der gekoppelten Spule 11
2.2 Vorstellung des Ansatzes 11
2.3 Simulationsansatz zur Bestimmung der Auslegungsparameter 12
2.4 Vergleich der Simulationsergebnisse HELLA vs. Uni Kassel 16
2.5 Design der gekoppelten Spule 17

3 AP3 – Leistungselektronische Komponenten und Schaltungsvarianten **18**

4 AP4 – Batterie- und Brennstoffzellenkonzepte: **19**

5 AP5 – Aufbau von Funktionsmustern **19**

5.1 Aufbau der gekoppelten Spule 19
5.2 Vermessung der gekoppelten Spule 20
5.3 Effizienzmessung mit der gekoppelten Induktivität im FC DC/DC Wandler 22

6 AP 6 – Lebensdauer & Zuverlässigkeit **24**

7 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse und Erfahrungen **25**

8 Fortschritt anderer Stellen **25**

9 Literatur **25**

Kurzdarstellung

Im Folgenden werden die Aufgabenstellung und der Beitrag von HELLA im Projekt beschrieben. Es werden die Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde, skizziert und Angaben zur Planung und zum Ablauf dargestellt. Ausführlicher wird ein Blick auf den Stand von Wissenschaft und Technik zum Antragszeitpunkt in den wichtigen Domänen gegeben. Mit der Vernetzung und Zusammenarbeit im Projekt und mit externen Stellen schließt die Kurzdarstellung.

1 Aufgabenstellung

1.1 Gesamtziel des Vorhabens

Die Brennstoffzelle (BZ) ist bei Einsatz von regenerativen Energiequellen eine hervorragende Alternative zur etablierten Batterie, hat aber wegen der relativ langsamen Änderungsrate ihrer elektrochemischen Reaktion Probleme mit schnellen Lastwechseln, wie sie bei Fahrzeugantrieben auftreten. Die gleiche Problematik tritt ebenfalls – in anderen Größenordnungen – im aviatischen und maritimen Bereich auf.

Im hier vorgeschlagenen Projekt soll die Energiewandlungskette zwischen der BZ und dem Kfz-Antrieb optimiert werden. Die vorgeschlagene Optimierung basiert auf der Tatsache, dass BZ am effizientesten arbeiten können, wenn sie im Teillastbereich und in einem konstanten Arbeitspunkt betrieben werden. Der Antrieb eines Kfz weist jedoch stark und schnell schwankende Leistungsanforderungen auf, die die BZ nicht ohne weiteres bedienen kann. Eine Entkopplung der BZ-Leistungsabgabe mittels einer geeigneten Pufferbatterie und dazugehöriger Leistungselektronik ist also sinnvoll. Diese Komponenten sollen im Projekt H2EASY untersucht werden.

Durch die Möglichkeiten der Aufteilung von Gleich- und Wechselanteil des magnetischen Flusses ist eine Gewichtsreduktion von bis zu 50 % gegenüber bekannten 8-phasigen Energiewandlern ohne magnetische Kopplung bei gleichem Ripplestrom das Ziel. Die mögliche Reduktion der Verluste in den magnetischen Bauelementen ist dabei im Bereich von 20 % bis 25 % anzugeben.

1.2 Beitrag HELLA

HELLA hatte im Projekt vorrangig beratende und unterstützende Aufgaben. Ziel war es, den Brennstoffzellen Fahrzeugmarkt zu monitoren und über die Entwicklung im Rahmen der Technologieoffenheit auf den Laufenden zu bleiben.

Im Arbeitspaket 2 lag das Hauptaugenmerk auf dem Aufbau und der Charakterisierung der Prototypen für das Funktionsmuster in AP 2.9, welches von der Uni Kassel in AP 5.1 im Aufbau getestet wurden. Diesbezüglich stand u. a. die Fertigbarkeit (im Hinblick auf Serie) der Wicklungen beider Prototypen im Fokus

Im Umfeld magnetischer Bauelemente entwickelt HELLA einen Workflow, der ausgehend von einem detaillierten FEM Simulationsmodell eines induktiven Bauteils dessen Amplituden– und Phasenfrequenzgang erzeugt und mittels Curve Fitting Algorithmen für die verschiedenen möglichen Ersatzschaltbilder die passenden Bauteilwerte (RLC) ermittelt. In der Simulation der elektrischen Schaltung können dann damit die weitegehend realen Charakteristika der induktiven Bauteile einschließlich parasitärer Effekte, wie Skin- und Proximity Effekt und wicklungsabhängige Koppelkapazitäten berücksichtigt werden. Neben FEM-Simulationsergebnissen können auch Messungen realer Induktiver Bauteile als Eingangswerte für die Frequenzanalyse dienen. Diese Herangehensweise wurde im Konsortialtreffen auf 24.04.2023 mit den Partnern diskutiert.

In AP 2.4 wurde der Einfluss Kern Geometrien bewertet. Die bereits beim Statustreffen in Erlau vorgestellte Berechnungsformel für zusätzliche Luftspaltverluste in der Wicklung wurde kalorimetrisch verifiziert. Zudem wurde ein Skript für die Verlustberechnung modifizierter E-Kerne erstellt. Alle neuen Erkenntnisse wurden in den Wicklungsaufbauten berücksichtigt.

Zuletzt wurde im Projekt noch der Austausch bzgl. der Kaskadierung induktiver Bauelemente in AP 5 (Kaskade- oder Ring-Topologie) zwischen Sumida und Kassel geführt, die für eine spätere Implementierung wichtig sind.

Mit BWM stand ein assoziierter Partner im Projekt parat, der an einer Brennstoffzellen Serienlösung arbeitete. HELLA trug durch langjährige Erfahrung als Anbieter automobiler Elektroniksysteme umfangreiche Kenntnisse zu den Systemanforderungen und der Anwendung im Automobil bei. Diese lassen sich aus der Entwicklung und Herstellung von Automobilelektronik in den Bereichen Batteriediagnosesysteme, DC/DC-Wandler für Mikro- und Mildhybridfahrzeuge sowie DC/DC-Wandler für BZ-Range-Extender ableiten. Bisher werden in solchen DC/DC Wandlern ungekoppelte Drosseln bzw. einfach gekoppelte Drosseln ohne Belastungstrennung verwendet.

1.3 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Brennstoffzellensysteme als Energielieferanten für Kfz-Antriebe weisen Verbesserungsbedarf hinsichtlich ihrer Systemkosten, des Systemgewichts und des -volumens auf, um am Markt attraktiv werden zu können. Insbesondere die Volumen- und Gewichtsreduktion der Energiewandlungskette vom Tank zum Antrieb stellt eine Herausforderung dar, da diese Eigenschaften von

der Systemleistung abhängen. Dafür sind innovative Ansätze erforderlich, die in diesem Forschungsprojekt behandelt werden sollten. Abstimmungen der Systemkomponenten unter Einsatz neuer Technologien ermöglichen eine starke Verkleinerung, die in ein Baukastensystem münden kann. Diese Technologie wurde bisher im Labormaßstab untersucht und konnte dort äußerst vielversprechende Ergebnisse liefern. Der Fokus im Projekt lag auf der Energieumwandlung mittels DCDC Wandler zwischen der Brennstoffzelle und der Pufferbatterie. Es wurde ein innovativer Ansatz zur Auslegung von magnetischen Bauelementen untersucht. Das Förderprojekt H2EASY sollte ermöglichen, diese Technologie auf Fahrzeug- Anwendungen zu übertragen. Bei erfolgreichem Abschluss leistet es einen nennenswerten Beitrag zur Volumen-, Gewichts- und Kostenreduktion kritischer Fahrzeugkomponenten und damit zu Marktreife nicht-fossil angetriebener Fahrzeuge.

1.4 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt war in drei Phasen unterteilt. In der ersten Phase sollten die Anforderungen erarbeitet werden, die der vorgestellte Systemansatz an die Leistungselektronik und die Batterie stellt. In Phase 2 sollten daraufhin die relevanten Komponenten, insbesondere die magnetischen Bauteile und der hochdynamische Batteriespeicher ausgelegt und anhand erster Funktionsmuster validiert werden. Für den DC/DC-Wandler sollte eine Tradeoff-Analyse zwischen der Skalierung/Kaskadierung der Technologie gegenüber dem Aufwand und den Kosten die Grundlage für die Identifikation sinnvoller Einsatzszenarien bilden. Für die Batterie wurden geeignete Konzepte zum elektrischen und thermischen Management entwickelt und hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit evaluiert. In der dritten und letzten Phase sollte anschließend ein Demonstrator aufgebaut werden, der auf die Anforderungen der Spezifikation aus Projektphase 1 optimiert wird und somit die Funktion des vorgestellten Konzepts in realitätsnahen Belastungsfällen demonstriert. Die Arbeitspakete sind in Tabelle 1dargestellt.

Tabelle 1 – Arbeitspakete und Mitarbeit HELLA

AP	Titel	BMW	SUM	HEL	EST	UKS
AP1	Konzeptphase	Z	Z	Z	Z	A / Z
AP2	Magnetische Komponenten für Bordnetzwandler		A / P	Z		Z / P
AP3	Leistungselektronische Komponenten und Schaltungsvarianten			Z		A / Z / P / T
AP4	Batterie- und Brennstoffzellenkonzepte				A / P	Z
AP5	Aufbau von Funktionsmuster und Demonstrator, Validierung	Z		Z		A / P / D / T
AP6	Lebensdauer und Zuverlässigkeit	Z		Z	A / P / T	Z

A= Ansprechpartner | Z = Zuarbeit | P = Prototypen-/Labormusterbau | D = Demonstratorbau | T = Tests
SUM – Sumida | HEL – HELLA | EST – E-Stream | UKS – Uni Kassel

Auf regelmäßigen Projekttreffen wurde die Einhaltung der Meilensteine überprüft und ggf. notwendige Maßnahmen abgestimmt. Ein zentraler „Abbruchmeilenstein“ wurde mit der Realisierung von Technologie-Labormustern für den DC/DC-Wandler und die Batterie angesetzt, mit denen die jeweiligen Funktionen unter Einsatzbedingungen validiert und die Verbesserungen für den finalen Demonstrator prognostiziert wurden (Meilenstein 3, Projektmonat 18). Mit dem Abschluss des Projekts sollte je ein funktionsfähiger Demonstrator unter Einsatzbedingungen validiert sein, wodurch der Nutzen des vorgestellten Ansatzes für industrielle Maßstäbe abgeleitet werden konnten.

1.5 Stand von Wissenschaft und Technik zum Antragszeitpunkt

Am Fachgebiet KDEE-LE der Universität Kassel wurden Methoden entwickelt und veröffentlicht, die für magnetische Bauteile einen besonders effizienten, platzsparenden und kostengünstigen Aufbau ermöglichen. Insbesondere der Ansatz der Belastungstrennung und der daraus resultierende Gewichtsvorteil, der in der Literatur nur vermutet wird, kann konkret umgesetzt und bewiesen werden. Zudem konnte eine Möglichkeit entwickelt werden, die auf Seiten der Brennstoffzelle

den wirksamen Stromripple im gesamten Aussteuerungsgrad des Tastgrads fast vollständig unterdrücken kann.

Unklar ist hier unter anderem der Einfluss von Nichtlinearitäten der magnetischen Komponenten, die im Projekt untersucht werden sollen. Die Ripple-Auslöschung erfordert zudem zusätzlichen Halbleiteraufwand, der jedoch bei merklich sinkender Drosselgröße und der im Projekt abgezielten Leistungsklasse kompensiert werden kann. Kombinationsmöglichkeiten mit der vorgestellten magnetischen Belastungstrennung waren Gegenstand der Untersuchungen. Aktuell werden für DC/DC-Wandler bei Einsatz an einer Brennstoffzelle verschachtelte Topologien mit oder ohne gekoppelte Drosseln verwendet (siehe Förderprojekt „FC-Komp“, FKZ 03B10106). Eine magnetische Belastungstrennung erfolgt dabei noch nicht.

1.6 Vernetzung und Zusammenarbeit

1.6.1 Projektintern

Die projektinterne Arbeitsaufteilung ist in Abbildung 1dargestellt. Im Konsortium brachte UKS die Grundlagen für die neuartige Drosseltechnologie ein, die Sumida als Bauteil detaillierte, entwickelte, herstellte und für die Entwicklung des DC/DC Wandlers durch UKS bereitgestellt hat. EST entwickelte ein Batteriesystem für die Anwendung im Brennstoffzellengesamtsystem. BMW und HELLA leiteten aus dem Fahrzeug, dem Brennstoffzellengesamtsystem und aus der Automobilelektronik die Anforderungen ab und stellten durch kontinuierliche Diskussion eine zügige und zielgerichtete Umsetzung sicher.

Auf Basis der Erfahrungen als Automobilzulieferer mit Leistungswandlern in Serienproduktion, hat HELLA im AP1 gemeinsam mit BMW und in Abstimmung mit UKS und Sumida die Kundenanforderungen herausgearbeitet und in Zielspezifikationen für die Gestaltung und für die Prüfung der Speicherdrosseln und des DC/DC Wandlers überführt. Dabei wurden die bei HELLA gesammelten Erfahrungen insbesondere mittels der z.B. für Aufbau- und Verbindungstechnik, Schaltungstechnik und Elektromagnetische Verträglichkeit daraus entstandenen Normen und Design-Guidelines berücksichtigt und eingearbeitet, insoweit dies für ein Forschungsprojekt geeignet war. Die konkreten Erfahrungen zu speziellen leistungselektronischen Aspekten des Geräte- und Bauteildesigns wurden durch Konsultationen der HELLA-Experten zu Zielspezifikationen sowie in kontinuierlichen Designreviews mit UKS und Sumida eingebracht.

In AP2 unterstützte HELLA die durch Sumida durchgeführten Arbeiten zur Simulation der Drosseln mit Simulationszielen, Informationen zu Einflüssen zur thermischen und elektrisch isolierten Ankopplung an das Kühlsystem und elektrischen Einflüssen bzw. Kopplungen mit der Leistungselektronik. Die Untersuchungen zur Multiphasen-Kaskadierung sowie hartmagnetisch vorgespannter Induktivitäten unterstützte HELLA mit Zielfindung, mit den Resultaten der bei HELLA realisierten Multiphasen DC/DC und AC/DC Wandlern, sowie den aktuell und zukünftig zu erwartenden Anforderungen, sowie durch Reviews. Zur EMV-Filterdrosselauslegung trug Hella mit den Anforderungen an Gerätefilter, Dimensionierung- und Tolerierungsvorgaben und Reviews bei. Letzteres gilt analog für die Musteraufbauten bei Sumida.

Die Entwicklung und Untersuchungen in AP3 und den Aufbau und die Erprobung des DC/DC Wandlers in AP5 unterstützte und begleitete HELLA parallel kontinuierlich, um bestmögliche Voraussetzungen für einen effizienten Transfer der Ergebnisse des AP in eine anschließende Industrialisierung bei HELLA zu schaffen.

Die Arbeiten zum Condition Monitoring für Brennstoffzellensysteme in AP6 hat HELLA mit Erfahrungswerten aus dem Bereich Batteriemanagement unterstützt. In die Untersuchung von Ripple-Auswirkungen auf Batteriesysteme hat HELLA die Erkenntnisse aus derzeit aktuellen Batteriesystemprojekten eingebracht.

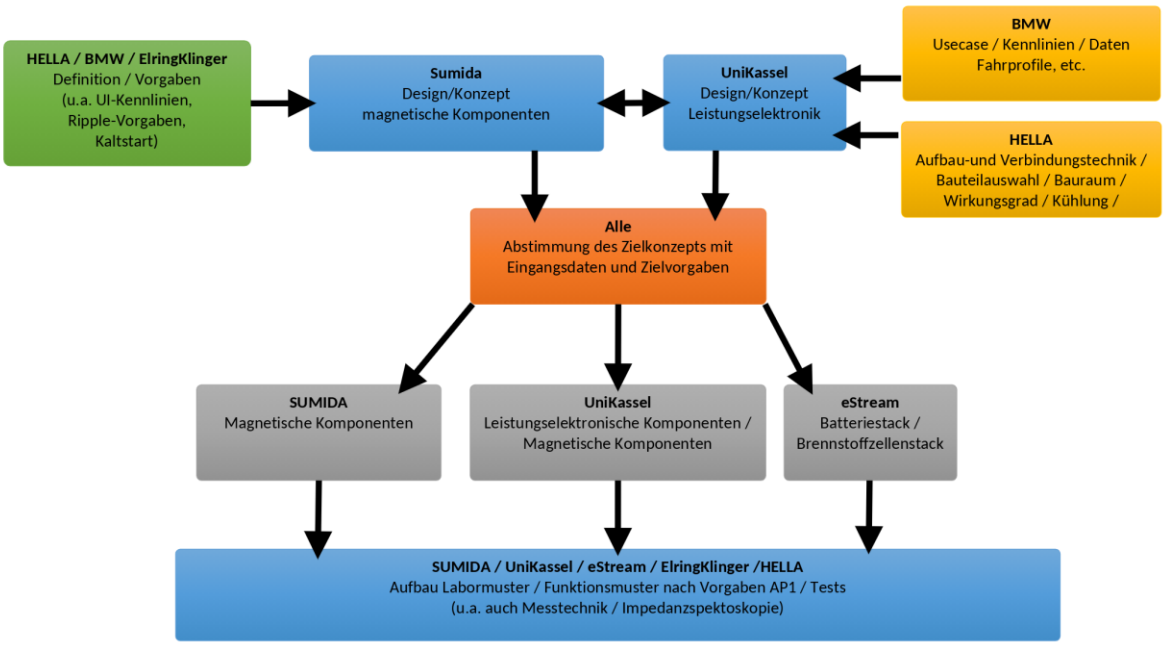


Abbildung 1 – Zusammenarbeit im Konsortium

1.6.2 Mit externen Partnern

In diesem Umfeld hat HELLA existierende Kontakte genutzt, um der Uni Kassel ein größeres Portfolio für die Auswahl und Bereitstellung von SiC Leistungsmodule zu ermöglichen. Die modulare Bauform ist hier eine relativ neue Entwicklung, welche 2-6 Halbleiter in einem Gehäuse vereint, um so letztendlich Bauraum und Kosten zu sparen (im Vergleich zu diskreten Komponenten).

Mit dem Abschluss des Vergleichs der Halbleiter Leistungsmodule für die verschiedenen Topologie Varianten unterstützte HELLA im nächsten Schritt die Einbindungen von Halbleiter Lieferanten in das Projekt. Basierend auf den Anforderungen war es möglich, über den etablierten HELLA Zulieferer Infineon projektspezifische Module zu beziehen. Die ersten Infineon Entwürfe führten jedoch zu Simulationsergebnissen, die mit den eigenen Erfahrungswerten nicht korrelierten. Basierend auf der geforderten Stromtragfähigkeit war die Anzahl der benötigten Module und somit das von den Modulen eingenommene Volumen zu groß, was für das Projektziel Leistungsdichte nicht zielführend gewesen wäre. Ursprünglich wurden 4 x 2 Phasen abgeschätzt, wobei die Simulationsergebnisse dagegen 8 x 2 Phasen notwendig machen würden.

Die HELLA Teilnahme auf der EPE Konferenz 2023 ermöglichte die Kontakt zur Firma Semikron-Danfoss. Hier stand die Unterstützungsleistung bei der Entwärmung von Schaltungsteilen durch Experten im Fokus.

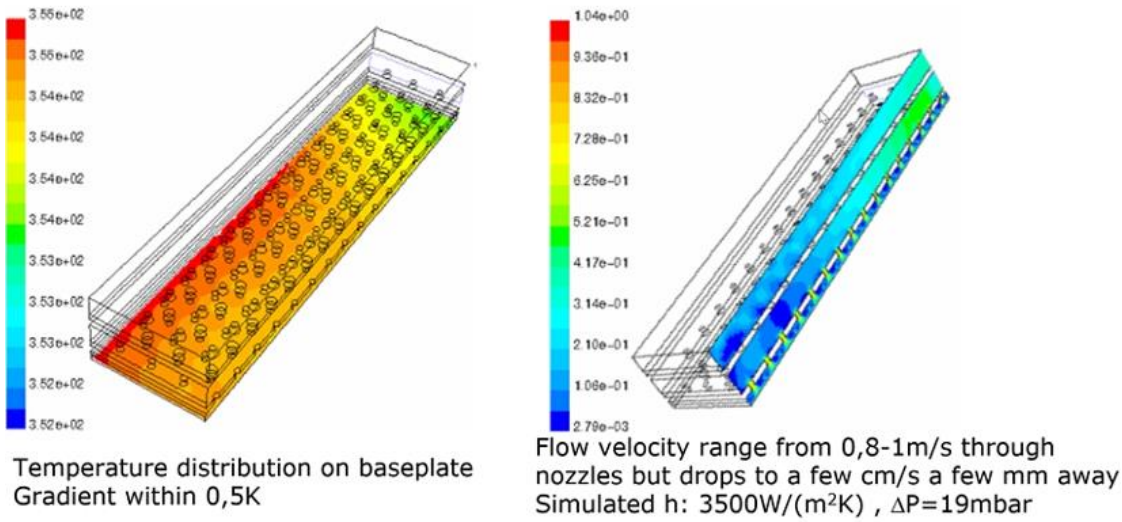


Abbildung 2 –Performance Nachweis einer Shower Power Lösung.

Semikron-Danfoss hat mit der Shower Power Technologie eine Technologie im Portfolio, die eine flächige Entwärmung ohne einen Temperarturgradienten sicherstellt. Die Nutzung der Technologie war zu dem Zeitpunkt als zielführend und vorteilhaft identifiziert worden (s. Abbildung 2Abbildung 2).

Eingehende Darstellung

Die nachfolgenden Kapitel, bezogen auf die Arbeitspakete (AP) im Projekt, geben einen Überblick zum Beitrag und den erzielten Ergebnissen von HELLA.

Hauptbeitrag war es zu Beginn die Spezifikation zu erarbeiten, um die Anforderungen an dem HV DCDC Wandler abzuleiten. Im Umfeld Schaltungstopologie, Regelung, Entwärmung und mechanisches Konzept im Umfeld Hochleistung Bordnetzwandler waren bei HELLA bereits Domänen übergreifende Kompetenzen vorhanden, auf die im Projekt zurückgegriffen wurde.

Im dritten Jahr wurde zudem eine gekoppelte Spule ausgelegt, deren Ansatz in einem vorherigen Förderprojekt identifiziert worden ist. In H2EASY war es die Aufgabe, den Ansatz für einen Hochsetzsteller auszulegen anzupassen.

Um einen Vergleich mit dem anderen magnetischen Design zu ermöglichen, wurde die Anzahl der Phasen, die Schaltungstopologie, sprich die gesamte Hardware gleich gelassen und nur das Regelungskonzept auf ZVS adaptiert

1 AP1 – Konzeptphase:

Die Spezifikation des DC/DC Wandlers als Bindeglied zwischen Brennstoffzelle und Hochvoltsystem des Fahrzeuges wurde gemäß Arbeitsplan erstellt und vereinbart. Wichtige Designmerkmale bzw. Designziele für den DC/DC Wandler mit Auswirkungen auf dessen wesentliche Komponenten wurden aufgestellt und mit den Projektpartnern, insbesondere KDEE/Universität Kassel, Sumida und BMW vereinbart.

Es wurde eine Aufstellung und Analyse der am Markt angebotenen bzw. in der Literatur vorgestellten DC/DC Wandler für Brennstoffzellenanwendungen erstellt, um die Anforderungen einordnen und bewerten zu können. Weiterhin wurden öffentlich verfügbare sowie aus dem Konsortium und von Partnerunternehmen erreichbare Informationen zu Prognosen und Konzepten für zukünftige Brennstoffzellenfahrzeuge erfasst und bezüglich der Auswirkungen auf Anforderungen an DC/DC Wandler und deren Skalierbarkeit bzw. Modularität bewertet.

Eine Spezifikation der Leistungsmerkmale und Schnittstellen des DC/DC Wandlers wurde in enger Abstimmung mit den beteiligten Projektpartnern erstellt. Diese sind in Tabelle 2 dargestellt:

Tabelle 2 Spezifizierte Parameter

Funktionen	Spitzenleistung	Fehlerfälle
Boost-Wandlung, unidirektional	Hochfahrbetrieb	Elektrische Signal für Zelldiagnostik
Dauerleistung	Kurzschlussverhalten	Eingangs- und Ausgangsgrößen
Spannungsbereiche	Strombereiche	

jeweils für Dauerbetrieb / eingeschränkter Betrieb / Kurzzeit / Fehlerfälle,

- Strom- und Spannungsripple auf Brennstoffzellenanschluss und HV-Batterie-anschluss
- Messgenauigkeiten
- Regelparameter und -genauigkeiten
- Arbeitstemperaturbereiche
- Derating-Bedingungen
- Kommunikationsschnittstellen
- Art, Anzahl

Darüber hinaus sind in Tabelle 3 die wichtigsten technischen Parameter dargestellt:

Tabelle 3: Spezifikation des FC DC/DC Konverter

Eigenschaften	Eckdaten	Bemerkungen
Leistung	160 kW @160 V	für mindestens **30** Minuten, **10** % - **20**% zusätzlich
FC Strom	1000 A	**1200** A für Höchstleistung als Reserve
FC Charakteristika	U_0 = 207 V, R_i = 55 mΩ	gilt im quasi-linearen Belastungsbereich
Batteriekapazität	5 kWh	
Eingangsspannung DCDC	160 V...300V	125V und 250V @ BMW
Ausgangsspannung DCDC	500 V...850V	
Ausgangsripple	500mA / 15%	< 15 % vom Batteriestrom oder <500 mA
Schaltfrequenz	65...100 kHz	
Wirkungsgrad	96 ... 97 %	97% @ für Leichtlast Betrieb
Kühlmitteltemperatur	65°C	8 Liter pro Minute; 100 mbar Druckverlust
Cx	10 µF...150 µF	
Cy	<300 nF	
Anzahl Phasen	4...8	
Topologie	Unidirektional	DC- galvanisch verbunden
Stromregeldynamik	>30kA/s	Falls auf Antriebsseite erforderlich
Regelgenauigkeit I / U	**+-1%**	Eingang und Ausgang, bezogen auf Maximalwert
Gesamtvolumen-Aufbau	**6** kW/l	**26,6** Liter (Außenhülle des Wandlers) für **160** kW

2 AP2 – Magnetische Komponenten für Bordnetzwandler:

Das Arbeitspaket war Kern der Projektidee und wurde von Uni Kassel und Sumida federführend bearbeitet.

Im Fokus stand eine magnetische Belastungstrennung, d.h. die Aufteilung von Gleich- und Wechselanteil des magnetischen Flusses und daraufhin der Einsatz von optimalen magnetischen Werkstoffen für die unterschiedlichen Stromformen. Am Ende sollte eine signifikante Gewichtsreduktion gegenüber bekannten 8-phasigen Energiewandlern ohne magnetische Kopplung bei gleichem Rippelstrom das Ziel sein.

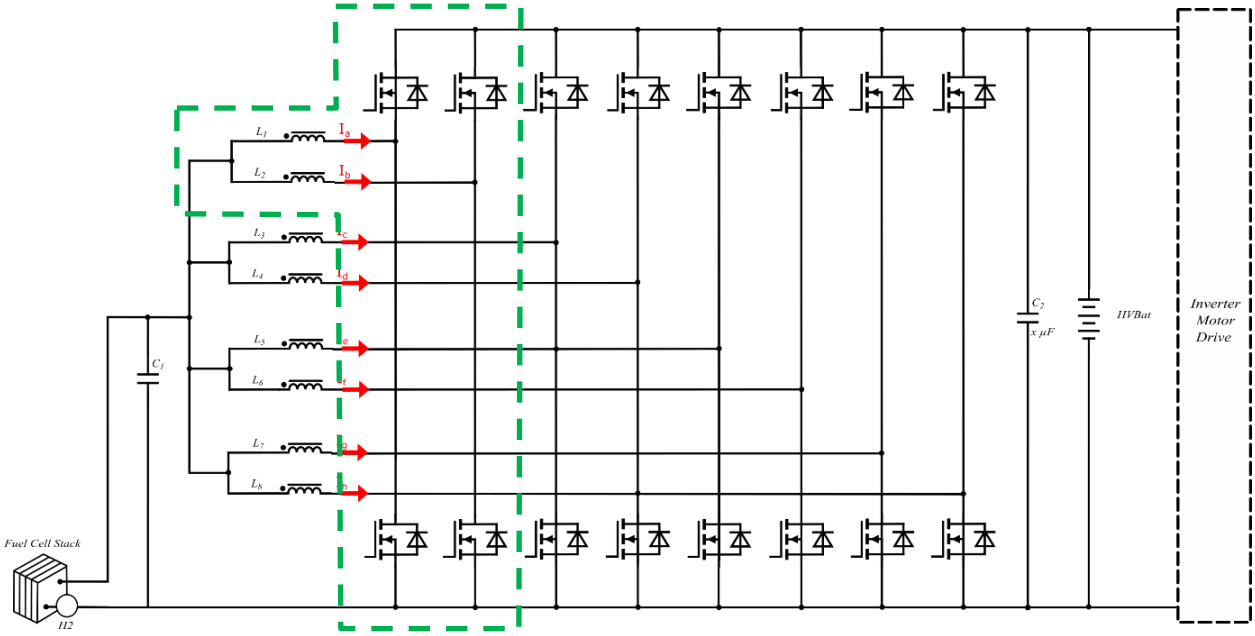


Abbildung 3 – 8 Phasige DC/DC Topologie mit 4 gekoppelten Spulen unter Verwendung von ZVS

Bei der Verfolgung des ursprünglichen Ansatzes gab es Iterationen während der Projektlaufzeit, die in Anpassungen der ursprünglichen Idee resultierten. Im letzten Drittel wurde parallel unter-

sucht, inwieweit gekoppelte Induktivitäten zur Reduzierung der magnetischen Bauteile eingesetzt werden können (s. Abbildung 3). Dabei wurde wie oben schon erwähnt, die Anzahl der Phasen und die Schaltungstopologie übernommen, aber zielführend auf Zero Voltage Switching ZVS umgestellt. Hiermit sollte ein besserer Vergleich der beiden verschiedenen Ansätzen möglich sein. Im Weiteren reicht es den Vergleich nur an 2 Phasen bzw. einer gekoppelten Induktivität zu machen (grün hinterlegt).

2.1 Vorstellung der gekoppelten Spule

Unser Ziel mit dem unten aufgeführten Ansatz war, die Gesamtverluste zu reduzieren. Mit der Auslegung kann man die Aufteilung der Verluste zwischen Spule und MOSFET beeinflussen.

2.2 Vorstellung des Ansatzes

Gekoppelte Induktivitäten von verschachtelten DC/DC-Wandlern sind ein bekannter Ansatz, um die Größe und Kosten der magnetischen Komponenten zu reduzieren. Ein solche Kopplung (z. B. [11]-[13]) bieten viele Vorteile in Stromversorgungen, die im Continuous Conduction Mode (CCM) mit einem Drosselstrom betrieben werden, der durch einen großen Gleichstrom und eine relativ geringe Welligkeit gekennzeichnet ist. In diesem CCM-Betriebsmodus werden die Transistoren im Hartkommutierungsmodus betrieben, und die gekoppelte Induktivität wird häufig für Hochstrom- und Niederspannungsanwendungen wie in [13] verwendet.

Wenn im Weiteren eine bessere Effizienz angestrebt werden soll, kommt man bei DC/DC-Wandlern dagegen häufig zu dem Schluss, für SiC-Bauelementen mit geringen parasitären Eigenschaften Soft-Switching anzuwenden [14].

In einem solchen ZVS-Design (auch als dreieckiger Strommodus TCM bekannt) können die Schaltverluste stark reduziert werden, jedoch muss die Induktivität für einen großen Welligkeitsstrom von etwa dem doppelten Durchschnittsstrom ausgelegt werden (vgl. Abbildung 4). Folglich führt die große Flusswelligkeit zu hohen Kernverlusten oder einem erhöhten Kernquerschnitt, was insgesamt zu einer sperrigen Komponente führt. Gleiches gilt folgerichtig auch für Einzelspulen, die interleaved betrieben werden.

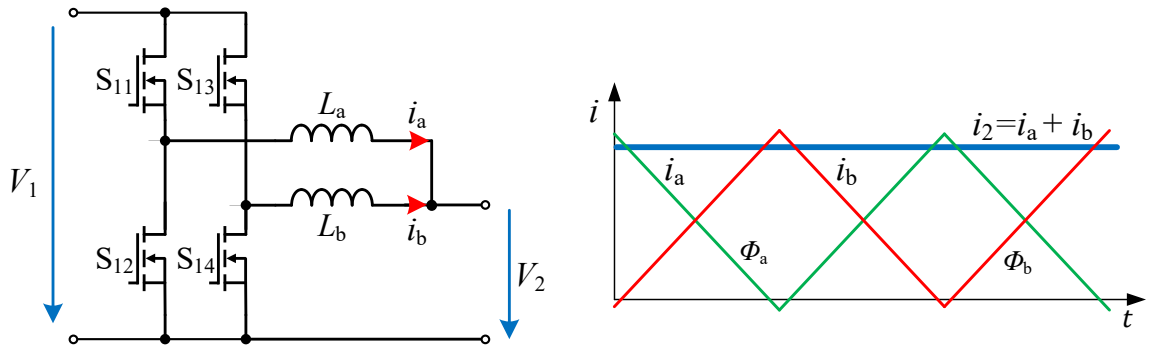


Abbildung 4 – Typischer Anordnung der zwei Halbrücken beim DC/DC Wandler (links), zusammen mit den prinzipiellen Stromwellenformen unter ZVS-Bedingungen (rechts)

Um eine vorteilhafte gekoppelte Induktivität speziell für diesen ZVS zu entwerfen, kombiniert der vorgeschlagene Ansatz die äußeren Schenkel jeder verschachtelten Spule zu einem gemeinsamen äußeren Schenkel (Abbildung 5). Analog zur Wellenauslöschung am verschachtelten Stromausgang ermöglicht dies die Auslöschung der Flusswelle im gemeinsamen äußeren Schenkel, da die Flüsse ϕ_a und ϕ_b derselben Wellenform folgen wie in Abbildung 4 (rechts) gezeigt. Dadurch können die Kernverluste in einem erheblichen Teil des Kerns minimiert werden. Darüber hinaus werden der Querschnitt des gemeinsamen Außenbeins und das gesamte Magnetvolumen aufgrund der reduzierten verschachtelten Spitzenflussdichte deutlich kleiner ausgelegt werden.

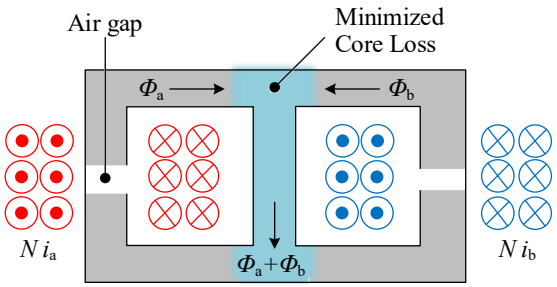


Abbildung 5 – Resultierende Kernanordnung nach der vorteilhaften magnetischen Kopplung

2.3 Simulationsansatz zur Bestimmung der Auslegungsparameter

Für die Auslegung des vorgestellten Ansatzes, haben wir unter Matlab/Simulink ein Simulationsmodell aufgesetzt, dass es ermöglicht, die optimalen Design Parameter der gekoppelten Spule unter Prämisse minimaler SiC MOSFET Verluste zu ermitteln.

Für die Simulation wurden die Parameter in Tabelle 4 angenommen.

Tabelle 4: Matlab/Simulink Simulationsparameter

Parameter	Wertebereich
Eingangsspannung (Fuel Cell)	160 - 300V
Ausgangspannung (Fuel Cell)	540 - 850V
Leistung	160kW
Anzahl der Halbbrücken	8
Max. Eingangsstrom	1000A
Topologie	2 Level Interleaved Boost/Buck
Modultyp	Wolfspeed CAB425M12XM3
Interner Gate Widerstand (→ Uni Kassel)	1,2 Ω

Im Matlab/Simulink Modell (s. Abbildung 6) wird nur eine Zelle, d.h. die Kopplung zweier Spulen berücksichtigt, was im Prinzip ¼ des Wandlers entspricht. Berücksichtigt sind für das Wolfspeed Halbbrückenmodul die R_{Dson} Werte und für den Gate Widerstand in Ansprache mit Uni Kassel nur der interne Wert. Mit den Vorgaben wurde im Folgenden eine Mehrzieloptimierung durchgeführt, d.h.

1. Was ist die optimale Induktivität L?
2. Wie sieht der optimale Kopplungsfaktor k aus?
3. Und wie muss dabei der Frequenzbereich f_{SW} für ZVS gewählt werden?

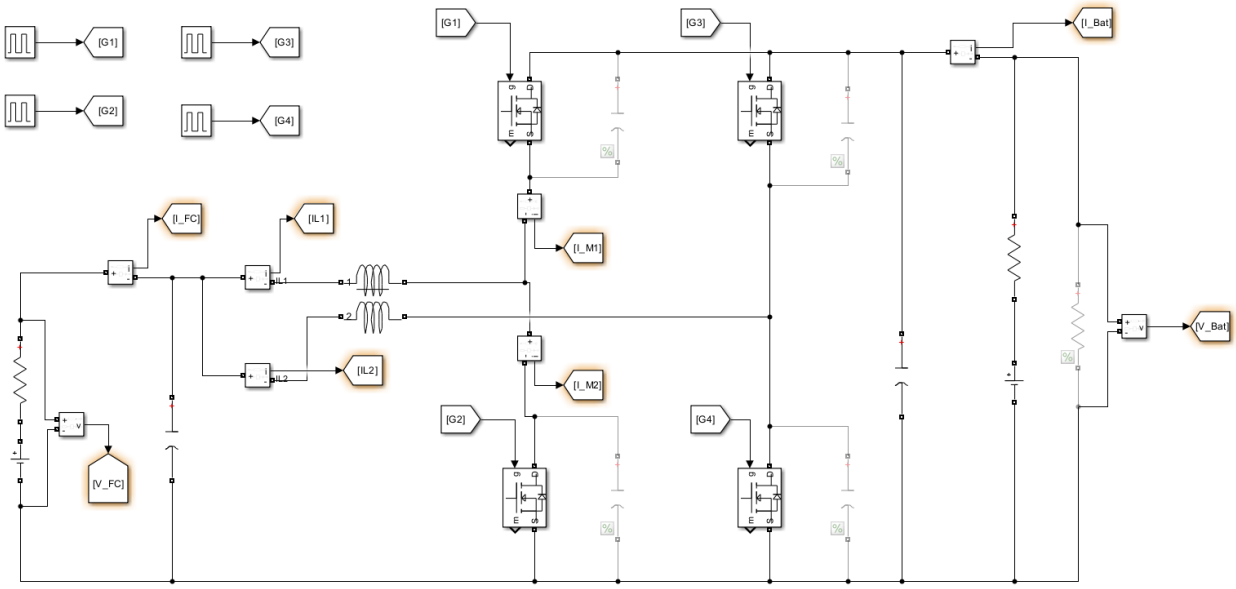


Abbildung 6 – Simulink Modell zur Bestimmung der optimalen Parameter

Die Verluste der SiC Halbrücken MOSFET setzen sich aus Leistungsverlusten

$$P_{Ohm} = R_{DSON} . I_{DS}^2 \qquad (1)$$

und Schaltverlusten

$$P_{fsw} = (E_{ON} + E_{OFF}) . f_{sw} \qquad (2)$$

zusammen. Wegen des ZVS-Betriebs brauchen nur die Ausschaltverluste E_{OFF} betrachtet werden.

$$P_{fsw} = E_{OFF} . f_{sw} \qquad (3)$$

Für die jeweiligen Berechnungen werden die Ströme und Spannungen aus der Simulation genommen, während Angaben zu den E_{ON}- und E_{OFF}-Energien im Datenblatt zu finden sind. Im Falle, dass die zugehöhre Spannung im Datenblatt nicht übereinstimmen mit den Werten aus der Simulation, wurde in erster Näherung linear interpoliert. Letztendlich ging es darum alle Ergebnisse zusammenzuführen und die Design Parameter abzuleiten.

In Abbildung 7 sieht man beispielhaft Ströme und Spannung aus der Validierung, d.h. Transistor Strom I_{DS}, Gate Spannung U_{GS} und den Spulenstrom I_L. Rot hinterlegt ist der Einschaltzeitpunkt des Transistors, bei dem man erkennt, dass im ZVS der Strom negativ ist.

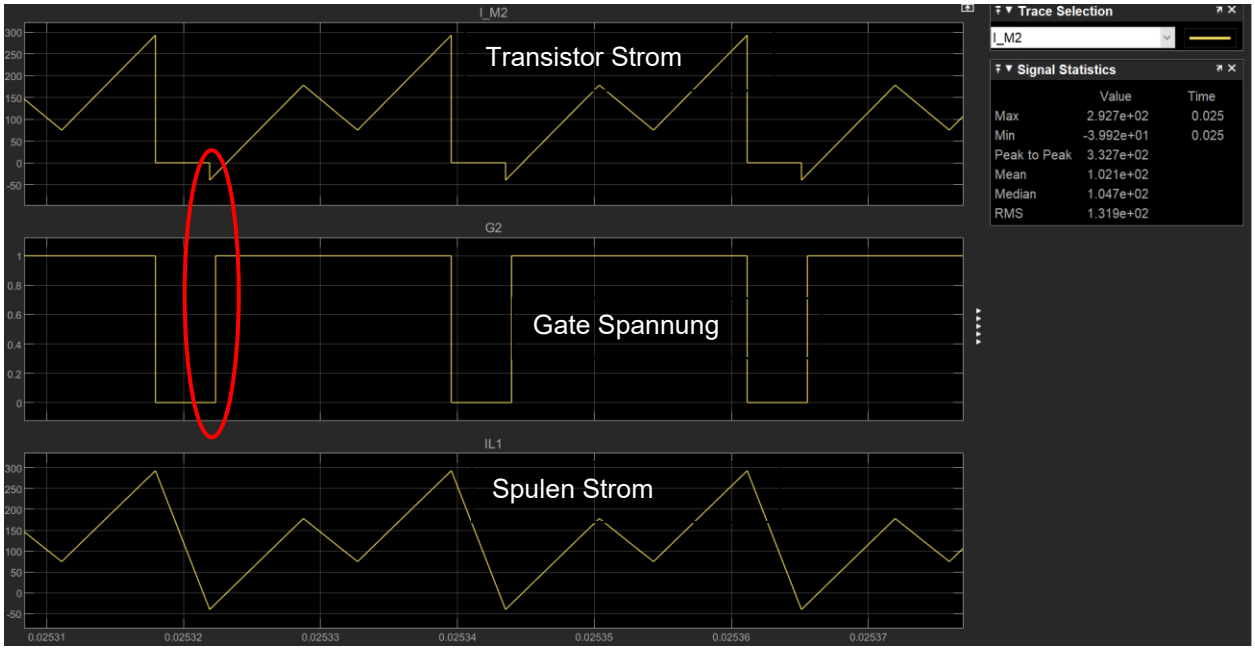


Abbildung 7 – Simulink Ergebnisse für Strom und Spannung

Zu Beginn wurde als optimaler Kopplungsfaktor k = -0.5 angenommen. Danach wurde untersucht, wie sich die Induktivität L auf die Transistor Verluste auswirkt. Parallel konnte analysiert werden, welchen Einfluss die Induktivität L auf die Höhe der Schaltfrequenz f_{SW} hat, die für das ZVS nachgeführt werden muss.

Wie man Abbildung 8 entnehmen kann, verringern sich die Verluste wie auch die ZVS Schaltfrequenz mit steigender Induktivität. Gleiches Verhalten ergibt sich, wenn man sich die minimale und maximale Schaltfrequenz zum Einstellen der Eingangs- und Ausgangsspannungsbereiche vom FC DC/DC Wandler in Abbildung 9 anschaut. Aus der Gegenüberstellung kann entnommen werden L = 10µF.

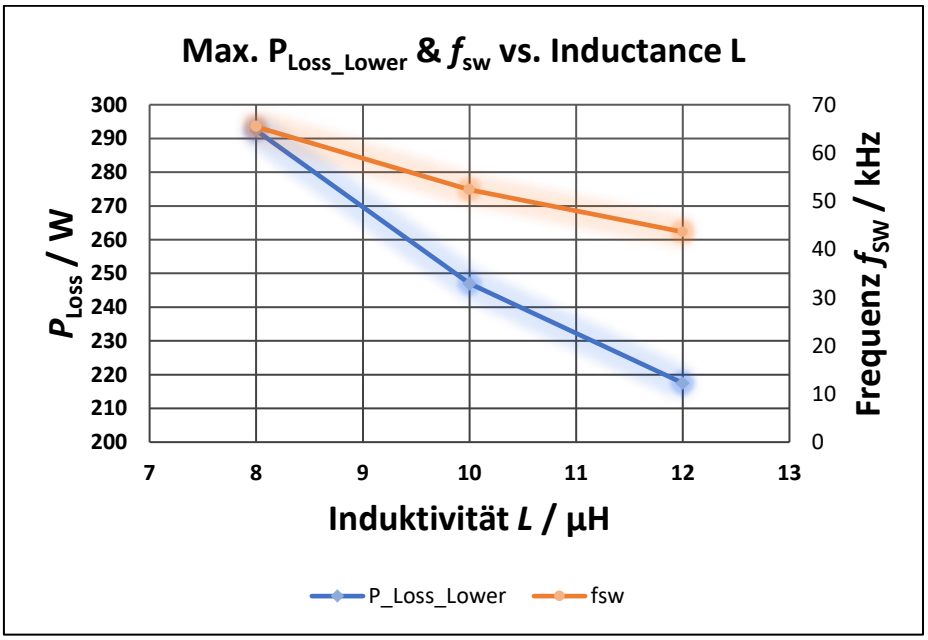


Abbildung 8 – Verhalten der Verluste und der Schaltfrequenz in Abhängigkeit der Induktivität

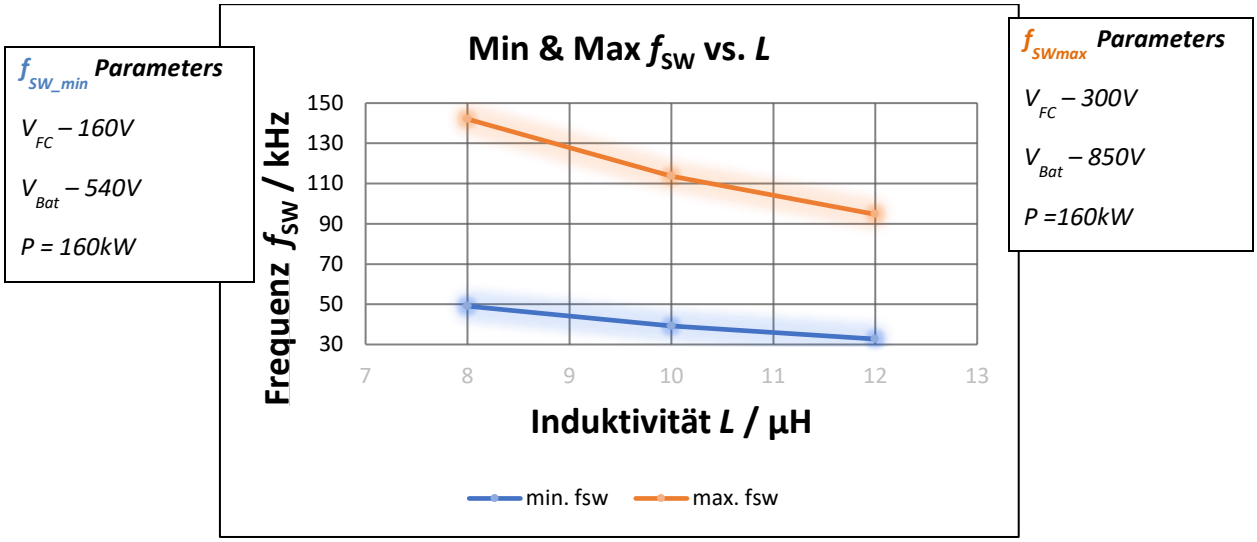


Abbildung 9 – Verhalten der minimalen und maximale Schaltfrequenz vs. Induktivität um den Eingangs- und Ausgangsspannungsbereich einzustellen

Neben den MOSFET Verlusten fallen im Betrieb bei der gekoppelten Spule Kern- und Windungsverluste an, die aus den Strömen resultieren.

Analysiert man, ob die Flussüberlagerung im gemeinsamen Außenschenkel induktivitätsabhängig (@ k = -0.5) ist, stellt man fest, dass der Einfluss vernachlässigbar ist (vgl. Abbildung 10).

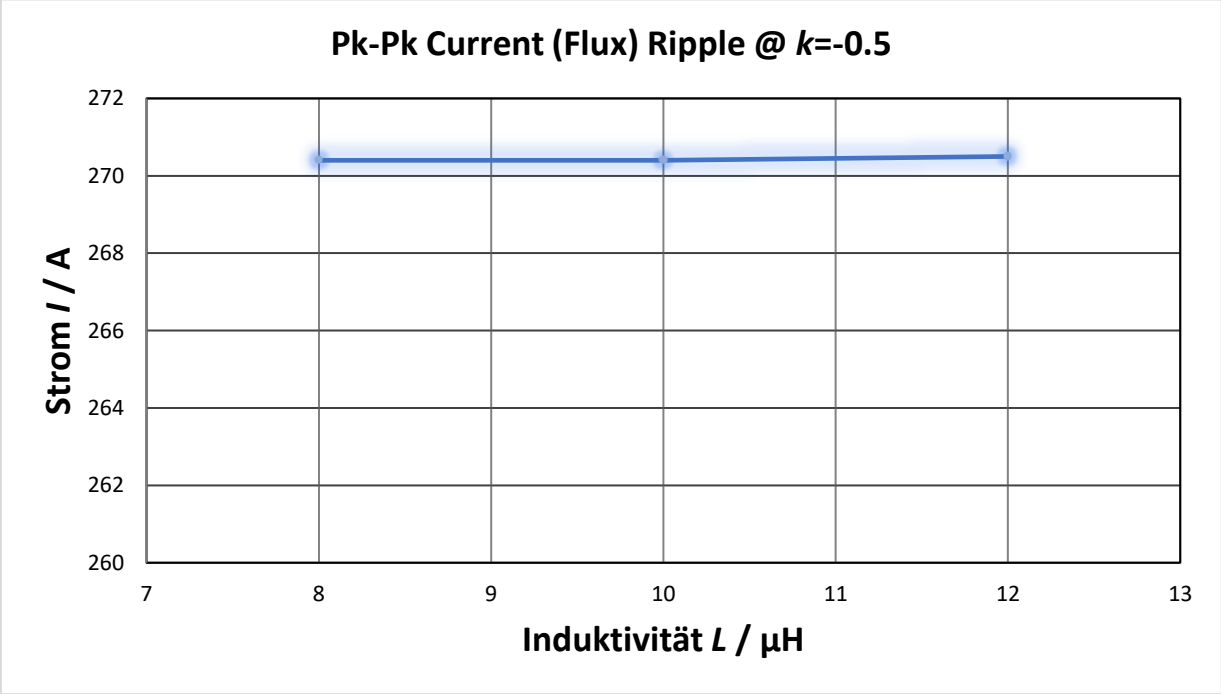


Abbildung 10 – Einfluss der Induktivität L auf dem Fluss im gemeinsamen Außenschenkel

Abschließend wurde die Abhängigkeit des Kopplungsfaktors auf die beiden dominanten Verluste (d.h. MOSFET- bzw. die Kernverluste) des vorgestellten Ansatzes untersucht. Im Fall der MOSFET Verluste kann der HS Transistor Anteil vernachlässigt werden (vgl. auch Tabelle 5). Die Kernverluste verhalten sich proportional zum Peak-Peak Strom.

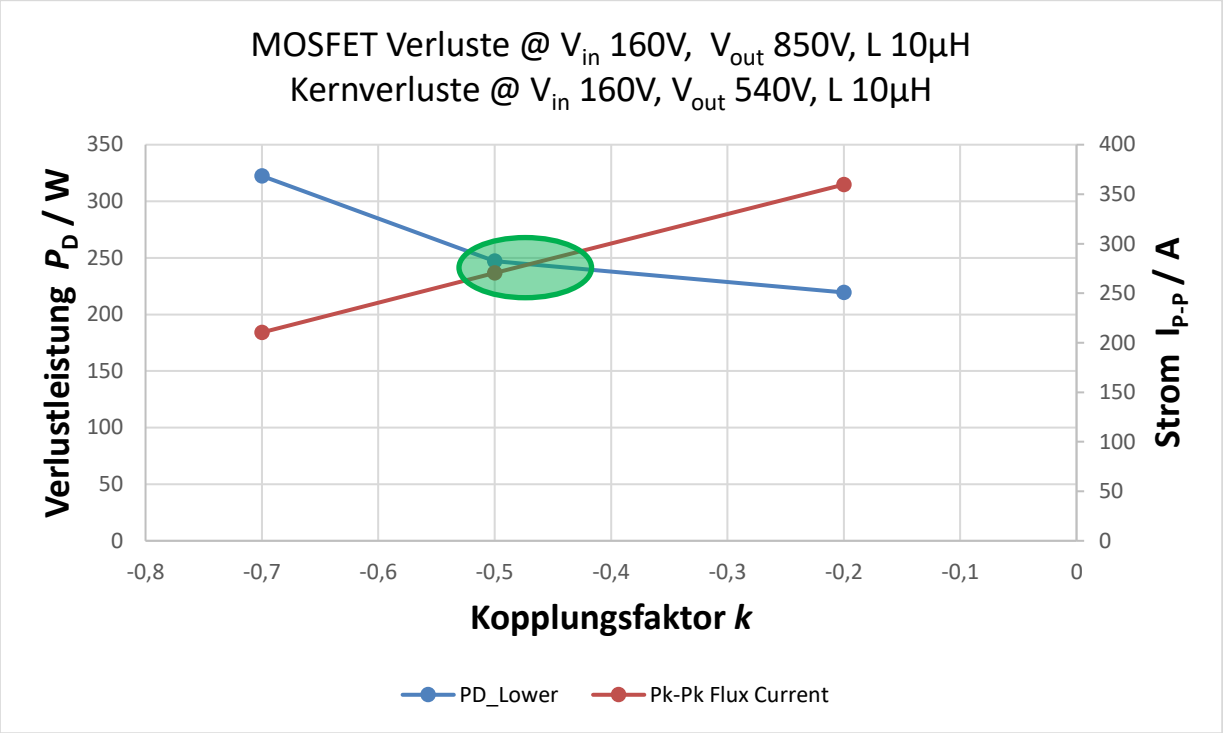


Abbildung 11 – Abhängigkeit des Kopplungsfaktors auf die dominanten Verluste

In Abbildung 11 erkennt man eine gegenläufige Tendenz von MOSFET- vs. Kernverluste. Ein Abwägen führt zu dem grün hinterlegen Kompromiss Bereich für den initial festgelegten Kopplungsfaktor *k*. Wie man erkennen ist *k* = -0.5 Teil des Bereichs.

2.4 Vergleich der Simulationsergebnisse HELLA vs. Uni Kassel

Führt man nun alle Untersuchungsergebnisse der Mehrzieloptimierung, die unter folgenden Randbedingungen ermittelt worden ist,

- Case Temperature – 100°C
- R_{thJC} – 0.14 K/W

zielgerichtet zusammen, ergibt sich für die Parameterschar die unten aufgeführte Tabelle 5. Aus der Aufstellung lässt sich ableiten, dass die wenigsten Halbleiterverluste für eine gekoppelte Induktivität *L* = 10µH bei *k* = -0,5 Kopplung im resultierenden ZVS-Frequenzbereich < 53 kHz vorliegen.

Tabelle 5: Verlustübersicht der Transistoren für die vorgeschlagenen Architektur im TCM Betrieb

Modul	V_{FC} / V	V_{BAT} / V	P / kW	L / µH	K	P_{total_LS} / W	P_{total_HS} / W	f_{SW} / kHz	T_{JC_Low} / °C
CAB425M12XM3 @ 8 Phasen	160	850	160	12	-0.5	217,5	19,9	43,6	130,4
		850		10	-0.5	247	22,9	52,3	134,6
		850		8	-0.5	292	20,3	65,5	140,9
		800		10	-0.5	226	21,6	46,8	131,6
		850	80	10	-0.5	179,5	5,3	96,2	125

Die Ergebnisse sehen sehr vielversprechend aus, wenn man sie mit den Simulationsergebnissen der Uni Kassel für die magnetische Belastungstrennung (vgl. Tabelle 6, untere Zeile, vorgestellt auf dem Statustreffen am 23.10.2023 in München) vergleicht.

Tabelle 6: Simulationsergebnisse der Uni Kassel für den magnetische Belastungstrennungsansatz

PartName	PtotLower, W	PtotUpper, W	Topology	Frequency, kHz	PhaseNumber	TempLower, °C	Eta, %	TotNum
CAB425M12XM3	472,78	85,00	1	50	6	146,19	97,91	12
CAB425M12XM3	544,33	85,00	1	60	6	156,21	97,64	12
CAB400M12XM3	439,76	60,00	1	70	8	150,36	97,50	16

Unter Verwendung des gleichen SiC Halbleitermoduls bei identischer Phasenanzahl und gleicher (bei ZVS maximalen) Schaltfrequenz, konnten die MOSFET Verluste nahezu halbiert werden, was in eine Effizienzsteigerung und geringeren Entwärmungsaufwand resultiert.

2.5 Design der gekoppelten Spule

Für das Design wurde die Reluktanz, d.h. der magnetische Widerstand in Analogie zum elektrischen Widerstand berechnet. Dabei werden die verschiedenen Schenkel diskreten magnetischen Widerständen zugeordnet. Zur Vereinfachung wurde auf existierende Standardgeometrien zurückgegriffen, die leicht zu beziehen sind (s. Abbildung 12).

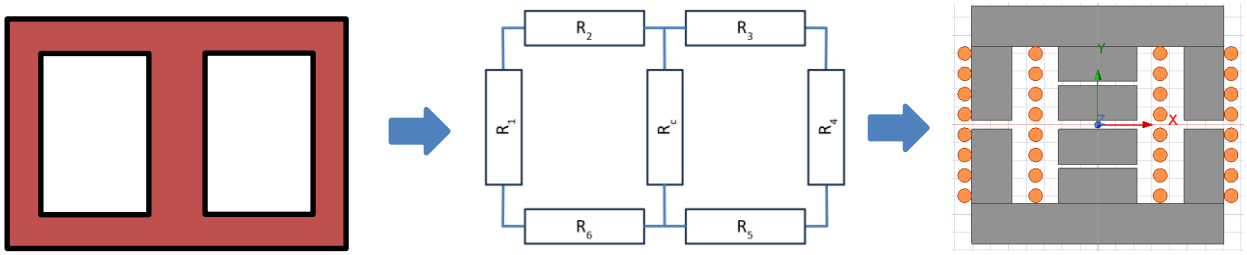


Abbildung 12 – Magnetischen Widerstandsnetzwerk und 2D Finite Elemente Analyse Modell

Für das magnetische Netzwerk wird die Windungsanzahl als Variable herangezogen, um die folgenden Parameter.

- Induktivität
- Streufluss
- Luftspaltgröße
- Magnetischer Fluss
- Kern und Wicklungsverluste

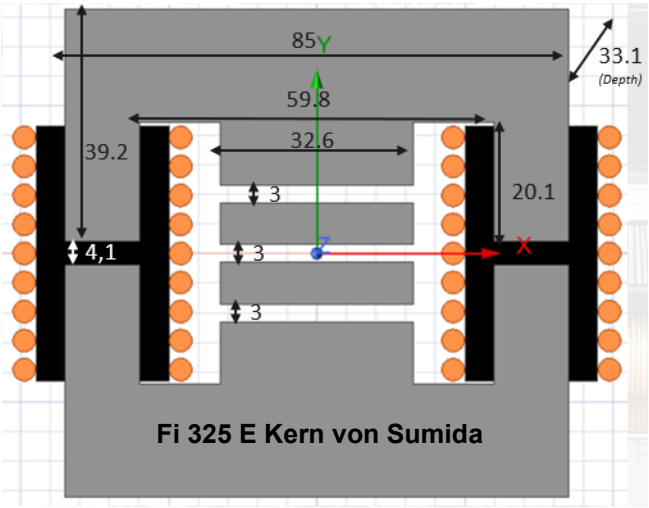
für einen unterschiedliche Anzahl von Windungen und Windung Konfiguration auszurechen. Das analytisch beste Modell wurde in eine 2D Finite Elemente Analyse importiert, um mittels Spaltgröße die Induktivität von 10µH und die Streuung fein abzustimmen. Anschließend wurde der Luftspalt auf mehrere kleinere verteilt, um danach die Windungen bestmöglich anordnen zu können, dass die resultierenden verteilten Streufelder einen minimalen Einfluss haben (→ Proximity Verluste).

Für das mögliche Design wurden zuerst drei verschiedene Materialien betrachtet. Bei der Realisierung ist dann aber nur das Kern- und Litzenmaterial berücksichtigt, was bei Sumida als Projektpartner verfügbar war (s. Tabelle 7).

Tabelle 7: Übersicht Kernmaterialien und Materialkennwerte

Material	Permeabilität μ_i	Stättigungs-flussdichte B_{SAT}	Steinmetz Koeffizienten $(P_{fe} = Cm \cdot f^a \cdot B^b)$ C_m	a	b
Fi325	1800	355mT	4,16	1,39	2,42
FI395	2300	370mT	2,49	1,46	2,91
N87	2200	390mT	0,089	1,695	2,631

In Abbildung 13 und Abbildung 14 ist das finale Design Ergebnis für den Sumida Kern aufgeführt bei Verwendung der HF Litze mit 3300 Strands @ Ø = 0,051mm. Er wurde eine Aufteilung in Kern- und Kupferverluste vorgenommen und eine Angabe zum Volumen gemacht.



HF Litz Wire 3300 strands (~2.65m)

0.051mm strand diameter

3.81mm total diameter

9 turns per winding

Results

10 µH inductance, -0.5 coupling

Loss @35kHz w/ 250A

30W Core + 64W Copper

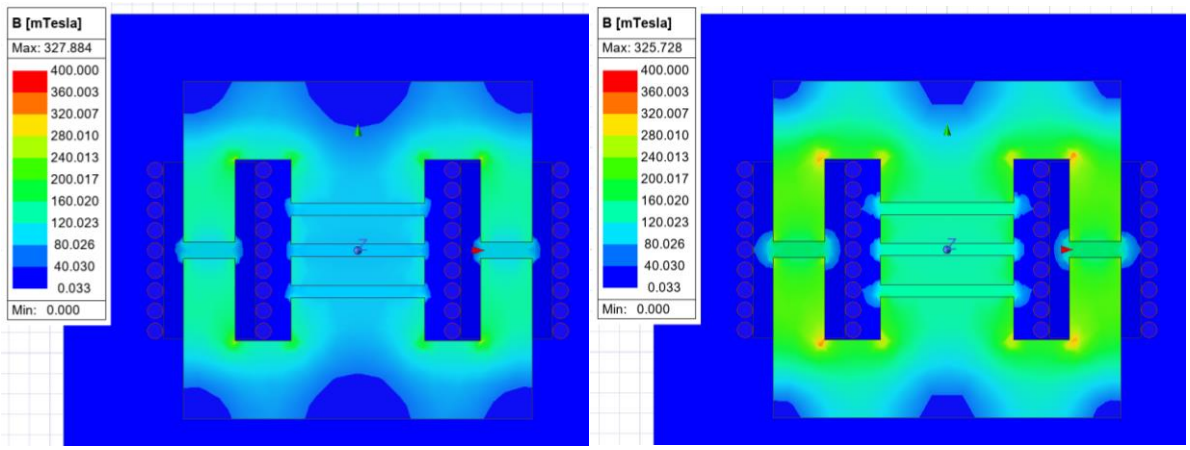
Loss @150kHz w/150A

67W Core + 30W Copper

Volume: 178.02 cm³ Core

320 cm³ w/ Windings

Abbildung 13 – HELLA Design Entwurf und zugehörige Simulationsergebnisse.



links 250A @35kHz und rechts 150A @150kHz.

Abbildung 14 – Flussdichte Verteilung für zwei Arbeitspunkte

3 AP3 – Leistungselektronische Komponenten und Schaltungsvarianten

Im Arbeitspaket 3 hat HELLA den Vergleich von Halbleiter Leistungsmodulen unterschiedlicher Hersteller gemäß den Anforderungen für die verschiedensten Topologie Varianten unterstützt. Neben der Analyse der technischen Daten und die Berücksichtigung von Automotiv Anforderungen von Chips in Leistungsmodulen galt der Fokus auch den Aufbau- und verbindungstechni-

schen Besonderheiten, die einen späteren Einsatz in den Steuergeräten ermöglicht. Mit den Erfahrungen und Verbindungen zu leistungsfähigen Lieferanten konnte HELLA im Projekt die Bereitstellung von Bauteilen, die für Hardware Aufbauten erforderlich sind, maßgeblich vereinfachen und beschleunigen.

Zudem wurden Topologie Untersuchungen durchgeführt, um den Anforderungen aus der Spezifikation zu genügen. Hier war der Wirkungsgrad ein wichtiges Designkriterium. Durch die Anzahl der Freiheitsgerade (Diskret vs. Modul, Frequenz, Anzahl Phasen etc. ergab sich eine Vielzahl von möglichen Lösungen, die final gegenübergestellt wurden. Mit der Aufstellung von Bewertungskriterien im Konsortium gelang es, den vielversprechendsten Ansatz für die Realisierung zu bestimmen.

4 AP4 – Batterie- und Brennstoffzellenkonzepte:

Im Arbeitspaket 4 hatte HELLA nach Planung keinen Beitrag. Im Projekt hat HELLA bei der Auswahl einer geeigneten LFP Zelle für das optimierte Batteriemodul unterstützt.

Im Umfeld Elektrische Impedanz Spektroskopie gab es einen Austausch zwischen den Firmen HELLA und e-Stream. HELLA als BMS Lieferant untersucht EIS für den Einsatz im Fahrzeug, um mittels dieser Technologie das Batterie Monitoring zu verbessern und andere Use Cases für OEM zu entwickeln. Ziel ist, dieses Feature in zukünftige BMS Geräte einzubinden, falls der zusätzliche HW Aufwand einen entsprechenden Mehrwert hat.

Bei e-Stream, die das BMS für das Batteriepack nicht selbst entwickeln, ist der Fokus eine Qualitätsüberwachung bzw. Eingangskontrolle zu implementieren, um die Rundzellen, die in die Speicher Anwendungen eingebaut werden, initial auf Auffälligkeiten zu überprüfen. gemacht ist.

5 AP5 – Aufbau von Funktionsmustern

5.1 Aufbau der gekoppelten Spule

Um den Entwurf in einen Aufbau zu überführen, wurde zuerst der Kern zusammengefügt. Unter Verwendung von Al_2O_3 Plättchen in den Luftspalten des Mittelschenkeln ist zum einen eine formgebende Fixierung möglich und zum andere wird die Wärmeabfuhr im Mittelschenkeln verbessert. Abbildung 15 zeigt die Präparation und das Kleben der Einzelteile.

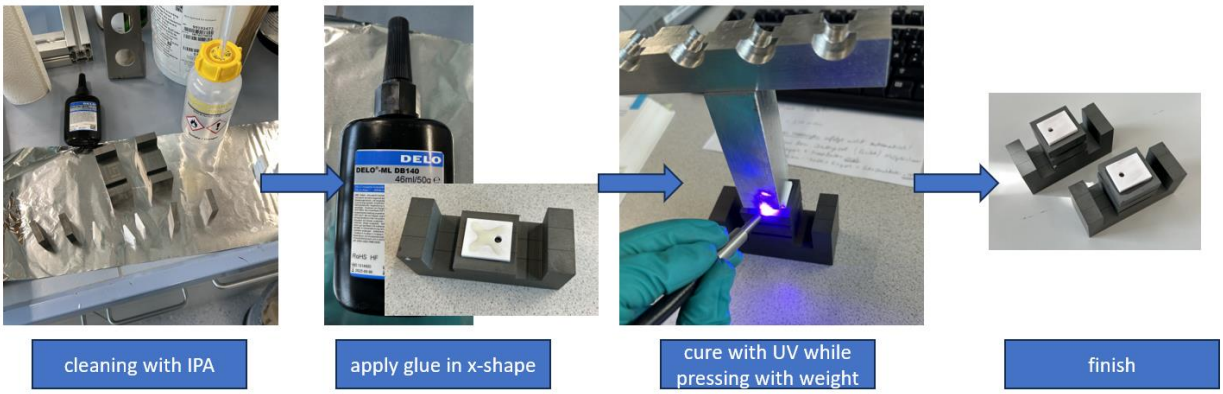


Abbildung 15 – Zusammenbau und die Präparation der Spulenkerne

Für die Aufnahme der Wicklungen wurden passsende Bobbins 3D gedruckt, sodass die beiden Wicklung incl. Bobbin auf Kern Platz haben und zusammen in das gefräste Alu Gehäuse eingebaut werden konnten (s. Abbildung 16). Eine geeignete Vergussmasse und ein zusätzliches TIM auf dem Gehäuseboden stellen einen guten thermischen Übergang zur Kühlung sicher und fixieren die Bauteile.

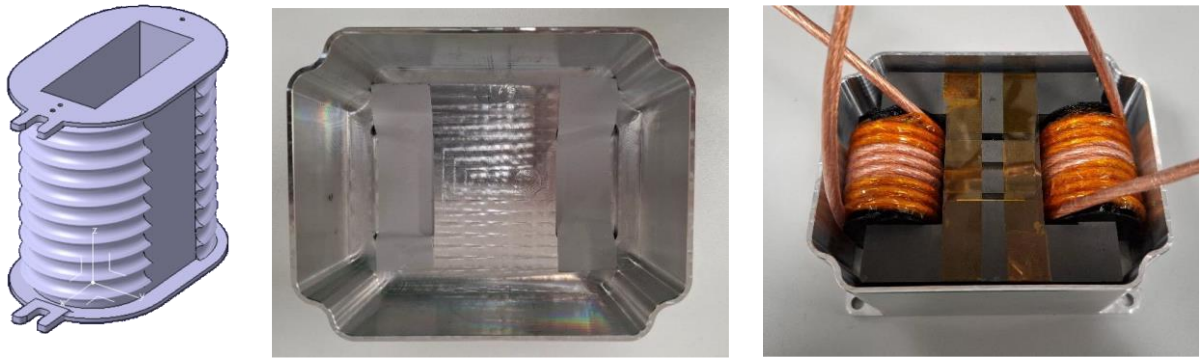


Abbildung 16 – 3D Druck Bobbin und Alugehäuse und der fertige Zusammenbau der gekoppelten Spule

Der fertige Zusammenbau wurde zudem mit Temperaturfühler versehen, um bei der Inbetriebnahme und später bei den relevanten Arbeitspunkten einem möglichen Überfahren des Bauteils vorzubeugen.

5.2 Vermessung der gekoppelten Spule

Die Vermessung der Spule zeigte gegenüber den Design Parametern eine nicht unerhebliche Abweichung bei der Induktivität *L* wie auch bei der Kopplung *k* (s. Abbildung 17). Dabei wurde in der ersten Messung Spule 1 mit offener Spule 2 und in der zweiten Messung Spule:2 kurzgeschlossen vermessen.

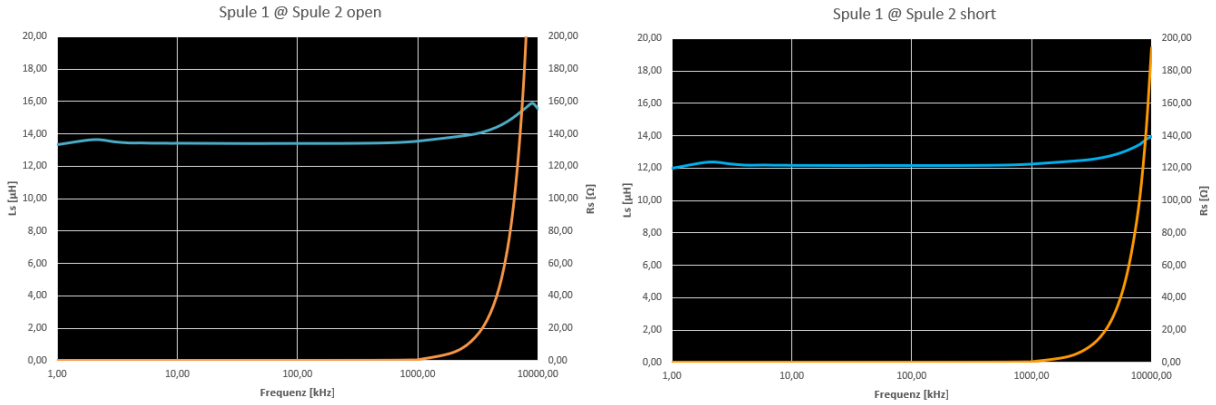


Abbildung 17 – Erste Vermessungen der Spulen 1 und 2. Es ist eine Abweichung der Induktivität und der Kopplung zu beobachten.

Entsprechendes wurde für Spule 2 durchgeführt. Dabei kann die Kopplung wie folgt berechnet werden:

$$K = \sqrt{1 - \frac{L_{1Short}}{L_{1Open}}} \qquad (4)$$

Die Abweichung zur Auslegung wurde als Grund genommen, die HELLA Messwerte nochmal von anderer Seite zu überprüfen. Am Ende wurde die Werte von Sumida bestätigt hat. Alle Werte sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Tabelle 8: Impedanzmessung der gekoppelten Spule @ 100kHz

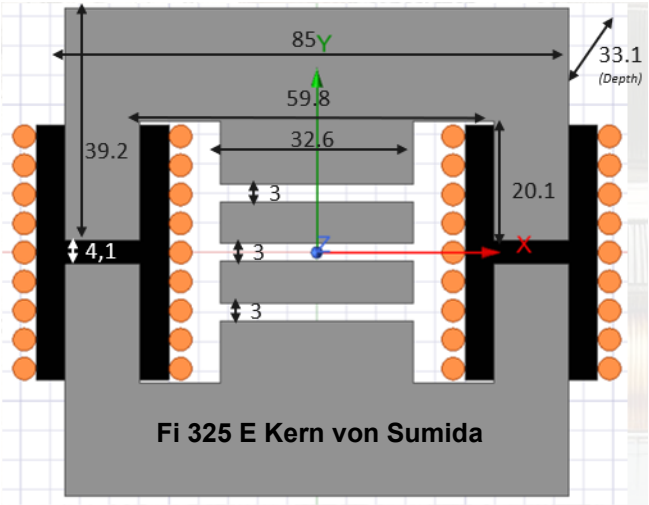
Impendanz Analysator				
	L / [µH]		*R* / [mΩ]	*k*
$L1_{Open}$	13,42	$R1_{Open}$	8,52	0,308
$L1_{Short}$	12,12	$R1_{Short}$	9,56	
$L2_{Open}$	12,9	$R2_{Open}$	14,26	0,305
$L2_{Short}$	11,7	$R2_{Short}$	14,76	

Eingebaut im Alu Gehäuse kommt es noch zu leichten Änderungen der Induktivitäts- und Kopplungswerte. Mit dem LCR Meter ergaben sich am Ende für *L*1=12,31µH und *L*2=11,99µH bzw. *K*= 0,41.

Sumida ist uns entgegenkommen und hat im Nachgang den Aufbau nochmal per 3D FEA unter Verwendung der neuen Werte analysiert. So konnten die Kernverluste ermittelt werden. Die Wicklungs- oder Kupferverluste lassen sich dagegen einteilen in

1. RMS-, Skin- und den inneren Proximity Verluste
2. und Verluste durch den externen Proximity Effekt

und wurden analytisch berechnet, wobei der notwendige Stromverlauf für 1.wie auch das magnetische Feld im Wickelfenster für 2. aus der Simulation genommen wurde. Der DC Widerstand wurde vorher gemessen (Ergebnisse siehe Abbildung 18).



HF Litz Wire 3300 strands (~2.65m)

0.051mm strand diameter

3.81mm total diameter

9 turns per winding

Results

12 µH inductance, -0.4 coupling

Loss @35kHz w/ 250A

23W Core + 70W Copper

4,5 mΩ DC Widerstand

Loss @150kHz w/150A

67W Core + 30W Copper

Volume: 178.02 cm³ Core

320 cm³ w/ Windings

Abbildung 18 – Finale Auswertung der gekoppelten Spule

Im Rahmen der Magnetische Aussteuerung ist dann festgestellt worden, dass unser Design nicht den gesamten Strom von 125A pro Spule tragen kann, weil es vorher schon Sättigung kommt. Die Induktivitätsmessung der aufgebauten Spulen liefert ca. 100A (s. Abbildung 19).

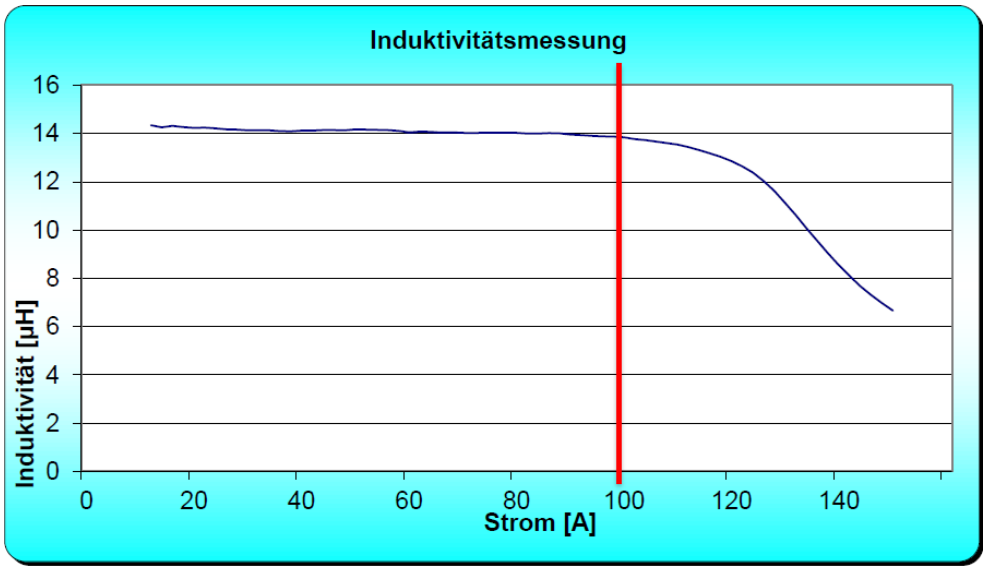


Abbildung 19 – Magnetische Aussteuerung der gekoppelten Induktivität, d.h. eine Wicklung

Der Vollständigkeit halber wurden mit den neuen Werten für Induktivität und Kopplung die Verlustabschätzung für das Cree SiC Modul CAB425M12XM3 aktualisiert (siehe Tabelle 9), wobei die Randbedingungen gleichgeblieben sind (vgl. oben unter Kapitel 2.4)

Tabelle 9: Korrigierte Verlustübersicht der SiC Transistoren nach der Vermessung des Spulenprototyps

Modul	V_{FC} / V	V_{BAT} / V	P / kW	L / µH	K	P_{total_LS} / W	P_{total_HS} / W	f_{SW} / kHz	T_{JC_Low} / °C
CAB425M12XM3 @ 8 Phasen	160	850	160	12,2	-0.41	203	17,5	40,84	128,42
	160	540		12,2	-0.41	124,5	26,3	32,96	117,43
	300	850		12,2	-0.41	173,9	9,5	92,69	124,3
	300	800		12,2	-0.41	70,2	13,1	57,2	109,8

5.3 Effizienzmessung mit der gekoppelten Induktivität im FC DC/DC Wandler

Im Projekt wurde von der Uni Kassel der zugehörige FC DC/DC Wandler entwickelt incl. der Steuerung für das ursprüngliche magnetische Design.

Der Vergleich mit nur einem vorliegenden gekoppelten Muster war somit auf ¼ der Systemleistung beschränkt zusätzlich der gezeigten Einschränkung, dass pro Wicklung nur 100A statt 125A Stromtragfähigkeit zur Verfügung stehen. Auf Prüfstandsseite konnte aufgrund eines Geräteausfall zuletzt nur eine Leistungsübertragung von 24kW realisiert werden. Der Mess- und Prüfaufbau ist in Abbildung 20 dargestellt.

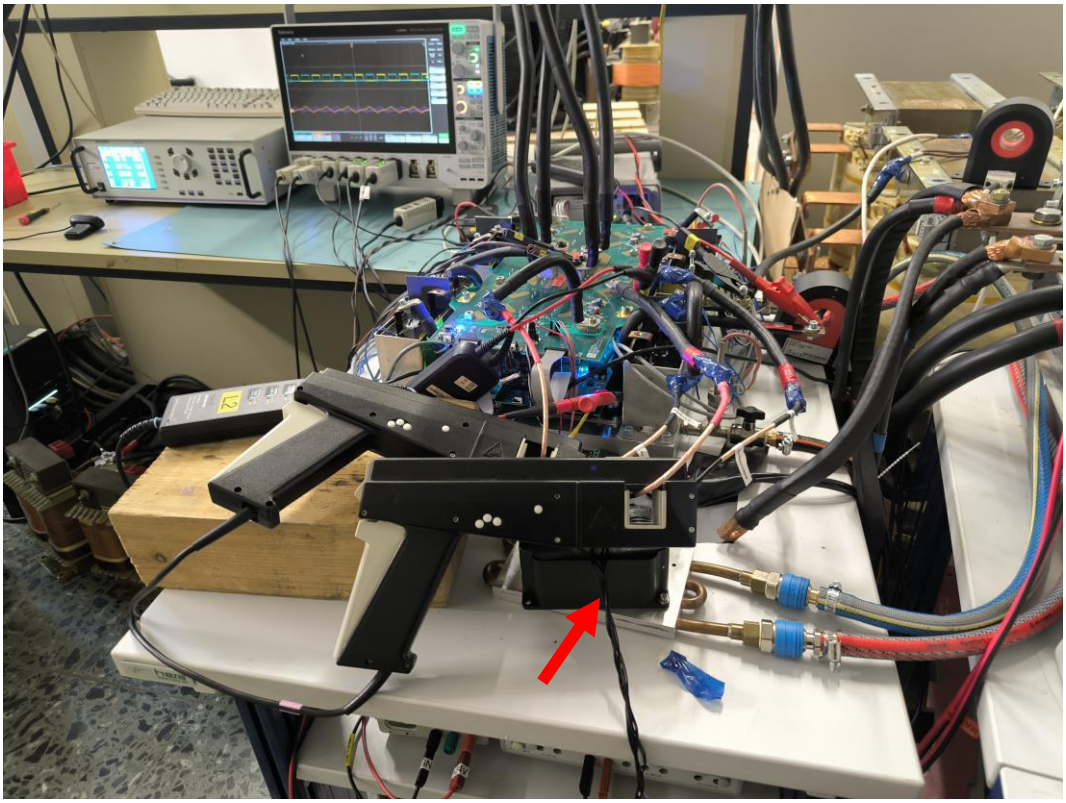


Abbildung 20 – Messaufbau zur Vermessung der gekoppelten Induktivität mit dem FC DC/DC Wandler

Der Betrieb wurde gesteuert vorgenommen, weil das HELLA Design mittels TCM ursprünglich nicht geplant war. Anders ist im TCM die Schaltfrequenz in Abhängigkeit der Spannung und der zu übertragende Leistung variable und gehorcht der folgenden Beziehung:

$$f_{SW} = \frac{U_{FC} \cdot (U_{BAT} - U_{FC})}{U_{BAT} \cdot L \cdot 2 \cdot (I_L - I_{L_{min}})} \qquad (6)$$

Aus den Randbedingungen konnte die Vermessung nur an einigen wenigen Arbeitspunkten vorgenommen werden, die mit wenig Aufwand nach Ende der Projektlaufzeit durchgeführt wurden. Für den Vergleich wurde ein ähnlicher Arbeitspunkt angefahren, der von früheren Vermessungen des Sumida Designs vorlag.

Abbildung 21 – Effizienzvergleich links HELLA Design vs. Rechts Sumida Design @ 20 kW

Aus den beiden Bildschirmaufnahmen des Zimmer Leistungsmessers in Abbildung 21 kann eine um 0,8% Punkte bessere Effizienz @ 20kW der gekoppelte Induktivitäten gegenüber dem Sumida Ansatz mit 2 Speicherinduktivitäten und 1 Koppelinduktivität entnommen werden.

Die Vorteile beim Volumen (siehe zum Vergleich Abbildung 22 und Abbildung 23) zwischen den beiden Prototypen relativieren sich, wenn man das HELLA Design in Richtung der geforderten Stromtragfähigkeit einem Re-Design unterwirft.

- V_{Sumida} = 176,5mm · 60mm · 69,5m = 0,736 l
- V_{HELLA} = 118mm · 92mm · 52mm = 0,56 l

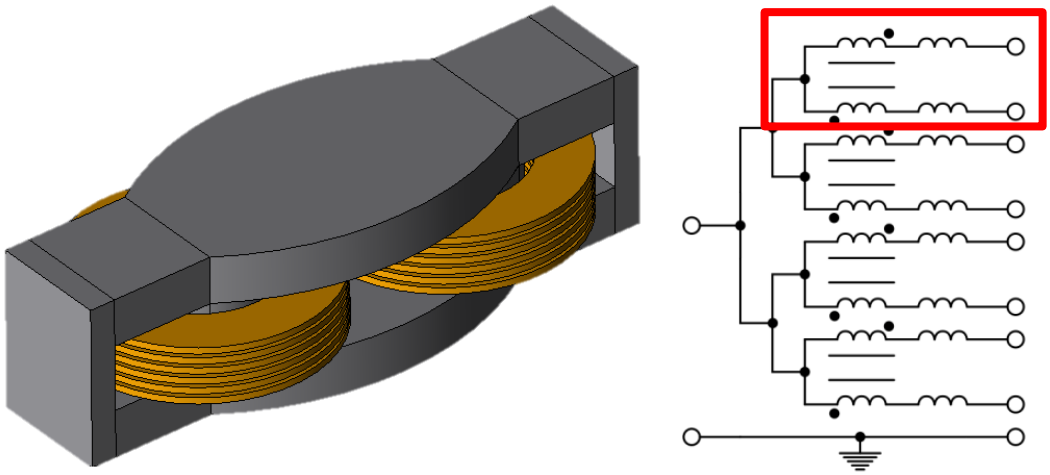


Abbildung 22 – Vergossenes Modul mit 2 Speicherinduktivitäten und 1 Koppelinduktivität

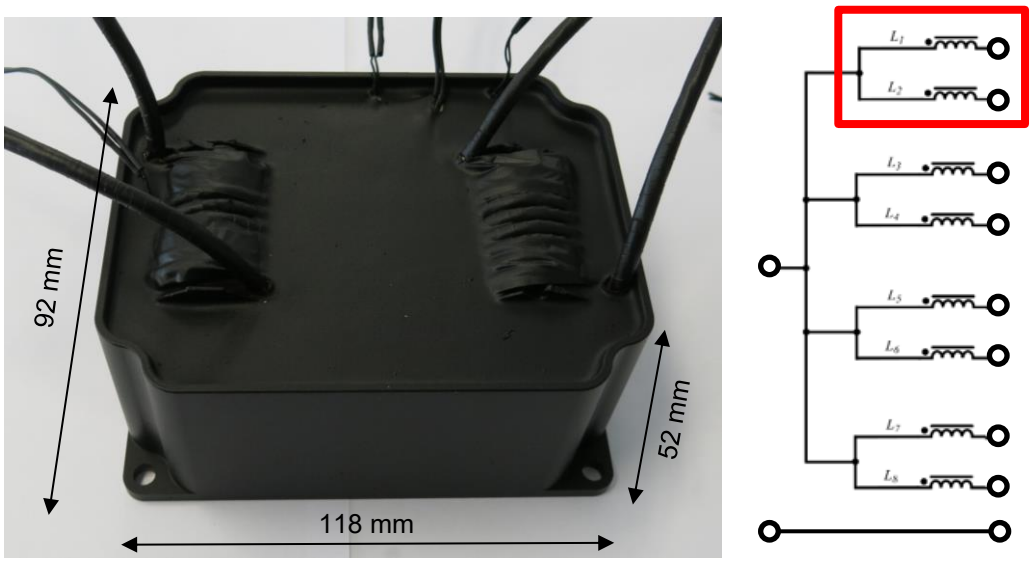


Abbildung 23 – Vergossene gekoppelte Induktivitäten

6 AP 6 – Lebensdauer & Zuverlässigkeit

In diesem Arbeitspaket hat HELLA einen Überblick zum Stand der Technik gegeben, wie man Lebensdauermodelle von Batteriezellen ermittelt. Als BMS-Hersteller, gilt es neben dem Monitoring im Betrieb vorrangig das Verhalten der Zellen über die Lebensdauer abschätzen zu können. Zudem werden in dem Umfeld gezielte Prüfungen wie Power-Cycling-Tests herangezogen, um eine Vorauswahl von Zellen für die verschiedenen Applikationen vorzunehmen. Aus EIS ist mittlerweile als Analysetool für den Vergleich von Zellen etabliert.

7 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse und Erfahrungen

Die im Rahmen des H2easy Projekts erzielten Ergebnisse und Erkenntnisse verstetigen das Knowhow für zukünftige Arbeiten und Entwicklungen von HV-Bordnetzwandlern. In der Projektlaufzeit wurde ein gemeinsames Systemverständnis für FC Antriebe aufgebaut, die es ermöglicht, Marktabschätzung zu treffen

- Im Projektzeitraum sind Labore für die HV Entwicklung und den sicheren Betrieb umfangreich aus eigenen Mitteln erweitert worden.
- Der Einsatz der Wide Bandgap WBG Halbleitermaterialien, der bisher im Unternehmen mit diskreten Bauteilen erfolgte, konnte um Erfahrungen mit SiC Modulen erweitert werden.
- Es hat sich gezeigt, dass auch im Leistungsbereich von größer 150kW Strategien, die Verluste in der Leistungselektronik minimieren, in der Regel in einem Kostenvorteil resultieren, was gleichzeitig auch einen positiven Einfluss auf dem Formfaktor hat.
- Die im Projekt detaillierte Wandler Strategie könnte ein Startpunkt im möglichen Umfeld DC/DC Boost Wandler werden. Solche Wandler stellen fürs DC-Schnellladen die Schnittstelle zwischen zahlreich vorhandenen 400V DC Schnellladern und den neuen 800V Bordenetzen dar.
- Die Analyse des Marktumfeldes während der Projektlaufzeit ergab, dass sich batterieelektrische Antriebe durchgesetzt haben. Selbst der Schwerlastverkehr setzt auf solche Lösungen.
- Die Erzeugung von Wasserstoff als Treibstoff macht aus Sicht der Umwandlungseffizient nur Sinn, wenn er aus überschüssigen regenerativen Energien erzeugt wird.

8 Fortschritt anderer Stellen

Während des Projektverlaufs sind keine relevanten Ergebnisse von dritter Seite bekannt geworden.

9 Literatur

[1] A. Falk, M. Kazanbas, B. Sahan, S. Vasconcelos Araújo und P. Zacharias, *Patentschrift DE102009052461A1. Wechselrichterschaltungsanordnung,* 2011.

[2] P. Zacharias, *Magnetische Bauelemente - Grundlagen und Anwendungen. ISBN-13: 978-3658247416,* Springer Verlag, 2020

[3] M. Schmidhuber, R. Ludwig, M. Baumann, M. Rossa und M. Schmeller, *Magnetically Biased High Power Coil Module,* Nürnberg, 2015.

[4] *Bundesforschungsprojekt HELENE: "Hocheffiziente, langlebige und kompakte Leistungselektronik auf Galliumnitridbasis für die Elektromobilität der Zukunft" (FKZ 16EMO0234).*

[5] J. Liu, *Dissertation: Investigation of Multiphase Power Converter using Integrated Coupled Inductor Regarding Electric Vehicle Applicaticon,* Universität Kassel , 2013.

[6] T. Kleeb, *Thiemo Kleeb: Investigation on Performance Advantage of Functionally Integrated Magnetic Components in Decentralised Power Electronic Applications,* Universität Kassel, 2016.

[7] J. Friebe, *Dissertation: Permanentmagnetische Vormagnetisierung von Speicherdrosseln in Stromrichtern,* Universität Kassel, 2014.

[8] J. Jablonski und S. Rank, *AUDI h-tron - sustainability in future drive concepts,* 2018.

[9] F. &. Sullivan, *Global Executive Analysis of the Fuel Cell Passenger Car Market, Forecast to 2030,* 2018

[10] P. Zacharias, A. Aganza-Torres, *Comparison and optimization of magnetically coupled and non-coupled magnetic devices in interleaved operation, EPE2020*.

[11] B. Cougo, V. Costan, T. Meynard, F. Forest and E. Laboure, "A new intercell transformer for interleaved converters," 2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications, Barcelona, Spain, 2009.

[12] B. Cougo, T. Friedli, D. O. Boillat and J. W. Kolar, "Comparative Evaluation of Individual and Coupled Inductor Arrangements for Input Filters of PV Inverter Systems," 2012 7th International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS), Nuremberg, Germany, 2012.

[13] M. Hagemeyer, F. Schafmeister and J. Böcker, "Coupled Inductor Design for Interleaved High-Current DC-DC Converters," 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Jeju, Korea (South), 2018.

[14] B. Strothmann, F. Schafmeister and J. Böcker, "Pareto Design and Switching Frequencies for SiC MOSFETs Applied in an 11 kW Buck Converter for EV-Charging," 2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Anaheim, CA, USA, 2019.

[15] F. Forest et al., "Optimization of the Supply Voltage System in Interleaved Converters Using Intercell Transformers," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, no. 3, pp. 934-942, May 2007

[16] L. Keuck, A. Munir, F. Schafmeister and J. Boecker, "Adaptive Frequency Control of DC-DC-Converters for Maximum Efficiency Using Artificial Neural Network," PCIM Europe 2018; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, Germany, 2018, pp. 1-8.

[17] J. Mühlethaler, J. Biela, J. W. Kolar, and A. Ecklebe. „Core losses under the dc bias condition based on steinmetz parameters," IEEE Transactions on Power Electronics, 27(2):953–963, Feb 2012.Perret F.: Development of GaN diodes for high voltage applications, EPE Journal Vol. 19 no 6 pp 63-72.

[18] C. R. Sullivan and R. Y. Zhang, "Simplified design method for litz wire," 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2014, Fort Worth, TX, USA, 2014, pp. 2667-2674, doi: 10.1109/APEC.2014.6803681.

[19] M. Albach, "Induktivitäten in der Leistungselektronik," 2017, Springer Vieweg Wiesbaden.

[20] L. Keuck, M. Dierkes and M. Weber, "Optimal Design of a Coupled Inductor for ZVS DCDC," 2023 25th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'23 ECCE Europe), Aalborg, Denmark, 2023, pp. 1-6, doi: 10.23919/EPE23ECCEEurope58414.2023.10264414.